

A EQUAÇÃO DIVINA

A Busca Inacabada por Uma Teoria de Tudo e o Futuro da Física



Autor: Michio Kaku

Edição e Preparação Digital: Gullan Greyl

Edição original: The God Equation: The Quest for a Theory of Everything, 2021.

Edição portuguesa concluída em 16-02-2024



Livroteca Gullan Greyl

Sinopse

Em A Equação Divina, Michio Kaku conduz o leitor por uma das mais grandiosas aventuras intelectuais da humanidade: a busca por uma teoria capaz de unificar todas as forças da Natureza numa única arquitetura do real. De Newton a Maxwell, de Einstein à revolução quântica, das partículas subatômicas aos buracos negros, o autor reconstrói a longa marcha da física rumo a uma pergunta vertiginosa: existirá uma equação capaz de explicar, numa só linguagem, a matéria, a energia, o espaço, o tempo e a própria origem do Universo?

Ao longo desta viagem, o leitor entra no coração das grandes revoluções científicas que mudaram a civilização: a gravidade, o eletromagnetismo, a mecânica quântica, o Modelo Padrão, a teoria de cordas e a hipótese de dimensões ocultas. Mas este não é apenas um livro sobre fórmulas. É um mapa do espanto humano perante o cosmos — um percurso em que cada descoberta abre novas portas para mistérios ainda maiores: o que aconteceu antes do Big Bang? O que existe dentro de um buraco negro? Haverá universos paralelos? Poderá a realidade, no seu nível mais fundo, ser música matemática?

A Equação Divina é, assim, mais do que uma história da física moderna: é a narrativa de uma procura inacabada pelo código profundo do Universo. Com a clareza entusiástica que o caracteriza, Kaku mostra-nos que a ciência não é apenas conhecimento acumulado, mas uma ascensão contínua em direção ao invisível — uma tentativa de ouvir, por trás do caos aparente, a harmonia secreta que sustenta todas as coisas.

Esta edição foi preparada para formato digital, com intervenção ao nível da organização, revisão e uniformização do texto, de forma a assegurar clareza, consistência e legibilidade em ambiente de leitura eletrónica.

Foram realizadas correções pontuais sempre que necessário, respeitando integralmente o conteúdo e a estrutura da obra original.

O objetivo desta preparação é preservar a fidelidade ao texto, garantindo simultaneamente uma experiência de leitura fluida e acessível.

Gullan Greyl

*Não se trata de saber mais,
mas de ver melhor*

Índice

Introdução à Teoria Final	1
1. O Sonho de Einstein	1
2. Um Exército de Críticos	3
CAPÍTULO 1	6
Unificação – Um Sonho Antigo	6
1. O Renascimento Durante a Renascença	9
2. A Teoria das Forças de Newton.....	10
3. O Que É a Simetria?.....	14
4. Confirmação das Leis de Newton	16
5. O Mistério da Eletricidade e do Magnetismo	19
6. As Equações de Maxwell	22
7. O Fim da Ciência?	31
CAPÍTULO 2	32
A Busca de Einstein pela Unificação	32
1. Simetria e Beleza	36
2. A Gravidade como Espaço Curvo	39
3. Eclipse Solar e Gravidade	45
4. Newton e Einstein: Opostos Totais	49
5. A Busca por uma Teoria Unificada	50
CAPÍTULO 3	53
A Ascensão do Quantim	53
1. A Revolução Quântica	57
2. Ondas de Elétrões.....	60
3. Explicar a Tabela Periódica	62
4. A Teoria do Elétron de Dirac.....	64
5. O Que está a Ondular?	66
6. Embate de Titãs.....	68
7. O Gato de Schrödinger	70
8. A Energia do Sol.....	72
9. Mecânica Quântica e Guerra.....	75
CAPÍTULO 4	79

A Teoria de Quase Tudo	79
1. QED	82
2. Aplicações da Revolução Quântica	85
3. O Que É a Vida?	86
4. A Força Nuclear	89
5. Opostos Totais II	93
6. Força Fraca e Partículas Fantasma	94
7. A Teoria de Yang-Mills	96
8. O Bosão de Higgs — A Partícula de Deus	98
9. A Teoria de Quase Tudo	102
10. LHC (Large Hadron Collider) – Grande Colisionador de Hadrões –	104
CAPÍTULO 5	109
O Universo Escuro	109
1. O Que É um Buraco Negro?	111
2. Através do <i>Wormhole</i>	120
3. Viajar no Tempo	126
4. Como foi Criado o Universo?	130
5. Por Que é o Céu Negro à Noite?	132
6. A Relatividade Geral e o Universo	134
7. O Resplendor Crepuscular Quântico do Big Bang	136
8. Inflação	138
9. Universo em Fuga	140
10. Procura-se: o Gravitão	143
CAPÍTULO 6	146
A Ascensão da Teoria de Cordas: Promessas e Problemas	146
1. A Teoria de Cordas	147
2. Dez Dimensões	149
3. O Gravitão	151
4. Supersimetria	152
5. Dois Tipos de Partículas Subatômicas	153
6. A Teoria-M	159
7. Universo Holográfico	161
8. Testar a Teoria	165
9. Críticas à Teoria de Cordas	167
10. Pode ser Testada?	169

11. A Busca pela Matéria Escura	171
12. Para além do LHC	172
13. O Big Bang como Esmagador de Átomos	174
14. LISA	175
15. Testar a Lei do Quadrado Inverso	177
16. O Problema do Panorama (<i>Landscape</i>).....	178
17. O Meu Ponto de Vista Sobre a Teoria de Cordas	182
18. Revelar uma Pirâmide	182
CAPÍTULO 7	190
Encontrar Sentido no Universo	190
1. Provar a Existência de Deus	193
2. O Meu Ponto de Vista	196
3. O Universo Teve ou Não Um Princípio?	201
4. Sentido Num Universo Finito	202
5. Conclusão	205
Agradecimentos	207
Leituras Seleccionadas.....	208

A EQUAÇÃO DIVINA

*A Busca Inacabada por Uma Teoria de
Tudo e o Futuro da Física*

Michio Kaku

Introdução à Teoria Final

Pretendia-se que fosse a teoria final, uma estrutura única que uniria todas as forças do cosmos e coreografaria tudo, desde o movimento do universo em expansão até à mais ínfima dança de partículas subatômicas. O desafio era escrever uma equação cuja elegância matemática abrangesse toda a física.

Alguns dos físicos mais conceituados do mundo embarcaram nesta demanda. Stephen Hawking até deu uma palestra com o auspicioso título «Estará à vista o fim da física teórica?»

Se uma teoria como esta tivesse êxito, seria o maior triunfo da ciência. Seria o Santo Graal da física, uma fórmula única da qual seria possível, em princípio, retirar todas as equações, a começar pelas que descrevem o *Big Bang* e terminando no fim do universo. Seria o produto final de dois mil anos de investigação científica, desde que os antigos fizeram a pergunta: «De que é feito o mundo?»

É uma visão assombrosa.

1. O Sonho de Einstein

Eu era uma criança de apenas 8 anos quando me deparei pela primeira vez com o desafio colocado por este sonho. Um dia, os jornais anunciaram a morte de um grande cientista. E, no jornal, vinha uma fotografia inesquecível.

Era uma imagem da secretária dele, sobre a qual havia um caderno aberto. A legenda anunciava que o maior cientista do nosso tempo não conseguiria terminar o trabalho que começara. Fiquei fascinado. O que poderia ser tão difícil, que nem mesmo o grande Einstein o conseguira resolver?

Esse caderno continha a sua teoria de tudo inacabada, aquilo a que Einstein chamava a teoria do campo unificado. Ele queria uma equação, talvez com apenas 4 centímetros de comprimento, que lhe permitisse, nas suas próprias palavras, «ler a mente de Deus».

Embora não tivesse a noção da enormidade do problema, decidi seguir as pegadas deste grande homem, na esperança de desempenhar um pequeno papel na conclusão da sua demanda.

Porém, muitos outros tentaram e falharam¹. Como disse uma vez o físico de Princeton, Freeman Dyson, o caminho para a teoria do campo unificado está pejada dos cadáveres de tentativas falhadas.

Hoje, contudo, muitos físicos influentes acreditam que estamos finalmente a convergir para uma solução.

A principal (e, na minha opinião, única) candidata chama-se teoria de cordas e propõe que o universo não é feito de partículas corpusculares, mas de minúsculas cordas vibratórias, em que cada nota corresponde a uma partícula subatômica.

Se tivéssemos um microscópio suficientemente poderoso, conseguiríamos ver que elétrons, quarks, neutrinos, etc., não são mais do que vibrações em elos minúsculos, semelhantes a elásticos. Se puxarmos o elástico vezes suficientes, de maneiras diferentes, acabaremos por criar todas as partículas subatômicas conhecidas no universo. Isto significa que todas as leis da física podem ser reduzidas às harmonias destas cordas. A química consiste nas melodias que se podem tocar nelas. O universo é uma sinfonia. E a mente de Deus, sobre a qual Einstein escreveu de modo tão eloquente, é música cósmica a ecoar através do espaço-tempo.

Esta não é apenas uma questão académica. Sempre que os cientistas deslindaram uma nova força, isso mudou o rumo da civilização e alterou o destino da humanidade. Por exemplo, a descoberta das leis do movimento e da gravidade por Newton assentou os alicerces para a Era da máquina e para a Revolução Industrial. A explicação da eletricidade e do magnetismo por Michael Faraday e James Clerk Maxwell abriu caminho à iluminação das nossas cidades e deu-nos poderosos motores elétricos e geradores, bem como comunicação instantânea através de televisão e rádio. A $E = mc^2$ de Einstein explicou o poder das estrelas e ajudou a decifrar a força nuclear. Quando Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg e outros revelaram os segredos da teoria quântica, deram-nos a revolução tecnológica dos nossos dias, com supercomputadores, lasers, a Internet e todas as engenhocas fascinantes que temos nas nossas salas.

Em última análise, todas as maravilhas da tecnologia moderna devem a sua origem aos cientistas que descobriram gradualmente as forças fundamentais do mundo. E, agora, os cientistas podem estar a convergir para a teoria que unifica estas quatro forças da natureza — gravidade, força eletromagnética e as forças nucleares fraca e forte — numa única teoria. Fundamentalmente, isso pode responder a alguns dos mistérios e questões mais profundos de toda a ciência, como:

- ❖ O que aconteceu antes do *Big Bang*? E por que é que ele ocorreu?
- ❖ O que fica do outro lado de um buraco negro?
- ❖ As viagens no tempo serão possíveis?
- ❖ Haverá *wormholes* para outros universos?
- ❖ Existirão dimensões superiores?
- ❖ Haverá um multiverso de universos paralelos?

Este livro é sobre a demanda para encontrar esta teoria final e sobre todas as reviravoltas bizarras daquele que é, sem qualquer dúvida, um dos capítulos mais estranhos na história da física. Vamos recapitular todas as revoluções anteriores que nos deram as maravilhas tecnológicas que possuímos hoje, começando pela revolução newtoniana, até ao domínio da força eletromagnética, ao desenvolvimento da relatividade e da teoria quântica, e à teoria de cordas dos nossos dias. E explicaremos como esta teoria pode também revelar os mais profundos mistérios do espaço e do tempo.

2. Um Exército de Críticos

Contudo, existem ainda obstáculos. Apesar de todo o entusiasmo gerado pela teoria de cordas, os críticos têm feito questão de apontar os seus defeitos. E depois de toda a excitação e frenesi iniciais, o progresso concreto estagnou.

O problema mais óbvio é que, apesar de todas as lisonjas na comunicação social, enaltecendo a beleza e complexidade da teoria, não dispomos de evidências sólidas e comprováveis. Em tempos houve a esperança de que o Grande Colisionador de Hadrões

(LHC, do inglês Large Hadron Collider) nos arredores de Genebra, Suíça, o maior acelerador de partículas da história, encontrasse provas concretas da teoria final, mas estas provas revelaram-se elusivas. O LHC conseguiu encontrar o bóson de Higgs (conhecido na gíria por partícula de Deus), mas esta partícula era apenas uma minúscula peça em falta na teoria final.

Embora tenham sido apresentadas propostas ambiciosas para um sucessor ainda mais poderoso do LHC, não há garantias de que estas máquinas dispendiosas encontrem seja o que for. Ninguém sabe ao certo a que nível de energia encontraremos novas partículas subatômicas que possam confirmar a teoria.

Porém, talvez a mais importante crítica à teoria de cordas seja que esta prevê um multiverso de universos. Einstein disse uma vez que a pergunta-chave era: Deus teve escolha na criação do universo? O universo será único? A teoria de cordas em si mesma é única, mas provavelmente tem um número infinito de soluções. Os físicos chamam a isto o problema do panorama (*landscape*) — o facto de o nosso universo poder ser apenas uma solução num oceano de outras, igualmente válidas. Se o nosso universo é uma de muitas possibilidades, então qual é a nossa? Por que vivemos neste universo em particular e não noutro? Qual é, então, o poder profético da teoria de cordas? É uma teoria de tudo ou uma teoria de qualquer coisa?

Admito que tenho um interesse pessoal nesta busca. Trabalho na teoria de cordas desde 1968, desde que esta emergiu acidentalmente, sem aviso prévio e de modo completamente inesperado. Assisti à evolução extraordinária da teoria, que se desenvolveu a partir de uma única fórmula até se transformar numa disciplina com toda uma biblioteca de trabalhos de investigação. Hoje, a teoria de cordas forma a base de grande parte da pesquisa que é feita nos principais laboratórios a nível mundial. Espero que este livro ofereça uma análise equilibrada e objetiva dos progressos e limitações da teoria de cordas.

Explicará também por que motivo esta busca se apoderou da imaginação dos maiores cientistas do mundo e por que tem esta teoria gerado tanta paixão e controvérsia.

¹ No passado, muitos dos gigantes da física tentaram, e falharam, criar a sua própria teoria de campo unificado. Em retrospectiva, vemos que uma teoria de campo unificado tem de cumprir três critérios:

1. Tem de incluir toda a teoria da relatividade geral de Einstein.
2. Tem de incluir o Modelo Padrão de partículas subatômicas.
3. Tem de produzir resultados finitos.

Erwin Schrödinger, um dos fundadores da teoria quântica, tinha uma proposta para a teoria de campo unificado que fora na verdade estudada anteriormente por Einstein. Falhou porque não reduzia corretamente à teoria de Einstein e não conseguia explicar as equações de Maxwell. (Faltava-lhe também qualquer descrição de elétrons ou átomos.)

Wolfgang Pauli e Werner Heisenberg propuseram também uma teoria de campo unificado que incluía campos de matéria de férmions, mas não era renormalizável e não incorporava o modelo dos quarks, que só viria a surgir décadas mais tarde.

O próprio Einstein investigou uma série de teorias que acabaram por falhar. Basicamente, tentou generalizar o tensor métrico da gravidade e os símbolos Christoffel de modo a incluir tensores antissimétricos, numa tentativa de incluir a teoria de Maxwell na sua própria teoria. Isto acabou por falhar. Expandir simplesmente o número de campos na teoria original de Einstein não era suficiente para explicar as equações de Maxwell. Esta abordagem não fazia também qualquer menção da matéria.

Ao longo dos anos, houve várias tentativas para simplesmente adicionar campos de matéria às equações de Einstein, mas demonstrou-se que divergem ao nível quântico de um-loop. Na verdade, foram usados computadores para calcular a dispersão de grávitões ao nível quântico de um-loop e concluiu-se que é infinita de forma conclusiva. Até agora, a única forma conhecida de eliminar estes infinitos ao nível de um-loop mais baixo é incorporar a supersimetria.

Uma ideia mais radical foi proposta já em 1919 por Theodor Kaluza, que expressou as equações de Einstein em cinco dimensões. Admiravelmente, quando enrolamos uma dimensão até ficar um pequeno círculo, encontramos como resultado o campo de Maxwell aliado ao campo gravitacional de Einstein. Esta abordagem foi estudada por Einstein, mas acabou por ser abandonada, porque ninguém compreendia como compactificar uma dimensão. Mais recentemente, esta abordagem foi incorporada na teoria de cordas, que compactifica dez dimensões em quatro e, nesse processo, gera o campo Yang-Mills. Assim, das muitas abordagens feitas a uma teoria de campo unificado, o único caminho que sobrevive hoje é a abordagem de dimensões superiores de Kaluza, mas generalizada de modo a incluir supersimetria, supercordas e supermembranas.

Mais recentemente, surgiu uma teoria chamada gravidade quântica em *loop*. Investiga a teoria quadridimensional original de Einstein de uma nova forma. Contudo, é uma teoria de pura gravidade, sem quaisquer elétrons ou partículas subatômicas, e, portanto, não pode qualificar-se como uma teoria de campo unificado. Não faz qualquer menção ao Modelo Padrão porque lhe faltam campos de matéria. Além disso, não é claro se a dispersão de multi-loops neste formalismo é verdadeiramente finita. Há especulação de que a colisão entre dois *loops* produz resultados divergentes.

CAPÍTULO 1

Unificação – Um Sonho Antigo

Quando contemplamos o esplendor magnífico do céu noturno, rodeados por todas as estrelas brilhantes do firmamento, é fácil sentirmo-nos esmagados pela sua majestade absoluta e assombrosa. As nossas preocupações viram-se para as questões mais misteriosas.

Existirá um desígnio superior no universo?

Como encontrar sentido num cosmos aparentemente desprovido dele?

Terá a nossa existência algum objetivo, ou não há finalidade alguma?

Faz-me lembrar um poema de Stephen Crane:

Um homem disse ao universo:

«Senhor, eu existo!»

«Contudo», respondeu o universo,

«esse facto não gera em mim qualquer noção de obrigação.»

Os gregos foram dos primeiros a efetuar tentativas sérias de encontrar ordem no caos do mundo à nossa volta. Filósofos como Aristóteles acreditavam que tudo podia ser reduzido a uma mistura de quatro ingredientes fundamentais: terra, ar, fogo e água. Mas como é que esses quatro elementos dão origem à magnífica complexidade do mundo?

Os gregos propuseram pelo menos duas respostas para esta pergunta. A primeira foi dada pelo filósofo Demócrito, antes ainda de Aristóteles. Ele acreditava que tudo podia ser reduzido a partículas ínfimas, invisíveis e indestrutíveis, às quais chamou átomos (palavra que significa «indivisível» em grego). Os críticos, contudo, observaram que era impossível obter evidência direta da existência dos átomos por serem demasiado pequenos para serem observáveis. Contudo, Demócrito podia apresentar evidências convincentes, embora indiretas.

Pensemos num anel de ouro, por exemplo. Ao longo dos anos, o anel vai-se desgastando. Há algo que se está a perder. Todos os dias, o anel perde fragmentos minúsculos de matéria. Logo, embora os átomos sejam invisíveis, a sua existência pode ser medida indiretamente.

Mesmo hoje, a maior parte da nossa ciência avançada é feita por via indireta. Sabemos a composição do Sol, a estrutura pormenorizada do ADN e a idade do universo graças a medições deste género. E sabemos tudo isto apesar de nunca termos visitado as estrelas, nem entrado numa molécula de ADN, nem assistido ao *Big Bang*. Esta distinção entre evidência direta e indireta será

essencial quando discutirmos as tentativas de provar uma teoria do campo unificado.

Uma segunda abordagem foi apresentada pela primeira vez pelo grande matemático Pitágoras.

Pitágoras teve a perspicácia de aplicar uma descrição matemática a fenómenos mundanos como a música. Reza a lenda que ele reparou em semelhanças entre o som do dedilhar de uma corda de lira e as ressonâncias causadas ao martelar uma barra de metal. Descobriu que ambas criavam frequências musicais que vibravam em certas escalas. Assim, algo tão esteticamente agradável como a música tem a sua origem na matemática da ressonância. Isto, pensou ele, pode mostrar que a diversidade dos objetos que vemos à nossa volta tem de obedecer a essas mesmas regras matemáticas.

Assim, pelo menos duas grandes teorias do nosso mundo nasceram na Grécia antiga: a ideia de que tudo consiste de átomos invisíveis e indestrutíveis, e a de que a diversidade da natureza pode ser descrita pela matemática das vibrações.

Infelizmente, com o colapso da civilização clássica, estes debates e discussões filosóficas perderam-se. O conceito de que podia existir um paradigma que explicasse o universo ficou esquecido durante quase mil anos. As trevas espalharam-se pelo mundo ocidental e a investigação científica foi em grande medida substituída por uma crença em superstição, magia e feitiçaria.

1. O Renascimento Durante a Renascença

No século XVII, alguns grandes cientistas ergueram-se para desafiar a ordem estabelecida e investigar a natureza do universo, mas depararam-se com uma feroz oposição e perseguição. Johannes Kepler, que foi um dos primeiros a aplicar a matemática aos movimentos dos planetas, era conselheiro do imperador Rudolfo II e terá talvez escapado à perseguição por incluir, devotamente, elementos religiosos no seu trabalho científico.

Giordano Bruno, um antigo monge, não teve tanta sorte. Em 1600 foi julgado e condenado à morte por heresia. Foi amordaçado, forçado a desfilar nu pelas ruas de Roma e, finalmente, queimado na fogueira. O seu principal crime? Declarar que podia existir vida em planetas que girassem à volta de outras estrelas.

O grande Galileu, pai da ciência experimental, quase sofreu o mesmo destino. Porém, ao contrário de Bruno, Galileu renegou as suas teorias sob a ameaça de morte. Ainda assim, deixou um legado duradouro com o seu telescópio, talvez a invenção mais revolucionária e sediciosa de toda a ciência. Com um telescópio, as pessoas podiam ver com os seus próprios olhos que a Lua estava marcada por crateras; que Vénus tinha fases consistentes com a sua órbita à volta do Sol; que Júpiter tinha luas — e tudo isto eram ideias heréticas.

Infelizmente, Galileu foi colocado em prisão domiciliária, isolado de visitantes, e acabou por ficar cego. (Diz-se que por ter olhado

diretamente para o Sol com o seu telescópio.) Galileu morreu como um homem destruído. No entanto, no ano em que ele morreu, nascia em Inglaterra um bebé que viria a completar as teorias inacabadas de Galileu e Kepler, dando-nos uma teoria unificada do firmamento.

2. A Teoria das Forças de Newton

Isaac Newton será talvez o maior cientista que já viveu. Num mundo obcecado por bruxaria e feitiçaria, ele ousou redigir as leis universais do firmamento e aplicar ao estudo das forças uma nova matemática, por ele inventada, chamada cálculo. Tal como escreveu o físico Steven Weinberg, «É com Isaac Newton que começa realmente o sonho moderno de uma teoria final.»¹ No seu tempo, era considerada a teoria de tudo — ou seja, a teoria que descrevia todos os movimentos.

Tudo começou quando ele tinha 23 anos. A Universidade de Cambridge estava fechada por causa da peste negra. Um dia, em 1666, enquanto caminhava pela sua propriedade no campo, viu cair uma maçã. Então fez a si próprio uma pergunta que viria a alterar o rumo da história humana.

Se uma maçã cai, por que razão a Lua não cai também?

Antes de Newton, a Igreja ensinava que havia dois tipos de leis. As primeiras eram as leis que se encontravam na Terra,

corrompidas pelo pecado dos mortais. As segundas eram as leis puras, perfeitas e harmoniosas dos céus.

A essência da ideia de Newton era propor uma teoria unificada que abrangesse os céus e a Terra.

No seu caderno, desenhou uma imagem fatídica (ver figura 1).

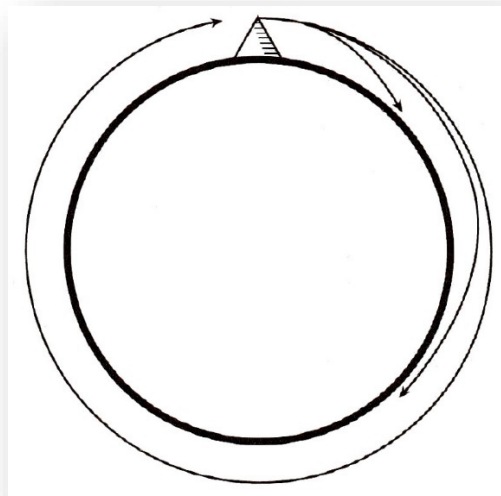


Figura 1. É possível disparar uma bala de canhão cada vez com mais energia até que, a determinada altura, esta contornará completamente a Terra e regressará ao ponto de partida. Newton disse que isto explica a órbita da Lua, unificando assim as leis físicas encontradas na Terra com as leis dos corpos celestes.

Se uma bala de canhão for disparada do alto de uma montanha, percorre uma certa distância antes de cair no chão. Porém, se a bala for disparada a velocidades cada vez maiores, esta irá mais e mais longe antes de regressar à terra, até que, a determinada altura, circundará completamente a Terra e regressará ao cimo da montanha. Ele concluiu que a lei natural que governa maçãs e balas de canhão, a gravidade, também prende a Lua na sua órbita em torno da Terra. A física terrestre e a celeste eram a mesma.

Para chegar a esta conclusão, introduziu o conceito de força. Os objetos moviam-se porque eram puxados ou empurrados por forças universais e que podiam ser medidas com precisão e matematicamente. (Antes, alguns teólogos pensavam que os objetos se moviam por causa de desejos e que os objetos caíam porque ansiavam unir-se à Terra.)

Assim, Newton apresentou o conceito-chave de unificação.

Contudo, Newton era um homem conhecido pela sua privacidade e manteve boa parte do seu trabalho em segredo. Tinha poucos amigos, era incapaz de fazer conversa de circunstância e envolvia-se frequentemente em azedas batalhas com outros cientistas quanto à primazia das suas descobertas.

Em 1682, ocorreu um evento sensacional que alterou o rumo da história. Um cometa ardente cortou os céus sobre a cidade de Londres. Ninguém falava de outra coisa, desde reis e rainhas até aos mendigos. De onde viera? Para onde ia? O que pressagiava?

Um homem que se interessou por este cometa foi o astrónomo Edmond Halley. Este viajou até Cambridge, para se encontrar com o famoso Isaac Newton, entretanto já bem conhecido pela sua teoria da luz. (Ao fazer incidir o sol através de um prisma de vidro, Newton mostrou que a luz branca se separava em todas as cores do arco-íris, demonstrando assim que a luz branca é, na verdade, uma cor composta. Inventou também um novo tipo de telescópio que usava espelhos refletores em vez de lentes.) Quando Halley

perguntou a Newton sobre o cometa de que toda a gente falava, ficou chocado ao ouvir que Newton podia demonstrar que os cometas se moviam em elipses em torno do Sol e que conseguia até prever essa trajetória com recurso à sua própria teoria da gravidade. Na verdade, estava a segui-los com o telescópio que inventara e moviam-se tal como ele previra.

Halley ficou atónito.

Apercebeu-se imediatamente de que estava a assistir a um momento marcante da ciência e ofereceu-se para pagar os custos de impressão daquela que viria a ser uma das maiores obras-primas da ciência, *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, também conhecida simplesmente por *Principia*.

Além disso, Halley, ao perceber que Newton estava a prever que os cometas regressariam a intervalos regulares, calculou que o cometa de 1682 voltaria em 1758. (O cometa de Halley passou sobre a Europa no dia de Natal de 1758, tal como previsto, e ajudou assim a consolidar, a título póstumo, as reputações de Newton e Halley.)

A teoria do movimento e da gravitação de Newton destaca-se como uma das maiores proezas da mente humana, um princípio singular que unifica as leis do movimento conhecidas. Alexander Pope escreveu:

A natureza e as leis da natureza estavam imersas em trevas:

E Deus disse: Faça-se Newton!

E tudo se iluminou.

Ainda hoje são as leis de Newton que permitem aos engenheiros da NASA conduzir as nossas sondas espaciais através do sistema solar.

3. O Que É a Simetria?

A lei da gravidade de Newton é também digna de nota porque possui uma simetria, isto é, a equação permanece igual se fizermos uma rotação. Imagine uma esfera em torno da Terra. A força da gravidade é idêntica em todos os pontos dessa esfera. Na verdade, é por isso que a Terra é esférica e não de outra forma qualquer: porque a gravidade comprimiu a Terra de modo uniforme. É essa a razão pela qual nunca vemos estrelas cúbicas ou planetas piramidais. (Os asteroides mais pequenos têm frequentemente formas irregulares porque a força gravitacional num asteroide é demasiado reduzida para o comprimir com uniformidade.)

O conceito de simetria é simples, elegante e intuitivo. Mais ainda, ao longo deste livro veremos que a simetria não é apenas a decoração frívola de uma teoria, mas na verdade uma característica essencial que indica um princípio físico profundo e subjacente do universo.

Mas o que queremos dizer quando afirmamos que uma equação é simétrica?

Um objeto é simétrico se, depois de reorganizar as suas partes, permanece na mesma, ou invariante. Por exemplo, uma esfera é simétrica porque permanece igual se a rodarmos. Mas como expressar isto matematicamente?

Pense na Terra a girar à volta do Sol (ver figura 2). O raio da órbita da Terra é-nos dado por R , que permanece o mesmo à medida que a Terra se desloca na sua órbita (na verdade, a órbita da Terra é elíptica, pelo que R sofre uma ligeira variação, mas isso não é relevante para este exemplo). As coordenadas da órbita da Terra são dadas por x e y . Conforme a Terra se desloca na sua órbita, x e y mudam constantemente, mas R é invariante — ou seja, não se altera.

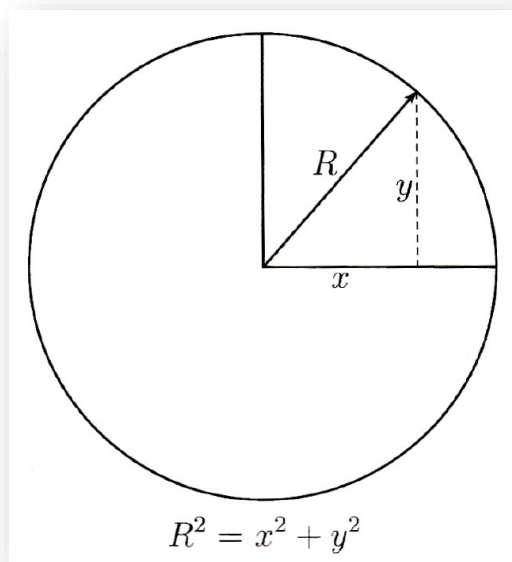


Figura 2. Se a Terra gira à volta do Sol, o seu raio, R , permanece o mesmo. As coordenadas x e y da Terra mudam continuamente ao longo da órbita, mas R é um invariante. Segundo o teorema de Pitágoras, sabemos que $x^2 + y^2 = R^2$. Assim, a equação de Newton tem uma simetria quando é expressa em termos de R (porque R é um invariante) ou de x e y (através do teorema de Pitágoras).

Assim, as equações de Newton mantêm esta simetria, o que significa que a gravidade entre a Terra e o Sol permanece a mesma à medida que a Terra gira em volta do Sol.² O nosso quadro de referência muda, mas as leis mantêm-se constantes. Seja qual for a orientação que assumirmos ao observar um problema, as regras são imutáveis e os resultados são os mesmos.

Voltaremos a encontrar uma e outra vez este conceito de simetria quando discutirmos a teoria do campo unificado. Na verdade, veremos que a simetria é uma das ferramentas mais poderosas de que dispomos para unificar todas as forças da natureza.

4. Confirmação das Leis de Newton

Ao longo dos séculos, encontraram-se inúmeras confirmações das leis de Newton, com um tremendo impacto na ciência e também na sociedade. No século XIX, os astrónomos repararam numa estranha anomalia no firmamento. O planeta Urano estava a desviar-se das previsões das leis de Newton. A sua órbita não era uma elipse perfeita, mas oscilava um pouco. Ou as leis de Newton tinham uma falha, ou havia um planeta ainda não descoberto cuja gravidade estava a afetar a órbita de Urano. A confiança nas leis de Newton era tão grande que físicos como Urbain Le Verrier calcularam meticulosamente onde este planeta misterioso poderia estar. Em 1846, à primeira tentativa, os astrónomos encontraram o planeta a um grau do ponto onde se previra que estaria. O novo planeta foi chamado de Neptuno. Isto foi um feito extraordinário para as leis de Newton, e a primeira vez na história em que se usou

matemática pura para detetar a presença de um importante corpo celeste.

Tal como já mencionámos, sempre que os cientistas decodificaram uma das quatro forças fundamentais do universo, isso não só revelou os segredos da natureza como revolucionou a própria sociedade. As leis de Newton, além de terem desvendado o segredo dos planetas e cometas, assentaram os alicerces das leis da mecânica, que utilizamos hoje em dia para desenhar arranha-céus, motores, aviões a jato, comboios, pontes, submarinos e foguetões. Por exemplo, no século XIX, os físicos aplicaram as leis de Newton para explicar a natureza do calor. Na altura, os cientistas especulavam que o calor seria uma forma de líquido que se espalhava através de uma substância. Porém, investigação posterior revelou que o calor era, na realidade, moléculas em movimento, como minúsculas bolas de aço a colidirem constantemente umas com as outras. As leis de Newton permitiram-nos calcular precisamente como duas bolas de aço faziam ricochete uma na outra. Depois, adicionando biliões e biliões de moléculas, era possível calcular as propriedades precisas do calor. (Por exemplo, quando o gás numa câmara é aquecido, expande-se de acordo com as leis de Newton, uma vez que o calor aumenta a velocidade das moléculas no interior da câmara.)

Os engenheiros podiam agora usar estes cálculos para aperfeiçoar o motor a vapor. Conseguiram calcular a quantidade de carvão necessária para transformar a água em vapor, que podia então ser usado para empurrar engrenagens, pistões, rodas e alavancas e alimentar máquinas. Com o advento do motor a vapor

no século XIX, a energia disponível a um trabalhador disparou para as centenas de cavalos-vapor. De súbito, havia carris de aço a ligar partes distantes do mundo e a aumentar de forma dramática a circulação de bens, conhecimento e pessoas.

Antes da Revolução Industrial, os bens eram fabricados por pequenas guildas exclusivas de artífices, que trabalhavam arduamente no fabrico até dos mais simples artigos domésticos. Estes artífices guardavam também ciosamente os segredos da sua arte. Assim, os bens eram muitas vezes escassos e caros. Com o advento do motor a vapor e das máquinas potentes por ele movidas, era agora possível produzir bens a uma fração do custo original, aumentando grandemente a riqueza coletiva das nações e elevando os nossos padrões de vida.

Quando ensino as leis de Newton a prometedores estudantes de Engenharia, tento sublinhar que estas leis não são apenas equações secas e enfadonhas, mas que alteraram o rumo da civilização moderna, criando a riqueza e prosperidade que vemos à nossa volta. Por vezes até mostramos aos nossos estudantes o catastrófico desabamento da ponte de Tacoma Narrows em Washington State, em 1940, que ficou captado em filme, como um exemplo extraordinário do que acontece quando as leis de Newton são mal aplicadas.

As leis de Newton, baseadas na unificação da física dos céus com a física da Terra, ajudaram a introduzir a primeira grande revolução tecnológica.

5. O Mistério da Eletricidade e do Magnetismo

O grande avanço seguinte chegaria apenas duzentos anos depois e deriva do estudo da eletricidade e do magnetismo. Os antigos sabiam que era possível domar o magnetismo — a invenção da bússola pelos chineses aproveitava o poder do magnetismo e ajudou a lançar uma Era de descoberta. Mas os antigos temiam o poder da eletricidade. Julgava-se que os relâmpagos eram uma manifestação da fúria dos deuses.

O homem que finalmente assentou as bases desta área foi Michael Faraday, um jovem pobre, mas diligente sem qualquer educação formal. Em criança, ele conseguiu um emprego como assistente na Royal Institution, em Londres. Normalmente, um homem do seu baixo estatuto social estaria condenado para sempre a varrer o chão, lavar garrafas e esconder-se nas sombras. Contudo, este jovem era tão incansável e curioso que os supervisores lhe deram autorização para fazer experiências.

Faraday viria a fazer algumas das maiores descobertas na área da eletricidade e do magnetismo. Mostrou que, se pegássemos num íman e o movimentássemos dentro de um rolo de fio, se gerava eletricidade no fio. Esta foi uma observação espantosa e importante, já que a relação entre eletricidade e magnetismo era, à época, totalmente desconhecida. Era também possível provar o inverso: que um campo elétrico em movimento pode criar um campo magnético.

Aos poucos, Faraday percebeu que estes dois fenômenos eram, na verdade, duas faces da mesma moeda. Esta simples observação ajudaria a abrir a porta à Era da eletricidade, na qual barragens hidroelétricas gigantescas iluminariam cidades inteiras. (Numa barragem hidroelétrica, o rio empurra uma roda que faz girar um íman que, por sua vez, empurra elétrons dentro de um fio que leva eletricidade até às tomadas na sua casa. O efeito oposto, transformar campos elétricos em magnéticos, é a razão pela qual o seu aspirador funciona. A eletricidade da tomada na parede faz girar um íman, que movimenta uma bomba que cria sucção e faz com que os rolos do aspirador girem também.)

Contudo, como Faraday não tinha qualquer educação formal, não possuía o domínio da matemática necessário para descrever as suas extraordinárias descobertas. Assim, encheu cadernos e cadernos com estranhos diagramas que mostravam linhas de força parecidas com a teia de linhas que as limalhas de ferro formam em torno de um íman. Inventou também o conceito de campo, um dos conceitos mais importantes de toda a física. Um campo consiste nestas linhas de força espalhadas pelo espaço. Linhas magnéticas rodeiam todos os ímanes, e o campo magnético da Terra emana do Polo Norte, espalha-se pelo espaço e regressa ao Polo Sul. Até a teoria da gravidade de Newton pode ser expressa em termos de campos: a Terra move-se em torno do Sol porque se movimenta no campo gravitacional do Sol.

A descoberta de Faraday ajudou a explicar a origem do campo magnético em torno da Terra. Uma vez que a Terra gira, as cargas elétricas no interior da Terra giram também. Este movimento

constante dentro da Terra é responsável pelo campo magnético. (No entanto, isto ainda é um mistério em aberto: de onde vem o campo magnético de um íman, uma vez que não há nele nada a girar ou em movimento? Voltaremos a este mistério mais à frente.) Hoje, todas as forças conhecidas do universo são expressas na linguagem de campos introduzida pela primeira vez por Faraday.

Devido à imensa contribuição de Faraday para a introdução da Era da eletricidade, o físico Ernest Rutherford declarou-o «o maior descobridor científico de todos os tempos».

Faraday era também invulgar, pelo menos para a época, porque adorava envolver o público, e até mesmo crianças, nas suas descobertas. Ficou famoso pelas suas Palestras de Natal, em que convidava toda a gente para assistir na Royal Institution, em Londres, a exibições deslumbrantes de magia elétrica. Entrava numa grande sala, com as paredes cobertas de folhas metálicas (aquilo a que hoje em dia se chama uma gaiola de Faraday), e depois eletrificava-a. Embora o metal estivesse claramente eletrificado, ele permanecia em perfeita segurança, porque o campo elétrico se espalhava por toda a superfície da sala, e o campo elétrico no interior se mantinha nulo. Hoje, este efeito é frequentemente usado para proteger de campos elétricos desgovernados os fornos micro-ondas e equipamentos delicados, ou para proteger os aviões a jato, que são muitas vezes atingidos por relâmpagos. (Num programa que apresentei uma vez no Science Channel, entrei numa gaiola de Faraday no Museu da Ciência de Boston. Enormes raios de eletricidade, de dois milhões

de volts, bombardearam a gaiola, enchendo o auditório de um crepitar ensurdecedor. Mas eu não senti nada.)

6. As Equações de Maxwell

Newton mostrara que os objetos se movem porque são empurrados por forças, forças estas que podem ser descritas pelo cálculo. Faraday mostrou que a eletricidade se move porque é empurrada por um campo. Mas o estudo dos campos requeria um novo ramo da matemática, que viria a ser codificado pelo matemático de Cambridge, James Clerk Maxwell, e que se chama cálculo vetorial. Assim, tal como Kepler e Galileu construíram as bases para a física newtoniana, Faraday abriu caminho às equações de Maxwell.

Maxwell era um génio da matemática que fez avanços extraordinários na área da física. Ele percebeu que o comportamento da eletricidade e do magnetismo, conforme fora descoberto por Faraday e outros, podia ser resumido em linguagem matemática precisa. Uma lei afirmava que um campo magnético em movimento podia criar um campo elétrico. Outra lei afirmava o oposto, que um campo elétrico em movimento podia criar um campo magnético.

Depois Maxwell teve uma ideia que ficaria para a história. E se um campo elétrico em mutação criasse um campo magnético que depois criasse outro campo elétrico, que criasse outro campo magnético, e assim sucessivamente? Ele teve a brilhante revelação

de que o produto final deste movimento rápido de um lado para o outro seria uma onda em movimento, onde os campos elétricos e magnéticos se transformavam constantemente um no outro. Esta sequência infinita de transformações tem vida própria e cria uma onda móvel de campos elétricos e magnéticos em vibração.

Utilizando o cálculo vetorial, ele calculou a velocidade desta onda em movimento e descobriu que era de 310.740 quilômetros por segundo. Ficou chocado. Mesmo tendo em conta a margem de erro experimental, esta velocidade aproximava-se extraordinariamente da velocidade da luz (que se sabe agora ser de 299.792 quilômetros por segundo). Ele foi então um passo mais além e afirmou que isto era luz! A luz é uma onda eletromagnética. Maxwell escreveu então, de forma profética: «Não podemos evitar a conclusão de que a luz consiste nas ondulações transversais do mesmo meio que é causa dos fenómenos elétricos e magnéticos.»³

Hoje, todos os estudantes de física e engenheiros elétricos têm de decorar as equações de Maxwell. São a base de televisões, lasers, dínamos, geradores, etc.

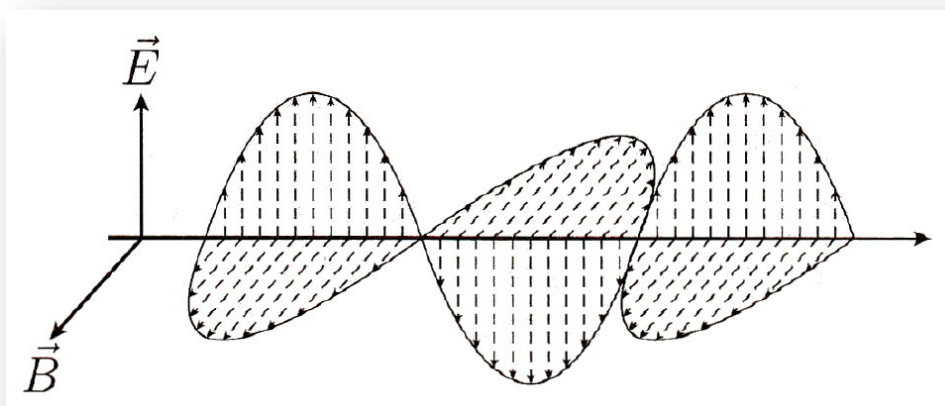


Figura 3. Os campos elétrico e magnético são as duas faces da mesma moeda. Os campos elétrico e magnético em oscilação transformam-se um no outro e movem-se como uma onda. A luz é uma manifestação de uma onda eletromagnética.

Faraday e Maxwell unificaram eletricidade e magnetismo. E a chave para a unificação é a simetria. As equações de Maxwell contêm a simetria chamada dualidade. Se o campo elétrico num raio de luz for representado por E , e o campo magnético por B , então as equações de eletricidade e magnetismo permanecem as mesmas quando trocamos E e B . Esta dualidade implica que eletricidade e magnetismo são duas manifestações da mesma força. Assim, a simetria entre E e B permite-nos unificar eletricidade e magnetismo, criando desta forma uma das maiores descobertas do século XIX.⁴

Os físicos ficaram fascinados por esta descoberta. O Prémio de Berlim foi oferecido a quem conseguisse reproduzir efetivamente estas ondas de Maxwell em laboratório. Em 1886, o físico Heinrich Hertz efetuou o teste histórico.

Primeiro, Hertz criou uma faísca elétrica num canto do laboratório. A vários metros, tinha um rolo de fio. Hertz mostrou que, ao acender a faísca, conseguia gerar uma corrente elétrica no rolo, provando assim que esta nova e misteriosa onda viajava sem fio condutor de um lugar para o outro. Foi o precursor da criação de um novo tipo de fenómeno, chamado rádio. Em 1894, Guglielmo Marconi apresentou ao público esta nova forma de comunicação. Mostrou que era possível enviar mensagens por telegrafia sem fios através do oceano Atlântico à velocidade da luz.

Com a introdução do rádio, tínhamos agora uma forma super-rápida, conveniente e sem fios de comunicar através de longas distâncias. Historicamente, a inexistência de um sistema de comunicação rápido e fiável sempre foi um dos grandes obstáculos à marcha da história. (Em 490 a. C., depois da Batalha de Maratona entre os gregos e os persas, um pobre corredor recebeu ordens para espalhar a notícia da vitória grega o mais depressa que conseguisse. Corajosamente, ele correu cerca de 42 quilómetros até Atenas, depois de ter antes corrido 237 quilómetros até Esparta, após o que, segundo reza a lenda, caiu morto de exaustão. O seu heroísmo, na Era antes das telecomunicações, é hoje celebrado na maratona moderna.)

Hoje em dia vemos como um dado adquirido a possibilidade de enviar mensagens e informação facilmente para todo o mundo, utilizando o facto de a energia poder ser transformada de muitas maneiras. Por exemplo, quando falamos ao telemóvel, a energia do som da nossa voz converte-se em energia mecânica num diafragma vibratório. O diafragma está ligado a um íman que assenta na permutabilidade de eletricidade e magnetismo para criar um impulso elétrico, do tipo que pode ser transportado e lido por um computador. Este impulso elétrico é então traduzido em ondas eletromagnéticas que são captadas por uma torre de micro-ondas próxima. Aí, a mensagem é amplificada e enviada através do globo.

Mas as equações de Maxwell não nos trouxeram apenas a comunicação quase instantânea através de rádio, telemóvel e cabos de fibra ótica — abriram também todo o espectro eletromagnético, do qual a luz visível e o rádio são apenas dois elementos. Na década

de 1660, Newton mostrara que a luz branca, ao atravessar um prisma, podia ser dividida nas cores do arco-íris. Em 1800, William Herschel colocara a si próprio uma simples pergunta: o que está para além das cores do arco-íris, que vão do vermelho ao violeta? Pegou num prisma, criou um arco-íris no seu laboratório e colocou um termómetro abaixo da cor vermelha, onde não existia qualquer cor. Para sua surpresa, a temperatura desta área vazia começou a subir. Por outras palavras, havia uma «cor» abaixo do vermelho que era invisível a olho nu, mas que continha energia. Chama-se infravermelhos.

Hoje sabemos que existe todo um espectro de radiações eletromagnéticas, a maior parte das quais é invisível, todas com comprimentos de onda distintos. O comprimento de onda da rádio e da televisão, por exemplo, é mais longo do que o da luz visível. O comprimento de onda das cores do arco-íris é, por sua vez, mais longo do que o comprimento de onda dos raios ultravioleta e dos raios X.

Isto significava também que a realidade que vemos à nossa volta é apenas uma minúscula parcela do espectro eletromagnético completo, uma ínfima aproximação de um universo muito mais vasto de cores eletromagnéticas. Alguns animais conseguem ver mais do que nós. As abelhas, por exemplo, conseguem ver a luz ultravioleta, que é invisível para nós, mas essencial para que elas encontrem o sol mesmo em dias nublados. Uma vez que as flores desenvolveram as suas cores deslumbrantes para atrair os insetos, como as abelhas, para as polinizarem, isto significa que as flores

podem ser ainda mais espetaculares quando vistas sob luz ultravioleta.

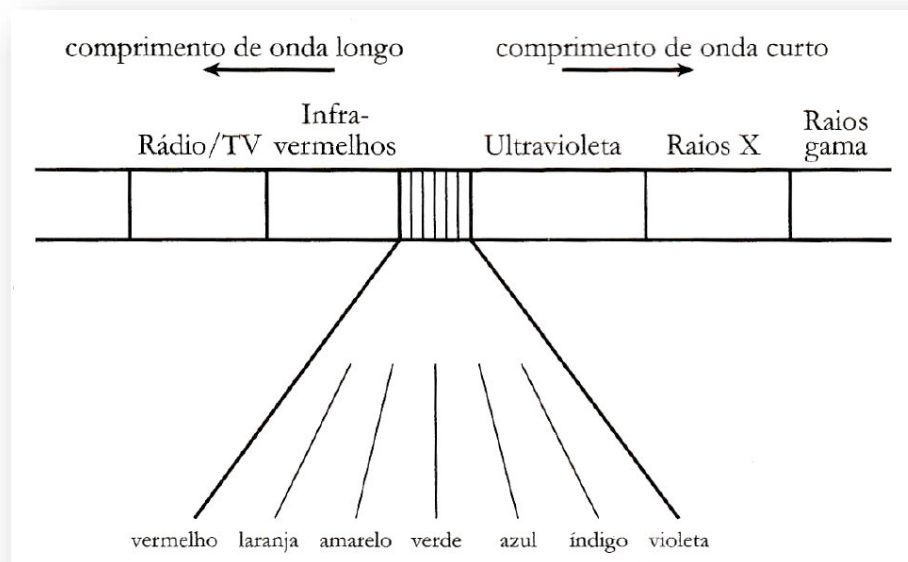


Figura 4. A maior parte das «cores» no espectro eletromagnético, das ondas de rádio aos raios gama, é invisível aos nossos olhos. Os nossos olhos só conseguem ver uma minúscula parcela de todo o espectro eletromagnético, devido ao tamanho das células das nossas retinas.

Quando era pequeno e li sobre isto, perguntei a mim próprio por que razão só conseguíamos ver uma parte tão pequena do espectro eletromagnético. Que desperdício, pensei. Mas a razão, sei-o agora, é que o comprimento de onda de uma onda eletromagnética é aproximadamente o mesmo do tamanho da antena que a produz. Assim, o seu telemóvel tem apenas alguns centímetros porque esse é o tamanho da antena, que é mais ou menos o comprimento de onda das ondas eletromagnéticas que estão a ser emitidas. Da mesma forma, o tamanho de uma célula na sua retina é mais ou menos do tamanho do comprimento de onda das cores que consegue ver. Portanto só conseguimos ver cores cujo comprimento de onda é do tamanho das nossas células. Todas as outras cores no espectro eletromagnético são invisíveis porque são demasiado

grandes ou demasiado pequenas para serem detetadas pelas células da nossa retina. Assim, se as células dos nossos olhos fossem do tamanho de uma casa, talvez conseguíssemos ver todas as ondas de rádio e radiação micro-ondas que nos rodeiam.

Da mesma forma, se as células dos nossos olhos fossem do tamanho de átomos, talvez conseguíssemos ver os raios X.

Outra aplicação das equações de Maxwell é a forma como a energia eletromagnética pode fornecer energia a todo o planeta. Embora o petróleo e o carvão tenham de ser enviados por barco e comboio ao longo de grandes distâncias, a energia elétrica pode ser enviada por fios com o ligar de um interruptor, eletrificando cidades inteiras.

Isto, por sua vez, conduziu a uma famosa controvérsia entre dois gigantes da Era elétrica, Thomas Edison e Nikola Tesla. Edison foi o génio por trás de muitas invenções elétricas, incluindo a lâmpada, os filmes, o fonógrafo, o telégrafo impressor e centenas de outras maravilhas. Foi também o primeiro a iluminar uma rua com eletricidade, neste caso, Pearl Street na baixa de Manhattan.

Isto criou a segunda grande revolução na tecnologia, a Era da eletricidade.

Edison presumiu que a corrente contínua (que se move sempre na mesma direção e cuja voltagem nunca varia) seria a melhor forma de transmitir eletricidade. Em vez da corrente contínua,

Tesla, que tinha trabalhado para Edison e ajudou a construir as bases para a rede de telecomunicações dos nossos dias, defendia a corrente alternada (na qual a eletricidade inverte a sua direção cerca de sessenta vezes por segundo). Isto resultou na famosa batalha das correntes, com corporações gigantescas a investirem milhões em tecnologias rivais: a General Electric a apoiar Edison e a Westinghouse a apoiar Tesla. O futuro da revolução elétrica dependeria de quem vencesse este conflito, a corrente contínua de Edison ou a corrente alternada de Tesla.

Embora Edison fosse o cérebro por trás da eletricidade, e um dos arquitetos do mundo moderno, ele não compreendia completamente as equações de Maxwell. Este seria um erro que lhe sairia muito caro. Na verdade, Edison menosprezava os cientistas que sabiam demasiada matemática. (Há uma história famosa segundo a qual ele costumava pedir aos cientistas que andavam à procura de trabalho que calculassem o volume de uma lâmpada. Sorria enquanto esses cientistas tentavam usar matemática avançada para calcular minuciosamente a forma da lâmpada e o seu volume. A seguir, Edison simplesmente enchia uma lâmpada vazia com água e depois transferia a água para um recipiente graduado.)

Os engenheiros sabiam que os fios esticados ao longo de muitos quilómetros perdiam uma quantidade significativa de energia se transportassem baixas voltagens, como Edison defendia. Assim, as linhas elétricas de alta voltagem de Tesla eram as preferidas, em termos económicos, mas os cabos de alta voltagem eram demasiado perigosos para se ter na sala de estar de uma casa. O

truque era usar cabos de alta voltagem eficientes desde a central elétrica até à cidade, e depois, de alguma forma, transformar a alta voltagem em baixa voltagem antes de esta entrar na sala das pessoas. A chave era usar transformadores.

Se bem se recordam, Maxwell demonstrou que um campo magnético em movimento criava uma corrente elétrica, e vice-versa. Isto permite criar um transformador que pode alterar rapidamente a voltagem num fio. Por exemplo, a voltagem dos cabos elétricos vindos de uma central elétrica pode transportar milhares de volts. Mas o transformador localizado no exterior da sua casa consegue reduzir essa voltagem a 110 volts, o suficiente para alimentar sem dificuldade o micro-ondas e o frigorífico.

Se estes campos fossem estáticos e não se alterassem, nunca poderiam ser convertidos um no outro. Porém, como a eletricidade alternada está constantemente a mudar, é fácil converte-la em campos magnéticos que são novamente convertidos em campos elétricos, mas a uma voltagem mais reduzida, o que significa que a corrente alternada pode facilmente mudar de voltagem com recurso a transformadores; mas a corrente contínua (porque a sua voltagem é constante e não alternada), não.

Por fim, Edison perdeu a batalha e os fundos consideráveis que investira na tecnologia de corrente contínua. Foi o preço que pagou por ignorar as equações de Maxwell.

7. O Fim da Ciência?

Além de explicar os mistérios da natureza e de abrir as portas a uma nova Era de prosperidade económica, a combinação das equações de Newton e de Maxwell deu-nos uma teoria de tudo muito convincente. Ou, pelo menos, de tudo o que se conhecia na altura.

Em 1900, alguns cientistas destacados estavam já a proclamar «o fim da ciência». A viragem do século passado foi uma altura inebriante para quem a viveu. Tudo o que havia a descobrir tinha sido descoberto — ou assim parecia.

Os físicos da época não se tinham apercebido de que os dois grandes pilares da ciência, as equações de Newton e de Maxwell, eram, na realidade, incompatíveis. Contradiam-se entre si.

Um desses dois grandes pilares tinha de cair. E a chave estava nas mãos de um rapazinho de 16 anos. Esse rapaz nasceria no ano em que Maxwell morreu, 1879.

¹ Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (Nova Iorque: Pantheon, 1992), 11.

² Como os *Principia* de Newton foram escritos de forma puramente geométrica, é evidente que Newton estava ciente do poder da simetria. É também evidente que ele explorou intuitivamente o poder da simetria para calcular o movimento dos planetas. Contudo, como não usava a forma de cálculo analítica, que envolveria símbolos como $X^2 + Y^2$, o seu manuscrito não representa a simetria analiticamente em termos das coordenadas X e Y .

³ Quotefancy.com, <https://quotefancy.com/quote/1572216/James-Clerk-Maxwell-I-We-can-scarcely-avoid-the-inference-that-light-consists-in-the-transverse-undulation-of-the-same-medium-which-is-the-cause-of-electric-and-magnetic-phenomena>.

⁴ Tecnicamente falando, as equações de Maxwell não são perfeitamente simétricas entre campos elétricos e magnéticos. Por exemplo, os elétrons são a fonte dos campos elétricos, mas as equações de Maxwell podem prever também a presença de fontes para o campo magnético, chamadas monopólos (ou seja, polos norte e sul isolados de magnetismo), que nunca foram vistos. Assim, alguns físicos conjecturaram que esses monopólos podem ainda vir a ser descobertos.

CAPÍTULO 2

A Busca de Einstein pela Unificação

Na adolescência, Einstein fez a si próprio uma pergunta que viria a alterar o rumo do século XX: *Será possível viajar mais depressa do que um raio de luz?*

Anos mais tarde, ele escreveria que esta simples questão continha a chave da sua teoria da relatividade.

Algum tempo antes, lera um livro infantil de Aaron David Bernstein, *Popular Books on Natural Science*, que pedia ao leitor que se imaginasse a correr ao lado de um cabo de telégrafo. Em vez disso, Einstein imaginou-se a correr ao lado de um raio de luz, que pareceria estático. Se estivesse a deslocar-se à mesma velocidade do raio, as ondas de luz estariam paradas, pensou, tal como Newton poderia ter previsto.

Porém, mesmo aos 16 anos, Einstein compreendia que nunca ninguém vira um raio de luz estático. Faltava aqui alguma coisa. Passaria os dez anos seguintes a refletir sobre esta questão.

Infelizmente, muitas pessoas consideravam-no um fracasso. Apesar de ser um aluno brilhante, os professores detestavam o seu

estilo de vida boémio e despreocupado. Uma vez que já sabia a maior parte da matéria, costumava faltar muito às aulas, e os professores escreveram-lhe cartas de recomendação pouco lisonjeiras; de cada vez que se candidatava a um emprego, era rejeitado. Desempregado e desesperado, arranjou trabalho como explicador (do qual foi despedido por discutir com o patrão). Chegou a pensar em ser vendedor de seguros, para sustentar a namorada e o filho. (Imagine, abrir a porta um dia e ver Einstein a tentar vender-lhe um seguro!) Como não conseguia arranjar emprego, considerava-se a si próprio um peso para a família. Numa carta, escreveu, abatido: «Não sou mais do que um fardo para os meus familiares... Certamente seria melhor se eu não existisse.»¹

Por fim, conseguiu emprego como funcionário de terceira no gabinete de patentes em Berna. Era um cargo humilhante, mas, na realidade, acabou por ser uma bênção inesperada. No sossego do gabinete de patentes, Einstein podia regressar à velha questão que o assombrava desde criança. E, daí, lançaria uma revolução que virou a física, e o mundo, de pernas para o ar.

Quando era estudante na famosa ETH Zürich, na Suíça, cruzara-se com as equações de Maxwell para a luz. E perguntou a si próprio: o que acontece às equações de Maxwell se viajarmos à velocidade da luz? Extraordinariamente, nunca ninguém colocara essa questão. Einstein recorreu à teoria de Maxwell e calculou a velocidade de um raio de luz num objeto em movimento, como um comboio. Esperava que a velocidade do raio de luz, do ponto de vista de um observador imóvel, fosse apenas a sua velocidade habitual mais a velocidade do comboio. De acordo com a mecânica

newtoniana, é possível simplesmente somar velocidades. Por exemplo, se atirmos uma bola de basebol para dentro de um comboio em movimento, um observador imóvel diria que a velocidade da bola é apenas a velocidade do comboio mais a velocidade da bola em relação ao comboio. Da mesma forma, é também possível subtrair velocidades. Assim, se alguém viajasse a par de um raio de luz, este devia parecer estático.

Para seu choque, descobriu que o raio de luz não estava parado, mas sim que continuava a movimentar-se à mesma velocidade. Impossível, pensou. Segundo Newton, é sempre possível apanhar seja o que for, desde que nos movimentemos à velocidade necessária. Era senso comum. Mas as equações de Maxwell diziam que seria impossível apanhar a luz, que esta se movia sempre à mesma velocidade independentemente da velocidade a que o observador se deslocasse.

Para Einstein, esta descoberta foi monumental. Ou Newton estava correto ou então Maxwell. Um deles tinha de estar errado. Mas como era possível que nunca se conseguisse apanhar a luz? No gabinete de patentes, tinha muito tempo para refletir sobre esta questão. Um dia, na primavera de 1905, a resposta ocorreu-lhe durante uma viagem de comboio em Berna. «Uma tempestade libertou-se na minha mente», recordaria mais tarde.²

A sua ideia brilhante foi que, uma vez que a velocidade da luz é medida por relógios e fitas métricas, e visto que a velocidade da luz é constante independentemente da velocidade a que nos

desloquemos, o espaço e o tempo devem estar distorcidos para que a velocidade da luz se mantenha constante!

Isto significava que, numa nave espacial em rápido movimento, os relógios dentro da mesma se deslocariam mais devagar do que os relógios na Terra. *O tempo abranda à medida que aceleramos* — este fenómeno é descrito pela relatividade especial de Einstein. Assim, a pergunta «Que horas são?» depende da velocidade a que nos estivermos a deslocar. Se a nave espacial estivesse a viajar próximo da velocidade da luz e a observássemos do solo através de um telescópio, toda a gente no interior da nave pareceria estar a movimentar-se em câmara lenta. Além disso, tudo na nave pareceria estar comprimido. Por fim, tudo na nave seria mais pesado. Surpreendentemente, para quem estivesse dentro da nave, tudo pareceria tudo normal. Einstein recordaria mais tarde: «Devo mais a Maxwell do que a qualquer outra pessoa.»³ Hoje em dia, esta experiência pode ser feita de forma rotineira. Se colocarmos um relógio atómico num avião e o compararmos com um relógio na Terra, é possível ver que o relógio no avião abrandou (por um fator muito pequeno, de uma parte num bilião).

Mas se espaço e tempo podem variar, então tudo aquilo que conseguimos medir deve variar também, incluindo matéria e energia. E quanto mais depressa nos deslocarmos, mais pesados nos tornamos. Mas de onde vem a massa extra? Vem da energia do movimento. Isto significa que alguma da energia do movimento se transforma em massa.

A relação precisa entre matéria e energia era $E = mc^2$. Esta equação, como veremos, respondia a uma das perguntas mais profundas da ciência: por que é que o Sol brilha? O Sol brilha porque, quando se comprimem átomos de hidrogénio a elevadas temperaturas, parte da massa do hidrogénio é convertida em energia.

A chave para compreender o universo é unificação. Para a relatividade, foi a unificação de espaço e tempo e matéria e energia. Mas como se alcança esta unificação?

1. Simetria e Beleza

Para poetas e artistas, a beleza é uma qualidade estética e etérea que evoca grande emoção e paixão.

Para um físico, beleza é simetria. As equações são belas porque possuem uma simetria — ou seja, se os componentes forem reorganizados ou baralhados, a equação permanece igual. É invariante sob esta transformação. Pense num caleidoscópio. Pega num monte aleatório de formas coloridas e, com espelhos, cria inúmeras cópias e depois dispõe estas imagens simetricamente num círculo. Assim, algo que é caótico torna-se subitamente ordenado e belo graças à simetria.

Da mesma forma, um floco de neve é belo porque, se o rodarmos 60 graus, fica igual. Uma esfera tem ainda mais simetria. Podemos rodá-la o que quisermos em torno do centro e a esfera é sempre

idêntica. Para um físico, uma equação é bela se reorganizarmos as várias partículas e componentes dentro da equação e verificarmos que o resultado não se altera — por outras palavras, se encontrarmos simetria entre as suas partes. O matemático G. H. Hardy escreveu uma vez: «Os padrões de um matemático, como os do pintor ou do poeta, têm de ser *belos*; as ideias, como as cores ou as palavras, têm de encaixar de modo harmonioso. A beleza é o primeiro teste; não há lugar permanente no mundo para matemática feia»⁴ E essa beleza é simetria.

Vimos anteriormente que, se aplicarmos a força gravitacional de Newton à Terra a girar em volta do Sol, o raio da órbita da Terra é constante. As coordenadas x e y mudam, mas R não. Isto pode também ser generalizado para três dimensões. Imagine que está sentado na superfície da Terra, onde a sua localização é dada por três dimensões: x , y e z são as suas coordenadas (ver figura 5). À medida que viaja pela superfície da Terra, seja para onde for, o raio da Terra, R , permanece o mesmo, logo $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Esta é uma versão tridimensional do teorema de Pitágoras.*

* Para ver isto, tomemos $z = 0$. Depois, a esfera reduz-se a um círculo no plano de x e y , como antes. Vimos que, à medida que nos movemos por este círculo, temos $x^2 + y^2 = R^2$. Agora aumentemos gradualmente z . O círculo diminui à medida que nos erguemos na direção de z . (O círculo corresponde às linhas de igual latitude num globo.) R permanece o mesmo, mas a equação do círculo pequeno passa a ser $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$ para um valor fixo de x . Agora, se permitirmos a variação de z , vemos que qualquer ponto na esfera tem coordenadas dadas por x , y e z , de tal forma que o teorema de Pitágoras tridimensional é válido. Assim, em suma, os pontos numa esfera podem todos ser descritos pelo teorema de Pitágoras em três dimensões, de tal forma que R permanece igual, mas x , y e z variam todos à medida que nos deslocamos pela esfera. A grande descoberta de Einstein foi generalizar isto para quatro dimensões, sendo a quarta dimensão o tempo.

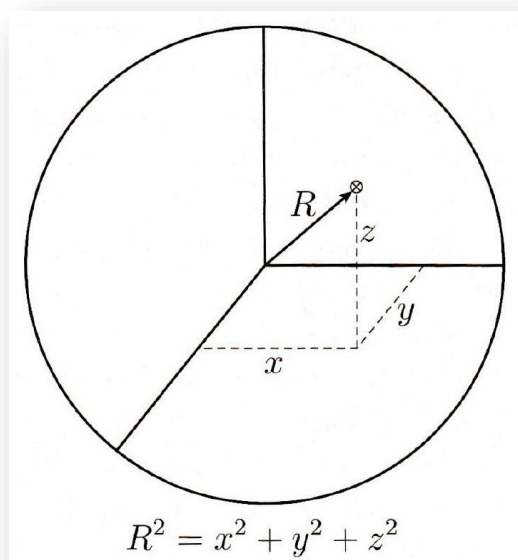


Figura 5. Quando percorremos a superfície da Terra, o raio da Terra, R , é uma constante, um invariante, apesar de as nossas coordenadas, x , y e z , trocarem constantemente de lugar. Assim, o teorema de Pitágoras tridimensional é a expressão matemática desta simetria.

Agora, se pegarmos nas equações de Einstein e depois rodarmos o espaço para o lugar do tempo e o tempo para o lugar do espaço, as equações permanecem iguais. Isto significa que às três dimensões do espaço se junta agora a dimensão do tempo, T , que se torna a quarta dimensão. Einstein mostrou que a quantidade $x^2 + y^2 + z^2 - T^2$ (com o tempo expresso em certas unidades) permanece a mesma, o que é uma versão modificada do teorema de Pitágoras em quatro dimensões. (Note-se que a coordenada do tempo tem um sinal de menos adicional. Isto significa que, embora a relatividade seja invariante sob rotações em quatro dimensões, a dimensão tempo é tratada de forma ligeiramente diferente das outras três dimensões espaciais.) Assim, as equações de Einstein são simétricas em quatro dimensões.⁵

As equações de Maxwell foram escritas pela primeira vez por volta de 1861, o ano em que começou a Guerra Civil Americana.

Anteriormente observámos que elas possuem uma simetria que transforma os campos elétrico e magnético um no outro. Mas as equações de Maxwell possuem uma simetria oculta adicional. Se alterarmos as equações de Maxwell em quatro dimensões, alternando as posições de x , y , z e T , como Einstein fez na década de 1910, elas permanecem iguais. Isto significa que, se os físicos não tivessem ficado cegos pelo sucesso da física newtoniana, a relatividade podia ter sido descoberta durante a Guerra Civil!

2. A Gravidade como Espaço Curvo

Embora Einstein tenha demonstrado que espaço, tempo, matéria e energia faziam todos parte de uma simetria quadridimensional mais vasta, havia uma lacuna evidente na sua equação: não dizia nada sobre gravidade e acelerações. E ele não estava satisfeito. Queria generalizar a sua teoria anterior, à qual chamou relatividade especial, de modo a incluir a gravidade e os movimentos acelerados, criando assim uma teoria geral da relatividade mais poderosa.

O seu colega físico Max Planck, contudo, avisou-o quanto à dificuldade de criar uma teoria que combinasse relatividade e gravidade. Ele disse: «Na minha qualidade de amigo mais velho, tenho de o prevenir quanto a isso. Pois, em primeiro lugar, não terá êxito, e, mesmo que tenha, ninguém acreditará em si.»⁶ Mas depois acrescentou: «Se for bem-sucedido, será conhecido como o próximo Copérnico»

Era óbvio para qualquer físico que a teoria da gravidade de Newton e a teoria de Einstein não eram compatíveis. Se o Sol desaparecesse subitamente sem deixar rasto, Einstein afirmava que a Terra demoraria oito minutos a dar pela sua ausência. A famosa equação da gravidade de Newton não menciona a velocidade da luz. Assim, a gravidade viaja instantaneamente, o que viola a relatividade, pelo que a Terra devia sentir de imediato os efeitos do desaparecimento do Sol.

Einstein ponderara durante oito anos a questão da luz, dos 16 aos 26 anos de idade. Passaria os próximos dez anos, até ter 36, concentrado na teoria da gravidade. A chave para todo o *puzzle* ocorreu-lhe um dia, quando inclinou a cadeira para trás e quase caiu. Nesse breve instante, percebeu que, se tivesse caído, não pesaria nada. Depois percebeu que essa podia ser a chave para a teoria da gravidade. Recordaria posteriormente que esse fora o pensamento mais feliz da sua vida.

Galileu compreendia que, se uma pessoa caísse de um edifício, ficaria momentaneamente desprovida de peso, mas apenas Einstein percebeu como explorar este facto para revelar o segredo da gravidade. Imagine por um momento que está num elevador e o cabo é cortado. Cairia, mas o chão cai à mesma velocidade, portanto dentro do elevador você começaria a flutuar, como se não houvesse gravidade (pelo menos até o elevador cair no chão). Dentro do elevador, a gravidade foi precisamente cancelada pela aceleração de um elevador em queda. A isto chama-se o princípio da equivalência, pelo qual a aceleração num referencial é indistinguível da gravidade noutro referencial.

Quando os astronautas no espaço parecem não ter peso, nas imagens de televisão, não é porque a gravidade desapareceu do espaço. Há muita gravidade por todo o sistema solar. A razão para isso acontecer é que a nave está a cair exatamente à mesma velocidade que eles. Tal como a bala de canhão imaginária de Newton, disparada do cimo de uma montanha, tanto eles como a cápsula estão em queda livre à volta da Terra. Assim, dentro da nave, é uma ilusão de ótica que não tenham peso, uma vez que tudo, incluindo o seu corpo e a nave propriamente dita, está a cair à mesma velocidade.

Einstein aplicou então isto a um carrossel infantil. Segundo a relatividade, quanto mais depressa nos movemos, mais ficamos achatados, porque o espaço se comprime. Quando um carrossel gira, a parte de fora move-se mais depressa do que o interior. Isto significa que, por causa do efeito da relatividade no espaço-tempo, a orla se contrai mais do que o interior, uma vez que se move mais depressa. Mas à medida que o carrossel se aproxima da velocidade da luz, o chão fica distorcido. Já não é apenas um disco plano. A orla encolheu, enquanto o centro está na mesma, pelo que a superfície fica curva, como uma tigela virada ao contrário.

Agora imagine tentar caminhar sobre o chão curvo desse carrossel — seria impossível fazê-lo em linha reta. Ao princípio, talvez pensasse que existe uma força invisível que tenta projetá-lo, porque a superfície está curvada ou distorcida. Assim, uma pessoa no carrossel diria que há uma força centrífuga a tentar empurrar tudo para fora dele. Contudo, para alguém no exterior, não há força externa nenhuma, apenas a curvatura do chão.

Einstein juntou isto tudo. A força que nos faz cair num carrossel é, na verdade, causada pela distorção do carrossel. A força centrífuga que sentimos é equivalente à gravidade — ou seja, uma força fictícia criada por estar num corpo em aceleração. *Por outras palavras, a aceleração num corpo é idêntica ao efeito da gravidade noutro, o que se deve ao facto de o espaço ser curvo.*

Agora substitua o carrossel pelo sistema solar. A Terra gira à volta do Sol, portanto nós, terrestres, temos a ilusão de que o Sol exerce uma força de atração, chamada gravidade, sobre a Terra. Mas para alguém no exterior do sistema solar não seria visível força alguma; observariam que o espaço em volta da Terra se curvou, de modo que o espaço vazio está a empurrar a Terra para que esta gire em círculo à volta do Sol.

Einstein fez a brilhante observação de que a atração gravitacional era, na realidade, uma ilusão. Os objetos movem-se, não por serem puxados pela gravidade ou pela força centrífuga, mas porque são empurrados pela curvatura do espaço à sua volta. *Vale a pena repetir: não é a gravidade que puxa; é o espaço que empurra.*

Shakespeare disse uma vez que o mundo inteiro é um palco e nós somos atores a fazer as nossas entradas e saídas de cena. Foi esta a imagem adotada por Newton. O mundo é estático e nós movemo-nos nesta superfície plana, em obediência às leis de Newton.

Mas Einstein abandonou esta imagem. O palco, disse, é curvo e distorcido. Se caminharíamos sobre ele, não conseguimos andar em linha reta. Estamos a ser constantemente empurrados porque o chão sob os nossos pés é curvo, e cambaleamos como bêbedos.

A atração gravitacional é uma ilusão. Por exemplo, talvez esteja neste momento sentado numa cadeira, a ler este livro. Normalmente, diria que a gravidade está a puxá-lo para baixo na cadeira, e que é por isso que não flutua para o espaço. Mas Einstein diria que está sentado na sua cadeira porque a massa da Terra distorce o espaço sobre a sua cabeça, e esta distorção empurra-o para a cadeira.

Imagine que coloca um peso muito pesado sobre um grande colchão. O peso afunda-se na cama e faz com que a superfície se distorça. Se atirar um berlinde ao longo do colchão, ele move-se numa linha curva. Na verdade, mover-se-á em círculo em torno do peso. À distância, um observador talvez dissesse que há uma força invisível a puxar o berlinde, a forçá-lo a orbitar o peso. Mas, ao perto, veria que não há força invisível nenhuma. O berlinde não se move em linha reta porque o colchão está curvado, o que faz com que o caminho mais direto seja uma elipse.

Agora substitua o berlinde pela Terra, o peso pelo Sol e o colchão pelo espaço-tempo. Vemos então que a Terra gira à volta do Sol porque o Sol distorceu o espaço à sua volta, e o espaço que a Terra percorre não é plano.

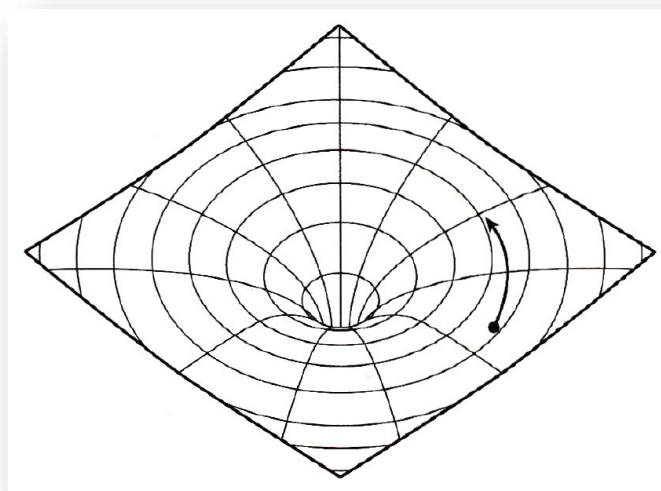


Figura 6. Um peso colocado num colchão afunda-se no tecido. Um berlim desloca-se em círculo em torno da depressão assim criada. À distância, parece que uma força do peso agarra o berlim e o obriga a entrar numa órbita. Na verdade, o berlim está a orbitar o peso porque o colchão está distorcido. Da mesma forma, a gravidade do Sol distorce a luz de estrelas distantes, que pode ser medida por telescópios durante um eclipse solar.

Pense também em formigas a movimentarem-se num papel amachucado. Não conseguem mover-se em linha reta. Podem sentir que há uma força qualquer constantemente a puxá-las. Mas nós, que observamos as formigas de fora, vemos que não há força alguma. Esta é a ideia daquilo a que Einstein chamou relatividade geral: o espaço-tempo é distorcido por massas pesadas, causando a ilusão de força gravitacional.

Isto significa que a relatividade geral é muito mais poderosa e simétrica do que a relatividade especial, uma vez que descreve a gravidade, que afeta todas as coisas no espaço-tempo. A relatividade especial, por outro lado, só funcionava para objetos que se movessem regularmente pelo espaço e pelo tempo em linha reta. Mas no nosso universo quase tudo está em aceleração. Desde carros de corridas a helicópteros ou foguetões, vemos que tudo está em aceleração. A relatividade geral funciona com acelerações que

estão continuamente a mudar em todos os pontos no espaço-tempo.

3. Eclipse Solar e Gravidade

Qualquer teoria, por mais bela que seja, tem mais cedo ou mais tarde de enfrentar uma verificação experimental. Assim, Einstein procurou levar a cabo várias experiências possíveis. A primeira foi com a órbita errática de Mercúrio. Quando calcularam a sua órbita, os astrónomos descobriram uma ligeira anomalia. Em vez de se mover numa elipse perfeita, como previam as equações de Newton, oscilava um pouco, num padrão a fazer lembrar as pétalas de uma flor.

Para proteger as leis de Newton, os astrónomos propuseram a existência de um novo planeta, chamado Vulcano, no interior da órbita de Mercúrio. A gravidade de Vulcano puxaria Mercúrio, causando essa aberração. Anteriormente vimos como esta estratégia permitiu aos astrónomos descobrirem o planeta Neptuno. No entanto, os astrónomos não conseguiram encontrar qualquer evidência observável de Vulcano.

Assim, quando Einstein recalculou o periélio de Mercúrio (o ponto em que está mais próximo do Sol) usando a sua teoria da gravidade, encontrou um ligeiro desvio das leis de Newton. Ficou extasiado por encontrar uma coincidência perfeita com os seus próprios cálculos. Descobriu que a diferença para uma elipse perfeita na órbita de Mercúrio era de 42,9 segundos de arco por

século, bem dentro dos resultados experimentais. Recordaria carinhosamente: «Durante alguns dias, estive fora de mim com o entusiasmo. Os meus sonhos mais ousados realizaram-se.»⁷

Percebeu também que, de acordo com as suas teorias, a luz devia ser refletida pelo Sol.

Einstein apercebeu-se de que a gravidade do Sol seria suficientemente poderosa para defletir ou desviar a luz das estrelas próximas. Uma vez que só era possível ver estas estrelas durante um eclipse solar, Einstein propôs uma expedição para assistir ao eclipse solar de 1919 e pôr à prova a sua teoria. (Os astrónomos teriam de tirar duas fotografias do céu noturno, uma com o Sol ausente e outra durante um eclipse solar. Ao comparar estas duas fotografias, a posição das estrelas durante o eclipse teria de se mover devido à gravidade do Sol.) Estava certo de que esta teoria seria comprovada. Quando lhe perguntaram o que pensaria se a experiência refutasse a sua teoria, ele respondeu que Deus devia ter cometido um erro. Estava convencido de estar certo, disse aos colegas em cartas, porque a teoria possuía uma beleza matemática e uma simetria soberbas.

Quando esta experiência épica foi finalmente levada a cabo pelo astrónomo Arthur Eddington, verificou-se uma coincidência admirável entre as previsões de Einstein e o resultado obtido. (Hoje em dia, a deflexão da luz das estrelas devido à gravidade é usada de forma rotineira pelos astrónomos. Quando a luz das estrelas passa perto de uma galáxia distante, curva-se, dando a aparência

de haver uma lente a «dobrar» a luz. Chama-se a isto lentes gravitacionais ou lentes de Einstein.)

Einstein receberia o prémio Nobel em 1921.

Depressa se tornou uma das figuras mais reconhecidas do mundo, mais ainda do que a maioria das estrelas de cinema e políticos. (Em 1933, apareceu com Charlie Chaplin na estreia de um filme. Quando foram cercados por caçadores de autógrafos, Einstein perguntou a Chaplin: «O que significa isto?» Chaplin respondeu: «Nada, absolutamente nada.» E depois acrescentou: «Aplaudem-me a mim porque toda a gente me compreende. E aplaudem-no a si porque ninguém o compreende.»)

Claro que uma teoria que veio derrubar duzentos e cinquenta anos de física newtoniana teria de ser também alvo de críticas ferozes. Um dos cétricos na liderança do ataque foi o professor de Columbia, Charles Lane Poor. Depois de ler sobre a relatividade, insurgiu-se: «Sinto-me como se tivesse andado a passear no País das Maravilhas com a Alice e tivesse bebido chá com o Chapeleiro Louco.»⁸

Mas Planck tranquilizaria sempre Einstein. Escreveu: «Uma nova verdade científica não triunfa por convencer os seus adversários e os fazer ver a luz, mas sim porque os adversários acabam por morrer e uma nova geração cresce familiarizada com ela»⁹

Ao longo das décadas, houve muitos desafios à relatividade, mas de todas as vezes a teoria de Einstein foi confirmada. Na verdade, como veremos em capítulos posteriores, a teoria da relatividade de Einstein reformulou toda a disciplina da física e revolucionou a nossa concepção do universo, da sua origem e da sua evolução, alterando a forma como vivemos.

Uma maneira fácil de confirmar a teoria de Einstein é usar o sistema de GPS do seu telemóvel. O sistema de GPS consiste de trinta e um satélites em órbita à volta da Terra. A qualquer altura, o telemóvel recebe sinais de três deles. Cada um destes três satélites move-se numa trajetória e ângulo ligeiramente diferentes. O computador no seu telemóvel analisa então estes dados dos três satélites e triangula a sua posição exata.

O sistema de GPS é tão exato que tem de levar em linha de conta correções minúsculas, tanto da relatividade especial como da geral.

Uma vez que os satélites se movem aproximadamente a 28.000 quilómetros por hora, um relógio nos satélites de GPS trabalha ligeiramente mais devagar do que os relógios na Terra, devido à relatividade especial, que diz que velocidades mais elevadas resultam num abrandamento do tempo — o fenómeno demonstrado na experiência mental de Einstein sobre ultrapassar um raio de luz. Porém, uma vez que a gravidade é mais fraca quanto mais nos afastamos no espaço exterior, o tempo acaba por acelerar um pouco, devido à relatividade geral, que diz que o espaço-tempo pode ser distorcido pela atração gravitacional — quanto mais fraca a atração gravitacional, mais depressa se move o tempo. Isto

significa que a relatividade especial e a relatividade geral trabalham em sentidos opostos, com a relatividade especial a fazer com que os sinais abrandem, enquanto a relatividade geral faz com que os sinais acelerem. O seu telemóvel leva então em conta ambos os efeitos contraditórios e diz-lhe exatamente qual é a sua localização. Assim, sem a relatividade especial e geral a trabalharem em conjunto, estaria perdido.

4. Newton e Einstein: Opostos Totais

Einstein foi aclamado como o novo Newton, mas Einstein e Newton eram opostos totais em termos de personalidade. Newton era um solitário, reticente ao ponto de ser antissocial. Não tinha amigos de longa data e era incapaz de conversas normais do dia a dia.

O físico Jeremy Bernstein disse uma vez: «Qualquer pessoa que tenha tido algum contato substancial com Einstein ficou com uma sensação avassaladora da nobreza deste homem. Uma expressão que surge repetidamente para o descrever é “humanitário” — em referência a essa qualidade simples e afável do seu carácter.»¹⁰

No entanto, tanto Newton como Einstein partilhavam algumas características-chave. A primeira era a capacidade de concentração e de focar uma tremenda energia mental. Newton esquecia-se de comer e de dormir durante dias enquanto estava concentrado num problema. Parava a meio de uma conversa para escrever qualquer coisa naquilo que tivesse à mão, por vezes um guardanapo ou a

parede. Da mesma forma, Einstein conseguia concentrar-se num problema durante anos, até mesmo décadas. Quase sofreu um esgotamento enquanto trabalhava na sua teoria geral.

Outra característica que partilhavam era a capacidade de visualizar um problema em imagens. Embora Newton pudesse ter escrito os *Principia* inteiramente em termos de símbolos algébricos, encheu em vez disso a sua obra-prima com diagramas geométricos. Usar cálculo com símbolos abstratos é relativamente simples; mas só um mestre consegue fazê-lo com triângulos e quadrados. Da mesma forma, a teoria de Einstein está repleta de diagramas de comboios, fitas métricas e relógios.

5. A Busca por uma Teoria Unificada

Einstein acabou por criar duas grandes teorias. A primeira foi a da relatividade especial, que governava as propriedades dos raios de luz e do espaço-tempo. Introduzia uma simetria baseada em rotações em quatro dimensões. A segunda foi a da relatividade geral, onde se revela que a gravidade é a curvatura do espaço-tempo.

Contudo, depois destes dois feitos monumentais, ele tentou alcançar um terceiro, ainda mais extraordinário. Queria uma teoria que unificasse todas as forças do universo numa única equação. Queria usar a linguagem da teoria dos campos para criar uma equação que combinasse a teoria da eletricidade e magnetismo de Maxwell com a sua própria teoria da gravidade. Tentou unificar

estas duas durante décadas, sem êxito. (Na verdade, foi Michael Faraday o primeiro a propor uma unificação da gravidade com o eletromagnetismo. Faraday costumava ir para a ponte de Londres deixar cair ímanes, na esperança de encontrar algum efeito mensurável da gravidade sobre o íman. Nunca o encontrou.)

Uma das razões para o fracasso de Einstein foi que, na década de 1920, havia uma enorme lacuna no nosso entendimento do mundo. Seriam precisos avanços numa nova teoria, a teoria quântica, para que os físicos percebessem que faltava uma peça do *puzzle*: a força nuclear.

Mas Einstein, embora seja um dos fundadores da teoria quântica, tornar-se-ia, ironicamente, um dos maiores adversários do *quantum*, e lançaria uma série de críticas contra a teoria quântica. Ao longo das décadas, a teoria resistiu a todos os desafios experimentais e trouxe-nos um dilúvio de maravilhosos aparelhos elétricos que enchem as nossas vidas e locais de trabalho. Contudo, como veremos, as objeções filosóficas profundas e subtis de Einstein fazem eco ainda hoje.

¹ Abraham Pais, *Subtle Is the Lord* (Nova Iorque: Oxford University Press, 1982), 41.

² Quotation.io, <https://quotation.io/page/quote/storm-broke-loose-mind>.

³ Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*, trad. e resumido por Ewald Osers (Nova Iorque: Penguin Books, 1997), 152.

⁴ Wikiquote.com, https://en.wikiquote.org/wiki/G._H._Hardy.

⁵ Assim, embora a relatividade especial tenha uma simetria quadridimensional, como se vê no simples teorema de Pitágoras quadridimensional, $X^2 + Y^2 + Z^2 - T^2$ (em certas unidades), o tempo entra com mais um sinal de menos em comparação com as outras dimensões espaciais. Isto significa que o tempo é de facto a quarta dimensão, mas de um tipo especial. Em particular, significa que não é possível viajar facilmente para trás e para a frente no tempo (caso contrário, as viagens no tempo seriam comuns). É possível viajar para trás e para a frente com facilidade no espaço, mas não no tempo, devido a este sinal de menos extra. (Além disso, repare-se que determinámos que a velocidade da luz é 1, em certas unidades, para deixar bem claro que o tempo entra na relatividade especial como a quarta dimensão.)

⁶ Brandon R. Brown, «Max Planck: Einstein's Supportive Skeptic in 1915», OUPblog, novembro de 2015, <https://blog.oup.com/2015/11/einstein-planck-general-relativity>.

⁷ Fölsing, *Albert Einstein*, 374.

⁸ Denis Brian, *Einstein* (Nova Iorque: Wiley, 1996), 102.

⁹ Johann Ambrosius e Barth Verlag (Leipzig, 1948), p. 22, em *Scientific Autobiography and Other Papers*.

¹⁰ Jeremy Bernstein, «Secrets of the Old One-II», *New Yorker*, 17 de março de 1973, 60.

CAPÍTULO 3

A Ascensão do Quantum

Enquanto Einstein criava sozinho esta vasta nova teoria baseada em espaço e tempo e matéria e energia, um desenvolvimento paralelo na física desvendava a resposta à velha questão: de que é feita a matéria? Isto levaria à próxima grande teoria da física, a teoria quântica.

Depois de concluir a sua teoria da gravidade, Newton levou a cabo várias experiências de alquimia numa tentativa de compreender a natureza da matéria. Pensa-se até que as suas crises depressivas terão sido causadas pelas experiências com mercúrio, um veneno que se sabe causar sintomas neurológicos. Contudo, sabia-se muito pouco sobre as propriedades fundamentais da matéria e não se ficou a saber muito mais através do trabalho desses primeiros alquimistas, que desperdiçavam grande parte do seu tempo e energia a tentar transformar chumbo em ouro.

Seriam precisos vários séculos para que os segredos da matéria fossem lentamente revelados. No século XIX, os químicos começaram a descobrir e a isolar os elementos básicos da natureza — elementos que, por sua vez, não podiam ser decompostos noutros mais simples. Enquanto os avanços extraordinários na física foram liderados por matemáticos, os progressos na área da química

derivaram essencialmente de muitas horas de trabalho árduo em laboratório.

Em 1869, Dmitri Mendeleev teve um sonho no qual todos os elementos da natureza caíam sobre uma mesa. Ao acordar, começou rapidamente a dispor os elementos conhecidos numa tabela regular, demonstrando que estes seguiam um padrão. Do caos da química surgiu assim, subitamente, ordem e previsibilidade. Era possível organizar nesta simples tabela os cerca de sessenta elementos conhecidos, mas havia lacunas, e Mendeleev conseguiu prever as propriedades desses elementos em falta. Quando estes foram efetivamente encontrados em laboratório, conforme previsto, tal veio consolidar a reputação de Mendeleev.

Mas por que estavam os elementos organizados num padrão tão regular»

O desenvolvimento seguinte ocorreu em 1898, quando Marie e Pierre Curie isolaram uma nova série de elementos instáveis nunca antes vistos. Sem qualquer fonte de energia, o rádio brilhava claramente no laboratório, violando um dos princípios mais caros da física, o da conservação de energia (que diz que a energia nunca pode ser criada ou destruída). A energia destes raios de rádio parecia vir do nada. Era evidente que seria necessária uma nova teoria.

Até então, os químicos acreditavam que os ingredientes fundamentais da matéria, os elementos, eram eternos, que

elementos como hidrogénio ou oxigénio eram estáveis para sempre. Porém, nos seus laboratórios, os químicos viam agora que elementos como o rádio estavam a desintegrar-se noutros elementos, libertando radiação nesse processo.

Era também possível calcular a rapidez a que estes elementos instáveis se desintegravam, que podia medir-se em milhares ou mesmo milhares de milhões de anos. As descobertas do casal Curie ajudaram a resolver um debate que há muito decorria. Os geólogos, estupefactos com o ritmo glacial da formação de rochas, sabiam que a Terra devia ter milhares de milhões de anos. Porém, Lorde Kelvin, um dos gigantes da física clássica na época vitoriana, calculou que uma Terra de lava líquida teria arrefecido em poucos milhões de anos. Quem teria razão?

Conforme se veio a saber, eram os geólogos. Lorde Kelvin não compreendia que uma nova força da natureza — a que estava a ser descoberta pelos Curies —, chamada força nuclear, podia aumentar o calor da Terra. Uma vez que a desintegração radioativa podia decorrer ao longo de milhares de milhões de anos, isso significava que o núcleo da Terra podia estar a ser aquecido pela desintegração de urânio, tório e outros elementos radioativos. Assim, o poder enorme de terremotos devastadores, vulcões gigantes e da lenta deslocação dos continentes era originado pela força nuclear.

Em 1910, Ernest Rutherford pôs um pedaço de rádio incandescente numa caixa de chumbo com um orifício minúsculo. Um raio ínfimo de radiação saiu pelo orifício, apontado a uma fina lâmina de ouro. Esperava-se que os átomos do ouro absorvessem

a radiação. Para choque de Rutherford, descobriu que o raio do rádio atravessava simplesmente a lâmina de ouro como se ela não estivesse lá.

Este era um resultado espantoso: significava que os átomos eram compostos essencialmente de espaço vazio. Por vezes fazemos esta demonstração com os estudantes. Pomos um pedaço de urânio inofensivo na mão deles e um contador Geiger, que deteta radiação, por baixo. Os estudantes ficam chocados ao ouvir o contador Geiger detetar a radiação porque o corpo deles é oco.

No início do século XX, a imagem padrão de um átomo era o modelo da tarte de passas — ou seja, o átomo era como uma tarte de carga positiva, com os eletrões (as passas) espalhados pelo interior. Gradualmente foi surgindo uma imagem radicalmente nova do átomo. O átomo era basicamente oco, consistindo de um enxame de eletrões a girar em torno de um núcleo denso minúsculo. A experiência de Rutherford ajudou a provar isto, porque o seu raio radioativo era de vez em quando defletido pelas partículas comprimidas do núcleo. Ao analisar o número, frequência e ângulos dessa deflação, ele conseguiu calcular o tamanho do núcleo do átomo. Era cem mil vezes mais pequeno do que o átomo propriamente dito.

Mais tarde, os cientistas viriam a determinar que o núcleo era, por sua vez, feito de partículas subatómicas ainda mais pequenas: prótons (com carga positiva) e neutrões (que não têm qualquer carga). Toda a tabela de Mendeleev, ao que parecia, podia ser

criada a partir de apenas três partículas subatômicas: o elétron, o próton e o nêutron. Mas a que equação obedeciam estas partículas?

1. A Revolução Quântica

Entretanto, estava a nascer uma nova teoria que podia explicar todas estas descobertas misteriosas. Esta teoria viria a esboçar uma revolução que ia pôr em causa tudo o que sabíamos sobre o universo. Chamava-se mecânica quântica. Mas o que é o *quantum*, afinal, e por que é tão importante?

O *quantum* nasceu em 1900, quando o físico alemão Max Planck colocou a si próprio uma simples pergunta: por que é que os objetos brilham quando estão quentes? Quando os humanos dominaram o fogo pela primeira vez, há muitos milhares de anos, repararam que os objetos quentes brilham com certas cores. Os oleiros sabem há séculos que os objetos, quando atingem temperaturas de milhares de graus, mudam de cor, passando de vermelho a amarelo e a azul. (Pode verificar isto por si próprio de forma muito simples, acendendo um fósforo ou uma vela. Na parte inferior, a chama é mais quente e pode ter uma cor azulada. É amarelada no centro e mais fria na parte superior, onde é avermelhada.)

Porém, quando os físicos tentaram calcular este efeito (chamado radiação do corpo negro) aplicando aos átomos o trabalho de Newton e de Maxwell, descobriram um problema. (Um corpo negro é um objeto que absorve perfeitamente toda a radiação que nele incide. Chama-se negro porque a cor negra absorve toda a luz.)

Segundo Newton, à medida que os átomos aquecem, vibram mais rapidamente. E de acordo com Maxwell, as cargas em vibração, por sua vez, podem emitir radiação eletromagnética sob a forma de luz. Mas quando calcularam a radiação emitida por átomos quentes em vibração, o resultado desafiou as expectativas. A baixas frequências, este modelo aplicava-se bastante bem aos dados. Mas a frequências elevadas, a energia da luz devia a dado ponto tornar-se infinita, o que era ridículo. Para um físico, o infinito é apenas um sinal de que as equações não estão a funcionar, de que não compreendem o que está a acontecer.

Max Planck propôs então uma hipótese inocente. Supôs que a energia, em vez de ser contínua e uniforme como na teoria de Newton, ocorria na realidade em pacotes discretos, aos quais chamou *quanta*. Quando ajustou a energia desses pacotes, descobriu que conseguia reproduzir exatamente a energia que irradiava dos objetos quentes. Quanto mais quente o objeto, mais elevada a frequência de radiação, correspondente a diferentes cores do espectro luminoso.

É por isso que uma chama muda de vermelho para azul à medida que a temperatura aumenta. É também por isso que sabemos a temperatura do Sol. Quando uma pessoa ouve dizer pela primeira vez que a superfície do Sol tem cerca de 5000 graus Celsius, talvez pense: como sabemos tal coisa? Nunca ninguém esteve no Sol com um termómetro. Mas sabemos a temperatura do Sol por causa do comprimento de onda da luz que emite.

Planck calculou então o tamanho destes pacotes de energia luminosa, ou *quanta*, e mediu-os em termos de uma pequena constante, h , a constante de Planck, que é $6,6 \times 10^{-34}$ ergs-segundo. (Planck, para encontrar este número, ajustou manualmente a energia destes pacotes até conseguir corresponder aos dados na perfeição.)

Se deixarmos a constante de Planck chegar gradualmente a zero, então todas as equações da teoria quântica se reduzem às equações de Newton. (Isto significa que o comportamento bizarro das partículas subatômicas, que com frequência violam o senso comum, se reduz gradualmente até às familiares leis newtonianas do movimento, quando a constante de Planck é manualmente reduzida a zero.) É por isso que raramente vemos efeitos quânticos na vida quotidiana. Para os nossos sentidos, o mundo parece muito newtoniano, porque a constante de Planck é um número muito pequeno e só afeta o universo ao nível subatômico.

Estes pequenos efeitos quânticos chamam-se *correções quânticas* e os físicos passam vidas inteiras a tentar calculá-los. Em 1905, no mesmo ano em que Einstein descobriu a relatividade especial, ele aplica a teoria quântica à luz e mostrou que a luz não é apenas uma onda, mas que agia também como um pacote de energia, ou uma partícula, chamada *fotão*. Assim, a luz tinha aparentemente dois lados: uma onda, como previsto por Maxwell, e uma partícula ou *fotão*, como previsto por Planck e Einstein. Começava a emergir uma nova imagem da luz. A luz era feita de *fotões*, que são *quanta*, ou partículas, mas cada *fotão* criava campos à sua volta (os campos elétrico e magnético). Estes

campos, por sua vez, tinham a forma de ondas e obedeciam às equações de Maxwell. E assim temos agora uma bela relação entre as partículas e os campos que as rodeiam. Se a luz tinha dois lados, como partícula e como onda, teria também o eletrão esta dualidade bizarra? Era este o próximo passo lógico, e algo que viria a ter um efeito extraordinariamente profundo, abalando o mundo da física moderna e a própria civilização.

2. Ondas de Eletrões

Os físicos, para seu choque, descobriram então que os eletrões, em tempos considerados partículas duras, corpusculares, podiam também agir como ondas. Para demonstrar, pegue-se em duas folhas de papel paralelas, uma atrás da outra. Faça-se dois cortes na primeira folha e dispare-se um raio de eletrões através da mesma. Normalmente seria de esperar encontrar dois pontos na folha de trás, onde os raios de eletrões incidiram. O raio de eletrões passa pelo primeiro corte ou pelo segundo. Não por ambos. É mero senso comum.

Contudo, quando a experiência é feita na prática, o padrão de pontos na segunda folha parece formar uma faixa de linhas verticais, um fenómeno que ocorre quando as ondas interferem umas com as outras. (Da próxima vez que tomar um banho de imersão, bata suavemente na superfície da água em dois locais, de modo sincronizado, e verá surgir este padrão de interferência, que se assemelha a uma rede de teias de aranha.)

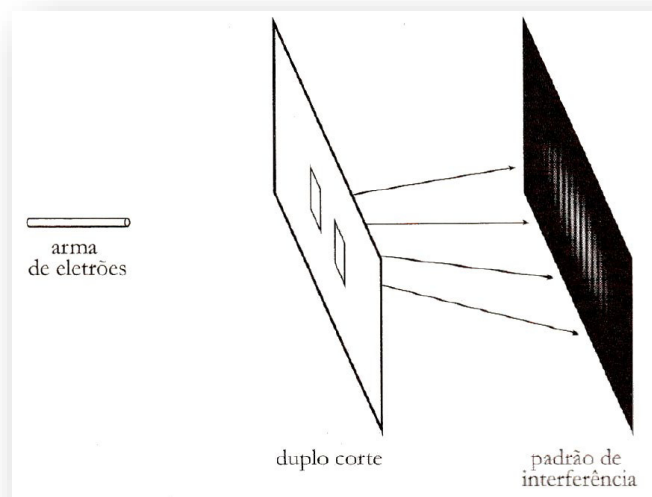


Figura 7. Os elétrons, ao passarem por um duplo corte, agem como se fossem uma onda — ou seja, interferem uns com os outros do outro lado, como se estivessem a passar pelos dois cortes simultaneamente, o que é impossível na física newtoniana, mas forma a base da mecânica quântica.

Mas isto significa, de alguma forma, que os elétrons passaram por ambos os cortes simultaneamente. Era este o paradoxo: como podia uma partícula corpuscular, o elétron, interferir consigo próprio, como se tivesse atravessado dois cortes separados? Além disto, outras experiências com elétrons mostraram que eles desapareciam e reapareciam noutro lado, o que é impossível num mundo newtoniano. Se a constante de Planck fosse consideravelmente maior e afetasse as coisas a uma escala humana, então o mundo seria um lugar bizarro e totalmente irreconhecível. Os objetos poderiam desaparecer e aparecer noutro sítio, e podiam estar em dois lugares ao mesmo tempo.

Por mais improvável que a teoria quântica parecesse ser, começou a ter um sucesso espetacular. Em 1925, o físico austríaco Erwin Schrödinger redigiu a sua famosa equação que descrevia com precisão o movimento destas ondas de partículas. Quando aplicada

ao átomo de hidrogénio, com um único eletrão em órbita em torno de um protão, correspondia de forma extraordinária à experiência. Os níveis de eletrões encontrados no átomo de Schrödinger coincidiam exatamente com os resultados experimentais. Na verdade, toda a tabela de Mendeleev podia ser explicada, em princípio, como uma solução da equação de Schrödinger.

3. Explicar a Tabela Periódica

Um dos feitos espetaculares da mecânica quântica é a capacidade de explicar o comportamento dos componentes da matéria, átomos e moléculas. Segundo Schrödinger, o eletrão é uma onda que rodeia o pequeno núcleo. Na figura 8, vemos como apenas as ondas com certos comprimentos de onda discretos conseguem viajar em volta do núcleo. Ondas com um número inteiro de comprimento de onda encaixam bem. Mas aquelas que não têm um número inteiro não rodeiam completamente o núcleo. São instáveis e não conseguem formar átomos estáveis. Isso significa que os eletrões só conseguem mover-se em invólucros distintos.

À medida que nos afastamos do núcleo, este padrão básico repete-se; conforme o número de eletrões aumenta, o anel exterior afasta-se mais do centro. Quanto mais avançamos, mais eletrões existem. Isto, por sua vez, explica por que razão a tabela de Mendeleev contém níveis regulares discretos que se repetem, com cada nível a imitar o comportamento do invólucro abaixo.

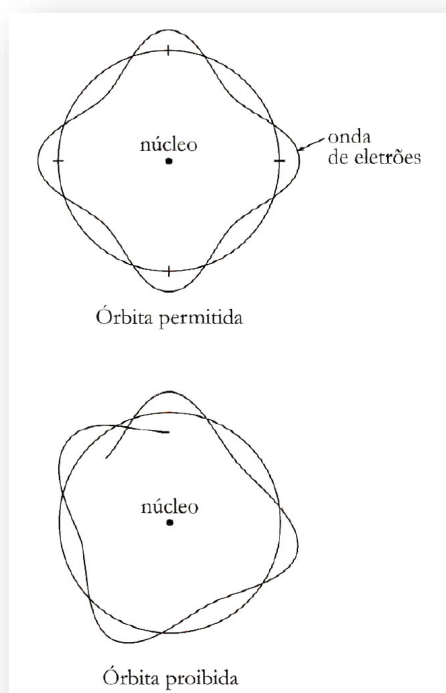


Figura 8. Apenas elétrons de um certo comprimento de onda conseguem encaixar-se dentro de um átomo — ou seja, a órbita tem de ser um múltiplo integral do comprimento de onda do elétron. Isto força as ondas de elétrons a formar invólucros discretos em torno do núcleo. Uma análise pormenorizada de como os elétrons preenchem estes invólucros pode ajudar a explicar a tabela periódica de Mendeleev.

Este efeito é visível sempre que cantamos no duche. Só certas frequências discretas, ou comprimentos de onda, fazem ricochete nas paredes e são ampliadas, e outras que não encaixam são canceladas, de forma semelhante ao modo como as ondas de elétrons contornam o núcleo de um átomo: só certas frequências discretas funcionam.

Esta descoberta alterou fundamentalmente o rumo da física. Num ano, os físicos não faziam ideia de como descrever o átomo. No ano seguinte, com a equação de Schrödinger, tinham ao seu alcance um modo de calcular as propriedades no interior do próprio átomo. Por vezes dou aulas de mecânica quântica e tento transmitir aos estudantes a noção de que tudo à volta deles, em certo sentido,

pode ser expresso como uma solução da equação de Schrödinger. Menciono que não só os átomos podem ser explicados por ela, mas é também possível explicar a união dos átomos para formar moléculas e, assim, os químicos de que é composto todo o nosso universo.

Contudo, por mais potente que fosse a equação de Schrödinger, ela tinha ainda uma limitação. Só funcionava com velocidades pequenas — ou seja, era não-relativista. A equação de Schrödinger não dizia nada sobre a velocidade da luz, a relatividade especial e a forma como os elétrons interagem com a luz através das equações de Maxwell. Faltava-lhe também a bela simetria da teoria de Einstein e era bastante feia e difícil de lidar, matematicamente.

4. A Teoria do Elétron de Dirac

Paul Dirac, na altura um jovem físico de 22 anos, decidiu escrever uma equação de ondas que obedecesse à relatividade especial de Einstein, fundindo espaço e tempo. Uma das coisas deselegantes na equação de Schrödinger era que tratava o espaço e o tempo separadamente e, portanto, os cálculos eram muitas vezes enfadonhos e demorados. Mas a teoria de Dirac combinava as duas coisas e tinha uma simetria quadridimensional, pelo que era também bela, compacta e elegante. Todos os termos feios na equação original de Schrödinger se transformavam numa simples equação quadridimensional.

(Lembro-me de, quando estava na escola secundária, tentar desesperadamente aprender a equação de Schrödinger e de me debater com todos os termos feios que continha. Como podia a natureza ser maliciosa, pensei, ao ponto de criar uma equação de ondas tão desastrada? Depois, um dia, tropecei na equação de Dirac, que era bela e compacta. Lembro-me de ter chorado quando a vi.)

A equação de Dirac foi um sucesso espetacular. Vimos anteriormente que Faraday demonstrara que um campo elétrico em mutação num rolo de fio produzia um campo magnético. Mas de onde vinha o campo magnético num íman, sem quaisquer cargas em movimento? Parecia ser um mistério total. Porém, segundo as equações de Dirac, previa-se que o eletrão tinha um *spin* que criava o seu próprio campo magnético. Esta propriedade do eletrão estava incluída desde o princípio na matemática. (Este *spin* é um termo matemático na equação de Dirac e não uma rotação, no sentido em que aplicamos a palavra, por exemplo, a um giroscópio.) O campo magnético criado pelo *spin* coincidia precisamente com o campo encontrado de facto em torno dos eletrões. Isto, por sua vez, ajudava a explicar a origem do magnetismo. Então de onde vem o campo magnético de um íman? Vem do *spin* dos eletrões presos dentro do metal. Mais tarde, descobriu-se que todas as partículas subatómicas têm *spin*. Voltaremos a este conceito importante num capítulo posterior.

Mais importante ainda, a equação de Dirac previa uma nova forma inesperada de matéria, chamada antimatéria. A antimatéria obedece às mesmas leis que a matéria vulgar, exceto com a carga

oposta. Assim, o antieletrão, que se chama positrão, tem uma carga positiva e não negativa. Em princípio, pode ser possível criar antiátomos, feitos de antieletrões a girar em volta de antiprotões e antineutrões. Mas quando a matéria e a antimatéria colidem, rebentam numa explosão de energia. (A antimatéria tornar-se-á um ingrediente essencial de uma teoria de tudo, uma vez que todas as partículas na teoria final têm de ter um equivalente de antimatéria.)

Anteriormente, os físicos consideravam a simetria um aspeto esteticamente agradável, mas não essencial de qualquer teoria. Agora, os físicos estavam assombrados com o poder da simetria, que conseguia realmente prever fenómenos físicos novos e inesperados (como a antimatéria e o *spin* dos eletrões). Os físicos começavam a compreender que a simetria era uma característica essencial e inevitável do universo a um nível fundamental.

5. O Que está a Ondular?

Contudo, havia ainda algumas perguntas persistentes. Se o eletrão tinha propriedades ondulatórias, então o que estava a perturbar o meio onde a onda existia? O que estava a ondular? E como podia passar através de dois orifícios simultaneamente? Como pode um eletrão estar em dois sítios ao mesmo tempo?

A resposta era sensacional e incrível, e dividiu ao meio a comunidade da física. Segundo um trabalho publicado por Max Born em 1926, *o que estava a ondular era a probabilidade de encontrar um eletrão naquele ponto*. Por outras palavras, era impossível saber

com certeza onde estava exatamente um elétron. A única coisa que se podia saber era a probabilidade de o encontrar. Isto foi codificado no famoso princípio da incerteza de Werner Heisenberg, que afirmava que não se pode conhecer precisamente a velocidade e localização de um elétron. Por outras palavras, *os elétrons são partículas, mas a probabilidade de encontrar essa partícula em certa localização é dada por uma função de onda.*

Esta ideia foi uma bomba. Significava que era impossível prever o futuro com precisão. Podíamos apenas prever as probabilidades de que certas coisas acontecessem. Mas os sucessos da teoria quântica eram inegáveis. Einstein escreveu que, «quanto mais êxito tem a teoria quântica, mais disparatada parece». Até Schrödinger, que introduzira pela primeira vez o conceito da onda de elétrons, rejeitou esta interpretação probabilística das suas próprias equações. Ainda hoje há controvérsia entre físicos que debatem as implicações filosóficas da teoria de ondas. Como é possível estar em dois lugares ao mesmo tempo? Richard Feynman, galardoado com um Nobel, disse uma vez: «Acho que posso dizer com segurança que ninguém compreende a mecânica quântica»¹

Desde Newton que os físicos acreditavam em algo chamado determinismo, a filosofia de que todos os eventos futuros podem ser previstos com exatidão. As leis da natureza determinam o movimento de todas as coisas no universo, tornando-as ordenadas e previsíveis. Para Newton, todo o universo era um relógio, a trabalhar de modo preciso e previsível. Se soubéssemos a localização e velocidade de todas as partículas do universo, poderíamos deduzir todos os eventos futuros.

Claro que prever o futuro sempre foi uma obsessão dos mortais. Em *Macbeth*, Shakespeare escreveu:

Se tendes a virtude de ver nas sementes do tempo

E adivinhar qual dará ou não dará fruto,

Falai também comigo.

De acordo com a física newtoniana, é possível prever quais as sementes que hão de brotar. Durante vários séculos, foi esta a opinião dominante entre os físicos. Assim, a incerteza era uma heresia e abalou profundamente a física moderna.

6. Embate de Titãs

De um lado deste debate estavam Einstein e Schrödinger, que ajudaram a iniciar a revolução quântica. Do outro lado estavam Niels Bohr e Werner Heisenberg, criadores da nova teoria quântica. O debate culminou na histórica sexta Conferência de Solvay em 1930, em Bruxelas. Seria um debate para os anais da história, em que os gigantes da física se enfrentariam diretamente para lutar pelo significado da própria realidade.

Paul Ehrenfest escreveu: «Nunca esquecerei a imagem dos dois adversários a saírem do clube da universidade. Einstein, uma figura majestosa, a caminhar calmamente, com um leve sorriso irónico, e Bohr a trotar ao seu lado, extremamente aborrecido.»² Nos

corredores, ouvia-se Bohr a resmungar baixinho uma única palavra: «Einstein... Einstein... Einstein...»

Einstein liderou o ataque, levantando objeções à teoria quântica, umas atrás das outras, e tentando demonstrar como era absurda. No entanto, Bohr respondeu com êxito a todas as críticas de Einstein, uma a uma. Quando Einstein insistiu em repetir que Deus não joga aos dados com o universo, consta que Bohr terá dito: «Pare de dizer a Deus o que pode ou não pode fazer»

O físico de Princeton, John Wheeler, disse: «Foi o maior debate de que tenho conhecimento na história intelectual. Em trinta anos, não ouvi falar de um outro debate entre dois homens de estatura superior, durante um período de tempo tão longo, sobre uma questão tão profunda, com maiores consequências para a compreensão deste nosso estranho mundo.»³

Os historiadores concordam, na sua maioria, que Bohr e os rebeldes quânticos venceram o debate.

No entanto, Einstein conseguiu expor as falhas nas bases da mecânica quântica. Demonstrou que esta era um gigante enorme com pés de barro filosóficos. Estas críticas ouvem-se ainda hoje, e giram todas à volta de um certo gato.

7. O Gato de Schrödinger

Schrödinger imaginou uma experiência mental simples que revelava a essência do problema. Colocar um gato numa caixa selada. Pôr um pedaço de urânio dentro da caixa. Quando o urânio dispara uma partícula subatômica, ativa um contador Geiger que aciona uma arma que dispara uma bala sobre o gato. A pergunta é: o gato está morto ou vivo?

Uma vez que o disparo de um átomo de urânio é um evento puramente quântico, significa que temos de descrever o gato em termos de mecânica quântica. Para Heisenberg, antes de abrirmos a caixa, o gato existe numa mistura de estados quânticos diferentes — ou seja, o gato é a soma de duas ondas. Uma onda descreve um gato morto. A outra onda descreve um gato vivo. O gato não está morto nem vivo, mas uma mistura de ambos. A única maneira de saber se o gato está vivo ou morto é abrir a caixa e fazer uma observação; nesse momento, a função de onda colapsa num gato vivo ou morto. Por outras palavras, *a observação (que requer consciência) determina a existência*.

Para Einstein, tudo isto era ridículo. Fazia lembrar a filosofia de Bishop Berkeley, que perguntava: se uma árvore cair na floresta e não estiver lá ninguém que oiça, faz barulho ou não? Os solipsistas diriam que não. Mas a teoria quântica era ainda pior. Dizia que se houvesse uma árvore na floresta sem ninguém por perto, a árvore existe como a soma de muitos estados diferentes: por exemplo, uma árvore queimada, uma árvore jovem, lenha, contraplacado,

etc. Só quando olhamos para a árvore é que a sua onda colapsa magicamente numa árvore normal.

Quando recebia visitantes em sua casa, Einstein perguntava-lhes: «A Lua existe porque um rato olha para ela?» Contudo, por mais que a teoria quântica violasse o senso comum, tinha uma coisa a seu favor: era experimentalmente correta. As previsões da teoria quântica foram testadas até às onze casas decimais, o que faz dela a teoria mais precisa de todos os tempos.

Einstein admitiria, no entanto, que a teoria quântica continha pelo menos parte da verdade. Em 1929, até recomendou Schrödinger e Heisenberg para o prémio Nobel da Física.

Ainda hoje não existe um consenso universal entre físicos em relação ao problema do gato. (A antiga interpretação de Copenhaga de Niels Bohr, de que o verdadeiro gato só surge porque a observação faz com que a onda do gato colapse, caiu em desgraça, em parte porque com a nanotecnologia conseguimos agora manipular átomos individuais e executar estas experiências. Entretanto, a interpretação muitos-mundos, na qual o universo se divide ao meio e uma metade contém um gato morto e a outra um gato vivo, tornou-se mais popular.)

Com o sucesso da teoria quântica, os físicos na década de 1930 viraram a sua atenção para um novo objetivo, a resposta à antiga questão: por que é que o Sol brilha?⁴

8. A Energia do Sol

Desde tempos imemoriais, as grandes religiões do mundo veneraram o Sol, colocando-o no centro da sua mitologia. O Sol era um dos deuses mais poderosos que governavam os céus. Para os gregos, ele era Hélios, que conduzia a sua carruagem em chamas através do céu, todos os dias, iluminando o mundo e dando-lhe vida. Os astecas, egípcios e hindus tinham todos a sua versão do deus sol.

Porém, durante a Renascença, alguns cientistas tentaram examinar o Sol através da lente da física. Se o Sol fosse feito de madeira ou óleo, já teria esgotado o seu combustível há muito tempo. E se a vasta extensão do espaço sideral não tinha ar, as chamas do Sol deviam ter-se extinguido há muito. Assim, a energia eterna do Sol era um mistério.

Em 1842, foi lançado um grande desafio aos cientistas do mundo. O filósofo francês Auguste Comte, fundador da filosofia do positivismo, declarou que a ciência era de facto poderosa, tendo revelado muitos segredos do universo, mas que uma coisa estaria eternamente para além do seu alcance. Nem os maiores cientistas conseguiriam alguma vez responder à pergunta: de que são feitos os planetas e o Sol?

Era um desafio razoável, uma vez que a base da ciência é a possibilidade de ser testada. Todas as descobertas da ciência têm de ser reproduzíveis e possíveis de serem testadas em laboratório,

mas era claramente impossível capturar o material do Sol num frasco e trazê-lo de volta à Terra. Assim, esta resposta estaria para sempre fora do nosso alcance.

Ironicamente, poucos anos depois de ele ter feito esta afirmação no seu livro *The Positive Philosophy*, os físicos mostraram-se à altura do desafio. O Sol era essencialmente composto por hidrogénio.

Comte cometera um erro pequeno, mas crucial. Sim, a ciência tem de ser sempre testável, mas, como já determinámos, a maior parte da ciência é, na verdade, feita de modo indireto.

Joseph von Fraunhofer era um cientista do século XIX que, em resposta a Comte, desenhou os espectrógrafos mais precisos e exatos do seu tempo. (Num espectrógrafo, as substâncias são aquecidas até começarem a brilhar com radiação do corpo negro. A luz é então projetada através de um prisma, onde cria um arco-íris. Dentro da faixa de cores, há zonas escuras. Estas criam-se porque os eletrões dão saltos quânticos de órbita em órbita, libertando e absorvendo quantidades específicas de energia. Uma vez que cada elemento cria as suas próprias faixas características, cada faixa espectral é como uma impressão digital, permitindo determinar de que é feita essa substância. Os espectrógrafos resolveram também inúmeros crimes, ao conseguirem identificar de onde é proveniente a lama na pegada de um criminoso, ou a natureza das toxinas encontradas no veneno, ou a origem de certas fibras microscópicas e cabelos. Os espectrógrafos permitem recriar a cena de um crime

ao determinarem a composição química de tudo o que está presente.)

Ao analisar as faixas de luz do Sol, Fraunhofer e outros perceberam que o Sol era feito maioritariamente de hidrogénio. (Estranhamente, os físicos descobriram também uma nova substância desconhecida no Sol. Chamaram-lhe hélio, que significa «metal do Sol». Assim, o hélio foi descoberto pela primeira vez no Sol e não na Terra. Mais tarde, os cientistas viriam a concluir que o hélio é um gás e não um metal.)

Porém, Fraunhofer fez outra descoberta importante. Ao analisar a luz das estrelas, descobriu que elas eram feitas das mesmas substâncias vulgarmente encontradas na Terra. Era uma descoberta profunda, uma vez que indicava que as leis da física eram as mesmas, não só no sistema solar, mas através de todo o universo.

Depois de as teorias de Einstein ganharem força, físicos como Hans Bethe juntaram tudo isto para determinar o que alimenta o Sol. Se o Sol é feito de hidrogénio, o seu imenso campo de gravidade pode comprimir o hidrogénio até os protões se fundirem, criando hélio e os elementos superiores. Uma vez que o hélio pesa um pouco menos do que os protões e neutrões que se combinam para o formar, isso significa que a massa perdida foi transformada em energia, através da fórmula de Einstein, $E = mc^2$.

9. Mecânica Quântica e Guerra

Enquanto os físicos debatiam os paradoxos alucinantes da teoria quântica, nuvens de guerra acumulavam-se no horizonte. Adolf Hitler apoderou-se do poder na Alemanha em 1933 e vagas de físicos foram forçados a fugir do país, ou presos, ou pior.

Um dia, Schrödinger estava a ver os camisas castanhas nazis a atormentarem transeuntes e comerciantes judeus inocentes. Quando os tentou impedir, viraram-se contra ele e espancaram-no. Por fim pararam quando um dos camisas castanhas reconheceu que o homem a quem batiam fora galardoado com o prémio Nobel da Física. Abalado, Schrödinger deixaria a Áustria pouco depois. Alarmados pelos relatos diários de repressão, os melhores e mais inteligentes cientistas alemães deixaram o país.

Planck, o pai da teoria quântica, sempre fora muito diplomático, e chegou a pedir pessoalmente a Hitler que pusesse um travão ao êxodo em massa de cientistas alemães, que estava a afastar do país as suas mentes mais brilhantes. Mas Hitler limitou-se a gritar com Planck, condenando os judeus. Depois disso, Planck escreveu que «era impossível falar com um homem assim». (Infelizmente, o próprio filho de Planck tentou assassinar Hitler e por esse crime foi brutalmente torturado e executado.)

Há décadas que perguntavam a Einstein se a sua equação conseguiria libertar as quantidades fabulosas de energia encerradas no átomo. Einstein dizia sempre que não, que a energia libertada

por um átomo era demasiado pequena para ter alguma utilidade prática.

Hitler, contudo, queria usar a superioridade alemã na área da ciência para criar armas poderosas que o mundo nunca vira antes, armas de terror, como os mísseis V-1 e V-2 e a bomba atômica. Afinal de contas, se o Sol era alimentado por energia nuclear, então talvez fosse possível criar uma superarma com a mesma fonte de energia.

A descoberta essencial para conseguir explorar a equação de Einstein veio do físico Leo Szilard. Os físicos alemães tinham demonstrado que o átomo de urânio, quando atingido por neutrões, podia dividir-se ao meio, libertando mais neutrões. A energia libertada pela divisão de um único átomo de urânio era extremamente pequena, mas Szilard percebeu que seria possível ampliar o poder do átomo de urânio através de uma reação em cadeia: dividir um átomo de urânio libertava dois neutrões. Estes dois neutrões podiam então dividir mais dois átomos de urânio, libertando quatro neutrões. Teríamos assim oito, dezasseis, trinta e dois, sessenta e quatro (e por aí fora) neutrões — ou seja, um aumento exponencial do número de átomos de urânio divididos, acabando por criar energia suficiente para arrasar uma cidade.

De súbito, as discussões obscuras que dividiam os físicos na Conferência de Solvay tornaram-se uma questão urgente de vida ou de morte, com o destino de populações inteiras, nações e a própria civilização em jogo.

Einstein ficou horrorizado quando soube que, na Boémia, os nazis estavam a selar as minas de pecheblenda que continham urânio. Embora fosse um pacifista, Einstein sentiu-se obrigado a escrever a famosa carta ao presidente Franklin Roosevelt, na qual incentivava os Estados Unidos a construírem uma bomba atômica. Roosevelt autorizaria posteriormente o maior projeto científico da história, o Projeto Manhattan.

Na Alemanha, Werner Heisenberg, possivelmente o mais destacado físico quântico à face da Terra, foi nomeado para a liderança do projeto da bomba atômica nazi. Segundo alguns historiadores, o receio de que Heisenberg chegasse primeiro do que os Aliados à bomba atômica era tão grande que a OSS, a agência precursora da CIA, formulou um plano para o assassinar. Em 1944, um ex-jogador dos Brooklyn Dodgers, Moe Berg, recebeu essa incumbência. Berg foi assistir a uma palestra que Heisenberg deu em Zurique, com ordens para matar o físico se lhe parecesse que os trabalhos de construção da bomba por parte dos alemães estariam perto da sua conclusão. (Esta história é desenvolvida no livro de Nicholas Dawidoff, *The Catcher Was a Spy*.)

Felizmente, o projeto da bomba nazi estava consideravelmente atrasado em relação ao dos Aliados. Tinha falta de fundos, sofria de atrasos crónicos e a sua base estava também a ser bombardeada pelos Aliados. Mais importante ainda, Heisenberg não conseguira até então resolver um problema crucial para a construção da bomba atômica: determinar a quantidade de urânio ou plutónio enriquecido necessária para criar uma reação em cadeia, aquilo que era conhecido como massa crítica. (Sabe-se agora que essa quantidade

é aproximadamente nove quilos de urânio-235, uma quantidade que caberia na palma da sua mão.)

Depois da guerra, o mundo começou a descobrir lentamente que as equações obscuras e misteriosas da teoria quântica encerravam não só a chave da física atômica, mas talvez também a do destino da própria raça humana.

Os físicos, contudo, começaram a regressar gradualmente à questão que os preocupava antes da guerra: como criar uma teoria quântica completa da matéria.

¹ https://en.wikiquote.org/wiki/Talk:Richard_Feynman.

² Citado em Albrecht Fölsing, *Albert Einstein*, trad. e resumido por Ewald Osers (Nova Iorque: Penguin Books, 1997), 516. 68

³ Citado em Denis Brian, *Einstein* (Nova Torque: Wiley, 1996), 306.

⁴ Ainda hoje não existe uma solução universalmente aceite para o problema do gato. A maioria dos físicos usa simplesmente a mecânica quântica como um livro de culinária que produz sempre a resposta certa e ignora as implicações filosóficas mais subtis e profundas. A maioria das cadeiras de Mecânica Quântica (incluindo a que eu leciono) menciona apenas o problema do gato sem oferecer qualquer solução definitiva. Foram propostas várias soluções, que são, regra geral, variações de duas abordagens populares. Uma é reconhecer que a consciência do observador tem de fazer parte do processo de medição. Há variações desta abordagem, consoante a definição de «consciência». Outra abordagem, que está a ganhar popularidade entre os físicos, é a teoria dos muitos-mundos, em que o universo se divide em dois, sendo que um universo contém o gato vivo e o outro contém um gato morto. Contudo, é quase impossível a deslocação entre estes dois universos, porque eles se «desuniram» um do outro — ou seja, já não vibram em uníssono, portanto já não podem comunicar entre si. Da mesma forma que duas estações de rádio não podem interagir uma com a outra, nós desligámo-nos de todos os outros universos paralelos. Assim, podem coexistir com o nosso universo outros universos quânticos bizarros, mas comunicar com eles é quase impossível. Podemos ter de esperar mais tempo do que o tempo de vida do universo para passar para estes universos paralelos.

CAPÍTULO 4

A Teoria de Quase Tudo

Depois da guerra, Einstein, essa figura destacada que desvendara a relação cósmica entre matéria e energia e descobrira o segredo das estrelas, deu por si sozinho e isolado.

Quase todos os progressos recentes na física tinham sido feitos na teoria quântica, não na teoria do campo unificado. Na verdade, Einstein lamentava-se de ser visto pelos outros físicos como uma relíquia. O seu objetivo de encontrar uma teoria de campo unificado era considerado demasiado difícil pela maioria dos físicos, em especial quando a força nuclear continuava a ser um mistério total.

Einstein comentou: «Sou encarado, de uma maneira geral, como uma espécie de objeto petrificado, que os anos deixaram cego e surdo. Não me desagrada demasiado este papel, pois corresponde bastante bem ao meu temperamento.»

No passado, havia sempre um princípio fundamental a orientar o trabalho de Einstein. Na relatividade especial, x , y , z e T eram intercambiáveis e a sua teoria tinha de permanecer a mesma. Na relatividade geral era o princípio da equivalência, de que gravidade e aceleração podiam ser equivalentes. Mas na sua demanda pela

teoria de tudo, Einstein não conseguiu encontrar um princípio orientador. Mesmo hoje, quando estudo os cadernos e cálculos de Einstein, encontro muitas ideias, mas nenhum princípio orientador. Ele próprio tinha consciência de que isto condenaria a sua busca. Observou uma vez, tristemente: «Acredito que, para fazer progressos reais, é preciso ir outra vez arrancar algum princípio geral à natureza.»

Nunca o encontrou. Einstein disse uma vez, corajosamente, que «Deus é subtil, mas não malicioso». Nos seus últimos anos de vida, a frustração levou-o a concluir: «Pensei melhor. Se calhar Deus é *mesmo* malicioso.»

Embora a busca de uma teoria do campo unificado tenha sido ignorada pela maioria dos físicos, de vez em quando alguém tentava criá-la.

Até Erwin Schrödinger tentou. Escreveu a Einstein, com toda a modéstia: «O senhor está numa caçada ao leão, enquanto eu estou a falar de coelhos»¹ Apesar disso, em 1947, Schrödinger deu uma conferência de imprensa para anunciar a sua versão da teoria do campo unificado. Até o primeiro-ministro da Irlanda, Éamon de Valera, compareceu. Schrödinger disse: «Creio estar certo. Farei uma triste figura se estiver errado.»² Einstein diria mais tarde a Schrödinger que também lhe ocorrera esta teoria, mas que concluía que era incorreta. Além do mais, essa teoria não conseguia explicar a natureza dos eletrões e do átomo.

Werner Heisenberg e Wolfgang Pauli também foram apanhados por esse bichinho e propuseram as suas versões de uma teoria do campo unificado. Pauli era o maior cínico na área da física, e um grande crítico do programa de Einstein. Ficou famoso por dizer: «Aquilo que Deus separou, que homem nenhum tente juntar» — ou seja, se Deus separou as forças no universo, quem somos nós para as tentar unificar?

Em 1958, Pauli deu uma palestra na Universidade de Columbia, onde explicou a teoria do campo unificado de Heisenberg-Pauli. Bohr estava entre o público. Depois da palestra, Bohr levantou-se e disse: «Aqui atrás, estamos convencidos de que a sua teoria é uma loucura. O que nos divide é saber se será loucura suficiente»³

Isto deu origem a uma acalorada discussão, com Pauli a afirmar que a sua teoria era louca o suficiente para ser verdadeira, enquanto outros diziam que não era. O físico Jeremy Bernstein estava no público e recordou: «Foi um encontro perturbador de dois gigantes da física moderna. Não me saía da cabeça o que teria pensado um visitante que não fosse físico»⁴

Bohr tinha razão; a teoria apresentada por Pauli seria mais tarde demonstrada incorreta.

Contudo, Bohr tocara de facto em algo importante. Todas as teorias fáceis e óbvias já tinham sido ensaiadas por Einstein e pelos seus associados, e todas tinham falhado. Assim, a verdadeira teoria do campo unificado devia ser algo radicalmente diferente de todas

as abordagens anteriores. Tinha de ser «suficientemente louca» para se qualificar como uma verdadeira teoria de tudo.

1. QED

O verdadeiro progresso na Era do pós-guerra foi feito no desenvolvimento de uma teoria quântica completa da luz e dos elétrons, chamada eletrodinâmica quântica, ou QED. O objetivo era combinar a teoria do elétron de Dirac com a teoria da luz de Maxwell, criando assim uma teoria da luz e dos elétrons que obedecesse à mecânica quântica e à relatividade especial. (Uma teoria que combinasse os elétrons de Dirac com a relatividade geral, contudo, era considerada demasiado difícil.)

Em 1930, Robert Oppenheimer (que mais tarde viria a liderar o projeto de construção da bomba atômica) apercebera-se de algo profundamente perturbador. Quando se tentava descrever a teoria quântica de um elétron a interagir com um fóton, descobria-se que as correções quânticas na realidade divergiam, produzindo resultados infinitos e inúteis. As correções quânticas deviam ser pequenas — esse fora o princípio orientador durante décadas. Assim, havia uma falha essencial na simples combinação da equação de elétrons de Dirac com a teoria de fótons de Maxwell. Isto assombrou os físicos durante quase duas décadas. Muitos trabalharam no problema, mas alcançaram pouco progresso.

Finalmente, em 1949, três jovens físicos a trabalhar independentemente, Richard Feynman e Julian Schwinger nos

Estados Unidos, e Shin'Ichiro Tomonaga no Japão, solucionaram este problema de longa data.

Tiveram um êxito espetacular e conseguiram calcular coisas como a propriedade magnética do eletrão com uma precisão extraordinária. Porém, a forma como o fizeram foi controversa e ainda causa aos físicos alguma inquietação e consternação.

Começaram com a equação de Dirac e a equação de Maxwell, onde são atribuídos à massa e carga do eletrão certos valores iniciais (chamados de «massa nua» e «carga nua»). Depois calcularam as correções quânticas da massa e carga nuas. Estas correções quânticas eram infinitas, o mesmo problema com que Oppenheimer se deparara anteriormente.

Mas é aqui que acontece magia. Se partirmos do princípio de que a massa e carga nuas originais eram, na realidade, infinitas, e depois calcularmos as correções quânticas infinitas, descobrimos que estes dois números infinitos podem cancelar-se mutuamente, deixando um resultado finito! Por outras palavras, *infinito menos infinito é igual a zero!*

Era uma ideia louca, mas resultou. A força do campo magnético do eletrão podia ser calculada com recurso a QED com uma precisão extraordinária — ou seja, uma parte em cem mil milhões.

«A concordância numérica entre teoria e experiência é, aqui, talvez a mais impressionante de toda a ciência», observou Steven

Weinberg⁵. É como calcular a distância de Los Angeles a Nova Iorque com uma margem de erro da espessura de um cabelo. Schwinger ficou tão orgulhoso que mandou gravar na sua lápide o símbolo deste resultado.

Este método chama-se teoria da renormalização. O processo, contudo, é trabalhoso, complexo e enfadonho. É preciso calcular com exatidão literalmente milhares de termos, e todos têm de se cancelar com precisão. O mais ínfimo erro neste grosso livro de equações pode arruinar todo o cálculo. (Não é exagero dizer que alguns físicos passam a vida inteira a calcular correções quânticas até à próxima casa decimal utilizando a teoria da renormalização.)

Como o processo de renormalização é tão difícil, nem mesmo Dirac, que ajudou a criar a QED originalmente, gostava dele. Dirac achava que parecia completamente artificial, como varrer o lixo para debaixo do tapete. Disse uma vez: «Isto não é, pura e simplesmente, matemática sensata. A matemática sensata envolve negligenciar uma quantidade quando esta se revela demasiado pequena — não negligenciá-la apenas porque é infinitamente grande e não a queremos»⁶

A teoria da renormalização, que podia combinar a relatividade especial de Einstein com o eletromagnetismo de Maxwell, é de facto tremendamente feia. É preciso dominar uma enciclopédia de truques matemáticos para conseguir cancelar milhares de termos. Mas os resultados são incontestáveis.

2. Aplicações da Revolução Quântica

Isto, por sua vez, abriu caminho para um conjunto notável de descobertas, que trariam o advento da terceira grande revolução da história, a revolução da alta tecnologia, incluindo transístores e lasers, e assim ajudaria a criar o mundo moderno.

Pensemos no transístor, talvez a principal invenção dos últimos cem anos. O transístor abriu a porta à revolução da informação, com uma vasta rede de sistemas de telecomunicações, computadores e a Internet. Um transístor é, basicamente, um portão que controla o fluxo de eletrões. Pense numa válvula. Com o leve rodar de uma válvula, conseguimos controlar o fluxo de água num cano. Da mesma forma, um transístor é como uma pequena válvula eletrónica que permite a uma pequena quantidade de eletricidade controlar o fluxo muito maior de eletrões num fio. Assim, é possível amplificar um pequeno sinal.

De forma semelhante, o laser, um dos instrumentos óticos mais versáteis da história, é outro derivado da teoria quântica. Para criar um laser a gás, começa-se com um tubo de hidrogénio e hélio. Depois injeta-se-lhe energia (aplicando uma corrente elétrica). Esta súbita injeção de energia faz com que biliões de eletrões no gás saltem para um nível de energia mais alta. Contudo, este conjunto de átomos energizados é instável. Se um eletrão se desintegrar para um nível inferior, liberta um fotão de luz, que atinge um átomo excitado nas imediações. Isto faz com que o segundo átomo se desintegre e liberte outro fotão. A mecânica quântica prevê que o segundo fotão vibra em uníssono com o primeiro. É possível colocar

espelhos em ambas as extremidades do tubo, ampliando este fluxo de fótons. Por fim, o processo causa uma avalanche gigantesca de fótons, todos a vibrar para trás e para a frente entre os espelhos, em uníssono, criando o raio laser.

Hoje em dia, os lasers encontram-se em todo o lado: nas caixas registradoras dos supermercados, em hospitais, computadores, concertos de rock, satélites no espaço, etc. Não só é possível transportar vastas quantidades de informação em raios laser, como se pode também transmitir quantidades colossais de energia, suficiente para atravessar a maioria dos materiais. (Aparentemente, a única limitação à energia de um laser é a estabilidade do material e a energia que alimenta o laser. Assim, com a substância e a fonte de energia adequadas, em teoria seria possível criar um raio laser semelhante aos que vemos nos filmes de ficção científica.)

3. O Que É a Vida?

Erwin Schrödinger foi uma figura crucial na formulação da mecânica quântica. Mas Schrödinger também estava interessado noutro problema científico que fascinava e atormentava os cientistas há séculos: o que é a vida? Poderia a mecânica quântica responder a este mistério ancestral? Ele acreditava que um dos derivados da revolução quântica seria a chave para compreender a origem da vida.

Ao longo da história, cientistas e filósofos acreditaram que havia alguma espécie de força vital que animava os seres vivos. Quando uma alma misteriosa entrava num corpo, este tornava-se subitamente animado e agia como um ser humano. Muitos acreditavam em algo chamado dualismo, em que o corpo material coexistia com uma alma espiritual.

Schrödinger, contudo, acreditava que o código da vida estava escondido dentro de uma molécula original que obedecia às leis da mecânica quântica. Einstein, por exemplo, baniu o éter da física. Da mesma forma, Schrödinger tentaria banir a força vital da biologia. Em 1944, escreveu um livro pioneiro, *What is Life?*, que teve um profundo efeito numa nova geração de cientistas no pós-guerra. Schrödinger propunha o uso da mecânica quântica para responder às mais antigas perguntas sobre a vida. Nesse livro, viu que havia um código genético que era, de alguma forma, transportado de uma geração de organismos vivos para a seguinte. Ele acreditava que este código estava armazenado, não numa alma, mas na disposição de moléculas nas nossas células. Usando a mecânica quântica, teorizou sobre o que poderia ser esta misteriosa molécula original. Infelizmente, não se sabia ainda o suficiente de biologia molecular nos anos 40 para responder a esta pergunta.

Contudo, dois cientistas, James D. Watson e Francis Crick, leram o livro e ficaram fascinados pela busca desta molécula original. Watson e Crick compreendiam que as moléculas eram tão pequenas que seria impossível ver ou manipular uma delas. Isto porque o comprimento de onda da luz visível é muito maior do que uma molécula. Mas tinham outro truque quântico na manga:

cristalografia de raios X. O comprimento de onda dos raios X é comparável, em tamanho, com as moléculas, e assim, ao fazer incidir raios X num cristal de materiais orgânicos, os raios X seriam dispersados em muitas direções. Mas o padrão de dispersão continha informação sobre a estrutura atômica do cristal. Moléculas diferentes produziam padrões de raios X diferentes. Um físico quântico experiente, ao olhar para as fotografias da dispersão, conseguiria então depreender qual era a estrutura da molécula original. Assim, embora não fosse possível ver a molécula propriamente dita, era possível decifrar a sua estrutura.

A mecânica quântica era tão poderosa que tornava possível determinar o ângulo a que diferentes átomos se uniam para criar moléculas. Tal como uma criança a brincar com Legos, era então possível construir, átomo a átomo, cadeias destes átomos unidos para reproduzir a estrutura de uma molécula complexa. Watson e Crick perceberam que a molécula de ADN era um dos muitos constituintes do núcleo de uma célula, pelo que era um alvo provável. Ao analisarem as cruciais fotografias de raios X, tiradas por Rosalind Franklin, puderam concluir que a estrutura da molécula de ADN era uma dupla hélice.

Num dos trabalhos mais importantes publicados no século XX, Watson e Crick conseguiram usar a mecânica quântica para decodificar toda a estrutura da molécula de ADN. Era uma obra-prima. Demonstraram de forma conclusiva que o processo fundamental das coisas vivas — a reprodução — podia ser duplicado ao nível molecular. A vida estava codificada nas fitas de ADN que se encontravam em cada célula.

Foi esta a descoberta que possibilitou alcançar o Santo Graal da biologia, o Projeto do Genoma Humano, que nos deu uma descrição atômica completa do ADN de uma pessoa.

Tal como Charles Darwin previra no século anterior, era agora possível construir a árvore genealógica da vida na Terra, e cada coisa viva ou fóssil teria lugar num ramo desta árvore. E tudo isto graças à mecânica quântica.

Assim, a unificação das leis da física quântica não só revelou os segredos do universo, como unificou também a árvore da vida.

4. A Força Nuclear

Se bem se lembram, vimos que Einstein não conseguiu terminar a sua teoria do campo unificado, em parte, porque lhe faltava uma grande peça do *puzzle*, a força nuclear. Nas décadas de 1920 e 1930, não se sabia quase nada a esse respeito.

Porém, na Era do pós-guerra, animados pelo sucesso extraordinário da QED, os físicos viraram a sua atenção para o próximo problema premente — aplicar a teoria quântica à força nuclear. Esta seria uma tarefa difícil e árdua, já que estavam a começar do zero e precisavam de instrumentos poderosos e completamente novos para se orientarem neste território desconhecido.

Há dois tipos de forças nucleares, a forte e a fraca. Uma vez que o próton tem carga positiva e as cargas positivas se repelem, o núcleo do átomo deveria normalmente desfazer-se. O que o mantém unido, sobrepondo-se à repulsão eletrostática, são as forças nucleares. Sem elas, todo o nosso mundo se dissolveria numa nuvem de partículas subatômicas.

A força nuclear forte é suficiente para manter o núcleo de muitos elementos químicos estável indefinidamente. Muitos são estáveis desde o início do próprio universo, especialmente se o número de prótons e neutrões estiver equilibrado. Contudo, alguns núcleos são instáveis por várias razões, em particular se tiverem demasiados prótons ou neutrões. Se tiverem demasiados prótons, a repulsão elétrica fará com que o núcleo se desfaça. Se o núcleo tiver demasiados neutrões, a sua instabilidade pode fazer com que se desintegre. Em particular, a força nuclear fraca não é suficientemente forte para unir de forma permanente os neutrões, pelo que acabará por se desfazer. Por exemplo, metade de qualquer coleção de neutrões livres desintegrar-se-á em catorze minutos. O que resta são três partículas: o próton; o eletrão; e outra partícula nova misteriosa, o antineutrino, de que falaremos mais à frente.

Estudar a força nuclear é extraordinariamente difícil, já que o núcleo é cerca de cem mil vezes mais pequeno do que um átomo. Para sondar o interior de um próton, os físicos precisavam de uma nova ferramenta, o acelerador de partículas. Vimos já como, anos antes, Ernest Rutherford usou os raios emitidos por rádio no interior de uma caixa de chumbo para descobrir o núcleo. Para explorar

mais profundamente o núcleo, os físicos precisavam de fontes de radiação ainda mais potentes.

Em 1929, Ernest Lawrence inventou o ciclotrão, o precursor dos aceleradores de partículas gigantes dos nossos dias. O princípio básico por trás do ciclotrão é simples. Um campo magnético força os prótons a moverem-se numa trajetória circular. A cada ciclo, os prótons recebem uma pequena injeção de energia dada por um campo elétrico. Por fim, após muitas revoluções, o raio de prótons pode atingir os milhões e mesmo milhares de milhões de eletrões-volt. (Os princípios básicos de um acelerador de partículas são tão simples que eu construí um acelerador de partículas para eletrões, um betatrão, quando andava na escola secundária.)

Este raio, por sua vez, será então direcionado para um alvo, onde embate contra outros prótons. Ao analisar os enormes detritos desta colisão, os cientistas conseguiram identificar partículas novas, até aí desconhecidas. (Este processo de disparar raios de partículas para desfazer prótons é uma operação desastrada e imprecisa. Já foi comparada a atirar um piano pela janela e depois tentar determinar todas as propriedades do piano através de uma análise do som do embate no chão. Por mais desastrado que seja o processo, contudo, é uma das poucas maneiras que temos de sondar o interior do próton.)

Quando os físicos desfizeram prótons com um acelerador de partículas pela primeira vez, nos anos 50, descobriram, para sua consternação, todo um zoo de partículas inesperadas.

Era uma abundância extraordinária. Acreditava-se que a natureza se tornava mais simples à medida que se investigava mais a fundo, e não mais complexa. Para o físico quântico, parecia que afinal de contas a natureza, se calhar, era mesmo maliciosa.

Frustrado com este dilúvio de novas partículas, Robert Oppenheimer declarou que o prêmio Nobel da Física devia ser atribuído ao físico que *não* descobrisse uma partícula nova nesse ano. Enrico Fermi declarou que, «se eu soubesse que havia tantas partículas com nomes gregos, teria ido para botânico em vez de físico»⁷.

Os investigadores estavam soterrados em partículas subatômicas. O caos levou até alguns físicos a declarar que talvez a mente humana não fosse inteligente o suficiente para compreender o reino subatômico. Afinal, argumentavam, é impossível ensinar cálculo a um cão, portanto é possível que a mente humana não seja poderosa o bastante para compreender o que está a acontecer no núcleo de um átomo.

Parte da confusão começou a esclarecer-se com o trabalho de Murray Gell-Mann e dos seus colegas no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), que afirmaram que, dentro do próton e do neutrão, havia três partículas mais pequenas chamadas quarks.

Era um modelo simples, mas resultava espetacularmente bem em termos de organizar as partículas em grupos. Tal como Mendeleev antes dele, Gell-Mann conseguia prever as propriedades

de novas partículas de interação forte, ao analisar as lacunas na sua teoria. Em 1964, outra partícula prevista pelo modelo de quark, chamada ómega-menos, foi efetivamente descoberta, confirmando a correção básica desta teoria, que conquistou a Gell-Mann o prémio Nobel.

A razão pela qual o modelo de quark conseguiu unificar tantas partículas é porque se baseava numa simetria. Einstein, se bem se lembram, introduziu uma simetria quadridimensional que transformava o espaço em tempo e vice-versa. Gell-Mann introduziu equações que continham três quarks; quando a sua posição se alterava dentro de uma equação, a equação permanecia igual. Esta nova simetria descrevia o intercâmbio de três quarks.

5. Opostos Totais II

O outro grande físico da Caltech, Richard Feynman, que renormalizou a QED, e Murray Gell-Mann, que introduziu o quark, eram opostos totais em termos de personalidade e temperamento.

No imaginário popular, os físicos são universalmente retratados como cientistas loucos (por exemplo, Doc Brown em *Regresso ao Futuro*) ou totós desesperadamente inaptos, como em *A Teoria do Big Bang*. Contudo, na realidade, há físicos de todos os tamanhos, feitos e tipos de personalidade.

Feynman era uma personagem excêntrica, um artista e um palhaço, sempre com histórias irreverentes sobre as suas proezas

chocantes, contadas num sotaque grosseiro da classe trabalhadora. (Durante a Segunda Guerra Mundial, ele arrombou o cofre que continha os segredos da bomba atômica no Laboratório Nacional de Los Alamos. Dentro do cofre, deixou um bilhete enigmático. Quando este bilhete foi descoberto no dia seguinte, causou alarme geral e lançou o pânico no laboratório mais secreto do país.) Para Feynman, nada era demasiado chocante ou escandaloso; por mera curiosidade, uma vez fechou-se numa câmara hiperbárica para ver se conseguia ter uma experiência de abandono do próprio corpo.

Gell-Mann, contudo, era o oposto, um cavalheiro, de palavras e modos ponderados. Os seus passatempos preferidos eram observar pássaros, colecionar antiguidades, linguística e arqueologia, e não contar histórias hilariantes. Contudo, por mais diferentes que fossem no seu carácter, ambos possuíam a mesma motivação e determinação, o que os ajudou a penetrar nos mistérios da teoria quântica.

6. Força Fraca e Partículas Fantasma

Entretanto, faziam-se grandes avanços também na compreensão da força nuclear fraca, que é cerca de um milhão de vezes mais fraca do que a força nuclear forte.

A força fraca, por exemplo, não é potente o suficiente para unir o núcleo de muitos tipos de átomos, que se desfazem e desintegram em partículas subatômicas mais pequenas. A desintegração radioativa, como já vimos, é o motivo para que o interior da Terra

seja tão quente. A energia feroz de vulcões e terremotos vem da força nuclear fraca. Tinha de ser introduzida uma nova partícula para explicar a força fraca. Um neutrão, por exemplo, é instável e acaba por se desintegrar num próton e num eletrão. A isto chama-se desintegração beta. Porém, para que os cálculos batessem certo, os físicos tinham de introduzir uma terceira partícula, uma partícula imprecisa chamada neutrino.

Chama-se por vezes ao neutrino a partícula fantasma, porque consegue penetrar em planetas e estrelas sem ser absorvido. Neste preciso instante, o seu corpo está a ser irradiado por uma torrente de neutrinos proveniente do espaço sideral, alguns dos quais atravessaram a totalidade do planeta Terra. Na verdade, alguns destes neutrinos podiam penetrar num bloco de chumbo sólido que se estendesse da Terra à estrela mais próxima.

Pauli, que previu a existência do neutrino em 1930, lamentou-se uma vez: «Cometi o derradeiro pecado. Introduzi uma partícula que nunca poderá ser observada.»⁸ Por mais elusiva que seja esta partícula, ela foi finalmente descoberta a nível experimental em 1956, ao analisar-se a radiação intensa emitida por uma central de energia nuclear. (Embora o neutrino praticamente não interaja com a matéria vulgar, os físicos compensaram este facto ao explorarem os vastos números de neutrinos emitidos num reator nuclear.)

Para compreender a força nuclear fraca, os físicos introduziram mais uma vez uma nova simetria. Uma vez que o eletrão e o neutrino eram um par de partículas de interação fraca, propôs-se que podiam ser emparelhadas, dando-nos uma simetria. Esta nova

simetria, por sua vez, podia ser aliada à simetria mais antiga da teoria de Maxwell. A teoria resultante chama-se teoria eletrofraca, e unificou o eletromagnetismo com a força nuclear fraca.

Esta teoria eletrofraca de Steven Weinberg, Sheldon Glasgow e Abdus Salam recebeu o prémio Nobel em 1979.

Assim, a luz, em vez de estar unida à gravidade, como Einstein esperava, preferia na realidade estar unida à força nuclear fraca.

Desta forma, a força forte baseava-se na simetria de Gell-Mann, que une os três quarks para formar prótons e neutrões, enquanto a força nuclear fraca se baseava numa simetria mais pequena, a reorganização do eletrão com o neutrino, que é então combinada com o eletromagnetismo.

Porém, por mais potentes que o modelo de quark e a teoria eletrofraca fossem na descrição do zoo de partículas subatómicas, isto deixava ainda uma enorme lacuna. A questão premente era: o que une todas estas partículas?

7. A Teoria de Yang-Mills

Uma vez que o campo de Maxwell revelara tanto êxito na previsão das propriedades encontradas no eletromagnetismo, os físicos começaram a estudar uma nova versão, mais poderosa, da equação de Maxwell. Esta foi proposta por Chen Ning Yang e Robert L. Mills, em 1954. Em vez de apenas um campo, conforme Maxwell

escrevera em 1861, a nova teoria introduzia uma família desses campos. A mesma simetria que Gell-Mann usou para reorganizar os quarks na sua teoria, foi agora usada para reorganizar esta nova coleção de campos de Yang-Mills uns nos outros.

A ideia era simples. O que mantém um átomo unido é o campo elétrico, que é descrito pelas equações de Maxwell. Então talvez o que mantém os quarks unidos seja uma generalização das equações de Maxwell — ou seja, os campos de Yang-Mills. A mesma simetria que descreve os quarks é agora aplicada ao campo de Yang-Mills.

Contudo, ao longo de várias décadas, esta simples ideia definhou porque, ao calcular-se as propriedades das partículas de Yang-Mills, o resultado era novamente infinito, tal como vimos na QED. Infelizmente, os truques introduzidos por Feynman não eram suficientes para renormalizar a teoria de Yang-Mills. Durante anos, os físicos perderam a esperança de encontrar uma teoria finita da força nuclear.

Por fim, um empreendedor estudante holandês, Gerard't Hooft, teve a coragem e a perseverança para abrir caminho neste matagal de termos infinitos e, através de força bruta, renormalizou o campo de Yang-Mills. Nesta altura, os computadores já eram suficientemente avançados para analisar estes infinitos. Quando o seu programa de computador vomitou uma série de zeros a representar estas correções quânticas, ele soube que devia estar certo.

A notícia deste avanço chamou de imediato a atenção dos físicos. O físico Sheldon Glashow exclamaria: «Ou este tipo é um perfeito idiota, ou o maior génio a surgir na física nos últimos anos!»⁹

Foi uma proeza que conquistaria a 't Hooft e ao seu orientador, Martinus Veltman, o prémio Nobel em 1999. De súbito, havia um novo campo que podia ser usado para unir as partículas conhecidas da força nuclear e explicar a força fraca. Quando aplicado aos quarks, o campo de Yang-Mills chamava-se gluão, porque funcionava como cola (*glue*) para unir os quarks. (Simulações de computador mostram que o campo de Yang-Mills se condensa numa substância semelhante a caramelo, que então une os quarks, como cola.) Para isto, era necessário que os quarks tivessem três tipos, ou cores, obedecendo à simetria de três quarks de Gell-Mann. E assim uma nova teoria da força forte começou a ganhar aceitação generalizada. Esta nova teoria foi batizada de cromodinâmica quântica (QCD) e hoje em dia é a melhor representação conhecida da força nuclear forte.

8. O Bosão de Higgs — A Partícula de Deus

Assim, gradualmente, uma nova teoria estava a emergir de todo este caos, a que se chamou Modelo Padrão. A confusão em torno do zoo de partículas subatómicas começava a dissipar-se. O campo de Yang-Mills (chamado gluão) mantinha os quarks unidos no neutrão e próton, e outro campo de Yang-Mills (chamado partículas W e Z) descrevia a interação entre eletrões e neutrinos.

Porém, o que impedia a aceitação definitiva do Modelo Padrão era a falta da última peça do *puzzle* de partículas, chamada bóson de Higgs, vulgarmente conhecido como a partícula de Deus. A simetria não era suficiente. Precisamos de uma forma de quebrar essa simetria, porque o universo que vemos à nossa volta não é perfeitamente simétrico.

Quando olhamos para o universo, hoje, vemos as quatro forças todas a trabalhar independentemente umas das outras. Gravidade, luz e as forças nucleares, à primeira vista, parecem não ter nada em comum. Porém, à medida que recuamos no tempo, estas forças começam a convergir, deixando talvez apenas uma força no instante da criação.

Começou a desenvolver-se uma nova imagem que usava a física de partículas para explicar o maior mistério da cosmologia, o nascimento do universo. De súbito, dois campos muito diferentes, a mecânica quântica e a relatividade geral, começaram a tornar-se, gradualmente, um só.

Nesta nova imagem, no instante do Big Bang, as quatro forças estavam fundidas numa única superforça que obedecia à simetria original. Esta simetria original podia fazer rodar todas as partículas do universo e trocar de lugar umas com as outras. A equação que governava a superforça era a equação divina. A sua simetria era a simetria que escapara a Einstein e a todos os físicos desde então.

Depois do Big Bang, à medida que se expandia, o universo começou a arrefecer e as várias forças de simetrias começaram a partir-se em pedaços, deixando as simetrias fragmentadas da força fraca e da força forte do Modelo Padrão dos nossos dias. A este processo, chama-se quebra de simetria. Isto significa que precisamos de um mecanismo capaz de quebrar com precisão esta simetria original, deixando-nos com o Modelo Padrão. É aqui que entra o bóson de Higgs.

Para imaginar isto, pense numa barragem. A água no reservatório também tem uma simetria. Se rodarmos a água, continua a parecer basicamente a mesma. Todos sabemos, pela experiência, que a água corre para baixo. Isto porque, segundo Newton, a água procura sempre um estado de energia mais baixo. Se a barragem rebentasse, a água correria subitamente para jusante, em direção a um estado de energia mais baixo. Assim, a água atrás da barragem encontra-se num estado de energia mais alto. Os físicos chamam ao estado da água atrás da barragem o falso vácuo, porque é instável até a água na barragem rebentada chegar ao verdadeiro vácuo, ou seja, o estado de energia inferior no vale mais abaixo. Depois de a barragem rebentar, a simetria original desaparece, mas a água atingiu o seu verdadeiro estado base.

Este efeito encontra-se também quando analisamos a água prestes a começar a ferver. Mesmo antes de ferver, a água está no falso vácuo. É instável, mas simétrica — ou seja, podemos rodá-la e continuará igual. Mas, a dada altura, formam-se pequenas bolhas, em que cada bolha existe num estado de energia mais baixo do que

o da água que a rodeia. Cada bolha começa a expandir-se, até se fundirem bolhas suficientes e a água ferver.

De acordo com este cenário, o universo estava originalmente num estado perfeitamente simétrico. Todas as partículas subatômicas faziam parte da mesma simetria e todas tinham massa zero. Como tinham massa zero, podiam ser reorganizadas, mas a equação ficaria na mesma. Contudo, por alguma razão desconhecida, era instável; estava no falso vácuo. O campo necessário para passar para o vácuo verdadeiro (mas quebrado) é o campo de Higgs. Tal como o campo elétrico de Faraday, que permeava todos os cantos do espaço, o campo de Higgs também preenchia todo o espaço-tempo.

Contudo, por alguma razão, a simetria do campo de Higgs começou a quebrar-se.

Pequenas bolhas começaram a formar-se dentro do campo de Higgs. No exterior das bolhas, todas as partículas continuavam sem massa e simétricas. Dentro da bolha, algumas partículas tinham massa. À medida que o Big Bang progredia, a bolha expandiu-se rapidamente, as partículas começaram a adquirir diferentes massas e a simetria original quebrou-se. Por fim, todo o universo existe no novo estado de vácuo dentro de uma bolha gigantesca.

Assim, na década de 1970, o trabalho árduo de dezenas de físicos começou a dar resultados. Depois de décadas a vaguear pelo deserto, eles estavam finalmente a encaixar todas as peças do

puzzle. Perceberam que ao unir três teorias (representando as forças forte, fraca e eletromagnética) podiam escrever um conjunto de equações que coincidiam verdadeiramente com os resultados observados em laboratório.¹⁰

A chave era criar uma simetria única, colando três simetrias distintas mais pequenas. A primeira simetria descrevia a força nuclear forte, que reorganizava três quarks entre si. A segunda simetria descrevia a força fraca, reorganizando elétrons e neutrinos. A terceira simetria descrevia o campo de Maxwell original. A teoria final era deselegante, mas não se pode argumentar com o sucesso.

9. A Teoria de Quase Tudo

Admiravelmente, o Modelo Padrão conseguia prever com exatidão as propriedades da matéria desde sempre, ou melhor, desde uma fração de segundo depois do Big Bang.

Embora o Modelo Padrão representasse o nosso melhor entendimento do mundo subatômico, havia inúmeros buracos óbvios. Primeiro, o Modelo Padrão não mencionava a gravidade. Isto era um grande problema, já que a gravidade é a força que controla o comportamento em grande escala do universo. E, sempre que os físicos tentavam adicioná-la ao Modelo Padrão, não conseguiam resolver as equações. As correções quânticas assim causadas, em vez de serem pequenas, revelavam-se infinitas, tal como na QED e nas partículas de Yang-Mills. Assim, o Modelo Padrão não conseguia iluminar alguns dos obstinados segredos do

universo, tais como o que aconteceu antes do Big Bang e o que existe dentro de um buraco negro. (Voltaremos mais tarde a estas questões importantes.)

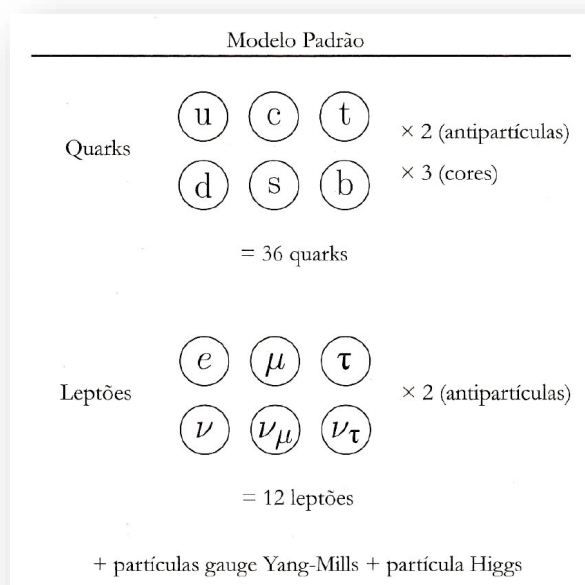


Figura 9. O Modelo Padrão é uma estranha coleção de partículas subatômicas que descreve com precisão o nosso universo quântico, com trinta e seis quarks e antiquarks, doze partículas e antipartículas de interação fraca (chamadas leptões) e um grande sortido de campos de Yang-Mills e bosões de Higgs, partículas que são criadas quando se excita o campo de Higgs.

Segundo, o Modelo Padrão foi criado ao encaixar manualmente as teorias que descreviam as várias forças, pelo que a teoria resultante era uma manta de retalhos.¹¹ (Um físico disse que era como juntar um ornitorrinco, um oricterope e uma baleia e declarar que era a criatura mais elegante da natureza. O animal resultante, dizia-se, era algo que só uma mãe conseguiria amar.)

Terceiro, o Modelo Padrão tinha uma série de parâmetros indeterminados (tais como as massas dos quarks e a força das interações). Na verdade, há cerca de vinte constantes que tinham

de ser introduzidas à mão, sem qualquer ideia quanto à sua origem ou o que elas representavam.

Quarto, havia não apenas uma cópia, mas três cópias ou gerações idênticas dos quarks, glúons, elétrons e neutrinos no Modelo Padrão. (Assim, no total, há trinta e seis quarks, com três cores, três gerações, bem como as suas antipartículas correspondentes, e vinte parâmetros livres.) Os físicos tinham dificuldade em acreditar que algo tão grosseiro e desajeitado pudesse ser a teoria fundamental do universo.

10. LHC (Large Hadron Collider)

– Grande Colisionador de Hadrões –

Uma vez que há tanta coisa em jogo, as nações estão dispostas a gastar milhares de milhões para criar a nova geração de aceleradores de partículas. Atualmente, as manchetes são dominadas pelo Grande Colisionador de Hadrões nos arredores de Genebra, Suíça, a maior máquina alguma vez construída pela ciência, que custou mais de 12 mil milhões de dólares e se estende ao longo de mais de 27 quilómetros em circunferência.

O LHC parece um *donut* gigante encavalitado sobre a fronteira entre a Suíça e a França. Dentro do tubo, os prótons são acelerados até atingirem uma energia extremamente elevada. Depois colidem com outro raio de prótons de elevada energia disparado em direção contrária, o que liberta 14 biliões de elétrons-volt de energia e cria uma chuva enorme de partículas subatômicas. Os computadores

mais avançados do mundo são então utilizados para procurar sentido nesta nuvem de partículas.

O objetivo do LHC é duplicar as condições encontradas pouco depois do Big Bang e, assim, criar estas partículas instáveis. Finalmente, em 2012, o bóson de Higgs, a última peça do Modelo Padrão, foi encontrado.

Embora tenha sido um grande dia para a física de alta energia, os físicos perceberam que tinham ainda um longo caminho pela frente. Por um lado, o Modelo Padrão descreve de facto todas as interações de partículas, desde as profundezas do próton à orla do universo visível. O problema é que a teoria é deselegante. No passado, sempre que os físicos sondaram a natureza fundamental da matéria, foram emergindo simetrias novas e elegantes, e por isso os físicos achavam problemático que, ao nível mais fundamental, a natureza parecesse preferir uma teoria tão atabalhoada.

Apesar dos seus sucessos práticos, era evidente para todos que o Modelo Padrão era apenas o número de abertura de uma teoria final que estava ainda por descobrir.

Entretanto, os físicos, entusiasmados com os sucessos extraordinários da teoria quântica quando aplicada às partículas subatómicas, começaram a reexaminar a teoria da relatividade geral, que estava a definir há décadas. E agora os físicos viravam-se para um objetivo mais ambicioso — combinar o Modelo Padrão

com a gravidade, o que significa que seria preciso uma teoria quântica da própria gravidade. Esta seria verdadeiramente uma teoria de tudo, em que poderiam ser calculadas todas as correções quânticas tanto do Modelo Padrão como da relatividade geral.

Anteriormente, a teoria da renormalização era um artifício inteligente que cancelara todas as correções quânticas da QED e do Modelo Padrão. A chave era representar as forças eletromagnética e nuclear como partículas, chamadas fótons e partícula de Yang-Mills, e depois agitar a mão num passe de mágica e fazer os infinitos desaparecerem, reabsorvendo-os noutro lado. Todos esses infinitos desagradáveis eram varridos para debaixo do tapete.

Ingenuamente, os físicos seguiram esta venerável tradição: pegaram na teoria da gravidade de Einstein e introduziram uma nova partícula corpuscular de gravidade, chamada gravitão. Assim, a superfície contínua, introduzida por Einstein para representar o tecido do espaço-tempo, estava agora rodeada por uma nuvem de bilhões de minúsculas partículas ou gravitões.

Infelizmente, os truques penosamente acumulados pelos físicos nos últimos setenta anos para eliminar estes infinitos não resultaram com o gravitão. As correções quânticas criadas pelos gravitões eram infinitas e não podiam ser reabsorvidas noutro lado. Aqui, os físicos embateram numa parede. A série de vitórias terminou abruptamente.

Frustrados, os físicos começaram então a tentar alcançar um objetivo mais modesto. Incapazes de criar uma teoria quântica da gravidade completa, tentaram calcular o que acontece quando a matéria vulgar é quantizada, deixando de lado a gravidade. Isto significava calcular as correções quânticas devido a estrelas e galáxias, mas sem tocar na gravidade. Ao quantizar apenas o átomo, a esperança era criar um degrau a partir de onde obter uma perspetiva sobre o objetivo mais vasto de formular uma teoria quântica da gravidade.

Era de facto um objetivo mais modesto, mas abriu as comportas a um conjunto espantoso de fenómenos físicos novos e fascinantes que viriam a desafiar a forma como vemos o universo. De súbito, os físicos quânticos depararam-se com os fenómenos mais bizarros do universo: buracos negros, *wormholes*, matéria escura e energia escura, viagens no tempo e até a criação do próprio universo.

Mas a descoberta desses estranhos fenómenos cósmicos era também um desafio para a teoria de tudo, que tem agora de explicar não só as partículas subatómicas familiares do Modelo Padrão, mas também todos esses estranhos fenómenos que põem à prova a imaginação humana.

¹ Denis Brian, *Einstein* (Nova Iorque: Wiley, 1996), 359.

² Citado em Walter Moore, *A Life of Erwin Schrödinger* (Cambridge: Cambridge University Press, 1994), 308.

³ Nigel Calder, *The Key to the Universe* (Nova Iorque: Viking, 1977), 15.

⁴ Citado em William H. Cropper, *Great Physicists* (Oxford: Oxford University Press, 2001), 252.

⁵ Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (Nova Iorque: Pantheon, 1992; Nova Torque: Vintage, 1994), 115.

⁶ John Gribbin, *In Search of Schrödinger's Cat* (Nova Iorque: Bantam Books, 1984), 259.

⁷ Citado em Dan Hooper, *Dark Cosmos* (Nova Iorque: HarperCollins, 2006), 59.

⁸ Frank Wilczek e Betsy Devine, *Longing for Harmonies* (Nova Iorque: Norton, 1988), 64.

⁹ Robert P. Crease e Charles C. Mann, *The Second Creation* (Nova Iorque: Macmillan, 1986), 326.

¹⁰ A simetria matemática que mistura três quarks chama-se SU(3), o grupo de Lie unitário especial de grau 3. Assim, ao reorganizar os três quarks de acordo com a simetria SU(3), a equação final para a força nuclear forte tem de permanecer a mesma. A simetria que mistura o elétron e o neutrino na força nuclear fraca chama-se SU(2), o grupo de Lie de grau 2. [Em geral, se começarmos com n férmions, então é simples escrever uma teoria com simetria SU(n)]. A simetria derivada da teoria de Maxwell chama-se U(1). Assim, ao colar estas três teorias, vemos que o Modelo Padrão tem simetria SU(3) x SU(2) x U(1). Embora o Modelo Padrão encaixe com todos os dados experimentais da física subatômica, a teoria parece rebuscada, porque se baseia numa colagem mecânica de três forças.

¹¹ Para comparar a simplicidade das equações de Einstein com a complexidade do Modelo Padrão, vemos que a teoria de Einstein pode ser resumida em apenas uma breve equação:

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

enquanto as equações do Modelo Padrão (em forma muito abreviada), ocupam a maior parte da página, pormenorizando os vários quarks, elétrons, neutrinos, glúons, partículas Yang-Mills e partículas Higgs:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{2}\text{Tr}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} - \frac{1}{2}\text{Tr}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & + (D_\mu\phi)^\dagger D^\mu\phi + \mu^2\phi^\dagger\phi - \frac{1}{2}\lambda(\phi^\dagger\phi)^2 \\ & + \sum_{f=1}^3 (\bar{\ell}_L^f i \not{D} \ell_L^f + \bar{\ell}_R^f i \not{D} \ell_R^f + \bar{q}_L^f i \not{D} q_L^f + \bar{d}_R^f i \not{D} d_R^f + \bar{u}_R^f i \not{D} u_R^f) \\ & - \sum_{f=1}^3 y_\ell^f (\bar{\ell}_L^f \phi \ell_R^f + \bar{\ell}_R^f \phi^\dagger \ell_L^f) \\ & - \sum_{f,g=1}^3 \left(y_d^{fg} \bar{q}_L^f \phi d_R^g + (y_d^{fg})^* \bar{d}_R^g \phi^\dagger q_L^f + y_u^{fg} \bar{q}_L^f \tilde{\phi} u_R^g + (y_u^{fg})^* \bar{u}_R^g \tilde{\phi}^\dagger q_L^f \right), \end{aligned}$$

Extraordinariamente, sabemos que todas as leis físicas do universo podem, em princípio, ser retiradas desta única página de equações. O problema é que as duas teorias — a teoria da relatividade de Einstein e o Modelo Padrão — se baseiam em matemáticas diferentes, suposições diferentes e campos diferentes. O derradeiro objetivo é unir estes dois conjuntos de equações de forma singular, finita e unificada. A observação-chave é que qualquer teoria que afirme ser a teoria de tudo tem de conter ambos os conjuntos de equações e, apesar disso, permanecer finita. Até agora, de todas as várias teorias que foram propostas, a única que consegue fazê-lo é a teoria de cordas.

CAPÍTULO 5

O Universo Escuro

Em 2019, jornais e websites de todo o mundo publicaram com honras de primeira página uma notícia sensacional: os astrónomos tinham tirado a primeira fotografia de um buraco negro. Milhares de milhões de pessoas viram essa imagem notável, uma bola vermelha de gás quente e ardente, com uma silhueta negra redonda no meio. Este objeto misterioso capturou a imaginação do público e dominou os noticiários. Os buracos negros, além de intrigarem e fascinarem os físicos, entraram também na consciência do público através de programas especiais de ciência e inúmeros filmes.

O buraco negro que foi fotografado pelo Telescópio do Horizonte de Acontecimentos fica na galáxia M87, a 53 milhões de anos-luz da Terra. O buraco negro é realmente um monstro, e pesa umas assombrosas 5 mil milhões de vezes a massa do Sol. Todo o nosso sistema solar, incluindo Plutão, caberia facilmente dentro da silhueta negra daquela fotografia.

Para alcançar este feito extraordinário, os astrónomos criaram um supertelelescópio. Normalmente, um radiotelescópio não tem tamanho suficiente para receber a quantidade necessária de sinais de rádio fracos para criar a imagem de um objeto tão distante. Contudo, os astrónomos conseguiram fotografar este buraco negro

ao juntar os sinais de cinco radiotelescópios individuais espalhados pelo mundo. Ao usarem supercomputadores para combinar cuidadosamente estes vários sinais criaram, na prática, um único radiotelescópio gigante, do tamanho do planeta Terra. Esta combinação era tão poderosa que conseguiria, em princípio, detetar uma laranja na superfície da Lua a partir da Terra.

Uma série de descobertas astronómicas novas e notáveis como esta fez renascer o interesse na teoria da gravidade de Einstein. Infelizmente, nos últimos cinquenta anos, a investigação sobre a relatividade geral de Einstein tem estado quase estagnada. As equações eram terrivelmente difíceis e envolviam muitas vezes centenas de variáveis; e as experiências sobre a gravidade eram pura e simplesmente demasiado caras, envolvendo detetores com quilómetros de diâmetro.

A ironia é que, embora Einstein tivesse as suas reservas em relação à teoria quântica, este renascimento atual na investigação sobre a relatividade foi alimentado pela fusão das duas, com a aplicação da teoria quântica à relatividade geral. Tal como mencionámos, um entendimento completo do gravitão e de como eliminar as suas correções quânticas é considerado demasiado difícil, mas uma aplicação mais modesta da teoria quântica às estrelas (negligenciando as correções de gravitões) abriu o firmamento a uma vaga de avanços científicos extraordinários.

1. O Que É um Buraco Negro?

A ideia básica de buraco negro remonta, na realidade, à descoberta das leis da gravidade por Newton. Os seus *Principia* davam-nos uma imagem simples: se disparássemos uma bala de canhão com energia suficiente, esta circundaria completamente a Terra e regressaria ao ponto original.

Mas o que acontece se apontarmos a bala de canhão para cima? Newton compreendia que a bala acabaria por atingir uma altitude máxima e depois cairia de novo na Terra. Contudo, com energia suficiente, a bala de canhão atingiria a velocidade de escape — ou seja, a velocidade necessária para fugir à gravidade da Terra e se erguer no espaço, de onde nunca mais regressaria.

É um exercício simples, usar as leis de Newton para calcular a velocidade de escape da Terra, que sabemos ser de 40.000 quilómetros por hora. Esta foi a velocidade que os nossos astronautas tiveram de alcançar para chegar à Lua em 1969. Se não se atingir a velocidade de escape, ou entramos em órbita ou caímos de novo para a Terra.

Em 1783, um astrónomo chamado John Michell fez a si próprio uma pergunta enganadoramente simples: o que acontece se a velocidade de escape for a velocidade da luz? Se um raio de luz for emitido por uma estrela gigante, tão grande que a sua velocidade de escape é a velocidade da luz, então talvez nem a sua própria luz conseguisse escapar. Toda a luz emitida por esta estrela acabaria

por voltar a cair para a estrela. Michell chamava a isto estrelas escuras, corpos celestes que pareciam negros porque a luz não conseguiria escapar à sua gravidade imensa. No século XVIII, os cientistas sabiam muito pouco sobre a física das estrelas e não conheciam o valor correto da velocidade da luz, e assim esta ideia estagnou durante alguns séculos.

Em 1916, durante a Primeira Guerra Mundial, o físico alemão Karl Schwarzschild estava destacado na frente russa como artilheiro. Enquanto combatia, no meio de uma guerra sangrenta, teve ainda tempo para ler e digerir o famoso trabalho de Einstein de 1915, onde este introduzia a relatividade geral. Num golpe de génio matemático brilhante, Schwarzschild conseguiu encontrar, de alguma forma, uma solução exata para as equações de Einstein. Em vez de resolver as equações para uma galáxia ou para o universo, o que era demasiado difícil, começou com o mais simples de todos os objetos possíveis, uma minúscula partícula corpuscular. Este objeto, por sua vez, aproximar-se-ia do campo de gravidade de uma estrela esférica vista à distância. Era então possível comparar a teoria de Einstein com a experiência.

A reação de Einstein ao trabalho de Schwarzschild foi de entusiasmo. Einstein percebeu que esta solução das suas equações lhe permitiria fazer cálculos mais precisos com a sua teoria, tais como a curvatura da luz das estrelas em torno do Sol e a oscilação do planeta Mercúrio. Assim, em vez de fazer aproximações grosseiras às suas equações, podia calcular os resultados exatos da sua teoria. Foi um progresso monumental, que se viria a revelar importante para o entendimento dos buracos negros.

(Schwarzschild morreu pouco depois da sua extraordinária descoberta. Pesaroso, Einstein escreveu-lhe um obituário comovente.)

No entanto, apesar do impacto enorme da solução de Schwarzschild, esta levantava também algumas questões intrigantes. Desde o princípio, a sua solução tinha propriedades estranhas que forçavam os limites do nosso entendimento de espaço e tempo. Em torno de uma estrela supermaciça havia uma esfera imaginária (à qual ele chamava esfera mágica e que se chama hoje horizonte de acontecimentos). Muito no exterior desta esfera, o campo de gravidade assemelhava-se ao de uma estrela newtoniana normal, pelo que a solução de Schwarzschild podia ser usada para aproximar a sua gravidade. Mas se tivéssemos o azar de nos aproximarmos da estrela e ultrapassar o horizonte de acontecimentos, ficaríamos presos para sempre e morreríamos esmagados. O horizonte de acontecimentos é o ponto de não retorno: tudo o que lá caia, não volta a sair.

Porém, à medida que nos aproximássemos do horizonte de acontecimentos, começariam a acontecer coisas ainda mais bizarras. Por exemplo, encontraríamos raios de luz presos há talvez milhares de milhões de anos e ainda em órbita à volta da estrela. A gravidade que nos puxava os pés seria maior do que a gravidade que nos puxava a cabeça, pelo que ficaríamos esticados como esparguete. Na verdade, esta «esparguetificação» torna-se tão extrema que até os átomos do nosso corpo seriam esticados e acabariam por se desintegrar.

Para quem assistisse a este evento extraordinário de uma grande distância, pareceria que o tempo dentro da nave espacial, na orla do horizonte de acontecimentos, abrandara gradualmente. Na verdade, para quem está de fora, parece que o tempo parou quando a nave atinge o horizonte de acontecimentos. O mais notável é que, para os astronautas dentro da nave, tudo aparenta estar normal enquanto passam pelo horizonte de acontecimentos — isto, claro está, até serem desfeitos.

Este conceito era tão bizarro que, durante muitas décadas, foi considerado ficção científica, um estranho derivado das equações de Einstein que não existia no mundo real. O astrónomo Arthur Eddington escreveu uma vez que «devia haver uma lei da Natureza que impedisse as estrelas de se comportarem de forma tão absurda!».

Einstein até escreveu um trabalho onde argumentava que, em circunstâncias normais, os buracos negros nunca se poderiam formar. Em 1939, mostrou que uma bola de gás giratória nunca poderia ser comprimida pela gravidade no interior do horizonte de acontecimentos.

Ironicamente, nesse mesmo ano, Robert Oppenheimer e o seu aluno Hartland Snyder mostraram que os buracos negros podiam de facto formar-se a partir de processos naturais que Einstein não previu. Se começarmos com uma estrela gigante, dez a quinze vezes maior do que o nosso Sol, quando esta consome todo o seu combustível nuclear pode acabar por explodir como supernova. Se o resultado da explosão for uma estrela que é comprimida pela

gravidade até ao seu horizonte de acontecimentos, então ela pode colapsar num buraco negro. (O nosso Sol não é suficientemente grande para explodir como supernova e o seu horizonte de acontecimentos tem cerca de 3 quilómetros. Não há nenhum processo natural conhecido capaz de comprimir o nosso Sol até 3 quilómetros de diâmetro, e, portanto, ele nunca se tornará num buraco negro.)

Os físicos descobriram que há pelo menos dois tipos de buracos negros. O primeiro é o que resta de uma estrela gigante, como acabámos de descrever. O segundo tipo de buraco negro encontra-se no centro das galáxias. Estes buracos negros galácticos podem ser milhões, ou mesmo milhares de milhões, de vezes maiores do que o nosso Sol. Muitos astrónomos acreditam que há buracos negros no centro de todas as galáxias.

Nas últimas décadas, os astrónomos conseguiram identificar centenas de possíveis buracos negros no espaço. No centro da nossa própria Via Láctea existe um buraco negro monstruoso cuja massa é duas a quatro milhões de vezes a do nosso Sol. Fica na constelação de Sagitário. (Infelizmente, há nuvens de poeira a obscurecer a área, por isso não conseguimos vê-lo. Mas se as nuvens de poeira se dissipassem, então todas as noites uma magnífica bola de fogo de estrelas, com o buraco negro no centro, iluminaria o céu noturno, mais brilhante até, talvez, do que a Lua. Seria de facto uma visão espetacular.)

A última agitação relacionada com os buracos negros surgiu quando a teoria quântica foi aplicada à gravidade. Estes cálculos

libertaram um manancial de fenômenos inesperados que põem à prova os limites da imaginação. E o guia que nos conduziu por este território inexplorado foi alguém que estava totalmente paralisado.

Quando estudava na Universidade de Cambridge, Stephen Hawking era um jovem normal, sem grande sentido de finalidade ou objetivos. Estudou para ser físico, mas sem muito entusiasmo. Era evidente que tinha uma mente brilhante, mas parecia desconcentrado. Um dia, porém, foi-lhe diagnosticada esclerose lateral amiotrófica (ALS) e os médicos deram-lhe dois anos de vida. Embora a sua mente continuasse intacta, o seu corpo degradar-se-ia rapidamente, perdendo toda a capacidade física, até por fim morrer. Deprimido e profundamente abalado, ele percebeu que a sua vida, até esse momento, fora desperdiçada.

Decidiu dedicar os poucos anos que lhe restavam a alguma coisa útil. Para ele, isto significava resolver um dos maiores problemas da física: a aplicação da teoria quântica à gravidade. Felizmente, a sua doença progrediu de forma muito mais lenta do que os médicos tinham previsto, pelo que pôde continuar a sua investigação pioneira nesta nova área mesmo depois de estar confinado a uma cadeira de rodas e de ter perdido o controlo dos membros e até das cordas vocais. Uma vez, fui convidado por Hawking para falar numa conferência que ele estava a organizar. Tive o prazer de o visitar em sua casa e fiquei surpreendido ao ver os vários instrumentos que lhe permitiam prosseguir com a sua investigação. Um desses aparelhos servia para virar páginas. Podíamos lá colocar um livro e ele virava automaticamente as páginas. Fiquei impressionado por

ver até que ponto Hawking estava determinado a não permitir que a doença o afastasse do objetivo da sua vida.

Naquela altura, a maioria dos físicos teóricos estava a trabalhar na teoria quântica, mas um pequeno punhado de renegados e obstinados tentava encontrar mais soluções para a equação de Einstein. Hawking colocou a si mesmo uma questão diferente, mas profunda: o que acontece quando combinamos esses dois sistemas e aplicamos a mecânica quântica a um buraco negro?

Ele percebeu que o problema de calcular correções quânticas para a gravidade era demasiado difícil de resolver. Assim, escolheu uma tarefa mais simples: calcular correções quânticas só para os átomos no interior de um buraco negro, ignorando as correções quânticas mais complexas dos gravitões.

Quanto mais lia sobre buracos negros, mais se apercebia de que havia algo errado. Começou a suspeitar de que o pensamento tradicional — nada pode escapar de um buraco negro — violava a teoria quântica. Na mecânica quântica, tudo é incerto. Um buraco negro parece perfeitamente negro porque absorve absolutamente tudo. Mas a escuridão perfeita violava o princípio da incerteza. Até a escuridão tinha de ser incerta.

Chegou então à conclusão revolucionária de que os buracos negros tinham necessariamente de emitir um brilho muito leve de radiação quântica.

Hawking demonstrou então que a radiação emitida por um buraco negro era, na realidade, uma forma de radiação de corpo negro. Para a calcular, concluiu que o vácuo não era apenas o estado de nada, mas fervilhava na realidade com atividade quântica. Na teoria quântica, até o nada está num estado de incerteza constante e em movimento, onde elétrons e antieletrões podiam saltar subitamente desse vácuo, depois colidir e voltar a desaparecer no vácuo. Assim, o nada fervilhava na realidade com atividade quântica. Apercebeu-se então de que, se o campo gravitacional fosse suficientemente intenso, podiam criar-se pares de elétrons e antieletrões a partir desse vácuo, originando aquilo a que se chama partículas virtuais. Se um membro do par cair no buraco negro enquanto a outra partícula escapa, isso criaria aquilo a que se chama agora radiação de Hawking. A energia para criar este par de partículas vem da energia contida no campo de gravidade do buraco negro. Como a segunda partícula deixa o buraco negro para sempre, isso significa que o conteúdo líquido de matéria e energia do buraco negro e do seu campo de gravidade diminuiu.

A isto chama-se evaporação do buraco negro e descreve o derradeiro destino de todos os buracos negros: emitirão suavemente radiação de Hawking durante biliões de anos, até esgotarem toda a sua radiação e morrerem numa explosão ardente. Assim, até os buracos negros têm um tempo de vida finito.

Daqui a biliões e biliões de anos, as estrelas do universo terão esgotado todo o seu combustível nuclear e ficarão escuras. Só os buracos negros sobreviverão, nessa Era desoladora. Mas até os

buracos negros têm de se evaporar, a dada altura, deixando apenas um mar de partículas subatômicas. Hawking fez a si próprio outra pergunta: o que acontece se atirmos um livro para um buraco negro? A informação constante desse livro perder-se-á para sempre?

De acordo com a mecânica quântica, a informação nunca se perde. Mesmo que queimemos um livro, se analisássemos meticulosamente todas as moléculas de papel queimado seria possível reconstruir todo o livro.

Mas Hawking mexeu num vespeiro de controvérsia ao dizer que a informação atirada para dentro de um buraco negro se perde de facto para sempre e que, portanto, a mecânica quântica não se aplica num buraco negro.

Tal como já mencionámos, Einstein disse uma vez que «Deus não joga aos dados com o universo» — ou seja, não podemos reduzir tudo a sorte e incerteza. Hawking acrescentou: «Às vezes, Deus atira os dados para onde não os conseguimos encontrar», querendo com isto dizer que os dados podem ir parar dentro de um buraco negro, onde as leis quânticas podem não ser válidas. Assim, as leis da incerteza falham quando passamos do horizonte de acontecimentos.

Desde então, outros físicos saíram em defesa da mecânica quântica, mostrando que teorias avançadas, como a teoria de cordas que discutiremos no capítulo seguinte, podem conservar

informação mesmo na presença de buracos negros. Por fim, Hawking admitiu que talvez estivesse errado. Mas propôs a sua própria solução inovadora. Talvez se atirássemos um livro para dentro de um buraco negro a informação não se perdesse para sempre, como ele julgara anteriormente, mas voltasse a sair sob a forma de radiação de Hawking. Codificada na leve radiação de Hawking está toda a informação necessária para recriar o livro original. Assim, talvez Hawking estivesse incorreto, mas a solução correta encontra-se na radiação que ele próprio descobrira anteriormente.

Em conclusão, se a informação se perde ou não num buraco negro ainda é uma questão debatida entre físicos. Mas, fundamentalmente, podemos ter de esperar até termos a teoria da gravidade quântica final, que inclua as correções quânticas para gravitões. Entretanto, Hawking virou-se para outra questão intrigante que envolve a combinação da teoria quântica e da relatividade geral.

2. Através do *Wormhole*

Se os buracos negros devoram tudo, para onde vão as coisas?

A resposta mais curta é: não sabemos. Talvez este problema venha a ser resolvido pela unificação da teoria quântica com a relatividade geral.

Só quando encontrarmos finalmente uma teoria quântica da gravidade (e não apenas da matéria) é que podemos responder a esta pergunta: o que existe do outro lado de um buraco negro?

Porém, se aceitarmos cegamente a teoria de Einstein, teremos problemas, pois as suas equações preveem que a força gravitacional no centro de um buraco negro ou no princípio dos tempos é infinita, o que não faz sentido.

Mas, em 1963, o matemático Roy Kerr encontrou uma solução totalmente nova para as equações de Einstein aplicadas a um buraco negro em rotação. Anteriormente, no trabalho de Schwarzschild, os buracos negros colapsavam num minúsculo ponto estacionário, chamado singularidade, onde os campos gravitacionais se tornam infinitos e tudo era esmagado até um mero ponto. Mas se analisarmos as equações de Einstein para um buraco negro em rotação, Kerr descobriu que acontecem coisas estranhas.

Primeiro, o buraco negro não colapsa num ponto. Em vez disso, colapsa num anel que gira rapidamente. (As forças centrífugas do anel a girar são suficientemente fortes para o impedir de colapsar sob a sua própria gravidade.)

Segundo, se uma pessoa caísse através do anel, é possível que não morresse esmagada, mas sim que atravessasse o anel. Na realidade, a gravidade dentro do anel é finita.

Terceiro, a matemática indica que, ao passarmos pelo anel, poderíamos entrar num universo paralelo. Deixaríamos literalmente o nosso universo e entraríamos num universo irmão. Pense em duas folhas de papel, uma em cima da outra. Depois espete uma palhinha a atravessar ambas. Ao passar através da palhinha, deixa um universo e entra num universo paralelo. A palhinha é aquilo a que se chama um *wormhole*.

Quarto, ao reentrar no anel, poderíamos passar ainda para outro universo — tal como apanhar um elevador num prédio passa de um andar para o seguinte, ou de um universo para outro. De cada vez que reentrasse no *wormhole*, poderia entrar num universo completamente novo. Isto introduziu assim uma imagem nova e surpreendente de um buraco negro. No centro de um buraco negro em rotação encontramos algo semelhante ao espelho da Alice. De um lado, a província tranquila de Oxford, Inglaterra; mas, se enfiarmos a mão através do espelho, poderíamos ir parar a outro lado completamente diferente.

Quinto, se conseguíssemos passar pelo anel, há também a probabilidade de irmos parar a uma região distante do nosso mesmo universo. Assim, o *wormhole* pode ser como um sistema de metropolitano, um atalho invisível através de espaço e tempo. Os cálculos mostram que podíamos conseguir ir mais longe do que a velocidade da luz, ou até voltar atrás no tempo, talvez sem violar quaisquer leis físicas conhecidas.

Estas conclusões bizarras, por mais chocantes que pareçam, não podem ser postas de lado com indiferença, pois são soluções da

equação de Einstein e descrevem buracos negros em rotação, aqueles que se crê hoje serem, de longe, os mais comuns.

Os *wormholes* foram, na verdade, apresentados pela primeira vez pelo próprio Einstein, em 1935, num trabalho elaborado com Nathan Rosen. Eles imaginaram dois buracos negros unidos, que se assemelhariam a dois funis no espaço-tempo. Se caíssemos num dos funis, seríamos projetados pelo outro, sem morrermos esmagados.

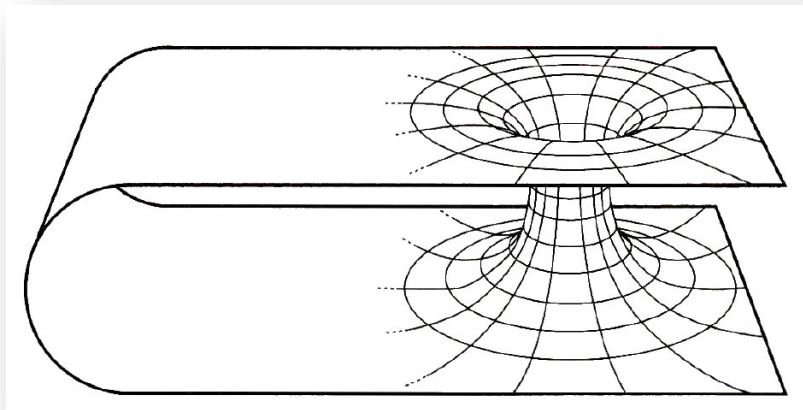


Figura 10. Em princípio, seria possível, hipoteticamente, alcançar as estrelas ou mesmo o passado ao atravessar o *wormhole*.

Há uma passagem famosa no romance de T. H. White, *The Once and Future King*: «Tudo o que não é proibido é obrigatório.» Os físicos levam esta ideia muito a sério. A menos que haja alguma lei física contra um fenómeno, talvez ele exista, algures no universo.

Por exemplo, embora os *wormholes* sejam notoriamente difíceis de criar, alguns físicos especularam que podem ter existido no princípio dos tempos, expandindo-se depois do Big Bang. Talvez

ocorram naturalmente. Um dia, os nossos telescópios podem mesmo ver um *wormhole* no espaço. Embora os *wormholes* tenham incendiado a imaginação dos escritores de ficção científica, criar um em laboratório coloca uma série de problemas intimidantes.

Primeiro, é preciso reunir vastas quantidades de energia positiva, comparável a um buraco negro, para abrir o portal no espaço-tempo. Só isto exigiria a tecnologia de uma civilização muito avançada. Portanto, não esperamos que algum inventor amador consiga criar um *wormhole* no seu laboratório na cave de casa nos próximos tempos.

Segundo, um *wormhole* destes seria instável e fechar-se-ia sobre si próprio, a menos que adicionássemos um ingrediente novo e exótico chamado matéria negativa ou energia negativa, o que é completamente diferente de antimatéria. A matéria e a energia negativas são repulsivas, o que pode impedir o *wormhole* de se fechar.

Os físicos nunca viram matéria negativa. Na verdade, esta obedeceria à antigravidade, pelo que cairia para cima em vez de cair para baixo. Se a matéria negativa tivesse existido na Terra há milhares de milhões de anos, teria sido repelida pela gravidade da Terra e projetada para o espaço sideral. Portanto, não esperamos encontrar matéria negativa na Terra.

A energia negativa, em contraste com a matéria negativa, existe realmente, mas apenas em quantidades minúsculas, demasiado

pequenas para ter algum valor prático. Só uma civilização muito avançada, talvez milénios mais avançada do que a nossa, conseguiria dominar energia positiva e negativa suficientes para criar um *wormhole* e depois o impedir de colapsar.

Terceiro, a radiação da própria gravidade (chamada radiação gravitacional) pode ser suficiente para fazer explodir o *wormhole*. Em última análise, a resposta à pergunta «O que acontece quando caímos num buraco negro?» tem de esperar por uma verdadeira teoria de tudo, na qual estejam quantizadas tanto a matéria como a gravidade.

Alguns físicos propuseram seriamente a ideia controversa de que, quando as estrelas caem num buraco negro, não são esmagadas até à singularidade, mas sim que explodem do outro lado de um *wormhole*, criando um buraco branco. Um buraco branco obedece precisamente às mesmas equações que um buraco negro, exceto que a seta do tempo é invertida, pelo que a matéria é projetada de um buraco branco. Os físicos já procuraram buracos brancos no espaço, mas até agora sem êxito. O objetivo de mencionar os buracos brancos é que talvez o Big Bang fosse, originalmente, um buraco branco, e todas as estrelas e planetas que vemos no firmamento tenham sido projetados para fora de um buraco negro — há cerca de 14 mil milhões de anos.

A questão é que só uma teoria de tudo pode dizer-nos o que existe do outro lado de um buraco negro. Só através do cálculo das correções quânticas à gravidade podemos responder às questões mais intrigantes colocadas pelos *wormholes*.

Contudo, se os *wormholes* podem um dia levar-nos instantaneamente para o outro lado da galáxia, poderão também levar-nos ao passado?

3. Viajar no Tempo

As viagens no tempo são uma das bases da ficção científica desde que H. G. Wells escreveu *A Máquina do Tempo*. Podemos mover-nos livremente em três dimensões (para a frente, para o lado e para cima), portanto talvez haja uma maneira de nos movermos na quarta dimensão, o tempo. Wells imaginou uma máquina do tempo na qual uma pessoa poderia entrar, rodar um manípulo e viajar milhares de anos para o futuro, até ao ano 802.701 d. C.

Desde então, os cientistas estudaram a possibilidade de se viajar no tempo. Quando Einstein apresentou pela primeira vez a teoria da gravidade, em 1915, estava preocupado com a possibilidade de as suas equações poderem permitir a distorção do tempo de modo a entrar no passado, algo que ele acreditava que indicaria uma falha na sua teoria. Mas este problema tornou-se uma possibilidade real em 1949, quando o seu vizinho no famoso Instituto de Estudos Avançados de Princeton, o grande matemático Kurt Gödel, descobriu que o universo girava e que, se conseguíssemos viajar suficientemente depressa em torno deste universo em rotação, poderíamos entrar no passado — ou seja, regressar antes de termos partido. Einstein ficou estupefacto com esta solução pouco ortodoxa. Nas suas memórias, Einstein concluiu finalmente que, embora as viagens no tempo fossem possíveis no universo de

Gödel, essa possibilidade podia ser posta de lado «com bases físicas», querendo com isso dizer que o universo se expandia e não rodava.

Hoje, embora os físicos ainda não estejam convencidos quanto à possibilidade de viajar no tempo, estão a levar a questão muito a sério. Descobriram-se várias soluções para as equações de Einstein que admitem a possibilidade de viajar no tempo.

Para Newton, o tempo era como uma seta. Depois de disparada, avançaria infalivelmente com uma velocidade uniforme através do universo. Um segundo na Terra era um segundo em todo o lado do espaço. Seria possível sincronizar relógios em qualquer ponto do universo. Para Einstein, contudo, o tempo era mais como um rio. Podia acelerar ou abrandar à medida que percorria o seu curso sinuoso entre estrelas e galáxias. O tempo podia avançar a ritmo diferente através do universo. O quadro atual, contudo, diz que o rio do tempo pode ter redemoinhos que nos arrastariam para o passado (os físicos chamam-lhes curvas temporais fechadas). Ou talvez o rio do tempo se bifurque em dois rios, e a linha temporal se divida, criando dois universos paralelos.

Hawking estava tão fascinado pelas viagens no tempo que lançou um desafio aos outros físicos. Ele acreditava que devia haver uma lei da física escondida, ainda por descobrir, à qual chamou a conjectura de proteção cronológica, e que excluía de forma definitiva as viagens no tempo. Porém, por mais que se esforçasse, nunca conseguiu provar esta hipótese. Isto significa que as viagens no

tempo podem ainda ser consistentes com as leis da física, sem nada que impeça a existência de máquinas do tempo.

Além disso, em tom irônico, ele disse que as viagens no tempo não eram possíveis, porque «onde estão todos os turistas do futuro?». Em cada evento histórico marcante devia haver hordas de turistas com as suas máquinas fotográficas a acotovelarem-se uns aos outros para tentar tirar a melhor fotografia para mostrar aos amigos no futuro.

Para já, pense no caos que seria possível criar se tivesse uma máquina do tempo. Se voltasse atrás no tempo podia apostar na Bolsa de Valores e tornar-se bilionário. Podia alterar o rumo de eventos passados. Seria impossível registar a história. Os historiadores ficariam no desemprego.

Claro que as viagens no tempo têm problemas sérios. Há uma série de paradoxos lógicos associados às viagens no tempo, como por exemplo:

- Tornariam o presente impossível: se eu voltasse atrás no tempo e conhecesse o meu avô em pequeno e o matasse, como poderia eu existir?
- Máquina do tempo vinda do nada: uma pessoa do futuro dá-lhe o segredo das viagens no tempo. Anos depois, você volta atrás no tempo e dá o segredo das viagens no tempo ao seu eu mais jovem. De onde veio o segredo, afinal?

- Ser a sua própria mãe: o escritor de ficção científica Robert Heinlein escreveu sobre a possibilidade de uma pessoa se tornar os seus próprios antepassados. Imagine que uma rapariga órfã cresce, mas se transforma num homem. Esse homem então volta atrás no tempo, encontra-se consigo próprio quando era uma rapariga e tem uma filha com ela. O homem pega então nesta bebé e recua mais ainda no tempo e deixa-a no mesmo orfanato, e depois repete o ciclo. Assim, ela torna-se a sua própria mãe, filha, avó, neta, etc.

Em última análise, a resolução final de todos estes paradoxos pode surgir quando for formulada a teoria da gravidade quântica completa. Por exemplo, talvez quando entrarmos numa máquina do tempo a linha temporal se divida e criemos um universo quântico paralelo. Imaginemos que voltava atrás no tempo e salvava Abraham Lincoln de ser assassinado no Teatro Ford. Talvez tivesse salvado Abraham Lincoln, mas num universo paralelo. Assim, o Abraham Lincoln no seu universo original morreu, e nada poderá modificar isso. Mas o universo dividiu-se em dois, e você salvou o presidente Lincoln num universo paralelo.

Assim, se partirmos do princípio de que uma linha temporal pode dividir-se num universo paralelo, todos os paradoxos das viagens no tempo poderiam ser solucionados.

A questão das viagens no tempo só poderá ser definitivamente resolvida quando conseguirmos calcular as correções quânticas gravitacionais, que temos ignorado até agora. Os físicos aplicaram

a teoria quântica a estrelas e *wormholes*, mas a chave é aplicar a teoria quântica à própria gravidade, através dos gravitões, o que requer uma teoria de tudo.

Esta discussão levanta questões interessantes. Poderá a mecânica quântica explicar completamente a natureza do Big Bang? Poderá a mecânica quântica aplicada à gravidade responder a uma das grandes questões da ciência: o que aconteceu antes do Big Bang?

4. Como foi Criado o Universo?

De onde veio o universo? O que o colocou em movimento? Estas são talvez as maiores questões de todas, na teologia e na ciência, e alvo de interminável especulação.

Os antigos egípcios acreditavam que o universo começara como um ovo cósmico a flutuar no Nilo. Alguns polinésios acreditavam que o universo começara como um coco cósmico. Os cristãos acreditam que o universo foi colocado em movimento quando Deus disse «Faça-se luz!»

A origem do universo sempre fascinou os físicos, em particular depois de Newton nos dar uma teoria da gravidade convincente. Contudo, quando Newton tentou aplicar a sua teoria ao universo que vemos à nossa volta, deparou-se com problemas.

Em 1692, recebeu uma carta perturbadora do clérigo Richard Bentley. Na carta, Bentley pedia a Newton que explicasse uma falha oculta e possivelmente prejudicial na sua teoria. Se o universo é finito, e se a gravidade é sempre atrativa e não repulsiva, então, a dada altura, todas as estrelas do universo serão atraídas umas para as outras. Na verdade, com o tempo suficiente, todas coalescerão numa única estrela gigantesca. Assim, um universo finito devia ser instável e acabaria por colapsar. Uma vez que isso não acontecia, tinha de haver uma falha na teoria de Newton.

A seguir, argumentou que as leis de Newton previam um universo instável mesmo que o universo fosse infinito. Num universo infinito, com um número infinito de estrelas, a soma de todas as forças que puxam uma estrela da esquerda e da direita seria também infinita. Logo, essas forças infinitas acabariam por desfazer as estrelas e assim todas as estrelas se desintegrariam.

Newton ficou perturbado com esta missiva, porque não lhe ocorrera aplicar a sua teoria a todo o universo. Por fim, encontrou uma resposta inteligente, mas incompleta, a esta questão.

Sim, admitiu, se a gravidade é sempre atrativa e nunca repulsiva, então as estrelas no universo podem ser instáveis. Mas há uma lacuna neste argumento. Se partirmos do princípio de que o universo é, em média, totalmente uniforme e infinito em todas as direções, num universo estático desta natureza todas as forças da gravidade se cancelariam mutuamente e o universo ficaria de novo estável. Para qualquer estrela, as forças da gravidade que agiriam

sobre ela, de todas as estrelas distantes em diferentes direções, acabariam por somar zero, e, portanto, o universo não colapsaria.

Embora fosse uma solução inteligente para o problema, Newton tinha consciência de que ainda havia uma potencial falha na sua solução. O universo podia ser uniforme em média, mas não pode ser exatamente uniforme em todos os pontos, pelo que deve haver desvios ínfimos. Como um castelo de cartas, parece estável, mas a mais pequena falha fará com que toda a estrutura se desmorone. Assim, Newton tinha inteligência suficiente para compreender que um universo infinito uniforme era de facto estável, mas estava sempre à beira do colapso. Por outras palavras, o cancelamento das forças infinitas tinha de ser infinitamente preciso ou o universo colapsaria ou desintegrar-se-ia.

Assim, a conclusão final de Newton era de que o universo era infinito e uniforme em média, mas de vez em quando Deus tinha de ajustar as estrelas no universo para que não colapsassem sob a gravidade.

5. Por Que é o Céu Negro à Noite?

Isto, porém, levantava outro problema. Se começarmos com um universo que é infinito e uniforme, então para onde quer que olhemos, no espaço, o nosso olhar incidirá numa estrela. Mas como existe um número infinito de estrelas, devia haver uma quantidade infinita de luz a entrar nos nossos olhos, vinda de todas as direções.

O céu à noite devia ser branco e não negro. A isto chama-se paradoxo de Olbers.

Algumas das grandes mentes da história tentaram debruçar-se sobre este problema complicado. Kepler, por exemplo, afastou o paradoxo afirmando que o universo era finito, e, portanto, não havia paradoxo algum. Outros teorizaram que nuvens de poeira obscurecem a luz das estrelas. (Embora isto não explique o paradoxo, pois, numa quantidade de tempo infinita, as nuvens de poeira começam a aquecer e emitem radiação do corpo negro, semelhante a uma estrela. E o universo voltaria a ser branco.)

A resposta final acabou por ser dada por Edgar Allan Poe, em 1848. Como era um astrónomo amador, ficou fascinado com o paradoxo e disse que o céu à noite é negro porque, se viajarmos para trás no tempo, acabaremos por encontrar a dada altura um término — ou seja, o princípio do universo. Por outras palavras, o céu à noite é negro porque o universo tem uma idade finita. Não recebemos luz do passado infinito, o que faria com que o céu fosse branco, porque o universo nunca teve um passado infinito. Isto significa que os telescópios virados para as estrelas mais distantes acabarão por alcançar a escuridão do próprio Big Bang.

Assim, é verdadeiramente espantoso que através de puro pensamento, sem fazer experiência alguma, seja possível concluir que o universo deve ter tido um princípio.

6. A Relatividade Geral e o Universo

Einstein teve de confrontar estes paradoxos intrigantes quando formulou a relatividade geral em 1915.

Na década de 1920, quando Einstein começou a aplicar a sua teoria ao próprio universo, os astrónomos disseram-lhe que o universo era estático, não se expandia nem se contraía. Einstein, porém, encontrou algo perturbador nas suas equações. Quando tentou resolvê-las, as equações disseram-lhe que o universo era dinâmico, e ou se expandia ou se contraía. (Ele não se apercebeu disso na altura, mas esta era a solução para a questão colocada por Richard Bentley. O universo não colapsava sob a gravidade porque o universo estava em expansão, ultrapassando assim a tendência para colapsar.)

De modo a encontrar um universo estático, Einstein foi obrigado a adicionar um fator inventado (chamado a constante cosmológica) às suas equações. Ao ajustar o seu valor manualmente, conseguia cancelar a expansão ou contração do universo.

Mais tarde, em 1929, o astrónomo Edwin Hubble, utilizando o gigantesco telescópio do Observatório de Mount Wilson na Califórnia, conseguiu fazer uma descoberta surpreendente. O universo, afinal, estava em expansão, tal como previam originalmente as equações de Einstein. E fez esta descoberta histórica ao analisar as alterações Doppler de galáxias distantes. (Quando uma estrela se afasta de nós, o comprimento de onda da

sua luz estica-se ao ponto de ficar ligeiramente avermelhado. Quando a estrela se aproxima de nós, o comprimento de onda comprime-se e, portanto, fica ligeiramente azulado. Ao analisar cuidadosamente as galáxias, Hubble descobriu que, em média, as galáxias tinham uma alteração avermelhada e, portanto, estavam a afastar-se de nós. O universo está em expansão.)

Em 1931, Einstein visitou o Observatório de Mount Wilson e encontrou-se com Hubble. Quando soube que a constante cosmológica era desnecessária, que o universo afinal estava em expansão, admitiu que a constante cosmológica era a sua «maior gafe». (Na verdade, como veremos, a constante cosmológica ressurgiu em anos recentes, pelo que até as gafes de Einstein, ao que parece, abrem áreas completamente novas de investigação científica.)

Era também possível levar este resultado um passo mais além e calcular a idade do universo. Uma vez que Hubble conseguia calcular a velocidade a que as galáxias estavam a afastar-se, devia ser possível «rebobinar o filme» e calcular há quanto tempo estava esta expansão a ocorrer. A resposta original para a idade do universo foi de 1,8 mil milhões de anos (o que foi embaraçoso, já que se sabia que a Terra era mais velha do que isso — 4,6 mil milhões de anos. Porém, felizmente, os últimos dados de satélite do satélite Planck indicam que a idade do universo é de 13,8 mil milhões de anos).

7. O Resplendor Crepuscular Quântico do Big Bang

A próxima revolução na cosmologia teve lugar quando os físicos começaram a aplicar a teoria quântica ao Big Bang. O físico russo George Gamow questionou se, uma vez que o universo teria começado como uma explosão gigantesca e superquente, algum desse calor teria sobrevivido até hoje. Se aplicarmos a teoria quântica ao Big Bang, então a bola de fogo original deve ter sido um radiador quântico do corpo negro. Uma vez que as propriedades de um radiador do corpo negro são bem conhecidas, devia ser possível calcular a radiação que é o resplendor crepuscular, ou eco, do Big Bang.

Usando as experiências primitivas disponíveis, em 1948, Gamow e os seus colegas Ralph Alpher e Robert Herman calcularam que a temperatura do resplendor crepuscular do Big Bang devia ser hoje de cinco graus acima do zero absoluto. (O valor é, na verdade, 2,73 graus Kelvin.) Esta é a temperatura do universo depois de ter arrefecido durante milhares de milhões de anos.

Esta previsão foi confirmada em 1964, quando Arno Penzias e Robert Wilson usaram o gigantesco radiotelescópio de Holmdel para detetar esta radiação residual no espaço. (Ao princípio, pensaram que esta radiação de fundo se devesse a um defeito dos seus instrumentos. Reza a lenda que se aperceberam do seu erro quando deram uma palestra em Princeton e alguém no público disse: «Ou detetaram merda de pássaro, ou a criação do universo» Para o testar, tiveram de raspar cuidadosamente todos os excrementos de pombo do radiotelescópio.)

Hoje, esta radiação de fundo de micro-ondas é talvez a evidência mais persuasiva e convincente do Big Bang. Tal como previsto, fotografias de satélite recentes da radiação de fundo mostram uma bola de fogo de energia uniforme distribuída regularmente pelo universo. (Quando ouvimos estática no rádio, parte dessa estática resulta, na verdade, do Big Bang.)

Na verdade, estas fotografias de satélite são agora tão precisas que é possível detetar ondulações minúsculas, ínfimas, na radiação de fundo devido ao princípio da incerteza quântica. No instante da criação, deve ter havido flutuações quânticas que causaram estas ondulações. Um Big Bang perfeitamente uniforme violaria o princípio da incerteza. Estas ondulações foram-se expandindo com o Big Bang para criar as galáxias que vemos à nossa volta. (Na verdade, se os nossos satélites não tivessem detetado essas ondulações quânticas na radiação de fundo, a sua ausência teria destruído a esperança de aplicar a teoria quântica ao universo.)

Isto dá-nos uma imagem nova e extraordinária da teoria quântica. O mero facto de existirmos na galáxia Via Láctea, na presença de milhares de milhões de outras galáxias, deve-se a estas ínfimas flutuações quânticas no Big Bang original. Há milhares de milhões de anos, tudo o que vemos à nossa volta era um ponto minúsculo nesta radiação de fundo.

O próximo passo na aplicação da teoria quântica à gravidade foi quando as lições da teoria quântica e o Modelo Padrão foram aplicados à relatividade geral.

8. Inflação

Animados pelo sucesso do Modelo Padrão na década de 1970, os físicos Alan Guth e Andrei Linde perguntaram a si próprios: poderão as lições aprendidas com o Modelo Padrão e a teoria quântica ser diretamente aplicadas ao Big Bang?

Era uma pergunta inovadora, já que aplicar o Modelo Padrão à cosmologia era algo ainda inexplorado. Guth reparou que havia dois aspectos intrigantes no universo que não podiam ser explicados pelo Big Bang tal como o concebiam.

Primeiro, o problema da planitude. A teoria de Einstein diz que o tecido do espaço-tempo deve ter uma ligeira curvatura. Porém, ao analisar a curvatura do universo, ele parece muito mais plano do que o previsto pela teoria de Einstein. Na verdade, o universo parece ser perfeitamente plano, dentro das margens de erro experimentais.

Segundo, é muito mais uniforme do que devia ser. No Big Bang, devia ter havido irregularidades e imperfeições na bola de fogo original. Em vez disso, o universo parece ser bastante uniforme, para onde quer que olhemos no firmamento.

Ambos estes paradoxos podem ser resolvidos com a invocação da teoria quântica, através de um fenómeno a que Guth chamou inflação. Primeiro, segundo este quadro, o universo passou por uma expansão muito mais rápida do que o originalmente proposto para

o Big Bang. Esta expansão fantástica, basicamente, achatou o universo e eliminou qualquer curvatura que existisse no universo original.

Segundo, o universo original podia ser irregular, mas uma parte ínfima desse universo original era uniforme, e foi inflacionada até atingir um tamanho enorme. Assim, isso explicaria por que razão o universo parece ser tão uniforme hoje, porque descendemos de um pedaço minúsculo e uniforme da bola de fogo maior que nos deu o Big Bang.

Esta inflação tem implicações de grande alcance. Significa que o universo visível que vemos à nossa volta é, na realidade, uma parte minúscula, infinitesimal, de um universo muito maior, que nunca veremos por estar tão distante.

Mas o que terá causado esta inflação? O que a pôs em movimento? Por que é que o universo se expandiu? Guth foi então buscar alguma inspiração ao Modelo Padrão. Na teoria quântica, começamos com uma simetria e depois quebramo-la com o bosão de Higgs para obter o universo que vemos à nossa volta. Da mesma forma, Guth teorizou então que talvez houvesse um novo tipo de bosão de Higgs (os inflatões) que possibilitava a inflação. Tal como no bosão de Higgs original, o universo começara no falso vácuo que nos deu a Era da inflação rápida. Mas depois ocorreram bolhas quânticas no campo do inflatão. Dentro da bolha, surgiu o verdadeiro vácuo, onde a inflação parou. O nosso universo emergiu como uma dessas bolhas. O universo abrandou dentro da bolha, dando-nos a expansão atual.

Até agora, a inflação parece encaixar com os dados astronômicos. É, de momento, a teoria dominante. Mas tem consequências inesperadas. Se invocarmos a teoria quântica, isso significa que o Big Bang pode acontecer uma e outra vez. Podem estar a nascer constantemente universos novos a partir do nosso universo.

Isso significa que o nosso universo é, na realidade, uma única bolha num banho de espuma de universos, o que cria um multiverso de universos paralelos. Tal deixa ainda em aberto uma questão intrigante: o que impulsionou a inflação originalmente? Isto, como veremos no próximo capítulo, requer uma teoria ainda mais avançada, uma teoria de tudo.

9. Universo em Fuga

A relatividade geral não só nos dá uma perspetiva sem precedentes sobre o princípio do universo, como nos dá também uma imagem do seu derradeiro destino. As antigas religiões, claro, deram-nos imagens desoladoras do fim dos tempos. Os antigos vikings acreditavam que o mundo acabará no Ragnarok, ou Crepúsculo dos Deuses, quando uma tempestade de neve gigantesca engolirá todo o planeta e os deuses travarão a batalha final contra os seus inimigos celestiais. Para os cristãos, o Livro do Apocalipse prevê catástrofes, cataclismos e a chegada dos Quatro Cavaleiros do Apocalipse, que precede a Segunda Vinda.

Mas para um físico há tradicionalmente duas formas como tudo terminará. Se a densidade do universo for baixa, então não há gravidade suficiente das estrelas e galáxias para inverter a expansão cósmica, e o universo expandir-se-á para sempre e morrerá lentamente no Big Freeze (Grande Congelamento). As estrelas acabarão por consumir todo o seu combustível nuclear, o céu ficará negro e até os buracos negros se evaporarão. O universo acabará num mar superfrio, desprovido de vida, de partículas subatômicas à deriva.

Se o universo for suficientemente denso, então a gravidade das estrelas e galáxias pode ser o bastante para inverter a expansão cósmica. Então as estrelas e galáxias acabarão por colapsar no Big Crunch (Grande Colapso), quando as temperaturas dispararem e devorarem toda a vida no universo. (Alguns físicos conjecturaram até que o universo pode depois regressar noutra Big Bang, criando um universo oscilatório.)

No entanto, em 1998, os astrónomos fizeram um anúncio surpreendente que derrubou muitas das nossas convicções e nos obrigou a rever os manuais. Ao analisarem supernovas distantes através do universo, descobriram que o universo não estava a abrandar na sua expansão, como se julgava anteriormente, mas, pelo contrário, a acelerar. Na verdade, estava a entrar em modo de fuga.

Foi preciso rever os dois cenários anteriores e daí emergiu uma nova teoria. Talvez o universo morra em algo chamado Big Rip (Grande Rutura), no qual a expansão do universo acelera até uma

velocidade estonteante. O universo expandir-se-á tão depressa que o céu à noite ficará completamente negro (uma vez que a luz das estrelas mais próximas não conseguirá chegar até nós) e tudo se aproximará do zero absoluto.

A essa temperatura, não pode existir vida. Mesmo as moléculas no espaço exterior perdem a sua energia.

O que pode estar a impulsionar esta expansão acelerada é algo que Einstein pôs de lado na década de 1920, a constante cosmológica, a energia do vácuo, a que se chama agora energia escura. Surpreendentemente, a quantidade de energia escura no universo é enorme. Mais de 68,3 por cento de toda a matéria e energia no universo encontra-se nesta forma misteriosa. (Coletivamente, a energia escura e a matéria escura compõem a maior parte da matéria/energia, mas são duas entidades distintas que não devem ser confundidas.)

Ironicamente, não há qualquer teoria conhecida capaz de explicar isto. Se tentarmos calcular às cegas a quantidade de energia escura no universo (usando as suposições da relatividade e a teoria quântica), chegamos a um valor que é 10^{120} vezes maior do que o valor real! (Isto corresponde ao algarismo 1 seguido por 120 zeros.)

Esta é a maior disparidade em toda a história da ciência. E a aposta não podia ser mais elevada: é o derradeiro destino do próprio universo que está em jogo.

Isto pode dizer-nos como o universo morrerá.

10. Procura-se: o Gravitão

Embora a pesquisa na área da relatividade geral esteja estagnada há décadas, a recente aplicação do *quantum* à relatividade abriu novos e inesperados panoramas, em especial à medida que instrumentos novos e poderosos ficam *online*. Houve um ressurgimento de nova investigação.

Porém, até agora, só discutimos a aplicação da mecânica quântica à matéria que se move no interior dos campos gravitacionais da teoria de Einstein. Não discutimos ainda uma questão muito mais difícil: aplicar a mecânica quântica à própria gravidade, sob a forma de gravitões.

E é aqui que nos deparamos com a maior questão de todas: encontrar uma teoria quântica da gravidade, algo que tem vindo há décadas a encher de frustração os maiores físicos do mundo. Vamos então rever o que aprendemos até aqui. Se bem se lembram, quando aplicámos a teoria quântica à luz, introduzimos o fóton, uma partícula de luz. À medida que este fóton se move, é rodeado por campos elétricos e magnéticos que oscilam e permeiam o espaço e obedecem às equações de Maxwell. É por este motivo que a luz tem propriedades corpusculares e também ondulatórias. O poder das equações de Maxwell está nas suas simetrias — ou seja, a capacidade de transformar campos elétricos e magnéticos uns nos outros.

Quando o fóton colide com elétrons, a equação que descreve esta interação produz resultados que são infinitos. Contudo, recorrendo ao arsenal de truques desenvolvidos por Feynman, Schwinger, Tomonaga e muitos outros, conseguimos esconder todos os infinitos. A teoria resultante chama-se QED. A seguir, aplicámos este método à força nuclear. Substituímos o campo de Maxwell original pelo campo de Yang-Mills, e substituímos o elétron por uma série de quarks, neutrinos, etc. Depois introduzimos um novo arsenal de truques criados por 't Hooft e os seus colegas, para voltar a eliminar todos os infinitos.

Assim, três das quatro forças do universo podiam agora ser unificadas numa única teoria, o Modelo Padrão. A teoria resultante não era muito bonita, uma vez que fora criada através da junção das simetrias das forças forte, fraca e eletromagnética, mas resultava. Porém, quando aplicamos este método comprovado à gravidade, temos problemas.

Em teoria, uma partícula de gravidade devia chamar-se gravitão. Tal como o fóton, é uma partícula corpuscular, e, uma vez que se move à velocidade da luz, está rodeada por ondas de gravidade que obedecem às equações de Einstein.

Até aqui, tudo muito bem. O problema ocorre quando o gravitão colide com outros gravitões e também com átomos. A colisão resultante cria respostas infinitas. Quando tentamos aplicar o arsenal de truques meticulosamente formulados ao longo dos últimos setenta anos, verificamos que todos eles falham. As

maiores mentes do século tentaram resolver este problema, mas ninguém teve êxito.

É óbvio que tem de ser usada uma abordagem completamente nova, uma vez que todas as ideias fáceis já foram investigadas e afastadas. Precisamos de algo verdadeiramente novo e original. O que nos traz até à teoria, talvez, mais controversa da física, a teoria de cordas, que pode muito bem ser louca o suficiente para ser a teoria de tudo.

CAPÍTULO 6

A Ascensão da Teoria de Cordas: Promessas e Problemas

Vimos anteriormente que por volta de 1900 havia dois grandes pilares da física: a lei da gravidade de Newton e as equações de Maxwell para a luz. Einstein compreendeu que estes dois grandes pilares estavam em conflito um com o outro. Um deles teria de cair. A queda da mecânica newtoniana colocou em andamento as grandes revoluções científicas do século XX.

Hoje, é possível que a história esteja a repetir-se. Mais uma vez temos dois grandes pilares da física. Por um lado, temos a teoria do muito grande, a teoria da gravidade de Einstein, que nos dá buracos negros, o Big Bang e um universo em expansão. Por outro lado, temos a teoria do muito pequeno, a teoria quântica, que explica o comportamento das partículas subatômicas. O problema é que estas duas teorias estão em conflito entre si. Baseiam-se em dois princípios diferentes, duas matemáticas diferentes e duas filosofias diferentes.

A próxima grande revolução, esperamos nós, será para unificar estes dois pilares.

1. A Teoria de Cordas

Tudo começou em 1968, quando dois jovens físicos, Gabriele Veneziano e Mahiko Suzuki, estavam a folhear livros de matemática e se depararam com uma fórmula estranha encontrada pelo matemático Leonhard Euler no século XVIII. Esta estranha fórmula parecia descrever a dispersão de duas partículas subatômicas! Como podia uma fórmula abstrata do século XVIII descrever os resultados mais recentes dos nossos destruidores de átomos? A física não funcionava assim.

Mais tarde, vários físicos, incluindo Yoichiro Nambu, Holger Nielsen e Leonard Susskind, compreenderam que as propriedades desta fórmula representavam a interação de duas cordas. Esta fórmula generalizou-se muito rapidamente a toda uma série de equações, representando a dispersão de múltiplas cordas. (Esta foi, na verdade, a minha tese de doutoramento, calcular o conjunto completo de interações de um número arbitrário de cordas.) Então os investigadores conseguiram introduzir partículas com *spin* na teoria de cordas.

A teoria de cordas era como um poço de petróleo do qual, de repente, brotou um jorro de novas equações. (Pessoalmente, não fiquei satisfeito com isto, porque, desde Faraday, a física é representada por campos que resumem concisamente vastas quantidades de informação. A teoria de cordas, em contraste, era uma coleção de equações desarticuladas. O meu colega Keiji Kikkawa e eu conseguimos então escrever com êxito toda a teoria de cordas na linguagem dos campos, criando aquilo a que se chama

teoria do campo de cordas.¹ Toda a teoria de cordas pode ser resumida, pelas nossas equações, numa equação de teoria de campo com apenas 4 centímetros.)

Em resultado da torrente de equações, começava a emergir uma nova imagem. Por que havia tantas partículas? Tal como Pitágoras, há mais de dois mil anos, a teoria dizia que cada nota musical — cada vibração de uma corda — representava uma partícula. Eletrões, quarks e partículas de Yang-Mills não eram mais do que notas diferentes da mesma corda a vibrar.

O que esta teoria tem de tão poderoso e interessante é que a gravidade está necessariamente incluída. Sem quaisquer assunções extra, o gravitão emerge como uma das vibrações mais baixas da corda. Na verdade, mesmo que Einstein nunca tivesse nascido, toda a sua teoria da gravidade podia ter sido descoberta apenas por observar a vibração mais baixa da corda.

Tal como disse uma vez o físico Edward Witten: «A teoria de cordas é extremamente atraente porque a gravidade nos é imposta à força. Todas as teorias de cordas consistentes conhecidas incluem a gravidade, pelo que, enquanto a gravidade é impossível na teoria do campo quântico como a conhecemos, ela é obrigatória na teoria de cordas.»

2. Dez Dimensões

Porém, à medida que a teoria começava a evoluir, foram sendo reveladas cada vez mais características totalmente inesperadas e fantásticas. Por exemplo, descobriu-se que a teoria só pode existir em dez dimensões (desde que estas sejam planas)!

Isto chocou os físicos, porque nunca ninguém tinha visto nada assim. Regra geral, qualquer teoria pode ser expressa na dimensão que pretendermos. Simplesmente afastamos essas outras teorias porque vivemos, obviamente, num mundo tridimensional. (Só podemos mover-nos em frente, de lado e para cima e para baixo. Se adicionarmos o tempo, então são precisas quatro dimensões para localizar qualquer evento no universo. Por exemplo, se quisermos encontrar-nos com alguém em Manhattan, podemos dizer: «Encontramo-nos na esquina da 5th Avenue com a 42nd Street, no décimo piso, ao meio-dia.» Contudo, movermo-nos em dimensões para além destas quatro é impossível para nós, por mais que tentemos. Na verdade, o nosso cérebro nem sequer consegue visualizar como se mover em dimensões superiores. Assim, toda a pesquisa feita na teoria de cordas em dimensões superiores é realizada através de matemática pura.)

Contudo, na teoria de cordas, a dimensionalidade do espaço-tempo está fixa em dez dimensões. A teoria decompõe-se matematicamente em outras dimensões.

Ainda me lembro do choque que os físicos sentiram quando a teoria de cordas propôs que vivemos num universo de dez dimensões. A maioria dos físicos viu isto como prova de que a teoria estava errada. Quando John Schwarz, um dos principais arquitetos da teoria de cordas, entrava no elevador na Caltech, Richard Feynman metia-se com ele e perguntava: «Então, John, em quantas dimensões estás hoje?»

Contudo, ao longo dos anos, os físicos começaram a demonstrar gradualmente que todas as teorias rivais sofriam de falhas fatais. Por exemplo, muitas podiam ser afastadas porque as suas correções quânticas eram infinitas ou anómalas (ou seja, matematicamente inconsistentes).

Assim, com o tempo, os físicos começaram a aceitar a ideia de que talvez o nosso universo seja, afinal de contas, em dez dimensões. Por fim, em 1984, John Schwarz e Michael Green mostraram que a teoria de cordas estava isenta de todos os problemas que tinham condenado as anteriores candidatas a uma teoria de campo unificado.

Se a teoria de cordas estiver certa, então o universo pode ter tido originalmente dez dimensões. Mas o universo era instável e seis dessas dimensões, de alguma forma, contraíram-se e tornaram-se demasiado pequenas para serem observadas. Assim, o nosso universo pode na realidade ter dez dimensões, mas os nossos átomos são demasiado grandes para entrar nestas minúsculas dimensões superiores.

3. O Gravitão

Apesar de toda a loucura da teoria de cordas, uma coisa que a manteve viva foi o facto de aliar com êxito as duas grandes teorias da física, a relatividade geral e a teoria quântica, dando-nos uma teoria finita da gravidade quântica. É daí que vem todo o entusiasmo.

Anteriormente, mencionámos que, se adicionarmos correções quânticas à QED, ou à partícula de Yang-Mills, obtemos um dilúvio de infinitos que têm de ser removidos cuidadosa e meticulosamente.

Mas tudo isto falha quando tentamos casar à força as duas grandes teorias da natureza, relatividade e teoria quântica. Quando aplicamos o princípio quântico à gravidade, temos de a dividir em pacotes de energia, ou *quanta*, chamados gravitões. Depois calculamos a colisão destes gravitões com outros gravitões e com a matéria, como o eletrão. Porém, quando o fazemos, todo o arsenal de truques descobertos por Feynman e 't Hooft fracassa miseravelmente. As correções quânticas causadas pela interação de gravitões com outros gravitões são infinitas e desafiam todos os métodos descobertos pela geração anterior de físicos.

É aqui que acontece a magia seguinte. A teoria de cordas pode remover estes infinitos problemáticos que atormentam os físicos há quase um século. E esta magia acontece, mais uma vez, através da simetria.

4. Supersimetria

Historicamente, sempre foi considerado agradável que as equações fossem simétricas, mas tratava-se de um luxo que não era estritamente necessário. Porém, na teoria quântica, a simetria torna-se a característica mais importante da física.

Tal como já determinámos, quando calculamos as correções quânticas de uma teoria, estas são frequentemente divergentes (ou seja, infinitas) ou anómalas (o que significa que violam a simetria original da teoria). Os físicos aperceberam-se ao longo das últimas décadas de que a simetria, em vez de ser apenas uma característica agradável de uma teoria, é, na realidade, o ingrediente central. *Exigir que uma teoria seja simétrica pode frequentemente banir as divergências e anomalias que atormentam as teorias não-simétricas.* A simetria é a espada que os físicos usam para vencer os dragões libertados pelas correções quânticas.

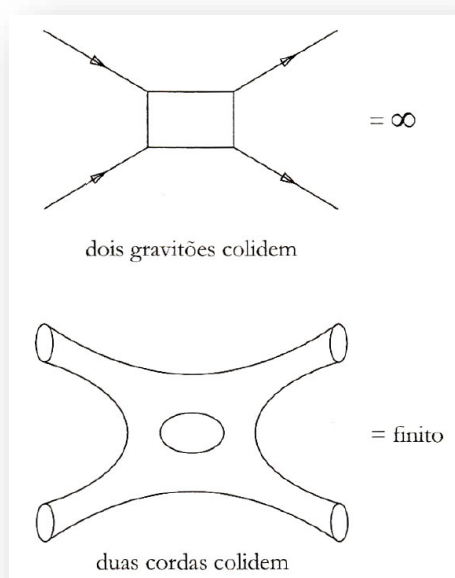


Figura 11. Ao calcular a colisão de dois grávitões (em cima), a resposta é infinita e, portanto, sem sentido. Mas quando duas cordas colidem (em baixo), temos dois termos, um de bósons e um de férmions. Na teoria de cordas, estes dois termos cancelam-se exatamente, o que ajuda a criar uma teoria quântica da gravidade finita.

Tal como mencionámos antes, Dirac descobriu que a sua equação para o eletrão previa que este tinha *spin* (uma característica matemática das equações que se assemelha à rotação familiar que vemos à nossa volta). Mais tarde, os físicos descobriram que todas as partículas subatômicas têm *spin*. Mas há dois tipos.

Em certas unidades quânticas, o *spin* pode ser inteiro (como 0, 1 ou 2) ou semi-inteiro (como $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$). Primeiro, as partículas que têm *spin* inteiro descrevem as forças do universo. Incluem o fóton e a partícula de Yang-Mills (com *spin* 1) e a partícula da gravidade, o gráviton (com *spin* 2). Estas partículas chamam-se bósons (em homenagem ao físico indiano Satyendra Nath Bose). Assim, as forças da natureza são mediadas por bósons.

Depois há partículas que compõem a matéria no universo. Estas têm *spin* semi-inteiro, como os eletrões, neutrinos e quarks (com *spin* $\frac{1}{2}$). Estas partículas chamam-se férmions (em homenagem a Enrico Fermi) e delas podemos construir as outras partículas do átomo: prótons e nêutrons. Assim, os átomos do nosso corpo são coleções de férmions.

5. Dois Tipos de Partículas Subatômicas

FERMIÕES (MATÉRIA)

BOSÕES (FORÇAS)

Eletrão, quark,

Fotão, gravitão,

Neutrino, próton

Yang-Mills

Bunji Sakita e Jean-Loup Gervais demonstraram então que a teoria de cordas tinha um novo tipo de simetria, chamado supersimetria. Desde então, a supersimetria tem sido expandida e é agora a maior simetria alguma vez encontrada na física. Tal como realçámos, para um físico, a beleza é simetria, que nos permite encontrar o elo de ligação entre diferentes partículas. Todas as partículas no universo poderiam então ser unificadas pela supersimetria. Tal como sublinhámos, uma simetria reorganiza as componentes de um objeto, deixando o objeto original na mesma. Aqui, estamos a reorganizar as partículas nas nossas equações de modo que os fermiões possam trocar de lugar com os bosões, e vice-versa. Esta torna-se a característica central da teoria de cordas, pelo que as partículas de um universo inteiro podem trocar de lugar entre si.

Isto significa que cada partícula tem uma supercompanheira, chamada superpartícula. Por exemplo, a supercompanheira do eletrão chama-se seletrão. A supercompanheira do quark chama-se squark. A supercompanheira do leptão (como o eletrão ou o neutrino) chama-se sleptão.

Mas na teoria de cordas acontece algo admirável. Quando calculamos as correções quânticas da teoria de cordas, temos duas contribuições separadas. Temos correções quânticas que vêm dos

fermiões e também dos bosões. Miraculosamente, são iguais em tamanho, mas ocorrem com sinal oposto. Um termo pode ter um sinal positivo, mas há outro termo que é negativo. Na verdade, quando se unem, *estes termos cancelam-se mutuamente, deixando um resultado finito*.

A aliança entre relatividade e teoria quântica atormenta os cientistas há quase um século, mas a simetria entre fermiões e bosões, chamada supersimetria, permite-nos cancelar muitos destes infinitos entre si. Rapidamente os físicos descobriram outros meios de eliminar estes infinitos, deixando um resultado finito. E é esta a origem de toda a excitação em torno da teoria de cordas: consegue unificar a gravidade com a teoria quântica. Mais nenhuma teoria pode afirmar o mesmo. Isto talvez satisfaça a objeção inicial de Dirac. Ele odiava a teoria da renormalização porque, apesar dos seus sucessos fantásticos e inegáveis, envolvia somar e subtrair quantidades infinitas em tamanho. Aqui, vemos que a teoria de cordas é finita por si só, sem renormalização.

Isto, por sua vez, pode satisfazer o quadro originalmente proposto pelo próprio Einstein. Ele comparou uma vez a sua teoria da gravidade a mármore, que é liso, elegante, polido. Contudo, a matéria, em contraste, era mais como madeira. O tronco de uma árvore é retorcido, caótico, rugoso, sem um padrão geométrico regular. O seu derradeiro objetivo era criar uma teoria unificada que combinasse o mármore e a madeira numa única forma — ou seja, *criar uma teoria inteiramente feita de mármore*. Esse era o sonho de Einstein.

A teoria de cordas pode completar este quadro. A supersimetria é uma simetria capaz de transformar mármore em madeira e vice-versa. Tornam-se dois lados da mesma moeda. Neste quadro, o mármore é representado por bósons e a madeira é representada por férmions. Embora não exista qualquer evidência experimental da supersimetria na natureza, ela é tão elegante e bela que captou a imaginação da comunidade da física.

Tal como disse uma vez Steven Weinberg: «Embora as simetrias estejam escondidas de nós, podemos sentir que estão latentes na natureza e que governam tudo à nossa volta. Essa é a ideia mais empolgante que conheço: que a natureza é muito mais simples do que parece. Nada me deixa mais esperançoso de que a nossa geração de seres humanos possa efetivamente ter na mão a chave para o universo — de que, talvez ainda no nosso tempo de vida, conseguiremos explicar por que razão tudo o que vemos neste imenso universo de galáxias e partículas é logicamente inevitável.»²

Em suma, sabemos agora que a simetria pode ser a chave para unificar todas as leis do universo, devido a vários feitos assinaláveis:

- A simetria cria ordem a partir da desordem. Do caos de elementos químicos e partículas subatômicas, a tabela periódica de Mendeleev e o Modelo Padrão podem reorganizá-los de forma ordenada e simétrica.

- A simetria ajuda a preencher as lacunas. A simetria permite-nos isolar lacunas nestas teorias e, assim, prever a existência de novos tipos de elementos e partículas subatômicas.
- A simetria unifica objetos totalmente inesperados e aparentemente não relacionados. A simetria encontra o elo de ligação entre espaço e tempo, matéria e energia, eletricidade e magnetismo, e férmions e bósons.
- A simetria revela fenómenos inesperados. A simetria previu a existência de novos fenómenos como antimatéria, *spin* e quarks.
- A simetria elimina consequências indesejadas que podem destruir a teoria. As correções quânticas têm frequentemente divergências e anomalias desastrosas que a simetria consegue eliminar.

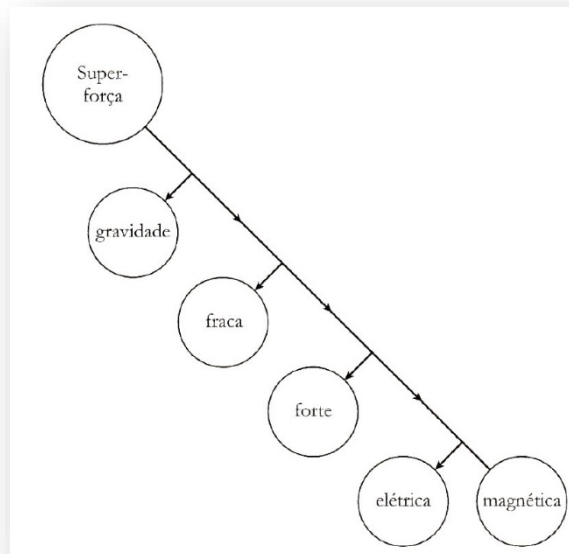


Figura 12. No princípio dos tempos, crê-se que havia uma única superforça cuja simetria incluía todas as partículas do universo. Mas era instável e a simetria começou a desfazer-se. A primeira a separar-se foi a gravidade. Depois a força forte e a força fraca, deixando a força eletromagnética. Assim o universo hoje parece desfeito, com todas as forças muito diferentes umas das outras. O trabalho dos físicos é voltar a unir todas as peças numa única força.

- A simetria altera a teoria clássica original. As correções quânticas à teoria de cordas são tão rigorosas que, na verdade, alteram a teoria original, corrigindo a dimensionalidade de espaço-tempo.

A teoria das supercordas aproveita todas estas características. A sua simetria é supersimetria (a simetria onde bósons e férmions são intercambiáveis). A supersimetria, pela sua vez, é a maior simetria alguma vez encontrada na física, capaz de unificar todas as partículas conhecidas do universo.

6. A Teoria-M

Falta-nos ainda completar o último passo da teoria de cordas, encontrar os seus princípios físicos fundamentais — ou seja, ainda não compreendemos como derivar toda a teoria de uma única equação. Em 1995 houve uma onda de choque quando a teoria de cordas passou por outra metamorfose e deu origem a uma nova teoria, chamada teoria-M. O problema da teoria de cordas original era que havia cinco versões distintas da gravidade quântica, cada uma delas finita e bem definida. Estas cinco teorias de cordas pareciam muito semelhantes, exceto que as suas rotações estavam organizadas de forma ligeiramente diferente. As pessoas começaram a perguntar: por que há de haver cinco? A maioria dos físicos pensava que o universo devia ser único.

O físico Edward Witten descobriu que existia na realidade uma teoria oculta de onze dimensões, chamada teoria-M, que se baseava em membranas (como as superfícies de esferas e *donuts*) em vez de apenas cordas. Conseguiu explicar por que razão havia cinco teorias de cordas diferentes: porque havia cinco maneiras de colapsar uma membrana de onze dimensões numa corda de dez dimensões.

Por outras palavras, as cinco versões da teoria de cordas eram representações matemáticas diferentes da mesma teoria-M. (Assim, a teoria de cordas e a teoria-M são, na realidade, a mesma teoria, exceto que a teoria de cordas é uma redução a dez dimensões da teoria-M de onze dimensões.) Mas como pode uma

única teoria de onze dimensões dar origem a cinco teorias de dez dimensões?

Por exemplo, imagine uma bola de praia insuflável. Se deixarmos sair o ar, a bola colapsa e começa a parecer-se gradualmente com uma salsicha. Se deixarmos sair ainda mais ar, a salsicha torna-se uma corda. Assim, uma corda é, na realidade, uma membrana disfarçada, depois de retirado o ar.

Se começarmos com uma bola de praia de onze dimensões, podemos mostrar matematicamente que há cinco formas de esta poder colapsar numa corda de dez dimensões.

Ou, então, pense na história dos homens cegos que encontram um elefante pela primeira vez. Um sábio, ao tocar na orelha do elefante, declara que o elefante é achatado e bidimensional como um leque. Outro sábio toca na cauda e parte do princípio de que o elefante é como uma corda, ou um fio unidimensional. Outro, ao tocar numa perna, conclui que o elefante é um tambor ou cilindro tridimensional. Mas na verdade, se recuarmos e nos erguermos na terceira dimensão, vemos o elefante como um animal tridimensional. Da mesma forma, as cinco teorias de cordas diferentes são como a orelha, cauda e perna, mas ainda temos de revelar o elefante na sua totalidade, ou a teoria-M.

7. Universo Holográfico

Tal como mencionámos, com a passagem do tempo foram descobertas novas camadas na teoria de cordas. Pouco depois de a teoria-M ser proposta, em 1995, Juan Maldacena fez outra descoberta extraordinária em 1997.³

Ele abalou toda a comunidade da física ao demonstrar algo que antes era considerado impossível: que uma teoria supersimétrica Yang-Mills, que descreve o comportamento das partículas subatômicas em quatro dimensões, era dual, ou matematicamente equivalente a uma certa teoria de cordas em dez dimensões. Isto deixou o mundo da física num frenesi. Em 2015 havia dez mil trabalhos que faziam referência a este trabalho, tornando-o de longe o mais influente na área da física de alta energia. (Simetria e dualidade estão relacionadas, mas são diferentes. A simetria surge quando reorganizamos as componentes de uma única equação e esta fica na mesma. A dualidade surge quando mostramos que duas teorias completamente diferentes são, na realidade, matematicamente equivalentes. Admiravelmente, a teoria de cordas tem ambas estas características altamente invulgares.)

Como já vimos, as equações de Maxwell têm uma dualidade entre campos elétricos e magnéticos — ou seja, as equações permanecem iguais se invertermos os dois campos, transformando campos elétricos em campos magnéticos. (Podemos ver isto em termos matemáticos, porque as equações eletromagnéticas contêm frequentemente termos como $E^2 + B^2$, que ficam iguais quando rodamos os dois campos, invertendo a sua posição, como no

teorema de Pitágoras.) Da mesma forma, há cinco teorias de cordas distintas em dez dimensões, que se pode provar serem duais umas das outras, pelo que na realidade são uma única teoria-M de onze dimensões disfarçada. Assim, de forma notável, a dualidade mostra que duas teorias diferentes são na verdade dois aspetos da mesma teoria.

Maldacena, contudo, mostrou que havia ainda outra dualidade entre cordas em dez dimensões e a teoria Yang-Mills em quatro dimensões. Este era um desenvolvimento totalmente inesperado, mas com profundas implicações. Significava que havia ligações profundas e inesperadas entre a força gravitacional e a força nuclear, definidas em dimensões totalmente diferentes.

Regra geral, as dualidades podem encontrar-se entre cordas na mesma dimensão. Se reorganizarmos os termos que descrevem essas cordas, por exemplo, podemos muitas vezes alterar uma teoria de cordas para formar outra. Isto cria uma teia de dualidades entre diferentes teorias de cordas, todas definidas na mesma dimensão. Mas uma dualidade entre dois objetos definidos em dimensões diferentes era algo inédito.

Esta não é meramente uma questão académica, porque tem implicações de longo alcance no entendimento da força nuclear. Por exemplo, vimos anteriormente como a teoria de gauge em quatro dimensões, representada pelo campo de Yang-Mills, nos dá a melhor descrição da força nuclear, mas nunca ninguém conseguiu encontrar uma solução exata para o campo Yang-Mills. Porém, uma vez que a teoria de gauge em quatro dimensões podia ser dual da

teoria de cordas em dez dimensões, isso significava que a gravidade quântica podia conter a chave da força nuclear. Esta era uma revelação espantosa, porque significava que as características básicas da força nuclear (como calcular a massa do próton) podiam ser mais bem descritas pela teoria de cordas.

Isto criou uma certa crise de identidade entre físicos. Aqueles que trabalham exclusivamente na força nuclear passam o tempo todo a estudar objetos tridimensionais, como prótons e nêutrons, e desdenham muitas vezes dos físicos que teorizam em dimensões superiores. Mas com esta nova dualidade entre gravidade e teoria de gauge, de súbito esses físicos davam por si a tentar aprender tudo sobre a teoria de cordas em dez dimensões, que podia conter a chave para compreender a força nuclear em quatro dimensões.

Outro desenvolvimento inesperado emergiu desta dualidade bizarra: o chamado princípio holográfico. Os hologramas são folhas de plástico planas bidimensionais que contêm no seu interior a imagem de objetos tridimensionais especialmente codificadas. Ao apontar um raio laser para o ecrã plano, a imagem tridimensional emerge subitamente. Por outras palavras, toda a informação necessária para criar uma imagem tridimensional foi codificada num ecrã plano bidimensional através da utilização de lasers, como a imagem da Princesa Leia projetada por R2-D2, ou a mansão assombrada na Disneyland, onde flutuam à nossa volta fantasmas tridimensionais.

Este princípio aplica-se também aos buracos negros. Tal como vimos antes, se atirmos uma enciclopédia para um buraco negro,

a informação contida no livro não pode desaparecer, de acordo com a mecânica quântica. Então para onde vai a informação? Uma teoria propõe que é distribuída pela superfície do horizonte de acontecimentos do buraco negro. Assim, a superfície bidimensional de um buraco negro contém toda a informação de todos os objetos tridimensionais que foram atirados para o seu interior.

Isto tem também implicações na nossa concepção da realidade. Estamos convencidos, claro, de que somos objetos tridimensionais que conseguem deslocar-se no espaço, definidos por três números, comprimento, largura e altura. Mas talvez isto seja uma ilusão. Talvez vivamos num holograma.

Talvez o mundo tridimensional que apreendemos pelos nossos sentidos seja apenas uma sombra do mundo real, que na verdade tem dez ou onze dimensões. Quando nos movemos nas três dimensões do espaço, o nosso eu real está na verdade a mover-se em dez ou onze dimensões. Quando caminhamos pela rua, a nossa sombra segue-nos e move-se como nós, mas a sombra existe em duas dimensões. Da mesma forma, talvez sejamos sombras a moverem-se em três dimensões, mas o nosso verdadeiro eu esteja a mover-se em dez ou onze dimensões.

Em suma, vemos que com o tempo a teoria de cordas revela resultados novos e totalmente inesperados. Isso significa que ainda não compreendemos realmente os princípios fundamentais na sua base. Talvez venhamos a concluir que a teoria de cordas não é, afinal de contas, uma teoria sobre cordas, já que as cordas podem

ser expressas como membranas quando formuladas em onze dimensões.

É por isso que será prematuro comparar a teoria de cordas com a experiência. Depois de revelarmos os verdadeiros princípios por trás da teoria de cordas, talvez encontremos uma forma de a testar, e talvez então possamos dizer de uma vez por todas se é uma teoria de tudo ou uma teoria de nada.

8. Testar a Teoria

Contudo, apesar de todos os sucessos teóricos da teoria de cordas, esta ainda tem pontos fracos óbvios. Qualquer teoria que se afirme tão poderosa como a teoria de cordas atrai naturalmente um exército de opositores. Temos de recordar continuamente as palavras de Carl Sagan, que disse que «reivindicações extraordinárias exigem provas extraordinárias».

(Faz-me lembrar também as palavras cínicas de Wolfgang Pauli, que era um mestre da troça. Ao ouvir uma palestra, podia dizer: «O que disse foi tão confuso que não consegui perceber se é um disparate ou não»⁴ Diria também: «Não me importo que pense devagar, mas oponho-me a que publique mais depressa do que pensa.» Se ele fosse vivo, talvez aplicasse estas palavras à teoria de cordas.)

O debate é tão intenso que as melhores mentes da física estão divididas nesta questão. Desde a grande sexta Conferência de

Solvay em 1930, quando Einstein e Bohr se enfrentaram na questão da teoria quântica, que não se assistia na ciência a uma clivagem como esta.

Físicos galardoados com o Nobel assumiram posições opostas em relação a este assunto. Sheldon Glashow escreveu: «Anos de esforços intensos por dezenas dos melhores e mais brilhantes não produziram uma única previsão verificável, nem devemos esperar que tal aconteça em breve.»⁵ Gerard't Hooft foi mesmo ao ponto de dizer que o interesse em torno da teoria de cordas é comparável aos «anúncios televisivos americanos» — ou seja, muita fanfarra e entusiasmo, mas pouca substância.

Outros louvaram as virtudes da teoria de cordas. David Gross escreveu: «Einstein ficaria satisfeito com isto, pelo menos com o objetivo, mesmo que a concretização fique aquém... Teria gostado do facto de haver um princípio geométrico subjacente — que, infelizmente, ainda não compreendemos por completo.»

Steven Weinberg comparou a teoria de cordas ao esforço histórico para encontrar o Polo Norte. Todos os mapas antigos da Terra tinham um enorme vazio onde devia estar o Polo Norte, mas nunca ninguém o vira. Onde quer que se estivesse na face da Terra, as agulhas de todas as bússolas apontavam para este local mítico. Contudo, todas as tentativas de encontrar o famoso Polo Norte terminavam em fracasso. No fundo do coração, os antigos marinheiros sabiam que tinha de haver um Polo Norte, mas ninguém conseguia prová-lo. Alguns duidavam mesmo da sua

existência. Contudo, depois de séculos de especulação, finalmente, em 1909, Robert Peary pisou pela primeira vez o Polo Norte.

Glashow, o crítico da teoria de cordas, admitiu que está em inferioridade numérica neste debate. Comentou uma vez: «Vejo-me como um dinossauro num mundo de mamíferos arrivistas.»⁶

9. Críticas à Teoria de Cordas

Há várias críticas principais à teoria de cordas. Os críticos afirmaram que a teoria é só conversa; que a beleza, por si só, não é um guia fiável na física; que a teoria prevê demasiados universos; e, a mais importante, que é impossível de testar.

O grande astrónomo Kepler deixou-se em tempos iludir pelo poder da beleza. Estava fascinado pelo facto de o sistema solar se assemelhar a um conjunto de poliedros regulares empilhados uns dentro dos outros. Séculos antes, os gregos tinham enumerado cinco destes poliedros (ou seja, cubo, pirâmide, etc.). Kepler reparou que ao introduzir sequencialmente estes poliedros uns dentro dos outros, como bonecas russas, era possível reproduzir alguns dos pormenores do sistema solar. Era uma ideia muito bela, que acabou por se revelar totalmente errada.

Recentemente, alguns físicos criticaram a teoria de cordas, afirmando que a beleza é um critério enganador no mundo da física. Lá porque a teoria de cordas tem propriedades matemáticas brilhantes, isso não significa que encerre um grão de verdade.

Apontaram, e bem, que outras teorias muito belas acabaram por provar ser becos sem saída.

Mas os poetas citam muitas vezes o poema «Ode a Uma Urna Grega», de John Keats:

A beleza é verdade, verdade é beleza —, é tudo
o que sabemos na Terra, e tudo o que precisamos de saber.

Paul Dirac era sem dúvida um seguidor deste princípio quando escreveu: «O investigador, nos seus esforços para expressar as leis fundamentais da Natureza em forma matemática, devia buscar acima de tudo a beleza matemática»⁷ Na verdade, ele escreveu que descobriu a sua famosa teoria do eletrão, não a observar os dados, mas sim a brincar com fórmulas matemáticas puras.

Por mais poderosa que seja a beleza na física, é certo que a beleza pode conduzir-nos pelo caminho errado. Como escreveu a física Sabine Hossenfelder: «As teorias belas foram excluídas às centenas, teorias sobre forças unificadas e novas partículas e simetrias adicionais e outros universos. Todas estas teorias estavam erradas, erradas, erradas. É evidente que depender da beleza não é uma estratégia de sucesso.»⁸

Os críticos afirmam que a matemática da teoria de cordas é bela, mas isto pode não ter nada a ver com a realidade física.

Há alguma validade nesta crítica, mas é preciso perceber que aspetos da teoria de cordas como a supersimetria não são inúteis e desprovidos de aplicações físicas. Embora ainda não se tenha encontrado evidência para a supersimetria, esta revelou-se essencial na eliminação de muitas das falhas na teoria quântica. A supersimetria, ao cancelar bósons contra férmions, permite-nos resolver um problema antigo: eliminar as divergências que atormentam a gravidade quântica.

Nem todas as teorias bonitas têm uma aplicação prática, mas todas as teorias físicas fundamentais descobertas até agora, sem exceção, possuem algum tipo de beleza ou simetria integrada.

10. Pode ser Testada?

A principal crítica à teoria de cordas é que é impossível de testar. A energia que os gravitões possuem chama-se energia de Planck, que é mil biliões de vezes maior do que a energia produzida pelo LHC. Imagine tentar construir um LHC mil biliões de vezes maior do que o atual! Provavelmente seria preciso um acelerador de partículas do tamanho da galáxia para fazer um teste direto da teoria.

Além do mais, cada solução da teoria de cordas é um universo inteiro. E parece haver um número infinito de soluções. Para fazer um teste direto da teoria, seria preciso criar universos bebés em laboratório! Por outras palavras, só um deus pode na verdade testar

a teoria diretamente, uma vez que a teoria se baseia em universos, não apenas em átomos ou moléculas.

Assim, à primeira vista, parece que a teoria de cordas falha o teste base de qualquer teoria: a capacidade de ser testada. Porém, os promotores da teoria de cordas não se deixam demover por isso. Tal como já determinámos, a maior parte da ciência é feita indiretamente, examinando ecos do Sol, do Big Bang, etc. Da mesma forma, procuramos ecos das décima e décima primeira dimensões. Talvez as evidências da teoria de cordas estejam escondidas à nossa volta, mas temos de tentar encontrar os seus ecos em vez de a tentar observar diretamente.

Por exemplo, um possível sinal do hiperespaço é a existência de matéria escura. Até há pouco tempo, era convicção generalizada que o universo é composto essencialmente por átomos. Os astrónomos ficaram chocados ao descobrir que apenas 4,9 por cento do universo é formado por átomos como hidrogénio e hélio. Na verdade, a maior parte do universo está escondida de nós, sob a forma de matéria escura e energia escura. (Recordamos aqui que matéria escura e energia escura são duas coisas distintas. A matéria escura, que é matéria invisível que rodeia as galáxias e as impede de se separarem, compõe 26,8 por cento do universo. E 68,3 por cento do universo é formado por energia escura, que é ainda mais misteriosa, a energia do espaço vazio que está a afastar as galáxias umas das outras.) Talvez as evidências para a teoria de tudo estejam ocultas neste universo invisível.

11. A Busca pela Matéria Escura

A matéria escura é estranha, é invisível, e, contudo, é o que mantém a galáxia da Via Láctea unida. Porém, como tem peso, mas não carga, se a tentássemos segurar na mão ela passaria através dos nossos dedos como se ali não estivessem. Cairia através do chão, através do centro da Terra, onde a gravidade acabaria por a fazer inverter a direção e voltar a cair até à nossa localização. Continuaría assim a oscilar entre nós e o outro lado do planeta, como se a Terra não estivesse lá.

Por mais estranha que seja a matéria escura, sabemos que deve existir. Se analisarmos a rotação da Via Láctea e usarmos as leis de Newton, descobrimos que não existe massa suficiente para contrabalançar a força centrífuga. Tendo em conta a quantidade de massa que vemos, as galáxias no universo deviam ser instáveis e desintegrar-se, mas mantêm-se estáveis há milhares de milhões de anos. Assim, temos duas opções: ou as equações de Newton estão incorretas quando aplicadas às galáxias, ou então existe um objeto invisível que mantém as galáxias intactas. (Se bem se lembram, o planeta Neptuno foi descoberto da mesma forma, postulando a existência de um novo planeta que explicasse os desvios de Úrano da elipse perfeita.)

De momento, um dos mais fortes candidatos à matéria escura são as chamadas partículas maciças de interação débil (WIMP, do inglês *weakly interacting massive particle*). Entre elas, uma possibilidade provável é o fotino, o companheiro supersimétrico do fóton. O fotino é estável, tem massa, é invisível e não tem carga, o

que coincide precisamente com as características da matéria escura. Os físicos acreditam que a Terra se move num vento invisível de matéria escura que está provavelmente a passar através do seu corpo neste preciso momento. Se um fotino colide com um protão, pode fazer com que o protão se desfaça numa chuva de partículas subatômicas que podem então ser detetadas. Na verdade, mesmo hoje há enormes detetores do tamanho de piscinas (com vastas quantidades de fluidos contendo xénon e árgon) que podem um dia captar a faísca criada por uma colisão de fotino. Há cerca de vinte grupos ativos à procura de matéria escura, muitas vezes nas profundezas de minas abaixo da superfície da Terra, longe da interferência da interação com raios cósmicos. Portanto é concebível que a colisão de matéria escura seja captada pelos nossos instrumentos. Depois de serem detetadas colisões de matéria escura, os físicos estudarão então as propriedades das partículas de matéria escura, que serão depois comparadas com as propriedades previstas dos fotinos. Se as previsões da teoria de cordas coincidirem com os resultados experimentais da matéria escura, isso contribuirá muito para convencer os físicos de que é este o caminho certo.

Outra possibilidade é que o fotino seja produzido pela próxima geração de aceleradores de partículas que está neste momento a ser discutida.

12. Para além do LHC

Os japoneses estão a pensar em financiar outro acelerador de partículas, o Colisionador Linear Internacional (ILC, do inglês

International Linear Collider), que dispararia um raio de elétrons ao longo de um tubo reto, até atingir um raio de antieletrões. Se for aprovado, este aparelho seria construído em doze anos. A vantagem de um acelerador como este é que usa elétrons em vez de prótons. Como os prótons consistem de três quarks unidos por glúons, a colisão entre prótons é muito desordenada e cria uma avalanche de partículas. O elétron, em contraste, é uma única partícula elementar, pelo que a colisão com um antieletrão seria muito mais ordeira e exigiria muito menos energia. Em resultado, deve ser possível criar bósons de Higgs a apenas 250 mil milhões de elétrons-volt.

Os chineses também manifestaram interesse em construir o Colisionador Circular de Partículas Elétron-Positrão (CRPC, do inglês Circular Electron Positron Collider). Os trabalhos começariam por volta de 2022 e talvez estivessem concluídos em 2030, com um custo de 5 a 6 mil milhões de dólares. Atingiria uma energia de 240 mil milhões de elétrons-volt e teria 100 quilómetros de comprimento.

Para não se deixarem ficar para trás, os físicos no CERN estão a planear o sucessor do LHC, chamado o Futuro Colisionador Circular (FCC, do inglês Future Circular Collider). Este atingiria uns espantosos 100 biliões de elétrons-volt. Teria também cerca de 100 quilómetros de perímetro.

Não é claro se estes aceleradores alguma vez chegarão a ser construídos, mas isso significa que há esperança de encontrar matéria escura na próxima geração de aceleradores para além do

LHC. Se descobrirmos partículas de matéria escura, estas podem então ser comparadas com as previsões da teoria de cordas.

Outra previsão da teoria de cordas que poderia ser verificada por estes aceleradores é a presença de miniburacos negros. Uma vez que a teoria de cordas é uma teoria de tudo, inclui a gravidade, bem como partículas subatômicas, pelo que os físicos esperam encontrar buracos negros minúsculos no acelerador. (Estes miniburacos negros, ao contrário dos buracos negros estelares, são inofensivos e têm a energia de partículas subatômicas ínfimas, não a energia de estrelas moribundas. Na verdade, a Terra é bombardeada por raios cósmicos muito mais poderosos do que tudo o que pode ser produzido por estes aceleradores, sem quaisquer efeitos prejudiciais.)

13. O Big Bang como Esmagador de Átomos

Há também a esperança de que possamos aproveitar o maior esmagador de átomos de todos, o próprio Big Bang. A radiação do Big Bang pode dar-nos uma pista para a matéria escura e a energia escura. Em primeiro lugar, o eco, ou resplendor crepuscular do Big Bang, é fácil de detetar. Os nossos satélites já conseguiram detetar esta radiação com uma precisão enorme.

Fotografias desta radiação de fundo de micro-ondas mostram que é extraordinariamente uniforme, com minúsculas ondulações à superfície. Estas ondulações, por sua vez, representam pequenas

flutuações quânticas que existiam no instante do Big Bang e que foram então ampliadas pela explosão.

Contudo, aquilo que é controverso é que parece haver irregularidades, ou borões, na radiação de fundo, que não sabemos explicar. Há alguma especulação de que estes estranhos borões sejam os restos de colisões com outros universos. Em particular, o ponto frio da radiação cósmica de fundo de micro-ondas (CMB, do inglês *cosmic microwave background*) é uma marca invulgarmente fria na radiação de fundo uniforme, que alguns físicos têm especulado poder tratar-se dos restos de algum tipo de ligação ou colisão entre o nosso universo e um universo paralelo no início dos tempos. Se estas estranhas marcas representarem a interação do nosso universo com universos paralelos, então a teoria dos muitos-mundos pode tornar-se mais plausível para os céticos.

Existem já planos para colocar no espaço detetores capazes de refinar todos estes cálculos, usando detetores de ondas de gravidade instalados no espaço.

14. LISA

Em 1916, Einstein demonstrou que a gravidade podia viajar em ondas. Tal como atirar uma pedra a um lago e ver os anéis concêntricos e em expansão que se criam a partir do ponto de impacto, Einstein previu que as ondas de gravidade viajariam à velocidade da luz. Infelizmente, estas seriam tão leves que ele não acreditava que viessem a ser descobertas em breve.

E tinha razão. Só em 2016, cem anos depois da sua previsão original, é que as ondas de gravidade foram observadas. Os sinais de dois buracos negros que colidiram no espaço há cerca de mil milhões de anos foram captados por enormes detetores. Estes detetores, construídos em Louisiana e Washington, ocupam cada um vários quilómetros quadrados. Assemelham-se a um grande L, com raios laser a percorrer cada uma das pernas do L. Quando os dois raios se encontram no centro, criam um padrão de interferência que é tão sensível às vibrações que conseguiram detetar esta colisão.

Por este trabalho pioneiro, três físicos, Rainer Weiss, Kip S. Thorne e Barry C. Barish, receberam o prémio Nobel em 2017.

Para alcançar uma sensibilidade ainda maior, há planos de enviar detetores de ondas de gravidade para o espaço exterior. O projeto, conhecido como Antena Espacial de Interferometria Laser (LISA, do inglês Laser Interferometry Space Antenna), pode conseguir apanhar vibrações do instante do próprio Big Bang. Uma versão da LISA consiste de três satélites separados no espaço, cada um ligado aos outros por uma rede de raios laser. O triângulo tem mais de 1500 quilómetros de lado. Quando uma onda de gravidade do Big Bang atingir o detetor, fará com que os raios laser estremecem um pouco, o que pode então ser medido por instrumentos sensíveis.

O objetivo final é registar as ondas de choque do Big Bang e depois rebobinar o filme para obter o melhor palpite possível quanto à radiação antes do Big Bang. Estas ondas pré-Big Bang seriam então comparadas com o que é previsto em várias versões da teoria

de cordas. Assim, poderia ser possível obter dados numéricos sobre o multiverso antes do Big Bang.

Com recurso a instrumentos mais avançados do que a LISA, poderia até ser possível tirar fotografias do universo quando era bebé. E talvez até encontrar evidências do cordão umbilical que ligava o nosso universo recém-nascido ao universo-mãe.

15. Testar a Lei do Quadrado Inverso

Outra objeção frequente à teoria de cordas é que esta postula que na realidade vivemos em dez ou onze dimensões, para as quais não existe qualquer evidência experimental.

Mas este aspeto pode na verdade ser testável com instrumentos comuns. Se o nosso universo é tridimensional, então a força da gravidade diminui pelo quadrado da distância de separação. Esta famosa lei de Newton é aquilo que conduz as nossas sondas espaciais ao longo de milhões de quilómetros no espaço com uma precisão assombrosa, ao ponto de conseguirmos lançar sondas espaciais através dos anéis de Saturno se assim o desejássemos. Mas a famosa lei do quadrado inverso de Newton só foi testada ao longo de distâncias astronómicas e raramente em laboratório. Se a força da gravidade em pequenas distâncias não obedecer à lei do quadrado inverso, isso indicaria a presença de uma dimensão superior. Por exemplo, se o universo tivesse quatro dimensões espaciais, então a gravidade devia diminuir pelo cubo da distância de separação. [Se o universo tivesse N dimensões espaciais, então

a gravidade devia diminuir pela potência ($N - 1$) da distância de separação.]

No entanto, a força da gravidade raramente foi medida entre dois objetos em laboratório. Estas experiências são difíceis de fazer, uma vez que as forças gravitacionais são bastante pequenas no laboratório, mas as primeiras medições foram feitas no Colorado e os resultados foram negativos — ou seja, a lei do quadrado inverso de Newton ainda se aplica. (No entanto, isto significa apenas que não há dimensões extra no Colorado.)

16. O Problema do Panorama (*Landscape*)

Para um teórico, todas estas críticas são problemáticas, mas não fatais. Contudo, o que causa problemas para um teórico é que o modelo parece prever um multiverso de universos paralelos, muitos dos quais são mais loucos do que tudo o que poderia ter saído da imaginação dos guionistas de Hollywood. A teoria de cordas tem um número infinito de soluções, cada uma das quais descreve uma teoria finita da gravidade perfeitamente bem-comportada que em nada se assemelha ao nosso universo. Em muitos destes universos paralelos, o próton não é estável, pelo que se desintegraria numa vasta nuvem de eletrões e neutrinos. Nestes universos, a matéria complexa tal como a conhecemos (átomos e moléculas) não pode existir. Eles consistem apenas de um gás de partículas subatómicas. (Algumas pessoas podem argumentar que estes universos alternativos são apenas possibilidades matemáticas e não reais. Mas o problema é que a teoria não tem poder previsivo, uma vez que não pode dizer-nos qual destes universos alternativos é o real.)

Este problema, na verdade, não é exclusivo da teoria de cordas. Por exemplo, quantas soluções existem para as equações de Newton ou de Maxwell? Há um número infinito, conforme aquilo que estivermos a estudar. Se começarmos com uma lâmpada ou um laser e resolvermos as equações de Maxwell, encontramos uma solução única para cada instrumento. Assim, as teorias de Maxwell ou Newton também têm um número infinito de soluções, dependente das condições iniciais — ou seja, da situação com que começamos.

É provável que este problema se coloque com qualquer teoria de tudo. Qualquer teoria de tudo terá um número infinito de soluções consoante as condições iniciais. Mas como podemos determinar as condições iniciais do universo inteiro? Isso significa que temos de introduzir as condições do Big Bang a partir do exterior, à mão.

Para muitos físicos, isto parece batota. Idealmente, queremos que seja a própria teoria a dizer-nos quais as condições que originaram o Big Bang. Queremos que a teoria nos diga tudo, incluindo a temperatura, densidade e composição do Big Bang original. Uma teoria de tudo devia, de alguma forma, conter as suas próprias condições iniciais, por si só.

Por outras palavras, queremos uma previsão única para o princípio do universo. Assim, a teoria de cordas possui uma abundância extraordinária. Consegue prever o nosso universo? Sim. É uma reivindicação sensacional, o objetivo dos físicos há quase um século. Mas conseguirá prever apenas um universo? Provavelmente não. Chama-se a isto o problema do panorama (*landscape*).

Há várias soluções possíveis para este problema, nenhuma das quais aceita de forma generalizada. A primeira é o princípio antrópico, que diz que o nosso universo é especial porque nós, enquanto seres conscientes, estamos aqui para discutir essa questão. Por outras palavras, pode haver um número infinito de universos, mas o nosso universo é aquele que tem condições para possibilitar a existência de vida inteligente. As condições iniciais do Big Bang são fixas no princípio dos tempos para que possa existir vida inteligente hoje. Os outros universos podem não conter qualquer vida consciente.

Lembro-me muito bem da primeira vez que ouvi este conceito, quando andava no segundo ano da escola. Lembro-me de a minha professora dizer que Deus gostava tanto da Terra que a colocara «à distância perfeita» do Sol. Não demasiado perto, ou os oceanos ferveriam. Nem demasiado longe, ou os oceanos congelariam. Mesmo em criança fiquei estupefacto com este argumento, porque usava lógica pura para determinar a natureza do universo. Mas hoje em dia os satélites revelaram quatro mil planetas na órbita de outras estrelas. Infelizmente, a maioria está demasiado perto ou demasiado longe da sua estrela para sustentar vida. Assim, podemos analisar o argumento da minha professora do segundo ano de duas maneiras. Talvez exista, afinal de contas, um Deus benevolente, ou talvez existam milhares de planetas mortos que estão demasiado perto ou demasiado longe, e nós estejamos num planeta com as condições perfeitas para sustentar vida inteligente e, assim, podermos debater esta questão. Da mesma forma, podemos coexistir num oceano de universos mortos, e o nosso

universo ser especial apenas porque nós estamos aqui para discutir esta questão.

O princípio antrópico, na verdade, permite-nos explicar um curioso facto experimental do nosso universo: que as constantes básicas da natureza parecem estar afinadas de modo a permitir a existência de vida. Tal como escreveu o físico Freeman Dyson, parece que o universo sabia que nós vínhamos aí. Por exemplo, se a força nuclear fosse um bocadinho mais fraca, o Sol nunca se teria incendiado e o sistema solar seria escuro. Se a força nuclear forte fosse um pouco mais forte, então o Sol ter-se-ia extinguido há milhares de milhões de anos. Assim, a força nuclear está afinada na perfeição.

De forma semelhante, se a gravidade fosse um pouco mais fraca, talvez o Big Bang tivesse acabado num Big Freeze, com um universo morto e gelado em expansão. Se a gravidade fosse um pouco mais forte, podíamos ter acabado num Big Crunch, e toda a vida ter-se-ia extinguido em chamas. No entanto, a nossa gravidade é exatamente a correta para permitir que estrelas e planetas se formem e durem tempo suficiente para o surgimento de vida.

É possível mencionar uma série destes acasos que tornam a vida possível, e em cada um deles estamos mesmo no centro das condições ideais. Assim, o universo é um jogo de dados gigantesco e nós ganhámos a partida. Mas, de acordo com a teoria dos muitos-mundos, isso significa que coexistimos com um vasto número de universos mortos.

Assim, talvez o princípio antrópico consiga escolher o nosso universo entre os milhões de universos no panorama (*landscape*) porque temos vida consciente no nosso universo.

17. O Meu Ponto de Vista Sobre a Teoria de Cordas

Trabalho na teoria de cordas desde 1968, portanto tenho o meu próprio ponto de vista definido. Seja qual for a maneira como olharmos para ela, a forma final da teoria ainda está por revelar. Assim, é prematuro comparar a teoria de cordas com o universo atual,

Uma característica da teoria de cordas é que está a evoluir ao contrário, revelando nova matemática e novos conceitos pelo caminho. Mais ou menos de dez em dez anos há uma nova revelação na teoria de cordas que modifica o nosso ponto de vista relativamente à natureza da mesma. Já assisti a umas três destas revoluções espantosas, e apesar disso ainda não conseguimos expressar a teoria de cordas na sua forma final. Ainda não conhecemos os seus princípios fundamentais finais. Só então podemos compará-la com a experiência.

18. Revelar uma Pirâmide

Gosto de comparar isto com a busca de um tesouro no deserto egípcio. Imaginemos que, um dia, tropeçamos numa pequena pedra no meio do deserto. Depois de afastar um pouco de areia começamos a perceber que esta pedra é, na realidade, o topo de

uma pirâmide gigantesca. Após anos de escavação, encontramos uma série de câmaras estranhas e obras de arte. Em cada piso deparamo-nos com novas surpresas. Por fim, depois de escavarmos muitos andares, chegamos à última porta, e estamos prestes a abri-la para descobrir quem construiu a pirâmide.

Pessoalmente, creio que ainda não estamos no último piso, uma vez que continuamos a descobrir novas camadas matemáticas de cada vez que analisamos a teoria. Ainda há mais camadas a revelar antes de encontrarmos a teoria de cordas na sua forma final. Por outras palavras, a teoria é mais inteligente do que nós.

É possível expressar toda a teoria de cordas em termos da teoria do campo de cordas, numa equação com cerca de 4 centímetros. Mas precisamos de cinco equações dessas em dez dimensões.

Embora seja possível expressar a teoria de cordas em forma de teoria de campo, isto ainda não é possível para a teoria-M. A esperança é que, um dia, os físicos consigam descobrir uma única equação que resuma toda a teoria-M. Infelizmente, é notoriamente difícil expressar uma membrana (que pode vibrar de tantas formas diferentes) na forma de teoria de campos. Em consequência, a teoria-M consiste de dezenas de equações desconexas que, miraculosamente, descrevem a mesma teoria. Se conseguirmos escrever a teoria-M em forma de teoria de campos, então toda a teoria deverá emergir de uma só equação.

Ninguém consegue prever se ou quando isto acontecerá. Porém, depois de assistir ao frenesi em torno da teoria de cordas, o público está a ficar impaciente.

Contudo, mesmo entre os teóricos de cordas, reina um certo pessimismo quanto às perspectivas futuras da teoria. Tal como mencionou o galardoado com o Nobel, David Gross, a teoria de cordas é como o cume de uma montanha. Enquanto os alpinistas escalam a montanha, o cume é claramente visível, mas parece afastar-se à medida que eles se aproximam. O objetivo parece perto, mas ao mesmo tempo sempre fora do nosso alcance.

Pessoalmente, penso que isto é compreensível, uma vez que ninguém sabe quando, ou se, encontraremos a supersimetria em laboratório, mas é preciso que a questão seja colocada na devida perspectiva. A correção ou incorreção de uma teoria deve depender de resultados concretos, não dos desejos subjetivos dos físicos. Todos esperamos que as nossas teorias preferidas sejam confirmadas ainda no nosso tempo de vida. É um desejo profundamente humano. Mas, às vezes, a natureza tem os seus próprios planos.

Por exemplo, a teoria atômica demorou dois mil anos a ser confirmada, e só recentemente os cientistas conseguiram captar imagens nítidas de átomos individuais. Até as grandes teorias de Newton e Einstein precisaram de décadas para que muitas das suas previsões fossem completamente testadas e verificadas. Os buracos negros foram previstos pela primeira vez em 1783 por John Michell,

mas só em 2019 os astrónomos apresentaram as primeiras imagens conclusivas do seu horizonte de acontecimentos.

Pessoalmente, penso que o pessimismo de muitos cientistas estará equivocado, porque as evidências da teoria de cordas podem muito bem ser encontradas, não em algum acelerador de partículas gigantesco, mas quando alguém descobrir a formulação matemática final da teoria.

A questão aqui é que *talvez não seja preciso uma prova experimental da teoria de cordas*. Uma teoria de tudo é também uma teoria de coisas vulgares. Se conseguirmos retirar a massa dos quarks e outras partículas subatômicas dos primeiros princípios, isso pode ser uma prova convincente de que esta é a teoria final,

O problema não é experimental, de todo. O Modelo Padrão tem cerca de vinte parâmetros livres que são introduzidos à mão (como a massa dos quarks e a força das suas interações). Temos muitos dados experimentais relativamente às massas e união de partículas subatômicas. Se a teoria de cordas conseguir prever com precisão estas constantes fundamentais a partir dos primeiros princípios, sem quaisquer suposições, isto, na minha opinião, provaria a sua correção. Seria um evento verdadeiramente histórico se os parâmetros conhecidos do universo pudessem emergir de uma única equação.

Mas depois de termos esta equação de 4 centímetros, o que faremos com ela? Como podemos escapar ao problema do panorama (*landscape*)?

Uma possibilidade é que muitos destes universos sejam instáveis e se desintegrem no nosso universo familiar. Recordemos que o vácuo, em vez de ser uma coisa enfadonha e uniforme, fervilha na realidade com bolhas de universos que surgem e desaparecem como num banho de espuma. Hawking chamou a isto a espuma espaciotemporal. A maioria destes minúsculos universos-bolhas é instável, salta para fora do vácuo e volta a saltar para ele.

Da mesma forma, depois de encontrada a formulação final da teoria, talvez seja possível demonstrar que a maioria destes universos alternativos é instável e se decompõe no nosso universo. Por exemplo, a escala temporal natural destes universos-bolhas é o tempo de Planck, que é 10^{-43} segundos, uma quantidade de tempo incrivelmente pequena. A maioria dos universos vive apenas durante este breve instante. No entanto, a idade do nosso universo, em comparação, é de 13,8 mil milhões de anos, astronomicamente mais do que a esperança de vida da maioria dos universos desta formulação. Por outras palavras, talvez o nosso universo seja especial entre o infinito de universos do panorama (*landscape*). O nosso sobreviveu a todos eles, e é por isso que estamos aqui hoje para discutir esta questão.

Mas o que fazer se a equação final se revelar tão complexa que será impossível de resolver à mão? Então parece impossível provar que o nosso universo é especial entre os universos do panorama

(*landscape*). Nesse ponto, penso que devíamos colocá-la num computador. Foi o caminho escolhido para a teoria dos quarks. Se bem se lembram, a partícula Yang-Mills funciona como uma cola, para unir os quarks e formar um próton. Mas ao fim de cinquenta anos ninguém conseguiu ainda prová-lo matematicamente com rigor. Na verdade, muitos físicos praticamente abandonaram a esperança de alguma vez o conseguir. Em vez disso, as equações de Yang-Mills são resolvidas num computador.

Isto faz-se abordando o espaço-tempo como uma série de pontos num gradeado. Normalmente, pensamos no espaço-tempo como uma superfície uniforme, com um número infinito de pontos. Quando os objetos se movem, passam através desta sequência infinita. Mas podemos abordar esta superfície uniforme como uma grelha ou gradeado, como uma rede. À medida que permitimos que os espaços entre os pontos da grelha se tornem cada vez mais pequenos, esta torna-se o espaço-tempo normal, e a teoria final começa a emergir. Da mesma forma, depois de termos a equação final da teoria-M, podemos aplicá-la a uma grelha e fazer o cálculo num computador. E neste cenário, o nosso universo emerge do produto de um supercomputador.

(No entanto, lembro-me sempre do livro *À Boleia pela Galáxia*, no qual constroem um supercomputador gigantesco para encontrar o sentido da vida. Depois de éons a fazer os cálculos, o computador conclui finalmente que o sentido do universo é «quarenta e dois».)

Assim, é concebível que a próxima geração de aceleradores de partículas, ou um detetor de partículas nas profundezas de uma

mina, ou um detetor de ondas de gravidade no espaço sideral, encontrem prova experimental da teoria de cordas. Contudo, se isso não acontecer, talvez um físico mais empreendedor tenha a energia e a visão necessárias para encontrar a formulação matemática final da teoria de tudo. Só então podemos compará-la com a experiência.

A física terá pela frente, provavelmente, mais reviravoltas antes da conclusão desta viagem. Mas tenho a certeza de que acabaremos por encontrar a teoria de tudo.

A próxima pergunta é: de onde veio a teoria de cordas? Se a teoria de tudo tem um grande desígnio, terá tido um criador? E, neste caso, terá o universo um sentido e uma finalidade?

¹ O Dr. Kikkawa e eu somos cofundadores de um ramo da teoria de cordas chamado «teoria do campo de cordas», que nos permite expressar a teoria de cordas na linguagem de campos, o que resulta numa simples equação com pouco mais de 4 centímetros

$$L = \Phi^\dagger (i\partial_\tau - H) \Phi + \Phi^\dagger * \Phi * \Phi$$

Embora isto nos permita expressar toda a teoria de cordas de forma compacta, não é a formulação final da teoria. Tal como veremos, há cinco tipos diferentes de teoria de cordas e cada um requer uma teoria do campo de cordas. Mas se formos para a décima primeira dimensão, as cinco teorias convergem aparentemente numa só equação, descrita por algo a que se chama teoria-M, que inclui uma variedade de membranas além de cordas. De momento, como é tão difícil trabalhar com as membranas matematicamente, em particular em onze dimensões, ninguém conseguiu ainda expressar a teoria-M numa única teoria do campo de cordas. Este é, na verdade, um dos principais objetivos da teoria de cordas: encontrar a formulação final da teoria da qual poderemos extrair resultados físicos. Por outras palavras, a teoria de cordas provavelmente ainda não se encontra na sua forma final.

² Citado em Nigel Calder, *The Key to the Universe* (Nova Iorque: Viking, 1977), 185.

³ Mais precisamente, a dualidade encontrada por Maldacena era entre a teoria supersimétrica de Yang-Mills $N = 4$ em quatro dimensões e a teoria de cordas tipo IIB em dez dimensões. Esta é uma dualidade altamente importante, porque mostra a equivalência entre uma teoria gauge com partículas Yang-Mills em quatro dimensões e a teoria de cordas em dez dimensões, que geralmente se consideram distintas. Esta dualidade mostrou a profunda relação entre teorias gauge, que se encontram nas interações fortes em quatro dimensões, e a teoria de cordas em dez dimensões, o que é extraordinário.

⁴ Citado em William H. Cropper, *Great Physicists* (Nova Iorque: Oxford University Press, 2001), 257

⁵ <http://www.preposterousuniverse.com/blog/2011/10/18/column-welcome-to-the-multiverse/comment-page-2>.

⁶ Sheldon Glashow, com Ben Bova, *Interactions* (Nova Iorque: Warner Books, 1988), 330.

⁷ Citado em Howard A. Baer e Alexander Belyaev, *Proceedings of the Dirac Centennial Symposium* (Singapura: World Scientific Publishing, 2003), 71.

⁸ Sabine Hossenfelder, «You Say Theoretical Physicists Are Doing Their Job All Wrong. Don't You Doubt Yourself?», *Back Reaction* (blogue), 4 de out. de 2018, <http://backreaction.blogspot.com/2018/10/you-say-theoretical-physicists-are.html>.

CAPÍTULO 7

Encontrar Sentido no Universo

Já vimos como o domínio das quatro forças fundamentais não só revelou muitos dos segredos da natureza, como desencadeou também as grandes revoluções científicas que alteraram o destino da própria civilização. Quando Newton escreveu as leis do movimento e da gravidade assentou os alicerces para a Revolução Industrial. Quando Faraday e Maxwell revelaram a unidade das forças elétrica e magnética, isto pôs em movimento a revolução elétrica. Quando Einstein e os físicos quânticos revelaram a natureza probabilística e relativista da realidade, isso impulsionou a revolução de alta tecnologia dos nossos dias.

Mas agora podemos estar a convergir para uma teoria de tudo que unifique as quatro forças fundamentais. Assim, partamos do princípio, por um minuto, de que alcançámos finalmente esta teoria. Partamos do princípio de que foi rigorosamente testada e é universalmente aceite pelos cientistas do mundo. Que impacto terá isso nas nossas vidas, no nosso pensamento e na nossa conceção do universo?

No que diz respeito a impacto direto na nossa vida, este provavelmente será mínimo. Cada solução da teoria de tudo é um universo inteiro. Assim, a energia a que a teoria se torna relevante

é a energia de Planck, que é mil bilhões de vezes maior do que a energia produzida pelo Grande Colisionador de Hadrões. A escala energética da teoria de tudo tem a ver com a criação do universo e os mistérios dos buracos negros, não com os nossos assuntos pessoais.

O verdadeiro impacto da teoria nas nossas vidas será filosófico, porque a teoria pode finalmente dar resposta a profundas questões filosóficas que atormentam os grandes pensadores há gerações, como por exemplo se é possível viajar no tempo, o que aconteceu antes da criação e de onde veio o universo.

Como disse em 1863 o grande biólogo Thomas H. Huxley: «A maior questão de todas as questões para a humanidade, o problema que está para além de todos os outros e é mais interessante do que qualquer um, é o da determinação do lugar do homem na Natureza e da sua relação com o Cosmos.»

Mas isto deixa ainda em aberto uma pergunta: o que tem a teoria de tudo a dizer sobre o sentido no universo?

A secretária de Einstein, Helen Dukas, mencionou uma vez que Einstein não tinha mãos a medir com a correspondência que recebia a implorar-lhe que explicasse o sentido da vida e a perguntar-lhe se acreditava em Deus. Ele dizia ser impotente para responder a todas essas perguntas sobre o objetivo do universo.

Hoje, as perguntas sobre o sentido no universo e a existência de um criador ainda fascinam as pessoas em geral. Em 2018, uma carta particular que Einstein escreveu pouco antes de morrer foi leiloada. Surpreendentemente, a licitação vencedora para a carta de Deus foi de 2,9 milhões de dólares, acima até das expectativas da leiloeira.

Nesta e noutras cartas, Einstein manifestava a sua incapacidade de responder a perguntas sobre o sentido da vida, mas era claro em relação ao que pensava sobre Deus. Um problema, escreveu, é que na realidade há dois tipos de Deus, e temos tendência para os confundir. Primeiro há o Deus pessoal, o Deus a quem rezamos, o Deus da Bíblia que castiga os filisteus e recompensa os crentes. E Einstein não acreditava nesse Deus. Não acreditava que o Deus que criara o universo interferisse nos assuntos de meros mortais.

Contudo, acreditava no Deus de Spinoza — ou seja, o Deus da ordem num universo que é belo, simples e elegante. O universo podia ter sido feio, caótico, aleatório, mas em vez disso tem uma ordem oculta que é misteriosa e, apesar disso, profunda. Numa analogia, Einstein disse uma vez que se sentia como uma criança a entrar numa grande biblioteca onde se via rodeada por pilhas de livros que continham as respostas para os mistérios do universo. O seu objetivo na vida era, na realidade, conseguir ler alguns capítulos destes livros.

Contudo, deixou esta questão em aberto: se o universo é como uma grande biblioteca, haverá um bibliotecário? Ou alguém que tenha escrito estes livros? Por outras palavras, se todas as leis

físicas podem ser explicadas pela teoria de tudo, então de onde veio essa equação?

E Einstein era movido ainda por outra pergunta: Deus terá tido escolha na criação do universo?

1. Provar a Existência de Deus

Contudo, estas perguntas não são tão simples como isso quando tentam usar lógica para provar ou refutar a existência de Deus. Hawking, por exemplo, não acreditava em Deus. Escreveu que o Big Bang teve lugar num breve instante de tempo, pelo que não haveria pura e simplesmente tempo para Deus ter criado o universo tal como o vemos.

Na teoria original de Einstein, o universo expandiu-se quase instantaneamente. Mas na teoria dos muitos-mundos, o nosso universo não é mais do que uma bolha que coexiste com outros universos-bolhas, que estão continuamente a ser criados.

Se assim é, talvez então o tempo não tenha simplesmente adquirido existência com o Big Bang, mas existisse um tempo antes do princípio do nosso universo. Cada universo nasceu num breve instante de tempo, mas a totalidade de universos no multiverso pode ser eterna. Assim, a teoria de tudo deixa em aberto a questão da existência de Deus.

No entanto, ao longo dos séculos, os teólogos tentaram o ponto de vista oposto: usar a lógica para provar a existência de Deus. São Tomás de Aquino, o grande teólogo católico do século XI, propôs cinco famosas provas da existência de Deus. São interessantes porque, ainda hoje, levantam questões profundas sobre a teoria de tudo.

Duas delas são, na realidade, redundantes, pelo que as cinco provas podem ser reduzidas a três:

1. Prova cosmológica. As coisas movem-se porque são empurradas — ou seja, algo as coloca em movimento. Mas qual é o Primeiro Motor ou Primeira Causa que pôs em movimento o universo? Só pode ser Deus.
2. Prova teológica. Em todo o lado, à nossa volta, vemos objetos de grande complexidade e sofisticação. Mas cada *design* requer um criador. O Primeiro Criador foi Deus.
3. Prova ontológica. Deus, por definição, é o ser mais perfeito imaginável. Mas é possível imaginar um Deus que não existe. Todavia, se Deus não existisse, não seria perfeito. Portanto, tem de existir.

Estas provas da existência de Deus perduraram durante muitos séculos. Só no século XIX é que Immanuel Kant encontrou uma falha na prova ontológica, porque perfeição e existência são duas

categorias distintas. Ser perfeito não implica necessariamente que algo tenha de existir.

Contudo, as outras duas provas têm de ser reexaminadas à luz da ciência moderna e da teoria de tudo. A análise da prova teológica é simples. Por todo o lado, à nossa volta, vemos objetos de grande complexidade. Mas a sofisticação das formas de vida que nos rodeiam pode ser explicada através da evolução. Com tempo suficiente, o puro acaso pode impulsionar a evolução através da sobrevivência dos mais fortes, pelo que surgem *designs* mais sofisticados aleatoriamente a partir de *designs* menos sofisticados. Não é necessário ter existido um primeiro criador da vida.

Em contraste, a análise da prova cosmológica não é tão simples. Hoje, os físicos conseguem rebobinar a fita e demonstrar que o universo começou com um Big Bang que pôs em movimento o universo. Contudo, para recuar para além do Big Bang, temos de usar a teoria dos muitos-mundos. No entanto, mesmo que partamos do princípio de que a teoria dos muitos-mundos explica de onde veio o Big Bang, somos obrigados a perguntar: e de onde vieram os muitos-mundos? Por fim, se afirmarmos que os muitos-mundos são uma consequência lógica da teoria de tudo, então temos de perguntar: de onde veio a teoria de tudo?

Neste ponto, a física cessa e começa a metafísica. A física não diz nada sobre de onde vêm as leis da física propriamente ditas. Assim, a prova cosmológica de São Tomás de Aquino relativa ao Primeiro Motor ou Primeira Causa continua ainda hoje a ser relevante.

A característica-chave de qualquer teoria de tudo será, provavelmente, a sua simetria. Mas de onde vem esta simetria? Esta simetria seria um derivado de profundas verdades matemáticas. Mas de onde vem a matemática? Quanto a esta questão, a teoria de tudo é, mais uma vez, muda.

As questões levantadas por um teólogo católico há oitocentos anos ainda são relevantes hoje, apesar dos nossos enormes progressos na compreensão da origem da vida e do universo.

2. O Meu Ponto de Vista

O universo é um lugar admiravelmente belo, ordenado e simples. Acho absolutamente assombroso que todas as leis conhecidas do universo físico possam ser resumidas numa folha de papel.

Nesse papel encontra-se a teoria da relatividade de Einstein. O Modelo Padrão é mais complicado, ocupando a maior parte da página com o seu zoo de partículas subatômicas. Estas conseguem descrever tudo no universo conhecido, do interior dos prótons aos limites do universo visível.

Dada a absoluta brevidade desta folha de papel, é difícil escapar à conclusão de que tudo isto foi planeado antecipadamente, de que este *design* elegante revela a mão de um criador cósmico. Para mim, este é o argumento mais forte a favor da existência de Deus.

Mas a base do nosso entendimento do mundo é a ciência, que, em última análise, se baseia em coisas que são testáveis, reproduzíveis, falsificáveis. A conclusão a retirar é esta. Em disciplinas como a crítica literária, as coisas tornam-se mais complicadas com o tempo. Os analistas questionarão para sempre o que James Joyce realmente queria dizer com esta ou aquela passagem. Mas a física move-se na direção oposta, tornando-se mais simples e mais poderosa com o tempo, até tudo ser uma consequência de um punhado de equações. Para mim, isto é notável. Mas os cientistas têm muitas vezes relutância em admitir que algumas coisas estão para além do reino da ciência.

Por exemplo, é impossível refutar uma negativa.

Imaginemos que queríamos refutar a existência de unicórnios. Embora tenhamos explorado a maior parte da superfície da Terra sem nunca ver um unicórnio, há sempre a possibilidade de que existam unicórnios em alguma ilha ou gruta ainda por descobrir. Assim, é impossível refutar a existência de unicórnios. Isto significa que, daqui a cem anos, as pessoas ainda estarão a debater a existência de Deus e o sentido do universo. Isto porque estes conceitos não são testáveis e, portanto, não podem resolver-se. Estão fora do âmbito da ciência normal.

Da mesma forma, mesmo que nunca tenhamos encontrado Deus em todas as nossas viagens pelo espaço, há sempre a possibilidade de que Deus exista em regiões que nunca explorámos.

Portanto, eu sou agnóstico. Não fizemos mais do que raspar a superfície do universo, e é presunçoso fazer declarações sobre a natureza de todo o universo, muito para além do alcance dos nossos instrumentos.

Contudo, temos ainda assim de confrontar a prova de São Tomás de Aquino quanto à existência de um Primeiro Motor. Por outras palavras, de onde veio tudo? Mesmo que o universo tenha começado segundo a teoria de tudo, então de onde veio a teoria de tudo?

Eu acredito que a teoria de tudo existe porque é a única teoria que é matematicamente consistente. Todas as outras teorias são inerentemente imperfeitas e inconsistentes. Acredito que, se começarmos com uma teoria alternativa, conseguiremos em última análise provar que $2 + 2 = 5$ — ou seja, estas teorias alternativas contradizem-se a si próprias.

Recordamos que existe uma saraivada de obstáculos a uma teoria de tudo. Quando adicionamos correções quânticas a uma teoria, concluímos geralmente que a teoria rebenta, com divergências infinitas, ou que a simetria original é arruinada por anomalias. Acredito que existe talvez apenas uma solução para estas limitações, que corrige a teoria excluindo todas as outras possibilidades. O universo não pode existir em quinze dimensões, uma vez que um universo assim sofreria destas imperfeições fatais. [Na teoria de cordas em dez dimensões, quando calculamos correções quânticas, estas contêm frequentemente o termo $(D - 10)$, onde D é a dimensionalidade do espaço-tempo. Obviamente

que se determinarmos que $D = 10$, então essas anomalias problemáticas desaparecem. Mas se não determinarmos que $D = 10$, então encontramos um universo alternativo repleto de contradições, onde a lógica matemática é violada. Da mesma forma, quando adicionamos membranas e cálculos com a teoria-M, encontramos termos indesejados que contêm o fator $(D - 11)$. Assim, com a teoria de cordas, existe apenas um universo autoconsistente onde $2 + 2 = 4$, e este é em dez ou onze dimensões]

Esta é então uma possível resposta para a questão levantada por Einstein na sua busca pela teoria de tudo: terá Deus tido escolha na criação do universo? O universo é único, ou há muitas formas de um universo poder existir?

Se o meu raciocínio estiver certo, então não há escolha. Existe apenas uma equação capaz de descrever o universo, porque todas as outras são matematicamente inconsistentes.

Assim, a equação final do universo é única. Pode haver um número infinito de soluções para esta equação original, dando-nos um panorama (*landscape*) de soluções, mas a equação em si mesma é única. Isto lança alguma luz sobre outra questão: por que há alguma coisa em vez de nada?

Na teoria quântica, não existe o nada absoluto. Já vimos que a escuridão absoluta não existe, pelo que os buracos negros são na realidade cinzentos e têm de se evaporar. Da mesma forma, ao

resolver a teoria quântica, descobrimos que a energia mais baixa não é zero. Por exemplo, nunca podemos alcançar o zero absoluto porque os átomos, no seu estado de energia quântico mais baixo, ainda vibram. (De forma semelhante, segundo a mecânica quântica, é impossível atingir zero energia quântica mecanicamente, porque ainda há energia de ponto zero — ou seja, as vibrações quânticas mais baixas. Um estado de vibração zero violaria o princípio da incerteza, uma vez que energia zero é um estado de zero incerteza, o que não é permitido.)

Então de onde veio o Big Bang? Muito provavelmente, era uma flutuação quântica em Nada. Mesmo Nada, ou um vácuo puro, fervilha com partículas de matéria e antimatéria, constantemente a saltar para fora do vácuo e a voltar a cair no vácuo. Foi assim que algo surgiu de nada.

Hawking, como já vimos, chamou a isto a espuma espaciotemporal — ou seja, uma espuma de minúsculos universos-bolhas continuamente a aparecer e a voltar a desaparecer no vácuo. Nunca vemos esta espuma espaciotemporal porque cada bolha é muito mais pequena do que qualquer átomo. Porém, de vez em quando, uma destas bolhas não volta a desaparecer no vácuo e continua a expandir-se, até criar todo um universo.

Então por que há algo em vez de nada? Porque o nosso universo veio originalmente de flutuações quânticas em Nada. Ao contrário de incontáveis outras bolhas, o nosso universo saltou da espuma espaciotemporal e continuou a expandir-se.

3. O Universo Teve ou Não Um Princípio?

Esta teoria de tudo dar-nos-á o sentido da vida? Há uns anos, vi um estranho cartaz de uma sociedade de meditação. Reconheci que publicava fielmente todos os pormenores das equações da supergravidade, em toda a sua glória matemática. Contudo, ligada a cada termo da equação tinha uma seta que dizia «paz», «tranquilidade», «unidade», «amor», etc.

Por outras palavras, o sentido da vida estava integrado nas equações da teoria de tudo.

Pessoalmente, acho improvável que uma expressão puramente matemática numa equação da física possa ser equacionada a amor ou felicidade.

Contudo, acredito que a teoria de tudo pode ter algo a dizer sobre o sentido do universo. Quando era criança, fui criado como presbiterano, mas os meus pais eram budistas. Estas duas grandes religiões têm, por sua vez, dois pontos de vista diametralmente opostos no que diz respeito ao Criador. Na igreja cristã, houve um instante no tempo em que Deus criou o mundo. O teólogo católico e físico Georges Lemaître, um dos arquitetos da teoria do Big Bang, acreditava que a teoria de Einstein era compatível com o Génesis.

Contudo, no budismo, não há Deus. O universo não tem princípio nem fim. Existe apenas o Nirvana, fora do tempo.

Então como conciliar estes dois pontos de vista diametralmente opostos? Ou o universo teve um princípio, ou não teve. Não há meio-termo.

Mas, na realidade, a teoria dos muitos-mundos dá-nos uma forma radicalmente nova de encarar esta contradição. Talvez o nosso universo tenha tido um princípio, como diz a Bíblia. Mas talvez haja Big Bangs a acontecer constantemente, segundo a teoria da inflação, criando um banho de espuma de universos. Talvez estes universos estejam a expandir-se numa arena muito maior, um Nirvana de hiperespaço. Assim, o nosso universo teve um princípio e é uma bolha tridimensional a flutuar num espaço muito maior de Nirvana em onze dimensões, no qual surgem continuamente outros universos.

Assim, a teoria dos muitos-mundos permite-nos combinar a mitologia da criação do cristianismo com o Nirvana do budismo numa única teoria compatível com as leis físicas conhecidas.

4. Sentido Num Universo Finito

No fim, acredito que nós criamos o nosso próprio sentido no universo.

É demasiado simples e fácil ter um guru a descer das montanhas com o sentido do universo. O sentido da vida é algo que temos de nos esforçar por compreender e apreciar. Se nos fosse entregue de mão beijada, isso iria contra o objetivo. Se o sentido da vida

estivesse disponível de graça, perderia o significado. Tudo o que tem algum significado resulta de esforço e sacrifício, e é algo pelo qual vale a pena lutar.

Mas é difícil argumentar que o universo tem um sentido se este universo estiver condenado a morrer. A física, de certa forma, encerra uma sentença de morte para o universo.

Apesar de todas as discussões eruditas sobre sentido e finalidade no universo, talvez seja tudo em vão, porque o universo está condenado a morrer num Big Freeze. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, tudo o que existe num sistema fechado tem eventualmente de se decompor, enferrujar ou desintegrar-se. A ordem natural das coisas é degradar-se e acabar por deixar de existir. Parece inescapável que todas as coisas têm de morrer quando o próprio universo morrer. Assim, seja qual for o sentido que atribuamos ao universo, este sentido acabará por ser eliminado quando o próprio universo morrer.

Contudo, mais uma vez, talvez a fusão da teoria quântica com a relatividade nos ofereça uma cláusula de fuga. Dissemos que a segunda lei da termodinâmica acaba por condenar o universo num sistema fechado. A palavra-chave aqui é fechado. Num universo aberto, onde possa entrar energia do exterior, é possível inverter a segunda lei.

Por exemplo, um ar condicionado parece violar a segunda lei porque pega em ar quente caótico e o arrefece. Mas um ar

condicionado vai buscar energia ao exterior, a uma bomba, e, portanto, não é um sistema fechado. Da mesma forma, até a vida na Terra parece violar a segunda lei, porque demora apenas nove meses a converter hambúrgueres e batatas fritas num bebê, o que é verdadeiramente um milagre.

Então por que é a vida possível na Terra? Porque temos uma fonte externa de energia, o Sol. A Terra não é um sistema fechado, por isso a luz do Sol permite-nos extrair energia do Sol para criar a comida necessária para alimentar um bebê. Assim, a segunda lei da termodinâmica tem uma cláusula de fuga. A luz do Sol torna possível a evolução para formas mais elevadas.

Da mesma forma, é possível usar *wormholes* para abrir um portal para outro universo. O nosso universo parece ser fechado. Mas um dia, talvez perante a proximidade da morte do universo, os nossos descendentes poderão, quem sabe, usar os seus fabulosos conhecimentos científicos para canalizar energia positiva suficiente para abrir um túnel através do espaço e do tempo, e depois usar energia negativa (do efeito Casimir quântico) para estabilizar o portal. Um dia, os nossos descendentes dominarão a energia de Planck, a energia na qual espaço e tempo se tornam instáveis, e usarão a sua poderosa energia para escapar ao nosso universo moribundo.

Assim, a gravidade quântica, em vez de ser um exercício na matemática do espaço-tempo em onze dimensões, torna-se um salva-vidas cósmico interdimensional que permitirá à vida

inteligente escapar à segunda lei da termodinâmica e fugir para um universo muito mais quente.

Desta forma, a teoria de tudo é mais do que apenas uma bonita teoria matemática. Em última análise, pode bem ser a nossa salvação.

5. Conclusão

A busca pela teoria de tudo conduziu-nos numa demanda para encontrar a derradeira simetria unificadora do universo. Do calor de uma brisa de verão à glória de um pôr do Sol flamejante, a simetria que vemos à nossa volta é um fragmento da simetria original encontrada no princípio dos tempos. Essa simetria original da superforça desfez-se no instante do Big Bang e vemos restos dessa simetria original onde quer que admiremos a beleza da natureza.

Gosto de pensar que talvez sejamos como criaturas bidimensionais, a viver num qualquer plano liso mítico, incapazes de visualizar a terceira dimensão, que é considerada mera superstição. No princípio dos tempos, nesta Terra Plana, havia um belo cristal tridimensional que, por algum motivo, era instável e se estilhaçou num milhão de pedaços que caíram sobre a Terra Plana. Durante séculos, os seus habitantes tentaram voltar a juntar essas peças, como se fosse um *puzzle*. Com o tempo, conseguiram reunir todas as peças em duas partes gigantescas. Uma chamava-se gravidade e a outra teoria quântica. Mas, por mais que tentassem, nunca conseguiram encaixar estas duas partes uma na outra.

Então, um dia, um habitante mais empreendedor apresentou uma conjectura escandalosa, que fez rir toda a gente. Por que não, disse ele, usar a matemática para elevar uma das partes para uma terceira dimensão imaginária, de modo que encaixem, uma por cima da outra? Quando isto foi feito, os habitantes da Terra Plana ficaram estupefactos e assombrados perante a joia deslumbrante e reluzente que surgiu de súbito perante eles, com a sua simetria perfeita e gloriosa.

Ou, como escreveu Stephen Hawking:

«Se descobrirmos de facto uma teoria completa, com o tempo, os seus princípios gerais deviam ser compreensíveis por todos, não apenas por alguns cientistas. Então todos nós, filósofos, cientistas e pessoas normais, poderíamos participar na discussão da questão do porquê de nós e o universo existirmos. Se encontrarmos a resposta para isso, seria o derradeiro triunfo da razão humana — pois então conheceríamos a mente de Deus»¹

¹ Stephen Hawking, *A Brief History of Time* (Nova Iorque: Bantam Books, 1988), 175.

Agradecimentos

Estou em dívida para com o meu agente, Stuart Krichevsky, que esteve lealmente ao meu lado durante todas estas décadas e sempre me deu bons e sábios conselhos. Confio sempre nos seus juízos de valor e no seu entendimento profundo em questões tanto literárias como científicas.

Gostaria também de agradecer ao meu editor, Edward Kastenmeier, que orientou vários dos meus livros com a sua mão firme e a sua perspicácia. Foi ele que me sugeriu que escrevesse este livro e que o guiou ao longo das várias fases. Este trabalho teria sido impossível sem os seus conselhos ponderados e honestos.

Queria ainda agradecer aos meus colegas, associados e amigos na área científica. Em particular, gostava de agradecer aos seguintes galardoados com o prémio Nobel por me terem cedido generosamente o seu tempo e os seus conhecimentos sobre física e ciências: Murray Gell-Mann, David Gross, Frank Wilczek, Steve Weinberg, Yoichiro Nambu, Leon Lederman, Walter Gilbert, Henry Kendall, T. D. Lee, Gerald Edelman, Joseph Rotblat, Henry Pollack, Peter Doherty e Eric Chivian. Por fim, queria agradecer aos mais de quatro mil físicos e cientistas com quem tive o prazer de interagir, quer seja como colaboradores na pesquisa sobre cordas, ou através dos meus programas semanais sobre ciência na rádio, dos vários programas que apresentei na BBC-TV e nos canais Discovery e Science, e do meu trabalho como correspondente para a ciência na CBS-TV.

Para uma lista mais completa dos cientistas que tive o prazer de entrevistar, consulte o meu livro *A Física do Futuro*. Para uma lista mais completa dos conceituados teóricos de cordas cujo trabalho menciono neste livro, consulte o meu manual académico, *Introduction to String Theory and M-Theory*.

Leituras Seleccionadas

- Bartusiak, Marcia. *Einstein Unfinished Symphony*. Yale University Press, 2017.
- Becker, Katrin, Melanie Becker e John Schwarz. *String Theory and M-Theory*. Cambridge University Press, 2007.
- Crease, Robert P., e Charles Mann. *The Second Creation: Makers of the Revolution um Twentieth-Century Physics*. Nova Iorque: Macmillan, 1986.
- Einstein, Albert. *The Special and General Theory*. Mineola, Nova Iorque: Dove Books, 2001.
- Feynman, Richard. *Está a Brincar, Sr. Feynman: Retrato de um físico enquanto homem*. Lisboa: Gradiva, 1998.
- *The Feynman Lectures on Physics* (com Robert Leighton e Matthew Sands). Nova Iorque: Basic Books, 2010.
- Green, Michael, John Schwarz e Edward Witten. *Superstring Theory*, vols. 1 e 2. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- Greene, Brian. *O Universo Elegante: Supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria final*. Lisboa: Gradiva, 2013.
- Hawking, Stephen. *Breve História do Tempo*. Lisboa: Gradiva, 2000.
- *O Grande Desígnio* (com Leonard Mlodinow). Lisboa: Gradiva, 2011.
- Hossenfelder, Sabine. *Lost in Math: How Beauty Leads Physics Astray*. Nova Iorque: Basic Books, 2010.
- Isaacson, Walter. *Einstein: o homem para além da mente*. Casa das Letras, 2017.
- Kaku, Michio. *Mundos Paralelos: Uma viagem através da criação, dimensões superiores e futuro do cosmos*. Lisboa: Bizâncio, 2006.
- *Hiperespaço: Uma odisséia científica através de universos paralelos, de dobras temporais e da 10.ª dimensão*. Lisboa: Bizâncio, 2016.
- *Introduction to String Theory and M-Theory*. Nova Iorque: SpringerVerlag, 1999.
- Kumar, Manjit. *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate About the Nature of Reality*. Nova Iorque: W. W. Norton, 2010.
- Lederman, Leon. *The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question?* Nova Iorque: Mariner Books, 2012.

- Levin, Janna. *Black Holes Blues and Other Songs from Outer Space*. Nova Iorque: Anchor Books, 2017.
- Maxwell, Jordan. *The History of Physics: The Story of Newton, Feynman, Schrödinger, Heisenberg, and Einstein*. Publicação independente, 2020.
- Misner, Charles W., Kip Thorne e John A. Wheeler. *Gravitation*. Princeton: Princeton University Press, 2017.
- Mlodinow, Leonard. *Stephen Hawking: Memórias de amizade e física*. Amadora: Vogais, 2021.
- Polchinski, Joseph. *String Theory*, vols. 1 e 2. Cambridge: Cambridge University Press, 1999,
- Smolin, Lee. *O Romper das Cordas: Ascensão e queda de uma teoria e o Futuro da física*. Lisboa: Gradiva, 2013.
- Thorne, Kip. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. Nova Iorque: W. W. Norton, 1994.
- Tyson, Neil de Grasse. *Morte por Buraco Negro e Outros Embaraços Cósmicos*. Lisboa: Gradiva, 2010.
- Weinberg, Steven. *Sonhos de Uma Teoria Final*. Gradiva, 1996.
- Wilczek, Frank. *Fundamentals: Ten Keys to Reality*. Nova Iorque: Penguin Books, 202,
- Woit, Peter. *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*. Nova Iorque: Basic Books, 2006.