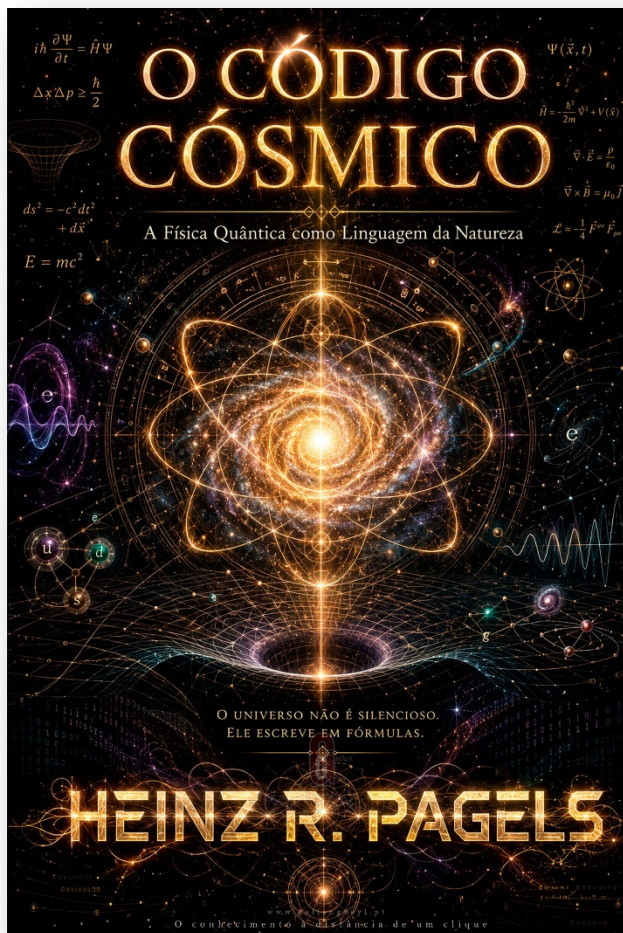


O CÓDIGO CÓSMICO

A Física Quântica como Linguagem da Natureza



Autor: Heinz R. Pagels

Edição e Preparação Digital: Gullan Grey!

Edição original: The Cosmic Code: Quantum Physics as the Language of Nature, 1982.

Edição portuguesa concluída em 09-04-2023



Livroteca Gullan Grey!

Sinopse

Em *O Código Cósmico*, Heinz R. Pagels convida o leitor a entrar no coração invisível da realidade e a acompanhar uma das mais extraordinárias aventuras do espírito humano: a descoberta de que o mundo, no seu nível mais profundo, não é feito de solidez tranquila, mas de energia, probabilidade, simetria, acaso e leis ocultas que a física moderna foi aprendendo a decifrar. Da relatividade à mecânica quântica, da indeterminação ao gato de Schrödinger, dos quarks aos léptons, do infinitamente pequeno ao cosmos inteiro, o livro conduz-nos por uma travessia em que a Natureza parece revelar-se como uma linguagem secreta escrita em fórmulas, experiências e estruturas invisíveis.

Ao longo dessa viagem, Pagels mostra que a física contemporânea não transformou apenas o conhecimento científico: transformou a própria imagem que a humanidade pode fazer de si e do Universo. Aquilo que antes parecia estável torna-se dinâmico; aquilo que parecia sólido dissolve-se em campos e partículas; aquilo que parecia governado por certezas absolutas abre-se ao mistério, à probabilidade e à participação do observador. O leitor descobre, assim, que a realidade quântica não é apenas uma curiosidade laboratorial, mas uma nova maneira de pensar a matéria, a causalidade, o conhecimento e os limites da percepção humana.

O Código Cósmico é, por isso, muito mais do que um livro de divulgação científica. É uma iniciação intelectual à nova visão do mundo nascida da física do século XX: um mundo em que a matéria já não é muda, o vazio já não está vazio, e o universo parece organizar-se segundo uma gramática profunda que a mente humana mal começou a compreender. Um livro que não apenas explica a ciência moderna, mas arrasta o leitor para dentro dela — até ao ponto em que o invisível se torna pensável e o cosmos começa, finalmente, a falar.

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 ao <i>Código Cósmico</i> , de Pagels	1
Agradecimentos	5
Prefácio	7
PARTE UM	9
O Caminho Para a Realidade Quântica	9
CAPÍTULO 1.....	10
O Último Físico Clássico.....	10
CAPÍTULO 2.....	42
A Invenção da Relatividade Generalizada	42
CAPÍTULO 3.....	75
Os Primeiros Físicos Quânticos	75
CAPÍTULO 4.....	90
Heisenberg em Heligolândia	90
CAPÍTULO 5.....	107
Indeterminação e Complementaridade	107
CAPÍTULO 6.....	131
O Aleatório	131
CAPÍTULO 7.....	144
A Mão Invisível	144
CAPÍTULO 8.....	158
A Mecânica Estatística.....	158
CAPÍTULO 9.....	179
Fazendo Ondas	179
CAPÍTULO 10.....	204
O Gato de Schrödinger	204
CAPÍTULO 11.....	214
Um Conto de Fadas Quântico	214
CAPÍTULO 12.....	222
A Desigualdade de Bell	222
CAPÍTULO 13.....	247
O Mercado da Realidade	247
PARTE DOIS	269
A Viagem ao Interior da Matéria	269
CAPÍTULO 14.....	270

Microscópios para a Matéria.....	270
CAPÍTULO 15.....	293
O Início da Viagem: Moléculas, Átomos e Núcleos.....	293
1. Moléculas.....	295
2. Átomos.....	300
3. Núcleos	303
CAPÍTULO 16.....	307
O Mistério dos Hadrões.....	307
CAPÍTULO 17.....	316
Quarks	316
CAPÍTULO 18.....	335
Leptões	335
1. O Eletrão	337
2. O Muão	341
3. Os Neutrinos	342
4. O Tau	348
CAPÍTULO 19.....	351
Gluões.....	351
1. A Interação Gravitacional	354
2. A Interação Eletromagnética	357
3. A Interação Fraca	360
4. A Interação Forte	364
CAPÍTULO 20.....	371
Campos, Partículas e a Realidade.....	371
CAPÍTULO 21.....	383
O Ser e o Nada.....	383
CAPÍTULO 22.....	391
Identidade e Diferença	391
CAPÍTULO 23.....	403
A Revolução das Teorias de Campos de <i>Gauge</i>	403
CAPÍTULO 24.....	426
O Decaimento do Protão.....	426
CAPÍTULO 25.....	436
O <i>Quantum</i> e o Cosmo	436
PARTE TRÊS	451

O Código Cósmico	451
CAPÍTULO 26.....	452
As Características da Lei Física	452
1. Natureza Invariante	454
2. Universalidade e Simplicidade das Leis Físicas	459
3. Carácter Completo.....	461
4. Relação com a Observação e com a Experiência.....	463
5. Relação com a Matemática	466
CAPÍTULO 27.....	477
O Código Cósmico.....	477
Bibliografia	487

O CÓDIGO CÓSMICO

*A Física Quântica como
Linguagem da Natureza*

Heinz R. Pagels

Introdução ao *Código Cósmico*, de Pagels

[...] o acaso é a lei de Deus na ordem do mundo.

(Camilo Castelo Branco, O Romance de Um Homem Rico)

Henri Poincaré, o grande matemático que tinha uma tal estatura que nunca se diminuía quando se debruçava sobre problemas da física, convidou, num luminoso ensaio, os leitores a imaginar qual seria a nossa visão científica do mundo se a Terra estivesse sempre envolvida por nuvens, de forma a tornar impossível a «vista» das estrelas e dos planetas. Quaisquer que sejam os resultados desse exercício, não tenho dúvidas de que poderíamos, em qualquer caso, concluir que não teriam sido abolidas as guerras, as convulsões sociais, os conflitos, mas as provocações teriam sido outras, pois seriam diferentes as regras dos jogos da vida e da morte dos homens, a sua história, em suma. Quero eu dizer que a todos vitalmente nos interessam os problemas das visões do mundo, ainda que nos apareçam longe das nossas ocupações e preocupações quotidianas; não se podem deixar aos filósofos, assim como deixamos o fabrico e o conserto dos sapatos ao sapateiro. Aqui, pelo menos, quando os pés nos doem, sabemos a quem nos queixar. É que as ideologias se alimentam dessas concepções do mundo e são elas que fazem arder os archotes com que os homens se queimam ou queimam outros homens. A física do século XX é dominada por duas das maiores realizações intelectuais de toda a história da humanidade: a teoria da relatividade e a física quântica. A relatividade pode considerar-se, no entanto, o esplendor da física clássica. Não é por acaso que Einstein, tão revolucionário na aparência, é o chefe da contrarreforma, não querendo (ou não podendo) aceitar todas as consequências de uma física quântica na sua formulação atual. O seu programa intelectual continuou (apesar da importância das suas contribuições para o desenvolvimento da mecânica quântica) a ser o cartesiano, da mente oposta ao mundo. Visceralmente, quase, repugnava-lhe esse envolvimento do observador com as coisas observadas e, principalmente, a intrusão do acaso na ordem do mundo. É que há homens que têm de reduzir tudo ao seu centro vital de decisão, sem contradições, e não estão dispostos a fazer sacrifícios... Honrados sejam, pois o seu fermento crítico é indispensável para a constante afirmação e reafirmação da dignidade humana. A inquietação e até irritação que provocam não é um preço excessivo para o que se joga.

O livro de Pagel responde a uma solicitação de Isidor Rabi para que os cientistas se obriguem a contar e explicar a todas as pessoas em que consistem as suas navegações, descobertas e invenções. Sabe-se que não é possível realizar plenamente esse programa. Não chego a dizer que as expressões físico-matemáticas são mais inteligentemente ricas do que os homens que as formularam, mas certamente existem, recônditas, zonas inacessíveis sem os instrumentos profissionais do cientista. Mas, se elas são importantes, não o serão menos aqueles aspetos que se podem, com o esforço e o talento indispensáveis, tornar acessíveis a todos aqueles que sejam devidamente informados, e interessados, sobre a sua importância. Realiza excelentemente o autor o seu objetivo. Este livro de Pagel é a melhor introdução que conheço aos princípios da física moderna pelo rigor (sim, leitor, há que exigir rigor à divulgação científica) e clareza da exposição. É interessante notar que, muitas vezes, a exigência imposta de sermos claros para os outros impõe uma clarificação igualmente do nosso pensamento.

Era importante que esse rigor e clareza não fossem atraídos na tradução para português. Jorge Buescu conseguiu plenamente esse objetivo com a dedicação e o interesse profissionais que fazem justiça ao original e que há que exemplarmente realçar. É importante que o homem do nosso tempo tenha conhecimento seguro dessa aventura intelectual cujos resultados permitem, nos nossos dias, sintetizar novos medicamentos, produzir novos materiais, fabricar novas máquinas, facilitar descobertas e, por múltiplas vias, facilitar a penetração no desconhecido. Mas a aventura leva-nos até uma nova conceção da realidade, possivelmente uma nova visão do mundo, e isto, como dissemos já, não é de menor importância. É importante que se faça um esforço que nos permita participar lucidamente na empresa. Participamos quando fazemos por compreender; participamos quando podemos responsabilmente criticar. Viver é também compreender e aceitar ou recusar criticamente o que se nos oferece. Ali onde a física quântica toca no problema da realidade chegamos a uma fronteira de contornos difusos, e até se fala de ortodoxia, de cismas, de heresias, de crenças e de igrejas. Uns resignam-se a estas situações falando de mistérios, outros continuam porfiando referindo-se a problemas.

Muitas coisas se vão esclarecer, pois estamos a falar da física. Recentemente (1983), Fritz Rohrlich, da Universidade de Siracusa, começou um trabalho intitulado *Enfrentando a Realidade Quantum Mecânica*, escrevendo: «A teoria das variáveis locais escondidas está morta. Recebeu o golpe de graça em duas rigorosas experiências realizadas no ano passado

em Paris.» Referia-se às notáveis experiências do grupo da Universidade de Paris constituído por A. Aspect, P. Grangier, G. Roger e J. Delibard. Há pouco, este grupo anunciou ter demonstrado a interferência de um fóton consigo mesmo. O leitor, depois da leitura deste livro, temos a certeza de que saberá do que se está a falar. Podemos dizer que Pagel pertence ao grupo dos «ortodoxos» quanto à interpretação da mecânica quântica, mas, quando entre os «heterodoxos» encontramos um Einstein, um Schrödinger, um De Broglie, que, em linguagem teológica, não falam do pecado da mecânica quântica, mas da sua imperfeição, as dúvidas são legítimas. Richard Feynman, com a sua indesmentível coragem intelectual, disse mesmo: «Penso ser certo afirmar que ninguém entende a mecânica quântica. Se o puderem evitar, não insistam convosco mesmo: mas como pode ser isto? Vão todos por água abaixo, para um beco sem saída de que ninguém ainda escapou. Ninguém sabe como as coisas são como são.»

Numa carta recentemente publicada dirigida a Heisenberg, o famoso físico Wolfgang Pauli, que desempenhou gostosamente o papel de árbitro da física (outros, mais retoricamente, disseram que tinha sido a «consciência da física»), homem para quem os grandes olhavam expectantemente, aguardando um sinal de aprovação, escrevia irritado: «Einstein veio novamente à praça pública opinar sobre a mecânica quântica. Como sabe, cada vez que isto acontece é um desastre...» Mas, depois de incitar Heisenberg a escrever uma refutação do célebre artigo de Einstein, Podolski e Rosen (a quem se faz referência notável neste livro) caem em si e escrevem: «[...] mas, deixando Einstein [...] numa fundação sistemática da mecânica quântica, devermos insistir mais na composição e separação dos sistemas [...] Isto é, na verdade — como Einstein *sentiu* acertadamente —, um ponto muito fundamental.» Mas mesmo Pauli, em sua ortodoxia, foi assaltado por muitas dúvidas. Imagine-se, conta-se numa história, Pauli chegando ao Céu (faleceu em 1958). Deus pergunta-lhe se gostaria de compreender, finalmente, os fundamentos da mecânica quântica. «Se quero... Se soubesse os disparates que os meus colegas escreveram sobre isso...» Então Deus deu a Pauli umas folhas que este folheou rapidamente, voltou à primeira página, passou à quarta e, finalmente, com um suspiro de resignação, devolveu-as a Deus, dizendo: «Mais uma vez, tudo errado.» Creio que, hoje, a grande maioria dos físicos não aceita a doutrina extrema de que a realidade é criada pelo observador e de que não existe, pois, independente dos atos de observação. No entanto, não são o que se poderia chamar realistas ingénuos. Aceitam antes que, a um dado nível microscópico, a realidade não pode ser apreendida apenas nos termos da física clássica, o que era a posição de Einstein, Podolski e Rosen. Aqui,

como disse, alguns aceitam isto como mistério e vão à sua vida tranquilizados; outros, no entanto, creem que enfrentam um problema para o qual um dia se encontrará solução. Atualmente, pois, não estamos longe da sensibilidade poética de D. H. Lawrence:

I like relativity and quantum theories
because I don't understand them
and they make me feel as if space shifted about
like a swan that can't settle,
refusing to sit still and be measured;
and as if the atom were an impulsive thing
always changing its mind.

Em vernáculo será mais ou menos isto:

Gosto das teorias da relatividade e quânticas
porque as não compreendo
e fazem-me sentir como se o espaço se esquivasse
como um cisne indeciso
que se recusa a ficar quieto e a ser medido;
como se o átomo fosse uma coisa temperamental
mudando constantemente a sua vontade.

António Manuel Baptista

Agradecimentos

Em Novembro de 1977 assisti a um simpósio na Universidade de Colúmbia em honra do Prof. Isidor Isaac Rabi, um físico experimental da geração de Los Alamos, vencedor do Prémio Nobel e um diplomata da ciência. Foi um dos fundadores do Brookhaven National Laboratory e do Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN). Após um dia de comunicações dos seus colegas, Rabi fez algumas observações. Censurou os físicos por não conseguirem comunicar o entusiasmo pela física a um público mais alargado e disse que eles tinham feito menos do que os escritores de ficção científica para comunicar o espírito da ciência. Depois de ouvir os seus comentários resolvi escrever este livro — uma resolução apoiada pelo instinto do meu amigo John Brockman pelo que pode suscitar entusiasmo intelectual. Com o amável estímulo de John redigi um projeto de livro.

Muitas pessoas, todas elas amigas, fizeram sugestões relativamente ao estilo e conteúdo que foram consideradas até ao produto final: Kathrin Burkhart, Ashton Carter, Sidney Coleman, Rodney Cool, Gerald Feinberg, Daniel Greenberger, Mark Kac, Tony King, Linda Hess, Emily McCully, Richard Ogust, Hilary Putnam, e especialmente Eugene Schwartz e Arthur Miller, cujas críticas me ajudaram enormemente. Muitos dos meus pontos de vista sobre o problema da realidade quântica partiram de discussões extremamente divertidas e informativas com Nicholas Herbert. Fui também feliz pelo facto de escrever este livro no ano do centenário do nascimento de Einstein, 1979. Nesse ano assisti a três simpósios relativos à ocasião, um realizado no Institute for Advanced Study de Princeton, N. J., outro em Jerusalém, apoiado pela Academia das Ciências Israelita e pela Fundação van Leer, e um terceiro em Nova Iorque, apoiado pela New York Academy of Sciences. Beneficiei grandemente das conferências destes simpósios, especialmente das de Daniel Bell, Jeremy Bernstein, Erik Erikson, Loren Graham, Gerald Holton, Martin Klein, Arthur Miller, Abraham Pais, Wolfgang Panofsky, Dennis Sciama, Irwin Shapiro, Steven Weinberg e John Wheeler. Os artigos de A. Pais e de G. Holton acerca dos trabalhos iniciais de Einstein foram-me especialmente úteis. A segunda parte deste livro foi influenciada pelo trabalho de Ugo Amaldi, publicado pelo CERN, sobre aceleradores e cultura científica, bem como pelo artigo de Steven Weinberg em *Dedalus*, 1977. A terceira parte do livro resultou de conversas com o meu amigo Joseph H. Hazen.

Fui também feliz em conhecer Matthew Zimet, que ilustrou o livro. Os seus desenhos originais e divertidos aliviam muito o peso do texto, deliciando a vista e o espírito.

A maior característica de um cientista, a capacidade de se concentrar eficientemente em problemas específicos até atingir a sua solução, pode tornar-se um risco quando ele tenta comunicar as suas ideias a um não cientista. Deste modo, a minha dívida mais profunda é relativa aos meus editores, Alice Mayhew e Catherine Shaw, que me mostraram como tal comunicação é possível sem sacrifício da clareza ou da integridade das ideias. Se o leitor obtiver uma melhor visão da floresta da física do que das suas árvores, é sinal de que lhes devo muito.

Gostaria de agradecer ao Aspen Center for Physics pela sua hospitalidade durante a escrita deste livro.

Finalmente, quero agradecer à minha mulher, Elaine, e ao meu filho, Mark, cujo apoio carinhoso transformou a escrita de um trabalho num desafio criativo.

Prefácio

Enquanto físico, gosto de partilhar o entusiasmo das descobertas recentes da física com outras pessoas — descobertas que permitem o conhecimento profundo da estrutura da matéria, das origens e futuro do universo e da nova realidade quântica. Nos últimos dez anos, os físicos aprenderam mais sobre o universo do que nos séculos anteriores — eles têm visto desenvolver-se uma nova imagem da realidade que implica uma reformulação das nossas convicções. O mundo visível não é matéria nem espírito, mas a invisível organização de energia.

Este livro está dividido em três partes. A primeira, «O caminho para a realidade quântica», descreve o desenvolvimento da teoria quântica do átomo. A compreensão da realidade quântica requer a transição de uma realidade que pode ser vista e sentida para uma realidade instrumentalmente detetada que pode apenas ser apreensível intelectualmente. O mundo descrito pela teoria quântica não faz apelo à nossa intuição imediata, ao contrário da velha física clássica. A realidade quântica é racional, mas não visualizável.

Outro ponto fundamental em que a antiga física difere da física quântica pode ser comparado à forma como o determinismo de um relógio difere da contingência de uma roleta. Albert Einstein, que nunca aceitou o carácter aleatório que a teoria quântica implica nos fundamentos da realidade, exprimiu a sua objeção afirmando: «Não posso acreditar que Deus jogue aos dados.» No entanto, quase todos os físicos hoje em dia acreditam que Ele o faz. Analisaremos o acaso nas mãos de um Deus-jogador-de-dados e veremos o que ele implica em relação à realidade.

A segunda parte do livro descreve «A viagem ao interior da matéria». Os físicos, alargando o entendimento humano às regiões mais remotas do espaço e do tempo, à estrutura íntima da matéria, apercebem-se de que para além da molécula e do átomo existe todo um novo domínio. A parte central do átomo é o núcleo. As mesmas forças que mantêm o núcleo coeso produzem um novo tipo de partículas — formas de matéria nunca antes observadas —, chamadas «hadrões», e estes, por sua vez, são constituídos por outro tipo de partículas ainda mais fundamentais chamadas «*quarks*». Os físicos penetraram no domínio dos *quarks* e de outras partículas quânticas a partir das quais tudo no universo pode ser construído. Aqui, à

escala das mais pequenas distâncias jamais atingidas por instrumentos humanos, eles descobriram as leis básicas que unem as forças da natureza.

A compreensão do mundo das partículas elementares exige a síntese da teoria quântica e da teoria da relatividade restrita de Einstein. O resultado desta síntese, que descreve, entre outras coisas, a criação e a aniquilação de partículas quânticas, é a chamada «teoria quântica dos campos». Representa um dos mais altos feitos intelectuais deste século e impõe uma imagem radicalmente nova do mundo material. Os físicos encontraram as teorias de campo unificado que procuravam há décadas — teorias que utilizam complexas e belas simetrias matemáticas. A linguagem destas teorias físicas é altamente matemática, e isso tem constituído um obstáculo para que muitas pessoas possam partilhar o entusiasmo destas descobertas recentes; mas aqui não recorreremos à matemática.

Utilizando estas novas teorias de campo unificado, os físicos podem reconstruir os primeiros segundos do *big-bang* no começo dos tempos, quando o universo era uma gigantesca bola de fogo de *quarks* e outros quanta. Tudo aquilo que conhecemos desenvolveu-se a partir desta bola de fogo primordial. A forma como o nosso universo nasceu através de uma sucessão de quebras de simetria e a maneira como poderá vir a acabar são também descritas.

Finalmente, há uma curta terceira parte, «O código cósmico», que descreve a natureza das leis físicas e o modo como os físicos as descobrem. Esta parte contém também algumas reflexões pessoais sobre o significado da aventura científica: através das atividades da ciência e da tecnologia, a descoberta da ordem do universo (que eu chamo «código cósmico») transforma-se num programa de evolução histórica. O mundo moderno é uma resposta às descobertas fascinantes do *quantum* e do cosmo — descobertas que continuam a modelar o nosso futuro e a transformar a nossa ideia de realidade.

*Nova Iorque, Nova Iorque
Aspen, Colorado, 1981*

PARTE UM

O Caminho Para a Realidade Quântica

O Senhor é subtil, mas não malicioso.

ALBERT EINSTEIN

CAPITULO 1

O Último Físico Clássico

No entanto, há momentos em que uma pessoa se sente livre da sua própria identificação com as limitações e insuficiências humanas. Nesses momentos, ela imagina-se em qualquer lugar de um pequeno planeta, contemplando com admiração a fria, mas profundamente comovente beleza do eterno, do impenetrável: a vida e a morte fundem-se e não existe evolução nem destino; apenas o ser.

ALBERT EINSTEIN

Durante a minha juventude, vivida nos subúrbios de Filadélfia, tive poucos heróis. Um deles foi Albert Einstein. Lendo o que se publicava sobre Einstein nos jornais e nos suplementos de domingo, aprendi que ele trabalhava numa teoria de campo unificado, o que quer que isso fosse. Antes de Einstein, os cientistas pensavam que o espaço se prolongava indefinidamente – que o universo era infinito. Mas aquilo que Einstein propunha, o que verdadeiramente me entusiasmava, era o conceito de curvatura do espaço tridimensional, pois isso significava que o universo poderia ser finito.

Imagine o leitor que está dentro de um avião que sobrevoa a superfície de Terra. Se o avião voar sempre em linha reta em qualquer direção, voltará sempre ao ponto de partida, descrevendo um círculo em torno da Terra. A superfície da Terra pode ser considerada um espaço bidimensional curvo, uma superfície finita

fechada sobre si própria sem uma fronteira delimitadora. É mais difícil visualizar um espaço tridimensional curvo fechado sobre si próprio em analogia com o exemplo anterior, mas *podemos* imaginar uma viagem através do universo em qualquer direção, mantendo um rumo fixo, e eventualmente o regresso ao ponto de partida. Como na viagem à volta da Terra dentro do avião, nunca encontraríamos uma fronteira física, algo que nos dissesse que o universo acabava ali. Einstein, na sua teoria da relatividade generalizada, mostrou que o espaço tridimensional do nosso universo pode curvar-se em torno de si próprio e ser finito, tal como a superfície bidimensional curva da Terra.

Os meus amigos e companheiros de basebol pensavam que eu era maluco quando lhes explicava estas coisas, mas eu sentia-me confiante e até satisfeito porque tinha Einstein por detrás de mim. Mais tarde aprendi que Einstein, prevendo estes apelos à sua autoridade, observou certa vez de forma irónica: «Por me revoltar contra toda a espécie de autoridade, o destino castigou-me fazendo de mim uma autoridade.»

Nunca conheci Einstein. Ele já tinha morrido quando eu entrei para a Universidade de Princeton para estudar Física. Mas tenho falado com os seus amigos e colaboradores, muitos dos quais eram refugiados, tal como ele. Einstein esteve presente no nascimento da física do século XX. Poder-se-ia dizer que foi o seu pai.

A física do século XX desenvolveu-se a partir da anterior física «clássica», inspirada pela obra de Isaac Newton nos finais do século XVII. Newton descobriu as leis fundamentais do movimento e da

gravitação e aplicou-as com enorme sucesso à descrição detalhada do movimento dos planetas e da Lua. No século que se seguiu às descobertas de Newton, uma nova interpretação do universo surgiu: o determinismo. De acordo com o determinismo, o universo pode ser encarado como um grande relógio mecânico posto em movimento no início dos tempos pela mão divina e depois abandonado. Dos maiores aos mais pequenos movimentos, toda a criação material evolui de uma forma que pode ser prevista com precisão absoluta pelas leis de Newton. Nada é deixado ao acaso. O futuro é tão precisamente determinado pelo passado como o movimento de um relógio. Apesar de as nossas mentes humanas não poderem, na prática, seguir o movimento de todas as partes deste grande mecanismo e, assim, conhecer o futuro, podemos imaginar que a mente onipotente de Deus pode fazê-lo e, portanto, ver todo o passado e todo o futuro à sua frente como uma sucessão de montanhas.

Este determinismo rígido que as leis de Newton implicam conduz a um sentimento de segurança acerca do lugar da humanidade no universo. Tudo o que acontece — a tragédia e a alegria da vida humana — está predeterminado. O universo objetivo existe independentemente da vontade e da finalidade do homem. Nada do que façamos pode alterá-lo. As rodas do grande relógio do mundo giram tão indiferentes à existência humana como o movimento silencioso das estrelas. Num certo sentido, a eternidade já existe.

Por muito que possa parecer estranho hoje em dia, o determinismo absoluto era a única conclusão que podia ser logicamente retirada da física clássica newtoniana. Mesmo os

grandes avanços científicos do século XIX — a teoria do calor conhecida por «termodinâmica» e a teoria da luz como onda eletromagnética, formulada pelo físico escocês James Clerk Maxwell — foram construídos no âmbito do quadro concetual de uma física determinista. Estas teorias foram dos últimos triunfos da física clássica. Ainda hoje são consideradas realizações superiores da mente humana, mas a imagem determinista do mundo que elas apoiavam ruiu. Ruiu não devido a alguma nova filosofia ou ideologia, mas porque, no fim do século XIX, os físicos experimentais contataram com a estrutura atómica da matéria. O que eles observaram foi que unidades atómicas de matéria se comportavam de uma forma aleatória e incontrollável que a física newtoniana, determinista, não podia descrever. Os físicos teóricos responderam a estas novas descobertas experimentais formulando uma nova teoria física, a teoria quântica, entre 1900 e 1926.

Quando a primeira versão da teoria quântica foi avançada, em 1900, não era ainda claro que um corte profundo com a física newtoniana fosse inevitável. Foram feitas tentativas entre 1900 e 1926 para reconciliar a teoria quântica do átomo com a física determinista. Os físicos tinham esperança em que mesmo as mais pequenas rodas do grande mecanismo de relógio, os átomos, obedecessem às leis deterministas de Newton. Depois de 1926 tornou-se evidente que um corte radical com a física newtoniana era necessário, e o determinismo ruiu.

Tal como Isaac Newton dois séculos antes, Albert Einstein é uma enorme figura de transição na história da física. Newton realizou a transição iniciada por Galileu da física escolástica para a física

clássica; Einstein foi o pioneiro da transição da física newtoniana para a teoria quântica da matéria e da radiação, uma nova física não newtoniana. Mas a grande ironia foi que Einstein, que abriu o caminho para a nova teoria quântica que despedaçou a imagem determinista do mundo, rejeitou a nova teoria quântica. Ele não podia aceitar intelectualmente que os fundamentos da realidade física fossem governados pelo acaso. E, no entanto, tinha sido ele a guiar a tribo dos físicos, através de um longo deserto teórico, à terra prometida da teoria quântica, uma teoria que ele não podia considerar como fornecendo a imagem completa da realidade física. Einstein foi o último físico clássico.

Por que rejeitou Einstein a interpretação da nova teoria quântica — o acaso subjacente à realidade — quando a maioria dos outros cientistas a aceitava? Nenhuma resposta a esta pergunta pode ser simples. A rejeição de Einstein reflete não apenas a sua opção racional, mas também o íntimo da sua personalidade e do seu carácter, formados durante a sua infância na Alemanha. Examinando a sua infância, encontramos pistas para a sua posterior adesão persistente à imagem clássica do mundo.

Einstein nasceu em Ulm, na Alemanha, a 14 de Março de 1879, no seio de uma família judia da classe média. Pouco depois, a sua família mudou-se para Munique, onde o pai de Einstein estabeleceu um pequeno negócio no campo da eletroquímica. Einstein não era uma criança-prodígio, tendo mesmo fraca memória para palavras; frequentemente repetia as palavras escutadas com os lábios. O seu espírito entretinha-se com associações especiais preferencialmente a associações linguísticas; construía enormes castelos de cartas e

adorava *puzzles*. Quando tinha 4 anos, o pai ofereceu-lhe uma bússola. Sete décadas depois, nas suas «Notas autobiográficas», inseridas na obra *Albert Einstein: Filósofo-Cientista*, ele recordou a admiração que esta bússola lhe causou; ela «não se adaptava de modo nenhum à natureza dos fenómenos que podiam pertencer ao mundo inconsciente dos conceitos».

Os pais de Einstein encorajavam a curiosidade do jovem. Num estudo psicanalítico da infância de Einstein, Erik Erikson chama-lhe «Albert, a criança vitoriosa». Algo no carácter e na educação de Einstein encorajava um profundo sentimento de confiança no universo e na vida. Essa confiança é a base da autonomia desta mente que viveu na fronteira do conhecimento humano.

A sua família tinha uma formação laica e liberal. Não eram particularmente intelectuais, mas respeitavam a instrução e amavam profundamente a música. Os seus pais, embora não observassem nenhuma religião, enviaram o jovem para uma escola católica, onde ele tomou contato com o ritual e o simbolismo da religião. Este contato não foi duradouro. Ele escreveu acerca da sua precoce odisseia emocional e intelectual da religião para a ciência quando tinha 67 anos. Estas «Notas autobiográficas» demonstram uma simplicidade e uma força que caracterizam a sua prosa:

Mesmo quando eu era um jovem bastante precoce, a vacuidade das esperanças e dos objetivos que a maioria das pessoas persegue ao longo de toda a sua vida ficou gravada na minha consciência com considerável vitalidade. Além disso, rapidamente me apercebi da crueldade de tal procura, que nesses anos estava muito mais cuidadosamente dissimulada em hipocrisia e nas palavras sonantes do que hoje. Pela mera

existência do seu estômago, uma pessoa estaria automaticamente condenada a participar nessa procura. Mais ainda, era possível satisfazer o estômago através de tal participação, mas não o homem enquanto ser que pensa e sente. Como uma primeira saída existia a religião, que é implantada em todas as crianças através do sistema educativo tradicional. Assim, vi-me convertido — apesar do facto de ser filho de pais (judeus) totalmente não-religiosos — a uma religiosidade profunda, que, no entanto, encontrou um fim abrupto aos 12 anos de idade. Pela leitura de livros de divulgação científica, depressa cheguei à conclusão de que muito das histórias da Bíblia não podia ser verdadeiro. A consequência foi uma orgia absolutamente fanática de livre pensamento, acompanhada da sensação de que a juventude é intencionalmente enganada com mentiras pelo Estado; foi uma sensação esmagadora. A dúvida relativamente a qualquer tipo de autoridade nasceu desta experiência, uma atitude cética em relação às convicções em voga em qualquer ambiente social — uma atitude que nunca mais me abandonou, ainda que mais tarde, devido a uma melhor compreensão das relações causais, tenha perdido alguma da sua aspereza original. É bastante claro para mim que o paraíso religioso da juventude, desta forma perdido, foi uma primeira tentativa para me libertar das correntes do «meramente pessoal», de uma existência dominada por desejos, esperanças e sentimentos primitivos. Em frente de mim estava este mundo enorme, que existe independentemente de nós, seres humanos, e que se nos apresenta como um grande e eterno enigma, pelo menos parcialmente acessível à nossa inspeção e ao nosso pensamento. A contemplação deste mundo aparecia-me como uma libertação e cedo me dei conta de que pessoas que eu tinha aprendido a estimar e a admirar tinham justamente encontrado liberdade interior e segurança ocupando-se dele devotadamente. A apreensão mental deste mundo extrapessoal, dentro das minhas possibilidades, pairava semiconsciente, semi-inconscientemente no meu espírito. Os homens igualmente motivados do presente e do passado, bem como os conhecimentos profundos que eles tinham atingido, eram os amigos que não podiam ser perdidos. A estrada para este paraíso não era tão confortável e atraente como a estrada para o paraíso religioso; mas revelou-se digna de confiança, e eu nunca me arrependi de a ter escolhido.

Aquilo que esta passagem revela é a conversão de uma religião pessoal para a «religião cósmica» da ciência, uma experiência que o modificou para o resto da vida. Einstein viu que o universo é regido por leis que podem ser conhecidas pelo homem, mas que são independentes dos seus pensamentos e sentimentos. A existência deste código cósmico — as leis da realidade material confirmadas pela experiência — é a fé profunda que anima o cientista. O cientista vê nesse código a estrutura eterna da realidade, não tal como é imposta pelo homem ou pela tradição, mas como aparece escrita na própria substância do universo. Este reconhecimento da natureza do universo pode surgir como uma intensa e entusiasmante experiência para uma mente jovem.

Muitas biografias de intelectuais do virar do século põem em evidência uma conversão semelhante. Os símbolos da religião e da família são substituídos pelos da cultura literária, científica ou política. O acontecimento formativo é a afirmação da autonomia individual por oposição à autoridade paternal, social ou religiosa. Para Einstein, este acontecimento tomou a forma de uma libertação de uma existência «dominada por desejos, esperanças e sentimentos primitivos». Ele voltou-se para a contemplação do universo, um sistema grandioso e ordenado que estava, segundo julgava, completamente determinado e de um modo independente da vontade humana. A imagem clássica do mundo satisfazia as necessidades intelectuais do jovem Einstein. A ideia de que a realidade é independente da forma como a abordamos pode ter-lhe surgido nesta altura. Esta adesão precoce ao determinismo clássico viria a ser o núcleo da sua posterior oposição à teoria quântica, que sustenta que os processos atômicos fundamentais ocorrem ao

acaso e que a intervenção humana influencia os resultados das experiências.

Quando tinha 12 anos, Einstein recebeu a *Geometria de Euclides*, «o livro sagrado da geometria», do seu tio Jacob; e, desde então, Euclides tornou-se a Bíblia de Einstein. A geometria de Euclides faz apelo à razão, e não à autoridade ou à tradição.

A nova forma de pensar atraía Einstein, e ele tornou-se fortemente antirreligioso e desafiava a autoridade e a disciplina da escola. Não há dúvidas de que o jovem era um aluno difícil. Detestava a organização militarizada das escolas alemãs. Raramente era encontrado na companhia de crianças da sua idade, e uma vez foi até expulso da sala de aula por um professor que disse que a sua mera presença na sala de aula era suficiente para subverter o processo educativo.

Quando Einstein tinha 14 anos, o negócio do seu pai abriu falência e a sua família mudou-se para a Itália. Albert não foi com eles, ficando em Munique durante o ano de 1894 para tentar terminar os seus estudos liceais. Mas acabou por desistir no fim do ano, juntou-se à família em Itália e passou a maior parte do ano seguinte vagueando por Itália, pensando que a recomendação dos seus professores de liceu seria suficiente para lhe garantir o acesso a uma universidade. Não foi, e ele teve de realizar um exame de admissão ao Instituto Politécnico de Zurique, em que não foi aceite. Então, no Outono de 1895, matriculou-se na Escola Cantonal de Argau, uma escola preparatória suíça na tradição liberal de Pestalozzi e à qual ele reagiu entusiasticamente. Aqui conseguiu o

seu diploma e em 1896 entrou no Instituto Politécnico de Zurique para dar início à sua formação como físico.

Foi nesse ano que ele pela primeira vez perguntou a si próprio o que aconteceria se conseguisse acompanhar um raio de luz — isto é, mover-se à velocidade da luz. A teoria da luz corrente nessa altura — e ainda válida hoje — era a teoria de Maxwell, que afirma que a luz é uma combinação de campos elétricos e magnéticos que se movem como uma onda através do espaço. Einstein conhecia a teoria da luz de Maxwell, bem como o facto de ela concordar com a grande maioria dos dados experimentais. Mas, se uma pessoa pudesse acompanhar uma dessas ondas de luz de Maxwell do mesmo modo que um surfista acompanha uma onda do mar, então a onda de luz não estaria em movimento em relação a ela, estando antes em repouso. A onda de luz seria então uma onda estacionária de campos elétricos e magnéticos, o que não é permitido pela teoria de Maxwell. Portanto, concluiu ele, deve haver qualquer coisa errada com a hipótese de ser possível acompanhar uma onda de luz da mesma forma que uma onda do mar. Esta ideia tão simples foi a semente a partir da qual germinou a teoria da relatividade restrita nove anos mais tarde. De acordo com essa teoria, nenhum objeto material pode atingir a velocidade da luz.

Em 1900, Einstein formou-se, mas com uma preparação muito apressada para os últimos exames. Detestava tanto os exames que mais tarde comentou que estes tinham destruído a sua capacidade de realizar trabalho científico durante pelo menos um ano. Chegou a ter vários postos de professor e a orientar dois estudantes de liceu. Einstein foi mesmo ao ponto de aconselhar os pais dos jovens,

sendo ele próprio professor de liceu, a tirarem os jovens da escola, onde a sua curiosidade natural ia sendo destruída! Não conservou o emprego por muito tempo.

Por intermédio de um amigo, arranjou um emprego numa repartição de patentes em Berna em 1902, enquanto preparava o seu doutoramento. Ganhava a vida examinando e apreciando requerimentos de patentes e nos tempos livres trabalhava em física. Este estado de coisas era-lhe particularmente grato, pois ele nunca sentiu que devia ser pago para realizar investigações em física teórica. Começou desta forma modesta a sua carreira em física.

A física teórica estava na altura dominada pela imagem clássica e determinista do mundo que produzira as grandes realizações científicas da física do século XIX — a teoria do calor e a teoria eletromagnética de Maxwell. Havia, pois, todas as razões para esperar que ela se mantivesse. Um dos principais problemas teóricos em aberto era o de deduzir as leis do movimento de partículas eletricamente carregadas a partir da teoria eletromagnética.

Mas os físicos experimentais haviam descoberto fenómenos que não tinham explicação no quadro das teorias existentes. A radioatividade — emissão espontânea de partículas e radiações por determinados materiais — tinha sido observada. Talvez o mais intrigante de todos os fenómenos observados fosse o das finas riscas no espectro da luz emitida por diferentes materiais. Ninguém tinha uma explicação para esse facto. Estas observações foram

como que as primeiras gotas de chuva numa tempestade que em breve se tornaria num dilúvio que havia de arrastar consigo a física clássica.

Experiências enigmáticas estavam indiretamente a revelar as propriedades e a estrutura da matéria à escala das mais pequenas distâncias, para lá das quais nada podia ser já diretamente visto. Sabemos hoje que a estrutura da matéria a esse nível é atómica, mas, no tempo de Einstein, alguns físicos debatiam ainda a existência dos átomos. Por mais de 2000 anos, as pessoas tinham suscitado a existência dos átomos, mas nunca fora possível prová-la. Apesar de todas as indicações, principalmente da química, de que a hipótese atómica — a hipótese de toda a matéria ser constituída por átomos — era de facto correta, ninguém tinha conseguido imaginar uma prova direta de modo a provar irrefutavelmente a existência dos átomos. Alguns cientistas de primeira classe não acreditavam nos átomos: um deles era Ernst Mach, um físico-filósofo. Era um positivista que sustentava que toda a teoria física se deve basear apenas na evidência experimental, que todas as ideias que não podem ser provadas experimentalmente devem ser abandonadas, isto é, a abordagem do tipo «ver para crer» aplicada à física. Mach não acreditava nos átomos porque nunca tinha visto um — e a sua perspetiva estrita e o seu pensamento rigoroso tiveram uma influência esmagadora na física em geral e em Einstein em particular.

Max Planck foi o físico que pela primeira vez avançou a ideia crucial da teoria quântica, em 1900, o mesmo ano em que Einstein se formou na universidade. Anteriormente à ideia de Planck, a

maioria dos físicos concebia o mundo clássico como um contínuo: eles imaginavam as formas da matéria fundindo-se de uma maneira suave e contínua. As várias grandezas físicas, como a energia, o momento e o momento angular, eram consideradas contínuas e podiam tomar qualquer valor.

A ideia básica da hipótese quântica de Planck é que esta visão contínua do mundo deve ser substituída por uma visão discreta. Em virtude de a descontinuidade das grandezas físicas ser extraordinariamente pequena, ela não é perceptível aos nossos sentidos. Por exemplo, se olharmos para uma pilha de trigo a uma certa distância, parece-nos tratar-se de um monte suave e contínuo. Mas de perto reconhecemos o nosso erro e vemos que de facto ele é feito de minúsculos grãos. Os grãos descontínuos são os *quanta* da pilha de trigo.

Outro exemplo desta «quantização» de objetos contínuos é a reprodução de fotografias nos jornais. Se o leitor examinar de perto uma fotografia de jornal, verá que ela consiste de muitos pequenos pontos; a imagem foi «quantizada» — um facto de que não nos damos conta ao observar a fotografia de longe.

Planck estava a trabalhar no problema da radiação do corpo negro. O que é a radiação do corpo negro? Tomemos um objeto material — uma barra metálica serve — e ponhamo-lo dentro de um contentor escuro e opaco. A barra metálica é o corpo negro; isto é, não o conseguimos ver. Se aquecermos a barra até uma dada temperatura e a recolocarmos no contentor, o seu interior deixa de ser negro e passa a irradiar um vermelho-escuro, como,

por exemplo, um pedaço de carvão em brasa. Se a aquecermos ainda mais, a barra passa a emitir uma luz branca. A luz emitida pela barra dentro do contentor escuro tem uma distribuição de cores que pode ser medida, resultando naquilo que é conhecido como a curva de radiação do corpo negro.

Duas equipas de físicos experimentais do Physikalisch-Technische Reichsanstalt, de Berlim, fizeram medições precisas da curva de radiação do corpo negro. Após estudar a sua curva empírica utilizando ideias da teoria do calor, Planck tentou compreender o fundamento físico da nova lei da radiação. Então, numa incrível inspiração, Planck avançou a hipótese quântica, que pelas suas próprias palavras é descrita como «um ato de puro desespero». Ele supôs que o material do corpo negro consistia em «osciladores vibrantes» (na realidade, os próprios átomos de que o corpo negro é constituído) cujas trocas de energia com a radiação de corpo negro estariam quantizadas. A troca de energia não seria contínua, mas discreta. Completamente sem precedentes, esta ideia foi um dos grandes saltos da imaginação racional e Planck passou o resto da sua longa vida a tentar reconciliar a sua lei da radiação com a imagem contínua da natureza. Planck designou o elemento mínimo de descontinuidade por um número h , mais tarde chamado «constante de Planck». Ele especificava, se quisermos, o tamanho de um só grão da pilha de trigo. Se a constante de Planck fosse zero, ou seja, no limite, grãos de dimensões nulas, a natureza contínua do mundo reapareceria. O facto experimental de a constante de Planck ser diferente de zero significa na realidade que o mundo é discreto. Planck, com a ajuda da hipótese quântica e de algumas intuições, deduziu a lei de radiação do corpo negro

observada experimentalmente. Os experimentadores de Berlim, no seu relatório à Academia Prussiana de 25 de Outubro de 1900, diziam que «a fórmula, dada por Herr M. Planck depois de as nossas experiências estarem já concluídas [...] reproduz as nossas observações dentro dos limites do erro». Foi este o nascimento da teoria dos *quanta*. Einstein tinha 21 anos.

O mundo da física teórica em que Einstein entrou era dominado pela imagem determinista do mundo inspirada pela mecânica de Newton. O trabalho de Planck sobre o quantum destruiu a concepção de um contínuo na natureza, e essa foi uma das principais razões da sua rejeição inicial pelos físicos. Algumas experiências intrigantes existiam, mas a maioria dos físicos não desejavam prescindir das leis de Newton para as explicar. A opinião científica estava dividida relativamente à existência dos átomos.

Em 1905, ano em que realizou o seu doutoramento em Zurique, Einstein publicou três artigos no volume 17 da publicação *Annalen der Physik*, alterando o curso da história científica. Esse volume é hoje em dia uma peça de coleção. Cada um dos três artigos é uma obra-prima científica que reflete um dos três grandes interesses científicos de Einstein: a mecânica estatística, a teoria quântica e a relatividade. Estes artigos despoletaram uma verdadeira revolução na física do século XX. Seriam necessárias décadas para que um novo consenso sobre a natureza da realidade física fosse atingido.

O primeiro artigo foi sobre mecânica estatística, uma teoria dos gases inventada por James Clerk Maxwell, pelo físico austríaco Ludwig Boltzmann e pelo americano J. Willard Gibbs. De acordo com

a mecânica estatística, um gás como o ar consiste num imenso número de moléculas ou átomos colidindo entre si em rápidos movimentos aleatórios, à maneira de uma caixa cheia de bolas de ténis em movimento. As bolas de ténis chocam entre si, chocam com as paredes da caixa e com tudo o que dentro dela estiver. Este modelo simula as propriedades de um gás. Mas a hipótese atómica de um gás consistir em minúsculos átomos ou moléculas demasiado pequenas para se detetarem os seus movimentos individuais parece não ser passível de teste direto.

É difícil julgar a hipótese atómica devido a os átomos serem tão pequenos e existirem em tão grande número. Por exemplo, na sua última inspiração é quase certo que o leitor inalou, pelo menos, um átomo contido no suspiro final de Júlio César, quando este se lamentava: «Et tu, Brutus.» Este facto é cientificamente trivial. A realidade é que numa inspiração humana estão contidos cerca de 1 milhão de biliões de biliões¹ (10^{24}) de átomos. Mesmo que eles se misturem com toda a atmosfera da Terra, é bastante provável que o leitor inale um deles.

Nós não podemos ver ou tocar nos átomos; eles não são uma parte perceptível do nosso mundo. No entanto, muita da física está baseada na existência dos átomos. Richard Feynman, um dos inventores da eletrodinâmica quântica, escreveu certa vez que, se todo o conhecimento científico fosse destruído por qualquer cataclismo, exceto uma frase que seria passada para o futuro, essa frase deveria ser: «[...] todas as coisas são feitas de átomos — pequenas partículas em perpétuo movimento, que se atraem

quando estão separadas por uma pequena distância, mas que se repelem quando são comprimidas umas contra as outras.»

O problema que Einstein atacou foi provar a existência dos átomos. Como pôde ele fazer isso, se os átomos são demasiado pequenos para serem vistos? Suponha o leitor que põe uma bola de futebol dentro da caixa cheia de bolas de ténis. A grande bola de futebol é bombardeada de todos os lados pelas bolas de ténis e começa a mover-se de forma aleatória. Supondo que o bombardeamento pelas bolas de ténis se dá ao acaso, as características do movimento da bola podem ser determinadas. Ela desloca-se em saltos devido às colisões com as bolas de ténis.

O artigo de Einstein fazia uso de uma ideia semelhante para fornecer a primeira prova convincente da existência dos átomos. Ele reconheceu, em primeiro lugar, que, se se colocarem no seio de um gás ou de um líquido grãos de pólen relativamente grandes — que podem ser vistos com um microscópio suficientemente forte — podemos observar um movimento errático. O botânico inglês Robert Brown observara este movimento dos grãos de pólen muito antes da publicação do artigo de Einstein, mas não tinha qualquer tipo de explicação para o fenómeno. Einstein explicou que este movimento browniano dos grãos de pólen é devido às colisões de átomos com os grãos. Os grãos de pólen são tão pequenos que sofrem impulsos consideráveis devidos a colisões individuais com os átomos do gás ou do líquido, tal como a bola de futebol receberia ao ser atingida pelas bolas de ténis. Perrin, o experimentador francês, realizou notáveis experiências que confirmaram as previsões quantitativas de Einstein para o movimento dos grãos de

pólen. Muitos físicos aceitaram então a hipótese atômica. Ostwald, o químico, que não acreditava em átomos por várias razões pessoais, foi convertido ao atomismo pela análise de Einstein e pelas experiências de Perrin. Ernst Mach, o positivista estrito, nunca se convenceu, no entanto, da existência dos átomos, mantendo o seu «ceticismo incorruptível» até à morte. A comunidade dos físicos é hoje unânime em reconhecer o artigo do examinador de patentes Einstein como a proposta para o primeiro teste convincente dos átomos. Esse artigo, apenas, seria já o suficiente para estabelecer uma reputação científica.

O segundo artigo explosivo de 1905 foi sobre o efeito fotoelétrico. Se um feixe de luz incide sobre uma superfície metálica, assiste-se à emissão de partículas eletricamente carregadas — os eletrões — pelo metal, provocando o estabelecimento de uma corrente elétrica. É este o efeito fotoelétrico — a luz produz uma corrente elétrica. O efeito fotoelétrico é utilizado em portas de ascensor de abertura automática. Um feixe de luz em frente da porta do ascensor atinge uma superfície metálica, provocando uma corrente elétrica. Se a corrente flui, a porta estará fechada. Mas, se o feixe de luz é interrompido por uma pessoa que se interpõe, a corrente pára e a porta fica aberta.

Em 1905 pouco se sabia sobre o efeito fotoelétrico. É característico do génio de Einstein ter ele sido capaz de ver neste efeito físico obscuro uma indicação profunda sobre a natureza da luz e da realidade física. O movimento criativo em ciência é do

específico — como o efeito fotoelétrico — para o geral — a natureza da luz. «Num grão de areia podemos ver o universo.»²

Einstein, no seu artigo sobre o efeito fotoelétrico, utilizou a hipótese quântica de Planck. Ele foi além de Planck e fez a suposição radical de que a própria luz estava quantizada em partículas. A maioria dos físicos, incluindo Planck, encarava a luz como sendo um fenómeno ondulatório de acordo com a imagem da natureza como um contínuo. A hipótese de Einstein implicava que a luz era, na realidade, uma chuva de partículas consistindo nos quanta de luz mais tarde chamados «fotões» — pequenos pacotes de energia bem definida. Utilizando a sua ideia de *quanta* de luz, Einstein deduziu uma equação para descrever o efeito fotoelétrico.

Dos três artigos de 1905, Einstein apenas se referia como «verdadeiramente revolucionário» o artigo sobre o efeito fotoelétrico; e, na realidade, ele bem merecia essa qualificação. Uma coisa que os físicos julgavam ter compreendido de uma vez por todas era a luz; consideravam-na uma onda eletromagnética contínua. O trabalho de Einstein parecia negar isto, afirmando que, pelo contrário, a luz era composta de partículas. Esta é uma das razões pelas quais os outros físicos resistiram à sua ideia revolucionária. Outra das razões era que, ao contrário da fórmula de Planck para a radiação do corpo negro, que era imediatamente verificada experimentalmente, não existia forma de confirmar experimentalmente a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico — o que aconteceria até 1915.

Einstein ficou sozinho por mais de uma década na questão da quantização da energia da luz. Quando foi proposto para membro da Academia Prussiana das Ciências, em 1913, a carta referia: «Em resumo, praticamente não se pode citar nenhum dos grandes problemas da física moderna ao qual Einstein não tenha dado uma notável contribuição. O facto de ele poder ter falhado o alvo em algumas das suas especulações, como, por exemplo, na sua hipótese dos *quanta* de luz, não pode realmente ser-lhe demasiado censurado, pois não é possível introduzir ideias verdadeiramente inovadoras no campo das ciências exatas sem correr um risco.» Millikan, o experimentador americano, trabalhou durante anos sobre o efeito fotoelétrico, realizando medições precisas para provar a equação de Einstein. Em 1915 afirmou: «Apesar [...] do completo sucesso aparente da equação de Einstein, a teoria física da qual ela deveria ser a expressão simbólica é tão insustentável que o próprio Einstein, creio, já não a apoia.» Einstein apoiava-a. Mas era evidente que, mesmo após a confirmação experimental da sua equação fotoelétrica, os outros físicos resistiam à ideia de que a luz é formada por partículas. A «verdadeiramente revolucionária» ideia do fóton, a partícula de luz, necessitava de maior confirmação experimental antes de ser aceite.

A confirmação final do fóton surgiu em 1923-24. Supondo que a luz consiste em pequenas partículas que têm energia e momento bem definidos, como pequenas bolas, Compton (um dos primeiros físicos atômicos americanos) e Debye (um físico holandês) fizeram independentemente previsões teóricas para a colisão de um fóton com outra partícula, o eletrão. Compton realizou as respetivas experiências e as suposições baseadas na hipótese das partículas

de luz foram confirmadas. A oposição ao conceito de fóton diminuiu grandemente depois disso. O Prémio Nobel foi atribuído a Einstein pela sua hipótese do *quantum* de luz, e não pelo seu maior trabalho, a teoria da relatividade.

O terceiro artigo de Einstein de 1905 era sobre a teoria da relatividade restrita. Este artigo mudou para sempre a nossa maneira de pensar acerca do espaço e do tempo. Max Planck disse em 1910, a propósito deste artigo: «Se [...] [o artigo] se revelar correto, como espero, ele [Einstein] virá a ser considerado o Copérnico do século XX.» Planck tinha razão.

A teoria da relatividade restrita — como foi mais tarde chamado o tema do seu artigo de 1905 — tratava dos conceitos de espaço e de tempo aos quais filósofos e cientistas modernos dedicaram tanto esforço ao longo dos tempos. Alguns pensavam que o espaço era uma substância — o éter — que impregnava todos os corpos. Outros invocavam imagens do fluxo do tempo como um rio ou como a areia numa ampulheta. Apesar da sugestão direta aos nossos sentidos, tais imagens têm pouco a ver com o conceito de tempo em física. A compreensão do espaço e do tempo em física exige a distinção clara entre a nossa experiência subjetiva do espaço e do tempo e aquilo que realmente deles podemos medir. Einstein disse-o de forma extremamente clara: o espaço é aquilo que medimos com uma régua e o tempo é aquilo que medimos com um relógio. A clareza destas definições revela uma intencionalidade intelectual fora do comum.

A partir destas definições, Einstein perguntou como é que as medições do espaço e do tempo se relacionam para dois observadores que se movem com uma velocidade constante relativamente um ao outro. Suponhamos que um dos observadores está dentro de um comboio em movimento, na posse da sua régua e do seu relógio, e que o seu amigo está no cais da estação com a sua régua e o seu relógio. A pessoa no comboio mede o comprimento da janela dentro da carruagem. Da mesma forma, a pessoa no cais mede o comprimento da mesma janela à medida que o comboio passa. Qual é a relação entre as duas medições? Naturalmente, seríamos levados a dizer que elas devem coincidir — afinal, é a mesma janela que está a ser medida. Mas esta conclusão é incorreta, como mostrou Einstein através de uma análise cuidadosa do processo de medida. A pessoa que está no cais da estação com a sua régua deve «ver» a janela passar por ele. Por outras palavras, a luz que transporta a informação acerca do comprimento da janela em movimento deve ser transmitida até à pessoa que está no cais, para que a janela possa ser medida. As propriedades da luz entraram na nossa comparação dos dois instrumentos, e, portanto, devemos examinar primeiro estas propriedades.

Ainda antes de Einstein, os físicos sabiam que a velocidade da luz era muito elevada, mas finita — cerca de 300 000 km por segundo. Mas Einstein pensou que a velocidade da luz tinha uma propriedade especial — devia ser uma constante absoluta. Independentemente da velocidade com que nos movamos, a velocidade da luz é sempre a mesma — nunca podemos acompanhar um raio de luz. Para compreender como isto é, de

facto, estranho, imaginemos que uma pistola dispara uma bala a uma determinada velocidade. Como a velocidade da bala não é uma constante absoluta, segue-se que, se, a seguir ao disparo, montarmos num foguete, podemos realmente acompanhar a bala de tal forma que, relativamente a nós, ela se encontra em repouso. A velocidade da bala é um conceito sem significado absoluto, pois ela é sempre medida em relação à nossa própria velocidade. O mesmo não se passa com a luz; a sua velocidade é absoluta — sempre a mesma, independentemente da nossa velocidade. Esta é a estranha propriedade da luz que faz com que a sua velocidade seja qualitativamente diferente de qualquer outra velocidade.

A hipótese da constância absoluta da velocidade da luz é o segundo postulado da teoria da relatividade restrita. O primeiro postulado que Einstein estabeleceu foi o de que é impossível detetar um movimento uniforme absoluto. O movimento uniforme é um movimento numa direção fixa a uma velocidade constante — como navegar num lago absolutamente calmo. O postulado de Einstein implica que uma pessoa não pode afirmar se está a navegar a não ser que compare a sua posição relativamente a outro objeto exterior. Os dois observadores, um no comboio e outro no cais da estação, ilustram este postulado. Para a pessoa no cais é o comboio que se move. Mas a pessoa no comboio pode igualmente supor que está em repouso e que é o cais, a estação e toda a Terra com eles que se movem em conjunto. O movimento uniforme é apenas relativo — o máximo que se pode afirmar é que nos movemos relativamente a algo.

A partir destes dois postulados, da relatividade do movimento e da constância da velocidade da luz, pode deduzir-se inteiramente a estrutura lógica da teoria da relatividade restrita. Mas, como Paul Ehrenfest, um físico e amigo de Einstein, observou, está implícito um terceiro postulado, que afirma que os primeiros dois não estão em contradição. Superficialmente, parecem estar. Qualquer movimento uniforme é relativo a outro, afirma um postulado. Exceto o movimento da luz, que é absoluto, afirma o outro. É este jogo entre a relatividade do movimento para todos os objetos materiais e o carácter absoluto da velocidade da luz que está na origem de todas as propriedades bizarras do mundo da relatividade restrita.

Utilizando estes postulados, Einstein deduziu matematicamente as leis que relacionam as medições do espaço e do tempo feitas por um observador com as mesmas medições feitas por um observador em movimento uniforme relativamente ao primeiro. Ele demonstrou que a pessoa no cais mediria um menor comprimento para a janela do comboio em movimento do que a pessoa dentro do comboio. Quanto maior fosse a velocidade do comboio, tanto menor seria o comprimento da janela medido pelo observador no cais, até que, para um comboio imaginário que se aproximasse da velocidade da luz, o comprimento da janela tenderia para zero. Devido ao facto de, no nosso mundo do dia-a-dia, a velocidade da maioria dos objetos ser extremamente pequena relativamente à velocidade da luz, nunca observamos normalmente tais contrações do comprimento, que se tornam dramáticas apenas para velocidades próximas às da luz.

A teoria da relatividade de Einstein liga o espaço e o tempo. Einstein mostrou que um relógio em movimento conta o tempo mais lentamente do que um relógio em repouso. Para a pessoa no cais, o relógio no pulso do passageiro do comboio anda mais devagar — o tempo passa mais lentamente. Se o comboio se deslocasse a uma velocidade próxima à da luz, a passagem do tempo seria praticamente nula. Analogamente, a pessoa no comboio veria o relógio da pessoa no cais andar mais devagar. O tempo absoluto é abolido. O tempo é medido de maneira diferente por observadores em movimento relativo.

Aparentemente, a relatividade do tempo produz um paradoxo — como é possível que tanto o passageiro do comboio como a pessoa no cais vejam o relógio do outro andar mais devagar? O que acontecerá se estas duas pessoas se encontrarem e compararem o tempo — qual dos relógios andou realmente mais devagar? Para fortalecer este paradoxo (frequentemente chamado «paradoxo dos gémeos»), suponhamos dois gémeos que acertam os seus relógios antes de um deles subir para o comboio. O comboio acelera até uma velocidade próxima à da luz — altura em que cada um dos gémeos verá o relógio do outro andar mais lentamente — e depois dá meia volta e regressa à estação. Qual dos gémeos é mais velho? Do ponto de vista do gémeo no cais, o gémeo do comboio fez uma viagem de ida e volta, enquanto para este último foi o gémeo que permaneceu na estação que se deslocou. Aparentemente, o movimento de cada gémeo é apenas relativo ao movimento do outro. Mas, de facto, existe uma assimetria no movimento dos dois gémeos, e essa é a chave para a resolução do paradoxo. Quando o comboio acelera, já não se encontra em estado de movimento

uniforme, mas acelerado, e na segunda parte da viagem, durante a travagem, está a desacelerar. O gémeo no cais nunca sente estas acelerações e desacelerações, existindo, portanto, uma distinção absoluta entre o movimento dos dois gémeos. Utilizando esta distinção crítica e aplicando a teoria da relatividade restrita de Einstein para comparar o tempo de viagem medido pelo observador no comboio com o mesmo tempo medido pelo observador no cais, chegamos à conclusão de que o gémeo no comboio, na realidade, envelheceu menos.

A relatividade do espaço e do tempo perturba-nos porque contraria a nossa intuição. Na nossa experiência diária, o espaço e o tempo não parecem contrair-se. Poderíamos ser levados a pensar que estes efeitos estranhos do espaço e do tempo não passam de uma mera ficção matemática. O matemático francês Poincaré descobriu, independentemente, as mesmas leis de transformação espaço-temporais em 1905, mas considerou-as como postulados, sem lhes atribuir significado físico. Einstein foi o primeiro a entender as implicações físicas dessas leis; por esta razão, ele é considerado o inventor da relatividade. Ele levou a física da situação à letra: os relógios em movimento contam de facto o tempo mais lentamente.

Uma forma de o leitor experimentar o espaço-tempo da relatividade restrita, não concetualmente, mas fisicamente, é imaginando-se com a altura de 18 milhões de quilómetros. A luz demora cerca de um minuto a percorrer 18 milhões de quilómetros. Se o leitor decidisse mexer os dedos dos pés — supondo que os impulsos nervosos se transmitissem à velocidade da luz —, seria necessário um minuto para que o sinal atingisse os pés e outro

minuto para que o sinal voltasse ao cérebro com a informação de que os dedos dos pés se tinham de facto mexido. O leitor sentir-se-ia como se estivesse num filme em câmara lenta com um corpo feito de borracha elástica. Se quisesse começar a andar, a parte superior da sua perna mover-se-ia para cima muito antes do pé, porque os impulsos nervosos a atingiriam meio minuto antes. Devido à finitude da velocidade da luz, ser-lhe-ia impossível levantar a perna de uma só vez de uma forma coordenada; pura e simplesmente, não conseguiria enviar sinais à sua perna, ao seu joelho e ao seu pé para se moverem simultaneamente. Nenhum sinal se propaga mais rapidamente do que a luz; nada se move instantaneamente.

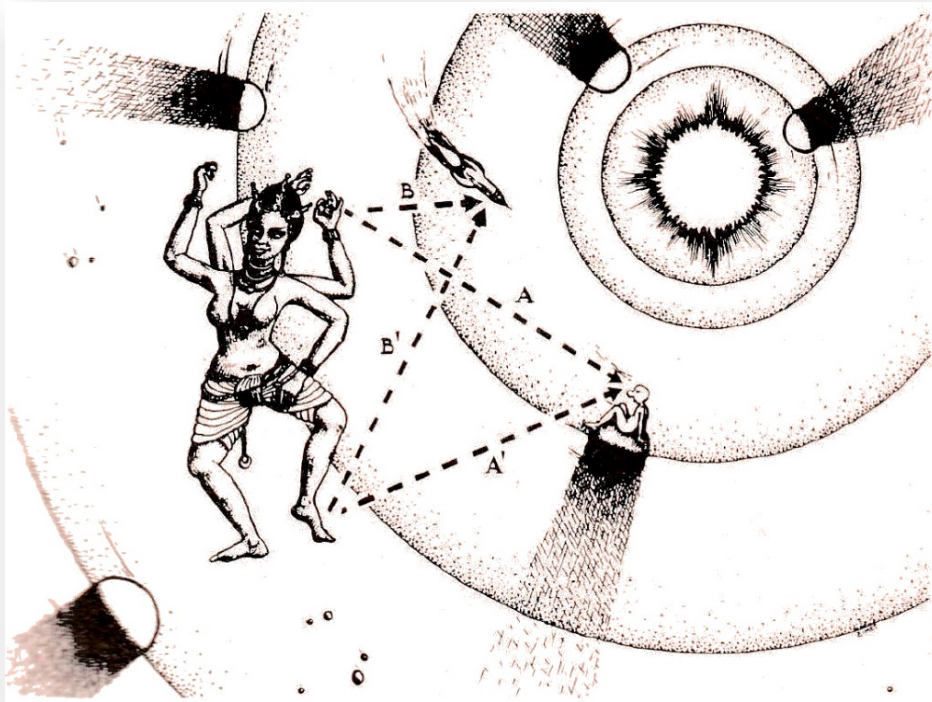
O leitor pode também imaginar duas pessoas de altura normal, uma na Terra e outra numa nave espacial que se move a uma velocidade próxima à da luz. Ambos observam a atuação de uma bailarina de 18 milhões de quilómetros de altura que se move através do sistema solar como se este fosse um palco. É uma atuação maravilhosa; e, mais tarde, as pessoas encontram-se e comentam-na — mas não conseguem concordar sobre o que viram. O observador na nave espacial diz que a bailarina moveu primeiro o braço e depois o pé, mas o observador na Terra descreve estes acontecimentos na ordem inversa. Mesmo quando analisam o movimento da bailarina levando em linha de conta a finitude da velocidade da luz e os movimentos da nave espacial e da Terra, eles nunca concordam. A razão é que o segundo postulado da relatividade restrita — que afirma que a velocidade da luz é uma constante universal — nega a existência de um tempo universal para todos os observadores. Até a ordenação temporal dos

acontecimentos pode ser diferente para observadores em movimento relativo; tais ordenações não têm um significado absoluto. As consequências da relatividade restrita parecem paradoxais à luz da nossa experiência diária. O mundo da relatividade restrita torna-se visível apenas para velocidades da ordem da velocidade da luz; aquelas que encontramos na vida diária são muitíssimo mais baixas. Mas a relatividade restrita é uma teoria coerente e logicamente consistente; não contém paradoxos.

Einstein escreveu ainda um quarto artigo em 1905, cujas consequências não foram totalmente exploradas até 1907. Pela análise da energia do movimento, (E), de uma partícula relativística de massa (m), ele mostrou que essa partícula tem uma energia dada por $E = mc^2$. A constante (c) é a velocidade da luz. Antes de Einstein, os físicos consideravam a energia e a massa grandezas distintas. Isto parece evidente a partir da nossa experiência. O que tem a energia que gastamos a levantar uma pedra do chão a ver com a massa da pedra? A massa transmite a sensação de uma presença material, ao contrário da energia.

A massa e a energia eram também quantidades que pareciam ser separadamente conservadas: No século XIX, os físicos descobriram a lei da conservação da energia — ela não pode ser criada nem destruída. Se o leitor levantar uma pedra, a energia foi gasta, mas não perdida. A pedra tem energia potencial que é libertada se a pedra for largada. Existia também uma lei de conservação separada para a massa — a massa não podia ser criada nem destruída. Se uma pedra é quebrada, os pedaços têm uma massa total igual à da pedra original. A distinção entre energia e

massa e a sua independente conservação estava profundamente enraizada na forma de pensar dos físicos em 1905, porque tinha um enorme apoio experimental. Dentro deste quadro concetual, a ideia de Einstein foi profundamente inovadora.



Uma bailarina de 18 milhões de quilómetros de altura move-se através do sistema solar e é observada da Terra e de uma nave espacial que se move a uma velocidade próxima à da luz relativamente à Terra. Os observadores na Terra e na nave não podem concordar sobre o facto de a bailarina ter movido primeiro a mão ou o pé. Mesmo depois de levar em linha de conta o seu movimento relativo e a finitude da velocidade da luz, eles não podem concordar sobre qual o acontecimento que «realmente» decorreu primeiro. Contrariamente ao que acontecia na física newtoniana, em relatividade restrita o tempo não é absoluto.

Einstein descobriu que os postulados da teoria da relatividade levam à conclusão de que a distinção entre massa e energia e a sua independente conservação devem ser abandonadas. Esta descoberta espantosa está resumida na sua equação $E=mc^2$. A massa e a energia são simplesmente diferentes manifestações da

mesma coisa. Toda a massa que nos rodeia é uma forma de energia concentrada. Se uma ínfima parte desta energia fosse libertada, o resultado seria uma explosão catastrófica como a de uma bomba nuclear. É claro que a matéria à nossa volta não está em vias de se transformar em energia — são necessárias condições físicas muito especiais para que isso suceda. Mas, no início dos tempos, durante o *big-bang* que criou o universo, a massa e a energia interconvertiam-se livremente uma na outra. Hoje, matéria e energia parecem-nos distintas e, provavelmente no futuro longínquo, a matéria que hoje vemos à nossa volta converter-se-á de novo, livremente, em energia.

Quais são os testes que existem para a teoria da relatividade restrita? Hoje em dia há toda uma tecnologia que depende da correção da teoria — aparelhos práticos que simplesmente não funcionariam se a teoria estivesse errada. O microscópio eletrónico é um desses aparelhos. A focalização dos eletrões no microscópio eletrónico leva em linha de conta os efeitos da teoria da relatividade. Os princípios da teoria da relatividade são também incorporados no projeto e execução de clistrões, tubos eletrónicos que fornecem potência na região das micro-ondas a sistemas de radar. A melhor prova de que a teoria da relatividade está correta é talvez a operação dos grandes aceleradores de partículas que aceleram partículas subatómicas, como o próton ou o eletrão, a velocidades muito próximas à da luz. O acelerador de eletrões de 3 km de comprimento da Universidade de Stanford, na Califórnia, acelera eletrões de tal forma que a sua massa (tal como é previsto pela teoria da relatividade) é cerca de 40 vezes maior no final da sua viagem de 3 km do que à partida.

Uma das mais estranhas previsões da teoria da relatividade é a do atraso dos relógios em movimento. Curiosamente, este é um dos efeitos mais bem testados da teoria. Apesar de não podermos acelerar relógios normais até velocidades da ordem da luz, existe uma partícula subatômica, o muão, que se comporta como um pequeno relógio. Numa fração de segundo, o muão desintegra-se noutras partículas. O tempo que um muão demora a desintegrar-se pode ser considerado a unidade de tempo deste relógio. Comparando o tempo de vida de um muão em repouso com o de um muão que se move rapidamente, podemos saber quanto se atrasa este relógio subatômico. Isto foi feito no CERN, laboratório nuclear perto de Genebra, Suíça, colocando muões extremamente rápidos num anel de acumulação e medindo precisamente o seu tempo de vida. O aumento observado no tempo de vida médio do muão foi uma confirmação precisa do atraso dos relógios em movimento previsto pela teoria da relatividade restrita.

Estes e muitos outros testes confirmam a correção do trabalho inicial de Einstein. O jovem Einstein era um boémio e um rebelde que se identificava com o mais elevado e o melhor do pensamento humano. Durante o seu período de intensa criatividade, de 1905 a 1925, ele parecia estar em comunicação direta com «o Velho» — o seu termo para o Criador ou Inteligência da natureza. Possuía o dom especial de atingir o centro dos problemas com argumentos simples e convincentes. Separadamente da comunidade dos físicos, mas em contato com os problemas perenes da ciência, Einstein construiu uma nova visão do universo.

Os artigos de Einstein de 1905 e o artigo de Planck de 1900 iniciaram a física do século XX. Eles transformaram aquilo que a física tinha sido até então. A ideia de Planck do *quantum*, mais tarde desenvolvida por Einstein através do fóton, implicava que a imagem contínua da natureza não podia ser mantida. Fora mostrado que a matéria era composta de átomos discretos. As ideias sobre o espaço e o tempo aceites desde os tempos de Newton tinham sido esmagadas. E, apesar destes avanços, a ideia de determinismo — isto é, a noção de que todos os pormenores do universo estão sujeitos às leis físicas — continuava profundamente arraigada em Einstein e em toda a sua geração de físicos. Nada nestas descobertas contrariava o determinismo.

A grande força de Einstein residia, não nas técnicas matemáticas, mas sim numa grande profundidade de compreensão e numa observância estrita dos princípios. Essa observância dos princípios da física clássica e do determinismo levava-o agora do seu trabalho em relatividade restrita à sua maior obra, a teoria da relatividade generalizada.

¹ Utiliza-se, ao longo de toda a obra, a convenção americana de 1 bilhão corresponder a 10^9 , e não a correspondente convenção europeia de 1 bilhão como 10^{12} , para melhor acordo com o original. (N. do T.)

² Citação do poeta William Blake. (N. do T.)

CAPÍTULO 2

A Invenção da Relatividade Generalizada

Mas o princípio criativo reside na matemática. Em certo sentido, portanto, defendo que o pensamento puro pode entender a realidade, como sonhavam os antigos.

ALBERT EINSTEIN

O reconhecimento do mérito de Einstein começou com os artigos de 1905 — a prova da existência dos átomos, a introdução do fóton como uma partícula de luz e a teoria da relatividade restrita. No Outono de 1909 deixou o seu emprego na repartição de patentes, para aceitar uma posição académica na Universidade de Zurique, seguida por cargos na Universidade Alemã de Praga e, finalmente, no Instituto Politécnico de Zurique. Em 1913, Max Planck visitou Einstein em Zurique e ofereceu-lhe a melhor posição na Europa para um físico teórico: o cargo de director do Instituto de Física no Instituto Kaiser Wilhelm, em Berlim. Einstein aceitou. Foram-lhe também oferecidas uma posição na Academia Prussiana e um professorado na Universidade de Berlim. Apesar da sua relutância em regressar à Alemanha e ao ambiente académico, de que tão pouco gostava, esta situação dava-lhe a oportunidade de trabalhar com os maiores físicos do seu tempo, incluindo Planck.

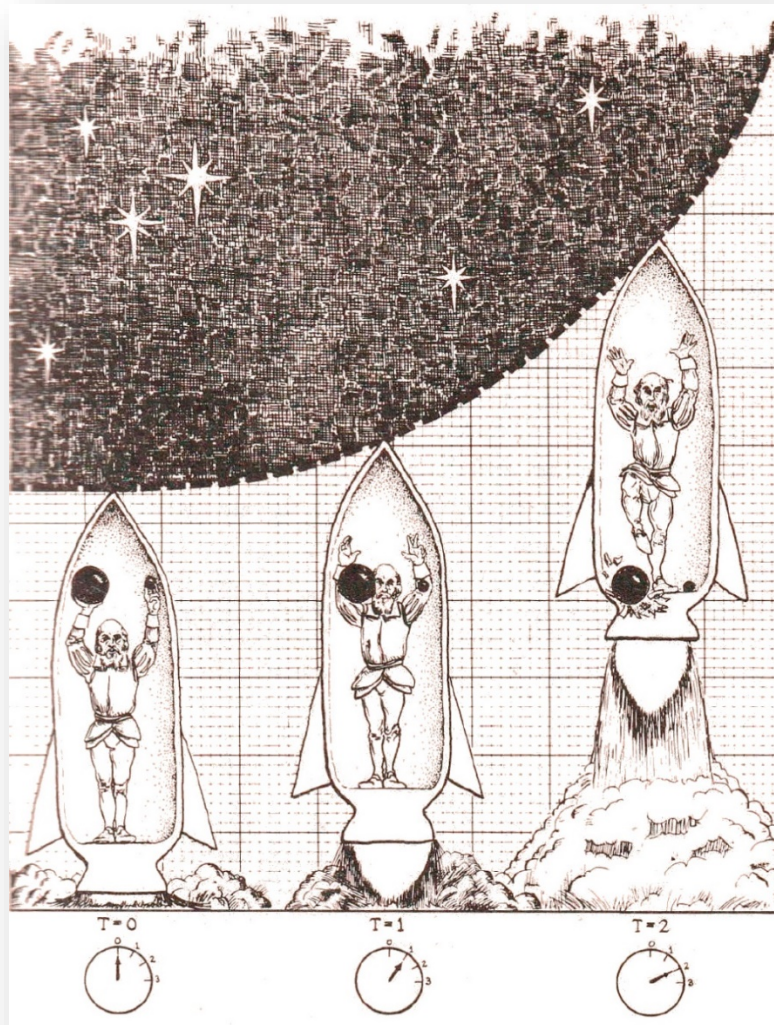
O contato pessoal com estes físicos foi das experiências que mais influenciaram a sua vida futura. Em Berlim, Einstein contribuiu para a teoria dos calores específicos e deu uma nova demonstração da lei de Planck para a radiação do corpo negro. Neste último trabalho utilizou a sua nova ideia das partículas de luz, os fótons, e introduziu o conceito de emissão estimulada de luz, princípio em que se baseiam os modernos *lasers*.

Einstein completou a sua maior obra — a teoria da relatividade generalizada — em Berlim, durante os anos de 1915-16. Esta teoria generalizava os conceitos de espaço e de tempo já introduzidos no seu trabalho anterior. Aí, na teoria da relatividade restrita, Einstein descobrira as leis que relacionam medidas espaciais e temporais entre dois observadores em movimento uniforme (como a pessoa no comboio e a pessoa no cais da estação). Um movimento uniforme realiza-se a uma velocidade constante numa direção fixa. Num movimento não uniforme, pelo contrário, a velocidade muda (o comboio acelera ou trava) ou muda a direção do movimento (o comboio dá uma curva). Mas Einstein apercebeu-se de que, para tratar o caso dos movimentos não uniformes, teria de ir além dos postulados da teoria da relatividade restrita.

Suponha o leitor que, em lugar do comboio que utilizámos para ilustrar a relatividade restrita, estamos longe da Terra, dentro de uma nave espacial. Quando os motores são ligados, a nave começa a mover-se, primeiro lentamente, depois cada vez mais depressa. Como a velocidade aumenta, temos uma aceleração — um movimento não uniforme da nave espacial. Dentro desta sentimos a aceleração como uma força que nos comprime contra o chão.

Enquanto os motores estiverem a acelerar a nave, continuaremos a sentir a mesma força.

Surpreendentemente, esta força, que sabemos ser devida à aceleração da nave, não pode ser distinguida da gravidade. Se largarmos pedras de diferentes massas dentro da nave acelerada, elas cairão para o chão ao mesmo ritmo — exatamente o que aconteceria se as largássemos à superfície da Terra. A partir do momento em que largamos as pedras, elas deixam de ser aceleradas pela nave — passam a estar em movimento uniforme — e podemos pensar que é o chão da nave que se acelera em direção a elas até as atingir.



Galileu realiza a sua lendária experiência, não na torre inclinada de Pisa, mas no interior de uma nave espacial acelerada. Ele larga dois objetos de massas diferentes, que lhe parecem estar a cair exatamente da mesma forma como cairiam na Terra. Note-se, no entanto, que, na realidade, as duas bolas não se estão a acelerar — elas estão em «queda livre» e não estão sujeitas a quaisquer forças exteriores. É o chão da nave acelerada que sobe até as atingir. Isto ilustra a equivalência entre o movimento acelerado e a gravidade — o primeiro postulado da teoria da relatividade generalizada.

Isto ilustra a primeira grande ideia da teoria da relatividade generalizada — a de que é impossível distinguir os efeitos da gravidade dos do movimento não uniforme (como o da nave acelerada). Dentro da nave sentimos de facto a gravidade. Se não soubéssemos que estávamos no espaço exterior viajando numa nave espacial, não teríamos possibilidade de determinar que o

efeito de «gravidade» que estávamos a sentir era devido ao movimento acelerado de toda a nave. O facto de não conseguirmos distinguir fisicamente um movimento não uniforme, como uma aceleração, da gravidade é chamado «princípio de equivalência» — a equivalência entre o movimento não uniforme e a gravidade. Einstein registou o momento criativo, «o pensamento mais feliz da minha vida», em que viu o modo como tudo isto se ajustava e fazia sentido:

Quando, no ano de 1907, estava a trabalhar num ensaio sumário sobre a teoria da relatividade restrita para o *Yearbook for Radioactivity and Electronics*, tentei modificar a teoria da gravitação de Newton de forma a ficar adaptada àquela. As tentativas nesta direção mostraram a possibilidade de realizar tal objetivo, mas não me satisfizeram porque tinham de ser apoiadas por hipóteses sem base física. Nesse ponto ocorreu-me o pensamento mais feliz da minha vida da seguinte forma:

Tal como no caso em que um campo elétrico é produzido pelo fenómeno de indução eletromagnética, analogamente o campo gravitacional tem uma existência relativa. *Assim, para um observador em queda livre do telhado da sua casa não existe, durante a queda, campo gravitacional* [itálico de Einstein], pelo menos na sua vizinhança próxima. Se o observador larga quaisquer objetos, eles ficarão em estado de repouso relativamente a ele, ou num estado de movimento uniforme, independentemente da sua composição física ou química particular. (Nesta consideração deve evidentemente desprezar-se a resistência do ar.) O observador pode legitimamente considerar o seu estado como de «repouso».

A lei empírica extraordinariamente curiosa que afirma que todos os corpos no mesmo campo gravitacional caem com a mesma aceleração ganha, através desta consideração, um significado físico profundo. De facto, se houvesse um só objeto que caísse num campo gravitacional de forma diferente da dos outros, o observador poderia distinguir através dele que está a cair num campo gravitacional. Mas, se tal objeto não existe — como a experiência confirmou com grande precisão —, o

observador não tem qualquer meio objetivo de se reconhecer como caindo num campo gravitacional. Pelo contrário, ele tem o direito de considerar o seu estado como sendo de repouso e a sua vizinhança imediata como livre de campos gravitacionais.

O facto, conhecido da experiência, de a aceleração em queda livre ser independente do material é, portanto, um argumento de peso para que o postulado da relatividade possa ser alargado a sistemas de coordenadas em movimento não uniforme relativo.

Einstein apercebeu-se de que o efeito da gravidade era equivalente a um movimento não uniforme. Sobre a superfície da Terra sentimos a força da gravidade, dirigida para o chão. Se largamos uma pedra, ela cai. Mas, se cairmos do telhado de uma casa, não sentimos a gravidade. Se agora largarmos uma pedra durante a queda, ela flutua à nossa frente. É como estar numa nave espacial em movimento uniforme — estamos em queda livre e não há gravidade. Os astronautas experimentam um regime livre de gravidade quando os motores do foguete são desligados e a aceleração cessa.

Se largarmos uma pedra a bordo da nave e ela cair, podemos interpretar isso como significando que o chão da nave se está a acelerar na nossa direção. Sobre a Terra não é óbvio que o efeito de gravidade que experimentamos seja equivalente a uma aceleração do chão para cima. Mas isso é assim — a gravidade é precisamente equivalente ao movimento não uniforme.

Na teoria da relatividade generalizada, Einstein encontrou as leis que relacionam medidas de espaço e de tempo realizadas por dois observadores em movimento relativo não uniforme (um observador

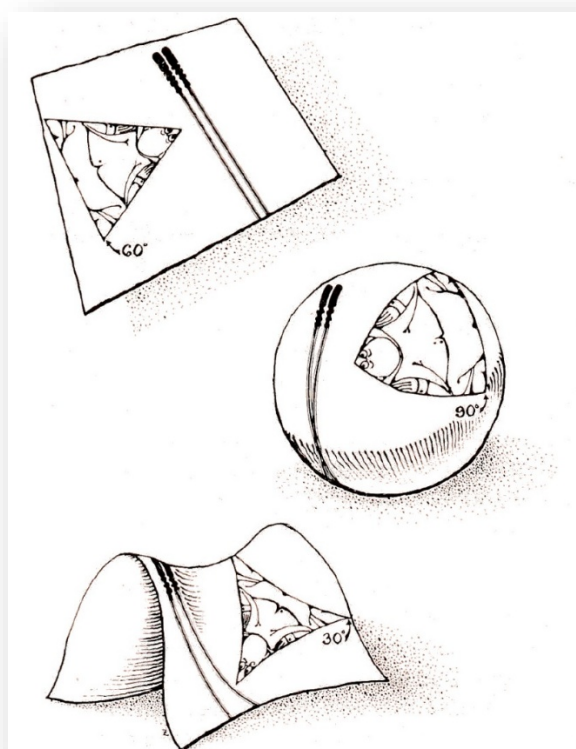
numa nave acelerada e o outro flutuando no espaço livre de gravidade, por exemplo). A consideração dessas leis levou Einstein para a disciplina matemática da geometria riemanniana — a geometria do espaço curvo. Aqui, Einstein solicitou a ajuda de um amigo matemático e antigo colega, Marcel Grossman. No entanto, ainda antes de se dedicar a essas investigações matemáticas com o fim de generalizar o princípio da relatividade, Einstein já tinha intuído o resultado. Como ele comentou, «estudei pela primeira vez o trabalho de Riemann numa altura em que o princípio básico da teoria da relatividade generalizada tinha já sido claramente concebido». A criação da teoria da relatividade generalizada fornece um exemplo de um físico socorrendo-se de uma disciplina matemática existente para encontrar a linguagem correta para exprimir as suas intuições.

Por que necessitou Einstein de considerar o espaço curvo para descrever a gravidade? A curvatura do espaço tridimensional (quatro dimensões se incluirmos o tempo) é de difícil apreensão pelas nossas mentes. Imaginemos em primeiro lugar um espaço que tenha apenas duas dimensões, como uma enorme folha de papel que se prolonga indefinidamente em todas as direções. Os habitantes desta folha de papel são sombras planas — têm apenas duas dimensões — e não sabem nada sobre a terceira dimensão. Na sua folha de papel, eles podem executar medições geométricas. O mundo em que eles vivem possui uma geometria euclidiana — é plano. Se eles medirem a soma dos ângulos internos de um triângulo desenhado no papel, obterão sempre 180° , qualquer que seja o triângulo, de acordo com um teorema da geometria

euclidiana. Duas retas paralelas desenhadas neste plano nunca se encontrarão — outra característica do espaço plano.

Agora coloquemos as nossas criaturas bidimensionais num novo mundo, a superfície de uma grande esfera. Enquanto nós, criaturas tridimensionais, vemos a sua esfera como um objeto tridimensional no espaço, as criaturas bidimensionais podem conhecer apenas a superfície da esfera — um espaço a duas dimensões semelhante àquele que elas acabaram de deixar. A parte mais interessante é a forma como os nossos amigos bidimensionais se apercebem da diferença entre a superfície bidimensional da esfera e a da folha de papel. A princípio, as criaturas estão bastante felizes neste mundo porque ele parece muito semelhante ao seu antigo mundo. Se elas desenharem pequenos triângulos e medirem os seus ângulos internos com a maior precisão possível, a sua soma será 180° . Localmente, o seu novo mundo é euclidiano e plano. Nessa altura, as criaturas fazem um avanço tecnológico — descobrem um tipo de *laser* capaz de enviar um feixe de luz em linha reta sobre a sua superfície esférica ao longo de milhares de quilómetros. A primeira coisa que elas notam é que, se dois feixes de luz são emitidos em direções paralelas, começam a convergir depois de viajar uns milhares de quilómetros. Nenhuma correção evita este fenómeno. Algumas das criaturas argumentam que os feixes de luz não se movem ao longo de linhas retas no seu novo mundo. Outras insistem em que a trajetória de um feixe de luz é, por definição, uma linha reta: um feixe de luz continua a deslocar-se pelo caminho mais curto; qualquer outro caminho será mais longo. Elas apercebem-se então de que não há nada de errado com os feixes de luz — o que se passa é que o espaço onde eles estão é curvo, e

não plano. Se grandes triângulos são formados por três destes feixes de luz, a soma dos seus ângulos internos é agora superior a 180° . Claramente, o espaço não é euclidiano. Eventualmente, as criaturas desenvolvem a geometria riemanniana para descrever o seu novo mundo curvo.



Um cientista bidimensional explora três diferentes superfícies geométricas bidimensionais. Em cima está a geometria euclidiana plana e aberta, para a qual a soma dos ângulos internos de um triângulo é sempre 180° e dois raios *laser* paralelos nunca se encontram. No meio está a superfície fechada de uma esfera — um espaço não euclidiano —, onde a soma dos ângulos pode ser superior a 180° e os raios *laser* «paralelos» têm de cruzar-se. Em baixo vemos uma superfície de geometria aberta e hiperbólica, igualmente um espaço não euclidiano, para a qual a soma dos ângulos internos de um triângulo é menor do que 180° e os raios *laser* «paralelos» divergem. O espaço do nosso universo tridimensional pode analogicamente ser classificado como plano, esférico ou hiperbólico. A determinação de qual destes três tipos de geometria é realmente o do nosso universo é um delicado problema experimental.

A nossa própria história é como a destes nossos amigos, com a diferença de se desenrolar num espaço com três, e não duas,

dimensões de espaço. Nós podemos viver num mundo que é um espaço curvo tridimensional. Tal como as criaturas não podiam visualizar a superfície curva bidimensional do seu novo mundo, também nós não podemos visualizar um espaço curvo tridimensional. Mas, tal como elas, podemos fazer experiências com raios *laser* para saber se o nosso mundo tridimensional é de facto curvo ou não. A maioria dos físicos hoje em dia estariam dispostos a apostar que, se se enviarem dois feixes paralelos de luz laser através do espaço intergaláctico, eles não permanecerão paralelos. Pelo contrário, eles ou divergirão ou convergirão. No caso de divergência, o universo diz-se «aberto» — o espaço é curvo, mas estende-se indefinidamente. No caso de convergência, o universo é «fechado» — o análogo tridimensional da superfície de uma esfera. A qual destas categorias pertence realmente o nosso universo é um problema que deve ser deixado para a astronomia experimental. Em qualquer dos casos, o espaço do nosso universo é não euclidiano; não é plano. A geometria desse espaço é descrita pela geometria riemanniana.

Mas o que tem a ver esta curvatura do espaço com a gravidade e com os movimentos não uniformes? Uma vez que decidamos definir uma linha reta como sendo a trajetória de um raio de luz, é fácil ver essa relação.

Como um raio de luz tem energia, a equivalência entre massa e energia de Einstein implica que ele tenha de facto uma massa. Tudo o que tem massa é atraído pela gravidade. Isto significa que, se emitirmos um feixe de luz na vizinhança de um planeta, a sua trajetória encurvar-se-á um pouco na direção do planeta.

Poderíamos ser levados a dizer que o encurvamento da trajetória dos raios de luz significa que essas trajetórias deixam de ser linhas retas. Seríamos então como essas criaturas que não aceitaram que os feixes de luz já não fossem paralelos e pensaram que o problema estaria na própria luz. Na realidade, a curvatura do espaço — a própria geometria do seu mundo — era responsável por este fenómeno. Do mesmo modo, poderíamos pensar que o encurvamento das trajetórias dos raios luminosos nas proximidades de um planeta seria devido à «gravidade», uma força misteriosa. Mas Einstein viu que a gravidade era um conceito supérfluo — não existe nenhuma «força gravitacional». O que sucede, na realidade, é que a massa de um planeta — ou qualquer outra massa — encurva o espaço ao seu redor, alterando a sua geometria. A luz move-se sempre em linha reta — mas uma linha reta definida num espaço curvo. Einstein dispensou a noção de gravidade em proveito da geometria do espaço curvo. De facto, ele descobriu que a gravidade é geometria. Esta é a conclusão central da relatividade generalizada.

Podemos resumir as ideias principais da relatividade generalizada como se segue: primeiro reconhecemos o princípio de equivalência. Depois, independentemente, temos de reconhecer que a determinação da geometria do nosso espaço é um problema experimental. Disparando feixes de raios *laser*, poderemos proceder a essa determinação. Estas duas ideias, o princípio da equivalência e a curvatura do espaço, podem ser combinadas se nos lembrarmos de que a trajetória de um raio luminoso — que utilizamos para determinar o tipo de geometria do nosso espaço — está sujeito à influência da gravidade. O movimento não uniforme

de um raio luminoso — o seu encurvamento no espaço — é equivalente à ação da gravidade nessa região do espaço. Mas, em vez de pensar que a trajetória de um raio luminoso se «encurva» na presença da «gravidade», deveríamos dar-nos conta de que a nossa «gravidade» é de facto a manifestação de um espaço curvo e de que os raios luminosos se deslocam ao longo do caminho mais curto nesse espaço curvo. A gravidade é a curvatura do espaço.

No seu artigo sobre a relatividade generalizada, Einstein deduziu um conjunto de equações que especificavam a curvatura na geometria do espaço — equivalente à gravidade — produzida pela presença da matéria, como o Sol ou um planeta. Essas equações determinam precisamente como o espaço se encurva devido à presença da matéria. A antiga ideia — recuando até aos tempos de Newton — era que a matéria, como, por exemplo, a Terra, produz um campo gravitacional que atrai a ela toda a outra matéria. Esta ideia foi agora substituída pela ideia de Einstein de que a matéria altera a geometria do espaço de plana para curva na sua vizinhança.

Einstein propôs três provas experimentais para a sua teoria da relatividade generalizada. São elas: 1) um ligeiro desvio dos raios de luz devido ao campo gravitacional do Sol; 2) uma pequena correção à órbita de Mercúrio; e 3) o ritmo dos relógios deve ser mais lento num campo gravitacional.

A primeira prova da relatividade generalizada é o encurvamento dos raios luminosos ao passarem nas proximidades do Sol. Hoje em dia, os cientistas realizam estas experiências utilizando radiointerferómetros, aparelhos que podem medir com grande

precisão a posição de fontes de ondas de rádio extremamente distantes, como certas galáxias e estrelas, quando passam por detrás do Sol¹. Mas, quando Einstein propôs esta experiência, em 1916, não existiam ainda radiotelescópios. Arthur Eddington, um astrónomo britânico e membro da Royal Society, tomou conhecimento da nova teoria de Einstein e decidiu verificá-la observando um eclipse total do Sol que se iria dar no dia 29 de Maio de 1919, no hemisfério sul. Em plena primeira guerra mundial não havia esperanças de que a Royal Society obtivesse os fundos necessários para financiar uma expedição solar. Mas Eddington era um pacifista e um estorvo para o governo do seu país; foram-lhe concedidas 5000 libras esterlinas, provavelmente para conseguir que ele não permanecesse em Inglaterra. O eclipse foi observado em Sobral, no Brasil, e na ilha do Príncipe, situada ao longo da costa da África ocidental².

Durante um eclipse total, o conjunto das estrelas muito próximas do Sol torna-se visível no escuro e pode ser fotografado. A luz destas estrelas que estão por detrás do Sol tem uma trajetória que passa muito perto deste e, portanto, de acordo com Einstein, deveria ser desviada pelo espaço curvo em torno do Sol. Este desvio pode ser posto em evidência comparando esta fotografia com outra do mesmo conjunto de estrelas tirada seis meses mais tarde, quando o Sol não está perto da trajetória dos raios luminosos vindos das estrelas. A comparação mostra que realmente existe uma diferença nas posições relativas das estrelas nas duas fotografias causada pelo encurvamento dos raios luminosos no seio do espaço-tempo, curvo em torno do Sol. Em 1919, a Royal Society anunciou o resultado que punha em evidência que as posições das estrelas

vistas durante o eclipse em Sobral e na ilha do Príncipe concordavam com as previsões de Einstein. Após mais de duzentos anos, a lei de gravitação de Newton tinha desabado e a notoriedade pública de Einstein começava.

Não foi fácil para a Royal Society fazer chegar os resultados desta experiência crucial a Berlim, onde Einstein se encontrava, porque a primeira guerra mundial tinha acabado havia muito pouco tempo. O telegrama, enviado de Londres, foi recebido pelo físico Hendrik Lorentz na Holanda, que era um país neutral. Lorentz reenviou-o para Einstein, em Berlim. Uma aluna de Einstein estava no seu gabinete e Einstein interrompeu a sua discussão com ela para lhe mostrar o telegrama, dizendo: «Isto pode interessar-lhe.» Quando ela leu que a expedição solar britânica confirmara a teoria de Einstein, exclamou que aquela era uma mensagem muito importante. Mas Einstein estava impassível e disse: «Eu sabia que a teoria estava correta. Você tinha dúvidas?» A aluna protestou; o que teria pensado Einstein se o resultado da experiência não tivesse confirmado a sua teoria? Einstein respondeu: «Nesse caso, eu teria de ter pena do bom Deus. A teoria está correta.» A linha direta para «o Velho» ainda estava em funcionamento.

O teste clássico da relatividade foi feito há muito. Mas apenas na última década foi concebida uma série de novos testes que comprovam muito precisamente a relatividade generalizada. A tecnologia envolvida pura e simplesmente não existia há dez anos.

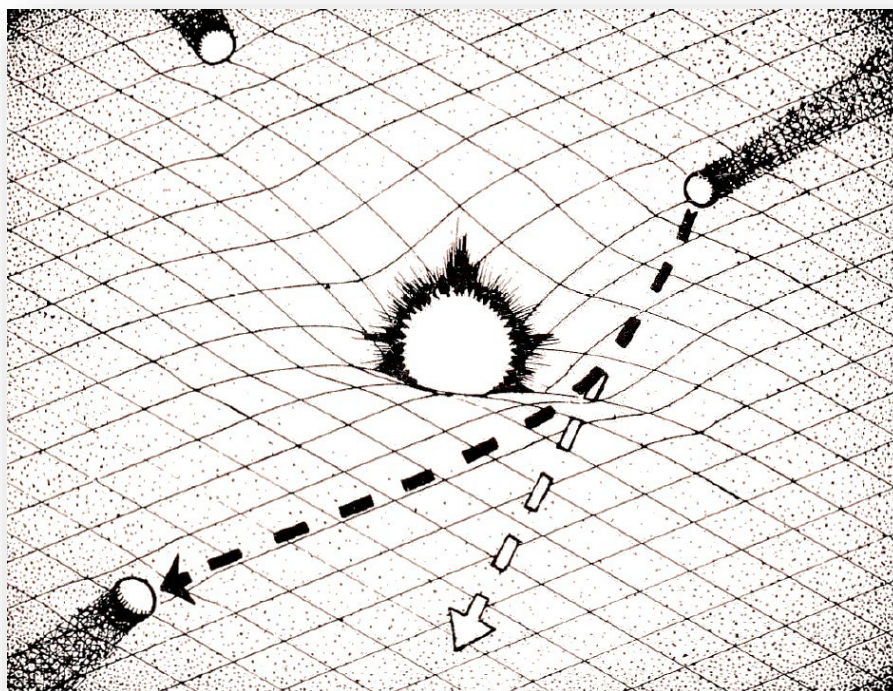
Irwin Shapiro e os seus colaboradores no MIT³ conceberam uma bela prova da teoria da relatividade generalizada. Utilizando um

poderoso feixe de radar e processadores de sinal computadorizados, eles fizeram refletir um feixe de radar num planeta como Mercúrio ou Vénus imediatamente antes de este se eclipsar devido à sua passagem por detrás do Sol, tal como é visto a partir da Terra. Quando o planeta está em eclipse, não há nenhum feixe refletido, mas imediatamente antes do eclipse é possível medir o intervalo de tempo necessário para o sinal de radar (que se comporta como um raio luminoso) ser emitido da Terra, refletido no planeta em questão e detetado de novo na Terra. De acordo com a relatividade generalizada, um feixe de luz encurva-se ligeiramente quando passa muito perto do Sol devido à curvatura do espaço. Isto aumenta o tempo necessário à viagem de ida e volta entre a Terra e o planeta relativamente ao que seria necessário se o feixe não passasse nas proximidades do Sol. À medida que a posição aparente do planeta vista da Terra se aproxima do Sol, o sinal de radar leva um tempo cada vez maior para realizar o seu percurso e, a partir da relatividade generalizada, pode prever-se exatamente qual será este atraso. Dentro das margens de erro experimental, as previsões são confirmadas.

O advento da tecnologia dos satélites e a exploração do sistema solar por sondas espaciais não tripuladas abriram novas perspetivas quanto a possíveis provas da relatividade generalizada. Está agora uma sonda em órbita em torno do planeta Marte enviando continuamente sinais para a Terra. Quando a sonda e Marte estão em vias de passar por detrás do Sol (tal como é visto da Terra), os sinais demoram cada vez mais a atingir a Terra devido à curvatura do espaço nas vizinhanças do Sol. Os cientistas podem medir

precisamente os atrasos efetivos nos sinais, e estes confirmam também a teoria de Einstein.

Talvez a confirmação mais espetacular do encurvamento dos raios de luz tenha sido a descoberta de uma lente gravitacional em 1979. Como as massas provocam a curvatura do espaço na sua vizinhança, as trajetórias da luz encurvam-se perto de uma grande massa de uma maneira análoga àquela como se encurvam numa vulgar lente de vidro. Einstein previu o efeito de lente gravitacional em 1937. Ele mostrou que, se existisse uma grande massa atuando como uma lente entre nós e uma fonte luminosa ainda mais distante, nós veríamos uma dupla imagem dessa fonte distante. Dennis Walsh, Robert Carswell e Ray J. Weymann descobriram em 1979 que um *quasar* — uma fonte extremamente distante de sinais de rádio e de luz visível — era visto, na realidade, como duplo quando observado através de um telescópio suficientemente potente. A melhor explicação para esta dupla imagem do *quasar* é que uma galáxia inteira, situada exatamente na direção em que nós vemos o *quasar*, está a produzir o efeito de lente gravitacional.



Uma representação esquemática da curvatura do espaço em torno do Sol. Um feixe de radar que é refletido por um planeta que, visto da Terra, passa por detrás do Sol é obrigado a encurvar-se. Isto provoca um atraso no sinal relativamente ao que seria de esperar se o feixe não passasse próximo do Sol. As diferentes trajetórias estão representadas pelas linhas curva e reta a tracejado. O atraso medido da trajetória curva relativamente à reta está de acordo com a teoria da relatividade generalizada.

Uma segunda prova da relatividade generalizada é um pequeno desvio na órbita do planeta Mercúrio chamado «precessão do periélio», descoberto pelo astrónomo francês Urbain Jean Joseph Le Verrier, em 1859. O periélio é o ponto mais próximo do Sol da órbita elíptica de um planeta e a sua precessão significa que este ponto pode variar a sua posição em relação ao Sol num dado intervalo de tempo. Quando Le Verrier calculou a influência de todos os outros planetas na precessão do periélio de Mercúrio utilizando a lei de gravitação de Newton, encontrou uma discrepância de cerca de 1% entre os seus cálculos teóricos e as observações astronómicas. Felizmente, ele não ignorou esta pequena discrepância e publicou o resultado. Outros cientistas tentaram dar conta desta discrepância,

conservando a lei de Newton, argumentando que este efeito poderia ser devido a poeiras em torno do Sol ou ao facto de este não ser perfeitamente esférico. Mas as poeiras nunca foram vistas e o Sol é esférico. A teoria da relatividade generalizada de Einstein previa pequenas diferenças relativamente à lei de Newton e dava um resultado de 43 segundos de arco por século — exactamente a discrepância que Le Verrier tinha encontrado! Hoje, poderosos radares podem distinguir as montanhas dos vales na superfície do planeta Mercúrio. Esses radares podem medir precisamente a órbita de Mercúrio, e de novo o desvio no periélio concorda com a relatividade generalizada.

A terceira prova da relatividade generalizada é a de que os relógios devem funcionar mais lentamente no seio de um campo gravitacional. Quanto maior for a intensidade do campo gravitacional, tanto mais lentamente o tempo se escoará. Einstein, afinal de contas, disse que o tempo é aquilo que é medido por um relógio. Se um relógio trabalha mais lentamente, também o tempo passa mais lentamente. Na realidade, nós envelhecemos mais devagar quando submetidos a um campo gravitacional do que alguém num ambiente livre de gravidade. Este efeito notável do abrandamento dos relógios é muito pequeno; apenas relógios extremamente precisos podem detetá-lo. Os relógios mais precisos que existem são relógios atómicos, mais precisos do que o antigo padrão baseado no movimento das estrelas. Se dois relógios atómicos forem sincronizados, eles diferirão apenas uma fração de segundo após milhões de anos. Podemos verificar qual é o efeito da gravidade sobre estes relógios pondo um deles numa trajetória orbital muito acima da superfície da Terra, onde a gravidade é mais

fraca, e em seguida trazendo-o de volta à Terra e comparando a sua medição do tempo com a de um relógio idêntico deixado sobre a Terra, onde a gravidade é mais forte. A diferença temporal observada concorda com a relatividade generalizada. Noutra versão desta experiência, um relógio atômico é transportado do National Bureau of Standards, em Washington, D. C., que está ao nível do mar, até Denver, Colorado. Os ritmos do relógio nos dois sítios diferem por causa da diferença na força gravitacional entre eles e, mais uma vez, a diferença está de acordo com a teoria da relatividade generalizada. Dentro de limites ínfimos, as pessoas de Denver envelhecem mais lentamente do que as pessoas de Washington, D. C.

As três provas originais da relatividade generalizada propostas por Einstein foram maravilhosamente confirmadas utilizando tecnologia moderna. Mas, além destas três previsões, a teoria tem outras implicações que os físicos hoje investigam.

A teoria da relatividade generalizada implica a existência de ondas gravitacionais, ondulações da curvatura do espaço que se propagam à velocidade da luz através de qualquer distância. Seria muito entusiasmante detetar ondas gravitacionais, mas grande parte dos meios de gerar ondas gravitacionais a partir de catástrofes cósmicas, como explosões ou colisões de estrelas, provocam a emissão de ondas gravitacionais demasiado fracas para serem detetadas na Terra. Uma fonte potencial de ondas gravitacionais poderiam ser os buracos negros consumindo estrelas no núcleo da nossa Galáxia. Talvez dentro de algumas décadas, se existirem ondas gravitacionais, nós venhamos a detetá-las.

Recentemente, a análise de um pulsar binário pelos astrofísicos Hulse e Taylor pareceu sugerir uma prova indireta a favor das ondas gravitacionais. Um pulsar é uma estrela colapsada, com uma enorme densidade. Um dedal de matéria de um pulsar pesaria várias toneladas. Um pulsar binário é um pulsar que orbita em torno de uma estrela normal. Apesar de não podermos ver um pulsar com um telescópio óptico, podemos detetar os sinais de rádio que ele emite com um grande radiotelescópio. No caso de um pulsar binário, este esconde-se por detrás da estrela companheira periodicamente, um fenómeno que bloqueia o seu sinal de rádio. Medindo a frequência com que o sinal é bloqueado, é possível determinar o período, ou tempo que demora o pulsar em cada órbita em torno da estrela companheira. Os astrónomos, observando um desses pulsares binários, mediram o seu período ao longo de uma série de anos e concluíram que este diminui. Como pode ser explicada esta diminuição?

O pulsar binário pode ser um emissor gigantesco de ondas gravitacionais. À medida que emite ondas gravitacionais para o espaço, perde energia, e esta perda de energia provoca a redução do período orbital do pulsar. Utilizando a relatividade generalizada, os astrofísicos calcularam a energia perdida sob a forma de ondas gravitacionais radiadas para o espaço, e esta está em notável acordo com a diminuição observada. Apesar de indireta, a diminuição do período do pulsar binário pode ser a primeira prova da existência de ondas gravitacionais.

Estas e outras provas da relatividade generalizada confirmaram a teoria de Einstein. As provas revelam pequenas, mas importantes

diferenças relativamente à teoria de Newton. Isto é devido ao facto de os campos gravitacionais no nosso sistema solar serem bastante fracos, e, para campos fracos, as teorias de Newton e de Einstein diferem muito pouco. Os campos gravitacionais fortes, como os produzidos por matéria totalmente colapsada na forma de buracos negros, revelam novas e excitantes características da relatividade generalizada. Com os fortes efeitos gravitacionais ligados aos buracos negros e à origem e expansão do universo, a relatividade generalizada é finalmente utilizada em todas as suas consequências qualitativamente diferentes da teoria de Newton. Através de tais descobertas apercebemo-nos de que é necessária uma revolução no nosso pensamento para descobrirmos as novas leis da natureza. Estas novas leis podem a princípio fornecer apenas pequenas correções às antigas. Mas as novas leis têm consequências qualitativas que se prolongam muito para lá das nossas antigas ideias, tal como a teoria de Einstein alcança mais além da antiga teoria de Newton. Se quisermos vir a compreender o início e o fim do universo, devemos ir além da teoria da gravitação de Newton e mergulhar na teoria da relatividade generalizada de Einstein.

A relatividade generalizada, com a sua ênfase na geometria, abre toda uma nova visão sobre a natureza do universo, fornecendo a base da cosmologia, o estudo do universo como um todo. Ao longo de milénios, o homem especulou sobre o universo e a sua origem. Agora, um novo instrumento matemático — a teoria da relatividade generalizada — está disponível para formular estas questões da forma adequada e talvez até encontrar para elas uma resposta correta.

Olhando para o céu numa noite clara, vemos miríades de estrelas. O nosso sentimento é de sermos muito pequenos; sabemos que o universo é muito maior do que mesmo as estrelas visíveis sugerem. Todas as estrelas que vemos fazem parte da Via Láctea — a nossa galáxia natal — e esta é apenas uma de entre biliões de galáxias. Como podemos estudar essa imensidade? Podemos imaginar que o universo é como um gás em que as partículas são as galáxias. Para este caso extremamente simplificado de um gás uniforme de galáxias podemos resolver as equações da relatividade generalizada.

O físico soviético Alexander Friedmann foi o primeiro a encontrar este tipo de soluções para as equações de Einstein. Em 1922 descobriu o facto surpreendente de a teoria da relatividade generalizada de Einstein implicar que o universo não podia ser estático — teria de estar em evolução. O gás de galáxias tinha de se expandir ou de se contrair. Tudo se passava como se as nossas amigas criaturas habitantes da superfície esférica descobrissem não só que estavam a viver num espaço curvo, mas também que essa curvatura variava com o tempo.

Friedmann mostrou que, se a densidade do gás de galáxias fosse menor do que um determinado valor crítico, o universo seria aberto e a sua expansão continuaria para sempre — as galáxias afastar-se-iam cada vez mais. Se a densidade de galáxias fosse superior a esse valor crítico, o universo seria fechado e viria eventualmente a sofrer uma fase de contração.

É como atirar uma pedra. Se a lançarmos para cima suficientemente depressa, isto é, com uma velocidade superior a uma certa velocidade crítica (relacionada com a quantidade total de matéria na Terra), ela nunca regressará à Terra: tal como o universo aberto nunca regressa ao ponto de partida. Abaixo da velocidade crítica, a pedra regressa sempre à Terra — como o universo fechado. As melhores indicações de que os astrónomos dispõem hoje em dia sugerem que estamos abaixo da densidade crítica de matéria galáctica e que, portanto, o universo é aberto. Mas, se mais aglomerados de matéria fossem descobertos, a densidade de matéria aumentaria e poderíamos então ter um universo fechado que se expandiria e se contrairia de novo.

A princípio, Einstein não acreditou nos cálculos de Friedmann e pensou que ele se tivesse enganado. Tal como a maioria dos físicos e astrónomos do seu tempo, Einstein pensava que o universo era estático e existia desde sempre e para sempre. Um universo dinâmico e em evolução parecia contrário à experiência e uma novidade artificial. Como queria um universo fechado e estático, Einstein foi ao ponto de alterar as suas equações da relatividade, acrescentando um «termo cosmológico» que permitia uma solução estática. Mais tarde chamou a esta mutilação «o maior disparate da minha vida». Assim, foi Friedmann, e não Einstein, quem descobriu que a relatividade generalizada exigia um universo em expansão, em movimento. A sua espantosa previsão foi feita sete anos antes da grande descoberta cosmológica do astrónomo americano Edwin Hubble. A partir de um estudo detalhado das galáxias distantes, Hubble concluiu que, de facto, o universo estava em expansão,

como se se tratasse duma explosão gigantesca. O universo estava em evolução!

A teoria da relatividade generalizada foi a maior obra de Einstein; ela representava a realização da imagem clássica e determinista do mundo. Apesar de Einstein ter ido além da física de Newton, dando às ideias de espaço, tempo e matéria a sua forma moderna, o quadro concetual da sua física era completamente determinista. O grande relógio do universo newtoniano foi alterado por Einstein — as engrenagens e as peças eram diferentes —, mas Einstein concordava com Newton em que o movimento do relógio estava completamente determinado desde o passado infinito até ao futuro infinito.

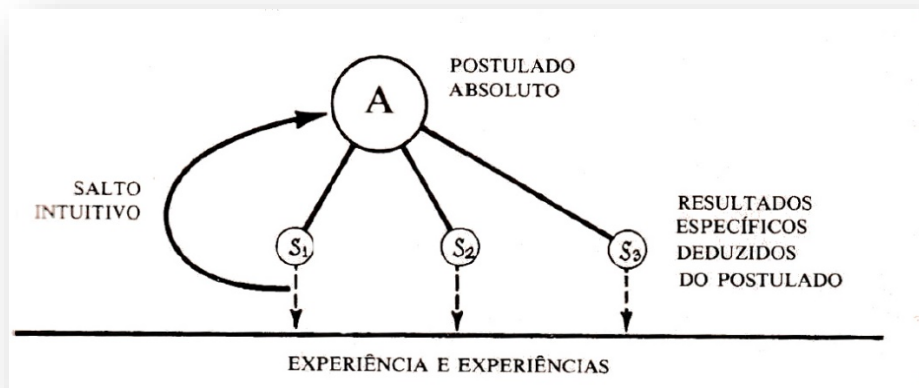
É difícil conceber que uma só pessoa tenha criado a relatividade generalizada. A teoria combina as ideias de espaço, tempo, energia, matéria e geometria num todo coerente de alcance e implicações enormes. Como inventou Einstein a relatividade generalizada?

Enquanto esteve em Zurique e nos seus primeiros anos em Berlim, Einstein esteve sob a influência intelectual do filósofo-físico Ernst Mach, um defensor acérrimo do positivismo na física. Mach ensinava que os físicos teóricos nunca deveriam utilizar em física uma ideia a que não pudesse ser dado um significado concreto e preciso através de operações experimentais. Ideias sem ligação ao mundo empírico eram supérfluas para as teorias físicas. O método de Mach tornou-se uma força viva no desenvolvimento da nova física. Einstein era um mestre neste método. Relembremos as suas definições de espaço e de tempo: espaço é aquilo que medimos com

uma régua; tempo é aquilo que medimos com um relógio. Estas definições, com o seu apelo direto à medida, rejeitam toda a excessiva bagagem filosófica que as ideias de espaço e de tempo tinham transportado ao longo de séculos. O positivista insiste em que devemos falar apenas daquilo que podemos conhecer através de operações diretas como a medição. A realidade física é definida por operações empíricas reais, não por fantasias da nossa mente.

No entanto, depois de se ter estabelecido em Berlim, Einstein afastou-se da posição de um estrito positivismo, e isto apenas parcialmente, devido aos argumentos persuasivos oferecidos pelo seu colega Planck. Foi em grande parte o próprio sucesso de Einstein com a teoria da relatividade generalizada e o método de pensamento que utilizou para chegar a ela que o convenceram das limitações do método do positivismo estrito. Se Einstein tivesse permanecido positivista, duvido que ele houvesse alguma vez formulado a sua teoria da relatividade generalizada. Einstein descreveu mais tarde o seu próprio método numa carta ao filósofo Maurice Solovine, um amigo dos seus tempos de Berna na repartição de patentes. Este método poderia ser chamado «método postulacional de Einstein».

Na sua carta a Solovine, Einstein incluía um diagrama que lustra o seu método. O diagrama é:



O cientista parte do mundo da experiência e das experiências. Com base apenas na intuição física, ele salta da experiência para a abstração de um postulado absoluto — tal como Einstein se apercebeu de que o princípio de equivalência implicava que a gravidade é geometria. Einstein realizou este salto concetual muito para além daquilo que qualquer experiência poderia verificar e antes de ter qualquer dado que o apoiasse. Como poderiam existir tais dados? Nenhum físico tinha sequer imaginado que poderia haver uma relação entre gravidade e geometria. O próximo passo é utilizar o postulado para deduzir resultados teóricos específicos que possam ser experimentalmente verificados. Para a relatividade generalizada, esses resultados são as previsões como a da correção à órbita de Mercúrio. Se uma experiência contrariar os resultados teóricos, destrói também o postulado em que eles se fundamentam. Esta vulnerabilidade do postulado absoluto à falsificação faz parte integrante do método positivista.

Mas um forte elemento antipositivista indispensável ao método de Einstein é o salto intuitivo a partir da experiência, que estabelece o postulado pela primeira vez. O teórico não pode deduzir

racionalmente o postulado absoluto a partir da experiência, uma vez que ele transcende a experiência. Só a intuição, uma suposição inspirada, pode inventar o postulado. Era isto o que Einstein queria dizer quando afirmou: «Para a criação de uma teoria, a mera coleção dos fenómenos registados nunca chega — deve sempre ser acrescentada uma invenção livre do espírito humano para atacar o coração do problema.» Uma grande parte do trabalho criativo em física avança desta forma, colocando a intuição no primeiro passo da teoria, um aspeto não racional, mas verificável, da criatividade científica.

Nos anos que se seguiram à primeira guerra mundial, a fama pública de Einstein cresceu e ele tornou-se uma figura mundial. A única outra personalidade de que posso lembrar-me que atingiu tal notoriedade como líder moral foi Gandhi, que, sendo um homem de estado, utilizava a proeminência pública como meio para conduzir a Índia à independência. Einstein nunca quis ser uma figura pública — e, no entanto, quando isso sucedeu, ele usou a sua celebridade para apoiar causas em que acreditava. Como se pode explicar este «fenómeno Einstein»?

Há vários fatores em jogo aqui. Em primeiro lugar está a emergência de novos meios de comunicação social, como a rádio e jornais de grande circulação associados ao aumento da instrução. Em segundo lugar, a Europa estava exausta e devastada pela guerra; a Alemanha, especialmente, tinha de salvar qualquer coisa da derrota geral. A atenção popular voltou-se para Einstein e para as suas realizações, que pareciam suficientemente afastadas do mundo político e lembravam aos alemães a sua grande cultura

científica. Durante a guerra, Einstein percorreu o seu próprio caminho, isolado como sempre. Era pacifista numa altura em que essa posição era considerada equivalente a traição. Orgulhava-se de ser judeu numa altura em que muitos judeus alemães escondiam a sua identidade. Estas posições eram impopulares, mas impuseram Einstein como um homem de princípios numa época em que os homens de princípios eram raros. Finalmente, esses tempos foram na Europa um período de conflitos e debates ideológicos. Na Rússia havia uma guerra civil, consequência da revolução de 1917. Em toda a parte o fascismo crescia. Os filósofos religiosos e sociais procuravam apoio para os seus pontos de vista nas novas teorias de Einstein, que, isso tornava-se claro, eram o passo seguinte na revelação da natureza. Os físicos soviéticos, liderados por V. Fock, tiveram necessidade de defender a relatividade contra acusações de idealismo, tentando demonstrar que ela estava em perfeito acordo com o materialismo de Lenine, a base ideológica da política soviética. Alguns cientistas na Inglaterra e na América insistiam em que a teoria da relatividade de Einstein nada tinha a ver com o relativismo moral ou cultural, uma doutrina filosófica que sustenta que os valores morais humanos são relativos ao seu ambiente cultural e social. Esta filosofia estava então muito em voga nas universidades e era ameaçadora para as religiões tradicionais. O astrónomo Arthur Eddington, ele próprio um «quacre»⁴, assegurava aos crentes que ainda havia um lugar para Deus e para a alma no universo. Em face destas controvérsias, Einstein reiterava a sua filosofia cósmica, já formulada quando adolescente, de que o universo era indiferente à humanidade e aos seus problemas. Mas ele sustentava também que as questões morais eram da maior

importância para a existência humana e que a humanidade tinha de criar uma ordem moral para a sua própria sobrevivência.

Mesmo quando a eminência de Einstein cresceu e a sua visão do universo se tornou do conhecimento público, a própria física avançava a passos largos. Na década de 1920 foi criada a teoria quântica dos fenómenos atómicos. Einstein rejeitou-a, não porque estivesse errada (concordava com todas as experiências), mas porque sentia que ela dava uma descrição incompleta da realidade física e negava a objetividade e o determinismo do mundo. O seu grande debate com Niels Bohr teve então o seu início; mas isso é uma história para outro capítulo. Durante as décadas de 1920 e de 1930 apareceu uma nova geração de físicos que aceitou a nova teoria quântica e a aplicou com enorme sucesso. A teoria da ligação química foi formulada; a nova teoria quântica explicava os fundamentos da química. As teorias da matéria no estado sólido, dos metais, da condutibilidade elétrica e da magnetização foram desenvolvidas a partir da nova teoria quântica. A física nuclear começou.

Einstein teve pouco a ver com estes progressos. Não esteve nos grandes centros de desenvolvimento da física a partir de 1926. Einstein, de facto, pensava que a nova teoria quântica não era suficientemente radical. Para ele, a teoria quântica poderia ser uma consequência da teoria do campo unificado — teoria que combinava os campos elétrico, magnético e gravitacional e ia além da relatividade generalizada. Em 1938 afirmou: «Tenho lutado com este problema básico da eletricidade durante mais de vinte anos e estou agora bastante desencorajado, apesar de não ser capaz de

desistir.» Ainda que tivesse falhado na unificação da eletricidade e da gravidade, foi um dos primeiros físicos a sublinhar a importância da procura da unificação de todas as forças da natureza, objetivo da física em relação ao qual tem havido grandes progressos nos últimos tempos. De todo o seu trabalho, sentia que tudo o que tinha feito teria sido descoberto sem ele, à exceção da relatividade generalizada. Esta era a coroa de toda a sua criatividade e da física clássica como ciência. Mas o caminho do progresso na física, pelo menos durante o meio século seguinte, era outro.

A minha opinião é a de que, depois de 1926, Einstein ficou enredado na matemática da teoria do campo unificado. Durante o resto da sua vida não conseguiu resistir ao poder concetual e à beleza da relatividade generalizada. A influência desta criação e do método utilizado para a atingir dominaram todo o seu pensamento subsequente. Perdeu o contato com «o Velho» e a intuição física criativa que tinha possuído por mais de vinte anos. O equilíbrio delicado entre inocência e experiência, condição prévia para a criatividade, inclinou-se para o lado da experiência. Como o físico Paul Ehrenfest disse quando soube da oposição de Einstein à nova teoria quântica, «perdemos o nosso líder».

Einstein defendeu a perspetiva clássica do determinismo até ao fim da vida. Para ele era impensável que existisse arbitrariedade e acaso na estrutura fundamental do universo. A sua visão do código cósmico — as leis eternas da natureza que governam toda a experiência — não deixava espaço para o acaso ou para a vontade e finalidade humanas. Sentia que a teoria quântica era superficial e que, para lá do jogo aleatório das partículas atómicas que ela

descrevia, encontraríamos uma nova física determinista. Ainda que muitos outros físicos estejam abertos quanto à possibilidade de uma revisão da teoria quântica, não acreditam que a física determinista regresse. Einstein, mesmo tendo sido líder dos físicos antes de 1926, estava agora afastado deles. Depois de 1926 estava não só afastado, mas também sozinho⁵.

Quando era adolescente, admirava Einstein como um herói da ciência, um deus no remoto panteão do intelecto. Agora, através de olhos mais velhos, vejo outra faceta sua — a sua solidão e exílio emocional dos caprichosos sentimentos humanos. Ele necessitava dessa distância para forjar os instrumentos do seu imenso gênio, um gênio que nos mostrou um universo muito maior e muito mais espantoso do que poderia antes ter sido imaginado. A sua visão do cosmo, estendendo-se através da imensa vastidão do espaço e do tempo, indiferente à nossa humanidade, obceca-nos agora a todos nós. Mas eu ainda me intrigo com o homem que pela primeira vez teve esta visão e procuro entender o seu carácter.

Einstein amava a música de Mozart. Ambos estes homens possuíam o sentido da vulnerabilidade última de toda a vida, mas nunca perderam o seu sentido de humor ou o gosto por uma boa gargalhada. Sabiam que, neste mundo, a realidade da vida é apenas contingência. No entanto, aquilo que podemos aprender de homens como eles é que também podemos celebrar a nossa existência criativa no conhecimento perfeito da sua futura extinção. E essa é a essência da ironia.

Com o crescimento da loucura tribal do nacional-socialismo, Einstein deixou a Alemanha numa emigração forçada para os Estados Unidos, um país que ele já visitara. Juntamente com muitos outros dos mais brilhantes cientistas europeus, levou para a América um espírito de pesquisa científica fermentado ao longo de séculos. Jovens americanos dotados tornaram-se estudantes desejosos de aprender.

Einstein nunca se sentiu em casa nos Estados Unidos. Produto do grande renascimento intelectual alemão do virar do século, não se adaptou aos novos tempos. Certa vez, com a ironia que lhe era habitual, observou: «Para os Judeus sou um santo, para os Americanos uma peça de exposição, para os meus colegas um charlatão.»

Einstein sabia que não podia escolher o seu nascimento, mas podia escolher a sua morte. Tomando conhecimento da sua doença final, Einstein recusou uma operação. Morreu em Princeton, Nova Jérсия, o seu lar americano, em 18 de Abril de 1955, assistido por uma enfermeira que não conseguiu compreender as suas últimas palavras, pronunciadas em alemão.

Michele Besso era o amigo mais antigo de Einstein; conheceram-se nos tempos da repartição de patentes de Berna e mantiveram correspondência durante cinquenta anos. O único agradecimento de Einstein no seu artigo de 1905 sobre a relatividade estrita refere-se às discussões com o seu amigo Besso. Que honra! O amigo de Einstein morreu um mês antes dele, na Suíça. Expressando a sua imagem do mundo de determinismo absoluto, Einstein escreveu as

seguintes palavras numa carta comovente ao filho e à irmã de Besso: «Agora ele deixou este estranho mundo um pouco antes de mim. Isso não significa nada. As pessoas como nós, que acreditam na física, sabem que a distinção entre passado, presente e futuro é apenas uma ilusão obstinadamente persistente.»

¹ Este «passar por detrás do Sol» é, evidentemente, força de expressão. Como a Terra se move em torno do Sol, o que sucede ao longo do ano é que da Terra vemos o Sol descrever uma trajetória aparente (eclíptica), enquanto as estrelas permanecem fixas. Assim, em diferentes alturas do ano, o Sol está próximo de diferentes constelações, realizando uma órbita completa num ano. É a este fenómeno que se alude, um pouco incorreta, mas concisamente, quando se diz que «as estrelas passam por detrás do Sol». *(N. do T.)*

² Trata-se de uma das ilhas do arquipélago de São Tomé e Príncipe. *(N. do T.)*

³ Massachusetts Institute of Technology. *(N. do T.)*

⁴ Quacre: membro de uma seita religiosa que defende a simplicidade e a austeridade dos costumes, do vestuário, etc. *(N. do T.)*

⁵ Melhor se poderia dizer «quase sozinho»: Schrodinger, Bloch, De Broglie e outros diversamente o acompanharam. *(N. do T.)*

CAPÍTULO 3

Os Primeiros Físicos Quânticos

Por Zeus, Soddy, tomar-nos-iam por alquimistas!

ERNEST RUTHERFORD

No meu primeiro ano na universidade tive o primeiro contato com a teoria quântica ao comprar um exemplar da *Mecânica Quântica*, um livro de Leonard Schiff, que viria mais tarde a ser meu professor num curso de pós-graduação. Li o seu livro e resolvi os respetivos problemas. A mecânica quântica era para mim um exercício de resolução de equações diferenciais. Para o meu espírito de aluno do primeiro ano, livre de qualquer influência da antiga física clássica, a teoria quântica não apresentava grandes dificuldades. Era simplesmente uma descrição matemática abstrata dos fenómenos atômicos. Eu não tinha a mínima noção da «peculiaridade quântica» do mundo atômico; era a teoria da relatividade restrita, com as suas contrações do espaço e dilatações do tempo, que me parecia estranha. Mas, ao prosseguir os meus estudos, a minha reação inverteu-se — a relatividade parecia-me menos estranha e mais de acordo com o senso comum, enquanto a teoria quântica me parecia cada vez mais «estranha». Aprofundando a matemática da teoria quântica, sentia-me longe do sentido comum, explorando áreas inimaginadas. Mais tarde vim a saber que a minha experiência pessoal era semelhante à dos físicos

que tinham descoberto a nova teoria quântica. Eles descobriram em primeiro lugar as equações matemáticas da teoria quântica, que concordavam com os dados experimentais; refletiram depois sobre as equações e sobre o seu significado para o mundo real, desenvolvendo uma interpretação que se afastava radicalmente do realismo ingênuo. Quando me apercebi daquilo que a matemática abstrata da teoria quântica queria na realidade dizer, o mundo pareceu-me algo de realmente muito estranho. Gostaria de partilhar essa sensação com o leitor.

Em que consiste esta peculiaridade quântica? A física da nova teoria quântica contrasta fortemente com a antiga física newtoniana, que veio substituir. As leis de Newton trouxeram a ordem ao mundo visível dos objetos e acontecimentos a que estamos habituados, como a queda das pedras, o movimento dos planetas, o fluir dos rios e as marés. As características básicas da imagem newtoniana do mundo eram o seu determinismo — o relógio do universo está totalmente determinado do princípio ao fim dos tempos — e a suposição tácita de que as pedras e os planetas existem objetivamente mesmo quando nós não os observamos diretamente; se lhes voltarmos as costas, eles permanecem no mesmo sítio.

Na teoria quântica, estas interpretações aparentemente sensatas do mundo (como o determinismo e a objetividade) não podem ser conservadas. Apesar de o mundo quântico ser racionalmente compreensível, não pode ser visualizado como o mundo newtoniano. E isso não apenas porque o mundo atómico e subatómico dos *quanta* seja extremamente pequeno, mas

essencialmente porque as convenções visuais que adotamos do mundo dos objetos vulgares não se aplicam aos objetos quânticos. Por exemplo, podemos visualizar uma pedra que esteja simultaneamente em repouso e num sítio bem determinado. Mas não faz sentido falar de uma partícula quântica como o elétron em repouso num ponto do espaço. Mais ainda, os elétrons podem ser encontrados em lugares onde as leis de Newton afirmam que eles não podem estar. Os físicos e os matemáticos mostraram que pensar nas partículas quânticas como objetos vulgares está em contradição com a experiência.

A teoria quântica não só nega a ideia tradicional de objetividade, como também destruiu a imagem determinista do mundo. De acordo com a teoria quântica, alguns acontecimentos, como as transições eletrônicas nos átomos, ocorrem ao acaso. Não existe nenhuma lei física que nos diga exatamente quando é que uma transição vai ocorrer; o máximo que podemos fazer é determinar a probabilidade de uma dada transição. As mais pequenas rodas do grande relógio, os átomos, não obedecem a leis deterministas.

Aos inventores da teoria quântica deparara-se mais uma diferença radical em relação à imagem newtoniana do mundo — a realidade criada pelo observador. Eles descobriram que a teoria quântica implica que aquilo que um observador decide medir influencia o resultado final dessa medida. O que acontece no mundo quântico depende da forma como o observamos. O mundo não existe independentemente da nossa observação; aquilo que existe depende em parte do que decidimos observar — a realidade é parcialmente criada pelo observador.

São estas propriedades do mundo quântico — a sua falta de objetividade, a sua indeterminação, a realidade criada pelo observador — que o distinguem do mundo habitual percebido pelos nossos sentidos. É a elas que me refiro como «peculiaridade quântica». Einstein resistiu a esta peculiaridade quântica, especialmente à noção de uma realidade criada pelo observador. O facto de um observador influenciar diretamente o resultado das medições ia contra a sua conceção determinista do mundo, segundo a qual a natureza era indiferente às opções humanas.

Algo dentro de nós recusa compreender a realidade quântica. Intellectualmente, aceitamo-la porque é matematicamente coerente e concorda espetacularmente com a experiência. No entanto, o espírito não se sente satisfeito. A forma como os físicos e outras pessoas têm problemas na perceção da realidade quântica faz-me lembrar o modo como as crianças reagem quando confrontadas com um conceito que ainda não dominam. Jean Piaget, o psicólogo, estudou este fenómeno. Se a uma criança de uma certa idade for mostrado um conjunto de recipientes transparentes, todos de formas diferentes, mas contendo o mesmo nível de um dado líquido, a criança pensa que todos os recipientes contêm a mesma quantidade de líquido. A criança ainda não se apercebeu de que a quantidade de um líquido é determinada pelo seu volume, e não pela sua altura. Se a forma correta de pensar sobre o problema for explicada à criança, ela compreendê-la-á em geral, mas imediatamente retoma a antiga forma de pensar. Apenas a partir de uma idade específica, por volta dos 6 ou 7 anos, passa a criança a estar em condições de dominar a relação entre quantidade e volume. O contato com a realidade quântica é de certa forma

parecido. Depois de julgarmos que a dominamos e de formarmos uma imagem do mundo quântico na nossa mente, retomamos imediatamente a forma antiga e clássica de pensar, tal como a criança na experiência de Jean Piaget.

É importante tomarmos consciência do facto de o mundo microscópico dos átomos, dos eletrões e das partículas elementares não ser totalmente diferente do mundo clássico, o mundo físico do realismo ingénuo. Podemos isolar um único átomo numa caixa; os eletrões e outras partículas deixam traços em emulsões fotográficas ou em câmaras de nevoeiro. Podemos acelerar as partículas usando campos elétricos e magnéticos. Os experimentadores podem medir certas propriedades destes minúsculos objetos, como a massa, a carga elétrica, o *spin*¹ ou a magnetização. Os físicos, tal como grande parte das pessoas, pensam sobre as partículas microfísicas desta forma. Elas são pequeníssimos objetos. Podemos formar feixes a partir delas, ou fazê-las colidir entre si. Onde está a peculiaridade quântica? O que é afinal tão difícil de dominar?

A peculiaridade quântica surge quando começamos a fazer certo tipo de perguntas sobre os átomos, os eletrões e os fótons. E surge apenas quando formulamos essas perguntas especiais e tentamos responder-lhes concebendo experiências que nos ajudem. Por exemplo, chegamos à conclusão de que é impossível medir precisamente a posição e a velocidade de um eletrão através de medições sucessivas. De cada vez que medimos a sua posição alteramos a velocidade, e vice-versa — o eletrão possui uma espécie de «fluidez quântica» nas suas propriedades. Se o eletrão fosse um objeto vulgar, poderíamos determinar sem problemas a

sua posição e a sua velocidade. Mas o elétron é uma partícula quântica e a ideia natural de objetividade falha. Até começarmos a fazer perguntas pormenorizadas sobre as partículas quânticas, tais como quais são exatamente a posição e a velocidade de uma partícula, poderemos viver muito felizes num paraíso de realismo ingênuo.

Assim que uma pessoa reconhece que a peculiaridade quântica do mundo microfísico é inevitável, pode tomar duas atitudes fundamentais. A primeira é esquecê-la e limitar-se à matemática da teoria quântica. Desse modo, ela encontrará os resultados corretos e fará progressos na descoberta das leis que regem o mundo microfísico. Muitos físicos teóricos, seguindo o exemplo de Paul Dirac e de Werner Heisenberg, que elaboraram os fundamentos matemáticos da nova teoria quântica, adotam esta atitude. A segunda atitude é a abordagem filosófica, que tenta interpretar a peculiaridade quântica do mundo microfísico em termos de realidade física. As pessoas que seguem esta via estão interessadas em desenvolver um quadro conceitual do mundo quântico que seja consistente, além de matematicamente coerente. Niels Bohr foi o fundador dessa atitude relativamente da física moderna e tinha muito a dizer sobre a interpretação da realidade.

A história da descoberta da teoria quântica começou com a determinação da lei de radiação do corpo negro por Max Planck, em 1900, o primeiro grande passo. A antiga teoria quântica caracterizava-se por representar as tentativas dos físicos para conciliarem a ideia do *quantum* de Plank — a existência de um elemento discreto na natureza — com a física clássica newtoniana.

No seu trabalho sobre a radiação do corpo negro, Max Planck introduziu uma nova constante física, a que chamou h , que era uma medida do grau de descontinuidade nos processos atômicos. Quando Planck publicou o seu trabalho, em 1900, os físicos pensavam que a energia total dos átomos podia ter qualquer valor — a energia era considerada uma variável contínua. Mas a introdução da hipótese quântica de Planck implicava a quantização da energia. Apesar de essa introdução não ter nenhum fundamento na física clássica, ainda não era claro que a nova teoria exigia um corte radical com os conceitos clássicos. Os físicos teóricos tentaram antes de tudo reconciliar a hipótese quântica de Planck com a física clássica.

Os físicos são uns revolucionários conservadores. Não desistem de princípios provados e confirmados até que os dados experimentais — ou um apelo à simplicidade lógica e concetual — os obrigue a adotar um ponto de vista novo e por vezes revolucionário. Esse conservadorismo está no centro da estrutura crítica da investigação. Os pseudocientistas não têm essa fé profunda nos princípios existentes, preferindo introduzir toda a espécie de ideias do exterior. Werner Heisenberg afirmou certa vez: «A teoria moderna não se desenvolveu a partir de ideias revolucionárias que tivessem sido, por assim dizer, introduzidas nas ciências exatas a partir do exterior. Pelo contrário, as ideias novas surgiram a partir de investigação que tentava cumprir de uma forma consistente o programa da física clássica — elas são uma consequência da própria natureza desta.» A antiga teoria quântica representava um programa para a reconciliação dos *quanta* com a física clássica.

Einstein retomou a ideia de Planck no seu artigo de 1905 sobre o efeito fotoelétrico. Planck supôs que as fontes de luz trocavam energia de uma forma quantizada. Einstein foi mais além e afirmou que a própria luz estava quantizada — a luz consistia em partículas chamadas «fotões». Esta ideia revolucionária colidia com a então bem estabelecida teoria ondulatória da luz — razão suficiente para que a grande maioria dos físicos a rejeitasse. Outros físicos resistiram à proposta de Einstein porque esta só explicava o efeito fotoelétrico, o que representava um fraco apoio ao conceito de fóton. Mas Einstein defendeu firmemente a noção de uma dualidade corpúsculo-onda para a luz e tentou reconciliar estas propriedades aparentemente contraditórias da luz, embora sem grande sucesso.

As ideias teóricas de Planck e de Einstein que deram origem à teoria quântica eram respostas a experiências que abriam todo um novo domínio de fenómenos naturais. Nos finais do século XIX, um grande número de novas e intrigantes propriedades da matéria foram descobertas; pela primeira vez, os cientistas estabeleciam contato direto com os processos atômicos. Roentgen descobriu os raios X em 1895. Henri Becquerel descobriu a radioatividade em 1896 e os Curie isolaram o rádio em 1898. Em 1897, J. J. Thomson descobriu o eletrão, uma nova partícula elementar. Uma descoberta intrigante foi a de que, sob certas condições, os átomos emitem riscas espectrais de luz. Se uma substância é aquecida ou se se provocarem descargas elétricas no seio de um gás, a substância ou o gás emitirá luz. Se o espectro dessa luz for analisado por um prisma que separa as várias cores, apenas certas riscas coloridas bem definidas aparecem no espectro. As lâmpadas coloridas de *néon* fornecem um exemplo deste fenómeno. Cada elemento

químico tem um conjunto bem determinado e característico de tais riscas, chamado por isso «espectro de riscas». Ninguém dispunha de uma explicação para este fenómeno no século XIX. E este era o grande indício experimental relativamente à estrutura dos átomos.

Ernest Rutherford era já um experimentador famoso pela sua descoberta da transformação radioativa dos elementos, em colaboração com Frederick Soddy, quando foi para a Universidade de Manchester. Rutherford e Soddy tinham descoberto que os elementos químicos, que antes se supunha serem imutáveis, eram alterados pelo processo da radioatividade. Soddy sugeriu então para o novo fenómeno o nome de «transmutação radioativa». A transmutação dos elementos, como a do chumbo em Ouro, era um antigo sonho dos alquimistas, já afastado pelos químicos e físicos do século XIX. A sugestão de Soddy provocou a resposta abrupta de Rutherford: «Por Zeus, Soddy, tomar-nos-iam por alquimistas!» E, no entanto, eles tinham de facto descoberto a transmutação dos elementos.

Em Manchester, Rutherford estudava partículas alfa (núcleos de hélio estáveis e carregados positivamente) emitidas por substâncias radioativas, Rutherford, que não tinha paciência necessária para contar durante longas horas as cintilações produzidas num *écran* pelo bombardeamento de partículas alfa, deixou uma experiência de beleza e simplicidade espantosa a cargo de um jovem assistente, Marsden. Uma fonte radioativa de partículas alfa é colocada junto de uma folha metálica (Marsden utilizou uma folha de ouro). As partículas alfa são projéteis, como pequenas balas disparadas em direção à folha. A maioria das partículas alfa atravessam a folha e

são detetadas num *écran*. No entanto, por descargo de consciência, Rutherford pediu a Marsden que verificasse se não havia partículas alfa fortemente desviadas pela folha de ouro. Colocando o *écran* detetor fora da direção segundo a qual a fonte emitia as partículas alfa, Marsden encontrou algumas partículas alfa defletidas. Observou que havia algumas até que eram reenviadas em direção à fonte emissora. Seria um pouco como disparar balas contra uma folha de papel e descobrir que algumas delas batiam no papel e voltavam para trás. Esta descoberta originou uma série de experiências.

O que é que poderia fazer com que as partículas alfa fossem reenviadas para trás? Rutherford sabia que as partículas alfa tinham carga elétrica positiva. Ao atravessarem a folha de Ouro, essas partículas passariam por vezes perto de núcleos atômicos, também de carga positiva. Como cargas do mesmo sinal se repelem, as partículas nessas condições sofreriam grandes deflexões, podendo mesmo ser reenviadas para trás. Estudando cuidadosamente essas deflexões, Rutherford determinou as principais características da estrutura atômica. Era assim aberta uma janela para o mundo microfísico.

A concepção de átomos defendida por muitas pessoas era a de que estes seriam um todo sem partes, sendo verdadeiramente elementares e, portanto, o último elemento de toda a estrutura material — seriam o bloco elementar da constituição da matéria. Apesar de alguns físicos teóricos especularem acerca da possibilidade de os átomos terem estrutura interna, não havia qualquer tipo de apoio experimental para tais especulações. A

simples experiência de Rutherford deu à humanidade a primeira indicação da existência de uma estrutura atômica.

O modelo atômico que Rutherford tornou público em Maio de 1911 indicava que quase toda a massa do átomo estava concentrada numa pequena parte central, de carga elétrica positiva (mais tarde chamada «núcleo»), enquanto os eletrões, de carga negativa e massa extremamente pequena, formavam uma grande nuvem em torno do núcleo, o que explicava o tamanho do átomo. O núcleo maciço era 10 000 vezes mais pequeno do que o átomo. O átomo de Rutherford era como um pequeno sistema solar em que o núcleo era o análogo do Sol, os eletrões, análogo dos planetas e as forças que asseguravam a coesão do sistema eram elétricas, em lugar de gravitacionais.

Apesar de as experiências de Rutherford serem sugestivas, do ponto de vista da física clássica o seu modelo planetário do átomo era completamente instável. De acordo com a física clássica, um eletrão em órbita em torno do núcleo deve irradiar a sua energia sob a forma de ondas eletromagnéticas e cair rapidamente para o núcleo. Os físicos sabiam que, de acordo com as leis da física clássica, o átomo de Rutherford não era estável. Mas naquele momento não existia um modelo melhor. Esta situação estranha depressa viria a sofrer alterações dramáticas. Em 1912, Rutherford dizia ao seu amigo Boltwood, numa carta que lhe escreveu de Manchester: «Bohr, um dinamarquês, saiu de Cambridge e apareceu aqui para ganhar experiência no trabalho com radioatividade.» Niels Bohr, que tinha sido aluno de J. J. Thomson em Cambridge, passou menos de meio ano em Manchester e

regressou então a Copenhaga, no entanto, apesar da sua curta estada, o jovem dinamarquês ficou muito impressionado com a personalidade de Rutherford.

Bohr, sentindo-se desafiado pelo problema da estrutura atómica, deu um passo ousado e imaginativo: prescindiu de alguns dos resultados da física clássica e aplicou a teoria quântica de Planck e Einstein ao problema da estrutura atómica. Naquela altura, as poucas características conhecidas da teoria quântica eram suficientes para resolver o problema — enquanto não nos preocupássemos com o conflito com a física clássica. Bohr supôs simplesmente que os eletrões em órbita em torno do núcleo não irradiam e que a luz emitida pelos átomos é devida a outros fenómenos físicos. Ele mostrou que a quantização da energia, tal como Planck a tinha proposto, levava à conclusão de que apenas determinadas órbitas para os eletrões são permitidas. Para assegurar a estabilidade dos átomos, Bohr postulou uma órbita mínima abaixo da qual o eletrão não poderia estar. Quando o eletrão passa de uma órbita mais elevada para outra mais baixa, perdendo energia, deve emitir luz, que transporta essa energia. Como apenas certas órbitas são permitidas, apenas se podem verificar transições eletrónicas entre essas mesmas órbitas, e assim a energia da luz emitida está quantizada. Como a energia da luz está relacionada com a sua cor, apenas certas cores podem ser emitidas pelos átomos. Desta forma, o modelo atómico de Bohr dá conta das famosas riscas espectrais. O facto experimentalmente observado de cada tipo de átomos emitir o seu padrão característico de riscas coloridas era assim uma prova da estrutura quântica dos átomos.

Uma forma de imaginar os níveis de energia do átomo de Bohr é pensar num instrumento musical de cordas, como uma harpa. Quando pulsamos uma corda, ela emite um som bem definido. Da mesma forma, quando um eletrão transita de órbita eletrónica, é emitida luz de uma cor bem definida. É esta a origem do espectro de riscas.

Bohr aplicou as suas ideias inovadoras ao átomo mais simples de todos, o de hidrogénio, que consiste num só protão e num só eletrão que orbita em torno dele. A vantagem de estudar um átomo de tal modo simples é que as órbitas permitidas para o eletrão podem ser precisamente calculadas e, assim, determinado o espectro de emissão do hidrogénio. Os cálculos de Bohr para o espectro de emissão do hidrogénio com base no seu modelo teórico do átomo concordavam com o espectro observado experimentalmente. Tal acordo entre a teoria e a experiência não podia ser acidental. Significava que o conjunto de ideias que Bohr tinha retirado da teoria quântica funcionavam realmente — a imaginação científica dava os seus primeiros passos em direção à estrutura dos átomos. A antiga capacidade do homem para compreender um novo ambiente, neste caso a estrutura atómica da matéria, era uma vez mais poderosamente reforçada.

Os físicos teóricos absorveram as ideias de Bohr e aplicaram-nas a átomos mais complicados. Mas o modelo de Bohr, como todos os verdadeiros avanços científicos, colocava muitas novas questões que nem sequer podiam ser consideradas antes. Quando é que um eletrão muda de órbita e provoca assim a emissão de luz pelo átomo? Qual a causa das transições de órbita? Em que direção é

emitida a luz e porquê? Estas perguntas perturbavam Einstein. De acordo com a física clássica, as leis do movimento determinam completa e precisamente o comportamento futuro de um sistema como o átomo. Mas o comportamento dos átomos emitindo luz parecia ser espontâneo e indeterminado. Os elétrons transitam de órbita. Mas porquê e em que direção? A mesma espontaneidade, compreendeu Einstein, era característica da radioatividade.

A princípio, os físicos tentaram compreender o comportamento dos átomos no âmbito da teoria clássica do eletromagnetismo e fizeram tentativas desesperadas para resolver o enigma dos saltos quânticos sem fazer apelo aos *quanta* de luz. Em 1924, Niels Bohr, Hendrik Kramers e John Slater escreveram um artigo em defesa desta abordagem, abandonando as leis de conservação do movimento e da energia ao nível atômico — uma proposta revolucionária, porque essas leis estão entre as leis físicas mais bem verificadas. Na altura desta proposta não havia indicações experimentais a favor da validade dessas leis de conservação ao nível atômico ou subatômico. No entanto, elas surgiram rapidamente. Arthur H. Compton e A. W. Simon levaram a cabo experiências de colisão entre fótons individuais, os *quanta* de luz, e elétrons. Utilizando uma câmara de nevoeiro de Wilson, um aparelho que permite seguir as trajetórias de elétrons individuais, eles comprovaram com um elevado grau de precisão a validade dessas leis de conservação para processos atômicos individuais. Para a maioria dos físicos, estas experiências feitas em 1925 apoiaram decisivamente a proposta, feita por Einstein em 1905, do *quantum* de luz.

Através de uma série de novas experiências atômicas, como as de Rutherford e de Compton, a estrutura do átomo ia sendo revelada. Essas experiências mergulharam os físicos teóricos num mundo novo e estranho; as regras habituais da física clássica não pareciam funcionar. O interior do átomo revelava uma nova mensagem à mente humana: uma nova física estava contida na estrutura do mundo atômico. A imagem determinista do mundo, apoiada por séculos de experiências e de teorias físicas, estava prestes a ruir.

Bohr aceitou os resultados das experiências de Compton e Simon, quer a validade das leis de conservação, quer a existência do *quantum* de luz ou fóton. Em Julho de 1925 concluiu: «Temos de estar preparados para o facto de a necessária generalização da teoria eletrodinâmica clássica exigir uma revolução profunda nos conceitos em que tem assentado até hoje a descrição da natureza.» Bohr estava pronto para a revolução. Ela estalou em breve. O primeiro tiro foi disparado de uma pequena ilha no mar do Norte.

¹ Sobre a noção de *spin* ver a nota do tradutor no cap. 11, parte 1. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 4

Heisenberg em Heligolândia

Se Deus fez do mundo um mecanismo perfeito, então concedeu tanto ao nosso intelecto imperfeito que, para prevermos pequenas partes do mundo, não necessitamos de resolver inúmeras equações diferenciais, mas podemos para isso usar com êxito dados.

MAX BORN

Heligolândia é uma pequena ilha no mar do Norte, não muito longe da cidade industrial de Hamburgo, com penhascos íngremes e maresia fresca. Foi aqui que Werner Heisenberg inventou a mecânica matricial — o primeiro passo em direção à nova teoria quântica. Heisenberg pertencia a uma nova geração de físicos que saiu da primeira guerra mundial com uma perspectiva diferente, incluindo uma certa desconfiança relativamente à geração anterior. Ele era um dos muitos estudantes alemães decididos a encontrar algo de valor, algo não corrompido pelo passado recente. O seu pai, um classicista, inspirou-lhe um profundo amor pela literatura e pela filosofia gregas. O jovem Heisenberg, com olhos claros, cabelo curto, calções e um aguçado sentido de competição, era a imagem da juventude alemã do pós-guerra. Apesar da sua admiração profunda pelos clássicos, Heisenberg era atraído pela ciência. Foi estudar para Munique com Arnold Sommerfeld, que o convidou em 1921 a ouvir a conferência de Niels Bohr em Gotinga naquilo que era conhecido como o

«Festival Bohr». Heisenberg tinha a intenção de se tornar um matemático puro; depois de longas discussões com Bohr, ficou fascinado com o problema da teoria atômica e decidiu tornar-se físico teórico. Heisenberg compreendeu que o domínio da matemática abstrata podia ser aplicado aos mais difíceis dos novos problemas físicos — uma ligação entre as ideias puras e o mundo real que o entusiasmava. Refletindo sobre isto, Heisenberg afirmou mais tarde: «Aprendi também algo talvez ainda mais importante: em ciência pode sempre saber-se o que está certo e o que está errado. Não é uma questão de fé, ou de *Weltanschauung*”¹, ou de hipótese; uma dada afirmação pode estar simplesmente certa e outra afirmação errada. Não são a origem ou a raça que decidem esta questão: ela é decidida pela natureza, ou, se se preferir, por Deus, mas nunca pelo homem.» Como Einstein na geração anterior, Werner Heisenberg tinha encontrado o código cósmico, a lógica interna do universo. Através da física, ele poderia conhecer a alma íntima do universo, um conhecimento muito distante dos acontecimentos políticos que recentemente tinham provocado tanto sofrimento humano. Quando terminou o seu doutoramento com Sommerfeld, em 1924, Heisenberg juntou-se a Bohr em Copenhaga para trabalhar sobre a nova teoria atômica.

Bohr tinha sempre sonhado com um lugar como o de Rutherford, em Manchester, que ele tinha visitado, onde os físicos pudessem discutir os seus problemas sem a interferência da relação formal professor-aluno. Em 1920, com o apoio financeiro de várias empresas dinamarquesas (incluindo a fábrica de cerveja Carlsberg), Bohr realizou o seu sonho e fundou um instituto em Copenhaga que se tornou conhecido como Instituto Niels Bohr. Bohr rodeou-se de

brilhantes jovens estudantes da Europa, da América e da União Soviética para estudar os problemas dos átomos. Aqui, Heisenberg encontrou um ambiente intelectual que desafiava o seu poder criativo — uma comunidade de génios que em breve se tornaria uma grande instituição científica. Estes estudantes formavam uma equipa brilhante, arrogante e sem dinheiro. O público em geral estava pouco interessado no seu trabalho, mas esta indiferença não os afetava. Eles tinham a certeza de estar a criar uma revolução científica que viria a transformar a nossa compreensão da realidade.

Após um ano com Bohr, Heisenberg deixou Copenhaga para se tornar assistente de Max Born, director do Instituto de Física da Universidade Alemã de Gotinga. Tal como muitos outros físicos, Heisenberg estava a braços com o problema das linhas espectrais atómicas. Após um acesso de febre dos fenos na Primavera de 1925, Heisenberg decidiu ir para Heligolândia repousar. Aqui teve uma autêntica iluminação e num dia e numa noite inventou uma nova mecânica. O seu artigo foi terminado em Julho de 1925. Como aconteceu com a ideia de Planck de 1900, não existia precedente histórico para a ideia de Heisenberg. Esta foi a primeira pedra de uma verdadeira avalanche teórica que se seguiria.

Heisenberg estava ainda interessado na filosofia grega, especialmente em Platão, que pensava nos átomos concetualmente, e não como objetos compostos. A maioria dos físicos tentava construir modelos físicos para os átomos, mas Heisenberg, como os Gregos, sentia que era necessário prescindir de todos os modelos atómicos, dos eletrões com órbitas em torno do núcleo com raios bem definidos, como sistemas solares em

miniatura. Ele não pensava naquilo que os átomos eram, mas naquilo que eles faziam — nas suas transições energéticas. Através de processos matemáticos, descreveu as transições energéticas por um quadro de números. Aplicando os seus admiráveis recursos matemáticos, descobriu as regras a que obedecem esses quadros de números e aplicou essas regras ao cálculo de processos atômicos. Antes de partir de novo para Copenhaga mostrou o seu trabalho a Max Born.

Born reconheceu nos quadros de números de Heisenberg a matemática das matrizes. Uma matriz é a generalização da ideia simples de número e consiste num quadro retangular ou quadrado de números. As regras algébricas adequadas para a multiplicação e para a divisão de matrizes tinham já sido desenvolvidas pelos matemáticos. Born solicitou a ajuda do seu aluno Pascual Jordan e, em conjunto, desenvolveram alguns pontos importantes. Born e Jordan publicaram um artigo que pode ser considerado uma extensão das ideias de Heisenberg, sublinhando a importância da álgebra matricial na descrição das transições energéticas atômicas. De alguma forma, as matrizes, e não simplesmente os números, eram a linguagem correta para descrever o átomo.

Na física clássica, as variáveis físicas que descrevem o movimento de uma partícula são números simples. Por exemplo, a posição (q) de uma partícula relativamente a um ponto fixo pode ser de 5 m; o seu momento (p = massa da partícula multiplicada pela sua velocidade) pode tomar o valor 3 ($p = 3$). A multiplicação de números simples como 5 e 3 possui a propriedade comutativa: isto é, $3 \times 5 = 5 \times 3 = 15$ — a ordem em que é efetuada a

multiplicação é indiferente. O mesmo se passa com a posição e momento na física clássica; estas variáveis, como são sempre representadas por números simples, possuem também a propriedade comutativa $p \times q = q \times p$.

A grande ideia da nova mecânica matricial é a de que as variáveis físicas como a posição q e o movimento p de uma partícula não são já números simples, mas sim matrizes. As *matrizes* não possuem necessariamente a propriedade comutativa da multiplicação — $p \times q$ não tem de ser igual a $q \times p$. O artigo de Born e Jordan continha uma relação para as matrizes que representavam a posição q e o movimento p que afirmava que a diferença entre $p \times q$ e $q \times p$ era proporcional à constante de Planck, h . Se vivêssemos num mundo contínuo em que h fosse nulo, as matrizes p e q possuiriam a propriedade comutativa, como se fossem números — tal como sucede na física clássica.

Mas, como h era diferente de zero, ainda que extremamente pequeno, a posição q e o movimento p não podiam ser considerados simplesmente como números — tinham de ser representados por matrizes e de verificar as leis não comutativas da nova mecânica matricial, e não verificar as leis comutativas da mecânica clássica. O que poderia isto significar? Os físicos, como grande parte das pessoas, pensam na posição de uma partícula como tendo um valor bem determinado representado por um número. Mas, na nova mecânica matricial, a posição era descrita por uma matriz, e não por um número. O que era então a posição «real» de uma partícula quântica? Neste ponto, e pela primeira vez, colocou-se o espantoso problema da interpretação física do formalismo matemático da nova

mecânica, um problema com o qual se debateriam os físicos quânticos nos anos seguintes.

Heisenberg, que se encontrava em Copenhaga quando tomou conhecimento do trabalho de Born e Jordan, não sabia o que era uma matriz; mas rapidamente aprendeu. Nesse mesmo ano de 1925, Heisenberg visitou o Cavendish Laboratory, em Cambridge, na Inglaterra, e realizou um seminário sobre o seu recente trabalho no gabinete de Peter Kapitza, um experimentador soviético então em Inglaterra. Na assistência estava Paul Dirac, um brilhante físico matemático de 23 anos de idade. Dirac compreendeu imediatamente a essência do trabalho de Heisenberg. Pouco depois de Heisenberg deixar Cambridge, Dirac escreveu um artigo extremamente lúcido que formulava a nova mecânica matricial e mostrava que esta era uma teoria dinâmica completa que podia assim substituir a mecânica clássica.

Entretanto, em Gotinga, Born e Jordan, em colaboração com Heisenberg, que regressara a Copenhaga, chegavam às mesmas conclusões por um caminho ligeiramente diferente. Os dois artigos, o de Dirac e o em coautoria de Born, Jordan e Heisenberg — ambos inspirados pela iluminação de Heisenberg em Heligolândia —, marcaram o início da mecânica quântica matricial.

A nova mecânica matricial era a modificação matemática das leis da mecânica clássica de Newton que os físicos perseguiram: ela fornecia uma descrição matemática do movimento das partículas, tal como a anterior teoria clássica. Mas também a ultrapassava. Os físicos teóricos tinham criado uma nova teoria matemática e agora,

com grande entusiasmo, enfrentavam a pergunta: a nova teoria descreve realmente a natureza, isto é, a mecânica matricial é a teoria atômica correta?

Heisenberg, em Copenhaga, trabalhava a fundo na aplicação dos novos métodos das matrizes ao problema da determinação do espectro do átomo de hidrogénio. Bohr tinha já resolvido este problema, mas seria interessante verificar se o novo método daria o mesmo resultado. Este problema foi solucionado pelo jovem, impetuoso e brilhante físico Wolfgang Pauli. Um colega de Pauli observou uma vez acerca dele que era impossível distinguir a sua grosseria da sua delicadeza. Ele era um crítico impiedoso de todas as ideias; por vezes assinava as suas cartas como «A Fúria de Deus». Quando era estudante em Munique, orientado por Arnold Sommerfeld, Pauli adquiriu reputação científica por um cristalino artigo que escreveu sobre a teoria da relatividade para uma enciclopédia². Certa vez, Einstein deu uma conferência em Munique e, no final desta, Pauli (que tinha na altura 19 anos de idade) levantou-se e disse: «Sabem, aquilo que o Sr. Einstein esteve a dizer não é assim tão estúpido [...] » Mais tarde, quando se encontrava em Copenhaga para trabalhar com Bohr, Pauli tinha longas discussões com ele. Uma vez, no fim de uma discussão acalorada com Bohr, Pauli disse-lhe: «Cale-se! Está a ser um idiota.» «Mas, Pauli...», protestou Bohr. «Não, isso é uma estupidez. Não quero ouvir nem mais uma palavra.» Era um homem deste tipo. Nenhum pensador de segunda classe podia resistir por muito tempo ao contato com Pauli; infelizmente até físicos com ideias corretas podiam ser vencidos por Pauli se ele pensasse que elas estavam erradas.

Pauli rapidamente dominou a matemática das matrizes e resolveu o problema do espectro do hidrogénio, obtendo o mesmo resultado de Bohr. Determinou também o problema do átomo de hidrogénio colocado no seio de um campo elétrico ou magnético, um problema que até aí se havia revelado impenetrável. O poder do novo método da mecânica matricial era evidente.

Os físicos não obtinham uma imagem, um modelo do átomo ou dos processos quânticos a partir da nova mecânica matricial — ela fora inventada justamente para evitar modelos físicos. A atitude de Dirac e de Heisenberg era a de que uma descrição matemática consistente da natureza era o caminho para a verdade na física. A necessidade de visualizar o mundo atômico era uma herança da física clássica e não era apropriada à nova teoria. Muitos físicos sentiram-se insatisfeitos com esta atitude e, enquanto Bohr, Born, Jordan, Heisenberg, Dirac e Pauli trabalhavam na nova mecânica matricial, desenvolvia-se uma teoria atômica alternativa, resultando no aparecimento da mecânica ondulatória.

Einstein, recordêmo-lo, tinha proposto em 1905 que a luz era uma partícula, ideia que contrariava a concepção habitual da luz como uma onda eletromagnética. Em 1909 sugeriu que a futura teoria da luz deveria fundir as teorias ondulatória e corpuscular da luz, mas observou que houvera poucos avanços neste sentido. Parecia que a luz tinha de ser ou uma partícula ou uma onda.

O passo seguinte foi dado por Louis de Broglie, um príncipe francês cujos interesses intelectuais o levaram às fronteiras da física. Ele pensou que, se a luz, que parece tão claramente ser uma

onda, pode por vezes comportar-se como uma partícula — o fóton —, então o elétron, claramente uma partícula, poderia por vezes comportar-se como uma onda. As ideias cruciais foram apresentadas em dois artigos de Setembro de 1923, nos quais de Broglie deduzia o comprimento de onda associado ao elétron. Ele sugeriu que a sua ideia poderia ser experimentalmente confirmada se os elétrons exibissem fenómenos de difração, tal como as ondas reais. A difração de uma onda em torno de um obstáculo, como uma onda do mar atingindo as estacas de um molhe, diz respeito à forma como ela contorna os obstáculos — ao contrário de um feixe de partículas, que projeta sombras bem definidas. O som é uma onda, e isto faz com que seja possível ouvir apesar de as paredes formarem esquinas; o som contorna essas esquinas. Os artigos tornaram-se a tese de doutoramento de, de Broglie e um membro do júri, Paul Langevin, enviou um exemplar a Einstein. Einstein considerou esse trabalho muito importante e fez muito para chamar a atenção dos outros físicos para as ideias de, de Broglie.

Um dos físicos que deram a devida atenção às ondas eletrónicas de, de Broglie foi o austríaco Erwin Schrödinger. Ele refletiu sobre o significado dessa ideia e chegou a uma equação que a forma da onda associada ao elétron teria de satisfazer para descrever o átomo de hidrogénio. Utilizando esta equação, ele deduziu o espectro do átomo de hidrogénio — e, uma vez mais, foi reencontrado o resultado de Bohr. A estranha conceção de que o elétron era uma onda estava assim justificada. O artigo de Schrödinger foi publicado em Janeiro de 1926 e marcou o início da mecânica ondulatória, outro modo de formular a nova mecânica do átomo em termos completamente gerais.

A «equação de Schrödinger» era aplicável a qualquer tipo de problema quântico. Uma série de experiências apoiava a tese de, de Broglie e de Schrödinger segundo a qual os eletrões deviam originar fenómenos de difração — mostrando-se que estavam envolvidas ondas no processo. Mas ondas de quê? A interpretação das ondas de, de Broglie-Schrödinger tornou-se assim o problema fundamental da nova mecânica ondulatória.

O próprio Schrödinger avançou uma das primeiras interpretações: o eletrão não é uma partícula, afirmou ele, é uma onda de matéria, tal como uma onda do mar é uma onda de água. De acordo com esta interpretação, a ideia de partícula é incorreta ou apenas aproximada. Todos os objetos quânticos, e não apenas os eletrões, são pequenas ondas — e tudo na natureza é um grande fenómeno ondulatório.

Esta interpretação, conhecida como «interpretação das ondas de matéria», foi rejeitada pelo grupo de Gotinga, liderado por Max Born. Eles sabiam que se podem contar as partículas uma a uma com um contador de Geiger, ou ver as suas trajetórias numa câmara de nevoeiro de Wilson. A natureza corpuscular do eletrão — o facto de ele se comportar como uma partícula real — não era uma simples convenção. Mas, nesse caso, o que eram as ondas?

Foi Max Born quem respondeu a esta pergunta intrigante e crucial. A sua interpretação marca o nascimento do Deus-que-joga-aos-dados e o fim do determinismo na física. Isto passou-se em Junho de 1926, seis meses após a publicação do artigo de Schrödinger, e desorientou profundamente a comunidade dos

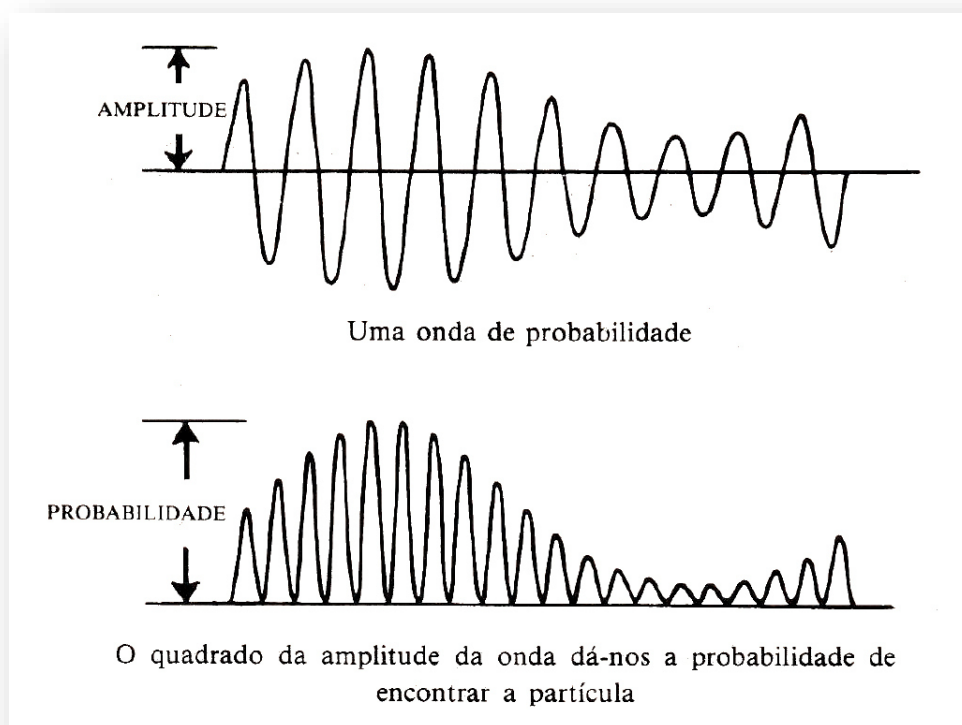
físicos. Born interpretava a função de onda de, de Broglie-Schrödinger como permitindo determinar a probabilidade de encontrar o elétron em qualquer ponto do espaço.

Pense o leitor numa onda que se propaga no espaço. Por vezes a altura da onda está acima do nível médio e outras vezes está abaixo. A altura da onda é chamada «amplitude». O que Born dizia exatamente era que o quadrado da amplitude da onda em qualquer ponto do espaço era proporcional à probabilidade de aí encontrarmos um dado elétron. Por exemplo, em regiões do espaço nas quais a amplitude da onda é grande, a probabilidade de aí encontrarmos um elétron é também grande; talvez numa em cada duas vezes o elétron aí seja encontrado. Analogamente, em regiões onde a amplitude da onda é pequena, a probabilidade de encontrarmos o elétron é pequena — digamos uma vez em cada dez. O elétron é sempre uma partícula real e a sua função de onda de Schrödinger especifica apenas a probabilidade de o encontrarmos em qualquer ponto do espaço. Born compreendeu que as ondas não são *materiais*, ao contrário do que supunha Schrödinger; na realidade, elas são ondas de *probabilidade*, como estatísticas para a descrição de partículas individuais que evoluem no espaço e no tempo. Esta descrição do movimento das partículas quânticas é essencialmente estatística — é impossível seguir as partículas com precisão. O melhor que os físicos podiam fazer era estabelecer o movimento provável da partícula. Born demonstrou a consistência da sua interpretação através de uma análise cuidadosa de várias experiências de colisões atômicas.

Como devemos pensar sobre o mundo atômico dos *quanta*? Os átomos, os fótons e os elétrons existem realmente como partículas, mas as suas propriedades — como a sua posição no espaço, o seu movimento e a sua energia — existem apenas de uma forma contingente. Imaginemos que um átomo individual é um baralho de cartas e que um nível de energia específico desse átomo corresponde a um dado conjunto de cinco cartas do baralho. A probabilidade de, retirando cinco cartas ao acaso, tirarmos justamente esse conjunto pode ser calculada através da análise combinatória. A teoria, no entanto, não prevê, em cada caso particular, quais são as nossas cinco cartas. A exigência de um determinismo deste tipo obrigar-nos-ia a verificar as cartas que sobraram no baralho — ou seja, a fazer batota. De acordo com Born, a função de onda de, de Broglie-Schrödinger prevê a probabilidade de um átomo ter um determinado nível de energia, tal como a análise combinatória prevê a probabilidade de saída de um dado conjunto de cinco cartas. A teoria não diz se, numa certa medição, o átomo estará ou não nesse mesmo nível de energia, tal como a teoria dos jogos não pode prever exatamente quais as cinco cartas do baralho que vão sair numa dada tentativa. A física clássica, ao contrário da nova teoria quântica, afirmava ser capaz de prever o resultado de tais experiências em cada caso concreto. A nova teoria quântica nega que esses acontecimentos individuais possam ser determinados. Como disse Born, é apenas a distribuição estatística dos acontecimentos que é causalmente determinada pela mecânica quântica, e não o resultado de acontecimentos específicos.

Uma característica importante das distribuições de probabilidade na teoria quântica — e que as distingue das distribuições de probabilidade dos conjuntos de cartas — é que as probabilidades quânticas podem propagar-se através do espaço e mudar de ponto para ponto; e isto é a onda de Schrödinger. O poder de predição da teoria quântica reside no facto de ela determinar precisamente a forma da onda e o modo como ela se move — isto é, o modo como a probabilidade evolui no espaço e no tempo.

Aqui vemos pela primeira vez a nova conceção de causalidade da mecânica quântica: é a probabilidade que está causalmente determinada para o futuro, e não os acontecimentos individuais.



De acordo com a interpretação estatística de Max Born para a onda de Broglie-Schrödinger, o quadrado da altura, ou amplitude da onda dá-nos a probabilidade de encontrar a partícula em qualquer ponto. Tudo aquilo que a teoria quântica pode fazer é prever a forma da onda e, portanto, a probabilidade de uma partícula

quântica ter certas propriedades; ela não pode prever com exatidão o resultado de medições particulares dessas propriedades, ao contrário da física clássica.

Born estava entusiasmado com a sua interpretação estatística da teoria ondulatória, mas tinha-a desenvolvido sozinho. Quando Schrödinger tomou conhecimento da interpretação de Born, comentou que poderia não ter publicado o seu artigo se tivesse sabido as consequências — ele nunca aceitou o indeterminismo. Max Planck concordava com as ondas de matéria de Schrödinger e, quando este aceitou a cátedra de Planck em Berlim, por aposentação deste, Planck felicitou-o por ter sido o homem a trazer o determinismo de regresso à física. No final de 1926, Einstein escreveu a Born: «A mecânica quântica está sem dúvida a impor-se. Mas uma voz interior diz-me que ainda não é a verdadeira imagem da realidade. A teoria diz muito, mas não nos traz mais perto do segredo do “Velho”.» Born ficou particularmente desiludido com a rejeição por Einstein da interpretação estatística. Mas Born tinha razão.

Este indeterminismo era o primeiro exemplo da peculiaridade quântica. Ele implicava a existência de acontecimentos físicos que não se poderiam prever ou sequer conhecer. Não só devem os experimentadores humanos desistir de saber quando é que um dado átomo vai emitir radiação ou quando é que um dado núcleo vai sofrer o declínio beta, como esses acontecimentos são desconhecidos mesmo para a mente perfeita de Deus. Os físicos, independentemente das suas crenças, podem invocar Deus quando sentem que estão em jogo questões de princípio, porque o Deus dos físicos é a ordem cósmica. O indeterminismo da teoria quântica é uma questão de princípio; refere-se àquilo que é cognoscível e

àquilo que é incognoscível, e não às possibilidades técnicas — e era isto que angustiava Einstein. Mesmo o próprio Deus pode apenas especificar a probabilidade de certos acontecimentos; nem Ele pode ter a certeza daquilo que se vai passar. Foi por esta altura que Einstein exprimiu a sua oposição à teoria quântica, dizendo que não acreditava que Deus jogasse aos dados. Max Born, que sempre respeitou Einstein como a um mestre, replicou: «Se Deus fez do mundo um mecanismo perfeito, então concedeu tanto ao nosso intelecto imperfeito que, para prevermos pequenas partes do mundo, não necessitamos de resolver inúmeras equações diferenciais, mas podemos para isso usar dados com êxito.» A porta para um universo indeterminado era assim aberta.

Havia, portanto, duas explicações para os fenómenos atómicos: a mecânica matricial de Heisenberg e a mecânica ondulatória de Schrödinger. Como era isto possível? Foi Dirac, seguido de Schrödinger, quem mostrou, por meio da sua teoria das transformações, que as mecânicas matricial e ondulatória eram completamente equivalentes — eram simplesmente representações diferentes dos mesmos conceitos. Os físicos passaram a referir-se-lhes como representação de Heisenberg (matricial) e representação de Schrödinger (ondulatória).

Uma boa forma de entendermos o significado da teoria das transformações de Dirac é pela analogia entre a linguagem e a matemática. Ambas são representações simbólicas do mundo; a linguagem é mais rica, enquanto a matemática é mais rigorosa. Suponhamos que alguém descreve uma árvore em inglês, enquanto outra pessoa a descreve em árabe. As descrições em inglês e em

árabe são representações simbólicas diferentes do mesmo objeto. Para descrever a árvore precisamos de escolher uma linguagem ou representação. Uma vez escolhida esta, podemos chegar a qualquer outra através das regras da tradução ou transformação. A descrição matemática dos objetos quânticos, como o elétron, processa-se de uma forma análoga. Algumas representações fazem sobressair as propriedades ondulatórias, outras as propriedades corpusculares, mas é sempre a mesma entidade que se descreve. A ideia de diferentes representações estarem sujeitas a leis de transformação tem profundas implicações. É variando as representações simbólicas por meio de transformações que chegamos à noção de *invariantes*: essas propriedades intrínsecas e profundas de um objeto que não são dependentes da forma como o descrevemos. Aprendemos quais são as características de uma árvore em qualquer linguagem. Os invariantes estabelecem a verdadeira estrutura de um objeto.

As mecânicas ondulatória e matricial empregam representações diferentes para descrever os mesmos fenômenos. A teoria completa, incluindo a teoria das transformações de Dirac, foi finalmente chamada «mecânica quântica» ou «teoria quântica», uma nova dinâmica matematicamente consistente que substituíra a física clássica. O esforço de quase três décadas tinha dado ao mundo uma nova teoria dinâmica. O formalismo matemático estava intacto e triunfava experimentalmente. Mas o que podia ele significar? Qual podia ser a interpretação da mecânica quântica e o que dizia ela sobre a realidade física? Heisenberg comentou a este propósito: «A ciência contemporânea, hoje mais do que em qualquer outra altura, foi forçada pela própria natureza a considerar

a antiga questão da possibilidade de compreender a realidade por processos mentais e a responder-lhe de maneira diferente.»

¹ Termo alemão comumente utilizado neste contexto, cujo significado literal é «imagem do mundo». (N. do T.)

² Trata-se do justamente famoso artigo de Pauli no *Handbuch der Physik*. (N. do T.)

CAPÍTULO 5

Indeterminação e Complementaridade

É errado pensar que a tarefa da física é descobrir como é a natureza. A física ocupa-se daquilo que podemos dizer sobre a natureza.

NIELS BOHR

O determinismo — a imagem do mundo segundo a qual a natureza e a nossa própria vida estão completamente determinados desde o passado até ao futuro — reflete a necessidade humana de segurança num mundo incerto. O paradigma dessa necessidade é o Deus onisciente que algumas pessoas encontram na Bíblia, um Deus que conhece passado e futuro até aos mais ínfimos pormenores — como um filme que já foi revelado. Podemos não ter visto o filme, mas as imagens que ele contém estão já fixas.

A física clássica apoiava a imagem determinista do mundo. De acordo com ela, as leis da natureza determinam completa e exatamente todo o passado e todo o futuro. O universo era como um relógio perfeito: uma vez conhecida a posição das suas peças num instante qualquer, a sua evolução posterior estaria para sempre determinada.

Os seres humanos poderiam, claro, não ser capazes de conhecer as posições e as velocidades de todas as partículas do universo num dado instante. Mas, fazendo apelo ao conceito medieval da «mente de Deus», podemos supor que esta mente perfeita conhece a configuração de todas as partículas, e assim conhece todo o passado e todo o futuro.

Com a interpretação estatística de Max Born para a função de onda de, de Broglie-Schrödinger, os físicos renunciaram finalmente à imagem determinista da natureza. O mundo deixava de ter o determinismo de um relógio para passar a ter a contingência de uma roleta. Os físicos tomaram consciência de que o conceito de uma mente divina onipotente e onisciente não é apoiada pela natureza. A teoria quântica — a nova teoria que substituía a física clássica — fazia apenas previsões estatísticas. Mas há alguma possibilidade de por detrás da teoria quântica existir uma nova física determinista, descrita por algum tipo de teoria subquântica e que a mente onisciente utilize para determinar o mundo? Segundo a teoria quântica, isso não é possível. Mesmo uma mente onisciente precisa de apoiar o seu conhecimento na experiência, e, mal ela tenta determinar experimentalmente uma grandeza física, o resto dos naipes de cartas da natureza é baralhado ao acaso. O próprio ato de tentar estabelecer o determinismo produz indeterminismo. Não existe acaso como o acaso quântico. Tal como nós, Deus joga aos dados — mesmo ele só conhece as probabilidades.

É este acaso que faz o determinista recuar. A física, tal como foi concebida durante séculos, era capaz de prever exatamente aquilo que pode suceder na natureza. Na teoria quântica, apenas as

probabilidades estão precisamente determinadas e o determinista tem dificuldade em renunciar à esperança de que por detrás da realidade quântica exista uma realidade determinista.

Mas, de facto, a teoria quântica fechou a porta ao determinismo. A presença do acaso na base do mundo material não significa que o conhecimento seja impossível ou que a física tenha falhado. Pelo contrário, a descoberta do universo indeterminado é um triunfo da física moderna e deu-nos uma nova perspetiva da natureza. A nova teoria quântica faz muitas previsões — todas de acordo com a experiência. Mas estas previsões são para a distribuição global dos acontecimentos, e não para acontecimentos individuais — é como prever quantas vezes um conjunto específico de cinco cartas sairá em média. São as distribuições de probabilidade, e não os acontecimentos específicos, que são causalmente determinadas.

Depois da contribuição de Born, outros físicos tentaram aprofundar a compreensão da nova teoria quântica. Qual era o conhecimento da natureza que se podia alcançar no âmbito da nova teoria? Por exemplo, o formalismo matemático da teoria quântica permitia representar o eletrão como uma partícula ou como uma onda. Mas estas representações eram claramente opostas e estavam em conflito com quaisquer ideias do senso comum. O eletrão é afinal uma onda ou uma partícula? Bohr, Heisenberg, Pauli e muitos outros debateram esta questão em Copenhaga por mais de um ano. A frustração generalizada estabeleceu-se, mas o otimismo persistente de Bohr mantinha um espírito de pesquisa. Finalmente, no início de Fevereiro de 1927, Bohr estava exausto e com necessidade de um intervalo nas suas discussões com

Heisenberg, e tirou umas férias que aproveitou para ordenar ideias. Nessa altura, Bohr teve uma iluminação básica quanto aos fundamentos da teoria quântica. Do mesmo modo Heisenberg, que na ausência de Bohr estava ainda mais sujeito à crítica acérrima de Pauli, atingiu uma interpretação da teoria quântica. Bohr e Heisenberg, cada um pela sua via, tinham atingido novos dados, que eram conceitualmente equivalentes para a compreensão da teoria quântica. Heisenberg tinha descoberto o princípio da indeterminação e Bohr o princípio da complementaridade. No seu conjunto, esses dois princípios constituíam a base do que ficou conhecido como a «interpretação de Copenhaga» da mecânica quântica — uma interpretação que para a maioria dos físicos mostrava que a nova teoria quântica estava correta. A interpretação de Copenhaga revelava a magnífica coerência interna da teoria quântica, uma coerência obtida em troca da renúncia ao determinismo e à objetividade do mundo natural.

O ponto forte de Heisenberg era exprimir as suas intuições físicas em termos matemáticos rigorosos. A sua descoberta das relações de indeterminação são um exemplo deste facto. Estas relações saíram do formalismo matemático da teoria e serviram para clarificar profundamente o significado desse mesmo formalismo.

Heisenberg, recordêmo-lo, tinha inventado a mecânica matricial, na qual as propriedades físicas de uma partícula (como a sua energia, o seu movimento, ou a sua posição) eram representadas por objetos matemáticos chamados «matrizes», generalizações da ideia de números simples. Os números simples possuem a propriedade comutativa da multiplicação — o resultado da sua

multiplicação não depende da ordem pela qual é efetuada. Por exemplo, $3 \times 6 = 6 \times 3 = 18$. Mas a multiplicação de matrizes *pode* depender da ordem pela qual é efetuada. Por exemplo, se A e B são matrizes, então $A \times B$ não tem necessariamente de ser igual a $B \times A$.

Heisenberg demonstrou que, se duas matrizes representativas de diferentes propriedades físicas de uma partícula, como a matriz p para a posição e a matriz q para o movimento, têm a propriedade de o seu produto depender da ordem pelo qual é efetuado — ou, no nosso caso, se $p \times q$ for diferente de $q \times p$ ¹ —, então essas propriedades não podem ser medidas simultaneamente com precisão arbitrariamente elevada. Como exemplo, suponhamos que construímos um aparelho para medir simultaneamente a posição e a velocidade de um só eletrão.

O aparelho fornece-nos dois conjuntos de números, um relativo à posição e outro ao movimento. Sempre que se carrega num botão, o aparelho mede simultaneamente a posição e o movimento do eletrão e imprime dois longos números, os resultados das medições. Para qualquer medição individual, digamos a primeira, os dois números podem ser tão longos quanto se queira e, portanto, essa medição tão precisa quanto se deseje. Podemos ser levados a pensar que medimos assim, simultaneamente, a posição e o movimento do eletrão com a precisão que desejarmos. Suponhamos, no entanto, que, para termos uma ideia do erro ou incerteza desta primeira medição, decidimos repetir a medição e carregar de novo no botão. De novo são impressos dois longos números representativos da posição e do movimento do eletrão.

Surpreendentemente, estes números não são exatamente os mesmos que da primeira medição, ainda que talvez os primeiros Algarismos de cada um deles coincidam. Carregando no botão mais vezes, obteremos cada vez mais resultados de medições. Então poderemos calcular a incerteza na posição e movimento do eletrão realizando as médias estatísticas dos dois conjuntos de medidas, de forma a determinar as quantidades Δp — dispersão ou incerteza nas medições da posição em torno do respetivo valor médio — e Δq — quantidade análoga relativamente às medições do movimento. As incertezas Δp e Δq apenas têm significado se tivermos uma série de medições de forma a podermos comparar as diferenças entre medidas individuais. As relações de indeterminação de Heisenberg, asseguram que é impossível construir um aparelho para o qual as incertezas assim calculadas para um grande número de medições deixem de verificar a condição de o seu produto, $\Delta p \times \Delta q$, ser superior ou igual à constante de Planck, h . Esta afirmação exprime-se matematicamente pela relação

$$(\Delta p) \times (\Delta q) \geq h$$

Uma relação de indeterminação semelhante pode ser deduzida para as indeterminações na energia, ΔE , de uma partícula, e no tempo decorrido, Δt :

$$(\Delta E) \times (\Delta t) \geq h$$

Heisenberg deduziu estas fórmulas diretamente a partir da nova teoria quântica.

Para compreender o que estas relações implicam, suponhamos que pretendemos medir a posição de um eletrão com precisão arbitrariamente elevada. Isto quer dizer que a nossa incerteza na posição do eletrão é nula, isto é, $\Delta p = 0$ — conhecemos a sua localização exatamente. Mas as relações de indeterminação de Heisenberg afirmam que o produto de Δp e Δq , as incertezas respetivamente na posição e no movimento, devem ser superiores a uma quantidade fixa, a constante de Planck. Se Δp é zero, isso quer dizer que Δq é infinito, isto é, a incerteza no nosso conhecimento do movimento do eletrão é infinita. Inversamente, se soubéssemos exatamente que o eletrão estava em repouso, de forma que a incerteza no movimento fosse nula, $\Delta q = 0$, então a incerteza na posição, Δp , teria de ser infinita — não teríamos a menor ideia de onde se situaria a partícula. Nas palavras de Heisenberg, as incertezas na posição e no movimento são como «o homem e a mulher na casinha do tempo². Se um deles sai, o outro tem de entrar». Note-se que, se a constante de Planck h fosse igual a zero, em lugar de ser um número extremamente pequeno, poderíamos medir simultaneamente a posição e o movimento de uma partícula, pois nesse caso as relações de indeterminação seriam $(\Delta p) \times (\Delta q) \geq 0$, e então Δp e Δq poderiam ser simultaneamente nulos. Mas, como a constante de Planck é diferente de zero, isto não é possível.

Sempre pensei que as sementes de um tomate ilustram bem as relações de Heisenberg. Se o leitor olhar para uma semente de tomate no seu prato, pode pensar que determinou inequivocamente a sua posição e o facto de ela estar em repouso. Mas se tentar medir a posição da semente pressionando-a com o dedo ou com uma

colher, ela acabará por escorregar e fugir-lhe. A partir do momento em que tenta medir a sua posição, ela começa a mover-se. É um escorregar semelhante para as propriedades das partículas quânticas que é expresso pelas relações de indeterminação de Heisenberg.

Um aviso importante deve ser feito em relação às relações de indeterminação de Heisenberg: elas não se aplicam a uma única medida relativa a uma única partícula, apesar de muitas vezes as pessoas pensarem que sim. As relações de Heisenberg são afirmações sobre médias estatísticas tomadas sobre um conjunto de medidas da posição e do movimento. Como vimos, as incertezas Δp e Δq têm apenas sentido se repetirmos as medições. Algumas pessoas imaginam que os objetos quânticos como o eletrão são difusos porque não podemos medir os seus posição e movimento simultaneamente, mas essa maneira de pensar não é precisa.

Para ter uma ideia daquilo que as relações de Heisenberg implicam para vários objetos, podemos comparar o produto das dimensões de um objeto e do seu movimento médio com a constante de Planck h — uma medida da importância dos efeitos quânticos nesse objeto. Para uma bola de ténis, as incertezas devidas à teoria quântica são apenas uma parte em 10 milhões de biliões de biliões (10^{-34}). Assim, uma bola de ténis obedece às leis deterministas da física clássica num elevado grau de precisão. Mesmo para uma bactéria, os efeitos são apenas da ordem de uma parte num bilião (10^{-9}), e assim ela é insensível também aos efeitos quânticos. Os átomos de uma rede cristalina estão mais próximos do mundo quântico e as incertezas são de uma parte em cem (10^{-2}).

²). Finalmente, para elétrons que se movem num átomo, as incertezas quânticas são muito grandes e este é já um mundo dominado pela incerteza e em que a física a aplicar é a mecânica quântica.

Uma vez tentei imaginar o que veria se tivesse o tamanho de um átomo. Tentaria estar próximo do núcleo atômico e ver realmente o que era e como se comportava um elétron. Mas, quando compreendi o significado da interpretação de Copenhaga devida a Bohr e Heisenberg, rapidamente me apercebi de que a teoria quântica, com a sua ênfase no super-realismo, nega explicitamente uma fantasia desse tipo. Tinha tentado formar uma imagem mental do átomo com base no mundo da minha experiência visual habitual, que obedece às leis da física clássica, e aplicá-la justamente onde a física quântica mostrou que tal imagem não pode ser mantida. Bohr insistiria em que, se quiséssemos prosseguir com a nossa fantasia, teríamos de especificar precisamente como poderíamos observar diretamente um átomo. Suponhamos que, em lugar de ter eu próprio o tamanho de um átomo, construo uma minúscula sonda que penetrará no átomo e me comunicará as suas observações. Mas essa sonda deve também ser feita de átomos e de partículas, de modo que ela própria fica sujeita às relações de indeterminação e, portanto, nós não podemos sequer localizá-la. Não temos saída. O máximo que podemos fazer é realizar experiências em átomos e partículas quânticas que tenham como resultado medidas registadas em instrumentos macroscópicos. A teoria quântica descreve todas as possíveis medidas desse tipo; nós não podemos fazer melhor. A fantasia da pessoa do tamanho de um átomo é justamente isso — uma fantasia.

As relações de indeterminação de Heisenberg ligavam-se muito bem à descoberta do indeterminismo na física quântica por Born, aprofundando assim a compreensão da consistência interna da teoria quântica. Os físicos tinham descoberto que as relações de indeterminação implicavam o indeterminismo. Podemos ver isto facilmente se imaginarmos um problema vulgar de balística. Suponhamos que disparamos uma arma (no espaço exterior, de forma a podermos desprezar a resistência do ar) e que conhecemos a posição e o movimento da bala à saída da arma. Utilizando as leis da física clássica e o conhecimento dos movimento e posição iniciais, podemos determinar completamente a sua trajetória futura; tudo está predeterminado. Se considerarmos o mesmo problema do ponto de vista da teoria quântica, chegamos a uma conclusão, diferente. As relações de indeterminação de Heisenberg implicam que não podemos conhecer simultaneamente a posição e o momento da bala quando ela sai da arma. Portanto, tal como essas medições iniciais são incertas, também a trajetória futura da bala está indeterminada. Tudo o que podemos fazer é dar uma descrição estatística ou probabilística da trajetória futura da bala³. Para balas reais, como para as bolas de ténis, estes efeitos quânticos são desprezáveis. Mas para eletrões estamos limitados a ter uma descrição probabilística do seu movimento futuro. É por isso que as relações de indeterminação de Heisenberg implicam o indeterminismo de Born.

Enquanto Heisenberg trabalhava sobre as relações de indeterminação, Bohr desenvolvia, num estilo muito diferente, a sua própria interpretação da teoria quântica. A abordagem de Heisenberg era a de utilizar a matemática para extrair o significado

da nova teoria, enquanto Bohr refletia filosoficamente sobre a natureza da realidade quântica. A abordagem de cada um deles complementava e enriquecia a do outro, e juntos formaram a base da interpretação de Copenhaga.

Bohr interrogava-se sobre a possibilidade de se falar sequer sobre o mundo atômico, uma vez que ele está tão afastado da nossa experiência. Ele debatia-se com o seguinte problema: como podemos utilizar a linguagem normal, desenvolvida para lidar com os objetos e acontecimentos da vida corrente, para descrever os átomos? Talvez a lógica inerente à nossa gramática não fosse adequada para isso. Assim, Bohr concentrou-se no problema da linguagem na sua interpretação da mecânica quântica. Como ele observou: «É errado pensar que a tarefa da física é descobrir o que a natureza é. A física ocupa-se daquilo que podemos dizer sobre a natureza.»

Bohr sublinhou que, quando estamos a fazer uma pergunta sobre a natureza, devemos sempre especificar o aparelho experimental que utilizaremos para determinar a resposta. Por exemplo, suponhamos que fazemos a pergunta: «Qual é a posição do elétron e qual é o seu movimento?» Em física clássica não é necessário levar em conta que respondendo à pergunta — realizando a experiência — se altera o estado do objeto. Podemos sempre pensar conseguir que seja desprezável a interação entre o aparelho de medida e o objeto em questão. Para objetos quânticos, como elétrons, isso já não é verdade. O próprio ato de observar altera o estado do objeto observado.

O facto de a observação poder alterar aquilo que está a ser observado pode ser verificado em vários exemplos retirados da vida comum. O antropólogo que estuda uma pequena aldeia isolada do mundo moderno alterará, pela sua mera presença, a vida na aldeia. O objeto do seu conhecimento é alterado em consequência da observação. O facto de as pessoas saberem que estão a ser observadas pode alterar o seu comportamento.

A natureza parece adaptar-se ao experimentador quântico. Se este decide medir a posição de um eletrão com precisão arbitrariamente grande e constrói um aparelho de medida para o fazer, nenhuma lei da mecânica quântica impede a obtenção de uma resposta precisa (por «posição» refiro-me sempre a uma média estatística de um grande número de medições de posição). O nosso experimentador concluiria que o eletrão é uma partícula, um objeto que ocupa uma posição espacial muito bem definida. Por outro lado, se decidir medir o comprimento de onda do eletrão e construir outro aparelho para o fazer, obterá também uma resposta bem determinada. Realizando esta experiência, ele concluiria que o eletrão é uma onda, e não uma partícula. Nenhuma contradição existe no entanto entre os conceitos de partícula e de onda, porque, como Bohr nos ensinou, o resultado das experiências depende do dispositivo experimental, e são necessários dispositivos experimentais diferentes para medir a posição e o comprimento de onda do eletrão.

Mas o nosso experimentador é persistente. Está saturado destas absurdas dualidades partícula-onda e posição-movimento e propõe-se decidir a questão de uma vez por todas, construindo um aparelho

que meça simultaneamente a posição e o movimento do eletrão. A natureza torna-se agora mais inflexível, porque o experimentador choca com o muro de granito das relações de indeterminação. Nenhuma técnica experimental parece servir, pois é uma questão de princípio que ele põe em jogo. Por que não pode ele medir o movimento e a posição simultaneamente? O que o impede? Born descreve a situação da seguinte maneira: «Para medir coordenadas espaciais e intervalos de tempo são necessários réguas rígidas e relógios. Para medir movimentos e energias são necessários dispositivos com partes móveis para absorver e medir o impacto do objeto. Se a mecânica quântica descreve a interação do objeto medido com o aparelho de medida, os dois dispositivos não são simultaneamente possíveis.» Born descreve, portanto, a estranha característica das leis da mecânica quântica que fazem que não seja possível a conceção de um aparelho que meça posição e movimento simultaneamente — os dispositivos experimentais necessários a estas duas medições excluem-se mutuamente. Tentar medir simultaneamente a posição e o movimento de uma forma exata é como tentar olhar simultaneamente para o espaço à nossa frente e atrás de nós sem utilizar um espelho. Mal nos viramos para olhar para trás, há uma nova região que deixamos de poder observar. Não somos capazes de ver simultaneamente o espaço à nossa frente e atrás de nós.

Partícula e onda são conceitos a que Bohr chamou complementares, o que quer dizer que se excluem um ao outro. Na analogia entre a matemática e a linguagem que utilizámos mais atrás, estes conceitos complementares são representações diferentes do mesmo objeto. Os físicos falam da representação

corpuscular e da representação ondulatória. O princípio da complementaridade de Bohr assegura que um objeto do conhecimento possui propriedades complementares: o conhecimento de uma delas exclui o conhecimento da outra. Podemos assim descrever um objeto como o elétron de formas mutuamente exclusivas — por exemplo, como partícula e como onda —, sem contradição lógica desde que tenhamos em consideração que os dispositivos experimentais que determinam essas descrições são também mutuamente exclusivos. Qual das experiências — e, conseqüentemente, qual das descrições — escolher é puramente uma questão de opção humana.

Bohr era um filósofo e gostava de prolongar o seu princípio de complementaridade a problemas fora do âmbito da física atômica. Por exemplo, o «dever perante a sociedade» e a «devoção à família» tal como surgem retratadas na *Antígona*, de Sófocles, eram conceitos complementares e mutuamente exclusivos num contexto moral. Como boa cidadã, Antígona deveria considerar seu irmão, morto numa tentativa de revolta contra o rei, como traidor. O seu dever perante o rei e a sociedade era repudiar seu irmão. No entanto, a devoção à família exige-lhe que enterre o seu corpo e venere a sua memória. Mais tarde, Bohr supôs que o princípio da complementaridade era aplicável ao problema da determinação da estrutura material dos organismos vivos. Nós poderíamos apenas determinar a estrutura molecular de um organismo vivo matando-o e, portanto, conheceríamos apenas a estrutura de um objeto inanimado; alternativamente, poderíamos conservar a vida do organismo em questão, mas sacrificando o conhecimento da sua estrutura. O ato experimental de determinar a estrutura mata o

organismo. Esta outra ideia, é evidente, está inteiramente errada, como mostraram os biólogos ao estabelecerem a base molecular da vida. Cito este exemplo só para mostrar que, mesmo que o leitor seja tão inteligente como Bohr, a extensão dos princípios da ciência para lá do seu campo habitual de aplicação pode levá-lo a conclusões falsas.

Atingimos assim os dois pontos críticos da realidade quântica que emergem dos trabalhos de Heisenberg e Bohr — a interpretação de Copenhaga. O primeiro deles é que a realidade quântica é estatística, e não exata. Mesmo depois de o dispositivo experimental para medir uma propriedade quântica ter sido especificado, pode ser necessário repetir a medição muitas vezes porque medidas individuais precisas não têm significado. O mundo microfísico é-nos dado apenas como uma distribuição estatística de medidas, e são estas distribuições que podem ser determinadas pela física. A tentativa de formar uma imagem mental da posição e do movimento de um só eletrão e respeitante a um único conjunto de medidas resulta num eletrão «difuso». Esta é uma idealização humana com vista a adaptar o mundo quântico às limitações do nosso conhecimento formado a partir de objetos e fenómenos habituais. As pessoas que idealizam tais imagens, ou que tentam encontrar um significado objetivo em acontecimentos individuais, não passam na verdade de deterministas que se recusam a encarar os factos.

O segundo grande ponto a destacar é que não faz sentido falar sobre as propriedades físicas de um objeto quântico sem especificar exatamente qual é o dispositivo experimental através do qual se

pretende observá-lo. A realidade quântica é em parte uma realidade criada pelo observador. Como diz o físico John Wheeler, «Nenhum fenómeno é fenómeno até ser um fenómeno *observado*». Esta orientação é radicalmente diferente à da física clássica. Nas palavras de Max Born, «A geração à qual Einstein, Bohr e eu próprio pertencíamos tinha aprendido a considerar que existe um mundo físico objetivo, que se manifesta de acordo com leis imutáveis independentes de nós; nós observamos este processo como a assistência observa uma peça de teatro.

Einstein acredita ainda ser esta a relação entre o observador científico e o seu objeto de estudo. Mas, com o advento da teoria quântica, concluiu-se que a intencionalidade humana influencia a estrutura do mundo físico.

Em resumo, a interpretação da teoria quântica pela escola de Copenhaga rejeita o determinismo, aceitando, em vez dele, a natureza estatística da realidade, e rejeita também a objetividade, aceitando em vez dela que a realidade material depende em parte da forma como decidimos observá-la. Após centenas de anos, a imagem do mundo da física clássica ruía. Aqui, no interior da própria substância do universo — o átomo —, os físicos aprendiam uma nova lição sobre a realidade.

Durante 1927, através de muitas discussões com Heisenberg e com Pauli, Bohr trabalhou num artigo em que expunha as suas ideias sobre a complementaridade. Iria proceder à sua apresentação pública em Como, num congresso de homenagem ao físico italiano Alessandro Volta, e em seguida na quinta conferência

de Solvay, em Bruxelas, onde iriam estar presentes muitos dos grandes físicos da época, incluindo Einstein. Einstein e Bohr tinham-se conhecido em 1920, quando já ambos eram físicos de renome internacional. Estabeleceu-se entre os dois mais do que uma simples relação de amizade profissional; eles criaram laços de profundo respeito e amor um pelo outro. Bohr tinha grandes esperanças de que o princípio da complementaridade convencesse Einstein de que a teoria quântica era correta. Quando Bohr apresentou a interpretação da mecânica quântica segundo a escola de Copenhaga na conferência de Solvay, a grande maioria dos físicos presentes aceitou-a pelo grande avanço que representava na compreensão dos fenómenos naturais. Einstein não era um deles. Não aceitava as novas ideias de Bohr e de Heisenberg e imaginava experiências conceptuais que mostrassem alguma falha na interpretação de Copenhaga. Sempre que Einstein pensava ter descoberto uma falha, Bohr encontrava um erro no seu raciocínio. No entanto, Einstein persistia. Finalmente, Paul Ehrenfest disse-lhe: «Einstein, você devia ter vergonha! Está a falar como os críticos falam das suas teorias da relatividade. Várias vezes os seus argumentos foram refutados; mas, em lugar de aplicar a sua própria regra segundo a qual a física deve ser construída a partir de relações mensuráveis, e não de noções preconcebidas, você continua a idealizar argumentos baseados nesses mesmos preconceitos.» Quando o congresso terminou, Einstein não estava convencido, e isto foi uma profunda desilusão para Bohr.

Três anos mais tarde, na conferência de Solvay seguinte, Einstein propôs uma nova experiência concetual — a do «relógio dentro da caixa». Einstein supôs que tinha um relógio dentro de

uma caixa à prova de luz, ajustado de maneira a abrir e fechar muito rapidamente um orifício na caixa. No interior da caixa estava também um gás de fótons. Quando o orifício se abrisse, um só fóton sairia da caixa. Pesando a caixa antes e depois da abertura do orifício, seria possível determinar a massa e, portanto, a energia do fóton que tinha saído da caixa. Deste modo, era possível determinar simultaneamente, e com precisão arbitrária, a energia e o instante de saída do fóton. Este facto violava a relação de indeterminação de Heisenberg energia-tempo $(\Delta E) \times (\Delta t) \geq h$, e, portanto, concluía Einstein, a teoria quântica deve estar errada.

Bohr passou uma noite em claro pensando sobre o problema. Se o raciocínio de Einstein estava correto, a mecânica quântica tinha falhado. Na manhã seguinte, ele descobriu a falha no raciocínio de Einstein. O fóton, ao sair da caixa, transmite-lhe um movimento desconhecido e faz, portanto, com que ela se mova no seio do campo gravitacional que está a ser utilizado para a pesar. No entanto, de acordo com a teoria da relatividade generalizada do próprio Einstein, o ritmo de um relógio depende da sua posição no campo gravitacional. Como existe uma incerteza na posição da caixa, causada pelo pequeno impulso que sofre devido à saída do fóton, o ritmo de contagem do tempo é também incerto. Bohr mostrou que a experiência concetual imaginada por Einstein não violava a relação de indeterminação energia-tempo, mas, pelo contrário, a confirmava.

Depois disto, Einstein não voltou a contestar a coerência interna da teoria quântica; continuou, no entanto, a não aceitar que ela desse uma descrição completa e objetiva da natureza. Esta objeção,

porém, era uma questão filosófica, e não de física teórica. A discussão entre Bohr e Einstein prosseguiu ao longo das suas vidas, mas nunca atingiu uma conclusão. Nem podia ter atingido. Uma vez estabelecido o princípio comum segundo o qual a realidade é instrumentalmente determinada, a discussão centrou-se na diferença de posições em relação à natureza da realidade e deixou de ter possibilidades de resolução. Cativados por uma enorme estima mútua, os dois gigantes — o último dos físicos clássicos e o líder dos físicos quânticos — discutiram até ao fim dos seus dias.

Pelo final da década de 1920, a interpretação da moderna teoria quântica estava intacta. Uma geração de jovens físicos cresceu com ela, mas estes estavam menos interessados nos problemas de interpretação do que nas suas aplicações. A nova teoria acentuava como nunca o papel essencial da matemática na física teórica. Apareceram em cena indivíduos com grande poder técnico em matemática abstrata e com o dom de a saber aplicar a problemas físicos.

A teoria quântica tornou-se o mais poderoso instrumento matemático para a explicação dos fenómenos naturais jamais na posse do homem — um acontecimento incomparável na história da ciência. A teoria fazia libertar a energia intelectual de milhares de jovens cientistas das nações industrializadas do mundo. Nenhum conjunto de ideias teve alguma vez um tão grande impacto na tecnologia e as suas implicações práticas continuarão a moldar o destino social e político da nossa civilização. Estabelecemos contato com novas componentes do código cósmico — as leis imutáveis do universo — que agora programam o nosso desenvolvimento.

Instrumentos práticos, como o transístor, o *microchip*, os *lasers*, a tecnologia criogénica, deram origem a indústrias completamente novas na vanguarda da civilização técnica. Quando a história deste século for escrita, veremos que os acontecimentos políticos — apesar dos seus imensos custos em vidas humanas e dinheiro — não terão sido os acontecimentos mais influentes. O principal evento terá sido o primeiro contato humano com o mundo invisível do *quantum* e as subsequentes revoluções biológica e dos computadores.

Com a moderna teoria quântica, a base para a tabela periódica dos elementos, a natureza da ligação química e a química molecular foram compreendidas. Estes novos desenvolvimentos teóricos, apoiados por investigação experimental, deram origem à moderna química quântica. Dirac escreveu num artigo de 1929 sobre a mecânica quântica: «As leis físicas de base necessárias para uma teoria matemática de uma grande parte da física e de toda a química estão assim completamente conhecidas [...]»

A primeira geração de biólogos moleculares foi inspirada pelo livro de Erwin Schrödinger *O Que É a Vida?*, no qual ele insistia no facto de a estabilidade genética dos organismos vivos dever ter uma base material, molecular. Estes investigadores, muitos dos quais físicos de formação, desenvolveram uma nova atitude dentro da genética e introduziram os métodos experimentais da física molecular, então estranhos à maioria dos biólogos. Esta nova atitude para com o problema da vida culminou com a descoberta da estrutura molecular do ADN e do ARN, as bases físicas para a reprodução orgânica. Não foi por acaso que esta descoberta, que,

por si só, despoletou outra revolução, foi feita num laboratório de física molecular.

Foi desenvolvida a teoria quântica dos sólidos. A teoria da condutibilidade elétrica, a teoria das bandas e a teoria dos materiais magnéticos foram todas desenvolvimentos da mecânica quântica. Na década de 1950 houve grandes descobertas nos domínios da supercondutividade, fenómeno de fluxo de corrente elétrica sem resistência, verificado a muito baixas temperaturas; e da superfluidez, o escoamento de líquidos sem fricção, igualmente a temperaturas muito baixas. Foi ainda desenvolvida a teoria das transições de fase da matéria (por exemplo, transição de um líquido para sólido ou gás).

A teoria quântica fornecia o instrumento teórico para a exploração do núcleo atómico, e nasceu a física nuclear. A razão para a enorme libertação de energia nos decaimentos radioativos foi finalmente compreendida: os decaimentos radioativos eram processos não clássicos que implicavam fenómenos quânticos. Os físicos souberam finalmente qual era a fonte de energia das estrelas e a astrofísica tornou-se uma ciência moderna.

Surpreendentemente, o público instruído não se deu conta desses desenvolvimentos. A teoria quântica nunca atraiu a atenção do público como atraiu a teoria da relatividade. Há várias razões para isto. Em primeiro lugar, o princípio da década de 1930 coincidiu com o período da grande depressão económica. Em segundo lugar, a atenção de muitos intelectuais era desviada para as ideologias políticas. Em terceiro lugar, e penso que talvez seja a razão mais

importante, o carácter matemático e abstrato da teoria quântica não se relacionava diretamente com a experiência humana.

A teoria quântica é uma teoria de uma realidade material detetada instrumentalmente — existe um aparelho de medida entre o observador humano e o átomo. Heisenberg comentou: «O progresso científico foi adquirido à custa da possibilidade de tornar os fenómenos naturais imediata ou diretamente compreensíveis à nossa maneira de pensar». E ainda: «A ciência sacrifica cada vez mais à possibilidade de fazer "viver" os fenómenos de uma forma imediatamente perceptível aos nossos sentidos e limita-se a colocar à nossa frente o núcleo matemático e formal do processo.»

Heisenberg estava interessado no contraste entre Goethe, o poeta e escritor romântico alemão, e Newton no respeitante à teoria das cores. Goethe interessava-se pelas cores enquanto experiência humana imediata e Newton enquanto fenómeno físico abstrato. Numa base experimental e material, temos de concordar com as conclusões de Newton. Mas a perspetiva de Goethe — e ele foi um dos originadores do vitalismo — está relacionada com a experiência humana imediata. Os vitalistas acreditam que existe uma «força vital» especial nos organismos vivos não sujeita às leis físicas. Apesar do apelo direto desta conceção à nossa experiência sensível, não existe base material para ela. A vida depende apenas do grau de organização da matéria normal. Os vitalistas defensores da conceção da força vital são hoje em dia raros, mas foram substituídos pelos que acreditam que a consciência humana possui alguma propriedade especial que ultrapassa as leis da física. Estes neovitalistas que procuram as raízes da consciência para lá da

realidade material, podem estar prestes a sofrer outra grande desilusão.

A atitude de Goethe inseria-se numa reação romântica à mecânica clássica e à ciência moderna — uma reação que encontra os seus ecos ainda hoje. Este confronto entre Goethe e Newton é bem a imagem de uma moderna crítica humanista à ciência, segundo a qual as explicações abstratas da ciência negam o centro vital da experiência humana. A teoria quântica e as ciências que dela emergiram fornecem ótimos exemplos dessas explicações abstratas.

A ciência não nega a realidade da nossa experiência imediata do mundo; pelo contrário, ela começa justamente aí. Mas não se limita a isso, porque a base para a compreensão da nossa experiência sensorial é algo que lhe é exterior. A ciência mostra-nos que, em apoio do mundo da nossa experiência sensorial, existe uma ordem concetual, um código cósmico que pode ser descoberto pela experiência e conhecido pelo espírito humano. A unidade da nossa experiência, tal como a unidade da ciência, é concetual, e não sensorial. É esta a grande diferença entre Newton e Goethe — Newton procurava conceitos universais sob a forma de leis físicas, enquanto Goethe procurava a unidade da natureza na experiência imediata.

A ciência é uma resposta às exigências que a nossa experiência nos coloca, e aquilo que em troca ela nos proporciona é uma nova experiência humana — ver com a nossa mente a lógica interna do cosmo. A descoberta do universo indeterminado pelos físicos

quânticos é um exemplo. A queda do determinismo não significou o fim da física, mas sim o estabelecimento de uma nova visão da realidade. Aqui, no interior da matéria, os físicos encontraram o acaso.

Mas o que é o acaso? Para analisar esta questão vamos desviar-nos um pouco do caminho principal para a realidade quântica nos próximos capítulos. No nosso desvio exploraremos o universo caótico e teremos uma primeira oportunidade de observar a mão de Deus-que-joga-aos-dados.

¹ Note-se de passagem que, ao contrário do que poderia sugerir o texto, $p \times q$ é sempre diferente de $q \times p$ e que, além disso, a sua diferença é fixa e proporcional à constante de Planck h , como já foi referido no cap. 4. (*N. do T.*)

² Pequeno higroscópio na forma de uma casa. Contém uma placa giratória sobre a qual estão um homem de guarda-chuva aberto e uma mulher com roupas de Verão. Quando o tempo está húmido, a disposição da placa é tal que o homem está no exterior da casa e a mulher no interior. Quando o tempo está seco, a placa gira e a mulher fica no exterior da casa e o homem no interior. O essencial nesta imagem é que eles nunca podem estar ambos fora ou ambos dentro da casa. (*N. do T.*)

³ A situação é na verdade ainda mais radical: como, por um lado, em qualquer instante é impossível falar de uma posição e de um movimento bem definidos e, por outro, a definição de trajetória é equivalente ao conhecimento exato e em qualquer instante da posição e do movimento, conclui-se que é o próprio conceito de trajetória que não tem lugar na mecânica quântica. Não se trata assim de existir uma trajetória que está indeterminada, mas sim de esta não existir. A mecânica quântica não descreve o movimento das partículas; apenas prevê resultados de medição. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 6

O Aleatório

É surpreendente que uma ciência que começou com a consideração de jogos de azar se tenha tornado no mais importante objeto do conhecimento humano.

MARQUÊS DE LAPLACE

Há alguns anos passeava eu pela antiga cidade de Jerusalém com um conhecido, um arqueólogo. Jerusalém é simplesmente o lar para muitas pessoas, mas para muitos visitantes é um lugar sagrado e poderoso. O racionalismo de pouco conta ali; os símbolos de fé são o verdadeiro valor dessa cidade.

Na época medieval, os crentes pensavam em Jerusalém como o centro do universo, o umbigo do mundo, onde se juntavam os céus e a Terra. Aqui, no centro do mundo, Deus tinha falado aos seus profetas e aos povos do Livro. Os Judeus vinham em peregrinação ao muro do seu grande templo, perto do Santo dos Santos.

Os cristãos seguiam os passos do Senhor na Sua Paixão final e os Muçulmanos vinham adorar o terceiro lugar mais sagrado do Islão, a cúpula da Rocha¹, onde o profeta Maomet recebera o Corão. Deus pode ser onnipresente, mas a Sua voz está em Jerusalém.

O arqueólogo que estava comigo observou que havia um antigo centro da cidade caracterizado pelo cruzamento de duas estradas romanas, que dividia a cidade e a Terra em quatro quadrantes — o fulcro da geografia medieval. As estradas tinham há muito desaparecido, mas em cada canto do cruzamento subsistia uma coluna romana. Enquanto passeávamos pelo centro do universo antigo, o meu amigo explicou-me que as colunas estavam agora no interior de um edifício moderno. Ao entrar no edifício, vi imediatamente as quatro colunas. E ali, por entre as colunas e em torno delas, estavam várias máquinas de *flippers*. Ali, no centro do universo antigo, estava agora instalado o único salão de máquinas de *flippers* de Jerusalém. Fiquei abismado. De acordo com a Bíblia, o Senhor fala apenas àqueles que estão preparados para O ouvir. A profecia tinha sido cumprida — eu tinha visto uma revelação do Deus-que-joga-aos-dados.

Muitas vezes sucede que tecnologias extremamente importantes penetram na nossa civilização de um modo inocente e modesto. Alguns aparelhos, que mais tarde se tornam importantes forças materiais, aparecem primeiro como brinquedos. A pólvora foi utilizada a princípio apenas nos fogos de artifício. O uso da potência motriz do vapor na Alexandria helénica, cerca de 100 d. C., fornece outro bom exemplo. Os Gregos viram no engenho de vapor de Héron apenas um brinquedo, uma novidade, mas, séculos depois, a máquina de vapor viria a estar na base das primeiras civilizações industriais. Os Gregos de Alexandria não estavam ainda preparados para essa ideia.

Creio que as máquinas de *flippers* são exemplos modernos desses aparelhos de divertimento — eles virão, mais cedo ou mais tarde, a ultrapassar-nos. Os deterministas pensam no mundo como um enorme mecanismo de relógio; eu penso nele como uma máquina de *flippers*. Jogar numa máquina de flippers exige concentração total, a combinação certa de perícia e sorte e um domínio da indeterminação enquanto a bola se move pela mesa de jogo e choca com os obstáculos e com os *flippers*. A máquina regista o resultado e nós podemos fazer um pouco de batota abanando a máquina — mas não demasiado para não fazer parar o jogo. Esta máquina imita o acaso da vida, recompensa o talento e cria uma realidade que se integra no sistema nervoso humano de uma forma notável. Talvez, no futuro, essas máquinas venham a ser combinadas com formas de arte, como filmes, e uma realidade completamente artificial seja criada. Nós fazemos parte do universo-máquina-de-flippers.

Não é acidental que as máquinas de *flippers* — o símbolo do universo indeterminado — estejam no centro do mundo. A teoria quântica afirma que para conhecer o mundo temos de o observar e no ato de observação introduzimos no mundo processos aleatórios e incontrolláveis. De igual modo, o princípio de complementaridade de Bohr implica que o conhecimento simultâneo de tudo sobre o mundo — uma das condições para o determinismo — é impossível, uma vez que as condições para conhecer certas coisas excluem necessariamente o conhecimento de outras. A teoria quântica exige-nos que renunciemos ao sonho determinista segundo o qual tudo pode ser conhecido. Para apreciar mais profundamente o universo indeterminado revelado pela teoria quântica,

mergulhemos no mundo do caos — um mundo explorado, em primeiro lugar, pelos matemáticos.

A mente humana repudia o caos, tendendo a descobrir a ordem mesmo onde ela não existe. Os antigos viam nos padrões aleatórios das estrelas e constelações representações de figuras míticas e nas formas das nuvens representações de figuras humanas ou animais. As folhas de chá, nalgumas culturas, predizem o futuro.

Alguns adivinhos encontram nas entranhas dos animais o futuro dos homens e os sacerdotes consultam os seus deuses lançando ossos². O acaso natural combinado com a disposição humana para ver padrões em tudo prepara o caminho para a hierofania — a aparência do sagrado. Algumas pessoas ouvem a voz de Deus no vento que passa, numa floresta que arde, ou num rio que corre.

Desde tempos imemoriais, o homem foi fascinado pelo acaso, manifestado, por exemplo, nos jogos de cartas ou de dados. Com o iluminismo apareceu a noção de que o acaso estava sujeito a uma ciência matemática — e Laplace e outros matemáticos descobriram as leis dos jogos de azar. À primeira vista não parece claro que haja leis que governem ocorrências aleatórias. Mas, se os acontecimentos se sucedem ao acaso, então existe um padrão médio que está sujeito a certas leis. Lançar um dado muitas vezes deve resultar, em média, em cada face sair uma vez em cada seis, caso contrário o dado está viciado. Mas existe algum padrão na sequência de lançamentos individuais, além deste comportamento médio? Como é que podemos saber se uma sucessão de acontecimentos é como a dos lançamentos individuais de um dado

— completamente sem significado —, ou como a sucessão de bases químicas numa molécula de ADN, um código genético que pode especificar as regras para fazer um bebé humano? Atingimos aqui a pergunta fundamental: o que é o acaso?

Numa tentativa de responder a esta pergunta, é importante distinguir entre os problemas físico e matemático do acaso. O problema matemático é o problema lógico de definir o que se quer dizer com uma sucessão aleatória de números ou de funções. O problema físico do acaso é determinar se fenómenos físicos reais obedecem aos critérios matemáticos do acaso. Evidentemente, não podemos estabelecer se uma sucessão de acontecimentos naturais é ou não aleatória antes de termos uma definição matemática de acaso. Uma vez que tenhamos tal definição, temos o problema empírico adicional de determinar se fenómenos reais correspondem a essa definição. Por exemplo; podemos definir matematicamente um triângulo na geometria euclidiana. Mas é uma questão independente e puramente empírica a de se configurações triangulares físicas correspondem a essa definição.

Aqui enfrentamos o primeiro problema: os matemáticos nunca tiveram êxito em dar uma definição precisa de acaso ou no problema intimamente associado de definir probabilidades. Se o leitor for a uma biblioteca de matemática, encontrará muitíssimos livros sobre probabilidades. Como é possível que se tenha escrito tanto sobre algo que continua mal definido? O que é que impede uma definição exata? Em parte, o problema de definir precisamente o acaso, ou, mais especificamente, uma sucessão aleatória de números inteiros, reside em que, se conseguirmos dar uma

definição exata da sucessão, ela deixará de ser aleatória. Ser capaz de dizer precisamente o que é o acaso nega a natureza íntima do acaso, que é o caos total — como se pode ser preciso em relação ao caos?

Para ilustrar estas dificuldades, consideremos o problema de definir uma sucessão aleatória dos números inteiros de 0 a 9. Por exemplo, consideremos a sucessão

31415926535897932384626433832795028841971...

onde ... significa que a sucessão poderia continuar por mais um milhão de algarismos e depois parar. Não vou escrevê-los todos. Isto parece ser um conjunto caótico dos dez inteiros, e podemos aplicar a este conjunto caótico dos dez inteiros vários testes para ver se de facto é aleatório. Um teste possível seria que qualquer número, por exemplo o 8, deveria aparecer em média uma vez em cada dez, uma vez que há dez algarismos diferentes. Assim, contaríamos o número de oitos que aparecem na sucessão e dividiríamos pelo número de inteiros que a formam. Isto deveria dar um número muito próximo de $1/10$. O mesmo seria aplicável a todos os outros inteiros. Suponhamos que a sucessão satisfaz esta prova.

Podemos conceber provas de aleatoriedade um pouco mais sofisticadas; por exemplo, podemos dividir a sucessão em blocos de dez inteiros, de forma a termos

(3141592653) — (5897932384) (6264338327)...

Agora podemos contar o número de inteiros pares que ocorrem em cada bloco de dez — o primeiro bloco tem três inteiros pares, o segundo tem quatro, o terceiro tem seis, e assim por diante. O número de inteiros pares num dado bloco pode variar entre zero e dez. Portanto, depois de muitos blocos de dez, podemos estabelecer a distribuição dos números pares — quantos blocos não têm números pares, quantos têm um número par, etc. — e devemos obter um resultado próximo da chamada «distribuição de Poisson». Se, ao aumentar o número de blocos em consideração, a distribuição obtida se aproximar ainda mais da distribuição de Poisson, teremos uma indicação suplementar de que a sucessão é aleatória.

Poderíamos aplicar outras provas à sucessão. Por exemplo, poderíamos utilizar blocos de doze inteiros para verificar a distribuição de Poisson. Suponhamos que a sucessão verifica todas essas provas. Podemos concluir que ela é aleatória? Infelizmente nunca podemos tirar essa conclusão, mesmo que a resposta a todas as provas seja positiva, porque a sucessão pode ser especificada por uma regra, e nesse caso não corresponde à nossa imagem de aleatório (não governado por nenhuma regra).

Por exemplo, a sucessão acima definida é simplesmente a expansão decimal de $\pi = 3,14159\dots$, a razão entre a circunferência e o diâmetro de um círculo, que não é um número aleatório; pelo contrário, é um número muito especial. O leitor poderia objetar a este truque e alterar um dos algarismos, digamos o 100 000º, da sucessão, de forma que ela não seja já determinada por π . Mas então eu posso alterar a regra dizendo que o 100 000º algarismo

deve ser modificado e ter ainda uma regra bastante simples. A expansão decimal de π é um exemplo de um número fácil de especificar completamente em palavras. Na realidade, o seu cálculo a partir desta definição exige um programa de computador com um número enorme de regras. Para π , essas regras de cálculo são bastante fáceis, mas para outros números podem não o ser.

Para qualquer sucessão finita de inteiros é sempre possível encontrar uma regra que diga exatamente a maneira de a construir. Mas essa regra pode ser extremamente complexa. Andrei Kolmogorov, o grande matemático soviético, julgou poder definir uma sucessão como sendo aleatória se, ao transcrever convenientemente para números a regra de formação da sucessão, se concluísse que o comprimento da dita regra era superior ou igual ao da própria sucessão. No entanto, encontrar uma regra de formação depende da inteligência humana, e nunca podemos garantir que a regra que descobrimos é a mais simples que descreve a sucessão. Se não tivéssemos reparado que a sucessão acima era a expansão decimal de π , ser-nos-ia muito difícil encontrar uma regra; mas, na realidade, ela é muito simples. Não existe uma definição matemática precisa do carácter aleatório de uma sucessão infinita de números inteiros.

Portanto, os matemáticos não sabem o que é o acaso! Mas eles podem dizer se uma sucessão de números é ou não aleatória, pois, se não for, não passará pelo menos uma das provas de aleatoriedade. Por exemplo, as sucessões 33333333... ou 32323232 ..., como possuem um padrão bem definido, falhariam as provas e obviamente não são aleatórias. Mas, mesmo que uma

sucessão de números passe todas as provas, não podemos ter a certeza de que ela é aleatória — alguém pode inventar uma nova prova e a sucessão não a satisfazer. Se um analista de mercado vê um padrão numa sequência de preços e o leitor não a vê, não poderemos decidir quem tem razão. O matemático Mark Kac exprimiu uma característica curiosa dos números aleatórios: «Uma tabela de números aleatórios, uma vez impressa, não necessita de errata.» Um número aleatório alterado de uma forma aleatória permanece aleatório. Mas nós não temos uma definição precisa de aleatoriedade. Talvez seja mesmo impossível termos uma — a aleatoriedade pode ser absolutamente indefinível.

Nesse caso, como podem os matemáticos escrever todos aqueles livros sem definir aleatoriedade ou probabilidade? Conseguem-no tornando-se operacionalistas — dando uma definição operacional de aleatoriedade e de probabilidade como sendo aquilo que obedece aos teoremas que eles demonstram. A teoria matemática das probabilidades começa *depois* de serem atribuídas probabilidades a acontecimentos elementares. A forma como estas probabilidades são atribuídas não é discutida, porque a sua discussão requeriria uma definição prévia de aleatoriedade — que não é conhecida. Esta abordagem operacionalista aplicada, por exemplo, à geometria corresponderia a provar todos os teoremas sobre os triângulos sem definir exatamente o que é um triângulo. Uma definição operacional de «triângulo» é simplesmente o objeto que obedece a todos esses teoremas. A única coisa que se exige é a consistência, e não as definições. Podemos chegar muito longe com esta abordagem, e é afinal isto que todos esses livros sobre probabilidades contêm.

Esta abordagem operacionalista da aleatoriedade funciona muito bem na grande maioria dos casos. No entanto, também nos pode trazer problemas, como mostra o exemplo que se segue. Muito frequentemente, em cálculos num computador eletrónico, torna-se demasiado demorado calcular completamente certas funções.

Alternativamente, pode calcular-se a função num conjunto de pontos aleatórios e interpolar a função nesses pontos, obtendo uma boa estimativa da função com grande economia de tempo de computador. Um processo semelhante é utilizado nas sondagens de opinião. É demasiado dispendioso perguntar a todas as pessoas a sua opinião, de modo que é escolhida uma amostra representativa — escolhida «aleatoriamente» — e é inquirida a opinião das pessoas dessa amostra. Uma estimativa bastante precisa da opinião geral pode ser obtida desde que a amostra inicial seja realmente aleatória.

O método de Monte Carlo é uma técnica computacional deste tipo, mas não é infalível. Os computadores possuem geradores de números aleatórios com a finalidade de realizar uma «sondagem de opinião» de funções matemáticas para acelerar os cálculos. Um dos métodos utilizados para gerar os números aleatórios no computador é a partir de soluções numéricas de equações algébricas. Esses números passam todas as provas habituais de aleatoriedade, como a expressão numérica de π , mas são, na realidade, construídos a partir de uma regra algébrica inserida num programa de computador. São chamados números «pseudoaleatórios» porque foram construídos a partir de uma regra. Uma vez alguém fez um cálculo usando o método de Monte Carlo e, ao utilizar estes

números pseudoaleatórios, obtinha sempre uma resposta absurda. Verificou-se depois que a razão para isto era que os cálculos feitos incluíam a intersecção de planos num espaço multidimensional, que estavam diretamente relacionados com as soluções da equação algébrica utilizada no gerador de números aleatórios. Para este cálculo particular, os números «pseudoaleatórios» gerados pelo computador não eram nada aleatórios.

Este exemplo mostra que aquilo que podemos pensar ser um número aleatório, na realidade não o é — está relacionado com outros números que são especificados por uma regra simples. Como podemos ter a certeza de que um número é realmente aleatório? Não podemos — o máximo que podemos fazer é estabelecer que o número não é aleatório se ele não passar alguma das provas de aleatoriedade.

Uma propriedade notável dos números «aleatórios» — números que passam todas as provas — é que dois desses números podem estar relacionados um com o outro de uma forma não aleatória. Consideremos a sucessão que examinámos antes e que passa todas as provas de aleatoriedade

31415926535897...

e consideremos agora uma segunda sucessão

20304815424786...

que também passa todos os testes de aleatoriedade. Poderia parecer que temos duas sucessões de números totalmente aleatórias; no entanto, subtraindo a segunda sucessão da primeira, Algarismo por Algarismo (com a regra de, caso obtenhamos um número negativo, adicionarmos 10 ao resultado), obtemos a sucessão

111111111111...

que não é aleatória. Isto mostra que duas sucessões aleatórias podem estar correlacionadas — cada uma é individualmente caótica, mas, se forem obtidas utilizando uma regra adequada (no exemplo acima, a regra era a de subtrair 1 da primeira sucessão), surge um padrão não aleatório. Os matemáticos diriam que a intercorrelação das duas sucessões é não nula.

É desta forma que os criptógrafos fazem códigos indecifráveis, utilizados na transmissão de informações ultrassecretas. Existem duas sucessões aleatórias: a mensagem e a tecla premida pela pessoa que recebe a mensagem. Tanto a mensagem como a tecla são sucessões completamente aleatórias; nunca alguém que possua o código apenas da mensagem ou apenas da tecla poderá descobrir a mensagem. Só combinando os dois códigos de acordo com alguma regra — como subtraindo as duas sucessões — se pode descobrir a mensagem; a informação está na intercorrelação.

A história final da aleatoriedade — o caos absoluto — ainda não nos foi contada pelos matemáticos. É surpreendente que algo tão essencial para a teoria das probabilidades não tenha sido definido;

e ainda mais surpreendente é o facto de podermos chegar tão longe em matemática sem uma definição. Supondo simplesmente que o acaso existe, os matemáticos atribuem probabilidades elementares aos acontecimentos, e este é o seu ponto de partida. Mas eles ainda não conseguiram capturar e olhar de frente o caos.

¹ Apesar de este ser o nome atribuído a este centro religioso pelos Muçulmanos ortodoxos, ele é também, ainda que incorretamente, conhecido como Mesquita de Omar. (N. do T.)

² Uma das formas de adivinhação (mântica) é lançar pequenos ossos, como dados, que permitem aos sacerdotes uma leitura dos destinos futuros. Esta forma de adivinhação é conhecida pelo nome de «osteomancia». (N. do T.)

CAPÍTULO 7

A Mão Invisível

Os problemas mais importantes da vida são, na sua grande maioria,
apenas problemas de probabilidade.

MARQUÊS DE LAPLACE

Um professor de Matemática no Irão pós-revolucionário começou a sua aula sobre a teoria das probabilidades segurando na mão um dado com o qual ia proceder a um exemplo. Antes ainda de ter começado, um estudante fundamentalista islâmico gritou: «Um objeto satânico!», referindo-se, claro está, ao dado. O professor perdeu o emprego e quase a vida. A noção de probabilidade é contrária às interpretações do islamismo, que sustentam que Deus conhece tudo — não há lugar para o acaso nas mentes de muitos fundamentalistas religiosos.

Se o professor tivesse podido dar a sua aula, podemos imaginar aquilo que teria dito aos alunos. Poderia ter sublinhado as aplicações da teoria das probabilidades ao mundo real e ter começado com a definição operacional de probabilidade. Este tipo de definição é necessário porque não possuímos uma definição intrínseca de aleatoriedade, como vimos no último capítulo. Não podemos determinar se um processo real é na verdade aleatório. Tudo aquilo que podemos fazer é verificar se o processo passa ou

não os nossos testes de aleatoriedade e, em caso afirmativo, podemos dizer que ele é «suficientemente aleatório». Na prática, isto resulta muito bem, mas subsiste sempre um problema de princípio — nunca podemos estar certos de que não surgirá um novo teste que mostre que aquilo que pensávamos ser aleatório na realidade o não é.

Apesar da dificuldade matemática na definição de aleatoriedade, podemos tomar uma atitude pragmática, como fez Richard von Mises. Ele disse que a definição prática de processo aleatório é imbatível. A definição prática é como se segue: suponhamos que é construída uma máquina de jogos que vence se conseguir gerar números aleatórios. Então, a longo prazo, é impossível vencê-la, qualquer que seja a estratégia que utilizemos, e poderíamos dizer que os números são realmente aleatórios para fins práticos. Se houvesse uma falha na máquina e os números não fossem realmente aleatórios (se, por exemplo, um número aparecesse mais frequentemente do que os outros), poderíamos utilizar esta informação para vencer a máquina. A aleatoriedade real é imbatível. Esta definição pragmática é suficiente para o mundo real. Todas as casas de jogo e todas as companhias de seguros a utilizam. E, como a aleatoriedade é imbatível e eles baseiam o seu negócio nessa realidade, ganham sempre.

Se procurarmos o acaso na natureza, concluimos que o melhor sítio para o encontrar é no átomo — não há acaso como o acaso quântico. Se estudarmos processos como os decaimentos nucleares radioativos, concluimos que eles passam todos os testes de aleatoriedade. O instante e o local de desintegração de um núcleo

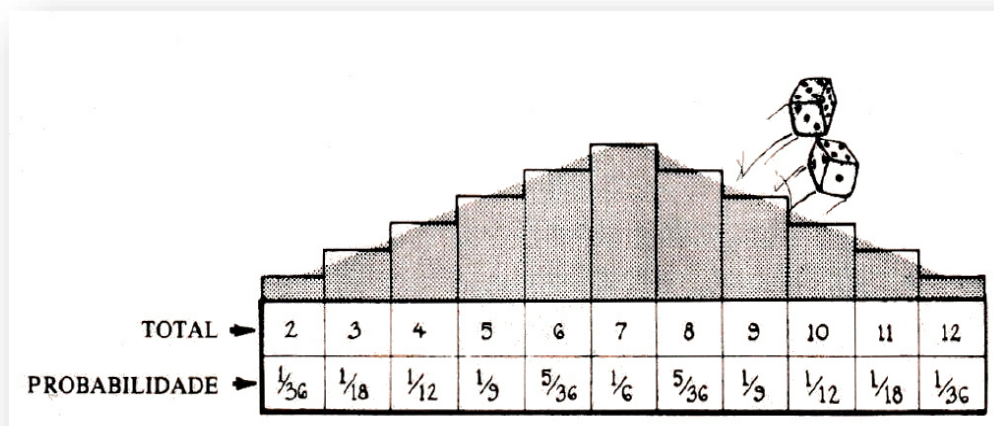
atômico são absolutamente aleatórios. Enquanto podemos imaginar uma falha na máquina de jogos, os físicos não encontram falhas no mundo quântico. O acaso quântico não pode ser batido; o Deus-que-joga-aos-dados é um jogador honesto. Mas como podemos estudar essa aleatoriedade?

Laplace e outros matemáticos tiveram a grande inspiração de que, apesar de os acontecimentos aleatórios individuais serem totalmente desordenados, a distribuição desses acontecimentos não o era e podia ser o tema de uma ciência exata — a teoria das probabilidades. A ideia central da teoria das probabilidades é a noção de uma distribuição de probabilidades — a atribuição de probabilidades a um conjunto de acontecimentos relacionados. Um exemplo simples é o lançamento de uma moeda ao ar. A probabilidade de sair cara é um meio e a de sair coroa é também um meio; se as adicionarmos, obtemos um. Uma probabilidade igual a um significa certeza: se lançarmos uma moeda ao ar, ela cairá com a cara ou a coroa voltada para cima.

Uma vez atribuídas as probabilidades elementares, é possível ir muito mais longe. Podemos calcular probabilidades para acontecimentos complexos. Tomemos um só dado. A probabilidade de um número qualquer, de 1 a 6, sair aquando de um lançamento é de $1/6$. Agora suponhamos que lançamos dois dados, como é comum em muitos jogos de dados. A soma dos números de cada dado pode ir de 2 a 12. Mas nem todos são igualmente prováveis. Por exemplo, a única maneira de obter um total de 2 é obtendo 1 em cada dado. Como a probabilidade de tirar 1 em cada dado é de $1/6$ e os acontecimentos são independentes, a probabilidade

conjunta é dada pelo produto $1/6 \times 1/6 = 1/36$. Em média, lançando dois dados, obteremos uma soma de 2 apenas uma vez em cada 36 tentativas.

Podemos tirar 3 de duas maneiras diferentes. O primeiro dado sai com a face 1 e o segundo com a face 2 voltadas para cima. Este acontecimento tem igualmente uma probabilidade de $1/6 \times 1/6 = 1/36$. No entanto, poderíamos obter um total de 3 tirando 2 no primeiro dado e 1 no segundo. Este acontecimento tem também a probabilidade de $1/36$. Portanto, a probabilidade total de tirar 3 é de $1/36 + 1/36 = 1/18$. Procedendo de forma análoga para todos os totais possíveis, podemos construir uma tabela que mostra como a probabilidade está distribuída pelos vários totais possíveis.



Probabilidades para os diferentes totais possíveis no lançamento de dois dados. Parece existir uma «força» ou uma «mão invisível» que faz que o 7 saia mais frequentemente, mas, na realidade, isto é apenas uma consequência da teoria matemática das probabilidades.

Se o leitor tivesse de apostar na saída de um só número, o número no qual o deveria fazer é o 7; é ele que tem a maior

probabilidade de saída. Se tivesse de apostar em cinco dos onze números possíveis, deveria escolher os números 5, 6, 7, 8 e 9, porque estes saíam, em média, duas vezes em cada três; Os outros seis números, 2, 3, 4, 10, 11 e 12, saíam apenas uma vez em cada três. O que nos diz que estes números saem com estas frequências? Vemos que esta distribuição de probabilidades é apenas uma consequência da análise combinatória — que determina de quantas maneiras diferentes podemos obter um determinado total. Mas parece haver uma «mão invisível» que faz com que o 7 saia mais frequentemente do que qualquer outro número. A propriedade relevante das distribuições de probabilidade para acontecimentos reais é que a distribuição não é material — e, no entanto, manifesta-se como uma espécie de força invisível em objetos materiais como dados.

As distribuições de probabilidades de acontecimentos reais como o lançamento de dados fazem parte de um mundo invisível. As distribuições são invisíveis, não porque (como os átomos) sejam muito pequenas, mas porque não têm existência material. Aquilo que é visível são os acontecimentos materiais individuais como o lançamento dos dados. As distribuições de probabilidades são como mãos individuais que não se tocam. Um bom exemplo é o processo lento e invisível de evolução biológica. Este processo torna-se perceptível apenas quando vamos além dos acontecimentos aparentemente aleatórios e analisamos as distribuições de probabilidades que conferem significado objetivo à pressão ambiental para uma determinada espécie evoluir, para outra espécie cuja sobrevivência nesse meio seja mais provável. As distribuições de acontecimentos parecem ter uma objetividade não

possuída pelos próprios acontecimentos. Vimos já que, no mundo microscópico dos átomos, são as distribuições dos acontecimentos que são especificáveis pela teoria quântica, e não os acontecimentos individuais. As distribuições de probabilidades quânticas, as mãos invisíveis ao nível dos átomos, são, na realidade, responsáveis pela força química que liga os átomos.

Poderíamos ser levados a pensar que as distribuições de probabilidades, devido a terem algum tipo de objetividade, têm uma existência independente dos acontecimentos individuais. Este erro pode resultar na noção errada de que a distribuição «força» o acontecimento a formar um padrão específico. Isto é o fatalismo secular — a crença em que as distribuições de probabilidades podem influenciar o resultado de um único acontecimento.

Mas este é um raciocínio viciado, porque são os acontecimentos individuais que dão origem à distribuição, e não o contrário. Pela introdução de um elemento não aleatório, um elemento de organização ao nível dos acontecimentos individuais, alteramos a distribuição de probabilidades. Viciando os dados, os resultados serão diferentes.

Enquanto a invisibilidade e a objetividade das distribuições é surpreendente, outra das suas notáveis propriedades é a sua estabilidade, quer se trate de distribuições de movimentos atômicos na matéria, quer de reações químicas, quer de acontecimentos biológicos ou sociais. Uma distribuição estável, que não muda com o tempo, é chamada «distribuição de equilíbrio». A distribuição de probabilidades do lançamento de dois dados não varia com o tempo,

porque os dados não estão sujeitos a forças temporais. Mas o que dizer da probabilidade de partir uma perna num acidente de esqui numa dada estância turística, Inverno após Inverno? Como explicar a estabilidade dessa probabilidade ao longo de grandes intervalos de tempo? A estabilidade de uma distribuição de equilíbrio é uma consequência do facto de os acontecimentos individuais serem aleatórios e independentes de acontecimentos semelhantes. O caos individual implica o determinismo coletivo.

O meu exemplo preferido da estabilidade estatística das distribuições é o das mordeduras de cão numa grande cidade. Quando as pessoas são mordidas por cães e são tratadas em médicos ou em hospitais, o acontecimento é registado. Ao longo de vários anos, os números totais foram de 68, 70, 64, 66 e 71, o que corresponde a uma média de cerca de 68 por ano. Por que é este número tão estável? Por que não há anos com 5 mordeduras de cão, ou com 500? Há algum «espírito misterioso» que afeta esses cães e essas pessoas todos os anos para que quase exatamente 68 pessoas sejam mordidas em cada ano? O espírito que as afeta é o do Deus-que-joga-aos-dados. Como os acontecimentos são aleatórios e independentes, a distribuição é estável. Apenas se introduzirmos um fator não aleatório, como, por exemplo, uma lei exigindo que as pessoas possuam raças de cães menos agressivos, podemos alterar a distribuição de equilíbrio.

Esta estabilidade das distribuições de probabilidades pode produzir um sentimento de pessimismo relativamente à liberdade pessoal, como foi descrito por Jacques Monod, o biólogo molecular francês, na sua obra sobre a evolução biológica, *O Acaso e a*

Necessidade. Monod sabia que a evolução de uma espécie é determinada coletivamente devido ao carácter aleatório dos acontecimentos para os indivíduos que constituem a espécie. Mas o que implica isto para a liberdade humana? O leitor pode pensar que está no exercício da sua liberdade humana? O leitor pode pensar que está no exercício da sua liberdade quando apoia uma dada opinião política ou quando decide usar sapatos azuis; mas, de facto, as suas ações são apenas parte de uma distribuição de probabilidades. Na sociedade francesa dos anos 70 existia uma determinada probabilidade de uma pessoa ser politicamente da esquerda ou da direita. O que é apercebido como liberdade pelo indivíduo é assim necessário do ponto de vista coletivo. Quando um dado é lançado, ele pode «pensar» que tem liberdade, mas o que quer que aconteça faz parte de uma distribuição de probabilidades; o dado está a ser influenciado pela mão invisível. Nós não podemos agir sem fazer parte de uma distribuição — é como estar dentro de uma prisão invisível agarrado por mãos invisíveis. O próprio ato de tentar escapar faz parte de uma nova distribuição, uma nova prisão. Talvez seja por isto que a verdadeira criatividade é tão difícil — milhares de mãos invisíveis amarram-nos aos nossos atos e ideias convencionais.

Parecem existir dois tipos básicos de pessoas neste mundo, que nas suas formas extremas são aquelas que veem tudo no mundo como causado e com um sentido em si próprio e aqueles que acreditam que Deus joga aos dados e que têm lugar acontecimentos verdadeiramente aleatórios. Os deterministas têm dificuldades em aceitar a natureza aleatória de alguns acontecimentos porque as suas mentes são repelidas pelo caos, pelo não causado. De facto, o

instinto natural da maioria das pessoas é procurar segurança no determinismo e encontrar «razões» devido às quais as coisas acontecem, por mais remotas que estas sejam. Nada realçará tão bem a diferença entre o determinista e o acausalista como a atitude perante uma grave doença noutra pessoa ou no próprio. O determinismo procurará a causa e o significado de tal doença — de alguma maneira, a pessoa em questão terá «pecado» de forma a atrair esta dor sobre si própria. Na realidade, a doença pode não ter causa absolutamente nenhuma e, como os decaimentos radioativos, ocorrer simplesmente.

Nós somos extremamente sensíveis a pequenas alterações na distribuição dos acontecimentos da nossa vida. Há alturas em que temos a sensação nítida de que nada vai bem na nossa vida, ou, pelo contrário, em que tudo está a correr bem. Muitas vezes, estas sensações são reações a flutuações numa distribuição de equilíbrio de acontecimentos positivos e negativos. Se, no mesmo dia, uma pessoa perde o emprego, o seu carro se avaria e um amigo seu morre, será difícil não se deixar afetar por esses acontecimentos. Essas flutuações podem, no entanto, não ser muito significativas. O importante é agir quando há grandes alterações materiais na vida que podem afetar a própria distribuição de equilíbrio.

Uma grande preocupação das pessoas é a sua esperança de uma vida longa e saudável. A esperança de vida, distribuição de probabilidades para a esperança de vida, pode ser determinada em função da idade, sexo e rendimento salarial. No entanto, podemos modificar a probabilidade associada à nossa esperança de vida eliminando hábitos pessoais perniciosos e introduzindo uma rotina

de exercício físico diário. Isso tem um efeito real na distribuição. Mas toda a distribuição tem uma pequena cauda. Há uma probabilidade finita de que uma pessoa que melhore substancialmente os seus hábitos de vida e, assim, a sua saúde tenha uma vida curta — tal como existe uma probabilidade de, ao lançar dois dados, tirarmos um 2.

Podemos alterar as distribuições de probabilidades introduzindo forças e constrangimentos não aleatórios. Mas será possível reduzir a probabilidade à certeza absoluta? Na prática, é claro que podemos determinar as circunstâncias de forma que alguns acontecimentos tenham realmente de ocorrer, pelo menos com uma probabilidade tão próxima da unidade que pareçam certos. Mas, se fizermos esta pergunta enquanto questão de princípio, a resposta é não — não há certeza absoluta para os acontecimentos. A razão última para isto é a interpretação estatística da mecânica quântica. Se por especificar um fenómeno entendermos conhecer o instante em que ele ocorreu e a transmissão de energia que o caracteriza, então o princípio de indeterminação de Heisenberg impede uma determinação absoluta do mesmo — a ironia final do Deus-que-joga-aos-dados.

Todos os acontecimentos individuais podem fazer parte de uma distribuição de probabilidades e estão assim sujeitos à mão invisível. Mas diferentes conjuntos de acontecimentos podem não ser independentes — os empurrões das diferentes mãos invisíveis podem estar correlacionados. Consideremos a probabilidade de, num dia especificado, ocorrerem ataques cardíacos em Nova Iorque e em Boston. Podemos pensar que estes acontecimentos são

independentes porque as duas cidades estão afastadas, mas, na realidade, não o são. Se ocorrer um número de ataques cardíacos superior à média em Nova Iorque, o mesmo sucederá em Boston. Analisando este facto, descobriremos que, se a temperatura é elevada numa das cidades — um fator que torna os ataques cardíacos mais prováveis —, então é possível que seja também elevada na outra. Os ataques de coração estão relacionados com a tensão emocional, que é elevada aos fins-de-semana; e, se é fim-de-semana numa das cidades, também é na outra. Acontecimentos que parecem a princípio independentes estão na verdade relacionados. Os matemáticos diriam que as duas distribuições de probabilidades para ataques de coração em Nova Iorque e em Boston estão em intercorrelação.

Na nossa discussão do acaso sublinhámos o facto de duas sucessões aleatórias, como sucessões de números inteiros, poderem ter, quando comparadas, uma intercorrelação não aleatória. O caos pode ser relacionado com o caos de uma forma ordenada. Uma ilustração maravilhosa da ideia de intercorrelação de funções aleatórias é fornecida pelos estereogramas aleatórios de Bella Julesz. O *stereopticon* era uma versão vitoriana do projetor de diapositivos, um aparelho para visualizar imagens, geralmente fotografias ou atrações turísticas. Os diapositivos consistiam em fotografias normais, lado a lado, quase idênticas, porque tinham sido tiradas com duas lentes separadas pela mesma distância que separa os nossos olhos um do outro. O aparelho divide as imagens de tal forma que a imagem direita é vista pelo olho direito e a esquerda pelo olho esquerdo. O resultado global é que o cérebro funde as duas imagens numa única imagem tridimensional da cena.

A ideia de Julesz foi utilizar conjuntos completamente aleatórios de pontos, como pontos num écran de televisão, para as duas imagens. No entanto, a correlação cruzada das duas imagens aleatórias não era aleatória, mas possuía um padrão discernível. Essas duas imagens, quando utilizadas num *stereopticon*, colocavam informação completamente aleatória nos olhos direito e esquerdo individualmente. Mas, surpreendentemente, o cérebro é sensível à correlação. Quando se olha pela primeira vez para um estereograma aleatório, vê-se apenas um conjunto aleatório de pontos. Após alguns minutos, o padrão, ou intercorrelação, torna-se visível. O que se vê é uma imagem tridimensional. O cérebro correlacionou uma grande quantidade de informação aleatória. Não seria possível ver a imagem tridimensional se o cérebro não estivesse de facto a correlacionar a informação vinda do olho direito com a proveniente do olho esquerdo. Se se observar o estereograma uma segunda vez, depois de algumas semanas, o padrão inteligível aparece quase imediatamente. De alguma forma, o cérebro humano pode recordar a intercorrelação de dezenas de milhares de bits de informação aleatória. Penso que seria muito interessante saber como é que o cérebro faz isto — um problema de neurofisiologia. O que mais nos interessa no problema dos estereogramas aleatórios é que eles transformam o conceito abstrato de intercorrelação numa experiência vivida. Mais tarde, quando voltarmos a analisar a teoria quântica, utilizaremos este conceito de intercorrelação.

Temos discutido as distribuições de probabilidade como as relativas ao lançamento de dados ou a mordeduras de cães numa cidade. Mas serão estas mãos invisíveis reais e objetivas? Um bom

jogador que não conheça absolutamente nada da teoria das probabilidades pode ter uma sensação das probabilidades que corresponda quase a uma presença material. Talvez exista um ser social como o Leviatão, de Hobbes — um símbolo da consciência coletiva social —, para quem a distribuição dos acontecimentos humanos tenha realidade da mesma forma que as cadeiras e as mesas têm realidade para nós. Se é que existe uma tal consciência coletiva, não faço a menor ideia de como comprovar a sua existência. Aqueles que apelam para uma consciência coletiva como «a vontade do povo» fazem-no geralmente para servir os seus interesses ou as suas opiniões políticas ou sociais.

Podemos debater a questão da natureza objetiva da distribuição dos acontecimentos humanos e sociais durante muito tempo. O nosso objetivo é, no entanto, analisar o conceito de distribuição de probabilidades em termos da imagem da realidade material que podemos formar a partir da teoria quântica. A realidade na teoria quântica é estatística; as mãos invisíveis tocam em tudo no mundo microfísico. Conforme observou Heisenberg, «em experiências sobre o mundo atómico lidamos com coisas e com factos, com fenómenos que são tão reais como os fenómenos da nossa vida quotidiana. Mas os átomos ou as partículas elementares não são tão reais; eles formam um mundo de potencialidades ou possibilidades, mais do que de coisas e de factos».

Mas, antes de regressar ao problema da realidade quântica, prosseguiremos por mais um capítulo a nossa incursão no domínio da natureza do acaso e da probabilidade. Se analisarmos a distribuição de probabilidades para o movimento das moléculas de

um gás, então — contrariamente ao que acontecia na distribuição de ataques cardíacos ou de mordeduras de cães —, o toque da mão invisível pode ser diretamente sentido. A forma pela qual isso é conseguido é extremamente importante e é o assunto do próximo capítulo.

CAPÍTULO 8

A Mecânica Estatística

Muitas vezes estive presente em reuniões de pessoas [...] que [...] exprimiram a sua incredulidade na falta de cultura literária dos cientistas. Uma ou duas vezes fui provocado e perguntei [se eles] podiam descrever a segunda lei da termodinâmica. A resposta foi fria [...] e também negativa. E, no entanto, eu estava a perguntar algo que é o equivalente científico de: Já leu alguma obra de Shakespeare?

C. P. Snow, The Two Cultures

O que é um gás? Durante séculos pensou-se que um gás fosse um meio contínuo material, porque essa é a sua aparência. Mas, na realidade, os gases consistem em biliões de biliões de moléculas em movimento rápido segundo uma trajetória retilínea até atingirem uma outra molécula ou uma parede — um circo louco de partículas em choque umas com as outras. Como podemos nós estudar um tão grande conjunto de partículas em movimento rápido e caótico?

Em primeiro lugar, podemos medir certas propriedades de um gás, como a sua temperatura, o seu volume e a sua pressão. Não é necessário saber que um gás é constituído por miríades de moléculas para medir estas propriedades; tudo aquilo de que necessitamos é dos aparelhos adequados para a sua medição. Tais propriedades quantitativas de um gás como a pressão ou a temperatura são chamadas «variáveis macroscópicas», pois

descrevem as propriedades fenomenológicas de um gás. Os físicos descobriram as leis termodinâmicas a que essas variáveis macroscópicas obedecem. Um exemplo é a lei dos gases ideais, que afirma que o produto da pressão de um gás pelo volume que ele ocupa é proporcional à sua temperatura. O mais notável é que com um pequeno número de variáveis macroscópicas podemos dar uma descrição completa da forma como as propriedades fenomenológicas da matéria se alteram. Não é necessário saber como as partículas se comportam para descrever um gás. Os físicos já compreendiam estas leis termodinâmicas pelos meados do século XIX.

Enquanto as leis termodinâmicas iam sendo descobertas, as leis de Newton e a imagem do mundo da física clássica impunham-se como compreensão fundamental da realidade. Os físicos perguntaram-se se as relações termodinâmicas para os gases e para a matéria em geral poderiam ser deduzidas das leis de Newton e ser assim postas numa base mais fundamental. Alguns propuseram que os gases consistiam em partículas móveis e supuseram que cada uma delas obedecia às leis do movimento de Newton, estando desta forma a sua trajetória totalmente determinada. Pensaram que, se possuíssemos a mente perfeita de Deus, poderíamos localizar cada uma das partículas, resolver as equações do movimento para todas elas e, desta forma, determinar todas as propriedades do gás. Para os mortais, esta teoria é impossível — e para Deus também, se tivermos em conta que a teoria quântica está correta e que a trajetória é indeterminada¹ (facto que não era sequer concebível no século passado). Portanto, põe-se-nos o seguinte problema: como deduzir, a partir das leis do

movimento para partículas microscópicas, as leis macroscópicas da termodinâmica? Como ir do conhecimento das partículas até ao gás que observamos? A solução deste problema foi um dos grandes êxitos da física do século XIX. Se analisarmos de perto a forma como os físicos resolveram este problema, aprenderemos algo de admirável sobre a relação da experiência humana com o mundo microfísico das partículas atômicas — a nossa experiência não é na realidade redutível aos fenómenos atômicos.

A solução deste problema foi, em primeiro lugar, obra do escocês James Clerk Maxwell, já famoso pelas suas leis do eletromagnetismo; de Ludwig Boltzmann, um físico que teve a responsabilidade de convencer os seus contemporâneos da correção da sua grande realização; e de J. Willard Gibbs, um obscuro génio americano que trabalhava sozinho na Universidade de Yale. Estes homens criaram a mecânica estatística. A hipótese básica da mecânica estatística é a de que toda a matéria é constituída por partículas — que podem ser identificadas com os átomos ou moléculas — cujo movimento obedece às leis da física clássica e determinista. Na prática, é impossível aplicar as leis da mecânica a cada uma das partículas, porque existe um número imenso delas numa amostra macroscópica de matéria. A grande ideia de Maxwell, Boltzmann e Gibbs foi a de aplicar métodos estatísticos de forma a determinar a distribuição de probabilidades para os movimentos das partículas, ignorando os movimentos individuais de cada uma das partículas. Por exemplo, um gás como o ar que nos rodeia é formado por biliões de partículas em movimento errático e que colidem entre si e com obstáculos como as paredes da sala. De acordo com a física clássica, cada partícula

move-se de uma maneira determinada, apesar de nos ser impossível seguir o movimento individual de todas as partículas. No entanto, os físicos deduziram, a partir das leis de Newton, as propriedades estatísticas do conjunto de partículas, tais como a sua distribuição de velocidades ou o tempo médio entre colisões. É como se se fizesse uma sondagem a todas as partículas, perguntando-lhes a sua velocidade, estabelecendo depois uma distribuição de velocidades. A obtenção das leis termodinâmicas sob a forma de leis relativas à distribuição dos movimentos das partículas foi a realização básica da mecânica estatística.

Um balão cheio de ar contém bilhões de partículas de ar. A pressão no interior do balão é devida às colisões das partículas com a sua superfície e consequente transferência de movimento. Podemos sentir a pressão se o comprimirmos com a mão. A pressão é uma propriedade macroscópica do gás, mas pode ser deduzida a partir das leis do movimento das partículas que colidem com a superfície do balão. Do mesmo modo, a temperatura de um gás, outra variável macroscópica, pode ser relacionada com a energia média do movimento de cada partícula. Não há conceito de temperatura para uma partícula isolada; apenas para grandes conjuntos de partículas surge a temperatura como propriedade coletiva. A temperatura e a pressão são propriedades médias da distribuição dos movimentos do conjunto de partículas. Ao contrário das distribuições de probabilidades que encontramos nas nossas discussões do lançamento de dados e dos acontecimentos humanos ou sociais, as distribuições da mecânica estatística são diretamente perceptíveis como temperatura ou pressão de um gás — mãos invisíveis que podemos tocar diretamente.

No decurso da descoberta das leis termodinâmicas, os físicos descobriram outra variável macroscópica que descrevia uma propriedade fenomenológica da matéria — a entropia. A entropia é uma medida quantitativa da desorganização de um sistema físico. O conceito de entropia é extremamente importante para a nossa compreensão da relação do micromundo das partículas com o mundo da nossa experiência humana. Já reparou o leitor como é difícil manter as coisas limpas e organizadas? A frustração do leitor não é acidental, mas sim consequência de uma das leis fundamentais da termodinâmica — a entropia, ou desordem, aumenta sempre num sistema físico fechado. O leitor luta com a segunda lei da termodinâmica.

Para ilustrar o aumento de entropia, consideremos um vaso cheio até um quarto com sal. Adicionemos então pimenta em pó até metade da altura do jarro. Vemos então uma camada negra sobre uma camada branca — uma distribuição improvável do conjunto global de partículas. Esta configuração tem uma entropia relativamente baixa porque é altamente organizada. Agora agitemos vigorosamente o jarro. O resultado final é uma mistura cinzenta, uma configuração desorganizada do sal e da pimenta. Se continuarmos a agitar o jarro, é muito pouco provável que a configuração original volte a ocorrer. Nem depois de o agitar por um milhão de anos ela ocorreria de novo. A entropia, ou desorganização, do sistema aumentou permanentemente. Este exemplo ilustra a segunda lei da termodinâmica: para um sistema isolado, a entropia aumenta sempre. Um sistema passará sempre de uma configuração menos provável (pimenta negra sobre sal branco) para uma outra mais provável (mistura cinzenta). É

essencial que o sistema seja fechado para que a lei da entropia seja aplicável. Se abrirmos o jarro que contém a mistura cinzenta e separarmos cuidadosamente o sal e a pimenta, podemos recriar a configuração inicial.

Quando eu andava no primeiro ano da universidade, o meu colega de quarto e eu chegámos à conclusão de que estávamos cansados de limpar e arrumar o quarto que partilhávamos e decidimos deixá-lo atingir um estado de «entropia máxima». Se pegássemos em qualquer objeto, não podíamos deixar de o limpar, mas em breve o quarto atingiria o nível de sujidade inicial. O problema das limpezas estava assim resolvido, mas em breve surgiu outro problema — não conseguíamos encontrar nada. Eram-nos necessários vários minutos para encontrar os objetos que procurávamos. Finalmente, concluímos que o estado de entropia máxima não nos estava a poupar tempo e esforço e voltámos a um estilo de vida mais convencional.

A lei do aumento da entropia manifesta-se em tudo aquilo que se passa em torno de nós. O fenómeno da deterioração material é um exemplo. Tudo, mais tarde ou mais cedo, se desagrega — os edifícios ruem; nós envelhecemos; a fruta apodrece. A lei do aumento de entropia pode aplicar-se ao universo como um todo porque o universo pode ser considerado um sistema fechado. Também o universo pode vir a morrer, uma «morte térmica» em que as estrelas esgotam o seu combustível e a matéria é dispersada por todo o espaço — a desordem total que ninguém poderá organizar de novo. Seria um inóspito e gelado final dos tempos.

A lei do aumento da entropia é muito interessante, porque é uma lei fundamental e, no entanto, tem carácter estatístico. Na realidade, a lei do aumento da entropia surge porque uma configuração altamente organizada é improvável quando comparada com uma configuração desorganizada e é mais viável que a evolução de um sistema seja de um estado menos provável para outro mais provável. As mãos invisíveis criam sempre desordem. Suponhamos que temos dois recipientes fechados, A e B, de igual volume, ligados por um tubo com uma válvula fechada. O recipiente A está cheio com um gás e o recipiente B está vazio. Se abrirmos a válvula, o gás escapa-se do recipiente cheio para o recipiente vazio até se atingir uma situação de equilíbrio em que as pressões em A e em B são iguais.

O gás move-se de acordo com a lei do aumento de entropia. Assim que a válvula é aberta, é uma configuração extremamente improvável que todo o gás permaneça em A, e, portanto, ele escapa-se para B até que seja atingido um estado de entropia máxima. Esta configuração de iguais pressões é simplesmente a mais provável (como no caso da mistura cinzenta do sal e da pimenta), e esta é a razão pela qual ela ocorre.

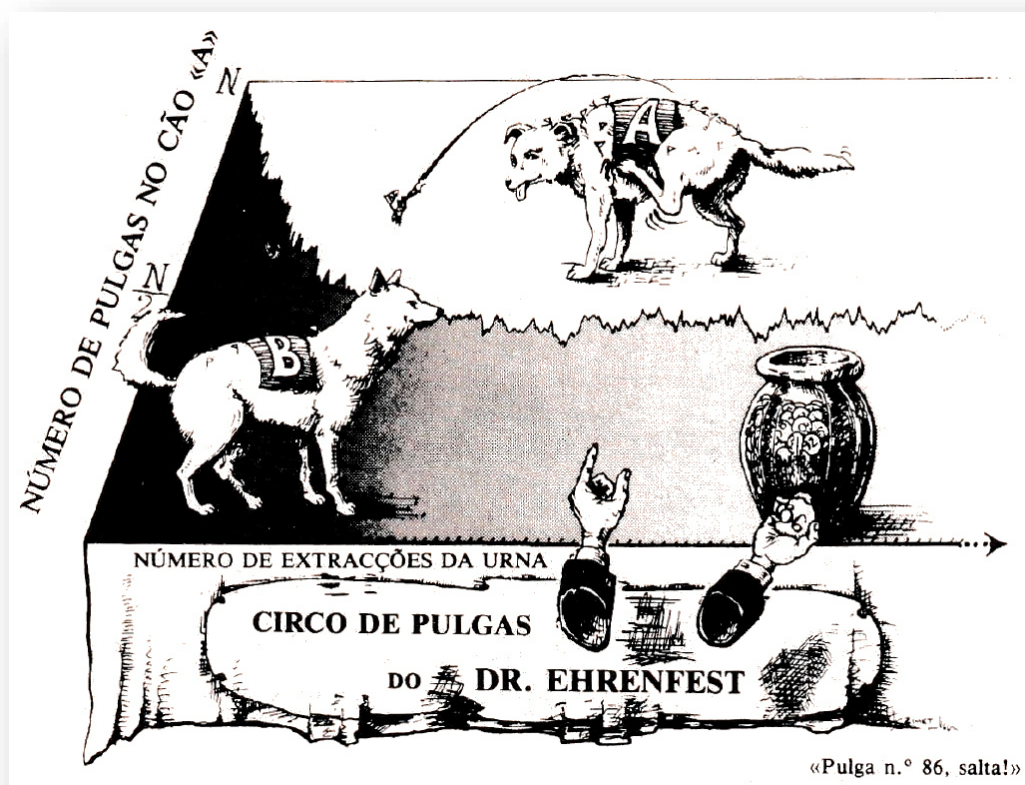
Do ponto de vista dos movimentos mecânicos individuais das partículas de gás — na descrição microscópica —, a situação é inteiramente diferente. É verdade que uma partícula de gás se moverá do recipiente a pressão mais elevada, A, para a região correspondente a uma pressão mais baixa, o recipiente B. Mas, como o movimento das partículas é aleatório, é igualmente provável que uma partícula que chegou até B volte para A. O matemático

francês Poincaré mostrou, usando as leis da física clássica, que um sistema como este retornará a um estado arbitrariamente próximo do seu estado original, com todas as partículas de novo no recipiente A. Será que este comportamento contradiz a lei do aumento da entropia? Aparentemente, sim.

Para esclarecer este problema, os matemáticos Paul e Tatiana Ehrenfest fizeram um modelo matemático simples que simulava a mecânica estatística do fluxo de um gás de A para B. Imaginemos dois cães, A e B, que representam os dois recipientes. Cão A tem pulgas, num total de N , enquanto o cão B não tem. Cada uma das pulgas tem um número, de 1 a N . As pulgas representam, neste modelo, as partículas de gás. Perto dos cães está uma urna contendo N bolas numeradas de 1 a N . As pulgas podem saltar de um cão para o outro, mas têm de esperar que alguém retire uma bola numerada da urna. Quando o número é chamado — «pulga número 86, salte!» —, a pulga que tiver esse número salta do cão em que estiver para o outro. A bola é repostada na urna e misturada com as outras, e uma nova bola é então retirada, repetindo-se o processo tantas vezes quantas se quiserem. Repare-se que cada pulga tem igual probabilidade de ficar sobre o cão em que está ou de saltar para o outro, tal como as moléculas de gás nos recipientes A e B.



Dois recipientes de gás, A e B, com um demónio amigável que abre a válvula de comunicação. Do nosso ponto de vista, o gás flui do recipiente cheio, A, para o recipiente vazio, B, porque a pressão é maior em A. Mas, de acordo com a mecânica estatística e com a segunda lei da termodinâmica (lei do aumento da entropia), este comportamento é devido a uma questão de probabilidades. Mas como é possível que o gás flua globalmente de A para B se, para cada molécula, é tão provável a sua ida de A para B como de B para A?



Os Ehrenfest ilustraram a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica através de dois cães, A e B, que representavam os dois recipientes de gás, A e B. A

princípio, o cão A tem todas as pulgas, mas, quando se chama o seu número, cada pulga salta do cão em que está para o outro. Rapidamente se estabelece um número igual de pulgas em cada cão — uma configuração de equilíbrio em torno da qual há pequenas flutuações estatísticas.

A princípio, todas as pulgas estão no cão A, e, portanto, quase todos os saltos devem ser na direção do cão B. Mas dali a pouco haverá quase o mesmo número de pulgas em A e em B e torna-se tão provável que uma pulga salte de A para B como de B para A. Isto corresponde a uma configuração de equilíbrio semelhante à que existia no caso dos gases. Suponhamos que existem $N = 100$ pulgas. Então, em média, haverá 50 pulgas em cada cão. Mas, em geral, haverá flutuações. Por vezes poderá haver 43 pulgas no cão A e 57 no cão B. Mas, ao longo da maior parte do tempo, o número de pulgas em cada cão será muito próximo de 50.

Pode acontecer, no entanto, que depois de muitos saltos se verifique uma flutuação muito grande e todas as pulgas estejam no mesmo cão. Isto é extremamente improvável mesmo para 100 pulgas. Mas imaginemos que só havia 4 pulgas. Então, de tempos a tempos, seria bastante provável que todas as pulgas estivessem no mesmo cão.

Este modelo muito simples ilustra bem a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica — a lei do aumento de entropia. A lei tem significado apenas para um grande número de partículas, isto é, em circunstâncias em que se possa falar de uma distribuição de probabilidades, de médias em relação aos movimentos de um grande número de partículas. A mão invisível pode apenas existir enquanto reflexo coletivo de um grande número de acontecimentos individuais. Para um pequeno número de partículas de gás, ou de

pulgas, a lei é de facto inaplicável. Podemos passar muito frequentemente de um estado com igual número de pulgas em cada cão a outro com todas as pulgas num mesmo cão. Mas, para gases reais, o número de partículas envolvidas é de triliões e a probabilidade de que a configuração inicial seja atingida desta forma é correspondente a uma vez em biliões de biliões de vezes a idade do nosso universo. É extremamente improvável que uma grande flutuação envolvendo um tão elevado número de partículas possa ocorrer. É uma aposta segura, quase certa, que a entropia nunca diminua num sistema fechado contendo um grande número de partículas. A lei do aumento de entropia é estatística e não absolutamente certa.

Pode parecer que o Deus-que-joga-aos-dados já entrou na nossa descrição da realidade material, porque atingimos uma descrição estatística de um gás. Mas não é assim. As leis da física clássica, a partir das quais as leis da termodinâmica, como a do aumento da entropia, foram deduzidas, são ainda completamente deterministas. Elas foram descobertas por físicos ligados a uma física determinista. Nós, mortais, podemos não conseguir calcular o movimento de todas as partículas de um gás. No entanto, isto é apenas um problema prático, e não uma questão de princípio. Os mortais devem jogar aos dados e utilizar métodos estatísticos para estudar o comportamento de sistemas como gases. Mas, para a mente de Deus, que pode conhecer exatamente o movimento de cada partícula, nenhum método estatístico é necessário — Deus não joga aos dados na física clássica. Ele pode conhecer exatamente todas as flutuações num gás.

O carácter estatístico da lei do aumento da entropia é apenas um dos seus aspetos. Outra propriedade extremamente importante da segunda lei da termodinâmica é que ela não pode ser deduzida apenas das leis clássicas do movimento. Este facto parece contradizer o próprio objetivo da mecânica estatística, que residia em deduzir as leis termodinâmicas a partir das leis de Newton. Mas a análise desta propriedade aprofunda a nossa compreensão da segunda lei e da relação da física com a experiência humana. Como podemos estar certos de que esta lei não pode ser obtida apenas a partir das leis do movimento das partículas individuais? Isto é fácil de ver.

A descrição microscópica de um sistema físico em termos do movimento individual das partículas é dada pelas leis de Newton para o movimento, que são o nosso ponto de partida. Estas leis de movimento não fazem distinção entre o passado e o futuro; do ponto de vista do mundo microscópico, o tempo pode literalmente ter qualquer dos sentidos. Um átomo não sabe o que é envelhecer — é o modo como os átomos se organizam que determina a idade. A irreversibilidade do tempo, o envelhecimento e o apodrecimento da fruta são apenas ilusões do ponto de vista da microfísica. Mas a lei do aumento da entropia com o tempo dá ao tempo uma orientação, um sentido que permite distinguir entre passado e futuro. Se uma peça de fruta podre se tornasse verde, em contradição com a lei do aumento da entropia, seria como se o tempo andasse para trás. As leis microscópicas são assim ditas invariantes relativamente a inversão do tempo, enquanto as leis macroscópicas, como a lei do aumento da entropia, o não são. É, portanto, impossível deduzir a segunda lei da termodinâmica, que

é uma lei para a variável macroscópica entropia, apenas a partir das leis da mecânica de Newton. Não existem malabarismos matemáticos que nos possam conduzir de um conjunto de leis para o outro. É claramente necessário fazer uma suposição adicional se queremos deduzir a lei do aumento da entropia a partir das leis de Newton. Gostaria de discutir esta suposição, porque nos diz algo sobre a relação das leis fundamentais do microcosmo com a nossa experiência imediata.

Para ilustrar esta suposição adicional, imaginemos que existe uma câmara de filmar com uma lente que permite a focalização sobre qualquer objeto, macroscópico ou microscópico. Vamos filmar uma pessoa que está a fumar cachimbo, evoluindo lentamente com a câmara do micromundo para o macromundo. O filme é então projetado num *écran*.

A princípio vemos apenas o micromundo das partículas de ar e de fumo chocando entre si. Todas as partículas obedecem às leis do movimento de Newton. Se o filme fosse projetado de trás para a frente, todas as partículas inverteriam o seu movimento no *écran*. Mas, qualitativamente, este movimento é igual ao anterior — é um conjunto de partículas que se entrechocam. Não nos é possível determinar o sentido de passagem do tempo a partir desta perspetiva microscópica porque as leis de Newton não distinguem o passado do futuro.

Imaginemos agora que a lente abarca uma área visual cada vez maior. Quando deixamos de ver as partículas individuais de fumo e de ar que se entrechocam, estamos a perder informação. O que

começamos a distinguir nesta fase são as pequenas línguas de fumo — a distribuição *média* das partículas no tempo. Se projetássemos o filme de trás para a frente, a este nível, seria ainda difícil reconhecê-lo a partir do que veríamos no *écran*. Mas começaríamos a suspeitar quando víssemos línguas de fumo a condensar-se em vez de se expandirem, porque isso parece improvável. O que se passou foi que, ao ignorar a informação microscópica em favor da informação macroscópica — ao eliminar o movimento individual das partículas, conservando apenas as médias —, caímos no terreno da suposição suplementar que liga a mecânica de Newton à termodinâmica. Não há forma de perder a pormenorizada informação microscópica sem aumentar a entropia. As nossas médias relativas à descrição microscópica, que apagam os detalhes do processo, violam necessariamente o carácter invariante relativamente à inversão do tempo do mundo microfísico. Poderíamos dizer que é a nossa própria exigência — a exigência de que exista uma descrição macroscópica, de que faça sentido falar de médias em relação à informação microscópica — que introduz a seta do tempo.

Em que ponto do filme nos apercebemos de que ele está a ser projetado de trás para a frente? Se observarmos algumas imagens do mundo macroscópico, vemos uma pessoa que inala fumo a partir do ar e que o reconstitui em tabaco de cachimbo. Não há dúvidas de que agora o filme está a ser projetado em sentido inverso. O ponto na sequência do filme em que reconhecemos que a seta do tempo aponta para trás é quando reconhecemos fenómenos que são impossíveis ou muito improváveis. Somos nós que reconhecemos o padrão e somos nós que impomos a descrição

macroscópica da realidade física, uma realidade que não se aplica ao mundo microfísico.

Vemos, portanto, que é possível traçar uma linha entre o micromundo e o macromundo da nossa experiência humana — são duas descrições qualitativamente diferentes da realidade material. As nossas mentes e os nossos corpos respondem às macrovariáveis termodinâmicas, que são distribuições dos movimentos microscópicos. Sentimos uma temperatura bem definida, e não o bombardeamento de biliões de partículas na superfície da pele. Envelhecemos e a vida está cheia de riscos que têm significado apenas porque algumas decisões são irreversíveis — não podemos voltar atrás no tempo. E, todavia, do ponto de vista microscópico, tudo isto é uma ilusão.

O facto de não termos uma continuidade lógica entre as descrições do micromundo e do macromundo sem introduzir uma suposição suplementar tem implicações na filosofia do reducionismo material. Na sua forma mais crua, o reducionismo material sustenta que existe uma série de níveis. No nível mais baixo estão as partículas subatómicas, e a partir destas são obtidas as propriedades químicas dos átomos e moléculas. As moléculas formam as coisas animadas e inanimadas, e a partir do comportamento das moléculas e das células é possível determinar o comportamento dos seres humanos individuais. Por seu turno, estes estabelecem a ordem social e as instituições. Finalmente, no último degrau da escada estão os acontecimentos históricos. Assim, a história é, em princípio, materialmente redutível aos fenómenos subatómicos.



Niels Bohr fumando o seu cachimbo. Imagine esta cena num filme. Se olharmos para o fumo muito de perto, tudo o que vemos são partículas que se entrecrocaram e não podemos concluir qual é o sentido em que o filme está a ser projetado — não conseguimos saber qual é o sentido da passagem do tempo. Se abrangermos uma maior área visual, começamos a distinguir línguas de fumo e, se o filme estiver a ser projetado de trás para a frente, talvez o consigamos detetar — e conhecer o sentido do decurso do tempo. Finalmente, a cena global possui claramente uma seta do tempo porque, se virmos que o fumo entra no cachimbo, sabemos que o filme está a ser projetado de trás para a frente. Repare o leitor no vaso com flores. Ou serão dois perfis? Esta é uma metáfora visual para a realidade criada pelo observador e para o princípio da complementaridade.

Mas é claro, a partir da nossa discussão sobre a forma como a seta do tempo é estabelecida, que tal redução é impossível mesmo do nível das partículas subatómicas para o dos átomos. Uma descrição do macromundo implica tomar médias que apagam informação proveniente do micromundo, e somos nós quem toma as médias. Podemos também ver que acontecimentos históricos

como uma revolução social não são sequer redutíveis às ações individuais das pessoas que nela tomam parte. Duas pessoas que observem uma mesma revolução social podem concordar absolutamente acerca dos acontecimentos individuais — o que foi dito por quem, quando e onde. Mas essas mesmas duas pessoas podem discordar completamente quanto ao significado do acontecimento histórico. Elas veem padrões diferentes e servem-se da sua experiência pessoal para interpretar os acontecimentos.

Apesar de discordarmos relativamente aos padrões observados nos acontecimentos sociais, todos parecemos concordar quanto ao sentido de passagem do tempo. Os físicos podem deduzir as leis da termodinâmica introduzindo médias relativas a um grande número de acontecimentos do mundo microfísico, processo que é matematicamente consistente. Mas por que conhecem os seres humanos o mundo apenas em termos desse processo matemático de tomar as médias? Quem nos disse que fizéssemos isso?

Julgo que a resposta está no processo de evolução biológica. Existe uma pressão evolutiva na direção de organismos que não reagem a fenômenos atômicos individuais, mas desenvolvem órgãos recetores que medem as propriedades globais das distribuições, como a pressão e a temperatura. Houve valor seletivo no processo que conduziu à perda da informação detalhada em favor da informação relevante. Esses organismos foram os primeiros a reconhecer padrões e tiveram sucesso do ponto de vista evolutivo. As distribuições, as mãos invisíveis, adquirem realidade através do processo evolutivo.

Richard Dawkins escreveu um livro maravilhoso, *The Selfish Gene*², que descreve como os padrões biológicos e comportamentais dos seres humanos e dos animais podem ser previstos supondo que determinados genes — conjuntos de moléculas de proteínas numa molécula de ADN ou de ARN³ — são egoístas e querem sobreviver a todo o custo. Os genes, na sua luta evolucionária pela sobrevivência, deram origem a corpos versáteis em torno de si — os nossos corpos — e a civilização é apenas a forma astuciosa de organização e de perpetuação destas moléculas. Isto parece demasiado — talvez mesmo mais do que os proponentes desta teoria sustentam —, e na verdade é a antiga filosofia do reducionismo material aplicada à biologia. Um amigo meu, director de um laboratório de biologia molecular, foi sondado pelos seus alunos a respeito dos pontos de vista de Dawkins. Teria ele realmente razão? No dia seguinte respondeu-lhes e disse-lhes que Dawkins estava errado. Os genes não eram egoístas; era de facto uma ligação química específica que tentava egoistamente perpetuar-se. Os genes eram apenas os instrumentos desta ligação química, tal como nós somos o instrumento dos nossos genes — uma redução ao absurdo.

Sem dúvida que o comportamento humano e animal é materialmente condicionado pela organização microscópica dos genes, tal como o aumento de entropia é materialmente condicionado pelos movimentos das moléculas. A prova desse condicionamento é descrita no livro de Dawkins. Mas não é possível reduzir todo o comportamento humano aos genes microscópicos. Os genes fazem apenas aquilo que lhes é permitido pelas leis da

química. Os genes não podem ser egoístas, enquanto os seres humanos podem.

O micromundo é indiferente ao sucesso ou ao fracasso, ao egoísmo ou ao altruísmo. Mas a natureza produziu organismos que conhecem essas diferenças e que reagem a padrões que não fazem sentido do ponto de vista do micromundo. O mundo humano, apesar de apoiado materialmente pelo micromundo, existe por si próprio. A civilização reflete um padrão de existência humana que é compatível com as leis fundamentais do micromundo, mas que não pode ser deduzido a partir delas.

Os seres humanos são animais reconhecedores de padrões por excelência. Podemos reconhecer distribuições onde os outros animais se apercebem apenas dos acontecimentos individuais. Reagimos ao padrão global do mundo, um conjunto de sensações atômicas, pela criação da linguagem. Na realidade, a representação simbólica é a nossa mais elevada capacidade de organização. E a possibilidade da linguagem apoia-se na nossa capacidade de reconhecer os padrões para atribuir significado a muitas ocorrências individuais em termos de distribuições objetivas. Estamos sempre a falar sobre essas mãos invisíveis — a economia ou o estado da nação — que influenciam as nossas vidas.

Há algum significado nos acontecimentos aleatórios? Existe algum padrão? O sincronismo refere-se ao fenómeno psicológico, muitas vezes ao nível inconsciente, da atribuição de um padrão ou de uma relação a acontecimentos aleatórios diferentes. As folhas caem quando os amantes se separam. Os pauzinhos são lançados

para determinar um padrão do *I Ching* — o *Livro da Mudança* chinês. Como é sedutor pensar que os acontecimentos individuais não são aleatórios, mas têm uma causa! A mente, a um determinado nível, não pode aceitar coincidências puras e procura um padrão bem definido. Evidentemente, este comportamento tem valor seletivo no desenvolvimento da nossa espécie, porque estamos prontos a reconhecer padrões em quaisquer configurações, mesmo que estas sejam aleatórias.

É a possibilidade de errar que abre as portas à mudança bem-sucedida. Os erros na transmissão de informação genética de geração para geração estimulam o processo evolutivo.

Na antiga física clássica, até os erros como aqueles que produzem as mutações genéticas são em princípio completamente determinados. Mesmo as alterações genéticas que regem o futuro da evolução biológica são conhecidas para uma mente todopoderosa. Mas, com o advento da teoria quântica, esta imagem clássica da realidade ruiu e foi substituída pela do universo indeterminado. Ocorrem de facto transformações espontâneas, indeterminadas mesmo para a mente perfeita de Deus, — por exemplo, algumas alterações aleatórias numa cadeia de ADN que produzem um mutante bem-sucedido. É esta a razão pela qual o indeterminismo da teoria quântica é tão importante para a nossa imagem da realidade: em princípio, existe uma base material para a liberdade da consciência humana e para a evolução das espécies.

A natureza nada sabe sobre imperfeição; a imperfeição é uma percepção humana da natureza. Enquanto parte da natureza, somos

também perfeitos; é a nossa humanidade que é imperfeita. E, ironicamente, é devido a essa nossa capacidade para a imperfeição e para o erro que somos livres — uma liberdade que nenhuma pedra nem nenhum animal pode saborear. Sem a possibilidade de erro e sem a real indeterminação que a teoria quântica implica, a liberdade humana não faz sentido.

O Deus-que-joga-aos-dados libertou-nos.

¹ Cf. p. 78, nota 13. (N. do T.)

² Literalmente, *O Gene Egoísta*, tanto quanto sabemos ainda não editado em Portugal. (N. do T.)

³ Existe uma pequena incorreção: ao contrário do que poderia ser sugerido pelo texto, as moléculas de ADN ou ARN não contêm moléculas de proteínas, mas sim a informação necessária à sua síntese. Os genes são, por seu lado, regiões específicas do ADN ou do ARN responsáveis pela informação relativa a determinadas atividades celulares. (N. do T.)

CAPÍTULO 9

Fazendo Ondas

Acho que se pode dizer, sem receio de desmentido, que ninguém compreende a mecânica quântica. Não diga para si mesmo, se o puder evitar, «Mas como é que isso pode ser assim?», porque se irá enfiar sem esperanças num beco do qual ninguém até hoje conseguiu sair. Ninguém sabe como é que isso pode ser assim.

RICHARD FEYNMAN

Completámos a nossa expedição à natureza do acaso, da probabilidade e da mecânica estatística e aprendemos que, ainda que o caos reine ao nível microscópico, os matemáticos não estão sequer certos daquilo que é o caos. Mais ainda, o programa ingénuo do reducionismo material — a redução da experiência humana aos acontecimentos atômicos — não pode ser realizado. Mas chegou a altura de nos voltarmos para a nossa principal tarefa — descobrir a natureza da realidade quântica a partir da teoria quântica.

Imaginemos que estamos num grupo de peregrinos, numa viagem que qualquer pessoa deve realizar uma vez na vida. Será como o *hajj* — a peregrinação que todo o muçulmano fiel deve fazer pelo menos uma vez na vida à cidade sagrada de Meca — ou como a peregrinação dos personagens de Chaucer¹ à Catedral de Cantuária. Mas a nossa viagem não é a uma cidade sagrada; temos

de nos contentar em vaguear ao longo da estrada que conduz à realidade quântica, não estando certos de aonde ela nos levará. Somos exploradores e devemos estar preparados para todos os tipos de experiências novas. Pelo caminho encontraremos várias experiências e imagens destinadas a expor os aspetos da realidade quântica de que andamos à procura. As primeiras experiências que analisaremos são várias experiências conceptuais com ondas — experiências que, na realidade, poderiam ser feitas, mas que aqui se destinam apenas a fazer sobressair as estranhas propriedades do mundo quântico.

A interpretação da nova teoria quântica segundo a escola de Copenhaga acabou com a ideia clássica de objetividade — a concepção de que o mundo possui um estado de existência bem definido, independentemente da nossa observação. Isto contrasta com a nossa experiência habitual do mundo, que apoia a visão clássica da objetividade segundo a qual o mundo continua a existir mesmo que não entremos em contato com ele. Ao acordar de manhã, o mundo está tal e qual como quando o deixámos. Mas a interpretação de Copenhaga sustenta que, se observarmos o mundo suficientemente de perto — ao nível dos átomos —, então o seu estado real de existência depende parcialmente do modo como o observamos e daquilo que decidimos observar. Vamos examinar a forma como a interpretação de Born das ondas de Schrödinger — o indeterminismo do mundo quântico — implica que a realidade objetiva seja substituída pela realidade criada pelo observador. O mundo atómico pura e simplesmente não existe num estado bem definido até que nós montemos um dispositivo experimental e o observemos. A interpretação de Copenhaga é super-realista — não

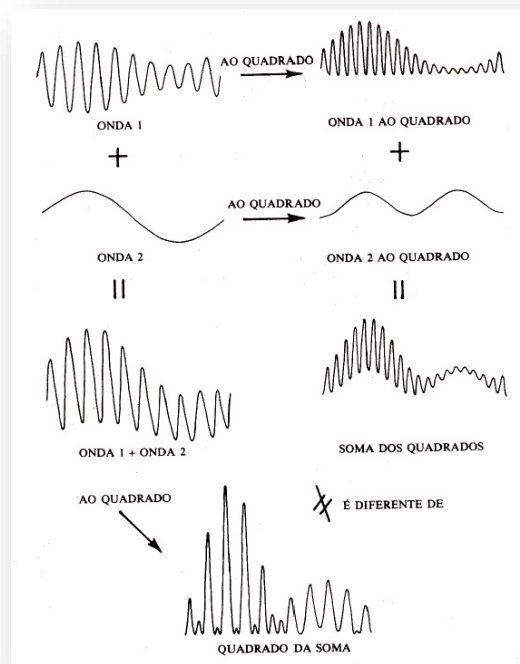
são permitidas fantasias ou racionalizações a respeito da realidade material.

Recordemos que de Broglie e Schrödinger pensavam que as ondas da teoria quântica eram um certo tipo de ondas de matéria. Mas Max Born compreendeu que essas ondas não têm nada a ver com qualquer tipo de onda material, como as ondas do mar. A sua interpretação estatística afirmava que elas eram ondas relativas à probabilidade de encontrar partículas em qualquer ponto do espaço.

Born deu um exemplo que descreve as diferenças entre uma onda de matéria e uma onda de probabilidades — a metralhadora de Max Born. Se fizermos explodir uma grande quantidade de pólvora e estivermos junto a ela, somos mortos pela explosão. Mas se estivermos a cerca de 40m, somos atingidos apenas pela onda de choque. A onda de choque é realmente uma onda de matéria e a sua influência diminui com a distância. Tomemos agora a pólvora e utilizemo-la para fazer balas para uma metralhadora. A metralhadora está assente num suporte giratório e dispara as balas numa direção aleatória, de modo que, se estivermos junto à metralhadora, seremos atingidos quase de certeza e, mesmo que estejamos a 40m, não estamos livres de perigo. Ao contrário da onda de choque relativa à explosão, há uma probabilidade pequena, mas finita, de uma bala nos atingir mortalmente. Podemos assim imaginar uma probabilidade matemática para que uma bala seja encontrada longe da arma — uma distribuição de probabilidades no espaço semelhante às ondas de probabilidade da teoria quântica. Apesar de esta probabilidade diminuir com a distância à arma, uma

bala particular ou atinge o alvo ou não atinge, tal como um elétron é encontrado ou não é.

A metralhadora de Max Born mostra que o conceito de uma distribuição de probabilidades pelo espaço e tempo não é estranho à física clássica. As probabilidades possuem na física clássica uma propriedade extremamente importante — elas adicionam-se linearmente para acontecimentos mutuamente exclusivos. Por exemplo, suponhamos que uma pessoa está dentro de uma casa que tem uma porta da frente e uma porta nas traseiras. Se a probabilidade de que a pessoa saia pela porta da frente e vá fazer compras é p_1 e a probabilidade para o acontecimento mutuamente exclusivo de sair pela porta das traseiras e ir fazer compras é p_2 , então a probabilidade total de que a pessoa vá fazer compras nesse dia é $p = p_1 + p_2$ — as probabilidades somam-se. Esta simples adição das probabilidades — quase evidente por si própria — não é válida na teoria quântica. As probabilidades na teoria quântica não têm análogo clássico, porque não são linearmente aditivas; são não lineares.



Em física clássica, para se calcular a probabilidade de dois acontecimentos independentes adicionam-se simplesmente as probabilidades para cada um. Mas em mecânica quântica, e de acordo com o princípio da sobreposição, devemos somar primeiro as amplitudes de onda para cada um dos acontecimentos independentes — como a passagem do elétron por fendas diferentes — e elevar esta soma então ao quadrado, para obter a distribuição total de probabilidades. Como mostra a figura, o resultado é muito diferente do esperado utilizando a física clássica: o quadrado da soma não é igual à soma dos quadrados. Esta é a razão pela qual as partículas quânticas não obedecem às leis usuais da física clássica e põem em evidência estranhas propriedades quânticas.

Para compreendermos a natureza não linear das probabilidades na teoria quântica temos de analisar mais profundamente a interpretação estatística de Born para a função de onda de, de Broglie-Schrödinger. O ponto de vista de Born era o de que os elétrons seriam partículas — entidades distintas —, mas o seu comportamento seria descrito por uma onda de probabilidades. A teoria quântica determinava precisamente a forma e o movimento da onda de probabilidades.

Se olharmos para as ondas do mar, veremos que elas parecem mover-se umas através das outras. As amplitudes, ou alturas, das ondas somam-se para dar a altura total. Se uma das ondas atingiu a altura máxima num dado ponto e a outra o seu ponto mínimo, a sua soma será zero. Este princípio de adição das amplitudes das ondas parciais para obter o total é chamado «princípio de sobreposição» e está no cerne da teoria quântica.

Tal como as ondas vulgares, as ondas de probabilidade da teoria quântica obedecem ao princípio de sobreposição — se houver duas ondas de probabilidade numa região do espaço, as amplitudes destas ondas somam-se para dar a amplitude de onda total. Mas havia outro aspeto importante na interpretação de Born. A probabilidade de encontrar uma partícula num ponto do espaço não é dada pela altura da onda nesse ponto, mas sim pela intensidade da onda — a altura do quadrado da onda, obtida pela multiplicação da altura da onda nesse ponto por si própria. A multiplicação de um número positivo ou negativo por si próprio resulta sempre num número positivo. Assim, a intensidade de uma onda é sempre uma quantidade positiva e Born identificou-a com a probabilidade de encontrar uma partícula — também ela sempre uma quantidade positiva. Como, por um lado, as amplitudes de onda se adicionam, pelo princípio de sobreposição e, por outro, a probabilidade de encontrar uma partícula é dada pelo quadrado da amplitude da onda — a sua intensidade —, as probabilidades na teoria quântica não são aditivas, e daqui resulta um carácter não linear das probabilidades quânticas, contrariamente às probabilidades correntes da física clássica.

Por exemplo, suponhamos que temos um elétron numa caixa — como a pessoa na casa — e que numa parede da caixa há dois pequenos orifícios muito próximos — como as portas da casa. Se taparmos um dos orifícios, a probabilidade de que o elétron saia da caixa e seja detetado no exterior é p_1 ; e, se taparmos o outro orifício, a probabilidade de encontrar o elétron no mesmo ponto é p_2 . Mas, se destaparmos ambos os orifícios, a probabilidade total de detetar o elétron nesse ponto do exterior da caixa, p , não é igual a $p_1 + p_2$, como era no caso da pessoa ao sair de casa. A razão deste comportamento peculiar é que o princípio de sobreposição implica que as ondas de probabilidade associadas com a saída do elétron através de cada um dos orifícios podem interferir construtiva ou destrutivamente entre si, e portanto a intensidade total, que dá a probabilidade total, pode ser maior ou menor do que a soma das probabilidades individuais.

Esta interferência das ondas de probabilidade não tem análogo no mundo clássico dos objetos quotidianos e está na base fundamental da peculiaridade quântica. A ilustração mais clara deste aspeto da peculiaridade quântica está na experiência das duas fendas. Se analisarmos cuidadosamente esta experiência, poderemos ver como a interpretação estatística de Born e o princípio de sobreposição, tomados em conjunto, implicam uma realidade criada pelo observador.

Nos anos 50, o físico americano Richard Feynman realizou uma série de conferências de divulgação patrocinadas pela BBC. Numa dessas conferências descreveu a experiência das duas fendas, que consiste numa fonte localizada a uma certa distância de uma

barreira com fendas, por detrás da qual está colocado um alvo de deteção. Ele considerou um conjunto de três experiências, utilizando sucessivamente balas de metralhadora, ondas e eletrões.

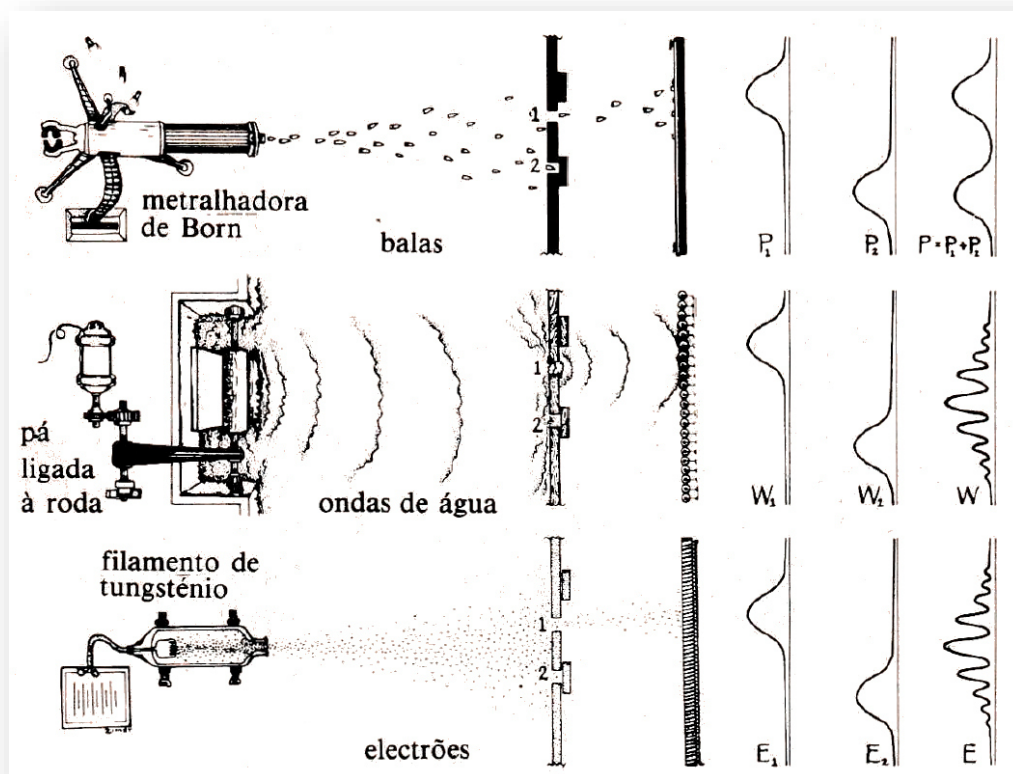
Imaginemos em primeiro lugar que a fonte consiste na metralhadora de Max Born, que dispara balas contra a barreira — uma placa de aço com dois pequenos orifícios ou fendas. Por detrás da barreira está uma placa espessa de madeira, que funciona como alvo de deteção de balas. Numeremos os orifícios 1 e 2. Tapamos o orifício 2 no início da experiência e disparamos balas em direção à placa de aço. Algumas balas passam através do orifício 1 e medimos a sua distribuição no alvo de madeira. Chamamos a esta distribuição de partículas P_1 . O mesmo é feito destapando o orifício 2 e tapando o 1, e encontramos uma nova distribuição, P_2 . A seguir destapamos ambos os orifícios. A distribuição resultante das balas que atingem o alvo é P e concluímos que ela é dada simplesmente pela soma $P = P_1 + P_2$. As balas comportam-se como partículas regidas pelas leis da física clássica e a distribuição de probabilidade total para atingir o alvo é dada simplesmente pela soma das quantidades correspondentes a cada um dos orifícios separadamente.

Na experiência seguinte adotamos a mesma configuração, mas, em lugar de balas, utilizamos ondas de água. A fonte consiste agora numa pá ligada a uma roda, parcialmente imersa na água; ela gera, quando posta em movimento, uma onda que atinge a barreira com as duas fendas. Como detetor das ondas de água, colocamos por detrás da barreira um alvo feito de um grande número de boias de cortiça. A altura das boias de cortiça determina a amplitude, e assim

a intensidade, da onda. Se taparmos o orifício 2 e medirmos a intensidade da onda no alvo, obtemos a distribuição W_1 , que se assemelha à distribuição P_1 , obtida com balas. De forma análoga, obtemos W_2 , que se parece com P_2 . Mas, se abrirmos ambos os orifícios, a distribuição resultante, W , não se parece absolutamente nada com a distribuição P , obtida para o caso da metralhadora — não é simplesmente a soma $W_1 + W_2$. Em vez disso, tem todo um conjunto de sinuosidades que resultam da interferência das ondas provenientes das fendas 1 e 2 entre si. As ondas vindas de 1 e 2 podem cancelar-se ou reforçar-se. A diferença entre os dois resultados é que as ondas podem interferir entre si, ao passo que as partículas (balas) não podem.

Até aqui, as nossas experiências foram experiências perfeitamente clássicas. Nada de estranho acontece — tudo ocorre à frente dos nossos olhos.

Na nossa próxima experiência utilizamos elétrons como projéteis e a fonte é um filamento de tungsténio aquecido que ejeta elétrons, a barreira é uma fina chapa metálica com duas fendas e o alvo é um conjunto de detetores de elétrons dispostos num plano. Não se põe em questão que os elétrons sejam partículas reais, podemos medir a sua carga, a sua massa, o seu *spin*, e podemos ver os traços que deixam nas câmaras de nevoeiro de Wilson.



As três diferentes experiências das duas fendas descritas no texto: a metralhadora de Max Born, as ondas de água e os eletrões. Enquanto podemos visualizar a forma como as balas e as ondas de água (umas e outras objetos da física clássica) produzem os padrões observados nos respetivos alvos de deteção, não podemos visualizar o que acontece aos eletrões (partículas quânticas) nas fendas para produzirem o padrão observado no alvo.

Os eletrões são disparados contra a barreira com o orifício 2 tapado e os eletrões, como pequenas balas, têm de passar todos pelo orifício 1, de modo que a sua distribuição, E_1 , é semelhante a P_1 e a W_1 . Analogamente, podemos determinar E_2 , que é semelhante a P_2 e a W_2 . No entanto, quando destapamos ambos os orifícios, a distribuição resultante é semelhante a W — a distribuição das ondas de água!

É importante lembrarmo-nos do facto de os detetores de partículas detetarem os eletrões um a um no alvo. Os eletrões são detetados como partículas reais e, após muitas deteções

individuais, a distribuição é E. Assim, concluiríamos que os eletrões se comportam nesta experiência como ondas. Mas que tipo de ondas?

De acordo com a teoria quântica, o eletrão não se comporta como uma onda de água ou como uma onda de matéria. O que se comporta como onda é a amplitude de probabilidade para encontrar eletrões — ondas de probabilidade!

Apesar de o eletrão ser uma partícula, a distribuição dessas partículas no alvo é semelhante à de uma onda — e completamente diferente da distribuição das balas. O que se passa aqui?

Analisemos logicamente a afirmação «O eletrão passa ou pelo orifício 1 ou pelo orifício 2». Se medirmos as propriedades de um único eletrão, ele é de facto uma partícula e, se acreditarmos na objetividade clássica, a proposição acima deve ser verdadeira, tal como no caso das balas de metralhadora que devem passar seja pelo orifício 1 seja pelo orifício 2, mas sempre por um deles. Como o eletrão é uma partícula, se o mundo é objetivo, ele permanece sempre como partícula e claramente tem de passar pelo orifício 1 ou pelo orifício 2. Mas, se a afirmação acima está correta, não obteremos a distribuição que é experimentalmente observada, a distribuição semelhante à da água; pelo contrário, obtemos o padrão das balas. Concluimos assim que para o mundo real a afirmação é falsa, ou, quando muito, sem significado.

O que está em causa é a noção de objetividade clássica — a peculiaridade quântica afetou a nossa simples experiência. De acordo com a interpretação de Copenhaga, a afirmação acima, segundo a qual o eletrão passa pela fenda 1 ou pela fenda 2, não tem significado até estabelecermos realmente um sistema de deteção junto de cada fenda para verificar através de qual delas passa o eletrão. Não podemos falar sobre os acontecimentos sem os observar — o super-realismo de Niels Bohr. Isto é completamente diferente da imagem clássica do mundo que supõe a objetividade do mundo mesmo que nós não o observemos: uma partícula permanece uma partícula e *tem de passar* por uma das fendas.

O que acontece realmente aos eletrões que se aproximam da barreira não pode ser visualizado. Se tentarmos visualizar o que acontece a um eletrão quando este se aproxima da barreira não o conseguiremos. Se tentarmos visualizar o que acontece quando o eletrão se aproxima das fendas e procurarmos deduzir o que se passa, enfiar-nos-emos, na expressão de Feynman, «num beco sem saída». Se tentarmos visualizar o eletrão como uma pequena bala, deveremos obter o padrão correspondente ao das balas. Mas não obtemos. Se tentarmos imaginar o eletrão como um tipo de onda, deveremos detetar ondas no alvo. Mas não detetamos — detetamos partículas, uma a uma. Há claramente um paradoxo, devido a querermos adaptar a todo o custo a imagem da objetividade que está nas nossas mentes — uma fantasia — ao mundo real. A interpretação de Copenhaga, especialmente na formulação de Bohr, insiste em que essas fantasias são desprovidas de significado porque não correspondem a nada que possa ser verificado no

mundo real. Para saber como é o mundo da realidade quântica não podemos fantasiar; temos de especificar exatamente como é que o observamos, de descer aos «parafusos e porcas». Suponhamos que somos super-realistas e analisemos o que se passa nas fendas.

Colocamos pequenos feixes de luz por trás de cada uma das fendas. Podemos agora olhar e ver por qual delas passou o eletrão, detetando simplesmente a luz dispersada pelo eletrão ao passar pela fenda. No entanto, assim que ligamos os feixes de luz, alteramos as condições experimentais iniciais e a distribuição dos eletrões no alvo muda — é a fluidez da realidade quântica que impede o paradoxo. Se sabemos exatamente através de qual das fendas passou o eletrão, a distribuição no alvo torna-se semelhante à das balas — uma distribuição de partículas. Assim que decidimos verificar experimentalmente que o eletrão é uma partícula que passa por uma das fendas, ele comporta-se como uma partícula que passa por uma das fendas.

Suponhamos que enfraquecemos os feixes de luz de modo a vermos apenas alguns dos eletrões que passam por uma das fendas. Nesse caso, a distribuição das partículas começa a transformar-se lenta e continuamente no padrão de interferências característico das ondas. A nossa pequena experiência com os feixes de luz mostra bem o significado da realidade criada pelo observador. É-nos impossível saber através de qual das fendas passou o eletrão, retendo o padrão de distribuição característico das ondas. Dispositivos experimentais mutuamente exclusivos — podemos ter os feixes de luz ou não — dão resultados mutuamente exclusivos — o eletrão comporta-se como uma partícula ou não.

Gostaria de sublinhar que o que está aqui em jogo é a natureza da realidade física. A existência objetiva de um eletrão, por exemplo numa das fendas, não tem significado independentemente de observações de facto. O eletrão parece ter existência como objeto real apenas quando o observamos! Não podemos falar coerentemente sobre a fenda que o eletrão atravessa, a menos que construamos um dispositivo experimental para o observar. A realidade quântica é racional, mas não visualizável.

A experiência das duas fendas é descrita pela teoria quântica em termos das ondas de probabilidades de Born e o comportamento do eletrão regido por uma onda desse tipo. Quando a onda de probabilidades atinge a barreira, parte dela passa através da fenda 1 e parte pela fenda 2, tal como as ondas de água. A onda está ao mesmo tempo em ambas as fendas — e nenhuma partícula pode fazê-lo! As duas ondas que emergem das fendas obedecem ao princípio da sobreposição; elas somam-se e dão origem ao padrão de interferências detetadas no alvo. A famosa peculiaridade quântica reside no facto de, enquanto não detetamos o eletrão, ele se comportar como uma onda de probabilidade. Quando o detetamos, ele é uma partícula. Mas, logo que deixamos de o observar, o seu comportamento é de novo o de uma onda. Isto é muito estranho e nenhuma conceção vulgar de objetividade pode compreender estes factos.

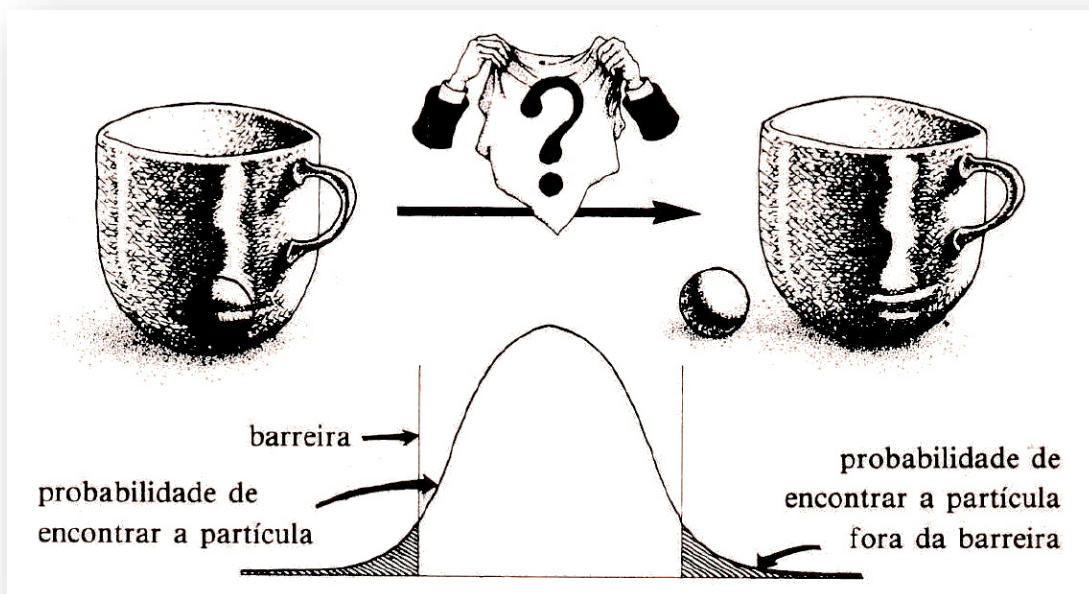
A nossa análise da experiência das duas fendas mostra que a interpretação estatística de Born das ondas quânticas não significa apenas o fim do determinismo, mas também o da objetividade clássica. A antiga ideia segundo a qual o mundo existe num estado

bem definido chega ao fim. A teoria quântica revela uma nova mensagem — a realidade é em parte criada pelo observador. Este novo aspeto da realidade justifica a fé científica de que a razão humana pode compreender o mundo mesmo quando os sentidos não conseguem apreendê-lo.

Enquanto a experiência das duas fendas é simplesmente uma experiência concetual que ilustra de uma forma dramática a peculiaridade quântica, há muitos instrumentos práticos que utilizam realmente as estranhas propriedades das ondas de probabilidades. Um exemplo prático da peculiaridade quântica em ação é o efeito de túnel da mecânica quântica — o transporte ou passagem de partículas subatômicas, como o eletrão, através de uma barreira, de uma parede. Este efeito pelo qual as partículas são encontradas onde lhes é interdito segundo as leis da física clássica só pode ser compreendido pela teoria quântica.

Imaginemos uma partícula vulgar dentro de uma barreira, como uma bola dentro de uma chávena. Se não se aplicarem forças à bola, ela não pode sair da chávena — foi capturada. Mas na teoria quântica temos de descrever a bola por uma onda de probabilidades, e a intensidade desta onda dá-nos a probabilidade de encontrar a partícula. Suponhamos que a partícula é um eletrão. Surpreendentemente, ao resolvermos a equação de onda de Schrödinger para saber a forma da onda do eletrão dentro da barreira, vemos que a solução tem uma pequena parte da onda no exterior da barreira. Isto quer dizer que o eletrão tem uma certa probabilidade de ser encontrado fora da barreira — como passar através de uma parede —, e este é o chamado «efeito de túnel».

Nós não conseguimos visualizar o que acontece, mas o facto é que as partículas aparecem realmente do lado da barreira que lhes é interdito pelas leis da física clássica. Os engenheiros eletrónicos deram-se conta de que o efeito de túnel pode ser utilizado para amplificar sinais eletrónicos, propriedade usada em muitos instrumentos práticos. Os transístores, os díodos de túnel e muitos instrumentos eletrónicos utilizam as propriedades das ondas de probabilidades e a peculiaridade quântica dos eletrões — até o relógio digital do leitor pode ter componentes que trabalham utilizando este efeito de túnel².



O efeito de túnel é outro exemplo da peculiaridade quântica. Não podemos visualizar a forma como ele se dá, e, no entanto, há uma probabilidade bem definida para que uma partícula passe através de uma barreira, como se uma bola passasse através da parede de uma chávena.

O efeito de túnel é também essencial para a explicação da radioatividade nuclear, na qual o núcleo atómico emite espontaneamente partículas. O núcleo age como uma barreira para as partículas que emite — as partículas são como bolas dentro de

uma chávena. No entanto, há uma pequena probabilidade de as partículas no interior do núcleo escaparem à barreira e serem encontradas no exterior. De tempos a tempos, as partículas passam através da parede nuclear, afastam-se do núcleo e manifestam-se como radioatividade.

O efeito de túnel e a experiência das duas fendas ilustram a peculiaridade quântica e o fim de um mundo visualizável. Vemos que, de acordo com a interpretação da mecânica quântica segundo a escola de Copenhaga, o universo indeterminado tem outra consequência — a realidade criada pelo observador. A noção de que o mundo existe num estado bem definido independentemente da intervenção humana chegou ao fim. Há qualquer coisa de muito especial no mundo quântico; podemos domesticá-lo com a nossa matemática, mas o certo é que ele é estranho — muito mais estranho do que podemos imaginar visualmente.

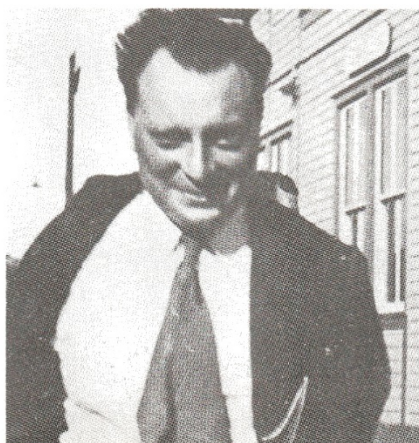
Regressemos à estrada da realidade quântica para continuar a nossa exploração. Grande parte dos físicos do nosso grupo de peregrinação sentem-se muito satisfeitos com a interpretação de Copenhaga. Mas um deles, um austríaco franzino e de óculos, transporta uma caixa grande, fechada e selada. Alguém lhe pergunta, «O que está dentro da caixa?» Ele responde apenas com um olhar irónico que significa; «O senhor bem gostaria de o saber, não é verdade?» Sentimos que estamos prestes a aprender algo de novo acerca da realidade quântica.



Niels Bohr andando de motorizada. (American Institute of Physics, Uhlenbeck Collection)

Werner Heisenberg e Niels Bohr na Conferência de Copenhaga de 1934, realizada no Instituto Niels Bohr.

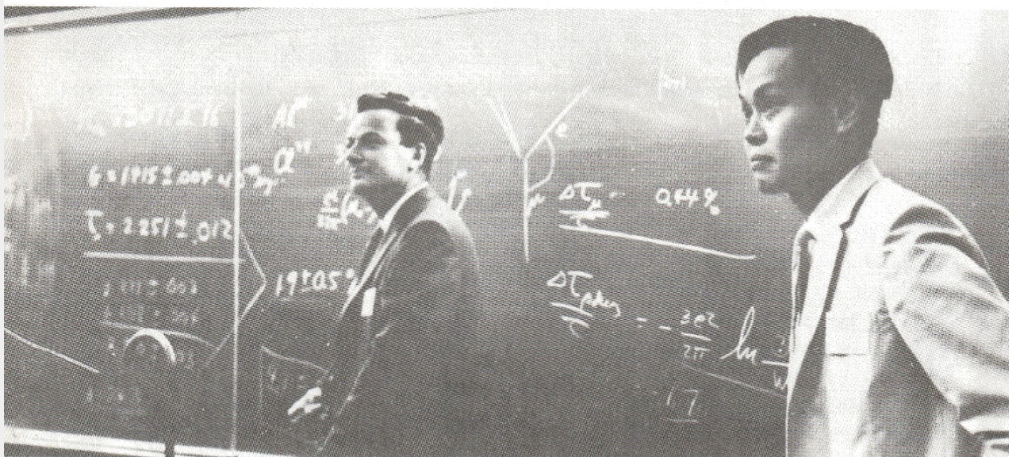
Em primeiro plano vê-se uma garrafa de cerveja *Carlsberg* — a cerveja que tornou a mecânica quântica famosa. (American Institute of Physics, Weisskopf Collection)



Wolfgang Pauli em Carlin, Nevada — uma curta paragem a caminho de Caltech, na Califórnia. Pauli iria tornar pública, nesse Verão de 1931, a sua hipótese do neutrino. (American Institute of Physics, Goudsmit Collection)



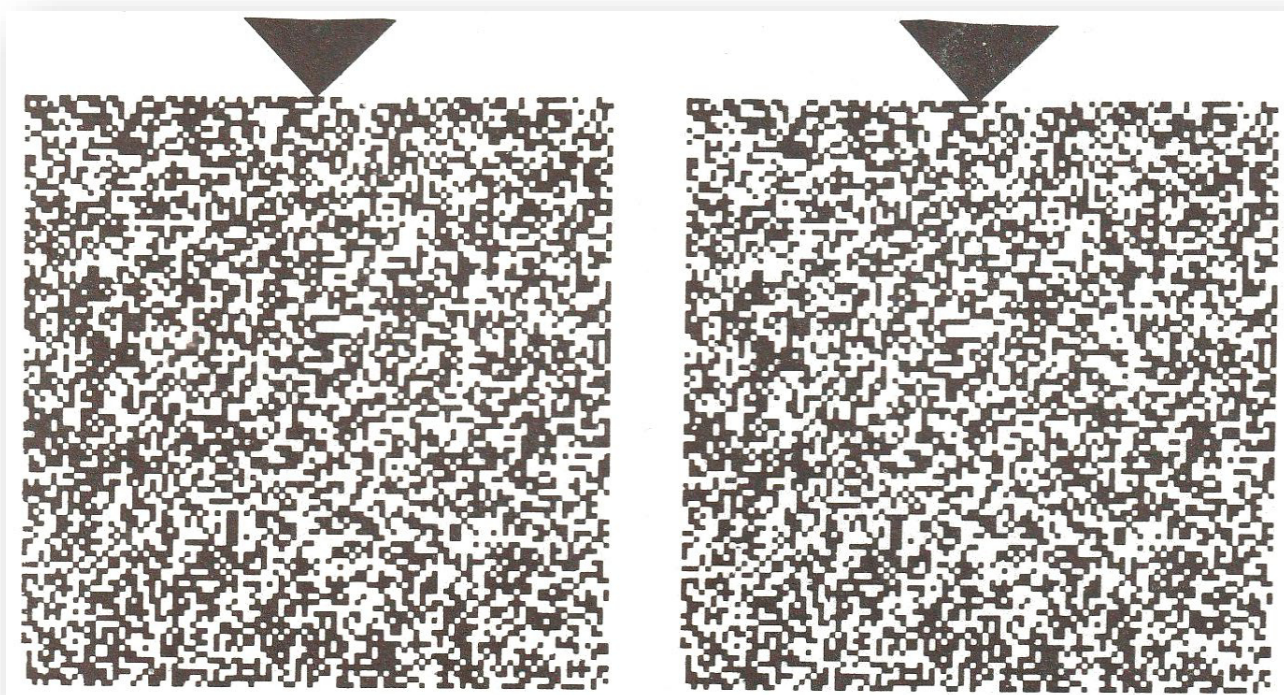
J. Robert Oppenheimer, I. I. Rabi, Harold M. Mott-Smith e Wolfgang Pauli.
(American Institute of Physics)



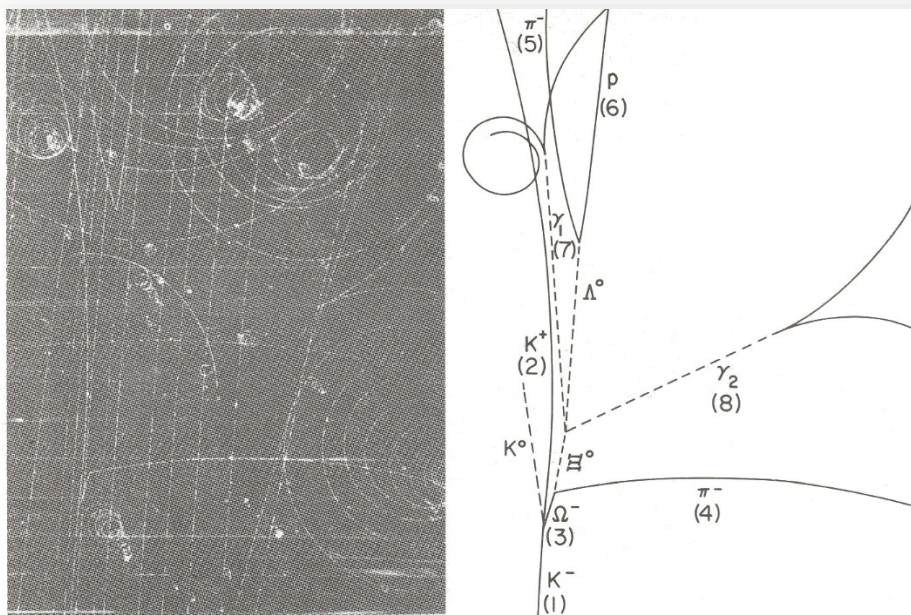
Richard Feynman e C. N. Yang. (American Institute of Physics, Marshak Collection)

Murray Gell-Mann a cortar cogumelos
em Tabor Gulch, Colorado, em 1974.
(Bernice Durand)





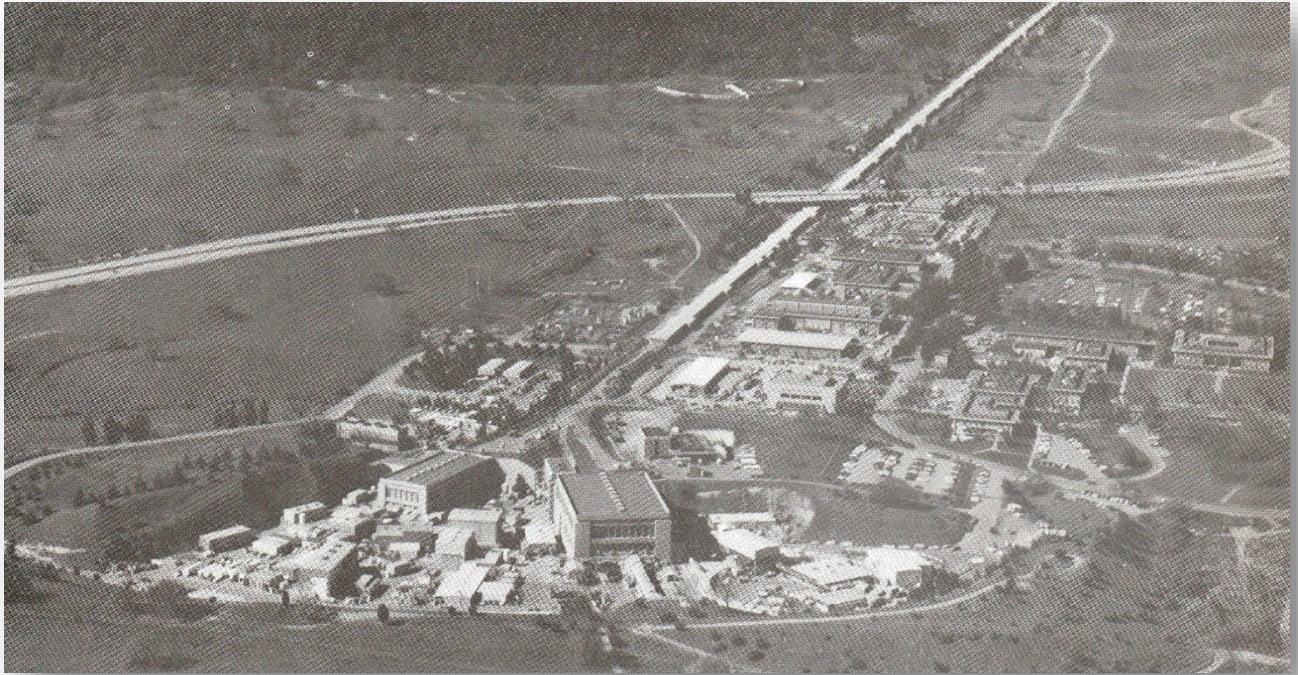
Um estereograma de pontos aleatórios retirado da obra de Bella Julesz *Foundations of Cyclopean Perception*, da University of Chicago Press. Cada quadrado consiste em pontos aleatórios, mas a intercorrelação dos dois padrões aleatórios não é aleatória. Para ver a imagem tridimensional (um quadrado dentro de um quadrado) é necessário fundir as duas partes do estereograma; não é fácil e não deve ser tentado por pessoas com má visão. Segure um estereograma a cerca de 50 cm dos olhos, sob boa iluminação. Eu coloquei dois triângulos sobre os quadrados. Tente fundi-los no seu campo visual. Olhe então para os quadrados fundidos; após algum tempo deve atingir a estereopse (visão de um objeto tridimensional). Este efeito é bastante nítido e espetacular. As pessoas que sentem dificuldades com este efeito podem consultar os anáglifos aleatórios contidos na obra de Julesz, que não requerem a fusão de duas imagens no campo visual, mas exigem uns óculos especiais.



Esta fotografia, tirada numa câmara de bolhas de hidrogénio líquido do Brookhaven National Laboratory, põe em evidência a primeira detecção do Ω^- , numa confirmação notável da via octópula. À direita da fotografia tirada na câmara de bolhas está a interpretação do fenómeno, com a identificação das várias partículas (partículas com carga eléctrica nula não deixam traços, mas as suas trajectórias, representadas a tracejado, podem ser reconstruídas). A trajectória do Ω^- é a curta perto do canto inferior esquerdo, produzida pela interacção de um mesão K^- com um protão estacionário (não visível) do hidrogénio líquido

Albert Einstein veleja em 1936.
(American Institute of Physics)

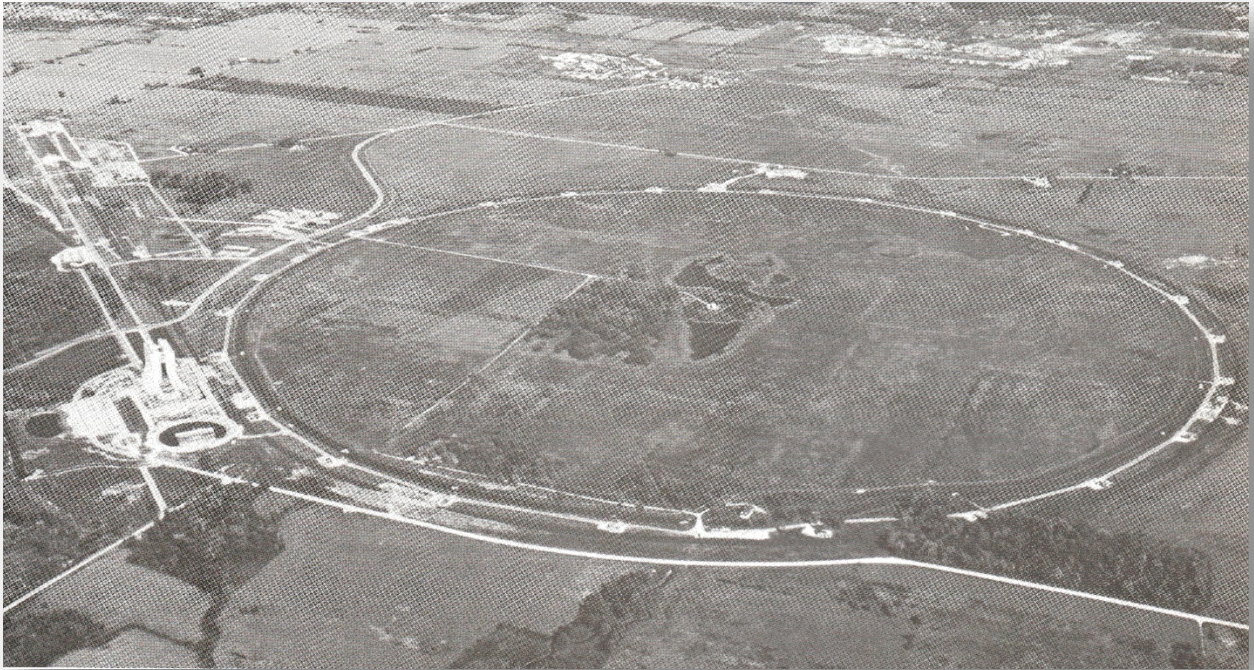




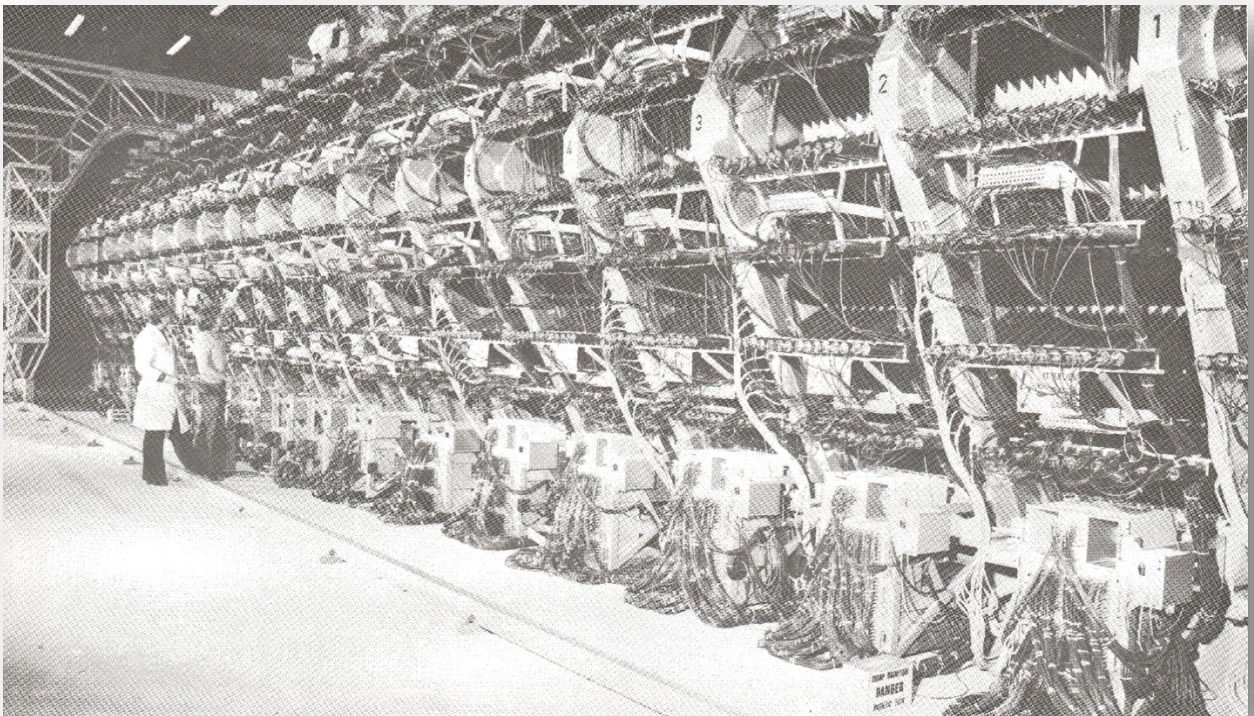
O acelerador linear de elétrons de Stanford, de comprimento total de cerca de 3 km. Parte do sistema de autoestradas interestaduais passa sobre o acelerador. Foi aqui que pela primeira vez foram vistos os *quarks* no interior dos prótons, «como passas num bolo inglês», e que foram descobertos e estudados os hádrões com *charm*. (Universidade de Stanford)



Melancholia, de Albrecht Dürer, é a apresentação da pesquisa racional. O quadrado mágico, na parede, tem a propriedade de a soma dos elementos de qualquer linha, de qualquer coluna ou das diagonais ser sempre a mesma.



Vista aérea do Fermi National Accelerator Laboratory. Veem-se ao fundo os arredores de Chicago. Os prótons são acelerados no anel e em seguida enviados para as diversas áreas experimentais que se veem do lado esquerdo. Foi aqui detetado um hádron contendo o *quark bottom*. (Fermi National Accelerator Laboratory)



Um detetor de interações de neutrinos do CERN, situado nos arredores de Genebra, na Suíça. Este grande calorímetro mede as propriedades das interações dos

neutrinos e fornece aos físicos as chaves para a construção de modelos teóricos das partículas quânticas. (CERN)

¹ Poeta inglês do século XIV. (*N. do T.*)

² Vem a propósito referir que, já após a publicação original deste livro, surgiu um instrumento baseado no efeito de túnel dos eletrões que pode representar um enorme progresso científico: o microscópio por efeito de túnel. Este novo microscópio permite estudar a estrutura das superfícies, átomo por átomo, e a sua versatilidade começou já a permitir enormes avanços nos domínios da física aplicada, da química e da biologia. O leitor interessado poderá consultar, por exemplo, na *Scientific American* de Agosto de 1985, p. 40, o artigo "*The Scanning Tunneling Microscope*", por G. Binnig

e H. Rohrer, bem como a bibliografia aí citada. Pela conceção deste novo microscópio foi atribuído a G. Binnig e H. Rohrer o Prémio Nobel da Física 1986. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 10

O Gato de Schrödinger

«Lá estarei», disse o Gato, desaparecendo. Alice não ficou muito surpresa com isso, pois já começava a ficar habituada a estas coisas estranhas.

LEWIS CARROL, Alice no País das Maravilhas

Na década de 1980 aparecerá uma nova geração de computadores extremamente rápidos que incorporarão dispositivos de comutação nos seus componentes eletrônicos de dimensões comparáveis às do mundo molecular. Os antigos computadores estavam sujeitos a «erros graves» — avarias de componentes, como um circuito queimado ou um cabo partido, que tinham de ser substituídos para que o computador voltasse a funcionar normalmente. Mas os novos computadores estão sujeitos a um tipo qualitativamente diferente de avarias chamadas «erros suaves», nos quais um dos pequenos comutadores falha durante uma só operação — na vez seguinte volta a funcionar perfeitamente. Os engenheiros não podem reparar os computadores deste tipo de avarias porque nada está realmente estragado.

O que causa os erros suaves? Eles ocorrem porque uma partícula quântica de alta energia pode atravessar um dos comutadores eletrônicos, provocando-lhe uma falha de funcionamento — estes

comutadores elementares são tão pequenos que podem ser influenciados por estas partículas que não perturbam componentes eletrônicos de maiores dimensões. A fonte destas partículas quânticas é a radioatividade natural do material do qual são feitos os *microchips*, ou os raios cósmicos que permanentemente atingem a Terra. Os erros suaves fazem parte do universo indeterminado; a sua localização e o seu efeito são completamente aleatórios. Seria possível que o Deus-que-joga-aos-dados desencadeasse um holocausto nuclear através de um erro aleatório num computador militar? Protegendo os novos computadores e reduzindo a sua radioatividade natural, a probabilidade de tal acontecimento pode ser reduzida a valores extremamente baixos. Mas este exemplo levanta a questão da possibilidade de a peculiaridade quântica do mundo microscópico poder chegar até ao nosso mundo macroscópico e influenciar-nos. Pode a indeterminação quântica afetar as nossas vidas?

A resposta é sim, como o exemplo dos erros suaves nos computadores mostra. Outro exemplo é a combinação aleatória de moléculas de ADN no momento da conceção de uma criança, durante a qual as propriedades quânticas das ligações químicas desempenham um papel muito importante.

Fenómenos atômicos completamente indeterminados influenciam profundamente as nossas vidas — estamos nas mãos do Deus-que-joga-aos-dados.

É indiscutível que a indeterminação quântica pode influenciar as nossas vidas. Mas surge agora um problema, quando se consideram

todas as consequências da experiência das duas fendas. A interpretação ortodoxa, segundo a escola de Copenhaga, desta experiência mostrou que a indeterminação — as ondas de probabilidades de Born — significava que tínhamos de renunciar à objetividade do mundo, à concepção segundo a qual o mundo existe independentemente do facto de nós o observarmos. Por exemplo, o eletrão apenas existe como partícula real num ponto do espaço se o observarmos diretamente. O problema está em que, se a indeterminação implica a não objetividade e se o mundo macroscópico é influenciado por acontecimentos indeterminados, será que os acontecimentos à escala humana são também não objetivos e que existem apenas se os observarmos diretamente? Teremos de renunciar à objetividade, não só do eletrão, mas de toda a espécie humana?

Surpreendentemente, se admitirmos estritamente a interpretação da mecânica quântica segundo a escola de Copenhaga, então as peculiaridades do mundo quântico são transportadas para a realidade quotidiana — é todo o mundo, e não somente o mundo atómico, que perde a objetividade. Erwin Schrödinger idealizou uma experiência concetual, a que chamou «experiência do gato-na-caixa», para mostrar como a interpretação de Copenhaga era louca e exigia que todo o mundo possuisse globalmente a famosa peculiaridade quântica. Infelizmente, a sua intenção ao propor esta experiência concetual, que era criticar a interpretação de Copenhaga, foi frequentemente mal entendida. Algumas pessoas, que querem à força ver a estranha realidade dos *quanta* refletida no mundo vulgar, utilizaram a experiência concetual de Schrödinger para mostrar que isto na realidade se

passa assim. Mas estão enganadas. Os físicos matemáticos analisaram cuidadosamente a «experiência do gato-na-caixa», especialmente a natureza física da observação, e chegaram à conclusão de que, apesar de o macromundo ser indeterminado, ele não é necessariamente não-objetivo, ao contrário do micromundo. Para compreender a razão de ser de tudo isto, vamos em primeiro lugar descrever uma versão da experiência do gato de Schrödinger e verificar como ela de facto parece implicar o fim da objetividade do mundo vulgar. Então analisaremos mais de perto o ato físico da observação e atingimos a perspetiva alternativa segundo a qual não é necessário aplicar a interpretação de Copenhaga ao mundo macroscópico — a peculiaridade quântica existe apenas no micromundo.

Schrödinger sugeriu que imaginássemos um gato que está dentro de uma caixa fechada e selada, juntamente com uma fraca fonte de radioatividade e um detetor de partículas radioativas. O detetor é ligado apenas durante um minuto; suponhamos que a probabilidade de a fonte emitir uma partícula detetável durante esse intervalo de tempo é $1/2$. A teoria quântica não prevê a deteção de uma destas partículas; diz apenas que a probabilidade de isso acontecer é $1/2$. Se uma partícula é detetada, é libertado um gás venenoso que mata o gato. A caixa, selada, é colocada num satélite que orbita em torno da Terra, de modo que não temos possibilidade de saber se o gato está vivo ou morto.

Em rigor, segundo a interpretação de Copenhaga, mesmo depois do minuto crítico não podemos falar do gato como estando num estado definido — vivo ou morto —, porque, como somos habitantes

da Terra, não chegámos a fazer uma observação que determine se o gato está vivo ou morto. Uma forma de descrever a situação é atribuir uma onda de probabilidades ao estado físico do gato morto e outra onda de probabilidades ao estado físico do gato vivo. O gato dentro da caixa é então descrito corretamente por um estado de sobreposição de ondas consistindo em iguais amplitudes de onda para o gato vivo e para o gato morto. Este estado de sobreposição para o gato na caixa não é caracterizado por realidades físicas em ato, mas sim por probabilidades — peculiaridade quântica macroscópica! É tão absurdo dizer se o gato está vivo ou morto como dizer por qual das fendas passou o eletrão na experiência das duas fendas. A afirmação «O eletrão passa ou pelo orifício 1 ou pelo orifício 2» é também absurda. Se não observarmos por qual dos orifícios passa o eletrão, ele existirá como estado de sobreposição de ondas de probabilidades para passar através dos orifícios 1 e 2. Talvez se possa aceitar essa peculiaridade para eletrões. Mas aqui temos o mesmo tipo de afirmação, «O gato ou está morto ou está vivo», para um gato, e não para um eletrão. Os gatos, tal como os eletrões, podem ser encontrados numa terra-de-ninguém quântica.

Suponhamos agora que um vaivém espacial com um grupo de cientistas vai até ao satélite para examinar o conteúdo da caixa e, quando a abrem, ouvem um grande miado. O gato está vivo. A interpretação deste facto segundo a escola de Copenhaga é que os cientistas, ao abrirem a caixa e fazerem a observação, fizeram com que o sistema passasse a um estado quântico bem definido — o gato vivo. Isto é análogo a colocar feixes de luz à saída das fendas 1 e 2 para tentar ver o eletrão. Para os cientistas do vaivém espacial, o estado do gato não é já uma sobreposição de ondas para

o gato vivo e para o gato morto. Mas, como o seu sistema de comunicações se avariou, os cientistas na Terra não sabem se o gato está vivo ou morto. Para esses cientistas terrestres, o gato dentro da caixa e os cientistas a bordo do vaivém, que agora conhecem o estado do gato, estão todos ainda num estado de sobreposição de ondas de probabilidade de gato morto e gato vivo. A terra-de-ninguém quântica do estado de sobreposição está a crescer.

Por fim, os cientistas a bordo da nave espacial conseguem abrir um canal de comunicação para um computador na Terra. Eles comunicam a informação de que o gato está vivo para o computador e esta informação é guardada numa banda magnética. Depois de o computador receber a informação, mas antes de a banda magnética ser lida pelos cientistas na Terra, o computador faz também parte do estado de sobreposição, do ponto de vista destes. Finalmente, ao ler a banda, os cientistas reduzem o estado de sobreposição a um estado bem definido. Eles comunicam o facto aos seus colegas da sala ao lado, e assim sucessivamente. A realidade tem existência apenas quando a observamos. De outra forma, está apenas como um estado de sobreposição, tal como o eletrão na experiência das duas fendas. De acordo com esta perspetiva, mesmo a realidade do mundo macroscópico não possui objetividade até a observarmos.

Estranha como parece, esta é a interpretação da realidade fornecida pela escola de Copenhaga. Vemos que ela exige uma clara linha de demarcação entre observador e observado, uma distinção entre mente e objeto. A princípio estava entre o gato e os cientistas do vaivém espacial. Depois de aberta a caixa, a linha passou a estar

entre os cientistas e o computador; e assim por diante. Tal como a informação sobre o estado do gato se propagou de lugar para lugar, assim se propagou a realidade do gato vivo. A interpretação de Copenhaga exige que seja feita uma distinção entre observador e observado; não especifica onde deve ser traçada a linha de separação — apenas diz que ela deve existir.

Algo nos perturba nesta descrição da «experiência do gato na caixa». De alguma forma, temos a sensação de que ao mundo dos átomos falta essa objetividade a que estamos habituados; mas estranhemos muito que essa bizarra propriedade seja comum ao mundo vulgar das mesas, das cadeiras e dos gatos. Será que estes também só existem num estado bem definido quando os observamos, conforme sustenta a interpretação de Copenhaga? A análise da «experiência do gato na caixa» sugere que uma observação exige consciência. Alguns físicos são de opinião que a interpretação de Copenhaga implica que a consciência deve existir — a ideia da realidade material sem consciência é impensável. Mas, se analisarmos de perto em que consiste uma observação, concluimos que esta visão extrema da realidade — segundo a qual as mesas, as cadeiras e os gatos não possuem existência bem definida até serem observados por uma consciência — não é realmente necessária. A interpretação de Copenhaga, se bem que necessária para o mundo atômico, não tem obrigatoriamente de ser aplicada ao mundo dos objetos vulgares. As pessoas que a aplicam ao macromundo fazem-no sem bases. Vejamos agora em pormenor o que ocorre realmente quando efetuamos uma observação.

Se observarmos algum objeto, os nossos olhos recebem dele energia. Mas a característica mais importante de uma observação é que obtemos informação — sabemos algo sobre o mundo que não sabíamos antes da observação. No nosso estudo da mecânica estatística aprendemos que não é possível obter informação sem aumentar a entropia — a medida da desorganização dos sistemas físicos. O preço que pagamos para obter informação é desordenar o mundo em qualquer outra parte, aumentando assim a entropia — consequência inevitável da segunda lei da termodinâmica. Este aumento de entropia implica que o tempo é orientado, à maneira de uma seta: existe irreversibilidade temporal e há processos que podem acumular informação; a memória existe. Concluímos que a principal característica da observação é a irreversibilidade temporal, e não a consciência da observação, apesar de esta ser também importante, já que está na base do processo de memorização, envolvendo, assim, a irreversibilidade. As observações podem ser efetuadas por máquinas ou computadores, desde que tenham um dispositivo de memorização. O fundamental nesta análise da observação é que, uma vez que a informação sobre o mundo quântico está irreversivelmente no mundo macroscópico, podemos atribuir-lhe carácter objetivo — ela não pode regressar à terra-de-ninguém quântica.

Na «experiência do gato na caixa», a informação está situada no mundo macroscópico porque o gato está vivo ou morto independentemente de o observarmos ou não. Não podemos apagar essa informação porque a morte é irreversível. Para a experiência das duas fendas, pelo contrário, a informação relativa à fenda pela qual passou o eletrão só passa a fazer parte do

micromundo se montarmos os feixes de luz para observar a saída das fendas. O eletrão, ao contrário do gato, não é portador de nenhum registo ou memória relativamente ao estado em que está — ou ao orifício por que passou.

Recordemos a linha traçada na sequência no filme do fumo de cachimbo entre o micromundo de partículas de fumo e o macromundo dos objetos reconhecíveis. A irreversibilidade do tempo surgia porque sacrificávamos informação específica acerca das partículas individuais em favor dos valores médios relevantes. É isto também aquilo que fazemos quando realizamos uma observação como aquela com os feixes de luz nas fendas. O conhecimento detalhado das ondas de probabilidade que descrevem o eletrão está a ser reduzido a um dado específico. A linha entre o macromundo e o micromundo é a mesma que separa observador e observado. Analisando onde foi realizada a interação irreversível correspondente à observação, podemos, na maioria dos casos, traçar a linha que separa a peculiaridade quântica do mundo macroscópico muito próxima dos fenómenos atómicos. Concluimos que, apesar de ser logicamente consistente falar acerca de peculiaridades quânticas, como sobreposição de ondas de probabilidade, no macromundo (como foi feito na descrição da experiência do gato de Schrödinger) somos intimamente forçados a não o fazer.

A experiência das duas fendas e a experiência do gato de Schrödinger são experiências concetuais — pontos de referência na estrada para a realidade quântica pela qual viajamos. Aprendemos que a teoria quântica implica um universo indeterminado, não só ao

nível atómico, como também ao nível dos acontecimentos humanos. A interpretação da experiência das duas fendas segundo a escola de Copenhaga chega à conclusão de que devemos renunciar à noção clássica de objetividade para partículas quânticas. Se aplicarmos a mesma interpretação à experiência do gato de Schrödinger, somos levados a pensar que devemos também renunciar à objetividade no nosso mundo familiar de mesas e cadeiras. Mas no nosso estudo da segunda lei da termodinâmica vimos que a diferença entre o micromundo e o macromundo não era simplesmente quantitativa — uma diferença de dimensões —, mas qualitativa — a seta do tempo, evidente no macromundo, não existe no micromundo. Concluímos, de facto, que a irreversibilidade da observação significa que o mundo dos eletrões e dos átomos é qualitativamente diferente do mundo das mesas e das cadeiras. A peculiaridade quântica não existe no macromundo. Temos de sobrepor as ondas de probabilidade relativas à passagem de um eletrão pelas fendas 1 e 2, mas não precisamos de sobrepor gatos vivos e mortos.

À medida que andamos pela estrada para a realidade quântica, vemos outros pontos de referência ao longo da estrada — albergues para viajantes onde se oferecem alternativas à interpretação da peculiaridade quântica pela escola de Copenhaga. Depois de almoçar num desses albergues encontramos um homem que nos começa a contar uma história — um conto de fadas quântico.

CAPÍTULO 11

Um Conto de Fadas Quântico

Deixem-na [à criança] saber exatamente os seus contos de fadas, e sentir, completos, alegria ou temor na sua concepção, como se ela fosse real; desta forma ela estará sempre a exercitar a sua capacidade de se aperceber das realidades...

Jorn Ruskin, introdução a Histórias Populares Alemãs, 1868

Era uma vez, há muito, muito tempo, uma linda princesa que vivia num castelo no topo de uma montanha. O seu pai, senhor de enormes domínios, decidiu que chegara a altura de a sua filha casar e interrogou-se sobre quem havia de a desposar. Para resolver este problema, o rei consultou o seu conselheiro, o mago da corte, que o aconselhou a realizar uma competição entre os pretendentes.

O concurso a estabelecer era um jogo de habilidade e de sorte, o que muito agradou ao rei. O mago apresentou três caixas e disse que duas das caixas continham uma pérola branca cada, idênticas, e uma outra uma pérola negra. Abrindo duas das caixas, mostrou uma pérola branca e outra negra. Fechando as caixas, foi abrir a terceira, que continha a outra pérola branca.

A tarefa dos pretendentes era adivinhar os conteúdos de todas as três caixas. Eles teriam de apontar as três caixas em qualquer

ordem e dizer: «Esta contém uma pérola branca, esta contém também uma pérola branca e esta última contém a pérola negra.» O mago abriria então as caixas e revelaria os respetivos conteúdos. Se o pretendente adivinhasse, ganharia a mão da princesa. No entanto, se errasse, seria decapitado — condições pensadas de modo a afastar todos os candidatos, à exceção dos mais sérios.

Como a princesa era muito bela e o pai um homem muito rico, muitos jovens aceitaram as regras do concurso. O mago abria sempre em primeiro lugar as duas caixas que o pretendente dizia conterem as pérolas brancas. Mas uma delas era sempre negra e a outra branca. Muitos pretendentes perderam assim a cabeça.

Quando o padrão se tornou claro, poucos jovens se aventuraram a tal concurso. Passaram-se anos e a princesa continuava solteira. Poder-se-ia supor que, pelo menos, um dentre tantos pretendentes deveria ter adivinhado corretamente. Mas tal não sucedeu. Como a maioria das pessoas, os pretendentes acreditavam na objetividade do mundo físico; julgavam que o facto de escolherem — de realizarem uma medição — não deveria influenciar os conteúdos das caixas.

Finalmente, chegou um jovem elegante de uma parte longínqua do reino. O sistema educativo convencional da lógica e da teoria da medida clássicas não tinha penetrado nessa parte do reino. As três caixas foram apresentadas ao jovem. Apontando para duas das caixas, disse: «Estas caixas contêm uma pérola negra e outra branca. Não direi o que contém a terceira.» Antes que alguém pudesse objetar a esta pequena infração às estritas regras do

concurso, a princesa, que já estava farta do concurso e a quem o jovem tinha agradado muito, correu para as duas caixas e abriu-as. Elas continham, tal como ele dissera, uma pérola negra e uma branca. Ela ordenou então ao mago que abrisse a terceira caixa, mas ele não o conseguiu.

O rei, que era um homem sensato, expulsou o mago da corte pela sua fraude. O jovem e a princesa casaram nesse mesmo dia e viveram felizes para sempre.

Este conto de fadas quântico é da autoria de Ernst Specker, que, juntamente com Simon Kochen, trabalhou sobre a lógica da teoria quântica. Entre 1965 e 1967 publicaram um conjunto de artigos que demonstravam a impossibilidade de empregar simultaneamente a lógica clássica e a teoria da medida clássica na teoria quântica. A lógica clássica, manifestada na linguagem vulgar, é formulada pelos matemáticos como lógica booleana — as leis do pensamento. A teoria clássica da medida supõe a objetividade do mundo, mesmo quando este não está a ser observado. Se a teoria quântica está correta, Kochen e Specker mostraram que é necessário abdicar ou da aplicação da lógica booleana ao mundo quântico, ou da suposição da objetividade. De forma concisa, só podemos conservar a lógica vulgar ou a realidade vulgar.

Caixas como aquelas utilizadas pelo mago não existem no mundo macroscópico. No entanto, as propriedades das caixas do mago simulam precisamente as do sistema quântico analisado por Kochen e Specker — um átomo de hélio no seu estado mais baixo de energia, imerso num campo magnético. Podemos querer pensar no

átomo de hélio como se fosse um pequeno pião a rodar. As pérolas nas caixas corresponderiam às diferentes componentes do *spin*¹ do átomo de hélio. Mas, como mostraram Kochen e Specker, qualquer imagem clássica do átomo de hélio deve ser afastada.

Gostaríamos de pensar que, tal como os estados de *spin* do átomo de hélio, também as pérolas no interior das caixas têm uma existência objetiva. Existe uma pérola branca numa caixa, outra pérola branca noutra caixa e uma pérola negra na terceira caixa. A noção vulgar de objetividade é que este estado das três caixas tem significado independentemente de examinarmos os respetivos conteúdos. Mas, como com os estados de *spin* do átomo de hélio, a realidade não é assim. O mago preparou as caixas — podemos fazer o mesmo para o átomo de hélio — de tal modo que, se o resultado da primeira medição for uma pérola branca, o resultado da segunda tem de ser uma pérola negra. Nunca podemos ver simultaneamente duas pérolas brancas. É como o eletrão na experiência das duas fendas. Não podemos observar o eletrão a passar simultaneamente pelas fendas 1 e 2. Mas, se não observarmos, podemos imaginar que o eletrão deve passar por uma das duas fendas. Da mesma forma, os pretendentes imaginaram que cada caixa continha uma pérola que tinha necessariamente de ser branca ou negra. Se tentarmos verificar que cada pérola possui realmente um estado de existência bem definido, como fez a princesa impaciente, as caixas não poderão ser abertas todas simultaneamente — a terceira caixa não se abrirá, a menos que uma das outras duas esteja fechada. Como as componentes de *spin* do átomo de hélio, não podemos observar todas as pérolas ao mesmo tempo. Não há significado objetivo para o conteúdo das três caixas. O mago podia sempre

invalidar a tentativa de um pretendente tomando simplesmente as duas caixas que este tinha afirmado conterem as pérolas brancas e mostrando que elas continham, na realidade, uma pérola branca e outra negra. Era uma realidade criada pelo observador, neste caso o mago.

Aquilo que Kochen e Specker demonstraram foi que, se um físico clássico supusesse que as observações não perturbam o estado de um objeto — ou seja, que o mundo objetivo existe independentemente da nossa observação — e realizasse uma série de medições do estado de *spin* de um átomo de hélio, utilizando a habitual lógica booleana, seria forçado a atingir as afirmações contraditórias «O átomo de hélio está no estado A e o átomo de hélio não está no estado A». Uma vez aceite uma contradição lógica, é possível provar seja o que for — é o fim do pensamento racional.

Há duas maneiras de evitar esta contradição. Uma delas é adotar uma lógica não booleana para as afirmações. Uma tal «lógica quântica» é perfeitamente consistente, mas as suas regras não correspondem às regras do «senso comum» da lógica booleana vulgar. Tal como os olhos e o cérebro veem o mundo em termos da geometria de Euclides, também, aparentemente, o cérebro humano pensa em termos de lógica booleana. Mas, tal como podemos construir geometrias não euclidianas perfeitamente consistentes, podemos construir lógicas não booleanas perfeitamente consistentes que alteram a gramática do «e» e do «ou». Por exemplo, na experiência das duas fendas analisámos a afirmação: «O eletrão passa ou pelo orifício 1 ou pelo orifício 2.» Na lógica booleana o «ou ... ou» nesta afirmação tem o seu significado

habitual: ou se verifica uma possibilidade ou a outra — elas excluem-se mutuamente. Na lógica quântica não booleana abandona-se este significado estrito da regra lógica «ou ... ou» e adota-se um significado menos restritivo. A propriedade interessante desta alternativa é que podemos conservar a noção de que o mundo existe objetivamente, mas devemos adotar uma nova lógica quântica para pensar sobre ele.

A segunda alternativa é a de conservar a lógica booleana, mas desistir da ideia de que o mundo possui um estado objetivo bem definido e independente do facto de o estarmos ou não a observar — a essência da interpretação de Copenhaga. Quando uma árvore cai numa floresta e ninguém a observa, não só não se produz som, como não tem sequer significado dizer-se que a árvore caiu. Muitos físicos optam por esta última alternativa: eles conservam a lógica clássica e booleana e aceitam a estranha ideia de que o mundo só existe enquanto o observamos. Como muitas pessoas, os físicos não querem abandonar a lógica habitual do seu pensamento em favor de outra lógica. Essa ginástica mental não parece prática.

A importância do trabalho de Kochen e Specker é mostrar que existe uma alternativa à peculiaridade física, que é a peculiaridade lógica. Mas não há forma de evitar a peculiaridade, se a teoria quântica está correta.

Como exploradores que caminham pela estrada da realidade quântica, agradecemos que nos tenham contado esta história maravilhosa e nos tenham explicado a sua moral: a nossa lógica é inaplicável ao mundo quântico, razão pela qual ele nos parece tão

estranho. Passamos toda a tarde no albergue em longas discussões acerca da lógica quântica; no fim do dia estamos cansados e decidimos passar a noite no albergue. Depois de jantar, quando estamos calmamente no salão, a porta do albergue abre-se subitamente e um homem de olhar esgazeado entra a correr. «Fui um pouco mais para a frente e as coisas estão muito estranhas por lá. Disseram-me que Einstein demonstrou que a teoria quântica implica que a acausalidade e a telepatia existem — tudo no universo está ligado a tudo o mais. Os físicos quânticos demonstraram a verdade da antiga sabedoria oriental!»

«Disparate!», grita um membro do nosso grupo. «Você distorceu o que Einstein disse; Einstein sempre defendeu o princípio da causalidade física. Em relação a comparar a antiga sabedoria oriental com a física moderna, já alguma vez pensou por que é que a teoria quântica foi descoberta no Ocidente, que tem uma tradição igualmente antiga de debate teológico e de discussões talmúdicas? Além disso, o budismo, com a sua ênfase na perspetiva de que a distinção entre a mente e o mundo é uma ilusão, está na realidade mais próximo da física newtoniana clássica do que da teoria quântica, para a qual a distinção entre observador e observado é essencial.» Ele prosseguiu durante bastante tempo, mas o interlocutor já não o ouvia, pois estava muito cansado e tinha adormecido. A discussão tinha-nos entusiasmado e deixado impacientes acerca daquilo que iríamos encontrar no dia seguinte na estrada para a realidade quântica.

¹ O *spin* é uma propriedade quântica associada a uma grandeza (momento angular) que classicamente representa uma medida do estado de rotação de um sistema físico. O *spin*, no entanto, não tem análogo clássico e não pode ser visualizado como representando uma rotação interna de um sistema quântico, conforme se verá pelo texto. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 12

A Desigualdade de Bell

Parece difícil espreitar para as cartas de Deus. Mas eu não posso acreditar por um só instante que Ele jogue aos dados e faça uso de meios «telepáticos» (como a corrente teoria quântica defende que Ele faz).

ALBERT EINSTEIN

Os físicos reagiram de duas formas à moderna teoria quântica. A primeira e mais geral foi a da aplicação da nova teoria aos fenómenos naturais, o que levou ao desenvolvimento da teoria quântica dos sólidos, da teoria quântica dos campos e da física nuclear. A segunda forma tinha uma orientação mais filosófica e centrava-se nos problemas de interpretação da nova teoria.

É de justiça dizer que a maioria dos físicos profissionais não está interessada nestes problemas de interpretação. Os físicos teóricos pragmáticos são motivados pelas novas experiências e pelas ideias relacionadas com essas experiências. Eles tomam a interpretação de Copenhaga como certa até que eventualmente surja alguma indicação experimental dizendo que não o devem fazer. A questão da interpretação da teoria quântica teve um pequeno impacto na compreensão da física nuclear, na física das partículas elementares, ou na construção de transístores e de outros dispositivos eletrónicos.

Apesar da falta de impacto nos problemas práticos da física moderna, a investigação sobre os problemas de interpretação prossegue. Os físicos e os filósofos não conseguem desembaraçar-se da pergunta: «O que é a realidade quântica?» Ao tentar responder a esta pergunta, atingiu-se um certo grau de esclarecimento sobre a natureza da realidade quântica. Ao longo dos anos foi concebido todo um conjunto de experiências conceituais, como as experiências das duas fendas e do gato de Schrödinger, e reais, de forma a evidenciar a peculiaridade quântica — as propriedades da teoria quântica que diferem do realismo ingênuo. Duas destas, as experiências EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) e de Bell, têm sido longamente discutidas por físicos e filósofos. Elas são a base da nossa presente discussão sobre a natureza da realidade física.

Após a apresentação da interpretação da teoria quântica segundo a escola de Copenhaga feita por Bohr em 1927, os físicos começaram a reconhecer a natureza radical da interpretação da realidade que ela propunha. A essência da interpretação de Copenhaga é que o mundo deve ser realmente observado para ser objetivo. Einstein estava entre os mais proeminentes críticos desta concepção. Ele, a partir de certo ponto, deixou de criticar a consistência da interpretação. Em lugar disso, concentrou-se na questão de saber se a teoria quântica daria ou não uma descrição completa da realidade.

Em 1935, Einstein, Podolsky e Rosen escreveram um artigo em que propunham uma experiência conceitual que levava àquele que é frequentemente chamado paradoxo EPR. Este nome está mal

atribuído, pois não há nenhuma contradição lógica; não há paradoxo. O artigo de EPR exprimia a perspectiva de Einstein segundo a qual a interpretação ortodoxa, conforme a escola de Copenhaga, da teoria quântica e a realidade objetiva são incompatíveis. Ele tinha razão. Mas o ponto principal do argumento de EPR foi defender que a teoria quântica, tal como está, é incompleta — existem elementos objetivos da realidade que ela não especifica. Como Einstein mais tarde resumiu: «Sou, portanto, levado a crer que a descrição do mecanismo quântico [...] tem de ser considerada como uma descrição indireta e incompleta da realidade, que deve ser mais tarde substituída por outra mais completa e direta.»

Sabendo que não existem falhas lógicas na interpretação de Copenhaga e que não existem experiências que contradigam a teoria quântica, como é que Einstein, Podolsky e Rosen chegam a esta surpreendente conclusão? Para o compreender teremos de esboçar as suposições feitas pelos três autores antes de passar à descrição da sua experiência concetual.

Já discutimos a suposição da objetividade — o mundo existe num estado bem definido. Bohr, na sua interpretação de Copenhaga, e a maioria dos físicos depois dele deram-se conta de que a teoria quântica nega esta suposição, mas Einstein e os seus colaboradores pensaram que se estava a rejeitar demasiado depressa a ideia de que pelo menos algumas propriedades mensuráveis do micromundo têm significado objetivo. Sentiam que nenhuma conceção razoável da realidade podia rejeitar completamente a objetividade, e assim a objetividade foi a primeira suposição da equipa EPR.

Einstein, já o sabemos, estava descontente com o indeterminismo da teoria quântica. Mas essa não era a principal das objeções que o impediam de aceitar a imagem da realidade oferecida pela teoria. Um princípio físico que ele considerava ainda mais fundamental do que o determinismo era o princípio da causalidade local — os acontecimentos distantes não podem influenciar instantaneamente objetos locais sem qualquer mediação. Aquilo que o argumento de EPR conseguia, sem fazer qualquer suposição acerca do determinismo ou do indeterminismo, era mostrar que a teoria quântica violava a causalidade local. Esta descoberta chocou muitos físicos, porque o princípio de causalidade local era considerado sagrado. Analisemos mais de perto o conceito de causalidade local.

A ideia básica da causalidade local é a seguinte: acontecimentos que ocorrem longe daqui não podem influenciar direta e instantaneamente os acontecimentos aqui. Se se estabelecer um incêndio a 100 quilómetros daqui, não há forma de ele nos poder influenciar diretamente. Um segundo depois de o fogo se estabelecer, um amigo pode telefonar e informar-nos de que o fogo rebentou — mas isso é a causalidade vulgar. A informação sobre o incêndio foi transmitida por meio de um sinal eletromagnético do nosso amigo para nós. Podemos definir precisamente a causalidade se imaginarmos uma superfície imaginária em torno de qualquer objeto. Então o princípio de causalidade local assegura que, seja o que for que influencie o objeto, é imputável a alterações locais no estado do próprio objeto ou à transmissão de energia através da superfície. O facto de este princípio — aceite por todos os físicos —

estar no centro de todo o nosso pensamento sobre o mundo físico é bem claro nas observações de Einstein:

Se nos perguntarmos, pondo de lado a mecânica quântica, o que é que caracteriza as ideias da física, vem-nos imediatamente ao espírito o seguinte: os conceitos da física dizem respeito a um mundo real exterior [...] É, além disso, característico destes objetos físicos serem imaginados dispostos num contínuo espaço-temporal. Um aspeto essencial desta disposição dos objetos físicos é que ela exige, mais tarde ou mais cedo, a existência independente de cada um, desde que estes objetos «estejam situados em diferentes partes do espaço».

Aquilo que a equipa EPR conseguiu com a sua definição de objetividade foi mostrar que a teoria quântica tinha ou de violar o princípio da causalidade local, ou de ser incompleta. Como ninguém quer seriamente abandonar a causalidade, a teoria quântica tem de ser incompleta. É esta a base do argumento.

Duas partículas, chamemos-lhes 1 e 2, estão perto uma da outra, nas posições respetivas p_1 e p_2 em relação a um ponto fixo. Supomos que as partículas estão em movimento e que os seus movimentos são q_1 e q_2 . Apesar de as relações de indeterminação de Heisenberg implicarem que não podemos medir simultaneamente q_1 e p_1 ou q_2 e p_2 sem incertezas, permitem-nos medir simultaneamente a *soma* dos dois movimentos $q = q_1 + q_2$ e a *distância entre* as duas partículas $p = p_1 - p_2$, sem qualquer incerteza. Imaginemos que as duas partículas interagem e que a partícula 2 é enviada para Londres, enquanto a partícula 1 fica em Nova Iorque. Estes dois lugares estão tão afastados um do outro que parece razoável supor que aquilo que fizemos à partícula 1 em

Nova Iorque não deve influenciar a partícula 2 em Londres — princípio da causalidade local. Como sabemos que o movimento total é conservado — tem o mesmo valor antes e depois da interação —, se medirmos o movimento q_1 da partícula de Nova Iorque, poderemos, por subtração a partir do movimento inicial q , conhecer exatamente o movimento $q_2 = q - q_1$ da partícula 2. Analogamente, por uma medição exata da posição p_1 da partícula que ficou em Nova Iorque, podemos deduzir a posição da partícula 2, subtraindo a partir da distância entre as partículas, $p_2 = p - p_1$. A medição da posição p_1 da partícula de Nova Iorque perturbará a nossa prévia medição do seu movimento q_1 , mas não deverá (se acreditarmos na causalidade local) alterar o movimento q_2 que acabámos de deduzir para a partícula de Londres. Portanto, acabámos de deduzir o movimento q_2 e a posição p_2 da partícula de Londres, sem qualquer incerteza. Mas o princípio de indeterminação de Heisenberg diz que é impossível determinar o movimento e a posição de uma partícula com precisão arbitrária. Supondo a validade da causalidade local, realizámos algo que a teoria quântica assegura ser impossível. Parece que a teoria quântica exige que medir a partícula 1 em Nova Iorque implica influenciar instantaneamente a partícula 2 em Londres. Com base neste argumento, Einstein, Podolsky e Rosen concluíram que, ou se admite que a mecânica quântica possui uma tal ação à distância «fantasmagórica» que viola a causalidade, ou se é forçado a reconhecer que a teoria quântica é incompleta e que existe de facto uma maneira de medir simultaneamente o movimento e a posição. Como poucos físicos gostariam de admitir a possibilidade de tais «meios 'telepáticos'», deveríamos aceitar a conclusão de que a teoria quântica é incompleta.

O artigo EPR causou grande sensação entre físicos e filósofos. A confiança na interpretação ortodoxa da mecânica quântica estava abalada. Ninguém tinha previamente sublinhado estes efeitos de ação à distância que a teoria quântica implicava. Teriam Einstein e os seus colaboradores razão na sua conclusão de que a teoria quântica não podia ser a última palavra sobre a realidade? Haveria alguma falha no seu argumento? Não há falha alguma. Há, todavia, uma suposição tácita na experiência concetual EPR que deveria ter-se explicitado. O argumento supõe que as propriedades da partícula 2, como a sua posição e o seu movimento, têm existência objetiva sem serem na realidade medidas. A equipa EPR deduziu estas propriedades supondo que elas tinham significado objetivo apenas através de medições feitas sobre a partícula 1. Eles concluíram então que, se a teoria quântica está correta, tem de existir uma ação à distância. Esta conclusão do argumento EPR é sólida.

Mas há uma interpretação alternativa para esta experiência — a interpretação de Copenhaga — que nega a objetividade do mundo quando este não é sujeito a medições. Bohr, que sustentava esta conceção, insistiria em que a posição e o movimento da partícula 2 não têm qualquer significado objetivo até que sejam medidos diretamente. Se tais medições forem efetuadas, elas obedecerão às relações de indeterminação de Heisenberg, de acordo com a teoria quântica. Assim se evita a conclusão da existência de uma ação à distância — interações instantâneas não locais. Einstein, ao contrário de Bohr, nunca aceitou a ideia de uma realidade criada pelo observador. Em lugar disso, mostrou que, se a realidade fosse objetiva e a teoria quântica completa, teriam forçosamente de

existir efeitos não locais. Como a violação da causalidade era tão repugnante, Einstein concluiu que a teoria quântica era incompleta.

Durante mais de trinta anos, os físicos debateram as conclusões do artigo EPR. Estaria talvez escondida, por detrás da realidade quântica, uma outra realidade? Para atacar este problema, John Bell, um físico teórico do CERN, perto de Genebra, deu o passo seguinte na caminhada para a realidade quântica em 1965. No seu artigo, ele não fez apelo ao formalismo da teoria quântica, mas sim diretamente à experiência — ele propôs uma experiência real, e não uma experiência concetual. O que Bell mostrou foi que o carácter incompleto da teoria quântica, segundo a proposta do argumento EPR, não era possível. Poderia haver apenas duas interpretações possíveis para a experiência de Bell: ou o mundo era não objetivo e não existia num estado definido, ou era não local, admitindo ação instantânea à distância. Escolha o leitor a peculiaridade que prefere.

O artigo de Bell tratava da questão das variáveis ocultas — ideia segundo a qual a teoria quântica, tal como é, está incompleta e existe uma hipotética teoria subquântica que especifica a informação física adicional sobre o estado do mundo sob a forma destas novas variáveis ocultas. Se os físicos conhecessem estas variáveis, poderiam prever o resultado de uma medição individual (não apenas as probabilidades dos vários resultados possíveis) e mesmo determinar simultaneamente a posição e o movimento de partículas. Uma teoria subquântica deste tipo restabeleceria o determinismo e a objetividade. Se imaginarmos que a realidade é um baralho de cartas, tudo o que a teoria quântica pode fazer é prever as probabilidades de saída para vários conjuntos de cartas.

Se existissem variáveis escondidas, seria como olhar para o baralho e prever exatamente as cartas que iriam sair.

Poderia parecer que, se a teoria quântica está experimentalmente correta, põe fora de questão qualquer teoria subquântica de variáveis ocultas, bem como uma realidade escondida. O matemático Von Neumann provou que tais variáveis, escondidas por detrás do véu da realidade quântica, não podiam existir e, devido a este teorema, os cientistas deixaram de pensar sobre variáveis ocultas. A demonstração de Von Neumann era logicamente perfeita, mas, como Bell mostrou pela primeira vez, uma das suposições que a integravam não era aplicável à teoria quântica e, portanto, a prova era irrelevante. A questão de a teoria quântica permitir ou não a existência de variáveis escondidas e de uma realidade causal estava ainda em aberto. Bell voltou-se em seguida para ela.

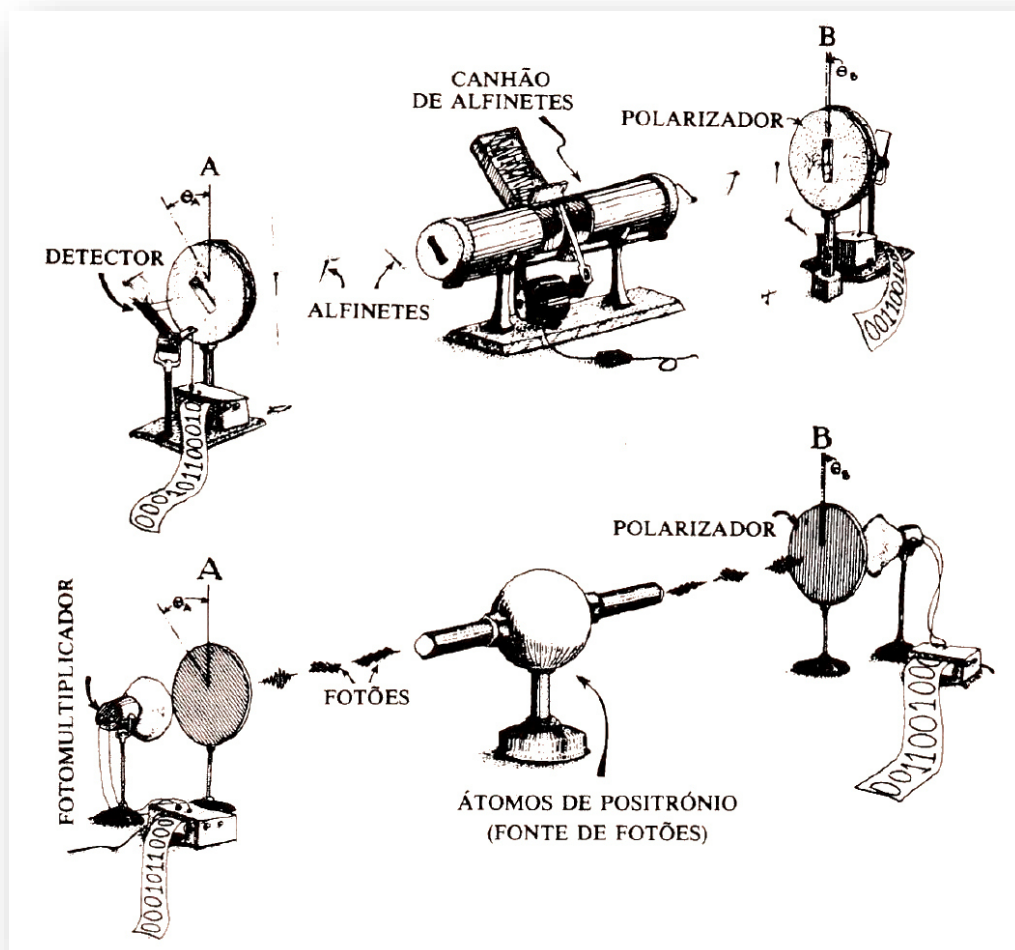
Bell queria ver como seria o mundo quântico se existissem realmente variáveis ocultas locais — e aqui a palavra «locais» é importante. As variáveis ocultas locais referem-se a quantidades que localmente determinam o estado de um objeto no interior de uma superfície imaginária. Pelo contrário, as variáveis ocultas não locais podem ser alteradas instantaneamente por acontecimentos ocorridos em qualquer outra parte do universo. Supor que as variáveis são «locais» equivale a supor a causalidade local. Utilizando esta suposição, Bell deduziu uma fórmula matemática, uma desigualdade, que podia ser experimentalmente verificada. A experiência foi feita independentemente, pelo menos, meia dúzia de vezes e concluiu-se que a desigualdade de Bell — juntamente

com a sua suposição de causalidade local — é violada. O mundo parecia *não* ser localmente causal! Iremos mais à frente explorar esta conclusão espantosa, mas primeiro descreveremos em pormenor a experiência de Bell. Como alguém observou, «Deus está nos pormenores», e veremos que, se olharmos para os pormenores, a experiência revela um notável ato de prestidigitação por parte do Deus-que-joga-aos-dados.

A desigualdade de Bell aplica-se a um grande número de experiências quânticas. Antes de aplicar esta desigualdade ao mundo quântico é útil deduzi-la, em primeiro lugar, para uma experiência clássica diretamente visualizável. Não haverá peculiaridade quântica nesta experiência clássica, tal como não havia para a metralhadora que disparava contra a placa de aço com dois orifícios. A razão para deduzir a desigualdade de Bell para uma experiência de física clássica é que todas as suposições que entram na sua dedução podem ser vistas explicitamente. Não há variáveis «ocultas» num sistema clássico — todas as cartas estãoostas na mesa.

Imaginemos que temos um canhão de alfinetes especial, de tal modo que dispara alfinetes, dois a dois, em sentidos exatamente opostos ao longo de uma direção bem definida. Ao contrário de um canhão normal, que dispararia alfinetes como se fossem flechas, este dispara-os de lado — um par de alfinetes afasta-se da arma com o seu eixo perpendicular à direção do movimento. Apesar de, num par de alfinetes, ambos terem exatamente a mesma orientação, pares diferentes, disparados em sucessão, têm orientações completamente aleatórias um relativamente ao outro.

A razão de todas estas exigências tão peculiares tornar-se-á evidente quando considerarmos um sistema quântico correspondente.



A experiência de Bell: o canhão de alfinetes e a fonte de positrônio de pares de fótons correlacionados. Se os alfinetes ou fótons estão adequadamente orientados, eles passam através dos respectivos polarizadores em A e em B e são detetados. Aqueles que passam são registados com um 1 e os que não passam com um 0. O ângulo $\theta = \theta_A - \theta_B$ é o ângulo relativo entre os polarizadores A e B.

Os alfinetes são disparados contra duas placas metálicas, A e B, cada uma com uma fenda relativamente larga. Estas fendas comportam-se como polarizadores — aparelhos que deixam passar objetos com uma orientação específica, mas que tapam a passagem a outros objetos idênticos, mas com diferente orientação. Por

exemplo, óculos de sol polarizados deixam passar as ondas de luz que vibram verticalmente e bloqueiam a passagem de luz que vibra horizontalmente. Como a maioria da luz refletida, contrariamente à luz direta, vibra horizontalmente, o efeito das lentes polarizadas para óculos de sol é impedir o ofuscamento. As fendas serão nesta experiência verdadeiros polarizadores, porque deixam apenas passar os alfinetes que estão alinhados com a fenda, bloqueando a passagem a todos os outros. Podemos ajustar a orientação destes polarizadores no decurso de uma experiência. Junto às placas A e B há dois observadores que tomam nota, assim que os alfinetes as atingem, se eles passaram ou não através da fenda. Se um alfinete passa através da fenda, é registado um 1 e, se não passa, é registado um 0.

Inicialmente, ambos os polarizadores estão orientados na mesma direção enquanto o canhão dispara os alfinetes. Como cada membro de cada par de alfinetes tem exatamente a mesma orientação e os polarizadores A e B estão alinhados, cada membro do par ou passa pela fenda ou não passa — mas a ambos sucede o mesmo. Existe correlação perfeita entre A e B. Os registos em A e em B poderiam parecer-se com

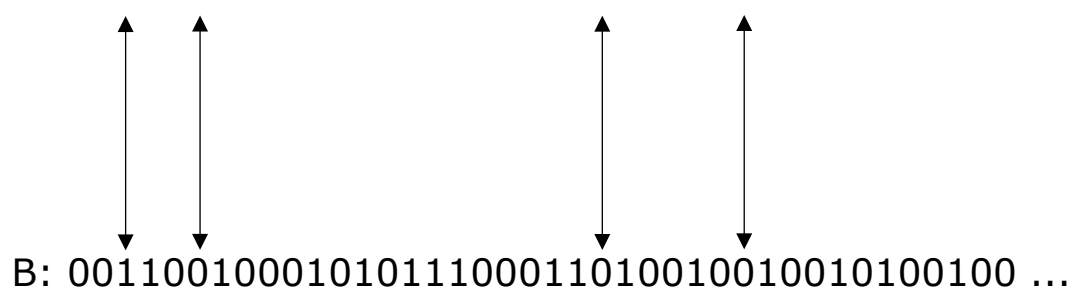
A: 0100011001000010110100110010110001000100 ...

B: 0100011001000010110100110010110001000100 ...

Cada sucessão de zeros e uns é aleatória, porque o canhão dispara os pares em orientações aleatórias. Mas repare-se que as duas sucessões aleatórias estão precisamente correlacionadas.

O passo seguinte é alterar o ângulo relativo entre os dois polarizadores rodando a fenda da placa A por um pequeno ângulo θ , mantendo a fenda de B fixa. Com esta configuração, um alfinete que passe através de A terá um par que não passará por vezes através de B e vice-versa. Os registos em A e em B não estão já perfeitamente correlacionados, mas, como as fendas são largas, ainda é possível que ambos os alfinetes do mesmo par passem através das respetivas fendas. Os registos poderiam ser qualquer coisa como

A: 0001011000101011100011110010110010100100 ...



B: 0011001000101011100011010010010010100100 ...

onde estão indicados os registos diferentes. A estas diferenças chamaremos «erros», porque elas podem ser consideradas como erros no registo de A relativamente ao de B, que, por se ter mantido fixo, se toma como padrão. No exemplo acima houve 4 erros em 40, de modo que a taxa de erro $E(\theta)$ para o ângulo θ é $E(\theta) = 10\%$.

Suponhamos que não tínhamos tocado no polarizador A, mas havíamos rodado o polarizador B do mesmo ângulo θ em sentido

inverso. A taxa de erro será, tal como antes, $E(\theta) = 10\%$, porque a configuração relativa é idêntica.

O passo final é rodar o polarizador A de um ângulo θ no sentido inicial, de modo que agora o ângulo relativo entre os dois polarizadores é de 2θ . Qual é a taxa de erro para esta nova configuração? A resposta é fácil, desde que suponhamos que os erros em A são independentes da situação em B e vice-versa. Ao fazer esta suposição estamos a partir do princípio da validade da causalidade local. Afinal de contas, o que tem a ver o facto de um alfinete passar através da fenda de A com a situação em B? Como os erros produzidos em B foram, na situação anterior, $E(\theta)$, devemos adicionar a isto a taxa de erro provocada por rodar o polarizador A, que é também $E(\theta)$. Parece, portanto, que a taxa de erro segundo a nova disposição deveria ser a soma de dois erros mutuamente exclusivos, ou seja, $E(\theta) + E(\theta) = 2E(\theta)$. Mas, ao rodar A pelo pequeno ângulo θ , deixámos de ter um registo-padrão para B, e, do mesmo modo, rodando B, deixámos de ter um padrão para A. Isto significa que, de tempos a tempos, será produzido um erro simultaneamente em A e em B — um erro duplo. Mas um erro duplo é detetado como não sendo erro. Por exemplo, suponhamos que um par de alfinetes tivesse registado um 1 em A e outro 1 em B se os polarizadores estivessem perfeitamente alinhados. Como o polarizador A foi rodado, o alfinete não passa e é registado um 0. Isto aparece como um erro. Mas, como também rodámos o polarizador B, pode acontecer que o segundo alfinete também não passe pela sua fenda, a fenda de B. Isto é um erro duplo, em que dois registos de passagem, um 1 e um 1, são registados como dois bloqueios, um 0 e um 0. Os dois erros não são assim considerados

como tal. Como é impossível detetar um erro duplo, a taxa de erro relativa a um ângulo 2θ entre os dois polarizadores — $E(2\theta)$ — será necessariamente inferior à soma das taxas de erro para cada uma das rotações separadas. Isto pode ser exprimido matematicamente pela fórmula

$$E(2\theta) \leq 2E(\theta)$$

que é a desigualdade de Bell.

Sem dúvida que, se esta estranha experiência fosse realizada, a desigualdade de Bell seria satisfeita. Por exemplo, para um ângulo 2θ o registo poderia ser qualquer coisa como

A: 0010110011111000101010100111101011101000

 B: 0010100011011100101010100110101011001100

ou seja, 6 erros em 40 e, assim, $E(2\theta) = 15\% \leq 2 \times 10\% = 20\%$. A desigualdade de Bell é satisfeita nesta experiência de física clássica.

Analisemos de perto as suposições essenciais para o estabelecimento da desigualdade de Bell. Partimos da suposição de que os alfinetes são objetos reais e que a orientação dos pares de alfinetes é a mesma. Na realidade, não observamos uma orientação

bem definida para os alfinetes porque eles se movem com grande velocidade. Esta parece uma suposição bastante segura para alfinetes, mas embarcamos na fantasia da objetividade. Supomos que os alfinetes existem, como as cadeiras e as mesas vulgares. Imaginemos que somos o observador em A. Então partimos do princípio de que um alfinete que se move para B, mesmo que B esteja na Lua, tem uma orientação bem definida. A suposição de que as coisas existem num estado bem definido, mesmo quando as não observamos, é a hipótese da objetividade — e da física clássica.

A segunda suposição essencial para obter a desigualdade de Bell foi a de que os erros produzidos em A e B são totalmente independentes. Rodando o polarizador A não influenciemos a situação física em B e vice-versa — é a hipótese da causalidade local.

As duas suposições — objetividade e causalidade local — são essenciais para a obtenção da desigualdade de Bell. O que acontecerá se agora substituirmos os alfinetes por fótons — partículas de luz?

Em lugar de uma metralhadora de alfinetes utilizaremos átomos de positrônio como fonte de partículas. O positrônio é um átomo que consiste num só eletrão ligado a um positrão (antieletrão) e este átomo por vezes decai em dois fótons que são emitidos em direções opostas. A característica importante do decaimento do positrônio é que os dois fótons têm as polarizações relativas perfeitamente correlacionadas — como os alfinetes. A polarização de um fóton é a orientação da sua vibração no espaço. Se um dos

fotões está polarizado numa direção, o outro (que se move em sentido oposto) está polarizado na mesma direção. A direção absoluta de polarização dos dois fotões correlacionados muda de decaimento para decaimento de uma forma aleatória, mas a polarização relativa de um par de fotões é fixa. É esta a característica importante desta fonte — é como o canhão de alfinetes.

Os fotões viajam em sentidos opostos e passam através de polarizadores separados A e B, bastante afastados e com observadores junto deles. Por detrás dos polarizadores estão tubos fotomultiplicadores que detetam fotões isolados. Se um tubo fotomultiplicador deteta um fotão, o acontecimento é registado por um 1 e, se nenhum fotão é detetado, o acontecimento é registado por um 0. Na configuração inicial, os dois polarizadores A e B estão perfeitamente alinhados um relativamente ao outro. O polarizador em B está fixo, enquanto o outro pode rodar; chamaremos θ ao ângulo relativo entre os dois polarizadores, de modo que na configuração inicial se tem $\theta = 0$.

Se um fotão atinge o polarizador, tem uma certa probabilidade de passar e ser detetado. Se a polarização do fotão é paralela à direção do polarizador, passa através dele, atinge o detetor e é registado um 1. Se a direção de polarização é perpendicular, ele será bloqueado e é registado um 0. Com orientações intermédias há apenas uma probabilidade de ele passar.

A polarização dos fotões relativamente aos polarizadores é completamente aleatória, de forma que cada detetor, na

configuração inicial com $\theta = 0$, registrará uma série de zeros e de uns.

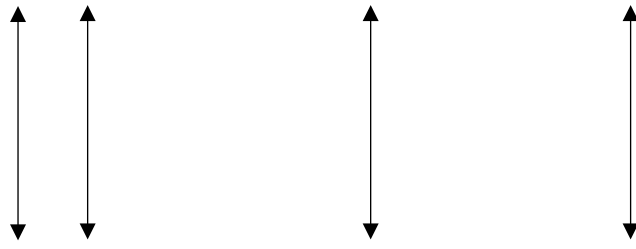
Suponhamos que essa série é algo como isto em cada detetor:

A: 01101011000010110101110011000101110 ...

B: 01101011000010110101110011000101110 ...

Isto é exatamente igual aos registos do canhão de alfinetes. As séries são idênticas porque cada par de fótons está polarizado da mesma forma e o ângulo entre os polarizadores é zero. Além disso, cada série tem, em média, um igual número de zeros e de uns, pois é igualmente provável que um fóton passe ou não através do polarizador.

Em seguida rodamos o polarizador A por um pequeno ângulo θ . Seja, por exemplo, $\theta = 25^\circ$. Esta pequena rotação faz com que os dois fótons de cada par tenham probabilidades de passar através do polarizador ligeiramente diferentes. As séries relativas aos fótons detetados já não são perfeitamente idênticas; mostram de tempos a tempos pequenas discrepâncias. No entanto, em média, ambas as séries relativas a A ou a B têm igual número de zeros ou de uns porque a probabilidade de passar através do polarizador é independente da sua orientação. As novas séries serão do tipo

A: 0010111011000111110110100111000101011100 ...

 B: 0110011011000111010110100110000101011100 ...

onde as discrepâncias estão indicadas. No exemplo acima, a taxa de erro, como há 4 erros em 40 detecções, é $E(\theta) = 10\%$.

Até aqui, esta experiência com fótons é perfeitamente idêntica à feita com alfinetes. Os fótons estão a comportar-se como objetos perfeitamente visualizáveis como alfinetes. Se supusermos que o estado de polarização que os fótons possuem em A e em B é objetivo (suposição de objetividade) e que o que se mede em A não influencia o que ocorre em B (suposição de causalidade local), deve verificar-se nesta experiência a desigualdade de Bell $E(2\theta) \leq 2E(\theta)$. Se duplicarmos o ângulo para $2\theta = 50^\circ$, obtemos os seguintes registos:

A: 100011100110011011100111110110101000100 ...

Isto perfaz 12 erros em 40 deteções, e, portanto, $E(2\theta) = 30\%$. Comparemos agora este resultado com a exigência da desigualdade de Bell. Como $E(\theta) = 10\%$, temos $2E(\theta) = 20\%$; mas a desigualdade de Bell exige que $E(2\theta) \leq 2E(\theta)$, e portanto, para ela ser verificada, é necessário que 30% seja menor do que 20%! Concluimos assim que a desigualdade de Bell é violada nesta experiência, tal como é violada para fótons reais. Consequentemente, a suposição de objetividade ou a de localidade ou ambas são falsas. Isto é muito surpreendente!

Descrevemos a experiência e a desigualdade de Bell em pormenor porque ela é bastante elementar e ilustra bem o centro da peculiaridade quântica. Bell estava interessado em encontrar uma forma de testar se existem variáveis ocultas no mundo das rochas, mesas e cadeiras. Ele mostrou que a teoria quântica, ao violar a desigualdade que tem o seu nome, não exclui necessariamente a possibilidade de um mundo objetivo descrito por variáveis ocultas; ela implica, no entanto, que a realidade assim descrita tem de ser não local. Por detrás da realidade quântica poderia existir outra realidade descrita por essas variáveis escondidas e nessa realidade teriam de existir influências que se movem instantaneamente ao longo de uma distância arbitrária e sem mediação evidente. É possível acreditar que o mundo quântico é objetivo conforme pretendia Einstein —, mas nesse caso somos forçados a aceitar influências não locais — algo que Einstein e grande parte dos físicos nunca aceitariam.

Para ter uma noção intuitiva de como a objetividade implica a não localidade, comparemos os registos para os ângulos $\theta = 25^\circ$ e

$\theta = 50^\circ$. Há demasiados erros para o dispositivo rodado por um ângulo de 50° (12) quando comparados com o dispositivo rodado por 25° (4). Parece que, rodando o polarizador A, devemos ter influenciado os fótons que vão ser detetados em B e que isso produz todos os erros a mais responsáveis pela violação da desigualdade de Bell. O observador B poderia estar na Terra e o observador A a anos-luz de distância, numa galáxia longínqua. A, rodando o seu polarizador, parece estar a enviar um sinal mais rápido do que a luz, alterando assim o registo de B. Isto parece certamente uma ação à distância — e o fim da localidade.

Agora que nos apercebemos daquilo que somos forçados a admitir, podemos querer olhar um pouco mais longe. Qualquer das alternativas — uma realidade não objetiva ou não local — é difícil de aceitar. Alguns divulgadores recentes do trabalho de Bell, quando confrontados com esta conclusão, chegaram ao ponto de afirmar que a telepatia é assim confirmada ou que a noção mística de que todas as partes do universo estão instantaneamente interligadas é deste modo justificada. Outros asseguram que este facto implica comunicação a velocidades superiores à da luz. Tudo isto é disparate; a teoria quântica e a desigualdade de Bell não implicam nada deste tipo. Os indivíduos que fazem tais afirmações substituíram a compreensão dos factos por uma fantasia que realiza os seus desejos. Se analisarmos de perto a experiência de Bell, veremos apenas alguma prestidigitação da parte do Deus-que-joga-aos-dados de forma a impedir as influências não locais. Assim que julgamos ter capturado um animal realmente estranho — como influências acausais —, ele escapa-se do nosso alcance. A fluidez da realidade quântica manifesta-se de novo.

Bohr teria sido o primeiro a apontar uma interpretação alternativa para a violação experimental da desigualdade de Bell. Para concluir que os fótons estão sujeitos a influências não locais permitimo-nos a fantasia de imaginar que eles existem num estado bem definido. Tentemos verificar essa afirmação, teria insistido Bohr. Se conseguirmos verificar que os fótons existem num estado de polarização bem definido sem o alterar, então teremos realmente de concluir, a partir da experiência de Bell, que temos influências não locais.

Para os alfinetes, esta verificação é fácil — preparamos uma câmara fotográfica de alta velocidade e fotografamo-los assim que chegam ao polarizador. Isto não perturbará o seu estado. Mas a experiência com alfinetes não violava a desigualdade de Bell, ao contrário da experiência com fótons.

Se agora tentarmos verificar o estado de polarização de um fóton, verificamos que isto não é possível sem alterar a exigência de que ambos os fótons tenham uma polarização idêntica. Ao medir a polarização de um fóton, colocamo-lo num estado bem definido, o que, no entanto, altera as condições iniciais da experiência. Passa-se aqui o mesmo que se passava na experiência das duas fendas feita com eletrões. Ao observar com feixes de luz a fenda pela qual o eletrão passava, alterávamos o padrão detetado no alvo. Da mesma forma, o ato de estabelecer o estado objetivo de um fóton altera as condições para as quais a desigualdade de Bell foi deduzida. A tentativa de verificar experimentalmente a suposição de objetividade tem por consequência a alteração das condições da experiência de tal forma que já não podemos utilizar a violação da

desigualdade de Bell para concluir que existem influências não locais.

Suponhamos então que não tentamos verificar o estado de polarização dos fótons. Afinal de contas, temos o registo de deteções em A e em B e eles, como parte do mundo macroscópico das mesas, cadeiras e gatos, são certamente objetivos. Será que o observador em B pode ler o seu registo, ver que a desigualdade de Bell foi violada, e assim concluir que a causalidade local foi também violada? A resposta é não, porque o Deus-que-joga-aos-dados tem um truque para nos mostrar. Recordemos que a fonte de fótons os emite aos pares, cada par com uma direção de polarização aleatória. Isto significa que os registos em A e em B, independentemente do ângulo entre si, são sucessões completamente aleatórias de zeros e uns. E é esse facto que nos impede de concluir a existência de influências não locais.

A princípio poderíamos ser levados a pensar que, ao rodar o polarizador A, influenciámos diretamente o número de erros produzidos em B. Portanto, rodando o polarizador A por vários ângulos diferentes em sucessão, B poderia, observando a alteração no número de erros produzidos em B, receber uma mensagem de A — um telégrafo que violaria a causalidade. Mas nenhuma informação pode ser transmitida de A para B utilizando este sistema, porque possuir um único registo de acontecimentos em A ou em B seria como possuir a mensagem de uma comunicação secreta escrita num código aleatório — nunca podemos decifrar a mensagem. Como as sucessões em A e em B são sempre completamente aleatórias, não existe forma de comunicação entre

A e B. É assim que a não localidade é evitada pelo Deus-que-joga-aos-dados; Ele está sempre a baralhar o baralho das cartas da natureza.

Os estereogramas aleatórios, que já analisámos, fornecem uma boa imagem desta manobra. Cada metade do estereograma é completamente aleatória, mas os dois conjuntos aleatórios de pontos, quando comparados, podem fornecer informação não aleatória. A informação está na intercorrelação obtida por comparação dos dois conjuntos. O mesmo se passa com os registos em A e em B — a informação sobre o ângulo relativo dos dois polarizadores A e B está na intercorrelação dos dois registos, e não em cada um deles separadamente. O que se passa quando o ângulo entre os polarizadores é alterado é que sucessões aleatórias de zeros e uns são transformadas noutras sucessões aleatórias de zeros e uns, mas não há possibilidade de dizer o que se passou analisando apenas uma das sucessões. Como esses processos aleatórios reais ocorrem de facto na natureza — como é o caso nesta experiência —, evitamos a conclusão da não localidade verdadeira.

Que truque maravilhoso utilizou a natureza para evitar influências não locais reais! Se nos perguntássemos, dentre todas as coisas do nosso universo, qual aquela que permanece idêntica quando alterada de uma forma aleatória, a resposta seria: uma sucessão aleatória. Uma sucessão aleatória alterada de uma forma aleatória permanece aleatória — a desordem permanece desordem. As sucessões aleatórias em A e em B comportam-se desta forma. Mas, por comparação destas sucessões, podemos dizer que houve

uma alteração devida à rotação de um dos polarizadores — a informação está na intercorrelação, e não nos registos individuais. E essa intercorrelação é completamente prevista pela teoria quântica.

Concluimos, portanto, que, mesmo que aceitemos a objetividade do micromundo, a experiência de Bell não implica a existência de influências não locais. Ela implica, sim, que se possa alterar instantaneamente a intercorrelação de duas sucessões aleatórias de acontecimentos em localizações afastadas da Galáxia. Mas a intercorrelação de dois conjuntos de acontecimentos muito afastados não é um objeto local e a informação que ela contém não pode ser utilizada para violar o princípio da causalidade local.

Com a desigualdade de Bell e a experiência de EPR penetrámos na essência da peculiaridade quântica. Para ver que tipo de realidade podemos adquirir com estas experiências temos de ir ao mercado da realidade.

CAPÍTULO 13

O Mercado da Realidade

O verdadeiro mistério do mundo é o visível, e não o invisível.

OSCAR WILDE

Estamos a chegar ao fim da nossa estrada em direção à realidade quântica. A estrada pode prolongar-se no futuro da física e novos factos sobre a teoria quântica podem ser postos em evidência. Talvez a teoria quântica esteja experimentalmente errada ou incompleta, o que não seria logicamente impossível. Deve haver, sem dúvida, coisas incríveis ainda por descobrir na estrada para a realidade quântica. Mas, na ausência de uma nova interpretação ou do insucesso experimental da teoria quântica, a estrada chegou para nós ao fim. O que agora encontramos é uma espécie de mercado — o mercado da realidade.

O mercado da realidade tem muitas lojas, cada uma com um comerciante que nos quer vender a sua versão da realidade física. Da forma como o mercado está organizado, temos dinheiro para comprar apenas uma realidade, e, portanto, o mercado é muito competitivo. Somos agora compradores bastante sofisticados, pois já ouvimos falar sobre a experiência das duas fendas, as experiências de EPR e de Bell, os trabalhos acerca da lógica quântica e o gato de Schrödinger. Os comerciantes nas lojas também sabem

tudo isto e ninguém discorda sobre as experiências reais. É a *interpretação* destas experiências em termos da realidade física que está à venda. A interpretação das experiências, no entanto, não é decidida pela experiência. Enquanto compradores, temos de fazer apelo a outros critérios para fazer a nossa escolha, e estes critérios podem ser a pequena quantidade de suposições, o conteúdo empírico potencial e o nosso gosto pessoal. Há muitas lojas, mas vale só a pena entrar nas lojas que têm a mercadoria mais fina. Assim que entramos, começamos a ouvir os argumentos dos vendedores.

A primeira loja em que entrámos, uma tenda nos arrabaldes do mercado, tem um cartaz à entrada que diz Muitos Universos à Venda, o que sem dúvida é intrigante. O vendedor explica que existe uma saída fácil para todos os problemas postos pela teoria quântica. Ele sublinha que temos feito uma suposição tácita em todos os nossos raciocínios sobre a realidade quântica: a de que existe apenas uma realidade. «Se você ainda continua a pensar», prossegue ele, «sobre qual a fenda através da qual o eletrão passou “realmente”, ou se o gato de Schrödinger está morto ou vivo, então imagine que todo o universo em cada instante se divide numa infinidade de universos. Todas essas terras-de-ninguém quânticas se tornam reais. Nalguns destes universos, o eletrão passa pela fenda 1 e noutros pela fenda 2. Universos diferentes não comunicam entre si, não sendo, portanto, possíveis contradições. A realidade é a infinidade de todos estes universos que existem num “superespaço” que os inclui a todos. Podemos imaginar que acontece todo o tipo de coisas incríveis em todos estes universos — tudo aquilo que pode acontecer acontecerá. Nalguns universos nem

sequer existem pessoas para pensar sobre a realidade quântica. Deixemos de pensar nas razões pelas quais o nosso universo existe ou por que tem características como a vida na Terra; o nosso universo é apenas um dentre uma infinidade que tem as propriedades que para ele observamos. De outra forma não estaríamos sequer aqui para fazer estas perguntas!»

«Mas», pergunta um dos nossos amigos, «não é verdade que esta multirrealidade e este superespaço são uma enorme fantasia e que, apesar de não estarem estritamente afastados pela teoria quântica, não são por ele exigidos? Você fala de todos esses mundos como se eles fossem reais, quando afinal é apenas este — aquele em que vivemos — que podemos conhecer. E, mesmo aceitando a sua interpretação da teoria quântica em termos de múltiplos mundos, como é que sabemos que os outros mundos são tão diferentes do nosso? Talvez mundos diferentes estejam relacionados entre si da mesma forma que as diferentes configurações das moléculas de um gás: cada configuração é radicalmente diferente de todas as outras, mas o importante é que o gás no seu conjunto tem as mesmas propriedades para a grande maioria dessas diferentes configurações moleculares. E não se lembra que John Wheeler, um dos físicos que ajudaram a desenvolver esta perspectiva dos múltiplos mundos, acabou por rejeitá-la porque, nas suas palavras, 'Ela necessitava de demasiada bagagem metafísica para se poder transportar?' Eu não posso provar a perspectiva dos múltiplos mundos», concluiu o nosso amigo, «e é justamente essa a razão pela qual ela não me interessa como físico.»

O vendedor parece bastante abatido à medida que o nosso grupo vai abandonando a sua loja. «Não vão ouvir o resto dos meus argumentos?», implora ele.

«Talvez em qualquer outro mundo», diz o nosso amigo crítico, «mas não neste!»

A loja em que entrámos a seguir é a Loja da Lógica Quântica. O vendedor desta loja vai tentar convencer-nos a comprar a sua «lógica quântica» e a abandonar a lógica booleana da linguagem normal; dessa forma, a realidade quântica não nos parecerá tão estranha. A lógica quântica é não booleana: o sentido vulgar de conexões como «e» e «ou ... ou» é alterado. O vendedor desta loja diz-nos que a razão pela qual o mundo quântico nos parece tão estranho é que não pensamos corretamente sobre ele — a nossa gramática está errada e a lógica normal não se aplica ao mundo quântico. Dentro da loja há vários computadores e inteligências artificiais em exposição; eles foram programados para pensar de uma forma não booleana, utilizando a lógica quântica. Para essas inteligências, o mundo quântico parece «natural» e não é de forma alguma estranho; e isto deixa-nos muito impressionados.

A pergunta mais interessante sugerida pela lógica quântica é a forma de determinar a lógica correta para pensar sobre o mundo físico. A lógica torna-se um problema empírico, tal como anteriormente a geometria do espaço e a do tempo se tinham tornado um problema empírico com o advento da teoria da relatividade generalizada. Aprendemos com a teoria da relatividade generalizada que o mundo é de facto não euclidiano. A lição da

teoria quântica pode ser interpretada como querendo dizer que a lógica do mundo físico é não booleana. A lógica, que geralmente é tida como anterior a qualquer experiência, torna-se empírica (dependente da nossa experiência), tal como, antes dela, a geometria.

Apesar da argumentação persuasiva do vendedor de lógica quântica — parece uma solução bastante simples para todos os nossos problemas —, grande parte dos físicos, tal como grande parte das pessoas, são relutantes em abandonar a sua maneira booleana de pensar.

Os físicos não podem deixar de pensar desta maneira; é através dela que a linguagem normal descreve o mundo da experiência. Eles sentem que a adoção de uma lógica quântica não booleana é de certa forma um truque — coloca a peculiaridade quântica na mente, e não já no mundo físico, ao qual julgam que ela de facto pertence.

Um dos membros do nosso grupo diz-nos que a analogia entre a lógica não booleana e a geometria não euclidiana não é exata. É verdade que, de acordo com a relatividade generalizada, a geometria do espaço é não euclidiana no seio de um campo gravitacional. No entanto, para campos gravitacionais pouco intensos, a geometria do espaço torna-se muito semelhante à geometria vulgar do espaço plano euclidiano. Mas a lógica não é assim — a decisão de escolher uma lógica e preterir a outra é uma decisão do tipo tudo ou nada. Uma vez que decidamos organizar a nossa conceção do mundo físico de acordo com uma lógica, ela (seja

booleana ou não booleana) deve ser aplicada globalmente, a todo o mundo.

À saída da Loja da Lógica Quântica encontrámos alguns indivíduos que adquiriram a lógica quântica. Esses infelizes estavam tão preocupados com a peculiaridade do mundo quântico que reprogramaram os seus cérebros para pensarem em termos de lógica não booleana. Que erro terrível cometeram! Não conseguem sequer efetuar uma transação pessoal ou financeira usando a lógica quântica. Se lhes contarmos a experiência das duas fendas, limitam-se a sorrir — não compreendem onde está o problema. Agora percebemos qual é o problema da lógica quântica: ela é mais restritiva do que a lógica booleana vulgar. Não podemos demonstrar tantos factos com a lógica quântica, e é por essa razão que não pensamos que o mundo físico tenha alguma coisa de estranho. Adotar a lógica quântica seria como que inventar uma nova lógica para sustentar que a Terra era plana, apesar de serem apresentadas provas de que ela era redonda. A nova lógica permitir-nos-ia interpretar as provas de forma a sustentar que a Terra fosse «plana». Algumas pessoas tentaram de facto fazê-lo. Mas parece que o preço a pagar por mudar a nossa lógica é demasiado elevado.

Apercebemo-nos de que o vendedor da «Loja de Lógica Quântica» não reprogramou o seu cérebro. Ele necessitava da lógica normal para nos tentar convencer de que a lógica quântica era a resposta à peculiaridade quântica. Mas afastámo-nos de novo a caminho da realidade e com as nossas mentes intactas.

A seguir chegámos a duas lojas que estão lado a lado. São as duas lojas mais cheias de todo o mercado da realidade: a Loja da Realidade Local e a Loja da Realidade Objetiva; e estão em competição direta entre si. Algumas pessoas chegam a comprar numa das lojas justamente porque sabem que isso significa renunciar à realidade vendida na outra — uma realidade que eles não podem aceitar. Decidimos então entrar na Loja da Realidade Objetiva no preciso momento em que o vendedor recomeça a apregoar a sua mercadoria.

«A base da física», começa ele, «na realidade a base de toda a ciência, é a existência de uma realidade objetiva — um mundo de objetos que existe independentemente de nós o conhecermos. O que acontece na Lua, na rua ao lado ou atrás das nossas costas não deve depender de nós o estarmos a observar ou não. O micromundo deve também ser objetivo, pois, de outro modo, como seria possível a pretensão de construir uma ciência desse mundo? Se negarmos a realidade do mundo, a menos que o observemos e estejamos conscientes da nossa observação, é certo que acabaremos no solipsismo — a convicção de que apenas a nossa consciência existe. Nenhuma ciência pode levar o solipsismo a sério. Mas é a isso que somos forçados se não admitirmos a objetividade do micromundo.

Aceitar a objetividade do micromundo não é um passo atrás, em direção à física clássica. Einstein sabia-o. O que essa aceitação significa é que a teoria quântica é incompleta e que algum dia descobriremos como ir além dela. Talvez por detrás da realidade quântica haja variáveis ocultas que, uma vez conhecidas, restabeleçam o determinismo; veremos então que a nossa

necessidade atual de utilizar métodos estatísticos é apenas consequência da nossa ignorância de uma teoria mais fundamental. Novos mundos podem abrir-se à nossa compreensão assim que virmos exatamente quais são as cartas no baralho da natureza.»

Enquanto o vendedor continua a fazer apelo à nossa razão com o seu discurso, alguns dos seus colegas com menos prestígio tentam convencer os membros mais crédulos da multidão. Ouvimos uma conversa, num dos cantos da loja, durante a qual um vendedor tenta convencer um conhecido ocultista. «Sabia que, se comprar a realidade objetiva, é forçado a renunciar à ideia de uma realidade localmente causal? Não acha isto entusiasmante? Devem, portanto, existir, de acordo com os resultados experimentais da mecânica quântica, interações não locais instantâneas, como a telepatia.»

«Já sei disso há muito tempo», replica o ocultista. «Acho divertido que os cientistas materialistas tenham levado tanto tempo a verificar esta antiga verdade da realidade. Tudo aquilo que eles chamam realidade material está interligado instantaneamente por forças não materiais. Qualquer parte do universo está ligada a todas as outras — a realidade é não local e acausal. Este conhecimento é bem compreendido por aqueles que se ativeram firmemente à tradição de Hermes Trismegisto¹, o mago antigo. Pelos seus próprios e lentos métodos, os cientistas só agora descobriram o universo acausal. Mas não é esta a altura própria para rejubilar de satisfação, aliás justificada. Os físicos quânticos e os ocultistas deveriam agora unir forças para começar a grande obra de explorar a nova realidade.»

Muitas pessoas na multidão aproximam-se para escutar com mais atenção este diálogo. Compreendemos imediatamente que o vendedor e o ocultista são colaboradores; eles formam uma equipa que tenta vender uma realidade àqueles que querem ver o bizarro e o incrível realizados na ciência. Muitos crentes convictos, ou pessoas com inclinações místicas, foram atraídos por estas ideias. Mas é tudo uma encenação — o vendedor apela para os céticos científicos, enquanto os seus colegas tentam a sorte com os grupos não científicos.

Ouvem-se berros nessa zona da loja quando um vendedor da Loja da Realidade Local aparece em cena. «É uma fraude vender a realidade objetiva àqueles que querem acreditar em telepatia e num universo interligado. A teoria quântica, o argumento de EPR e a experiência de Bell não implicam nada deste género. Isso é um enorme disparate! Mesmo que vocês decidam comprar a realidade objetiva — e eu não vos aconselharia a fazê-lo —, não há forma de fazer com que ela exija a existência de qualquer tipo de telepatia ou de interações instantâneas à distância. Peço-vos que pensem nisto a sério (aqueles que não compraram a lógica quântica!) e que escutem com atenção os meus argumentos.» O ocultista e o seu colega vendedor já conhecem muito bem este indivíduo e tentam impedi-lo de falar. Mas a multidão não os deixa fazê-lo e começa a ouvir os argumentos do recém-chegado.

«Suponhamos, por hipótese, que aceitamos aquilo que há pouco nos estava a propor o vendedor — isto é, que a realidade microfísica deve ser objetiva. Então é verdade que existem influências não locais, como diz o vendedor. Mas que tipo de influências não locais

são estas? Consideremos a análise já feita da experiência de Bell com fótons. Tudo indica que rodar o polarizador A influencia instantaneamente a situação em B, de forma que se produzem mais erros. Se supusermos que os fótons são objetivos e existem num estado bem definido, este facto tem toda a aparência de uma ação à distância e, portanto, de uma violação da causalidade.

Mas, na realidade, não o é. Aqueles que querem acreditar numa acausalidade desse tipo são realmente deterministas rígidos. Para restabelecer a objetividade e o determinismo estão prontos a avançar com a hipótese da existência de influências não locais que impregnam o universo. Esta é uma versão moderna da antiga teoria do éter do espaço absoluto mantida pelos físicos antes de Einstein formular a sua teoria da relatividade generalizada. A teoria do éter sustentava que o espaço era uma substância que tudo impregnava, como uma geleia transparente. Talvez exista um éter, mas, se Einstein tem razão, ele não pode ser detetado. A navalha de Occam — princípio segundo o qual as suposições supérfluas devem ser eliminadas — pode ser eficazmente aplicada. Podem ignorar tudo o que ouvirem acerca de a teoria quântica implicar influências acausais ou acerca do éter — eles não têm consequências experimentais.»

«Está então a dizer-nos que as influências não locais que a nossa suposição de que o fóton e os outros quanta são objetivamente reais arrasta não podem, segundo a mecânica quântica, ser verificadas?», pergunta uma pessoa da multidão. Um suspiro de decepção é ouvido, vindo dos lados do grupo que julgava que a teoria quântica comprovava a comunicação telepática por todo o universo.

O ocultista, bastante desanimado, abandona a loja. O novo orador é muito persuasivo e encantou a multidão.

«Exatamente», continua ele. «É verdade que na teoria quântica tudo se passa como se existisse uma ação instantânea à distância, e foi isto que tanto preocupou Einstein. Rodar o polarizador A da experiência de Bell influencia instantaneamente o registo em B. Mas repito a minha pergunta: que tipo de influência é esta? Apesar de o registo de B ser influenciado pela rotação do polarizador A, não há forma de o detetar analisando apenas o registo de B! A razão é que a fonte emite fótons com polarizações aleatórias. Assim, quer o registo de A quer o de B são *completamente aleatórios*, qualquer que seja o ângulo entre os polarizadores A e B. Uma só sucessão não contém informação alguma; é como a mensagem secreta codificada de que não se conhece a sucessão decodificadora. No entanto, a intercorrelação entre as sucessões de A e de B *não é* aleatória e depende do ângulo θ entre os polarizadores. O facto notável é que duas sucessões completamente aleatórias como as de A e de B podem, quando comparadas, fornecer informação não aleatória.

«Como cada um dos padrões é verdadeiramente aleatório, não podemos usar as experiências de Bell para descobrir a não localidade real, mas sim, e apenas, para verificar uma espécie de não localidade a posteriori. E, mesmo isto, apenas se admitirmos a existência objetiva dos fótons independentemente de observarmos, de facto, o seu estado. É devido ao carácter aleatório de cada registo que as influências não locais reais ou as ações à distância são impossíveis. O Deus-que-joga-aos-dados interveio para impedir

a acausalidade. O que eu sugiro é irmos todos ali ao lado, à Loja da Realidade Local, onde vocês podem obter uma forma alternativa (e bastante melhor) de olhar para a realidade.»

«Mas o que significa “aleatório”?», pergunta um agitador no meio da multidão. «Você afastou as influências não locais porque cada um dos registros era realmente “aleatório”.»

«Pergunte aos matemáticos», respondeu o vendedor.

«Eles não sabem o seu significado preciso», diz o agitador.

«Nem eu», diz o vendedor da realidade local. Mas a verdadeira aleatoriedade é imbatível, e isso quer neste caso dizer que derrotará sempre quem tentar detetar influências não locais reais. Não há acaso como o acaso quântico.»

A multidão começa a sair da Loja da Realidade Objetiva para entrar na Loja da Realidade Local, liderada pelo vendedor, que está muito satisfeito com o seu discurso. Alguém lhe pergunta por que é que ele é tão crítico em relação aos ocultistas e aos pseudocientistas e ele começa a contar uma pequena história:

«Quando tinha 10 anos, fiquei fascinado pela magia. Aprendi truques de cartas elementares, construí pequenos aparelhos e comprei pequenas caixas com truques mágicos. As minhas oportunidades de praticar a magia eram as festas de aniversário, e era um belo espetáculo de magia. Como ilusionista e animador de

reuniões, eu correspondia aos interesses da assistência. O que mais me impressionou foi a diferença nas reações de adultos e crianças aos truques. Os adultos aceitavam os truques como divertimento; queriam ser enganados. Mas as crianças não. A sua capacidade para a suspensão da crença não estava ainda desenvolvida; elas queriam sempre saber como é que os truques eram feitos. Para elas não era um simples divertimento; era uma violação da sua confiança na realidade física.

Um ilusionista profissional não proclama que viola as leis físicas; apenas parece fazê-lo. No entanto, quando pseudocientistas anunciam ter descoberto novos fenómenos dramáticos que transcendem em muito as teorias físicas correntes, como a telepatia ou a dobragem do metal através do “poder mental”, ou fazemos como as crianças e insistimos em saber como é realizado o truque, ou fazemos como os adultos e apreciamos como tal aquilo que não passa de um divertimento.»

Ao entrarmos na Loja da Realidade Local vemos que ela está já bastante cheia; nela estão muitos físicos que acreditam na interpretação da teoria quântica segundo a escola de Copenhaga apenas porque os seus heróis, Bohr e Heisenberg, a inventaram. O vendedor que terminou a discussão na outra loja e nos conduziu a esta é com certeza o seu dono. À medida que as pessoas entram, ele começa a apregoar.

«A base da física», começa ele, «na realidade, a base de toda a ciência, é o princípio da causalidade local: os acontecimentos materiais que ocorrem numa dada região do espaço são causados

por acontecimentos materiais adjacentes. Como é que podemos construir a ciência se um acontecimento numa outra região do universo influencia instantaneamente os acontecimentos que ocorrem aqui e agora? A teoria quântica obedece ao princípio da causalidade local. Se aceitarmos este princípio, temos de analisar com muita atenção o que significa a objetividade — a suposição de que o micromundo tem um estado de existência bem definido, tal como o macromundo. Os cientistas estão habituados a pensar em termos daquilo que sabemos ser na realidade verdadeiro sobre o mundo, e não das nossas fantasias; e o micromundo é uma fantasia se não o observarmos. Até que as medições sejam de facto realizadas não podemos sequer falar sobre as propriedades objetivas das coisas. Todos os físicos aceitam esta perspetiva, e insisto convosco para que a aceitem também.»

«Mas não é verdade que isso implica que a realidade é determinada pelo observador?», pergunta um membro da assistência. «Que tipo de realidade é essa?»

«É verdade», diz o vendedor, «mas temos apenas de nos preocupar com a realidade determinada pelo observador para objetos de dimensões quânticas. É claro que os acontecimentos quânticos influenciam o mundo macroscópico — como foi mostrado pelo gato de Schrödinger — e, portanto, parece que a peculiaridade quântica se escapa para o mundo dos objetos vulgares. Mas isso é levar a interpretação de Copenhaga demasiado longe, porque há uma diferença qualitativa essencial entre o micromundo e o macromundo: o macromundo pode acumular informação, enquanto o micromundo não pode. Acabámos a nossa discussão do gato de

Schrödinger com a conclusão de que a realidade é determinada pelo observador apenas para objetos de dimensões atômicas. A realidade é para estes uma distribuição de acontecimentos. Pelo ato da observação transformamos uma distribuição aleatória noutra distribuição aleatória. Mal podemos chamar a isto uma realidade determinada pelo observador. Seria como os defensores das teorias não locais, que afinal de contas diziam apenas que uma sucessão aleatória se transformava noutra igualmente aleatória.»

Um distinto cientista do nosso grupo pergunta educadamente ao vendedor como pode ele estar certo de que foi realizada uma observação se a observação depende de processos temporalmente irreversíveis, que são apenas estatísticos — altamente irreversíveis, mas apenas em média. Antes que o vendedor possa responder, uma pessoa irrompe aos berros:

«Mas suponha que ocorre só um acontecimento, e não uma sucessão!», exclama o agitador que se juntou à multidão e veio para esta loja. «Suponha que há apenas um acontecimento, e não uma distribuição, e que esse acontecimento determina se a espécie humana, e não apenas um gato, vai sobreviver.»

«Acontecimentos quânticos isolados não têm significado no contexto da teoria quântica. Eles dão-se aleatoriamente», diz o vendedor.

«O que significa "aleatório?», pergunta o agitador. Já ouvimos esta pergunta. As nossas cabeças já estão a andar à roda e o ar

dentro da loja está abafadíssimo. Decidimos sair da loja na altura em que rebenta um novo foco de discussão. É qualquer coisa acerca da consciência do observador que a teoria quântica exige. Não chegámos a ouvir o fim da discussão, mas bem precisávamos de sair e apanhar um pouco de ar fresco. É altura de dar um passeio para refletir sobre tudo aquilo que ouvimos e assentar ideias.

Não muito longe do mercado da realidade encontrámos um parque muito agradável e, sentado num banco a fumar cachimbo, um homem idoso cuja presença nos inspira imediatamente confiança. «Já comprou alguma realidade?», perguntámos.

«Não, ainda não, e duvido de que venha a fazê-lo», responde-nos ele com um acentuado sotaque dinamarquês. «Tenho refletido sobre o problema desde há muito e, em discussões com Einstein, cheguei a algumas conclusões.»

«Onde está Einstein agora? Que realidade adquiriu ele?», perguntámos ao nosso interlocutor.

«Einstein abandonou o mercado da realidade há muito tempo e deixou-me o seu dinheiro. Não gostava de nenhuma delas e afastou-se para vaguear mais longe, na estrada, como vagueava na sua juventude. Não faço a menor ideia do que ele encontrou por lá, se é que encontrou alguma coisa. Quanto a mim, cheguei a acordo com a realidade quântica.

«Não há nenhum mundo quântico semelhante ao mundo familiar dos objetos vulgares, como cadeiras e mesas, e deveríamos deixar de procurá-lo. As entidades do micromundo, como elétrons, fótons e prótons, existem certamente, mas algumas das suas propriedades (propriedades fundamentais, como a sua localização no espaço) existem apenas de uma forma contingente. Antes da invenção da teoria quântica, os físicos podiam pensar sobre o mundo em termos dos seus objetos, independentemente da forma *como* tomavam conhecimento da existência deles. A realidade quântica também tem objetos — os quanta, como os elétrons e os fótons —, mas acompanha-os toda uma estrutura da informação que, em última análise, se reflete no modo como falamos sobre a realidade quântica. A teoria da medida quântica é uma teoria da informação. O mundo quântico confunde-se com aquilo que sobre ele podemos saber, e aquilo que sobre ele podemos saber deve provir de dispositivos experimentais concretos — não temos outra via.

«Aquilo de que eu estou certo é de que a realidade quântica é diferente da realidade clássica: não há forma de a adaptar à realidade clássica. A teoria quântica não prevê acontecimentos individuais e a teoria clássica prevê-los-ia; as duas teorias são logicamente distintas. Mas, mesmo na nossa tentativa de caracterizar aquilo que a teoria quântica não é, fazemos apelo a conceitos clássicos, como a objetividade e a causalidade local. Não temos alternativas para isto, pois somos seres macroscópicos e vivemos num mundo clássico e visualizável ao qual estes conceitos são aplicáveis.

«Podemos imaginar que a realidade quântica é como uma caixa selada da qual recebemos mensagens. Podemos fazer perguntas acerca do conteúdo da caixa, mas nunca abri-la e ver o que está dentro. Formulámos uma teoria — a teoria quântica — sobre essas mensagens e ela é consistente. Mas não há maneira de visualizar o conteúdo da caixa. A melhor atitude a tomar é a de “testemunha verídica?” — descrevamos apenas aquilo que é observado sem projetar nisso as nossas fantasias. Esta é a melhor abordagem da realidade e aquela que pessoalmente defendo.

«Aqueles pessoas do mercado da realidade esqueceram-se de uma coisa que eu lhes disse há muito, ou talvez nem sequer a tenham ouvido como deve ser: o princípio da complementaridade. Este princípio assegura que para descrever a realidade temos de fazer apelo a conceitos complementares que se excluem uns aos outros, isto é, não podem ser todos verdadeiros. Mas não só eles se excluem mutuamente do ponto de vista concetual, como dependem uns dos outros pela sua própria definição. Por exemplo, homem e mulher podem ser considerados como conceitos complementares. Se imaginarmos que o nosso sexo fica determinado à nascença, podemos ser ou homem ou mulher. Mas, se no mundo houvesse um só sexo, seria o próprio conceito de sexo a não fazer sentido: os conceitos de homem e de mulher definem-se mutuamente, além de mutuamente se excluírem. Esses conceitos complementares são representações diferentes da mesma realidade única; no meu exemplo, essa realidade é a humanidade.

«A minha imagem preferida sobre a complementaridade é o desenho de um vaso feito com dois perfis pelos psicólogos da *Gestalt*. Será um vaso ou dois perfis? Podemos ver ambos, dependendo de qual das imagens consideramos como figura e qual consideramos como fundo. Mas não podemos ver o desenho como vaso e perfis simultaneamente. É um exemplo perfeito de uma realidade criada pelo observador — nós decidimos que realidade vamos observar. E, no entanto, as definições de o que é o vaso e de o que são os perfis dependem uma da outra — não podemos ter uma delas sem a outra. Elas são representações diferentes de uma mesma realidade subjacente: o branco e negro numa folha de papel.



Desenho de um vaso feito com dois perfis pelos psicólogos da *Gestalt*.

«Agora compreende por que deixei de frequentar o mercado da realidade. As lojas das realidades objetiva e local pertencem, na verdade, a dois irmãos e os outros membros da família possuem as outras lojas. Se pensar cuidadosamente acerca da objetividade e da localidade no micromundo, verá que estes conceitos se tornam complementares na teoria quântica, tal como o vaso e os perfis. É esta a maravilhosa característica posta em evidência pela experiência de Bell. Se imaginarmos que os fótons existem num estado bem definido, tal como os alfinetes, somos conduzidos à conclusão de que a realidade deve ser não local. Mas, assim que tentamos verificar o estado 'real' de um fóton (que equivale a tentar verificar a existência de influências não locais e acausais), perturbamos necessariamente a condição essencial da experiência, que consiste em as polarizações dos dois fótons de um mesmo par estarem perfeitamente correlacionadas. Do mesmo modo, se aceitarmos a causalidade local em sentido estrito, temos necessariamente de desistir da ideia de objetividade para fótons individuais. É assim que o princípio da complementaridade se aplica à experiência de Bell.

«Do ponto de vista macroscópico, tudo o que temos são os registos de A e de B, e estes são objetivos, no sentido comum do termo. Tal como o gato está vivo ou morto, eles não podem ser apagados. Mas a informação destes registos nunca pode ser utilizada para inferir a existência de influências não locais ou acausais. Sei que há pessoas que sustentam que a teoria quântica exige que desistamos das ideias de objetividade ou de localidade relativamente ao macromundo das mesas e das cadeiras. Mas não

compreenderam que o macromundo e o micromundo são qualitativamente distintos. Não há peculiaridade macroscópica.

«Discutir se o micromundo é efetivamente objetivo ou local é como discutir se a imagem representa o vaso ou os perfis. São duas formas mutuamente exclusivas de falar sobre a mesma realidade. Temos de escolher uma delas para descrever a realidade quântica. Mas, dentro do quadro das possibilidades materiais, a nossa realidade é uma questão de escolha. Uma vez que o nosso espírito aceite isto, o mundo nunca voltará a ser o mesmo. Foi o próprio mundo material que nos impôs esta forma de pensar. Não posso deixar de refletir sobre isso. O verdadeiro mistério do mundo físico é o facto de não haver mistério; nada parece estar escondido para sempre. A razão pela qual nem sempre nos é possível conhecer a realidade não é ela estar demasiado longe de nós, mas sim nós estarmos demasiado perto dela.»

Sentimo-nos entusiasmados pelos seus comentários, apesar de o velho mal-estar não nos ter abandonado. No entanto, escutá-lo é muito melhor do que estar no mercado. Após um longo silêncio, o nosso amigo deixa-nos as suas últimas palavras: «Aquilo que a realidade quântica é, é o mercado da realidade. A casa do Deus-que-joga-aos-dados tem muitos quartos. Só podemos estar num dos quartos de cada vez, mas é toda a casa que é a realidade.»

Ele levanta-se e deixa-nos. Apenas o fumo do seu cachimbo permanece, para, a pouco e pouco, se ir dissipando.

¹ Hermes Trismegisto, identificado como o deus egípcio Toth, a quem foram atribuídos escritos filosóficos e religiosos, que deram origem à chamada «filosofia hermética». (*N. do T.*)

PARTE DOIS

A Viagem ao Interior da Matéria

Deus utilizou matemática maravilhosa para criar o mundo.

PAUL DIRAC

CAPÍTULO 14

Microscópios para a Matéria

A verdade pode até não existir; [...] mas aquilo que os homens tomaram por verdade está presente em todo o lado e pede a nossa compreensão. Os arquitetos dos séculos XII e XIII tomaram a Igreja e o universo por verdades e tentaram exprimi-las numa estrutura que julgavam ser definitiva.

HENRY ADAMS, Mont-Saint-Michel and Chartres

Há algum tempo, um colega e amigo, Sidney Coleman, e eu estávamos a saborear um jantar num pequeno restaurante francês perdido por entre as montanhas do Jura, perto da Suíça. Estávamos de visita ao CERN, um grande laboratório internacional de investigação nuclear perto de Genebra, e, como muitos cientistas nas nossas circunstâncias, entregávamo-nos aos prazeres da excelente cozinha local. No pôr do Sol de Verão, Sidney provava as suas almôndegas e bebia o seu vinho; e começámos a especular sobre o futuro da física de altas energias.

Foram construídos nos Estados Unidos, na Europa e na União Soviética enormes laboratórios como o CERN, com o objetivo de estudar a estrutura mais fundamental da matéria. A componente principal destes laboratórios é um grande anel oco através do qual prótons — partículas quânticas — são acelerados até velocidades muito elevadas e forçados a colidir com uma série de alvos

nucleares. Estudando os resultados dessas colisões, os físicos aprendem muito sobre a estrutura da matéria.

Sidney e eu éramos físicos teóricos, cuja ambição é ajudar a encontrar uma descrição matemática da estrutura fundamental da matéria. Mas, no CERN, os físicos teóricos (apesar de serem mais de uma centena) são apenas uma fração muito pequena do pessoal. Um número muito maior de físicos experimentais, vindos de todas as universidades europeias e americanas, competem para utilizar as instalações do CERN. Os construtores das máquinas projetam e desenvolvem os aceleradores, enquanto milhares de técnicos são empregados para construir o equipamento. Cada um destes laboratórios custa centenas de milhões de dólares e absorve uma boa parte dos orçamentos nacionais para a investigação pura. Sidney e eu pensávamos: onde está a legitimidade pública para a investigação em física das altas energias, a quem interessa ela? Não seriam os fundos melhor aproveitados se fossem dirigidos para áreas com objetivos práticos mais imediatos? Não acredito que a resposta a estas perguntas possa ser encontrada numa análise económica. Creio que a resposta está na confiança que a sociedade tem na ideia de civilização.

Como físicos teóricos cujo trabalho não exige mais material do que papel e caneta, Sidney e eu ficámos impressionados com a escala gigantesca dos modernos laboratórios de altas energias: enormes áreas experimentais cheias de máquinas, equipamento computacional, sistemas eletrónicos de apoio, detetores e aparelhos de medida. Não havia dúvidas de que o nosso campo de investigação se tinha tornado numa grande ciência. Mas isto não foi

sempre assim — houve uma altura em que estes laboratórios eram pequenos. O que nos preocupava era que estávamos conscientes de que o último estágio (e também o mais decadente) de qualquer desenvolvimento é o gigantismo. Quando não conseguimos imaginar uma forma de fazer coisas melhores, pensamos simplesmente em fazê-las maiores. A construção das grandes Pirâmides do Egito marcou o fim do Antigo Império. Templos e catedrais cada vez maiores foram construídos quando os crentes começaram a estar mais seguros e confortáveis. Também os dinossauros foram um beco sem saída do ponto de vista evolutivo: os grandes répteis foram substituídos por pequenos mamíferos, mais eficientes do ponto de vista energético. E, no entanto, alguns físicos sugerem a construção de aceleradores ainda maiores em pleno espaço exterior, onde os problemas de gravidade e de espaço não limitariam as suas dimensões. Estarão os laboratórios de física das altas energias, tal como os dinossauros, condenados à extinção? Haverá uma maneira melhor de estudar a estrutura íntima da matéria?

A resposta atual é não. Uma vez tomada a decisão de explorar a matéria até ao mais pequeno pormenor, é claro que as dimensões gigantescas dos aceleradores de altas energias não são injustificadas. Poderia parecer que, para explorar o mundo dos objetos muito pequenos, necessitaríamos de instrumentos extremamente pequenos, mas passa-se justamente o contrário. Os grandes instrumentos são necessários devido a uma propriedade curiosa das partículas quânticas. Recordemos que, de acordo com a mecânica quântica, qualquer partícula quântica como o próton ou o eletrão pode ser encarada como um pequeno pacote de ondas de,

de Broglie-Schrödinger. O comprimento de onda de uma partícula — a distância entre dois picos da onda — é inversamente proporcional à velocidade¹ da partícula. Portanto, quanto mais rapidamente uma partícula se mover, menor será o seu comprimento de onda. Se obtivermos um feixe de partículas provenientes de um acelerador de altas energias, o mais pequeno objeto que com ele podemos «ver» tem de ser maior do que um comprimento de onda. Por exemplo, uma onda do mar não é influenciada por um nadador, que é pequeno comparado com o seu comprimento de onda, mas é influenciada por um navio — a onda pode «ver» o navio, mas não o nadador. O comprimento de onda das partículas de um feixe é essencial para determinar as dimensões do mais pequeno objeto que pode ser distinguido utilizando esse feixe. Portanto, para detetar objetos materiais mais pequenos, precisamos de comprimentos de onda mais curtos. A única forma de criar essas partículas de pequeno comprimento de onda é acelerando-as até velocidades muito próximas à da luz. E é justamente esse o objetivo dos aceleradores de partículas.

Um acelerador de partículas é essencialmente um microscópio — um microscópio para a matéria — projetado para observar as mais pequenas coisas que sabemos existirem: as partículas elementares. O princípio de um microscópio e de um acelerador é o mesmo. Num microscópio vulgar, o feixe consiste em partículas de luz (fótons) que se difundem no objeto que pretendemos observar ao microscópio. As lentes ajudam-nos a focar a luz para distinguir e intensificar a imagem. Mas um microscópio vulgar é inútil para observar objetos de dimensões inferiores à do comprimento de onda da luz visível. Para o fazer, damos o passo seguinte e

utilizamos o microscópio eletrônico, que utiliza elétrons em lugar de fótons, porque o comprimento de onda dos elétrons, mesmo que se desloquem a velocidades baixas, é menor do que o da luz visível. Os elétrons podem ser focalizados por lentes magnéticas que produzem campos magnéticos que desviam a trajetória dos elétrons. Utilizando o microscópio eletrônico e algumas técnicas especiais, é possível chegar ao nível das moléculas. É necessária uma tecnologia diferente para acelerar feixes de partículas até velocidades ainda maiores e comprimentos de onda ainda menores, para sondar o núcleo atômico. Como conseguem os físicos fazê-lo?

A resposta a esta pergunta marcou o modesto início dos modernos aceleradores de partículas. John Cockroft, um jovem aluno de Rutherford que trabalhava no Cavendish Laboratory, em Inglaterra, sugeriu, em 1928, que os prótons poderiam ser acelerados por um campo eletrostático e depois ser utilizados para bombardear os núcleos de vários átomos. Cálculos teóricos baseados na teoria quântica que acabava de surgir mostraram que os prótons de Cockroft deveriam penetrar nos fortes campos elétricos repulsivos que circundavam o núcleo e que formavam uma espécie de barreira em torno dele. Em 1932, em colaboração com E. S. Walton, Cockroft realizou transmutações nucleares com o seu feixe de prótons — sinal seguro de que se tinha conseguido penetrar no núcleo. A humanidade tinha tocado no núcleo central dos átomos.

No princípio da década de 1930, enquanto Cockroft realizava as suas experiências em Inglaterra, um jovem americano muito dinâmico, Ernest O. Lawrence, em colaboração com M. S.

Livingsgton, outro físico, começara a projetar outro tipo de acelerador (o ciclotrão) em Berkeley, na Califórnia. Os ciclotrões aceleravam os feixes de partículas em círculos, usando ímanes para encurvar as suas trajetórias, e desta forma o feixe poderia ser acelerado durante mais tempo. As primeiras máquinas de Lawrence aceleravam os prótons numa órbita espiral, dirigida para fora, entre as placas de um grande eletroímã. Quando as partículas atingiam a parte exterior da espiral, possuíam a energia máxima. A princípio, Lawrence estava apenas interessado em produzir partículas de alta energia e em estudar as suas propriedades. Mas, quando soube do trabalho de Cockroft e Walton em Inglaterra, apercebeu-se de que o ciclotrão podia ter outras utilizações — podia ser utilizado como microscópio para a matéria. Lawrence começou a utilizar os seus feixes de partículas de alta energia em alvos nucleares. Os trabalhos de Cockroft, Walton e Lawrence marcaram o início da Era moderna da física nuclear experimental. Os níveis energéticos dos núcleos atômicos começaram então a ser cuidadosamente estudados.

Os ciclotrões de Lawrence tiveram um enorme sucesso e tornaram-se o protótipo de todos os grandes aceleradores de prótons que se seguiram. Sempre que se punha a questão de ser possível construir um ciclotrão de energias ainda mais elevadas, Lawrence respondia: «Eu consigo fazê-lo.» Os físicos deram-se conta de que tinham no ciclotrão um instrumento que, tal como a luneta de Galileu no seu tempo, permitia explorar todo um novo domínio da natureza: o microcosmo subatômico. Para lá do átomo e do núcleo estava um território completamente virgem, um lugar nunca antes visto. Os físicos acreditavam que no núcleo estava a chave de toda a estrutura da matéria e das leis fundamentais da

natureza. Mas eles aperceberam-se de que seria necessário atingir energias ainda mais elevadas para ir além do núcleo e dos seus níveis energéticos, de forma a conhecer as próprias estruturas que produziam as forças nucleares. De novo, o comprimento de onda das partículas incidentes teria de ser reduzido para se poder sondar o mundo subnuclear.

Após a segunda guerra mundial, os físicos voltaram a defrontar-se com o problema de construir aceleradores de partículas ainda maiores. Muitos físicos, tendo participado no Projeto Manhattan, que produziu a bomba atómica, tinham ganho experiência na administração de grandes projetos apoiados pelo governo. Professores universitários tornaram-se administradores e a simbiose entre governo e investigação científica atingiu o seu ponto máximo. J. Robert Oppenheimer insistia junto de membros do governo em que os Estados Unidos deveriam apoiar a investigação científica num contexto muito mais alargado do que o desenvolvimento de armas; o estímulo da investigação pura ou fundamental e os fins pragmáticos da segurança nacional tinham a mesma natureza. A confiança nacional do após-guerra e o crescimento económico forneciam o apoio moral e material para a construção de novos e maiores aceleradores e respetivos laboratórios nos Estados Unidos.

Em 1945 e 1952 houve progressos tecnológicos extremamente importantes ligados à conceção dos aceleradores que resultaram numa redução substancial do custo dos ímanes. Tornou-se também muito claro que não existia um limite teórico para a energia a que era possível acelerar as partículas²; tudo o que era necessário eram

ímanes suficientemente poderosos. A primeira geração de aceleradores a integrar estes princípios de concepção foi a dos chamados sincrociclotrões e sincrotrões. Os construtores de máquinas que descobriram estes novos princípios eram, tal como Lawrence, visionários que queriam construir os instrumentos que revelassem a estrutura íntima da matéria e estavam agora lado a lado com os físicos experimentais e teóricos. Victor Weisskopf, do MIT, um físico teórico e diplomata da ciência, descreveu certa vez a divisão do trabalho entre os físicos da seguinte forma:

Há três tipos de físicos, tal como sabemos: os construtores de máquinas, os físicos experimentais e os físicos teóricos. Se compararmos estas três classes, verificamos que os construtores de máquinas são os mais importantes, porque sem eles não poderíamos sequer chegar a esta região de tão pequena escala. Se compararmos este facto com a descoberta da América, eu diria que os construtores de máquinas correspondem aos capitães e construtores de navios que nessa época realmente desenvolveram as técnicas. Os experimentalistas são os indivíduos que viajaram até ao outro lado do mundo, saltavam para as ilhas que tinham descoberto e tomavam nota daquilo que viram. Os físicos teóricos são os indivíduos que ficaram em Madrid e disseram a Colombo que ele iria chegar à Índia.

Quando a geração seguinte de aceleradores — o Cosmotron, no Brookhaven National Laboratory, em Long Island, Nova Iorque, e o Bevatron, em Berkeley, Califórnia — entrou em funcionamento, em 1952 e 1954, respetivamente, teve início a moderna viagem ao interior da matéria.

O que foi revelado por esses novos microscópios para a matéria estava muito para além das expectativas de todos os físicos. O mundo subnuclear abria-se como um enorme oceano inexplorado

aos olhos ávidos dos experimentadores que, com os seus feixes de prótons de alta energia, descobriam formas de matéria nunca antes vistas. Esta nova matéria, sob a forma de partículas chamadas «hadrões», era, na realidade, responsável pela força nuclear. A proliferação dos hadrões constituiu uma descoberta muito intrigante — ninguém tinha imaginado que poderiam existir tantas partículas novas e ninguém sabia o que tudo isto poderia significar.

Antes da descoberta dos hadrões, os físicos conheciam muito poucas partículas. O eletrão e o próton eram conhecidos desde o princípio do século e em 1932 foi descoberto o neutrão, o outro constituinte do núcleo atómico. Mais tarde foi descoberto o píon, e esta partícula funcionava como uma espécie de cola nuclear que mantinha os prótons e os neutrões coesos no núcleo. Estas partículas, e poucas mais, eram as únicas conhecidas antes do verdadeiro dilúvio de hadrões descobertos com os novos aceleradores durante os anos 50 e 60. Os novos hadrões receberam nomes como kaão, mesão ró, hiperão lambda, e foram designados simbolicamente por letras dos alfabetos grego e latino. Mas em breve foram descobertos mais hadrões, e os físicos, que por esta altura tinham esgotado todas as letras disponíveis, recorreram a índices superiores e inferiores nas letras para distinguir os hadrões. Havia tantos hadrões que os físicos teóricos especulavam se existiriam de facto em número infinito.

Com a proliferação dos hadrões surgiu um novo problema: como determinar precisamente as interações entre as novas partículas. Uma resposta a este problema surgiu em 1953 com a invenção da câmara de bolhas, dispositivo que facilitava enormemente a

identificação das partículas elementares como os hádrões. É colocado hidrogénio líquido dentro de uma câmara e em seguida é superaquecido por uma expansão muito rápida da câmara. Se o hidrogénio líquido neste estado — muito próximo do seu ponto de ebulição — for perturbado pela passagem de uma partícula elementar, a energia depositada pela passagem da partícula faz o líquido ferver e deixa assim a sua passagem assinalada por uma linha de bolhas na sua esteira, como uma linha de bolhas num copo de cerveja. Este rasto de bolhas é então fotografado e, a partir da trajetória visível, os físicos podem determinar as propriedades das partículas. Apesar de os problemas técnicos deste aparelho poderem ser grandes, ele conduz diretamente à identificação das partículas.

De todas as partículas fundamentais, só o prótão³, o eletrão, o fotão e o neutrino são estáveis. Todas as outras partículas acabam por se desintegrar nas partículas estáveis. Alguns dos novos hádrões são metastáveis, o que significa que a sua vida tem apenas a duração suficiente para que se possam ver os seus rastos numa câmara de bolhas. No entanto, a maioria dos hádrões será extremamente instável e não deixará rastos. Mas, a partir dos hádrões que deixam traços numa câmara de bolhas, é possível deduzir a existência dos que são extremamente instáveis. Na década seguinte foi às câmaras de bolhas que se deveu a descoberta de muitos novos hádrões chamados «mesões», «hiperões», «partículas estranhas», «estados excitados do neutrão e do prótão», «ressonâncias de hiperão» — enfim, grande parte do jardim zoológico hadrónico.

A câmara de bolhas é um bom exemplo da nova tecnologia que a construção de aceleradores de altas energias estimula. O novo domínio do microcosmo desafiava os cientistas a desenvolver sistemas de eletrónica rápida para contar partículas, novas tecnologias para a obtenção de vácuos extremos, ímanes superpotentes e muitos outros aparelhos engenhosos.

Mas o que nos diziam os hádrões, esses milhares de novas partículas descobertas nas experiências, sobre a estrutura íntima da matéria? Era claro que essas novas partículas representavam um novo nível de organização da matéria. O próton e o neutrão, os dois constituintes do núcleo atómico, eram agora considerados apenas como duas partículas, caracterizadas pela sua excecional estabilidade, de entre milhares de outros hádrões menos estáveis. Os físicos tinham pensado que a construção dos novos microscópios para a matéria e a exploração dos mais pequenos objetos revelariam um nível da matéria mais simples, e não mais complexo. A proliferação dos hádrões parecia negar essa esperança. Estaria a natureza a enganar cruelmente os físicos que defendiam que a natureza revelaria a sua simplicidade ao ser explorada à mais pequena escala?

Ao começar a sua viagem ao interior da matéria, os físicos descobriram que ela não termina nos átomos nem nos núcleos atómicos, antes se prolonga no vasto oceano dos hádrões. Eles encontraram uma nova fronteira no mundo da matéria subnuclear, que, como a fronteira do espaço exterior, parece interminável. É como navegar num enorme oceano cujo fim se perde na escuridão. Poderemos alguma vez chegar a terra, ou estaremos condenados,

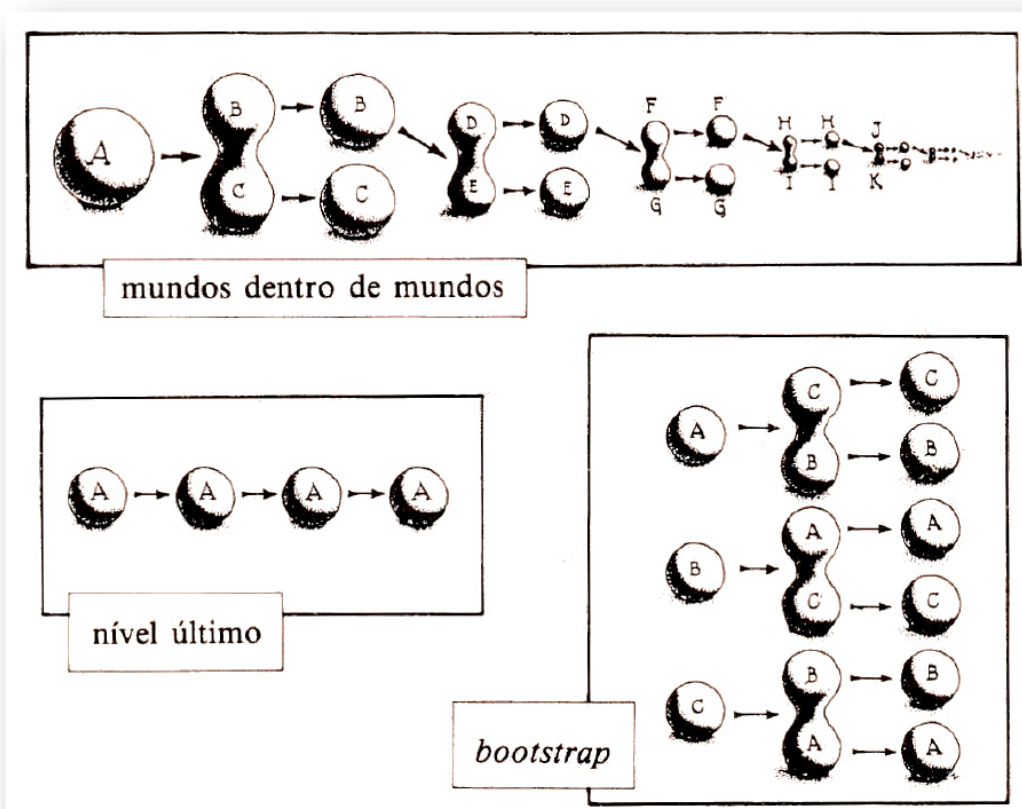
como o *Holandês Voador*, a navegar para sempre? O problema de interpretar o enorme número de hádrons e de construir a partir deles uma imagem coerente da natureza preocupava os físicos teóricos dos anos 60. Eles perguntavam-se qual poderia ser a estrutura última da matéria; quais as opções lógicas que seriam compatíveis com as leis da física quântica e com as observações experimentais. Os físicos apenas viam três alternativas lógicas para o fim da viagem ao interior da matéria.

Podemos chamar à primeira destas hipóteses a dos «mundos dentro de mundos». De cada vez que atingimos um certo nível da matéria a muito curtas distâncias, descobrimos que o mundo da matéria, a esse nível, não é elementar e indivisível. Os átomos já foram julgados indivisíveis, mas os físicos decompueram o átomo nas suas partes. Descobriu-se então que as partes eram constituídas por outras partes menores, e assim por diante em regressão infinita. Os níveis da matéria podem ser em número infinito — é possível que não haja partículas verdadeiramente «elementares» e que todas as partículas sejam compostas de partículas ainda menores.

Em alternativa pode existir um «nível último» da matéria, partículas verdadeiramente elementares que não possam ser subdivididas. Todas as outras partículas seriam compostas destas partículas elementares, verdadeiros blocos de construção do mundo físico — e fim da viagem para distâncias cada vez menores.

A terceira possibilidade dá pelo nome de «hipótese do *bootstrap*», inspirado pelo barão von Munchhausen, um contador

de histórias que supostamente subiu pelos ares apenas puxando os atacadores das suas próprias botas⁴. De acordo com esta hipótese, pode existir um nível da matéria que seja simultaneamente elementar e composto, e a matéria poderia «subir pelos ares da existência puxando os atacadores das próprias botas». A ideia básica é a de que podemos atingir um nível da matéria para o qual as partículas sejam de facto compostas; mas aquilo de que elas são compostas são exatamente mais partículas precisamente do mesmo tipo. Isto põe um fim à regressão infinita, pois, apesar de as partículas a este nível serem divisíveis, elas não se decompõem em novos tipos de partículas. Seria como uma torta que, quando cortada ao meio, resultasse em duas tortas idênticas à inicial. Nenhuma forma de cortar a torta nos daria pequenos pedaços, mas sim mais tortas.



Três cenários para a viagem ao interior da matéria. Mundos dentro de mundos: as partículas são infinitamente divisíveis em partículas menores de natureza diferente. Nível último: é atingido um nível da matéria para o qual é impossível uma subdivisão — uma verdadeira partícula elementar. *Bootstrap*: as partículas podem ser subdivididas, mas os resultados são partículas da mesma natureza daquelas que as originaram.

Destas três respostas possíveis, os físicos anteriores a este século tinham já considerado a dos mundos dentro de mundos e a do nível último. A hipótese do *bootstrap* fazia sentido apenas depois de as novas leis físicas da teoria quântica e a teoria da relatividade terem sido descobertas, já neste século. De acordo com estas teorias, o conceito de partícula sofreu uma transformação que fazia com que a hipótese do *bootstrap* fosse uma possibilidade física: as partículas podiam ser simultaneamente compostas e elementares, uma possibilidade que antes parecia absurda. A lição a extrair é que a estrutura última da matéria está condicionada às leis da física. Dito de outra forma, à medida que sondamos distâncias cada vez menores, as leis da física são diferentes e tornam-se concebíveis novos cenários para a estrutura da matéria.

Nos primeiros anos da década de 60, quando estavam a ser descobertos os novos hádrões, muitos físicos foram atraídos pela hipótese do *bootstrap* porque ela implicava que todos aqueles surpreendentes hádrões eram, na realidade, feitos uns dos outros, e, portanto, não existia nada para lá dos hádrões. Se se fizessem colidir hádrões uns contra os outros, como era feito nos aceleradores de partículas, tudo o que era produzido eram mais hádrões, e nunca algo que pudesse ser identificado como uma partícula mais elementar. Partindo um hádrão ao meio, encontramos mais hádrões. Talvez o elevado número de hádrões

fosse na realidade o sinal de que os físicos tinham chegado ao fim da viagem ao interior da matéria.

Por muito agradável que a hipótese do *bootstrap* nos pareça, ela já não é grandemente aceite hoje em dia. A maioria dos físicos crê que os hádrões são objetos compostos constituídos por partículas mais fundamentais chamadas *quarks*. Como é que esta modificação de pontos de vista se processou?

No princípio da década de 1960, os físicos teóricos, liderados por Murray Gell-Mann, descobriram que os hádrões se organizam em classes ou famílias. Este princípio de organização foi chamado «via octópula»^{5,6}. Era baseado numa simetria matemática e teve um sucesso extremo em relacionar as propriedades experimentalmente observadas dos hádrões. Uma forma acessível de compreender por que funcionava a via octópula era supor que os hádrões eram constituídos por outras partículas mais pequenas, os *quarks*, dos quais apenas três eram necessários para construir todos os hádrões. Cada hádrão podia ser considerado como se fosse constituído por alguns *quarks* em órbita uns em torno dos outros numa configuração específica. Como os *quarks* podiam orbitar num número infinito de configurações, existia na realidade um número infinito de hádrões. Este modelo de *quarks* foi inventado pelos físicos teóricos para tentar simplificar as complexidades dos hádrões, e conseguiu-o. Mas nunca ninguém vira um *quark*. Onde estavam os *quarks* e como se poderia confirmar experimentalmente o modelo dos *quarks*?

Ainda antes de os físicos teóricos terem imaginado a existência de *quarks*, os físicos experimentais da Universidade de Stanford tinham obtido dados experimentais que indicavam que o próton — o primeiro hádron a ser conhecido — não podia ser uma partícula pontual, sem extensão espacial, tendo, pelo contrário, de ocupar um dado volume no espaço; era como uma pequena bola, e não como um ponto matemático. Eles dispararam um feixe de elétrons de alta energia contra um alvo de prótons e, pela análise dos resultados das colisões, concluíram que o próton (e, conseqüentemente, todos os prótons) tinha uma estrutura e extensão espacial bem definidas. Com sabedoria retrospectiva, vemos agora que a sua descoberta forneceu a primeira indicação no sentido de os hádrons não serem elementares.

Com o estímulo destes resultados foi construída perto das instalações da Universidade de Stanford uma versão muito aumentada do seu acelerador de elétrons, em meados da década de 1960. Neste novo acelerador realizaram os físicos as experiências cruciais que confirmaram a ideia segundo a qual os hádrons eram feitos de novas partículas ainda mais pequenas — os *quarks*. A nova máquina, com mais de 3 km de comprimento, está localizada no Stanford Linear Accelerator Center (SLAC). A sua estrutura básica é completamente diferente dos sincrotrões; não está sequer construída em forma de anel. Pelo contrário, o acelerador consiste num tubo de vácuo linear, de 3 km de comprimento, ao longo do qual os elétrons são acelerados. A energia é fornecida aos elétrons por uma série de clistrões, aparelhos que injetam energia sob a forma de ondas eletromagnéticas no tubo, a intervalos regulares. Os feixes de

eletrões vão sendo acelerados pela onda eletromagnética ao longo do tubo de 3 km, como um surfista numa onda do mar. Na outra extremidade do acelerador, os eletrões adquiriram uma enorme energia e colidem então com uma série de alvos na área experimental.

As pessoas mais críticas em relação a esta máquina diziam que os eletrões — que têm essencialmente interações eletromagnéticas — nunca nos poderiam ensinar nada sobre a estrutura dos hádrões e insistiam em que eram necessários feixes de prótons para estudar as suas interações. Essas pessoas estavam enganadas. Quando a estrutura dos hádrões foi determinada, os *quarks*, no interior dos hádrões, puderam ser estudados de uma forma muito precisa pela interação eletromagnética do eletrão, e não pela interação forte do próton. Ironicamente, se não existissem *quarks* no interior dos hádrões, os críticos teriam saído reforçados. As experiências do SLAC confirmaram a imagem do modelo dos *quarks*: os hádrões eram constituídos por *quarks* mantidos unidos por forças muito intensas.

No final dos anos 60, em resultado das experiências de colisões com feixes de eletrões e de outras experiências realizadas com feixes de neutrinos, era óbvio que se tinha descoberto um novo nível da matéria — os *quarks*. Todos os hádrões, o grande jardim zoológico das partículas subnucleares, podiam, segundo parecia, ser construídos a partir apenas de três *quarks* diferentes. Isto era uma tremenda simplificação que emergia do caos aparente dos hádrões. Mas como se podem estudar os *quarks* ou saber se existem mais de três? Para isso teve de ser desenvolvida uma nova

tecnologia de aceleradores — os aceleradores para colisão de feixes elétron-positrão, um novo microscópio para a matéria que conseguia distinguir distâncias ainda menores. Estas máquinas faziam colidir matéria sob a forma de elétrons com antimatéria sob a forma de antieletrões (ou positrões). Ao fazer colidir a matéria com a antimatéria, realiza-se uma espetacular aniquilação em que é produzido um enorme número de partículas hadrónicas diferentes. Assim, este novo método de levar feixes de matéria e de antimatéria a circular em sentidos opostos e a colidir frontalmente era muito eficaz para a criação de novas formas de matéria.

Os primeiros resultados desta nova tecnologia vieram de um acelerador para colisão de feixes em Frascati, na Itália. Foi então construída uma máquina semelhante, mas capaz de atingir muito mais altas energias, no Stanford Linear Accelerator Center. Em Novembro de 1974, experimentadores desta máquina para colisão de feixes e outros do Brookhaven National Laboratory anunciaram a uma comunidade científica completamente estupefacta a descoberta de um hádrão surpreendente, constituído por um quarto *quark*. Posteriormente foram descobertos mais hádrões constituídos por este quarto tipo de *quark* em Stanford e a sua existência confirmada num laboratório alemão perto de Hamburgo — talvez a prova mais convincente a favor do modelo dos *quarks*. Finalmente, em 1978 foi descoberto outro hádrão, feito sem dúvida de um quinto tipo de *quark*, de massa muito maior, no Fermi National Laboratory Center, perto de Chicago. As propriedades destes hádrões constituídos pelos quarto e quinto *quarks* foram estudadas pormenorizadamente pelos físicos com os aceleradores

para colisão de feixes. Estes tornavam-se agora os novos navios nos quais era necessário embarcar para viajar até ao domínio dos *quarks*.

Muitos teóricos creem que existe um sexto *quark* a uma energia ainda mais elevada, mas essa descoberta pertence ao futuro. Novos aceleradores de partículas continuam a ser construídos. Em Brookhaven está a ser construído um anel de acumulação para prótons. No CERN, perto de Genebra, um enorme acelerador para colisão de feixes próton-antipróton deve estar em funcionamento no princípio dos anos 80, tal como o enorme anel de colisões eletrão-positrão⁷. Está planeada a construção de um sincrotrão de prótons em Serpukhov, na União Soviética, enquanto o Japão constrói também um novo acelerador. Os Estados Unidos, que já chegaram a dominar a física das altas energias, são neste momento um parceiro das outras nações no que diz respeito à exploração da matéria.

Uma nova física, do tipo mais fundamental, será possibilitada por estas máquinas. Talvez sejam descobertos novos *quarks* ou outras partículas exóticas. Um aspeto que tem intrigado os físicos é a proliferação dos *quarks*. Há relativamente pouco tempo eram necessários apenas três *quarks* para construir todos os hádrons conhecidos; agora são necessários cinco ou talvez mesmo seis.

Alguns físicos pensam que existem demasiados *quarks* para que possam ser realmente elementares. Ainda que o pequeno número de *quarks* seja uma grande simplificação em relação ao número infinito de hádrons, muitos físicos não estão ainda satisfeitos.

Serão os *quarks* constituídos por estruturas ainda mais fundamentais? Apesar de haver sugestões que apontam nesta direção, ainda não houve progresso real. Os *quarks* parecem ser partículas pontuais sem estrutura interna — o «nível último» da matéria. Alguns físicos teóricos pensam que, para além das energias a que trabalhamos presentemente, há apenas um enorme oceano vazio. Mas ninguém tem uma indicação sobre a teoria correta que poderia dar conta das massas que se observaram para os *quarks*; este é um enigma completo. O facto de existirem enigmas deste tipo para os *quarks*, em relação aos quais não há respostas bem definidas, é uma boa indicação de que ainda há alguma coisa por descobrir. Se os enigmas do passado proporcionaram um modelo para os enigmas do presente, então a chave da sua solução estará para vir da exploração experimental a energias mais elevadas. Mas o que é que aprendemos exatamente até agora?

Se considerarmos o nosso século globalmente, vemos até onde penetrámos na nossa viagem ao interior da matéria. Foram identificados cinco níveis distintos da matéria: moléculas, átomos, núcleos, hádrões e *quarks*. Para compreender cada um dos níveis foi necessário explorar mais profundamente o interior da matéria. A estrutura da matéria nesses níveis mais profundos parece ser mais simples. Uma centena de átomos foram uma enorme simplificação em relação aos milhões de compostos moleculares que formam. Os núcleos de todos estes átomos eram estados ligados de apenas dois hádrões, o protão e o neutrão. Com a proliferação dos hádrões nos anos 60 parecia que a matéria se estava a tornar

mais complexa; mas os *quarks* — o nível seguinte — trouxeram a ordem ao domínio dos hádrons. E aqui estamos hoje.

Para o futuro podem surgir níveis suplementares, talvez governados por novas leis físicas. Não temos indicações de que se deva passar algo de novo; parece que com a descoberta dos *quarks* se chegou ao fim da viagem. Mas há um sentimento geral entre os físicos de que a viagem ainda não está terminada.

Os físicos encontraram um cosmo dentro da matéria. Utilizando aceleradores de partículas de altas energias — microscópios para a matéria —, estabeleceram contato com os domínios invisíveis para além do átomo e determinaram as suas leis. O que com eles aprendemos fala-nos da origem do universo, dessa época há biliões de anos em que todo o universo era uma gigantesca bola de fogo em expansão constituída pelos componentes básicos da matéria. Provavelmente, tornar-nos-emos mestres do domínio subnuclear e serão concebidos aparelhos práticos que utilizam a nova física. Não podemos saber ou imaginar o que serão estes aparelhos, mas, se a relação passada entre investigação fundamental e tecnologia servir de indicador, então surgirão certamente desenvolvimentos espantosos.

Todo o conhecimento detalhado sobre o mundo subnuclear teve o seu início nos grandes laboratórios de aceleradores, os navios nos quais viajámos através do universo. Estes laboratórios podem ser comparados com as catedrais construídas na Europa na idade da fé. A construção das catedrais servia de foco para as energias dos melhores arquitetos e homens de artes e ofícios, oferecendo-lhes

um desafio ímpar ao seu génio e às suas capacidades de produzir novas técnicas. Estas grandes naves espaciais da fé, concebidas para conduzir as almas dos homens a Deus, inspiraram os seus construtores a cobrir enormes espaços, atingir novas alturas e inventar novos materiais. Mas o objetivo da construção das novas catedrais não era a obtenção de nova tecnologia.

Para o progresso da civilização é necessária uma visão. As catedrais da Europa foram construídas por povos com uma visão ardente da fé. Mas a razão tem também os seus sonhos. Os grandes laboratórios científicos são a realização do sonho contemporâneo de resolver os enigmas do cosmo. Talvez no futuro, quando as pessoas olharem para a nossa época, não partilhem já o nosso sentimento da verdade; mas, tal como nós ficámos comovidos com a visão que levou à construção das catedrais, elas ficarão comovidas com a nossa visão: a de que o conhecimento é o instrumento fundamental da sobrevivência humana no cosmo.

¹ Na realidade, a relação de, de Broglie afirma que o comprimento de onda é reciprocamente proporcional ao movimento, e não à velocidade, de uma partícula. Como o tratamento de partículas em física das altas energias tem, hoje em dia, de se reger pelas leis da mecânica relativista, em que o movimento não é proporcional à velocidade, conclui-se que, em rigor, o comprimento de onda não é inversamente proporcional à velocidade, embora esta seja uma forma concisa e intuitiva de nos referirmos a este facto. (N. do T.)

² Não esquecer, no entanto, que a velocidade da luz no vácuo é um limite superior da velocidade de qualquer partícula. (N. do T.)

³ A física de partículas põe hoje em causa a estabilidade absoluta do protão, conforme será exposto aliás no cap. 11 (N. do T.)

⁴ Apesar de *bootstrap* ter tradução exata, utiliza-se o termo original pela sua consagração. (N. do T.)

⁵ A «via octópula» original provém de um aforismo atribuído a Buda: «Esta, ó monges, é a nobre verdade que leva ao fim do sofrimento; esta é a nobre Via dos Oito Graus: correta opinião, correta intenção, correto discurso, correta ação, correta vida, corretos esforços, correta atenção, correta concentração.»

⁶ No original, *eightfold way*. (N. do T.)

⁷ O acelerador para colisão de feixes protão-antiprotão do CERN entrou de facto em funcionamento em 1981. No início de 1983 eram aí descobertos os bosões W e Z, cuja existência era prevista pelos teóricos e era essencial para a unificação das interações eletromagnética e fraca, como adiante se verá. A importância desta descoberta levou a Academia Sueca a atribuir o Prémio Nobel da Física de 1984 a dois cientistas fundamentais para ela, o italiano Carlo Rubbia e o holandês Simon van der Meer. Quanto ao

acelerador para colisão de feixes eletrão-positrão, LEP, será a maior máquina jamais construída pelo homem e a sua entrada em funcionamento está prevista para 1988. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 15

O Início da Viagem: Moléculas, Átomos e Núcleos

Aquando de uma das descobertas de Rutherford, um seu colega, Arthur Eve, disse-lhe: «Você é um homem de sorte, Rutherford, está sempre na crista da onda!»; ao que Rutherford respondeu, sorridente: «Bom! Fui eu que fiz a onda, não fui?»

Por vezes tenho a sensação de que estou a viver num filme tridimensional. O filme começou há bilhões de anos com o *big-bang* que criou o universo e continua a decorrer desde então. Tudo no universo, as estrelas, o Sol, a Terra, o meu corpo e o do leitor, faz parte das cenas. Estamos todos no filme; é um filme único. Não está claro aonde é que a ação dramática conduz, ou mesmo se o filme tem uma intriga ou um realizador. Como físico, o meu interesse está na forma como é construído o cenário para este filme a três dimensões, de que é que são feitas as suas partes e como funciona toda a maquinaria. Eu não pedi o filme, nem sequer pedi para fazer parte dele; no entanto, aqui estamos todos como participantes do filme cósmico.

Os filósofos existencialistas falam de se ser «atirado para o mundo», mas eu prefiro as descrições psiquiátricas da «dissociação». Os seres humanos podem dissociar as suas mentes

do mundo e criar metáforas como o filme cósmico a três dimensões. As metáforas são símbolos livremente criados que transcendem o mundo e que, quando partilhadas, podem organizar a nossa experiência social de formas diferentes. É este o grande, e por vezes perigoso, poder dos símbolos. Com estes avisos em mente, entreguemo-nos à imagem do mundo como um filme a três dimensões e perguntemos: «O que é? Quem o ordenou?» Os físicos fazem estas mesmas perguntas.

Para responder a estas perguntas, os físicos teóricos voltam-se para as indicações fornecidas pelos microscópios para a matéria e, com algumas conjecturas inspiradas, tentam construir a sua própria versão do grande filme a três dimensões. Neste século, os físicos tomaram conhecimento de cinco níveis da matéria, à maneira das camadas de uma cebola: os níveis molecular, atómico, nuclear, hadrónico e dos *quarks*. Cada um foi descoberto através de novas técnicas experimentais, utilizando autênticos microscópios para a matéria que sondam distâncias cada vez menores. Realizando medições precisas em cada um destes cinco níveis da matéria, os físicos aprenderam as propriedades das interações que os produzem.

A nossa finalidade neste e nos próximos capítulos é explorar os cinco níveis da matéria — moléculas, átomos, núcleos, hádrões e, finalmente, os *quarks*. Estes objetos são o conjunto de personagens, os atores, do filme cósmico a três dimensões. Depois da apresentação do elenco vem o filme propriamente dito — as interações entre os atores, que são mediados por outro conjunto de *quanta* chamados «gluões». Finalmente, viramo-nos para a análise

do jogo das partículas e do que ele pode significar em termos da formação de imagem da realidade material. No futuro, os físicos experimentais podem descobrir novos tipos de matéria para além destes *quanta* ao sondarem ainda menores distâncias. Nessa altura podemos ter de repensar a nossa análise. Mas, dentro de limites experimentais muito precisos, nada foi esquecido. É esta a mensagem da física das últimas décadas e o desafio que nos espera. Se nada nos escapa, os físicos tornaram compreensível tudo o que existe. Aquilo que entusiasma os físicos é que na última década, depois de muitos falsos alarmes, emergiu uma ordem. Podemos estar à beira de uma nova síntese, de uma unificação de todas as forças da natureza. Essa grande síntese e as suas implicações para o problema das origens do universo serão o tema dos capítulos finais da nossa viagem ao interior da matéria.

1. Moléculas

A nossa viagem ao interior da matéria começa com as moléculas — as substâncias básicas das quais é feito tudo aquilo que vemos, tocamos, ouvimos, cheiramos e sentimos. A mais pequena quantidade de qualquer substância é uma só molécula, porque, se esta for dividida nos átomos que a constituem, deixará de ter as suas propriedades químicas; tornar-se-á noutra substância, altamente instável e com outras propriedades. As moléculas de água são compostas por 2 átomos de hidrogénio e 1 de oxigénio. À temperatura ambiente, a água é líquida, enquanto o hidrogénio e o oxigénio são gases; ao dividir uma molécula de água nos átomos que a compõem, obtemos substâncias qualitativamente diferentes.

As moléculas podem ter dimensões muito variáveis; a de água, por exemplo, tem apenas 3 átomos, enquanto algumas moléculas orgânicas têm uma estrutura complexa com dezenas de milhares de átomos. Podemos pensar nos átomos como os materiais de construção básicos das moléculas, que, por sua vez, são os edifícios e máquinas do micromundo. As regras que governam a formação de moléculas pelos átomos são conhecidas a partir da teoria quântica, mas o estudo das interações entre moléculas é um campo de investigação bastante complexo. Algumas estruturas moleculares são organizações de átomos em disposições altamente repetitivas que resultam em cristais ou em metais: estruturas rígidas e fixas. Outras moléculas libertam-se das ligações com as que as circundam e movem-se livremente nos movimentos aleatórios que caracterizam os gases. Moléculas que só se libertam parcialmente das suas ligações podem deslizar umas sobre as outras e formar assim os líquidos. Há biliões de moléculas de diferentes tipos que podem existir nas condições de temperatura características do nosso planeta e esta enorme variedade de moléculas reflete-se na enorme variedade de substâncias que encontramos no mundo. A temperaturas mais elevadas ou mais baixas que as da Terra, o número de moléculas diferentes e as suas possibilidades de interação são grandemente reduzidos e a complexidade possível na sua organização é muito menor. Nós estamos dentro dos limites de temperatura para os quais existe uma complexidade molecular máxima, complexidade da qual a própria vida depende.

Os químicos e os biólogos moleculares são os arquitetos e engenheiros do micromundo molecular, aqueles que estudam os

métodos de combinar as moléculas. Para este tipo de trabalho foi extremamente útil o aparecimento dos computadores (que manipulam grandes quantidades de dados melhor do que qualquer ser humano); eles ajudaram a determinar a estrutura das grandes moléculas. Começou há muito pouco a exploração do mundo das macromoléculas e estou certo de que este ainda nos reserva muitas surpresas.

Em 1959, Richard Feynman, um físico então no California Institute of Technology, deu uma conferência intitulada «There's plenty of room at the bottom»¹. Aquilo que ele então disse pode vir a revelar-se profético. Feynman considera o mundo das moléculas como uma fábrica potencial para todo o tipo de novas estruturas; nele poderíamos construir dispositivos minúsculos que realizariam tarefas específicas. Operários de dimensões moleculares poderiam ser lançados no corpo humano para reparar um órgão defeituoso ou doente. Poderíamos imaginar a construção de pequenas «cidades» com indústrias que produzem determinados instrumentos moleculares. Computadores infinitesimais poderiam controlar este mundo molecular, fronteira da miniaturização. Poderiam ser construídas «sociedades» moleculares para servir as finalidades humanas. O micromundo é um campo tão vasto como o espaço exterior e o domínio do homem sobre ele está no princípio. Talvez a sobrevivência da nossa civilização dependa de podermos ou não dominar esse micromundo.

Os arquitetos moleculares começam agora a imitar a natureza na construção de edifícios moleculares — e a imitação é a forma mais sincera do elogio. Se considerarmos a natureza um bom guia

sobre aquilo que pode existir, chegamos à conclusão de que as moléculas mais belas e, sem dúvida, mais complexas são as moléculas orgânicas que tomam parte nos processos da vida. Esta arquitetura molecular natural é o resultado de centenas de milhões de anos de evolução molecular.

Muitas pessoas consideram a evolução improvável. Por que é que a minha coluna é vertical e por que é que os meus polegares são oponíveis? Os evolucionistas podem realmente explicar tudo isto? Certa vez assisti a uma conferência dada pelo escritor Isaac Bashevis Singer e um dentre os muitos biólogos presentes na assistência perguntou se Singer acreditava na evolução. Singer respondeu contando a história do relógio de Paley: Disse então que existia uma ilha onde os cientistas estavam certos de que nunca nenhum ser humano tinha estado. Quando uma expedição científica desembarcou na ilha, foi descoberto um relógio de pulso no meio de umas pedras, o que constituía um absoluto mistério. Os cientistas, apesar de confrontados com o relógio, continuaram a defender que a ilha era desabitada. Eles explicaram que, ao longo de milhares de anos, pequenos pedaços de vidro, metal e couro se tinham reunido ao acaso e tinham acabado por formar aquilo a que chamamos relógio. A opinião de Singer diferiria da dos cientistas; como ele disse, «Não há relógios sem construtores de relógios». Esta história reflete a sensação partilhada por muitas pessoas de que as interações químicas aleatórias não podem explicar a existência de vida na Terra. A razão pela qual essas pessoas se recusam a aceitar o ponto de vista evolutivo — e nisto as nossas sensações não ajudam — é a dificuldade que têm em se aperceber do tempo imenso que é um bilião de anos.

De acordo com as perspectivas defendidas pelos cientistas, as moléculas simples, em condições ambientais adequadas, combinar-se-ão para formar moléculas mais complexas, que serão automaticamente capazes de se replicar. A forma como isso ocorreu nos antigos oceanos é ainda tema de muita especulação científica — mas não há razão fundamental que impeça este fenómeno de ocorrer. Essas antigas moléculas, das quais o ADN e o ARN (o material genético) são os atuais descendentes, foram a primeira base material da vida. Houve um tempo em que existia à superfície deste planeta uma só molécula com a propriedade da autorreplicação, uma propriedade que nenhuma outra molécula tinha antes possuído. Deve então ter feito biliões e biliões de cópias de si mesma, numa autêntica orgia reprodutiva. Provavelmente, não deixou de se replicar até que ocorreu um erro que produziu uma molécula diferente, mas com a mesma propriedade de autorreplicação, competidora da primeira e iniciadora da evolução molecular. Nas palavras do físico Gerald Feinberg, a vida parecia apenas ser uma «doença da matéria».

Se não tivéssemos tão boas provas em seu favor, a evolução seria um enredo muito improvável para o filme a três dimensões. Quem poderia alguma vez imaginar que a partir da guerra da natureza, da fome e da morte, poderiam desenvolver-se as mais elevadas formas de vida? A ideia de evolução é demasiado improvável para ter sido imaginada. Ela teve de ser descoberta através de uma observação cuidadosa do mundo natural.

Podem dedicar-se valiosas carreiras científicas ao estudo da arquitetura das moléculas. Com o apoio de computadores e de

outras novas tecnologias, os cientistas descobrirão no próximo século novos edifícios moleculares, notáveis pelas suas funções e objetivos. O micromundo das moléculas é uma nova fronteira que começou agora a ser explorada. Por muito entusiasmante que ela seja, temos agora de abandoná-la e de prosseguir a nossa exploração ao interior da matéria. O nosso próximo passo leva-nos aos materiais de construção das moléculas: a centena de átomos dos quais todas elas são feitas. E, ao entrarmos no átomo, entramos no mundo da peculiaridade quântica.

2. Átomos

Ernest Rutherford realizou em 1911 a primeira determinação experimental da estrutura atômica, o primeiro grande passo para a compreensão do átomo. Rutherford descobriu que os átomos têm uma parte central com carga elétrica positiva — o núcleo —, cerca de 10 000 vezes menor do que o próprio átomo. As dimensões do átomo eram assim determinadas pela muito maior nuvem de eletrões que rodeia o núcleo. Quase toda a massa do átomo, e portanto da matéria vulgar, está concentrada no núcleo; a nuvem de eletrões pesa muito menos. No entanto, são as propriedades dos eletrões que orbitam em torno do núcleo que determinam as interações entre os átomos e, portanto, as leis das reações químicas para a formação das moléculas. A descoberta das leis químicas a partir de uma teoria atômica ocupou as duas décadas que se seguiram ao trabalho de Rutherford.

Eram necessários dois grandes passos na teoria atômica antes de se poderem formular essas leis químicas. O primeiro passo foi

dado por Niels Bohr, que aplicou as antigas ideias quânticas de Planck e de Einstein ao modelo atômico de Rutherford. O modelo teórico de Bohr explicava corretamente o espectro de luz do átomo de hidrogénio, mas levantava muitas questões de princípio relativamente à possibilidade de aplicação da física clássica aos sistemas atômicos. O segundo grande passo foi a invenção da moderna teoria quântica, que fez desabar o edifício da física clássica, proporcionou a base matemática para a compreensão completa das propriedades atômicas e iniciou uma revolução na compreensão da realidade material.

Quando analisamos estes feitos científicos à distância de meio século, damos-nos conta de que existia uma «dádiva da natureza» que facilitou o progresso: o átomo de hidrogénio. O hidrogénio é o átomo mais simples, consistindo num só eletrão que orbita em torno do núcleo, constituído, por sua vez, por um só protão. Como a natureza deu aos físicos um sistema tão simples no qual eles podiam provar as suas ideias, pôde ser feito um rápido progresso na descoberta das leis do átomo. O espectro da luz emitida pelo hidrogénio é regular, e esta regularidade foi explicada pelo modelo de Bohr. O progresso teria sido muito mais difícil se o átomo mais simples fosse o oxigénio, com a sua nuvem de oito eletrões e um espectro de luz relativamente complicado. Poderiam então ter sido necessárias centenas de anos para se descobrirem as leis da teoria quântica que descrevem o movimento de todos esses eletrões. Pelo contrário, deduzindo as leis quânticas gerais que funcionavam para o caso simples do átomo de hidrogénio, os físicos convenceram-se de que essas mesmas leis funcionariam também para átomos mais complicados.

Uma tal «dádiva da natureza» tinha já ocorrido há mais de dois séculos, tendo tido como resultado a descoberta da lei da gravitação. A dádiva da natureza aos físicos (ou filósofos naturais, como eram então chamados) foi nessa altura a simplicidade do sistema solar. Se a Terra não tivesse uma Lua (como é o caso de Vénus e de Mercúrio) e se, em lugar de um Sol, tivéssemos dois ou três, a órbita da Terra seria muito complicada. Nenhuma lei do tipo da primeira lei de Kepler, que afirma que as órbitas dos planetas são elipses em que o Sol ocupa um dos focos, poderia ser facilmente descoberta; assim, poderíamos estar ainda hoje em busca da lei da gravitação. Estas dádivas da natureza mostram que o progresso na compreensão do universo está profundamente condicionado pela existência de um sistema simples nas vizinhanças. Provavelmente, a falta desses sistemas extraordinariamente simplificados pode ter atrasado o progresso noutras áreas da ciência.

Com a invenção da teoria quântica, o progresso na compreensão das propriedades dos átomos foi muito rápido. As leis da química podiam agora ser colocadas numa base mais fundamental: elas eram consequência das interações quânticas das nuvens eletrónicas que rodeiam o núcleo. A estranha realidade que a teoria quântica implicava estava correta. Apoiados por estas novas ideias, os físicos experimentais exploraram os domínios do átomo.

O átomo tem dois componentes básicos; a nuvem de eletrões e o núcleo no seu centro. Enquanto alguns físicos se interessaram pelo estudo das propriedades eletrónicas dos átomos, outros dedicaram-se ao estudo do núcleo, o coração do átomo.

3. Núcleos

A princípio, o núcleo, o outro componente primário do átomo, era um completo enigma para os físicos — um grande ponto de interrogação no centro do átomo. Eles sabiam que o pequeno núcleo era responsável por quase toda a massa dos átomos e era lugar de enormes transformações energéticas, como era provado pela radioatividade — emissão de partículas pelo núcleo. Em 1932, Chadwick, físico inglês, descobriu outra partícula fundamental a que chamou «neutrão»; esta partícula era semelhante ao próton nas suas propriedades, exceto na carga elétrica, de que era desprovido. Com esta descoberta tornava-se claro que o núcleo era composto por duas partículas fundamentais, prótons e nêutrons, mantidas coesas numa pequena região por fortíssimas forças nucleares. Mas foi apenas com o advento dos microscópios para a matéria nuclear, especialmente com os ciclotrões, que o núcleo começou a revelar os seus segredos.

Explorando o núcleo com os seus feixes de partículas de alta energia, os físicos descobriram que os prótons e nêutrons do núcleo tinham uma organização bem definida; eles dispunham-se em níveis. Os prótons e nêutrons podiam saltar de nível para nível e, assim, libertar energia, de forma análoga àquela em que os elétrons saltam de uma órbita para outra. Cada um dos cerca de cem núcleos conhecidos tinha um conjunto característico de níveis de energia. O movimento dos prótons e nêutrons no interior do núcleo assinalava transições de um nível energético para outro. Os níveis de energia observados para os núcleos eram centenas de vezes maiores do que os observados para as transições eletrônicas nos átomos. Isto

significava que a força que mantinha os prótons e os nêutrons coesos no núcleo era centenas de vezes mais forte do que as forças elétricas que se sabia manterem o sistema núcleo-elétrons coeso. O que poderia produzir uma força tão intensa?

H. Yukawa, um físico teórico japonês, dedicou-se a este problema e sugeriu uma resposta baseada numa analogia. Ele pensou que, se a força eletromagnética que liga os elétrons ao núcleo tinha uma partícula quântica associada (o fóton), então também a força nuclear deveria ter uma partícula quântica a ela associada; e essa partícula deveria ter uma forte interação com os prótons ou nêutrons, centenas de vezes mais forte do que a interação entre fóton e elétron. Além disso, a força nuclear associada com esta nova partícula deveria ter uma grande intensidade apenas em muito pequenas distâncias, devido às pequenas dimensões do núcleo. A conclusão do raciocínio de Yukawa foi que a força nuclear era devida a uma nova partícula de grande massa com fortes interações com o próton e com o nêutron. Esta nova partícula foi chamada «mesão», termo que foi depois utilizado para designar toda uma família de partículas subnucleares.

Em 1946, a partícula postulada teoricamente por Yukawa foi descoberta experimentalmente em raios cósmicos, fonte natural de partículas de alta energia. O seu raciocínio estava assim confirmado: as forças nucleares tinham partículas quânticas associadas. A nova partícula, designada pelo símbolo grego π , foi apelidada de «mesão pi», ou «pião», para abreviar. Ela tinha a massa e as interações exigidas pelo mesão de Yukawa. Mais tarde, em 1948, quando foram construídos novos ciclotrões, criaram-se

artificialmente píões em laboratórios: píões reais eram emitidos na sequência de reações nucleares induzidas por partículas de alta energia. No entanto, a descoberta mais entusiasmante dos novos ciclotrões foi feita em 1952: o próton e o neutrão podiam ser transformados num novo estado da matéria, a ressonância de nucleão.

O que é uma ressonância de nucleão? Uma forma de descrever este novo estado da matéria é através de uma analogia com a corda de uma guitarra. A corda, quando está sob tensão, mas em repouso, tem uma certa energia, a energia mais baixa possível. Na nossa analogia com a física nuclear, este estado de energia mais baixa possível corresponde ao próton e ao neutrão. Se fornecermos energia à corda pulsando-a, ela irá entrar em ressonância e terá assim uma energia mais elevada. Da mesma forma, se fornecermos energia a um próton ou a um neutrão, ele pode passar a um estado energeticamente excitado, tornando-se assim uma ressonância de nucleão. Pode haver estados de energia mais elevados que correspondem às harmónicas superiores da corda de guitarra. Tais estados de alta energia foram também observados nos prótons e neutrões, na forma de ressonâncias de nucleão adicionais. As ressonâncias de nucleão eram extremamente instáveis e rapidamente se desintegravam num próton ou num neutrão e num píão; mas não havia dúvida de que existiam.

O significado desta descoberta era muito profundo. Ela queria dizer que o próton, o neutrão e o píão não estavam sós. Os físicos tinham descoberto novos estados quânticos da matéria com níveis de energia centenas de vezes mais elevados do que aqueles até aí

observados nos núcleos. A ressonância de nucleão e o pião foram apenas os primeiros a serem observados. Estas novas partículas foram chamadas «hadrões» (a partir da palavra grega para «forte»), porque todas elas tinham interações nucleares fortes.

De facto, quando a geração seguinte de aceleradores, o Cosmotron no Brookhaven National Laboratory (1952) e o Bevatron em Berkeley (1954), entrou em funcionamento, muitos novos hadrões foram descobertos. Estas máquinas, com o seu feixe de prótons de alta energia, podiam produzir novas formas de matéria nunca vistas — algo que não poderia ter sido imaginado nem nos mais temerários sonhos da razão. Tinha começado a viagem pelo oceano dos hadrões.

¹ Numa tradução livre poder-se-ia interpretar como «Há muito espaço de manobra nos níveis mais baixos.» (*N. do T.*)

CAPÍTULO 16

O Mistério dos Hadrões

Tudo o que não é interdito é obrigatório

MURRAY GELL-MANN

No princípio da década de 1950, o elenco (os *quanta* fundamentais) do filme tridimensional que os físicos estudavam era ainda pequeno. Esta situação não tardaria a mudar. Os novos microscópios para a matéria, os aceleradores construídos nos anos 50 e 60, utilizavam feixes de prótons de alta energia para bombardear outros prótons no interior de uma câmara de bolhas de hidrogénio líquido. De acordo com a teoria da relatividade de Einstein, a energia pode ser convertida em matéria — e era justamente isto o que acontecia à energia dos prótons do feixe ao colidirem com os prótons que serviam de alvo. A energia do feixe criava novas formas de matéria, os chamados «hadrões». O próton, o neutrão e o píon, os primeiros hadrões a serem descobertos, eram apenas a ponta do icebergue. Hoje em dia, os físicos creem que há um número infinito de hadrões, grande parte dos quais são extremamente instáveis, desintegrando-se em menos de um bilionésimo de bilionésimo de segundo, em hadrões mais estáveis. Enrico Fermi, o físico italo-americano, comentou, ao verificar a proliferação dos hadrões, que, se tivesse sabido que seria este o resultado da física nuclear, teria estudado zoologia.

Fermi exprimia deste modo a desilusão dos físicos devido ao facto de a exploração para além do núcleo não revelar um mundo subnuclear mais simples. Fazer colidir um feixe de protões de alta energia com outros protões, como era feito nos laboratórios de aceleradores como Brookhaven e Berkeley, nos Estados Unidos, no CERN, perto de Genebra, e em Dubna e Serpukhov, perto de Moscovo, não revelava uma estrutura mais simples. Em vez disso, eram produzidos todos aqueles hadrões. Qual poderia ser o significado da proliferação dos hadrões? Este era o mistério com o qual se confrontavam os físicos teóricos de partículas na década de 1960.

Como é que os físicos teóricos consideravam os hadrões? Tornava-se claro, a partir das experiências do início dos anos 60, que os hadrões tinham uma extensão espacial bem definida, ao contrário do eletrão, que parece comportar-se como um ponto matemático. Os hadrões, como o protão, podiam ser visualizados como pequenas bolas sem estrutura interna observável. Estas bolas hadrónicas podiam girar em torno de si próprias e tinham carga elétrica e propriedades magnéticas — mas o seu interior era desconhecido, era uma terra incógnita.

O facto de os hadrões poderem girar, como pequenos piões¹, conduziu ao primeiro princípio para a sua classificação. O *spin* de um hadrão, como o de qualquer partícula quântica, estava quantizado e podia apenas tomar certos valores como 0, 1/2, 1, 3/2, 2..., ou seja, valores inteiros ou semi-inteiros em determinado sistema de unidades. A existência deste *spin* quantizado conduziu à classificação dos hadrões em dois grandes subconjuntos: o

conjunto dos «mesões», que possuíam *spin* inteiro (0, 1, 2, ...), e o conjunto dos bariões, que possuíam *spin* semi-inteiro (1/2, 3/2, ...). O próton e o neutrão, que têm *spin* 1/2, são exemplos de bariões. O píon tem *spin* 0 e é assim um mesão. Qualquer hádrão é ou um mesão, ou um barião.

A distinção entre mesões e bariões é muito importante, porque se comportam de formas diferentes em interações hadrónicas. Verifica-se que o número de bariões que entra numa reação de colisão é igual ao número de bariões que dela sai, facto que é chamado «conservação do número bariónico»². Não existe nenhuma lei de conservação do número mesónico; as colisões de hádrões podem ser pródigas na produção de mesões.

Muitos teóricos concentraram a sua atenção no facto de as interações fortes possuírem novas leis de conservação, como a conservação do número bariónico e a conservação absoluta da carga elétrica. Os hádrões, além de possuírem carga elétrica — o próton, por exemplo, tem uma unidade de carga elétrica —, tinham outros tipos de cargas discretas que eram conservadas no decorrer de uma interação hadrónica. Estas novas cargas receberam nomes como carga «isotópica» e carga de «estranheza». Aquando de uma colisão entre hádrões, que produzia ainda mais hádrões através de interações complexas, as quantidades de carga elétrica, isotópica e de estranheza eram sempre exatamente conservadas: existia a mesma quantidade de cada uma das cargas antes e depois da colisão. Não havia uma compreensão profunda da razão pela qual estas cargas eram conservadas no decurso de colisões entre hádrões; era simplesmente uma observação experimental.

Os cientistas tinham testemunhado algo de semelhante a estas leis de conservação da carga há muito tempo e noutra área da ciência: a química. As reações químicas entre moléculas podem ser extraordinariamente complexas, tal como as reações entre os hádrões, mas, como qualquer estudante de química elementar sabe, o número de átomos de um dado elemento que participa numa reação química deve ser conservado. Por exemplo, 2 átomos de hidrogénio e 1 de oxigénio podem combinar-se para formar uma molécula de água. Antes da reação química havia 2 átomos de hidrogénio, e depois dela há ainda 2 átomos de hidrogénio ligados na molécula de água. A quantidade de oxigénio, hidrogénio, carbono, ferro, e assim por diante, que entra numa reação química deve manter-se. Esta conservação dos átomos em reações moleculares é semelhante à conservação das várias cargas que os físicos descobriram pela observação das complexas colisões entre os hádrões. Estas novas leis de conservação proporcionavam indicações esclarecedoras sobre a estrutura dos hádrões — mas essa é uma história para o próximo capítulo.

Em resumo, as características principais de qualquer hádrão que os físicos conheciam eram a sua massa, o seu *spin* (que o classificavam como mesão ou barião) e a quantidade que possuía de cada uma das cargas. Estas características eram cruciais para classificar os vários hádrões, o que constituía o primeiro passo para trazer ordem ao mundo caótico das partículas hadrónicas. Os físicos podiam agora construir tabelas dos hádrões que tinham descoberto e cada hádrão tinha o seu lugar na tabela. Os hádrões foram classificados de uma forma muito semelhante àquela como os

átomos dos vários elementos químicos foram classificados na tabela periódica.

Em 1961, Murray Gell-Mann, um físico do Caltech³, e, de uma forma independente, Yuval Neeman, um agente dos serviços de informação israelitas que acabou por se dedicar à física, deram-se conta da existência de um padrão nos hádrons já classificados. Eles basearam a sua investigação numa simetria matemática que integrava as conhecidas conservações das várias cargas hádrônicas. Mas essa simetria matemática, que implicava o padrão a que eles deram o nome de via octópula, ultrapassava em muito as leis de conservação que integrava. De acordo com a via octópula, cada hádron deve pertencer a uma família específica de hádrons. Estas famílias tinham números fixos de membros; havia famílias de 1, 8, 10 e 27 membros. Famílias com um só membro (se é que se podem chamar famílias!) são chamadas «singletos»; outras famílias, com 8 membros, são chamadas «octetos», e com 10, «decupletos». Todos os membros de uma dada família têm o mesmo *spin*, mas as suas cargas elétricas, isotópica e de estranheza diferem.

A via octópula constituiu um enorme passo em frente para a resolução do mistério dos hádrons. O próton e o neutrão eram agora considerados apenas dois membros de uma grande família de 8 partículas, chamada «octeto de bariões». Quais eram as outras 6 partículas? Ainda antes de a via octópula ter sido descoberta, estas partículas já tinham sido detetadas em laboratórios de aceleradores. Os físicos associaram letras gregas a estes seis novos hádrons: a partícula Λ (lambda), as 3 partículas Σ (sigma) e as 2

partículas Ξ (csi). De forma análoga, o pião era agora considerado membro de uma outra família de 8 partículas, chamada «octeto de mesões». O ajuste dos hádrons em famílias era o princípio de classificação da via octópula e funcionava perfeitamente, tal como a tabela periódica dos elementos. Muitas propriedades de uma dada família de partículas, como as suas diferentes massas, podiam agora ser relacionadas através da simetria matemática. A exploração destas e de muitas outras consequências da via octópula ocupou os físicos nos meados da década de 1960.

Alguns críticos dos resultados da via octópula pensaram que o seu êxito podia ser accidental. Afinal de contas, argumentavam eles, ela apenas explicava propriedades dos hádrons já conhecidas a partir da experiência, e talvez a teoria estivesse construída de forma a adaptar-se aos factos, e nada mais. Mas a via octópula fazia uma nova previsão: a existência de uma nova partícula chamada «ómega menos» (Ω^-), que fora postulada por Gell-Mann. A descoberta desta partícula, nunca antes observada, convenceria mesmo os mais críticos. Como sabia Gell-Mann que o Ω^- tinha de existir? De acordo com a via octópula, existia uma família de hádrons com 10 membros, o «decuplete». 7 destes 10 membros podiam ser identificados com hádrons conhecidos. Mas havia ainda uma lacuna de 3 membros em 1962, quando Gell-Mann assistiu a um congresso de física das altas energias no CERN. Um dos resultados que os físicos experimentais anunciaram nesse congresso foi a descoberta, já rotineira, de dois novos hádrons. Gell-Mann viu imediatamente a ligação à via octópula. Estes dois hádrons tinham exatamente as propriedades corretas para o decuplete; quando eram associados aos outros sete já conhecidos,

o conjunto resultante consistia de 9 das 10 partículas previstas para o decuplete. Isto queria dizer que a décima partícula, o Ω^- , tinha de existir. A natureza não devia mostrar uma regularidade parcial, ficando depois a meio caminho.

Em Novembro de 1963, no Brookhaven Laboratory, um numeroso grupo de físicos experimentais conjugou os seus esforços para a pesquisa do Ω^- . Eles realizaram cerca de 50 000 fotografias de câmaras de bolhas e numa delas apareceu o rasto do Ω^- . Em Dezembro desse mesmo ano, os exultantes experimentadores enviaram um cartão de boas-festas constituído pela fotografia do rasto deixado pelo Ω^- na câmara de bolhas. Quando o Ω^- foi descoberto dentro dos limites teóricos previstos para a sua massa, praticamente todos os críticos foram conquistados pela via octópula.

Pelos meados da década de 60, a via octópula e a simetria matemática que ela utilizava trouxeram ordem ao domínio dos hádrões. O conjunto infinito dos hádrões (bárions e mésons) podia ser classificado e o padrão das suas propriedades esclarecido. Mas, como qualquer grande progresso em física, o êxito da via octópula punha questões novas e mais profundas.

A pergunta principal era: por que é que a via octópula funciona? Esta pergunta era especialmente intrigante nos anos 60, devido à concepção que os físicos tinham nessa altura da estrutura dos hádrões — nomeadamente, que os hádrões não pareciam ter qualquer estrutura interna. Se um hádrão fosse esmagado, tudo o que emergiria seriam mais hádrões criados a partir da energia

fornecida ao esmagar o primeiro hadrão. A melhor explicação para esta observação era na altura a hipótese do *bootstrap*, que assegurava que todos os hadrões eram compostos uns dos outros. Para ilustrar esta ideia, suponhamos que, em vez de um número infinito de hadrões, há apenas três, a que chamamos A, B e C. Primeiro fazemos a pergunta: de que é feito A? Fazendo colidir dois hadrões A, fornecemos a energia necessária para criar novas partículas, e neste caso verificamos que A é constituído por B e C. A seguir fazemos exatamente o mesmo para B e chegamos à conclusão de que ele é constituído por A e C. Da mesma forma, C é constituído por A e B. As três partículas são mutuamente compostas — elas elevaram-se pelos ares da existência «puxando os atacadores das próprias botas». Nos anos 60, muitos físicos eram atraídos por esta ideia do *bootstrap*, que era aplicada a um conjunto infinito de hadrões, e não apenas a três, porque parecia justificar o facto de não serem observadas novas partículas fundamentais em colisões hadrónicas além dos próprios hadrões. Nenhum hadrão era mais fundamental do que qualquer dos outros; imperava uma espécie de «democracia nuclear» no microcosmo.

A dificuldade da ideia do *bootstrap* era a de não fornecer explicação para a via octópula, para as propriedades de simetria observadas para os hadrões. A ideia do *bootstrap* não parecia resolver o mistério dos hadrões; era necessário procurar noutro lado.

A solução do mistério dos hadrões surgiu a partir da imaginação matemática dos físicos teóricos. Murray Gell-Mann e, independentemente, George Zweig aperceberam-se de que todas

as famílias de hádrões podiam ser elegantemente justificadas se se imaginasse que os hádrões eram constituídos por partículas mais fundamentais, a que Gell-Mann chamou *quarks*. Utilizando regras simples para combinar os *quarks*, todo o conjunto infinito dos hádrões e todas as famílias observadas eram explicados. A forma de pensar sobre um hádrão é considerá-lo um pequeno saco com alguns *quarks* pontuais em movimento no seu interior. As leis observadas de conservação de cargas eram uma simples consequência do facto de os *quarks* de tipo diferente serem conservados no decurso de uma reacção hadrónica, à maneira dos átomos numa reacção química. A resposta ao mistério dos hádrões é que estes são «moléculas» de *quarks*. O Prémio Nobel foi atribuído em 1969 a Gell-Mann por esclarecer as simetrias dos hádrões.

— Olhando para trás, os hádrões parecem uma partida pregada aos físicos pelo realizador do filme a três dimensões. Foi uma partida que, uma vez compreendida, não só nos ensinou a solução do mistério dos *quarks*, mas também nos deu indicações sobre a unificação das interações da natureza. Mas primeiro vamos aos *quarks*!

¹ Neste caso concreto, e ao contrário do que acontecerá daqui para a frente, pião refere-se ao brinquedo infantil, e não à partícula elementar do mesmo nome, homonímia que se torna óbvia a partir do contexto. (N. do T.)

² O hipotético e já referido decaimento do protão violaria a lei de conservação do número bariónico. Este fenómeno será discutido no cap. 11 da parte 2. (N. do T.)

³ Acrónimo pelo qual é conhecido o California Institute of Technology. (N. do T.)

CAPÍTULO 17

Quarks

— Three quarks for Muster Mark!

Sure he hasn't got much of bark

And sure any he has it's all beside the mark¹.

JAMES JOYCE, *Finnegans Wake*

Os hádrões são feitos de *quarks*: é essa a solução do mistério dos hádrões. Mas o que são os quarks? Os quarks são partículas quânticas pontuais semelhantes ao elétron e com o mesmo *spin* ($1/2$) que ele. No entanto, têm uma carga elétrica fracionária em relação à carga unitária do elétron e, ao contrário deste, nunca ninguém «viu» um *quark*. Os *quarks* não entraram na física moderna como descoberta experimental espetacular — um grito de «Eureka» vindo do laboratório —, mas sim a partir de uma astúcia matemática dos físicos teóricos.

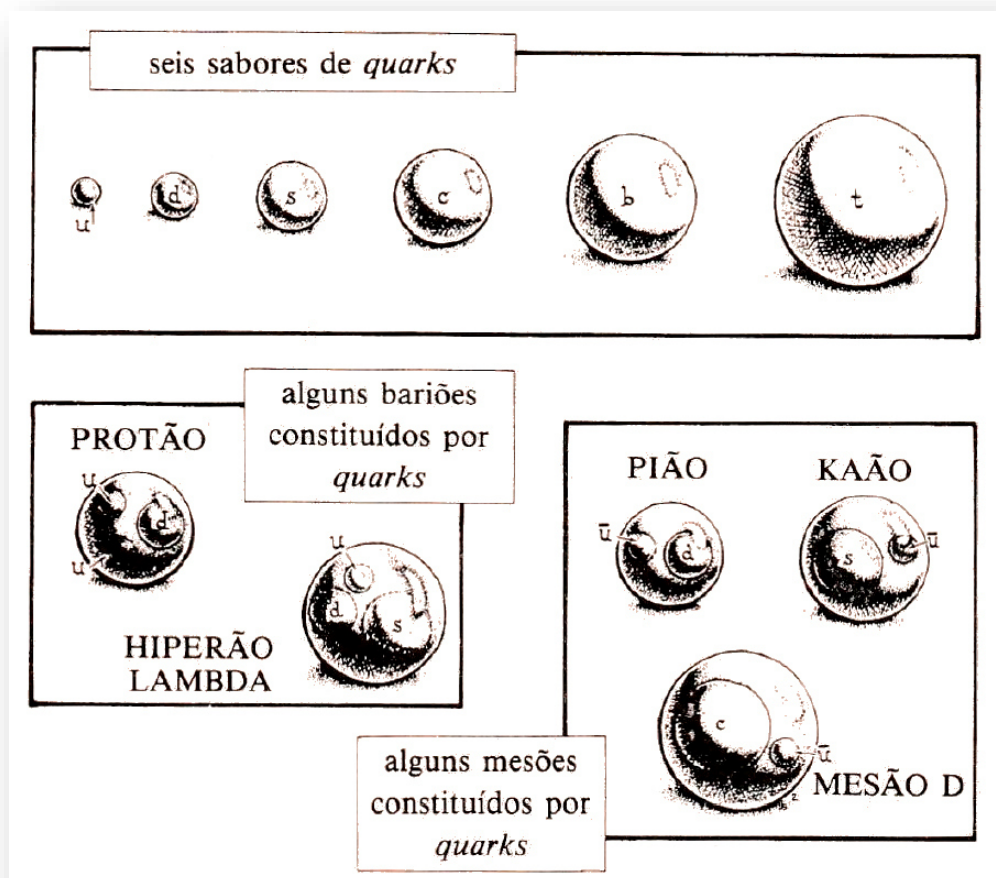
Certo dia, em 1963, Murray Gell-Mann visitava a Universidade de Colúmbia, onde ia proferir uma conferência. Estimulado por perguntas e sugestões de Robert Serber, físico teórico de Colúmbia, Gell-Mann concebeu a ideia de uma subestrutura para os hádrões, a que chamou *quarks*, inspirando-se numa linha do livro *Finnegans Wake*, de James Joyce. *Quark* é a palavra alemã para «coalhada» ou «requeijão». De uma forma completamente independente, outro

físico americano, George Zweig, que estava nessa altura de visita ao CERN, chegou à mesma conclusão, mas chamou às novas subestruturas «ases». Zweig quis publicar o seu artigo numa revista americana de física, mas a direção europeia do CERN, tentando manter um critério de independência em relação à física americana, tinha a política de fazer publicar a investigação realizada no CERN em publicações europeias. O artigo de Zweig nunca chegou a ser publicado e o termo «ases» nunca foi utilizado.

A ideia básica dos *quarks* é que todos os hádrões podem ser construídos a partir de três *quarks*, chamados *up* (literalmente, «cimo»), *down* (literalmente, «baixo») e *strange* (literalmente, «estranho»), bem como dos seus correspondentes *antiquarks* (isto é, versões dos quarks em antimatéria com carga elétrica simétrica). *Up*, *down* e *strange* são os três sabores dos *quarks* — uma utilização curiosa da palavra «sabor». A certa altura, os físicos referiram-se extravagantemente aos três *quarks* como «chocolate», «baunilha» e «morango», em lugar de *up*, *down* e *strange*, e daí a utilização da palavra «sabor». A terminologia dos gelados nunca se tornou corrente, sendo, no entanto, adotado o uso do termo «sabor» para distinguir os três quarks. E parece ter vindo para ficar.

Os físicos consideram conveniente designar as partículas por letras; os *quarks* *up*, *down* e *strange* são respetivamente simbolizados por **u**, **d** e **s** e os correspondentes *antiquarks* por **u**, **d** e **s**. Algumas propriedades destes *quarks* estão resumidas na tabela que se apresenta. Uma forma de pensar nos *quarks* é como sendo eles pequenas partículas pontuais que interagem por meio de forças fortes e que, desta forma, se ligam para constituir os hádrões —

são como um pequeno conjunto de Lego, cujas peças podem ser montadas de acordo com determinadas regras de construção para constituir os hádrões.



Os seis diferentes sabores de *quarks* que os físicos creem existir (foram descobertos cinco) e alguns dos bariões e dos mesões por eles constituídos. Os sabores são *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* e *top*. Os *quarks* nunca foram detetados isolados, mas apenas ligados no interior dos hádrões observados.

As regras para construir os hádrões a partir dos *quarks* são extremamente simples. Os bariões, que, como sabemos, são um dos grandes grupos de hádrões e têm spin semi-inteiro, são combinações de três *quarks*:

$$qqq$$

onde **q** significa **u**, **d** ou **s**. Os antibariões são constituídos por três *antiquarks*:

$$\bar{q}\bar{q}\bar{q}$$

O outro grupo de hádrões, os mesões (hádrões de *spin* inteiro), são combinações de um *quark* e de um *antiquark*:

$$q\bar{q}$$

Com estas regras, os hádrões são simplesmente combinações de *quarks* cuja carga elétrica total é inteira: 0, ± 1 , ± 2 , etc., ou seja, as cargas observadas para os hádrões. A última regra é a de que apenas se podem combinar *quarks* de forma que a carga elétrica total seja inteira. Assim, com os *quarks* **u**, **d** e **s**, e com estas regras, podem construir-se todos os hádrões, e somente os hádrões.

Uma pergunta óbvia é: como se pode construir um conjunto infinito de hádrões a partir apenas de três *quarks*? Parece não existirem *quarks* suficientes para realizar esta tarefa infinita! De acordo com o modelo dos *quarks*, estes podem ligar-se, através de muitas configurações diferentes, ao orbitarem em torno uns dos outros no interior de um hádrão. Tal como os eletrões num átomo, os *quarks* no interior de um hádrão têm muitas órbitas possíveis. Por exemplo, o par *quark-antiquark*, que constitui um mesão, pode orbitar em torno de um centro comum com uma, duas ou três unidades de movimento angular orbital; cada uma destas configurações tem uma dada energia e corresponde a determinado

mesão. Como há um número infinito de órbitas possíveis para o par *quark-antiquark*, há um conjunto infinito de mesões.

Na prática, os físicos estudam apenas as configurações orbitais de menor energia, que correspondem aos hádrões mais facilmente observáveis no laboratório. As órbitas de energia mais elevada correspondem a ressonâncias de hádrão que decaem rapidamente em hádrões de menor massa.

A beleza concetual do modelo dos *quarks* está em explicar automaticamente o esquema de classificação dos hádrões pela via octópula, que já era conhecido.

Utilizando as regras para a combinação dos *quarks*, os hádrões formavam famílias de 1, 8, 10... membros cada uma, tal como na via octópula. Seria como se as peças do nosso conjunto de Lego (os *quarks*) apenas pudessem ser montadas em combinações especiais (os hádrões) que constituíssem as famílias.

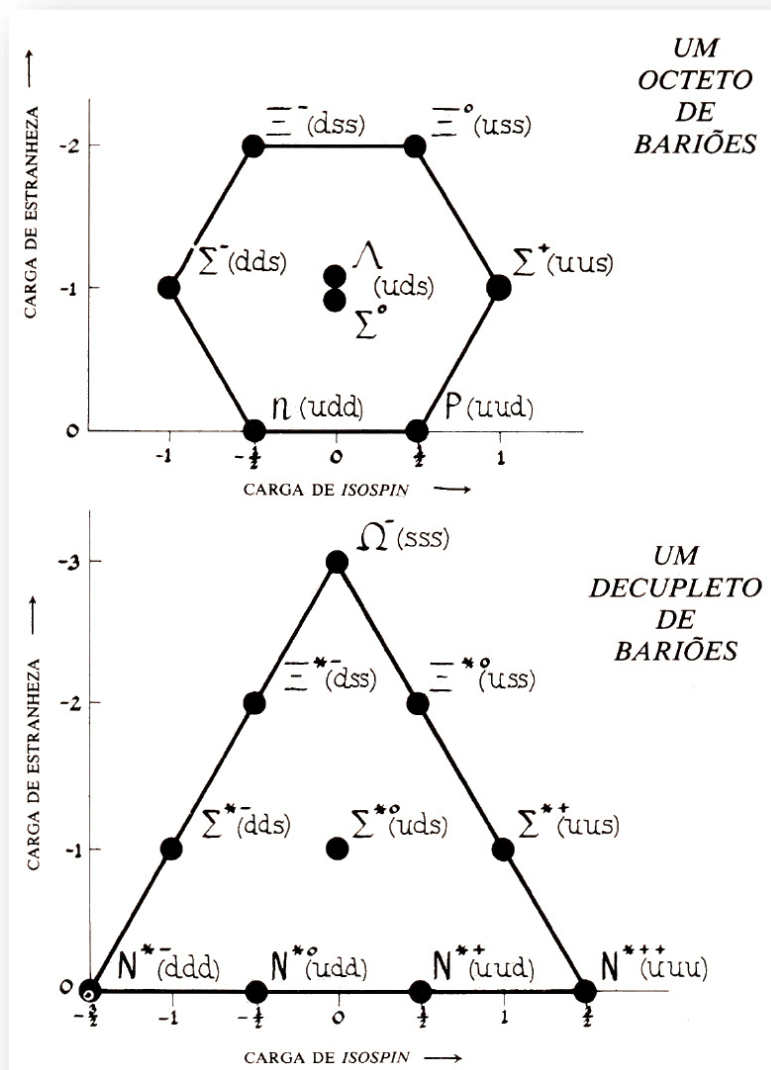
Por exemplo, o protão (p) e o neutrão (n), os primeiros hádrões a serem descobertos, são compostos por *quarks* **u** e **d** de acordo com o esquema:

$$p \sim uud$$

$$n \sim udd$$

É fácil verificar, através da soma algébrica das cargas dos quarks, que o protão tem assim carga elétrica +1 e o neutrão carga

elétrica 0. O protão e o neutrão, de acordo com a via octópula, são apenas dois membros de uma família de 8 hadrões. O resto deste octeto é formado substituindo um dos quarks **u** e **d** do protão ou neutrão por um *quark s*, *strange*. O conteúdo em *quarks* de cada um dos elementos da família assim formada mostra-se numa das figuras.



Classificação, segundo a via octópula, dos hadrões de um octeto e de um decuplo de bariões. Cada barião ou mesão detetado em laboratório ajusta-se a um destes padrões em que a carga de estranheza é marcada no eixo vertical e a de *isospin* no horizontal. Junto do símbolo de cada barião está indicada a sua composição em *quarks*. Com a introdução dos *quarks*, a razão profunda da existência destes padrões ficou esclarecida.

A única diferença entre os *quarks* **u**, **d** e **s**, em termos das interações entre eles, está nas suas diferentes massas: os quarks **u** e **d** são muito leves, enquanto o *quark* **s** tem uma massa cinquenta vezes maior. Ninguém faz a menor ideia da razão pela qual as massas dos *quarks* diferem; é um problema totalmente em aberto. Mas o facto de a massa do *quark strange* ser muito superior à dos outros dois explica que os hádrões que o integram — e que também se designam por hádrões «estranhos» — sejam muito mais pesados do que os hádrões que não o integram.

Podemos agora apreciar a enorme simplificação que o modelo dos *quarks* representava: o problema de um conjunto infinito de hádrões era assim reduzido a um problema de dinâmica e de interações entre apenas três *quarks*. O modelo justificava a via octópula. Além disso, as leis de conservação observadas nas colisões entre hádrões que conduziram à via octópula eram agora vistas como representando a conservação dos vários sabores de *quarks*: as quantidades dos sabores *up*, *down* e *strange* tinham de ser idênticas no início e no fim de uma reação hadrónica. Os *quarks* trocados em colisões de hádrões eram análogos aos átomos trocados pelas moléculas numa reação química.

Mas havia ainda um problema incómodo: os *quarks* nunca tinham sido observados. Porquê? Talvez existam *quarks* livres, mas apenas com massas enormes, não podendo assim ser criados nos laboratórios atuais. Os físicos procuraram os *quarks* em experiências de laboratório, em raios cósmicos e em muitas outras pesquisas, mas sempre sem êxito. Se os físicos tentarem separar um hádrão nos *quarks* que o constituem, tal como se pode dividir

uma molécula nos átomos que a constituem, não obtêm *quarks*, mas sim mais hádrons. O modelo dos *quarks* era uma ficção matemática que de alguma forma funcionava. Como podiam os físicos aceitar intelectualmente essa ficção?

Os físicos têm fortes tendências positivistas, que se manifestam na sua relutância em introduzir na ciência conceitos novos que não possam ser empiricamente verificados de forma direta. Ernst Mach, um físico influente do virar do século, nunca aceitou os átomos porque nunca tinha visto um. Os físicos chegaram mais tarde a conceber testes diretos para verificar a existência dos átomos, que até aí eram apenas ficções convenientes para a descrição do comportamento dos gases. Mas o que teria hoje pensado Mach sobre os *quarks*? Atualmente, muitos físicos creem que os *quarks* nunca serão observados; eles estão permanentemente confinados ao interior dos hádrons. Ainda que muitos físicos sejam positivistas, eles são, antes de tudo, pragmatistas criativos. Os melhores físicos nunca deixam que os seus preconceitos influenciem a atividade da sua imaginação; a imaginação deve ser conduzida por aquilo que funciona. E, neste caso, o modelo dos *quarks* funcionava.

Pode discutir-se o estatuto existencial dos *quarks* por muito tempo. A discussão poderia terminar com a descoberta de um *quark* livre — uma partícula de carga elétrica fracionária —, e isso constituiria a descoberta do século. Novos tipos de matéria, nunca antes vistos, poderiam ser produzidos utilizando os *quarks*. Uma nova química, que lidasse com *quarks* em lugar de elétrons, bem como indústrias que a utilizassem, poderiam então surgir. Mas duvido que alguma vez se observem *quarks* livres, porque há já

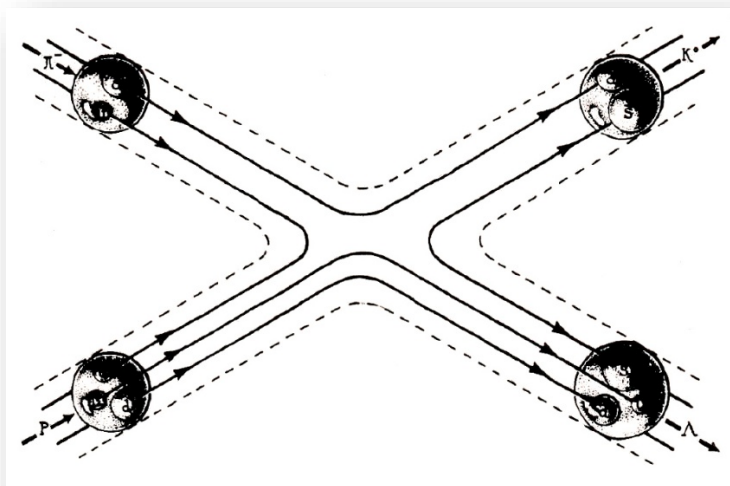
muito que se vem tentando fazê-lo e nunca se conseguiu. De qualquer modo, a discussão sobre a existência real dos *quarks* em termos da estrutura interna dos hádrons terminou por volta de 1968. Tal como muitas questões postas pela física, ela foi decidida experimentalmente.

Pouco antes de 1968 tornou-se operacional um novo instrumento para a exploração da estrutura da matéria: o acelerador linear de elétrons de 2 km de comprimento (SLAC), construído nas colinas por detrás da Universidade de Stanford. Uma série de experiências realizadas em Stanford por um grupo local e por cientistas do MIT convenceram os físicos de que existiam realmente *quarks* no interior dos hádrons. Um feixe de elétrons vindo do acelerador interagiria com um alvo de prótons, trocando um único fóton de muito alta energia que sondaria a carga elétrica no interior do próton e mediria a sua distribuição. Estas experiências revelaram que a carga elétrica do próton estava concentrada em estruturas pontuais. Os *quarks* do próton eram como as passas de um bolo. De facto, os físicos haviam observado o interior do próton e tinham visto os *quarks*.

Estas experiências realizadas no SLAC para pôr em evidência a estrutura interna do próton eram análogas à experiência feita mais de cinquenta anos antes por Rutherford com o objetivo de determinar a estrutura do átomo. Ambas as experiências consistiam em realizar colisões de uma partícula com outra. Rutherford fazia colidir partículas alfa com átomos de ouro e a experiência do SLAC fazia colidir elétrons com prótons. Rutherford realizou esta experiência sobre uma mesa, enquanto o acelerador de Stanford

tem o comprimento de 3 km — a diferença de tamanho dos equipamentos reflete o facto de a energia necessária para «ver» o interior do átomo. Mas a filosofia da experiência é a mesma.

Depois de Rutherford tornar públicas as suas determinações das características da estrutura atómica, os físicos teóricos, como Niels Bohr, tentaram fazer modelos que as explicassem. De forma análoga, depois da experiência do SLAC e de experiências semelhantes feitas noutros laboratórios que confirmaram os resultados daquela, os físicos teóricos tentaram fazer modelos para os hádrões com base na ideia de *quarks* permanentemente confinados. Tal como Bohr, ao estabelecer o seu modelo, não possuía uma teoria fundamental — teria de esperar-se bastante até ser formulada a teoria quântica —, os físicos teóricos que tentavam explicar o movimento dos *quarks* no interior dos hádrões não dispunham de uma teoria fundamental. Mas isso não os impediu de fazer modelos teóricos dos hádrões que podiam ser comparados com a experiência, permitindo assim provar as hipóteses do modelo.



Uma interação entre hádrões no modelo dos *quarks*. Os dois hádrões do lado esquerdo (um píão carregado negativamente e um píão carregado positivamente) colidem e transformam-se nos hádrões vistos do lado direito (um kaão neutro e um lambda). Os *quarks* de um hádrão podem aniquilar os correspondentes *antiquarks* do outro ou passar de um hádrão para o outro. Podem também ser criados novos *quarks* a partir da energia da colisão, como acontece neste caso ao par S e $\bar{S}$.

Um dos modelos com maior êxito para explicar a dinâmica dos *quarks* no interior dos hádrões foi o «modelo do saco», proposto por Kenneth Johnson e seus colaboradores no MIT: os hádrões podiam ser visualizados como pequenos sacos no interior dos quais estavam os *quarks*. O saco, ou hádrão, podia ser imaginado como uma bolha de ar no seio de um líquido, dentro da qual estavam os *quarks*, permanentemente confinados no seu interior. Imaginemos uma colisão entre dois hádrões, ou bolhas de ar. Durante um pequeno intervalo de tempo, as duas bolhas sobrepõem-se e comportam-se como uma só bolha. Durante este tempo, os *quarks* podem passar de um saco para o outro. Mas não só podem as bolhas trocar *quarks* entre si, como novos pares *quark-antiquark* podem ser criados no interior das bolhas sobrepostas, a partir da energia da colisão. Após a colisão, a bolha fragmenta-se em duas ou mais bolhas, cada uma das quais representa um hádrão contendo os seus próprios *quarks*. A característica maravilhosa deste modelo do saco é que se podem calcular em grande pormenor os detalhes relativos às colisões e decaimentos dos hádrões. O acordo com a experiência é notável e indica que a ideia de *quarks* permanentemente confinados é bastante acertada.

O que acontecerá se tentarmos afastar entre si os *quarks* de um mesmo saco? O saco começa a deformar-se e alonga-se ao longo da direção segundo a qual os *quarks* se afastam. De facto, o hádrão neste estado assemelha-se mais a uma corda que une os *quarks* do

que a uma bolha. Esta configuração descreve o que é designado por «modelo da corda» para os hádrões: os *quarks* são unidos por uma espécie de cola que se deforma até atingir a forma de uma corda. Podemos imaginar que esta corda é como um elástico; por mais que puxemos, a força que devemos exercer é constante. Seria necessária uma quantidade infinita de energia para separar realmente os dois quarks se eles estivessem unidos por uma corda deste tipo. Como não podemos dispor de uma quantidade infinita de energia, os *quarks* não podem ser isolados.

Mas muito antes de se fornecer uma quantidade infinita de energia ocorre outro fenómeno. A energia que se forneceu ao puxar a corda pode converter-se em matéria, sob a forma de um par *quark-antiquark*, tal como se vê na figura. O par *quark-antiquark* é criado a partir do vácuo, porque existe energia suficiente para o produzir. A corda fragmenta-se e dá origem a duas cordas, ou dois hádrões. Assim, nunca se conseguem isolar os *quarks*; em lugar disso, produzem-se novos hádrões, tal como se observa no laboratório.

Os modelos do saco e da corda para os hádrões explicam muitas das propriedades observadas para os hádrões, de cuja estrutura nos dão também uma imagem intuitiva. Mas não são teorias quânticas fundamentais. Existe hoje uma teoria fundamental para a dinâmica dos *quarks* chamada «cromodinâmica quântica», que descreveremos num próximo capítulo. A esperança atual dos físicos teóricos é que os modelos do saco e da corda, bem como a propriedade de confinamento dos *quarks*, possam ser deduzidos a partir da cromodinâmica quântica, tal como os resultados obtidos

através do modelo atômico de Bohr puderam ser deduzidos a partir da mecânica quântica. Até aqui, este objetivo tem-nos escapado, mas há todas as razões para se supor que estamos no caminho certo.



Uma tentativa frustrada de extrair *quarks* de um *hadrão*. À medida que o *saco* é deformado, torna-se numa *corda*. A energia utilizada para separar os *quarks* é convertida na criação de um par *quark-antiquark*. O resultado final é a obtenção de dois *hadrões*, e não de *quarks* isolados.

Ainda que o modelo dos *quarks* com apenas três sabores de *quarks* explicasse a origem de todos os hádrons conhecidos, alguns físicos teóricos, ainda na década de 60, não resistiram a supor que existiam mais *quarks* até então insuspeitados. Grande parte dos físicos não deram muita atenção a estas especulações, porque não havia razões profundas para a existência de mais *quarks*. Esta situação transformou-se radicalmente em 1973. Por essa altura tinham sido formuladas pelos físicos teóricos novas teorias da interação dos *quarks* baseadas em elegantes simetrias matemáticas. Mas estas maravilhosas teorias só estariam de acordo com a experiência desde que se postulasse a existência de um quarto *quark*. Apesar disto, muitos físicos pensavam ainda que a introdução do quarto *quark* parecia artificial. Por seu lado, os defensores do quarto *quark*, liderados pelo teórico Sheldon Glashow e pelos seus colaboradores da Universidade de Harvard, estavam convencidos da sua existência. Glashow designou, inclusivamente, o hipotético quarto *quark* por *charm* (literalmente, «encanto»). Mas onde estavam os hádrons que integravam o novo *quark*?

No Verão de 1974, Sam Ting e os seus colaboradores experimentais no Brookhaven National Laboratory descobriram um pico invulgar em dados relativos a colisões. Poucas pessoas tomaram conhecimento deste fenómeno ou das energias a que ele ocorria: era secreto. Os físicos experimentais gostam muito de manter os seus resultados em segredo até os verificarem uma ou duas vezes, porque não querem anunciar descobertas que tenham mais tarde de desmentir. Um físico do acelerador linear de Stanford, na Califórnia, apostou com Ting sobre a existência deste pico para tentar fazê-lo falar. Mas Ting apostou contra a existência do pico,

apesar dos seus dados, talvez para dar a sensação de que não possuía resultado algum. Em Novembro desse mesmo ano, um grupo experimental que trabalhava em Stanford com colisões de feixes de eletrões e positrões procedeu a uma investigação cuidadosa do que sucedia a diferentes energias. A uma determinada energia era criado um enorme número de partículas em virtude da aniquilação de eletrão e positrão, o que era registado como um pico no gráfico dos dados. Os experimentalistas de Stanford, conduzidos por Burton Richter, anunciaram a descoberta de uma nova partícula em consequência do pico observado nos seus dados. Na mesma altura, Ting publicou imediatamente os seus resultados. Aquilo que as duas equipas de experimentadores tinham independentemente descoberto era um novo mesão, um hadrão constituído por um par *quark-antiquark* do sabor *charm*. Em breve surgiria confirmação destes resultados num laboratório alemão. Pouco depois da descoberta deste mesão foi descoberto em Stanford um outro constituído também por um *quark c* e por um *antiquark c*. O conjunto destes hadrões é designado por «*charmónio*».

Os físicos referem-se frequentemente a estas surpreendentes descobertas experimentais como Revolução de Novembro de 1974. O *charm* é mais um sabor a ser adicionado à nossa lista de *up*, *down* e *strange*. Tanto quanto se pode saber, o *quark charm* é semelhante aos outros três *quarks*, exceto no facto de ter uma massa muito maior. Foi por isso que a sua descoberta teve de esperar o advento de aceleradores com energia suficiente para o produzir.

Se os novos hadrões descobertos em Brookhaven e Stanford eram de facto compostos por um novo *quark*, o *charm*, e

correspondente *antiquark*, de acordo com o esquema $c\bar{c}$, então deveriam existir muitos mais novos hádrões compostos pelo novo *quark charm* e pelos outros quarks **u**, **d** e **s**. Por exemplo, deveriam existir mesões construídos a partir dos esquemas $\bar{d}c$, $\bar{u}c$, $\bar{s}c$, que agrupam um *quark charm* com um dos outros três *quarks* já conhecidos. Esta exigência põe realmente o modelo dos *quarks* à prova; e alguns destes mesões foram de facto descobertos em Junho de 1976, em Stanford. Um novo, e muito rico, conjunto de novos hádrões pode ser construído a partir do *quark c*, facto agora confirmado pela experiência. Pode afirmar-se com segurança que não há grandes divergências entre o modelo dos *quarks* e a experiência. O *quark charm* parece ser como os outros, à parte a sua massa mais elevada.

Existem, portanto, quatro sabores de quarks, **u**, **d**, **s** e **c**. E por que não mais? A grande caça aos *quarks* estava em pleno desenvolvimento e provavelmente ainda não terminou. Em 1978, um grupo do Fermi National π Laboratory, liderado por Leon Lederman (hoje director do laboratório), descobriu outro mesão de elevada massa, a que chamou (ípsilon). Este mesão é, sem margem para dúvidas, um estado ligado de um *quark* cuja massa é ainda maior, o *quark bottom* (literalmente, «fundo»), ou simplesmente **b** [por vezes designado por *beauty* (literalmente, «beleza»)], de acordo com o esquema de construção $\bar{b}b$. Se este novo *quark* é uma versão de maior massa dos outros quatro, deve combinar-se com eles para formar novos hádrões. Neste momento está a ser pesquisada a existência de um estado de *bottom* visível², em particular a combinação $\bar{u}b$.

Os físicos teóricos pensam que existe, pelo menos, mais um tipo de sabor para os *quarks*, o quark *top* (literalmente, «topo»), ou simplesmente **t** [por vezes designado por *truth* (literalmente, «verdade»)], que será descoberto numa região de massas ainda mais elevadas. Este *quark* tem sido bastante procurado e não foi ainda descoberto; provavelmente existirá a energias ainda mais elevadas do que aquelas que podemos atingir hoje em dia. Quantos sabores de *quarks* existem? Ninguém sabe ao certo — essa será uma história para o futuro. Mas uma coisa é certa: o problema dos hádrões foi reduzido ao problema da interação dos *quarks*.

TABELA DOS *QUARKS*

Nome	Símbolo	Massa aproximada em unidades da massa do electrão	Carga eléctrica em unidades da carga do protão
<i>up</i>	u	2	$\frac{2}{3}$
<i>down</i>	d	6	$-\frac{1}{3}$
<i>strange</i>	s	200	$-\frac{1}{3}$
<i>charm</i>	c	3000	$\frac{2}{3}$
<i>bottom</i>	b	9000	$-\frac{1}{3}$
<i>top</i>	t	?	$\frac{2}{3}$

Hoje conhecem-se mais *quarks* do que se conheciam hádrões em 1950 e a sua lista está ainda em crescimento. Muitos físicos sentem-se insatisfeitos com o elevado número de *quarks*, mas não foi

concebida nenhuma alternativa. Serão os *quarks* o fim da estrada? Ou serão eles próprios constituídos por objetos mais fundamentais? Uma vez que os *quarks* parecem estar permanentemente confinados no interior dos hádrões, fará qualquer sentido falar em subestruturas dos *quarks*? Como comentou Sheldon Glashow, «Se esta interpretação do confinamento dos «*quarks*» está correta, sugere uma forma engenhosa de terminar a regressão aparentemente infinita na estrutura da matéria. Os átomos podem ser analisados e divididos em eletrões e núcleos, os núcleos em prótons e neutrões e os prótons e neutrões nos *quarks*; mas a teoria do confinamento dos *quarks* sugere que a série termina aqui. É difícil imaginar como pode uma partícula ter estrutura interna se ela não pode sequer ser criada». Todas as indicações experimentais apontam, hoje em dia, no sentido de os *quarks* serem um nível último para a matéria, mas não conheço nenhum físico que estivesse disposto a apostar muito nisso.

Até aqui viajámos profundamente no interior do núcleo atómico; chegámos até ao oceano de hádrões e descobrimos que todos eles são feitos de *quarks*. Vemos agora que a física nuclear é a física dos *quarks* confinados. Mas há outra peça do jogo que já entrava nos átomos — o eletrão. Como é que o eletrão se adapta a este estado de coisas? O eletrão pertence a outro conjunto de partículas chamadas «leptões», que, à primeira vista, parecem não ter nada a ver com os hádrões ou com os *quarks*. Eles são outra parte do elenco do filme a três dimensões e vamos agora analisá-los.

¹ A fim de não atraiçoar a relação entre o título e a citação em epígrafe, abstinemo-nos de a traduzir. Podemos no entanto, oferecer uma tradução bastante livre:

Três hurras pelo Ti? Marcos!

Ladrar já não ladra muito

E o que ladra não vem muito a propósito.

(*N. do T.*)

² Diz-se que o *quark* **b** não é «visível» no mesão composto por $\bar{b}b$ porque temos um *quark bottom* e um *antiquark antibottom*, e assim só podemos detetar a sua presença indiretamente. Um mesão que contenha apenas um *quark* **b** e um antiquark de outro sabor poderá conduzir à deteção direta das propriedades do **b**, fenómeno a que se refere por «ter **b** visível». (*N. do T.*)

CAPÍTULO 18

Leptões

Quem encomendou isto?

ISIDOR ISAAC RABI

Um amigo meu, um físico teórico de ascendência norueguesa, costumava navegar nas águas azuis do cabo Cod, num pequeno e rápido barco à vela, revivendo as memórias do seu passado víquingue. Deu ao seu barco o nome de *Leptão*, palavra de origem grega que significa «ligeiro» ou «leve». Lembro-me bem de uma viagem de barco que fizemos juntos numa altura em que estávamos ambos intrigados com outro tipo de leptões: um conjunto de partículas elementares que inclui o eletrão e o neutrino. Os físicos conheciam os leptões e as suas propriedades de há muito, mas não tinham ideia do seu papel na intriga do filme a três dimensões. Eles pareciam supérfluos, como atores que não eram necessários. Só nos últimos anos os físicos começaram a compreender a forma como leptões e *quarks* se relacionam para formar uma teoria unificada dos *quanta* fundamentais. Mas, antes de entrarmos nessa questão, perguntemo-nos primeiro: o que são os leptões?

Recordemos que, no decorrer da nossa viagem pelo interior da matéria, assim que chegámos ao átomo, fomos imediatamente

explorar o núcleo atómico e depois os prótons e neutrões que o constituem. Estas partículas eram apenas duas dentre um conjunto infinito de hádrons. Na origem do mistério dos hádrons estavam os *quarks* — partículas pontuais que se ligam através de forças fortes e formam assim uma infinidade de configurações, os hádrons. Os *quarks* são o último passo dado na viagem ao interior do núcleo. Mas os átomos têm dois componentes primários: o núcleo e os eletrões que o rodeiam. Qual o lugar do eletrão no meio de tudo isto? Os físicos sabem hoje que o eletrão é o primeiro elemento de uma nova classe de partículas, todas de *spin* $1/2$, a que se deu o nome de «leptões». Os outros leptões são o neutrino, o muão e o tauão, partículas que aqui descreveremos.

Por que é que os físicos classificam os leptões separadamente dos hádrons e dos *quarks* que os constituem? Os hádrons interagem entre si muito intensamente, de uma forma que reflete as fortes forças que atuam entre os *quarks* que os constituem. Os leptões, pelo contrário, têm apenas interações relativamente fracas e formam assim um «cantinho» bastante arrumado no mundo dos *quarks*. Os físicos integraram assim os leptões numa classe específica.

Ao contrário dos *quarks*, a que se assemelham sob muitos aspetos, os leptões podem existir num estado livre. O eletrão, por exemplo, está ligado ao núcleo do átomo por forças eletromagnéticas e pode assim ser facilmente libertado. Os físicos conseguiram fazer feixes de eletrões, de neutrinos e de muões. O canhão de eletrões, na base de um tubo de televisão, dispara um feixe modulado de eletrões em direção ao ecrã de forma a produzir

uma imagem. Os leptões, como o eletrão, existem realmente no mundo. Imaginemos que abrimos o programa do filme cósmico a três dimensões na parte em que se descrevem os atores leptónicos.

1. O Eletrão

O mais notável e móvel dos *quanta* elementares é o eletrão, já identificado como partícula em 1897. Pode facilmente libertar-se das suas ligações aos núcleos atómicos e a sua massa é a menor de todos os *quanta* eletricamente carregados. A tecnologia eletrónica é uma consequência do domínio humano sobre o eletrão. As primeiras utilizações da eletricidade — eletrões em movimento — eram bastante primárias; aquilo que se fazia era provocar o movimento de um número imenso de eletrões sob a forma de uma corrente elétrica, de modo a acender lâmpadas e fornecer energia a motores elétricos e a outros aparelhos elétricos simples. Com o desenvolvimento dos tubos de vácuo e, mais tarde, dos transístores, tornou-se possível uma utilização mais elaborada do movimento eletrónico. Os cientistas aprenderam a lidar com quantidades cada vez mais pequenas de eletrões. O domínio do eletrão é o exemplo mais acabado da forma como o nosso contato com o invisível mundo quântico transformou a nossa civilização. Devido às propriedades específicas dos eletrões, que ninguém encomendou ou projetou, tornaram-se possíveis as telecomunicações eletrónicas e os *mass media*. Os computadores e os microprocessadores estão a transformar a nossa civilização. As leis materiais do invisível mundo quântico tornaram-se os princípios básicos de novos aparelhos e abriram toda uma nova esfera de investigação humana.

A teoria moderna do elétron começa com os trabalhos de Paul Dirac, um dos fundadores da moderna teoria quântica. Dirac sabia que existiam dois conjuntos separados de ideias (a moderna teoria quântica e a teoria da relatividade) que estavam essencialmente corretos. Mas o problema estava em combinar esses dois conjuntos de ideias e conceber uma teoria quântica que obedecesse também ao princípio da relatividade. Dirac centrou a sua atenção no elétron, partícula quântica bem conhecida cujas propriedades tinham sido experimentalmente confirmadas. Seria possível encontrar uma descrição matemática da onda associada ao elétron que fosse compatível com a teoria da relatividade? Dirac acabou por deduzir uma equação (a chamada «equação de Dirac») a que a onda associada ao elétron tinha de obedecer. Esta equação tinha profundas implicações.

Em primeiro lugar, previa o comportamento dos elétrons em movimento no seio de campos elétricos ou magnéticos, o que tinha até então escapado a uma compreensão teórica profunda. Foram estas previsões que convenceram os físicos de que a teoria de Dirac estava correta. Mas a mais espantosa previsão da equação de Dirac para o elétron era a da existência de um novo tipo de matéria nunca antes observado — a antimatéria. Como é que esta descoberta foi feita?

A equação de Dirac tinha, na realidade, duas soluções: uma delas descrevia o elétron e a outra descrevia uma partícula com carga elétrica positiva, simétrica da do elétron. A princípio, Dirac pensou que a partícula que correspondia a esta nova solução tinha de ser o próton, que era na altura a única partícula de carga positiva que se

conhecia. Mais tarde tornou-se claro que a nova partícula prevista pela equação de Dirac tinha de ter exatamente a mesma massa que o eletrão, não podendo assim ser o protão, cuja massa era cerca de 2000 vezes superior à do eletrão. A equação de Dirac previa de facto um novo tipo de eletrão: o antieletrão ou positrão. Em breve os físicos se aperceberam de que a equação de Dirac, ao implicar a existência do antieletrão, oferecia um exemplo específico de uma consequência geral da combinação da teoria quântica com o princípio da relatividade: a existência da antimatéria.

A antimatéria é em tudo idêntica à matéria, à exceção de os sinais das cargas elétricas de todas as partículas de antimatéria serem contrários aos das correspondentes partículas de matéria. As leis da física implicam que para cada partícula existe uma correspondente antipartícula. Assim, poderiam existir antiprotões, e também átomos de anti-hidrogénio compostos por um antiprotão e um positrão. Poderiam existir mundos inteiros de antimatéria; talvez algumas galáxias distantes fossem feitas de antimatéria. Não podem existir grandes aglomerados de antimatéria no nosso mundo porque, quando matéria e antimatéria se encontram aniquilam-se numa explosão espetacular. A antimatéria parece estranha — como um outro mundo do outro lado do espelho —, mas é uma previsão rigorosa da teoria de Dirac; se esta estivesse correta, ela teria de existir. E existe de facto. O antieletrão foi descoberto por Carl Anderson, um físico do Caltech, nos raios cósmicos que bombardeiam a Terra. Foram mais tarde descobertas versões de antimatéria do protão e de outras partículas; os físicos conseguiram até, recentemente, formar um antideutério — um núcleo atómico que consiste num antiprotão e num antineutrão.

Antes da ideia de Dirac sobre a antimatéria, os físicos podiam pensar nas partículas quânticas como sendo imutáveis: o número de partículas de um dado tipo tinha de ser o mesmo antes e depois de uma reação. Mas a descoberta da antimatéria alterou profundamente este estado de coisas. Heisenberg afirma:

Acredito que a descoberta de partículas e antipartículas por Dirac transformou completamente a nossa conceção da física atómica [...] Assim que chegámos à conclusão de que se podem criar pares, temos de considerar as partículas elementares como sistemas compostos, porque, ao considerar uma partícula, podemos estar em presença dela, ou dela e de um par, ou de dois pares, e assim por diante; e, assim, a conceção de partícula elementar modificou-se subitamente. Até essa altura julgo que todos os físicos tinham pensado nas partículas elementares à boa maneira de Demócrito, considerando essas partículas unidades incorruptíveis dadas pela natureza que nunca se transformam essencialmente e que não podem ser transmutadas noutra coisa. Não são sistemas dinâmicos, mas existem em si. Após a descoberta de Dirac tudo era diferente, pois podia perguntar-se: por que é que um próton não pode ser por vezes um próton mais um par eletrão-positrão, e assim por diante? [...] Assim, o problema da divisão da matéria tinha passado a ser visto de forma diferente.

Como estes comentários indicam, o advento da antimatéria provocou o fim da noção de conservação do número de partículas e tornou concebível a hipótese do *bootstrap*. As partículas como o eletrão podem ser criadas e aniquiladas; podem também transmutar-se umas nas outras.

O eletrão é a mais bem conhecida de todas as partículas quânticas. Aparentemente, é uma partícula absolutamente estável. A razão para este facto é bastante interessante. Se admitirmos que

a carga elétrica é absolutamente conservada — e atualmente todos os físicos aceitam que assim seja —, então, uma vez que o eletrão é a mais leve das partículas carregadas, ele não pode decair em partículas mais leves porque não há nenhuma que possa transportar a sua carga elétrica. A carga elétrica é como um testemunho, que, uma vez passado ao último estafeta, não pode ser entregue a mais ninguém.

A moderna teoria da interação entre os eletrões e a luz é chamada «eletrodinâmica quântica» e foi inventada logo após a segunda guerra mundial. Esta teoria é um dos grandes triunfos da física teórica moderna e efetuou previsões sobre as interações dos eletrões que foram verificadas pelas experiências mais precisas que o homem realizou. A eletrodinâmica quântica incorpora a teoria de Dirac para o eletrão e indica que o eletrão é uma partícula pontual sem estrutura interna. Ao contrário dos prótons e dos neutrões, que são constituídos por *quarks*, o eletrão parece ser o fim da viagem segundo as conceções atuais. O que constitui o enigma do eletrão é o facto de ele não estar sozinho.

2. O Muão

O segundo leptão, o muão, foi descoberto em 1937. Os muões são os componentes principais da radiação cósmica que atinge a superfície da Terra. Neste preciso momento, um número imenso de muões está a atravessar o corpo do leitor. Se pudéssemos ser equipados com óculos especiais que nos permitissem ver os muões que nos rodeiam, os seus rastos — supondo que eles «vivessem» o tempo suficiente — formariam um denso matagal de linhas quase

verticais em torno e através de nós. Esta radiação cósmica invisível pode ser, na realidade, revelada por detetores como câmaras de ionização, aparelhos que revelam o rasto de uma partícula carregada como o muão através de uma descarga elétrica entre placas metálicas. Mas o que é um muão?

O muão, tanto quanto se pode dizer, é em tudo idêntico a um eletrão, exceto na sua massa, que é cerca de 200 vezes maior. O muão é um eletrão gordo. Ele é também descrito pela equação de Dirac, tem carga elétrica negativa (o antimuão tem carga positiva) e as suas interações são determinadas com grande precisão pela eletrodinâmica quântica. Como todos os leptões, ele não tem interações fortes.

Depois de o muão ter sido descoberto e de algumas das suas propriedades terem sido estudadas, o físico Isidor Isaac Rabi perguntou: «Mas quem encomendou isto?» Rabi exprimia o sentimento de que ninguém esperava o muão ou necessitava dele. Ninguém sabe responder à pergunta de Rabi, mas hoje em dia deveríamos generalizar a sua pergunta de forma a incluir todos os *quanta*. Ninguém tem a menor ideia da razão pela qual leptões e *quarks* entram no filme cósmico a três dimensões.

3. Os Neutrinos

Durante a década de 1930, os físicos que estudavam os decaimentos radioativos dos núcleos descobriram um fenómeno bastante preocupante. Através de medições precisas descobriram que existia

mais energia antes da desintegração de um núcleo do que depois — uma violação da sagrada lei de conservação da massa-energia. O físico teórico Wolfgang Pauli sugeriu então que existia uma nova partícula até aí indetetada que era portadora da energia que faltava. Na altura em que Pauli fez esta sugestão parecia um pouco forçado resolver o problema da energia em falta postulando uma nova partícula que era impossível detetar. Mas essas partículas foram mais tarde detetadas, e hoje os físicos produzem feixes dessas partículas. Contrariamente ao eletrão e ao muão, essas partículas não possuem carga elétrica. Fermi deu-lhes o nome de «pequeninos neutrões» — neutrinos.

Os neutrinos são leptões reais. Têm uma massa inferior à do eletrão (de facto, não está estabelecido se têm ou não massa) e têm apenas interações extremamente fracas com a matéria. São frequentemente produzidos em decaimentos de outras partículas. Por exemplo, o muão decai num eletrão, num neutrino e num antineutrino. Como o neutrino tem interações muito fracas, é difícil fazer um neutrino parar uma vez produzido: seriam necessários cerca de oito anos-luz de chumbo maciço para fazer parar metade dos neutrinos produzidos num declínio nuclear típico. Eles movem-se através da matéria indiferentes à sua existência.

Surpreendentemente, os físicos podem agora produzir e controlar feixes de neutrinos, como os produzidos no Fermi National Accelerator Laboratory, próximo de Chicago, ou no CERN, o acelerador europeu nos arredores de Genebra. Estes feixes intensos de neutrinos de alta energia interagem por vezes no interior de enormes detetores. Apesar da pequena probabilidade de ocorrência

desse tipo de fenómenos, têm sido realizadas experiências importantes utilizando feixes de neutrinos. Os neutrinos, por serem tão penetrantes, podem sondar profundamente a estrutura dos prótons e dos nêutrons, e assim se aprendeu muito sobre a estrutura dos *quarks* que estão no interior destas partículas. A parte do feixe de neutrinos que não foi utilizada (e que é a maior) atravessa o detetor e prossegue tranquilamente o seu caminho na direção de Chicago. Podemos estar a ser atravessados por um feixe de neutrinos durante cinco dias sem que uma única reação se dê com eles dentro do nosso corpo.

Uma proposta divertida é a da utilização de um feixe de neutrinos como meio de comunicação. Teoricamente, poder-se-ia disparar um feixe de neutrinos através da Terra, de forma a ele emergir do outro lado desta, onde um enorme detetor poderia captar o fraco sinal. Apesar de este esquema poder, em princípio, funcionar, seria extremamente dispendioso em comparação com métodos mais convencionais. Outra proposta em tom de brincadeira é a de uma bomba de neutrinos, a arma preferida de um pacifista. Uma tal bomba, que facilmente poderia ser tão cara como uma arma nuclear convencional, explodiria com estrondo e inundaria a área do alvo com um fluxo intenso de neutrinos. Após aterrorizar toda a gente, os neutrinos atravessariam todos os objetos inofensivamente.

Os físicos ficaram muito surpreendidos ao descobrirem que há dois tipos de neutrinos, um dos quais está associado com o eletrão e o outro com o múon. São chamados, respetivamente, «neutrino de eletrão» e «neutrino de múon». Mas houve um elemento suplementar na história dos neutrinos: eles são esquerdos. A

maioria dos *quanta* fundamentais surgem em iguais quantidades de versões esquerdas e direitas, mas isso não sucede com os neutrinos.

Alguns dos objetos vulgares que nos rodeiam podem apresentar-se sob duas formas, que correspondem a um objeto e à sua imagem ao espelho: são direitos ou esquerdos. As luvas e sapatos são um exemplo: não há forma de transformar uma luva da mão direita numa da mão esquerda (se cosermos a entrada da luva de modo que ela não possa ser virada do avesso). Algumas moléculas químicas podem também classificar-se como direitas ou esquerdas, como a molécula de ADN, que tem a forma de uma dupla hélice direita: ela enrola-se, como uma escada em caracol, para a direita. Apesar de o ADN ser direito, não há nenhuma lei física fundamental que afirme que a vida não se pudesse desenvolver usando o ADN esquerdo. A vida tem, isso sim, de utilizar uma das duas formas e neste planeta foi feita a opção da direita¹.

Os neutrinos, se não têm massa e, como os fótons, se movem sempre à velocidade da luz, podem também ser direitos ou esquerdos. Como é que algo tão pequeno e quase indetetável como o neutrino pode ter uma orientação, como uma molécula de ADN ou uma luva? Os neutrinos, como todos os leptões, têm *spin* 1/2 e podemos pensar neles como pequenos piões cujo eixo de rotação aponta na direção do movimento. A rotação pode dar-se no sentido dos ponteiros do relógio ou no sentido inverso, relativamente à direção do movimento, e estas duas possibilidades correspondem respetivamente a neutrinos direitos e esquerdos. Se os neutrinos se deslocam sempre à velocidade da luz, nunca os podemos

ultrapassar e modificar a sua direção de movimento relativo, alterando assim a característica de serem esquerdos ou direitos: um neutrino esquerdo deve permanecer esquerdo para todos os observadores; e o mesmo se passa com a versão direita.

Podemos agora ver a razão pela qual os neutrinos são tão estranhos: não existem neutrinos direitos. As leis fundamentais da física parecem proibir a sua existência; não seríamos capazes de produzi-los mesmo que tentássemos. Seria como se existisse uma lei física que proibisse o fabrico de luvas para a mão direita.

O facto de apenas existirem neutrinos esquerdos manifesta uma violação da conservação da paridade, lei que afirma que, se uma partícula existe, a sua imagem ao espelho (que transforma esquerda em direita e direita em esquerda) também existe. A imagem ao espelho de um neutrino esquerdo é um neutrino direito, que sabemos não existir. Não há forma de produzi-los. Dois físicos sino-americanos, Chen Ning Yang e Tsung Dao Lee, desenvolveram em grande pormenor a ideia da violação da conservação da paridade e propuseram uma experiência para verificar a sua hipótese. Quando Pauli soube que estavam a ser realizadas experiências para testar a hipótese da violação da paridade, comentou: «Não acredito que Deus seja um pobre canhoto.» Mas a experiência de Chieng Shiung Wu e seus colaboradores, realizada na Universidade de Colúmbia, mostrou que Pauli estava errado; Deus é um pobre canhoto. Yang e Lee receberam um Prémio Nobel pelos seus trabalhos.

Os físicos sempre se deixaram fascinar pelos neutrinos, os mais leves de todos os leptões. Recentemente tem-se desenvolvido considerável investigação experimental em torno da questão de os neutrinos possuírem ou não uma massa diferente de zero. Há especulações da parte dos físicos teóricos no sentido de os neutrinos possuírem uma pequena massa; se eles a possuírem de facto, isso terá implicações profundíssimas na cosmologia, estudo do universo como um todo. Mesmo que a massa dos neutrinos fosse uma pequena fração da massa do electrão, eles passariam a constituir a principal fonte de massa do universo. O pequeno e invisível neutrino passaria a ser o componente dominante do universo!

Há neste preciso momento milhares de neutrinos que atravessam a mão do leitor, porque todo o universo está cheio de neutrinos. Apesar do seu enorme número, eles em nada contribuirão para a massa total do universo se não tiverem massa. Mas, se, pelo contrário, possuírem massa, calcula-se que correspondam a cerca de 90% de toda a massa do universo — uma massa invisível, porque ninguém pode na realidade ver esta «radiação de neutrinos». Os outros 10% da massa total do universo, uma pequena parte, constituiriam então a matéria visível sob a forma de estrelas e galáxias. Os neutrinos poderiam, deste modo, fornecer a «massa ausente» do universo, a quantidade de massa necessária para fazer parar a expansão do universo e provocar depois a sua contração. Os neutrinos poderiam ser a «cola» que mantém o universo coeso. A questão da determinação da massa dos neutrinos é muito delicada, mas estão neste

momento em curso experiências bastante sofisticadas para resolver esta importante questão².

Durante muito tempo, os físicos pensaram que o elétron, o múon e os respectivos neutrinos eram os únicos léptons que existiam. Mas em 1977 surgiu uma grande surpresa.

4. O Tau

A descoberta do tau surgiu lenta e placidamente. Em 1976, cientistas que trabalhavam num anel de aceleração e colisão de feixes de elétrons e pósitrons em Stanford notaram efeitos estranhos. O chefe do grupo, Martin Perl, sugeriu, com persistência cuidadosa, que estes efeitos poderiam ser devidos a um novo lépton, apesar de haver outras explicações possíveis. Em 1977-1978, com o aparecimento de provas no mesmo sentido vindas de um laboratório experimental de características semelhantes em Hamburgo, na Alemanha, tornou-se clara a existência de um novo lépton com uma grande massa, cerca de 3500 vezes a massa do elétron. Tal como o elétron e o múon, o tau possui, provavelmente associado, o seu próprio neutrino esquerdo, ainda que os dados experimentais neste sentido sejam quase inexistentes. O tau, devido à sua grande massa, pode decair em muitas outras partículas leves, acompanhadas pelo seu neutrino associado. A única diferença entre o elétron, o múon e o tau parece estar nas suas massas. Se o múon é um elétron gordo, o tau é um múon gordo.

A pergunta de Rabi — «Mas quem encomendou isto?» — ecoa nos nossos ouvidos. Quem precisa de qualquer dos leptões para além do eletrão e do neutrino? Apenas o eletrão é necessário para construir os átomos. No entanto, o muão e o tau são tão fundamentais como o eletrão. A característica notável de todos os leptões é que nunca revelaram possuir estrutura interna. Aparentemente, são partículas pontuais mesmo às mais elevadas energias atingidas. Isto sugere que eles são partículas verdadeiramente elementares, e não compostas — um nível último da matéria, característica que constitui o mistério dos leptões.

Os físicos não conhecem a resposta à pergunta de Rabi, nem por que é que o filme cósmico a três dimensões tem todos estes protagonistas a mais. Os físicos teóricos podem adaptar estes leptões em teorias muito gerais e realizar previsões sobre as suas interações; mas não sabem por que é que eles existem, nem porque têm as massas que têm. A descoberta do tau parece marcar um fim à história dos leptões, pelo menos por agora. Mas muitos físicos estariam prontos a apostar em que existem leptões mais pesados, os quais serão descobertos assim que forem construídas máquinas que atinjam as energias necessárias à sua criação.

TABELA DOS LEPTÕES

Nome	Símbolo	Massa em unidades da massa do electrão	Carga eléctrica em unidades da carga do protão
electrão	e^-	1	- 1
neutrino de electrão	ν_e	menos de 0,00012	0
muão	μ^-	207	- 1
neutrino de muão	ν_μ	menos de 1,1	0
tau	τ^-	3491	- 1
neutrino de tau	ν_τ	menos de 500	0

Vimos que o elenco do filme cósmico a três dimensões engloba os *quarks* e os leptões, duas famílias que parecem ser «níveis últimos» da estrutura da matéria. Os leptões existem sob a forma de partículas isoladas, enquanto os *quarks* estão confinados ao interior dos hádrões. Mas como é que os *quarks* e os leptões interagem entre si? Ainda não nos referimos a isso. As interações entre estes atores do nosso filme cósmico são mediadas por outro conjunto de *quanta*: os *gluões*. Eles constituem o último conjunto de atores do nosso filme tridimensional.

¹ Recentemente descobriu-se uma forma «esquerda» do ADN. (N. do T.)

² O assunto, ainda quando da publicação desta tradução, não está esclarecido, mas trabalhos recentes parecem não confirmar os primeiros resultados afirmativos quanto à massa dos neutrinos. (N. do T.)

CAPÍTULO 19

Gluões

Chamamos a esses *quanta* «gluões» e afirmamos que, além dos *quarks*, devem existir gluões para manter os *quarks* COESOS.

RICHARD FEYNMAN

Os *quarks* e os leptões são os principais atores do filme cósmico a três dimensões e, como atores reais, estas partículas interagem entre si. O conhecimento das propriedades destas interações ocupou os físicos durante grande parte deste século; mas, hoje em dia, elas são bastante bem compreendidas. Utilizando os aceleradores de partículas para sondar o interior da matéria, os físicos descobriram que a complexidade do mundo se desvanece a muito pequenas distâncias e que a interação entre partículas quânticas se torna simples e pode ser classificada em padrões regulares. Obteve-se uma imagem simples da realidade quando se compreendeu que as complicadas interações entre *quarks* e leptões são, na realidade, mediadas por um conjunto de outras partículas quânticas chamadas «gluões». Como o nome sugere¹, os gluões estão na origem da coesão das partículas quânticas; os gluões são a cola que mantém o mundo unido.

Quarks, léptons e glúons, juntamente com a sua organização, são tudo aquilo que existe no universo, são o material último no qual encontra a sua origem toda a complexidade da existência. Eles são a costa mais distante a que os físicos até hoje aportaram na sua viagem ao interior da matéria. Se há outros lugares aonde ir, os físicos ainda não suspeitaram da sua existência. Mas o que são os glúons e como é que os físicos compreenderam o seu papel nas interações quânticas?

Os físicos procuram sempre padrões no mundo natural que de certa forma revelem uma simplicidade subjacente que seja compreensível pela razão humana. São como detetives para quem os padrões são as verdadeiras indicações em relação à natureza da realidade. Mas que padrões existem nas complexas interações entre a matéria? Não há padrões evidentes de interações simples no mundo macroscópico; mas, ao analisar a matéria ao nível microscópico dos *quanta*, isto é, aos níveis atómico e subatómico, os físicos descobriram que existem apenas quatro tipos fundamentais de interações. Em ordem crescente de intensidade, são elas: a interação gravitacional; a interação fraca, responsável pela radioatividade; a interação eletromagnética; e a interação forte, que liga os quarks. Cada uma destas quatro interações tem um tipo de glúão a ela associado, e a «adesividade» do glúão é uma medida da intensidade da interação.

Uma característica notável das interações quânticas dos glúons, descoberta já nesta década, é que a intensidade da sua interação depende da energia das partículas que interagem. Os *quarks* e léptons que interagem às energias relativamente baixas disponíveis

nos laboratórios atuais interagem através das quatro interações distintas acima mencionadas: as interações gravitacional, fraca, eletromagnética e forte. Mas a grande descoberta é que, a energias muito mais elevadas, as intensidades das quatro interações (medidas através das adesividades dos respetivos gluões) se podem tornar iguais, desaparecendo assim as diferenças entre elas. As quatro interações podem, na realidade, ser manifestações aparentemente diferentes de uma única interação universal! Esta possibilidade é a base de uma teoria do campo unificado, que sempre foi o sonho dos físicos.

Na última década, os físicos progrediram muito no antigo sonho de unificar as diferentes interações. Existem atualmente teorias que unificam as interações eletromagnética, fraca e forte numa única interação. Tais teorias de campo unificado são o resultado de muitos anos de esforço e, apesar de os físicos discordarem no que diz respeito a pequenos detalhes, o princípio de unificação está firmemente estabelecido. Analisaremos estes esforços nos próximos capítulos, mas para já vamos descrever o modo como os físicos pensam as quatro interações fundamentais entre os *quanta*.

Um bom ponto de partida para as nossas considerações sobre as interações quânticas é o átomo de hidrogénio, no qual um único eletrão está ligado a um protão através de campos elétricos, o que fornece um bom exemplo da interação eletromagnética. Seguindo um ponto de vista antiquado, o átomo de hidrogénio é formado por duas partículas, o protão e o eletrão, ligadas por um campo elétrico. Uma nova forma de pensar sobre o átomo de hidrogénio, que surgiu com os desenvolvimentos da teoria quântica, é a de que dois

quanta, o próton e o elétron, trocam um terceiro *quantum*, o fóton. Na realidade, não existem partículas e campos, mas apenas *quanta*. Podemos pensar no elétron e no próton como dois jogadores de ténis que trocam uma bola (o fóton) entre si, devolvendo-a de um campo para o outro. Esta troca da bola liga os dois jogadores um ao outro: o fóton age como uma espécie de cola que mantém ligados os dois componentes do átomo de hidrogénio. O fóton é o primeiro exemplo de uma classe de partículas a que os físicos chamam «glúões».

Podemos nesta imagem ver a ideia central da conceção moderna das interações: elas próprias são mediadas por *quanta*. Cada uma das quatro interações fundamentais tem associado o seu próprio tipo de *quanta* a que se chama «glúões». O glúão associado à interação eletromagnética é o fóton; o glúão portador da interação gravitacional é o gravitão. Os glúões fracos são os portadores das interações fracas e os glúões de cor transmitem as forças que ligam os *quarks*. Partículas como *quarks* e léptões podem interagir através da troca desses glúões, tal como dois jogadores de ténis trocam uma bola. E, tal como as bolas de ténis, os glúões podem por vezes ser detetados diretamente como partículas quânticas. Examinemos agora cada uma destas quatro interações em pormenor.

1. A Interação Gravitacional

Os físicos descrevem a interação gravitacional como tendo um «longo alcance», o que significa que ela pode agir ao longo de distâncias macroscópicas. A Lua está ligada à Terra pela interação gravitacional. Como a gravidade tem um longo alcance e se faz

sentir a distâncias macroscópicas, os seus efeitos nas nossas vizinhanças são evidentes. Por esta razão, ela foi historicamente a primeira das quatro interações fundamentais a ser descoberta. No entanto, do ponto de vista das partículas quânticas, ela é de longe a mais fraca das interações fundamentais. A atração gravitacional de um próton sobre um eletrão é mais de um bilião de biliões de biliões de biliões (10^{36}) menos intensa do que a atração entre eles devida à força eletromagnética. Apenas em grandes aglomerados de matéria, como um planeta ou uma estrela, os efeitos gravitacionais de todas as partículas em conjunto desempenham um papel significativo. A intensidade extremamente fraca da gravidade torna-se evidente se pensarmos que o peso dos nossos corpos é devido à interação de toda a massa da Terra com eles. Do ponto de vista das partículas elementares podemos desprezar a gravidade devido à sua extrema irrelevância.

É sempre interessante imaginar como seria o mundo se não existisse uma das interações fundamentais. Gosto de imaginar que, num lugar distante, numa enorme sala de controlo, está um demónio que é o operador e controlador do universo em que vivemos. O demónio pode, puxando alavancas e girando botões, ajustar as constantes físicas fundamentais que determinam o comportamento do nosso universo. Este demónio pode ser considerado malicioso ou brincalhão, mas o seu dever é o de ajustar as constantes físicas fundamentais, de modo a tornar o universo o mais habitável e interessante possível. Mais tarde, o seu trabalho será julgado por um demónio supremo, que, se não ficar satisfeito, condenará o demónio a viver na sua própria criação. Esta última

condição é imposta para gerar alguma simpatia humana pelo trabalho do demónio.

Um dos principais comandos de que o demónio dispõe altera a intensidade das várias interações — ou, por outras palavras, altera a «adesividade» dos gluões. Obviamente, ele irá experimentar este comando. Se desligasse a gravidade, todos nós seríamos atirados para fora da Terra e a Terra e os outros planetas despedaçar-se-iam e os seus pedaços seriam projetados para longe das suas antigas órbitas em torno do Sol. O Sol e as outras estrelas, por sua vez, também se despedaçariam, porque é a gravidade que os mantém coesos. O universo poderia então consistir de pequenos aglomerados de rocha, como os asteroides, ligados pelas forças químicas que mantêm as rochas unidas. O efeito de desligar a gravidade seria dramático a uma escala macroscópica, mas pouca diferença faria no mundo microscópico dos quanta. Diminuir ou desligar a gravidade provocaria um universo inabitável. Mas suponhamos que, em lugar disso, o nosso amigo demónio decide aumentar a intensidade da gravidade relativamente aos seus valores atuais. Nessa altura, as estrelas e os planetas cederiam à pressão do seu próprio peso e sofreriam um colapso interno, tornando-se buracos negros — uma opção também pouco atraente. O nosso demónio, se for sensato, conservará a intensidade da interação gravitacional aos níveis atuais.

De acordo com as ideias da teoria quântica dos campos, que consubstanciam a imagem da realidade do físico teórico, todos os campos, como o da gravidade, têm uma partícula quântica associada. Para o campo gravitacional, esses *quanta* são os

gravitões; são eles os glúões que mantêm coesos os grandes aglomerados de massa como as estrelas. Em lugar de considerar a gravidade como um tipo de campo de forças que se prolonga para lá da Lua e do Sol, os físicos modernos creem que tal campo está «quantizado» em inumeráveis gravitões. Na realidade, a Terra e a Lua estão continuamente a trocar gravitões, e são essas trocas que produzem aquilo que descrevemos como um campo gravitacional entre esses dois corpos. Isto pode parecer estranho, mas é uma forma completamente correta de explicar os efeitos da gravidade e dos outros campos.

Ainda que muitos físicos aceitem a ideia de que o campo gravitacional está realmente quantizado, é muito pouco provável que o gravitão, o quantum de gravidade, seja alguma vez detetado diretamente. Para detetar as partículas quânticas como o gravitão, e não apenas os seus campos associados, é necessário fazer observações ao nível das interações quânticas, e as interações dos gravitões são demasiado fracas para poderem alguma vez ser observadas. Falando rigorosamente, se um gravitão atingisse um próton, este teria de recuar devido ao choque; mas este recuo seria tão pequeno que nunca seria detetável. A gravidade é a mais fraca de todas as interações.

2. A Interação Eletromagnética

Tal como a gravidade, a força eletromagnética (sentida através de campos elétricos e magnéticos) tem também um longo alcance. Mas esta é praticamente a sua única semelhança com a gravidade. A interação eletromagnética entre partículas carregadas é biliões de

bilhões de vezes mais intensa do que a gravidade. Ao contrário desta, que tem como origem massas que são sempre quantidades positivas, a fonte dos campos elétricos e magnéticos são as cargas elétricas em movimento; e estas podem ser positivas ou negativas. Portanto, a força eletromagnética pode ser atrativa (entre partículas com cargas de sinais contrários) ou repulsiva (entre partículas com cargas do mesmo sinal), ao contrário da gravidade, que é sempre atrativa (a gravidade repulsiva, ou antigravidade, não parece ser permitida pela nossa atual teoria da gravidade). Estas são apenas algumas das diferenças entre as interações eletromagnética e gravitacional.

Os efeitos mais interessantes das propriedades elétricas da matéria dão-se ao nível dos átomos. A razão para isto é que as grandes quantidades de matéria não têm carga elétrica global e, portanto, não realizam interações eletromagnéticas. No entanto, as partículas atômicas individuais, como o eletrão, possuem cargas elétricas; no caso do eletrão, é esta carga que origina os campos elétricos que o mantêm ligado ao núcleo e que são responsáveis, em grande parte, pelas interações químicas entre átomos. Quase todas as propriedades da matéria vulgar podem ser compreendidas em termos das propriedades quânticas e eletromagnéticas dos átomos. Esta compreensão inclui a física atômica, a química, a física da matéria condensada, a física dos plasmas e, de uma forma geral, quase toda a física, à exceção da física nuclear e da cosmologia, que exigem uma compreensão das forças forte, fraca e gravitacional. Devido à riqueza das suas implicações experimentais, a força eletromagnética tornou-se a mais bem conhecida de todas as interações fundamentais.

O que aconteceria se o nosso amigo demônio desligasse a interação eletromagnética rodando um botão que reduzisse todas as cargas elétricas a zero? O efeito mais dramático seria que os átomos deixariam de existir e deixaria de haver matéria tal como a vemos à nossa volta. Os núcleos atômicos poderiam agora ser muito grandes porque não existiria repulsão elétrica entre prótons de cargas iguais, fator que previamente limitava as dimensões dos núcleos atômicos. Haveria estrelas de prótons, tal como há estrelas de nêutrons: núcleos gigantes. Todas as interações entre a matéria, exceto a gravitacional, teriam um alcance extremamente curto. A vida tal como a conhecemos, isto é, baseada na química, não poderia existir, o que é uma boa razão para o demônio não desligar a interação eletromagnética.

O glúon associado à interação eletromagnética é o **fotão**, a partícula de luz postulada em 1905 por Einstein no seu artigo sobre o efeito fotoelétrico. Quando ele postulou o fóton, poucos físicos acreditaram na sua existência.

Mas em 1923 foram realizadas experiências em que eram detectados elétrons que eram desviados ao serem atingidos por fótons; estas experiências convenceram a maioria dos físicos da realidade do fóton. O fóton foi o primeiro — e até aqui o único² — glúon a ser diretamente confirmado pela experiência.

As mais precisas experiências alguma vez realizadas são medições das interações eletromagnéticas entre fótons e elétrons. A teoria moderna que com tanto êxito explica essas experiências é chamada «eletrodinâmica quântica» e foi inventada, na década de

1920, por Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan e Paul Dirac. O fóton foi descrito pelo campo eletromagnético quantizado e o elétron pelo campo eletrónico quantizado. No final da década de 1940, depois de muitas lutas com a matemática, a versão final da eletrodinâmica quântica foi elaborada por Richard Feynman, Julian Schwinger e Sin-itiro Tomonaga, facto pelo qual lhes foi atribuído o Prémio Nobel.

A eletrodinâmica quântica foi o primeiro exemplo prático daquilo a que os físicos chamam «teoria relativista de campo quantizado». Era uma «teoria de campo» porque os objetos primários da sua formulação eram campos, como os campos eléctrico ou magnético; estes estavam «quantizados» porque o seu estudo era feito com base nas ideias da mecânica quântica; e era «relativista» porque integrava o princípio da relatividade restrita de Einstein. A eletrodinâmica quântica integrava o fóton enquanto glúon do campo eletromagnético. Foi uma teoria com enorme sucesso, de tal modo que se tornou o paradigma para futuros esforços de conceção de descrições matemáticas do mundo dos *quanta*. Não há dúvida de que foi o êxito do conceito de fóton e de eletrodinâmica quântica que encorajou os físicos a adotar a perspetiva de que todas as interações são mediadas por glúões. Este ponto de vista foi de novo coroado de êxito quando os físicos se dedicaram à análise da interação fraca.

3. A Interação Fraca

A interação fraca é responsável pela desintegração de muitas das partículas quânticas descobertas nos laboratórios; ela está, em

particular, na origem da radioatividade — consequência da desintegração dos núcleos atômicos. Apesar de existir um enorme número de partículas quânticas, apenas algumas dentre elas são estáveis, como o elétron, o fóton, o próton³ e o neutrino; quando isoladas, não se desintegram. Outras partículas, como múons, nêutrons e outros hádrons, desintegram-se muito rapidamente nas partículas estáveis. Estes processos de decaimento das partículas fornecem indicações importantes quanto às suas propriedades. Os físicos identificaram uma interação fraca como sendo responsável por certos decaimentos. Ao contrário das interações eletromagnética e gravitacional, que têm efeitos de longo alcance que podemos observar no mundo que nos rodeia, a interação fraca tem um alcance extremamente curto: os seus efeitos podem apenas ser estudados através de análises cuidadosas do mundo quântico. Por esta razão, foi necessário muito tempo para os físicos compreenderem a misteriosa interação fraca.

Historicamente, o primeiro encontro da humanidade com a força fraca foi o estranho brilho dos sais de rádio observado no final do século passado. Ao investigar este fenômeno, os físicos chegaram à conclusão de que o brilho não podia ter uma origem química: a libertação de energia era demasiado grande para isso. A origem do brilho foi depois estabelecida como sendo devida à emissão de partículas pelo núcleo atômico. Os físicos descobriram que os núcleos de alguns átomos eram instáveis e, ao desintegrar-se, emitiam as partículas que eram detetadas como radioatividade. O estudo das interações fracas levou os físicos ao interior do núcleo e, mais tarde, ao mundo subnuclear dos hádrons.

Durante décadas houve grande confusão quanto à descrição experimental e teórica das interações fracas, que provocavam o decaimento dos hádrons. Mas hoje, depois de muito esforço, luta e, por fim, triunfo, existe uma teoria que explica as propriedades experimentalmente observadas da interação fraca. A pedra angular da teoria é a suposição de que, tal como as interações gravitacional e eletromagnética, a interação fraca é mediada por glúons — «glúons fracos». Os glúons fracos, ao contrário do gravitão e do fóton, têm uma massa extremamente elevada; tão elevada que não existem atualmente aceleradores capazes de os produzir. Mas estão neste momento em construção aceleradores maiores que se supõe terem a possibilidade de atingir a energia necessária para a criação destes glúons; assim, muitos físicos pensam que eles sejam descobertos nos anos 80, abrindo assim um novo método para estudar diretamente a interação fraca. Se os glúons fracos forem descobertos, ter-se-á dado um grande passo na compreensão da interação fraca⁴.

Como é que os glúons fracos podem provocar a desintegração de outras partículas, como os hádrons? Os outros glúons que descrevemos, o gravitão e o fóton, não o fazem; por que serão os glúons fracos tão especiais? Para compreender como é que um hádrão se pode desintegrar, temos de recordar como é que ele é constituído: por dois ou três (consoante for mesão ou barião) dos *quarks up, down, strange, charm, bottom e top*. Aquilo que os glúons fracos fazem é alterar o sabor dos *quarks*, e é esta a forma como podem fazer um hádrão desintegrar-se. Por exemplo, um *quark strange* de um hádrão pode ser transformado num *quark up* ou *down* através da interação com um glúão fraco. Isto significa que

hadrões que contenham um *quark strange* se podem tornar hadrões que contenham *quarks up* ou *down*, um exemplo de decaimento de hadrões estranhos. Da mesma forma, *quarks charm* podem transformar-se em *quarks up* ou *down* através da interação fraca. É este, pois, o papel dos glúons fracos: proporcionar vias de decaimento dos hadrões que contenham *quarks strange* ou *charm* de tal forma que apenas subsistam os hadrões mais comuns; e, em última análise, o próton seria o único hádron estável. Os glúons fracos interagem também com os léptons, proporcionando-lhes também vias de decaimento.

Podemos imaginar o que aconteceria se o nosso amigo demónio decidisse desligar a interação fraca. A radioatividade deixaria de existir; mas, como não é muito perceptível, não haveria grandes alterações imediatas no mundo. Só depois de alguns milhões de anos o Sol deixaria de brilhar, porque a interação fraca é por ele utilizada na produção de energia⁵. A grande alteração seria que, nessas circunstâncias, muitos *quanta* exóticos como hadrões contendo *quarks strange* e *charm* seriam completamente estáveis. Já que é a interação fraca que permite o decaimento dessas partículas, ela age como um tubo de escoamento que faz desaparecer estas formas de matéria mal elas são criadas. Se taparmos esse tubo de escoamento desligando a interação fraca, o nosso mundo ficará cheio dessas partículas exóticas, tal como está cheio de prótons (que não contêm *quarks strange* ou *charm*). Novos tipos de matéria (uma nova química baseada nestas partículas exóticas estáveis) seriam então possíveis. O mundo poderia parecer muito estranho comparado com aquilo que é hoje; seria também muito mais complexo. Poderiam ser possíveis formas de vida

baseadas numa química diferente. Provavelmente, o demónio poderia decidir desligar a interação fraca, para ver o que sucederia.

4. A Interação Forte

A mais forte interação da nossa pequena lista de quatro é a interação que assegura a coesão dos *quarks* no interior dos hádrões. Os hádrões são feitos de *quarks*; mas o que é que os mantém unidos? Por que é que eles não se separam simplesmente quando os hádrões colidem? A resposta que os físicos teóricos deram a esta pergunta é que os *quarks* estão ligados por um novo conjunto de glúões tão superadesivos que os *quarks* nunca podem ser observados isolados. A necessidade de introduzir esses novos glúões tornou-se evidente nas experiências de colisões com feixes de elétrons realizadas em Stanford, as quais revelaram a estrutura interna do próton. Como observou Richard Feynman:

[...] se somarmos todos os movimentos dos *quarks* e dos *antiquarks* que observamos nas experiências de colisão com elétrons e com neutrinos, não obtemos o movimento total do próton, mas sim, e apenas, cerca de metade. Isto quer dizer que há outras partes no interior do próton que são eletricamente neutras e que não interagem com neutrinos. Sim, mesmo no nosso modelo de três *quarks* teríamos de assegurar a coesão dos *quarks* de alguma forma, para que eles pudessem interagir e transferir movimento de uns para os outros. Isto pode perfeitamente ocorrer através de um campo de interação (análogo ao campo elétrico que assegura a coesão dos átomos), que teria a possibilidade de transferir movimento e disporia, portanto, de *quanta* (análogos aos fótons). Chamamos a esses *quanta* «glúões» e afirmamos que, além dos *quarks*, devem existir glúões para manter os *quarks* coesos. Estes glúões contribuem para a outra metade do movimento do próton.

Era claro que, mais uma vez, se fazia apelo à ideia de que as interações eram mediadas por glúons. Os físicos começaram a tentar compreender estes glúons que ligavam os *quarks*, e em breve viria a nascer uma nova teoria: a cromodinâmica quântica. Esta era uma teoria relativista de campo quantizado que dava uma descrição dos glúons fortes, do mesmo modo que a eletrodinâmica quântica dava uma descrição do fóton.

A ideia principal da cromodinâmica quântica era que cada um dos *quarks* que anteriormente discutimos (os *quarks up, down, strange, charm, bottom e top*) se pode apresentar em três «cores» distintas. É claro que os *quarks* não têm cor, da mesma forma que não têm sabor! Isto é apenas um modo de falar que nos auxilia a formar uma imagem mental. A «cor» dos *quarks* refere-se a um novo conjunto de cargas (ou, se preferirmos, etiquetas) que os *quarks* possuem. Os novos glúons fortes ligam-se, ou acoplam-se, às cargas de cor da mesma forma que um fóton se acopla à carga elétrica. De acordo com a cromodinâmica quântica, existem oito «glúons coloridos» que fornecem as forças necessárias para assegurar a coesão dos *quarks*.

Estas forças, mediadas pelos glúons coloridos, são tão fortes que todos os *quarks* que possuem uma carga de cor (de forma que os glúons coloridos com eles interajam) estão permanentemente unidos. Consequentemente, como os *quarks* possuem carga de cor, estão permanentemente ligados uns aos outros pelos glúons coloridos. Os próprios glúons coloridos, como possuem carga de cor, também interagem consigo próprios, de tal modo que nunca se «descolam». No entanto, podem existir combinações de *quarks* e

gluões coloridos de tal forma que a soma de todas as cargas de cor seja zero, exatamente da mesma forma que a carga elétrica positiva do núcleo atômico cancela a carga negativa devida aos elétrons que rodeiam o núcleo, fazendo que o átomo seja eletricamente neutro. Tais combinações de *quarks* coloridos «neutras em relação à cor» correspondem exatamente aos hádrons observados. Este conjunto de ideias, adotado pela teoria cromodinâmica, tem um enorme apoio experimental.

Suponhamos que o nosso demónio desliga as forças de cor. Isto implicaria que os gluões se separariam e que os *quarks* seriam libertados. Não existiriam hádrons, prótons, neutrões, píons — todo o jardim zoológico hadrónico desapareceria e apenas restariam os *quarks* isolados. Não existiriam átomos, porque não haveria prótons e neutrões para constituir o núcleo. Talvez os *quarks* pudessem formar outro tipo de matéria; mas o mundo seria muito diferente daquilo que é hoje. Um demónio sensato não faria muitas experiências com as forças que ligam os *quarks*.

Completámos assim a nossa análise das quatro interações fundamentais. À primeira vista, as forças forte, eletromagnética, fraca e gravitacional não têm nada a ver umas com as outras. Mas, à medida que os físicos avançaram na exploração da matéria, a distinção entre as interações tornou-se superficial. É esta a grande mensagem da física teórica da última década.

TABELA DOS GLUÕES

Nome e símbolo	Acopla-se a	Papel nas interações quânticas
gravitão	massa	gravidade; cosmologia; liga os planetas ao sol e as estrelas em galáxias
fotão γ	carga eléctrica	ondas electromagnéticas; liga os electrões ao núcleo
gluões fracos W^+ , W^- , Z^0	cargas fraca e de sabor	decaimentos radioactivos de hádrões e leptões
gluões de cor	carga de cor	força forte; confina os <i>quarks</i> permanentemente no interior dos hádrões

Cada interação é mediada por *quanta*, os gluões. O gluão da gravidade é o **gravitão**, o do eletromagnetismo o **fotão**, os da interação fraca os **gluões fracos** e os da interação forte os **gluões coloridos**. Surpreendentemente, cada um destes gluões é descrito matematicamente por teorias relativistas de campos quantizados, todas semelhantes entre si. Há dez anos, quem sugerisse que a teoria das interações fortes podia assemelhar-se à da interação eletromagnética teria sido motivo de riso. Hoje sabemos que a cromodinâmica quântica e a eletrodinâmica quântica não são assim tão diferentes.

Crê-se hoje que as quatro interações fundamentais se unificam numa só a energias ultraelevadas. A razão pela qual nos apercebemos dessas interações como distintas é que os processos

físicos que ocorrem no mundo familiar de todos os dias se dão a baixas energias, e, nessa região, as intensidades das interações são de facto muito diferentes. A simetria e a simplicidade da física revelam-se apenas a energias ultraelevadas. As teorias de campo unificado (e foram construídas muitas nos últimos anos) incorporam estas características.

De acordo com estas teorias unificadas, todas as interações que vemos no mundo são um resíduo assimétrico daquilo que uma vez foi um mundo perfeitamente simétrico. Este mundo simétrico revela-se apenas a energias extremamente elevadas, tão elevadas que nunca poderão ser atingidas pelos seres humanos. A única altura em que tais energias existiram foi durante os primeiros nanossegundos⁶ após o *big-bang* que esteve na origem do universo.

Se recuarmos até à origem dos tempos, até aos primeiros momentos da criação, vemos que a energia da bola de fogo primordial era tão elevada que as quatro interações fundamentais estavam unificadas numa só interação altamente simétrica. À medida que esta bola de fogo de *quarks*, glúões coloridos, eletrões e fotões se expandia, o universo ia arrefecendo e a simetria perfeita começou a quebrar-se. Em primeiro lugar, a gravidade começou a distinguir-se das outras interações e depois, progressivamente, as interações forte, fraca e eletromagnética tornaram-se independentes à medida que o arrefecimento global do universo ia manifestando uma quebra da simetria inicial. *Quanta* exóticos, como partículas com *charm*, foram progressivamente decaindo, e em breve apenas sobravam protões, eletrões, neutrões, fotões e neutrinos. Após um arrefecimento ainda maior puderam formar-se

átomos e a matéria pôde condensar-se sob a forma de estrelas; formaram-se planetas, sistemas solares e galáxias. À medida que as temperaturas à superfície de alguns planetas iam baixando, começaram a formar-se moléculas complexas — os blocos de construção da matéria viva. Na própria evolução da vida assistimos a este mesmo processo de quebra de simetria, à medida que a complexidade dos organismos foi aumentando. Também as sociedades humanas parecem tornar-se mais complexas à medida que se desenvolvem. O universo, desde o seu início até ao presente, pode ser encarado como uma hierarquia de simetrias sucessivamente quebradas — a transição de uma simetria simples e perfeita no início dos tempos até aos padrões complexos de simetrias quebradas que vemos hoje.

A essas imensas energias, no início dos tempos, a vida não podia existir. Ainda que as interações estivessem unificadas e fossem perfeitamente simétricas, era um mundo estéril. O universo teve de arrefecer e as simetrias perfeitas tiveram de quebrar-se antes que as complexas interações que estão na origem da vida pudessem sequer existir. O nosso mundo manifesta uma simetria quebrada ou imperfeita. Mas, a partir dessa imperfeição, surgiu a possibilidade da vida.

¹ Recorde-se que, em inglês, *glue* significa «cola» e que o termo «gluão» tem origem na língua inglesa, designando justamente as partículas que, por assim dizer, «colam» as partículas quânticas umas às outras. (N. do T.)

² Esta afirmação não é correta: conforme foi referido na nota 29, foram detetados em 1983, nos laboratórios do CERN, os chamados «bosões intermediários» W^+ , W^- e Z^0 , no texto referidos como «gluões fracos». Assim, também os gluões fracos foram hoje diretamente observados. (N. do T.)

³ Cf. nota 33.

⁴ Cf. notas 25 e 29.

⁵ Igualmente a energia térmica no interior da Terra ficaria reduzida e haveria perturbações muito importantes em todos os fenómenos que dependem do transporte do calor no nosso planeta. (*N. do T.*)

⁶ 1 nanossegundo = 10^{-9} segundo. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 20

Campos, Partículas e a Realidade

Na sua essência, sobreviveu até ao dia presente e forma o dogma central da teoria do campo quantizado, a perspectiva segundo a qual a realidade essencial é um conjunto de campos sujeitos às regras da relatividade restrita e da mecânica quântica; tudo o resto é deduzido a partir da dinâmica quântica destes campos.

STEVEN WEINBERG

Nos últimos capítulos apresentámos o elenco do filme cósmico a três dimensões: *quarks*, leptões e gluões. Estes objetos quânticos são o nível último do mundo material — tudo aquilo que conhecemos pode ser feito a partir deles. Voltamo-nos agora para a análise do guião para o filme cósmico tridimensional, para as leis a que estes *quanta* obedecem. Como é que os físicos descrevem as partículas subatómicas como eletrões, prótons e fótons? O que se passa a essas pequenas distâncias?

A descoberta dos níveis da matéria — moléculas, átomos, núcleos, hádrons e *quarks* — e das interações dos *quanta* levantaram questões fundamentais sobre o próprio conceito de matéria, questões abordadas pelos físicos teóricos. De que é que as partículas como os eletrões e os fótons são feitos? No princípio deste século, ainda que os físicos soubessem da existência dos fótons e

dos elétrons, não podiam responder a estas perguntas. Hoje podem. Foi inventada uma imagem coerente, unificada e experimentalmente correta para pensar sobre o mundo dos *quanta*. Como é que essas novas ideias se desenvolveram?

As três primeiras décadas assistiram à criação de duas grandes teorias físicas: a teoria da relatividade restrita de Einstein e a moderna teoria quântica. Estas teorias, tomadas em conjunto, fornecem o quadro concetual de quase toda a física e são as bases das nossas ideias sobre a realidade material. Confrontados com estas duas teorias no final dos anos 20, os físicos perguntaram-se: seria possível fundir a relatividade e a teoria quântica numa única teoria que englobasse ambos os conjuntos de princípios?

Conseguir esta fusão foi muito mais difícil do que os físicos teóricos tinham a princípio imaginado. Depois de anos de luta intelectual, o resultado da fusão foi a invenção da teoria quântica relativista de campos. Um exemplo de uma tal teoria existia no final dos anos 40; era a chamada «eletrodinâmica quântica», que modificou radicalmente a forma como os físicos pensavam sobre a matéria.

A teoria quântica relativista de campos implicava que, para compreender as partículas atómicas, era necessário ultrapassar a ideia da matéria como uma «coisa palpável» que pode ser conhecida através dos nossos sentidos e passar à descrição das partículas em termos das suas transformações quando sujeitas a várias interações. É a forma como os objetos reagem a uma ação que nos diz o que eles são.

Não podemos ver as partículas subatômicas. Suponhamos, por um momento, que não podemos ver bolas de ténis, mas podemos observar um jogo de ténis jogado com bolas invisíveis. Observando os serviços, as jogadas e os movimentos dos jogadores seríamos capazes de calcular a massa e as dimensões do objeto que eles trocam. Poderíamos, assim, tirar muitas conclusões sobre a bola, apesar de não a podermos ver. Observações cuidadosas levar-nos-iam à conclusão de que a bola podia girar sobre si própria. Poderíamos estar certos, pela maneira como os jogadores se movem e como atingem a bola, que não se trata nem de uma bola de golfe nem de futebol. É isto o que se passa com as partículas subatômicas: também não as podemos ver, mas, pela análise da forma como os instrumentos reagem a elas, podemos estabelecer as suas propriedades e as leis que regem o seu movimento. As partículas subatômicas não obedecem às mesmas leis do movimento das bolas de ténis, que são as leis da física clássica de Newton. Elas obedecem às estranhas leis do movimento dadas pela teoria quântica e, na expressão de Richard Feynman, «são todas igualmente loucas».

A teoria quântica descreve a interação das partículas subatômicas por meio do conceito de campo. A princípio pode parecer que uma partícula não tem nada a ver com um campo (como o campo magnético, por exemplo), mas, à medida que descrevemos o conceito de campo, torna-se claro que partícula e campo são manifestações complementares da mesma entidade.

Exemplos correntes de campos são os campos eletromagnético e gravitacional, que têm longo alcance e podem assim fazer-se

sentir a distâncias muito grandes. Um campo é invisível, mas os seus efeitos podem ser detetados. Podemos imaginar a massa da Terra como uma fonte para o campo gravitacional que impregna todo o espaço e que atrai os corpos materiais para a Terra. Do mesmo modo, os campos magnéticos da Terra ou de um íman podem ser visualizados como campos de forças que impregnam todo o espaço. O efeito de um campo magnético pode ser verificado com uma bússola, um facto que fascinava Einstein quando este tinha 4 anos.

Na teoria newtoniana da gravidade não era necessária a existência real do campo gravitacional; mas, mais do que isso, ele não tinha qualquer realidade material. Era simplesmente uma ficção matemática útil para descrever o efeito da gravidade sobre as partículas de matéria. Podia descrever-se a gravidade sem ele.

A concepção de que os campos têm uma existência física começou a ser aceite apenas no século XIX. Michael Faraday, o físico inglês que realizou inúmeras experiências sobre eletricidade e magnetismo, sublinhou especialmente a natureza física dos campos elétrico e magnéticos. As partículas eletricamente carregadas eram por ele visualizadas como pontos nos quais os campos se tornavam infinitamente grandes; os campos, e não as partículas, eram por ele considerados como os objetos físicos essenciais. A intuição de Faraday sobre a natureza física dos campos foi consubstanciada na teoria eletromagnética de James Clerk Maxwell, na qual a luz é uma onda de campos elétricos e magnéticos oscilatórios que se propaga no espaço. Os campos elétrico e magnético não eram, na teoria de

Maxwell, meras ficções; eles podiam transportar energia e movimento. Os campos tinham uma realidade física.

O facto de a luz ser uma forma de energia é para nós muito claro: quando estamos ao sol, sentimos calor; esse calor foi energia emitida pelo Sol e transmitida até nós sob a forma de luz, ou de um campo eletromagnético. Mas a luz transporta também movimento e exerce assim uma «pressão de radiação», uma pressão pequena, mas observável. Poderíamos içar grandes velas em naves espaciais no espaço exterior de forma a captar o «vento solar» e navegar assim por entre os planetas. Uma tal regata poderia decorrer no próximo século.

Apesar dos progressos da física do século XIX, houve dois dualismos que tiveram de ser ultrapassados para que se formasse a conceção moderna de matéria. O primeiro era o dualismo massa-energia, que eram consideradas grandezas físicas distintas. Este dualismo foi ultrapassado com a teoria da relatividade de Einstein, que mostrou que massa e energia eram interconvertíveis; a massa era apenas uma forma concentrada de energia. O segundo dualismo era o que opunha campo e partícula, frequentemente referido como dualidade onda-partícula. Este dualismo foi ultrapassado com a moderna teoria quântica, na qual partículas e campos eram vistos não já como opostos, mas sim como complementares.

Antes do advento da teoria quântica, os físicos consideravam as partículas e os campos como entidades diferentes. Por exemplo, o protão e o eletrão que constituem o átomo de hidrogénio eram considerados duas partículas ligadas pelo campo elétrico, que

provocava a atração mútua. As partículas eram consideradas imutáveis e eternas. Os campos emanavam das partículas e eram responsáveis pelas forças entre elas. Ainda que esta imagem de partículas e campos como entidades físicas distintas parecesse na altura adequada, havia o incômodo mistério do fóton de Einstein: a luz como uma partícula. Como poderia a luz ser simultaneamente uma onda eletromagnética, conforme era exigido pela teoria de Maxwell, e uma partícula, conforme era exigido pela explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico? Um grande passo para a resolução deste problema foi a sugestão de, de Broglie de que as partículas como o elétron tinham a elas associada uma onda. As partículas podiam comportar-se como campos de ondas e os campos de ondas como partículas. Afinal o que se passava?

O dualismo de partículas e campos foi ultrapassado no final dos anos 20. Com o desenvolvimento da teoria quântica, os campos adquiriram um novo significado. Nas palavras de Steven Weinberg:

Em 1926, Born, Heisenberg e Jordan dedicaram a sua atenção ao campo eletromagnético no espaço vazio e [...] conseguiram mostrar que a energia de cada modo de oscilação de um campo eletromagnético está quantizada [...] Desta forma, a aplicação da mecânica quântica ao campo eletromagnético tinha finalmente colocado o conceito de fóton introduzido por Einstein numa base matemática sólida [...] No entanto, ainda se concebia o mundo como sendo composto de dois ingredientes muito diferentes: partículas e campos; ambos eram descritos pela mecânica quântica, mas de formas muito diferentes. As partículas materiais, como os elétrons e os prótons, eram concebidas como eternas [...] Por outro lado, supunha-se que os fótons eram uma mera manifestação de uma entidade subjacente, o campo eletromagnético, e podiam ser livremente criados ou destruídos. Não tardou muito a ser encontrada uma via de escapar a este dualismo desagradável em direção a uma

visão verdadeiramente unificada da natureza. Os passos essenciais foram dados num artigo de 1928 da autoria de Jordan e Eugene Wigner e, mais tarde, em dois grandes artigos publicados em 1929 e 1930 da autoria de Heisenberg e Pauli. Eles mostraram que as partículas materiais podiam ser encaradas como *quanta* de vários campos, da mesma forma que o fóton é o quantum do campo eletromagnético. Supunha-se existir um campo para cada tipo de partícula elementar. Assim, os habitantes do universo passaram a ser concebidos como um conjunto de campos — um campo eletrónico, um campo protónico, um campo eletromagnético — e as partículas foram reduzidas a meros epifenómenos. Na sua essência, esta perspetiva sobreviveu até aos dias de hoje e forma o dogma central da teoria do campo quantizado: a realidade essencial é um conjunto de campos sujeito às leis da relatividade restrita e da mecânica quântica; tudo o resto é deduzido como consequência da dinâmica quântica destes campos.

Estas ideias marcam assim o início da teoria relativista do campo quantizado, a fusão da relatividade e da teoria quântica. O micromundo, e na realidade todo o mundo, podia ser considerado uma arena de campos em interação. Anteriormente, os físicos supunham que o mundo estava dividido em matéria e energia. A matéria residia nas partículas e a energia nos campos que interagiam com as partículas e as faziam mover-se. Os dualismos de energia e matéria, de partícula e campo, eram desta forma suprimidos e tudo podia ser visto na interação dos campos quânticos. Apenas existia, enquanto realidade material, a organização e a transformação dos *quanta* dos campos. Isto marcou o grande triunfo do conceito de campo nas tentativas humanas para compreender a realidade.

De acordo com a teoria quântica, a intensidade do campo num ponto do espaço é interpretada como a probabilidade estatística de

aí encontrar os seus *quanta* associados, as partículas. O significado da «quantização de um campo» é a sua análise, como uma onda eletromagnética, em termos dos seus *quanta* associados — no caso da onda eletromagnética, fótons. A intensidade do campo eletromagnético num ponto do espaço dá a probabilidade de aí encontrarmos um fóton.

A conceção de que a realidade é um conjunto de campos que nos fornecem as probabilidades de encontrar os respetivos *quanta* é a mais importante consequência da teoria relativista do campo quantizado. É o conceito central para a imagem da realidade. Não só a ideia de matéria se integrou no conceito de campo, como este especificava a probabilidade de encontrar os *quanta*.

O mundo dos campos quânticos em interação não é fácil de visualizar. Podemos descrever esse mundo em termos matemáticos e tornar os nossos conceitos precisos, mas é como tentar visualizar objetos num espaço com infinitas dimensões: a imaginação visual não consegue produzir uma imagem adequada. Mas podemos sentir um pouco o que é a teoria do campo quantizado a partir da seguinte analogia: o colchão de molas tridimensional infinito.

Consideremos uma mola de aço vulgar; imaginemos que ela flutua no espaço. Prendamos a essas molas outras iguais e a essas outras ainda, de modo a construir uma rede de molas de aço que impregne todo o espaço tridimensional. Isto é o colchão de molas tridimensional. Todo o reticulado de molas representa, na nossa analogia, um campo quântico. Suponhamos que é o campo eletrónico. Se uma das molas for comprimida e solta, vibrará; esta

vibração corresponde ao *quantum*, um eletrão associado ao campo. Podíamos igualmente ter comprimido duas molas afastadas; as vibrações resultantes corresponderiam a dois *quanta*, dois eletrões nesses pontos.

Podemos imaginar um segundo colchão, feito de molas diferentes, talvez um pouco mais pesadas, que é sobreposto no primeiro reticulado; este colchão representa um campo de *quarks*. As suas vibrações correspondem aos *quarks*. Assim, para cada campo haverá um colchão de molas que impregna todo o espaço e as vibrações de uma mola específica correspondem à presença de uma partícula nesse ponto.

Até agora, estes reticulados de molas sobrepostos, que representam todos os campos da natureza, não têm interações entre si — não se tocam. Mas imaginemos que os vários reticulados de molas que representam os *quarks* e os leptões podem ser ligados por outro conjunto de molas, que representam os gluões. O reticulado de eletrões está ligado ao reticulado de fotões, este ao reticulado de *quarks*, e assim por diante. Este espaço de reticulados de molas representa uma teoria quântica de campos em interação.

Se uma das molas do reticulado de eletrões apresentar uma vibração correspondente a um eletrão nalgum ponto, esta vibração pode ser transferida para o reticulado de fotões. Este começa a vibrar, assinalando a presença de fotões nas vizinhanças do eletrão. O fotão poderia ainda ligar-se a um *quark*, e assim por diante. Todos os campos — reticulados de diferentes tipos de molas, uma para

cada partícula — podem interagir entre si através de um terceiro tipo de campo.

Para explorar ao máximo esta analogia, imaginemos que as molas são invisíveis. Tudo o que resta do reticulado de molas é o conjunto de vibrações. Na realidade, as molas deveriam ser consideradas tão pequenas que, numa região tão pequena quanto se queira, exista sempre um número infinito de molas. Este supercolchão tridimensional de molas infinitesimais está bastante próximo daquilo que os físicos teóricos descrevem como um campo quântico. Tudo o que resta do campo são as vibrações potenciais em cada ponto — os *quanta* que se manifestam como várias partículas. Estas partículas podem mover-se no espaço e interagir entre si. A realidade subjacente é o conjunto de campos, que se manifesta sob a forma de partículas. O universo é um grande campo de batalha para os *quanta*, de acordo com a teoria relativista do campo quantizado.

Com este cenário podemos agora enunciar os dogmas centrais da teoria relativista do campo quantizado:

1. A realidade material essencial é um conjunto de campos;
2. Os campos obedecem aos princípios da relatividade restrita e da teoria quântica;

3. A intensidade de um campo num ponto dá a probabilidade de aí se encontrarem os seus *quanta* associados — as partículas fundamentais observadas pelos experimentalistas.
4. Os campos interagem e provocam as interações dos seus *quanta* associados, as quais são mediadas por *quanta*;
5. Não existe nada mais.

Estes princípios constituem o quadro concetual da física quântica relativista moderna; eles proporcionam-nos a imagem básica da realidade. É dentro deste quadro que os físicos devem tentar construir toda a física. Há várias perguntas fundamentais que estes dogmas suscitam.

Em primeiro lugar, quais são os campos fundamentais? Como cada campo tem uma partícula quântica associada, estamos a perguntar mais uma vez quais são as partículas elementares. Esta pergunta tem sido respondida pelos físicos experimentais que, na sua exploração da matéria, encontraram os *quarks*, os leptões e os glúões.

Neste momento, estes *quanta* parecem representar os níveis mais elementares da matéria e, portanto, os seus campos são os mais fundamentais.

A segunda pergunta que assedia muitos físicos teóricos é a seguinte: uma vez identificados os campos fundamentais, como é possível construir um modelo matemático — uma teoria relativista do campo quantizado — para descrever as suas interações? Exemplos dessas teorias de campo são a eletrodinâmica quântica e a cromodinâmica quântica.

As pessoas interessam-se sempre pelo problema de saber se os físicos inventam estas teorias ou as descobrem da forma que Colombo descobriu a América. Estarão as teorias «lá fora», no mundo, à espera de que surja alguém suficientemente arrojado e astucioso para as descobrir? Creio que não; as teorias são invenções. Gosto de pensar nas teorias físicas como programas de computador que, a partir de muitos poucos dados, calculam tudo aquilo que, relativamente às interações quânticas, nos é possível comparar com a experiência. A estrutura de um tal programa de computador pode, evidentemente, estar errada. Mas, se o nosso programa funciona, a nossa invenção mostra-nos algo de novo sobre a realidade da única forma que nos é possível conhecê-la. Formou-se, a partir das teorias relativistas de campo quantizado, uma nova imagem da realidade material: não apenas em termos do seu conteúdo, os *quanta* fundamentais, mas também do próprio conceito de realidade, do palco no qual se desenrola o filme cósmico a três dimensões.

O nosso objetivo nos próximos capítulos será exatamente apresentar o conceito de realidade material tal como ele hoje é considerado pelos físicos. Um bom ponto de partida será a conceção que os físicos fazem do nada — isto é, do vácuo.

CAPÍTULO 21

O Ser e o Nada

Nada é mais fundamental do que isto: o espaço vazio não é vazio; pelo contrário, nele se desenrola a física mais violenta.

JOHN A. WHEELER

«A natureza», disse Aristóteles, «tem horror ao vazio.» Ele observou que, sempre que tentamos remover toda a matéria de uma região do espaço, existe uma tendência para outra matéria preencher o vazio assim formado. A matéria está por todo o lado. A concepção moderna de universo é justamente contrária: a matéria é a exceção no universo. A maioria do espaço entre as estrelas é vazio ou quase vazio, e mesmo a matéria sólida é, em grande parte, espaço vazio, com quase toda a massa concentrada nos núcleos atômicos. Quase tudo é vácuo.

No entanto, a antiga concepção de vácuo segundo a qual este seria espaço vazio, o nada, foi radicalmente alterada. Depois de inventarem a teoria quântica relativista de campos nos anos 30 e 40, os físicos formaram uma nova imagem de vácuo: ele não é vazio, mas pleno. O vácuo, o espaço vazio, consiste, na realidade, de pares de partículas e antipartículas espontaneamente criados e aniquilados. Todos os *quanta* que os físicos descobriram ou venham

a descobrir são continuamente criados e destruídos no Armagedão que é o vácuo. Como é que isto pode acontecer?

O espaço parece vazio porque esta grande criação e destruição de todos os *quanta* se desenrola apenas ao longo de distâncias muito pequenas e durante intervalos de tempo muito curtos. À escala de grandes distâncias, o vácuo parece calmo e suave, como o oceano parece tranquilo quando o sobrevoamos de avião. Mas, à superfície do oceano, num pequeno barco de borracha, o mar pode apresentar grandes ondas. De uma forma análoga, o vácuo apresenta flutuações com a criação e destruição dos *quanta*, se o examinarmos suficientemente de perto. Mesmo ao nível dos átomos, essas flutuações do vácuo são extremamente pequenas, embora observáveis. A partir de medições dos níveis de energia atômicos, os físicos sabem que as flutuações do vácuo existem realmente; e, se pudessem observar mais de perto, o vácuo pareceria um mar revolto constituído por todos os *quanta*. Em lugar de «A natureza tem horror ao vazio», a física moderna sugere «O vácuo contém toda a física». Tudo o que pode ter existido ou virá alguma vez a existir está potencialmente no nada do espaço. Os físicos atingiram esta conclusão notável sobre o vácuo através de uma compreensão mais profunda do princípio de indeterminação de Heisenberg e da existência das antipartículas. O modo como tal se processa é o seguinte:

Uma lei rigorosa da física moderna é a da conservação da energia. Podemos imaginar que esta lei é controlada por um contabilista que toma nota da energia total antes e depois de uma interação. No seu livro de contabilidade, ele anota as receitas e as

despesas de energia e estas duas colunas devem compensar-se exatamente. É esta a lei da conservação da energia.

O princípio de indeterminação de Heisenberg entra em jogo se tentarmos aplicar esta lei ao mundo quântico. As relações de indeterminação implicam que, se medirmos a energia de um *quantum* como o eletrão ao longo de um dado intervalo de tempo, o grau de incerteza nessa determinação é inversamente proporcional ao intervalo de tempo. Assim, para intervalos de tempo muito curtos pode haver uma incerteza muito grande no nosso conhecimento da energia do *quantum*. Isto significa que, em intervalos de tempo muito curtos, o nosso contabilista tem de fazer erros nas colunas de receitas e despesas, ainda que os erros médios sejam zero ao longo de grandes intervalos de tempo. As relações de indeterminação produzem assim uma falha no argumento de que a lei de conservação da energia implicava que os *quanta* não podiam ser criados a partir do nada. Eles podem ser criados a partir do nada por pequenos intervalos de tempo. Os erros na contabilidade da energia são como ondas no oceano do vácuo: nalguns pontos, as ondas são mais altas, noutros mais baixas, mas, em média, constituem um oceano tranquilo. Os erros aleatórios que o nosso contabilista de energia comete são mais uma manifestação da natureza estatística da realidade e do Deus-que-joga-aos-dados. O vácuo flutua aleatoriamente entre o ser e o nada.

Como há uma incerteza na energia ao longo de pequenos períodos de tempo, um *quantum* poderia, em princípio, ser criado no espaço vazio a partir do nada e desaparecer em seguida. Um *quantum* deste tipo, que é criado subitamente e em seguida

aniquilado, é chamado «*quantum virtual*». Apenas se pode tornar real se dispuser da energia suficiente para isso. Estes *quanta* virtuais são os erros que o contabilista comete. Eles possuem uma realidade virtual, mas no final têm de ser aniquilados. Se pudéssemos fornecer ao vácuo, a partir do exterior, a energia necessária, estas partículas virtuais poderiam tornar-se reais. Seria como dizer ao contabilista de energia que podia dispor de um crédito real na sua conta e que um dos erros de receita não tinha de ser cancelado com um erro de despesa. Este processo de criação de *quanta* reais a partir de virtuais já foi observado em laboratório.

Os *quanta* virtuais do vácuo devem, em rigor, ser considerados como pares de partículas, correspondentes a uma partícula virtual e sua antipartícula. Uma flutuação do vácuo consiste na criação de um par partícula-antipartícula virtuais num ponto do espaço e na sua imediata aniquilação noutro ponto do espaço. Quanto mais baixa for a massa desses pares de partículas, tanto maior será a probabilidade da sua criação a partir do vácuo, porque o erro de energia necessário para o fazer será pequeno. Consequentemente, as maiores ondas no mar do vácuo correspondem aos pares eletrão-positrão, uma vez que estas são as partículas de mais baixa massa. Existem ondas mais baixas correspondentes aos pares partícula-antipartícula mais pesados. Há ondas no mar do vácuo correspondentes a todos os *quanta* possíveis, inclusivamente àqueles que ainda não foram descobertos. Toda a física — tudo aquilo que esperamos conhecer — está no vácuo, à espera de ser descoberta.

Outra forma de visualizar o vácuo é imaginar o colchão de molas tridimensional como uma analogia com o campo quântico, conforme já foi exposto. As molas do colchão cobriam todo o espaço e eram infinitamente pequenas; a vibração de uma mola correspondia a uma partícula quântica. Podemos pensar no vácuo como um reticulado de molas em que nenhuma delas vibra, o que representa a ausência de partículas reais. No entanto, devido ao princípio de indeterminação de Heisenberg, nunca podemos estar certos de que uma mola não tem absolutamente nenhuma vibração. É assim permitida a vibração das molas a um nível abaixo do correspondente a partículas reais. Estas vibrações, correspondem aos *quanta* virtuais, às ondas do oceano. Se pudéssemos fornecer energia real a essas vibrações, elas poderiam aumentar de nível e passar a ser partículas reais. O vácuo está preenchido com as vibrações correspondentes a todos os *quanta* possíveis.

Esta conceção surpreendente de vácuo foi uma consequência das novas ideias teóricas que serviram de base às teorias relativistas do campo quantizado. Ainda que a nova ideia de vácuo fosse compreendida do ponto de vista teórico, estava em aberto a questão da verificação experimental desta ideia fantástica.

Como poderiam os físicos determinar o efeito destes *quanta* virtuais no vácuo? Muito do espaço entre o núcleo atómico e um eletrão que orbita em torno dele pode ser considerado vazio, e foi assim que os físicos puseram em evidência os novos efeitos do vácuo. De facto, um dos efeitos da criação e aniquilação de *quanta* virtuais era um pequeno desvio na energia do eletrão que orbita em torno do núcleo. O que acontece é que o campo elétrico que

mantém o elétron na sua órbita em torno do núcleo pode por vezes criar um par elétron-positrão a partir do mar revolto de *quanta* virtuais do vácuo. Este par aniquila-se imediatamente a seguir. Este efeito, chamado «polarização do vácuo», produzirá pequenas alterações na órbita do elétron em torno do núcleo¹. Uma destas alterações orbitais no átomo de hidrogénio foi medida com grande precisão pelo experimentador Willis Lamb. Ele utilizou técnicas de micro-ondas muito precisas, que foram desenvolvidas com o radar durante a segunda guerra mundial. A característica das medições de Lamb era a de poderem ser comparadas com cálculos teóricos baseados na teoria de campo quantizado chamada «eletrodinâmica quântica». A não inclusão do efeito de polarização do vácuo teria levado a um desacordo com as observações de Lamb. Na realidade, o valor previsto para a energia da órbita do elétron concordava com as suas medições. O mundo dos *quanta* virtuais tinha um efeito real.

Apesar de haver muitas outras experiências que verificaram os efeitos de polarização do vácuo previstos pelos teóricos, a consequência mais drástica desta nova conceção de vácuo foi a construção de novos aceleradores para colisão de feixes de elétrons e de positrões. Estas máquinas, que entraram em funcionamento nos anos 70, faziam colidir um feixe de elétrons (matéria) de alta energia contra um feixe de positrões (antimatéria) de alta energia, em choque frontal. As colisões de matéria com antimatéria forneciam a energia necessária para que os pares virtuais partícula-antipartícula do vácuo se tornassem reais.

Estes aceleradores de colisão direta de feixes, ao fornecerem energia ao vácuo, estão, na realidade, a sondar a estrutura do vácuo em termos de pares virtuais, partícula-antipartícula. Podem ser desta forma criados, a partir do vácuo, pares *quark-antiquark*. Foi esta uma das maneiras pelas quais foram descobertos novos *quarks*, como o *charm*. O par *quark c* - *antiquark $\bar{c}$* formava uma pequena onda no oceano do vácuo que, assim que os físicos lhe forneceram a quantidade necessária de energia, pôde ser trazido à existência real sob a forma de um novo hadrão. Os físicos preveem que novos tipos de matéria possam ser descobertos utilizando este método de proporcionar a existência real aos *quanta* virtuais. Isso fará parte da história da física experimental dos anos 80: a criação de matéria através do fornecimento de energia ao vácuo pela colisão de feixes.

Uma vez aceite a mutabilidade da matéria e a nova concepção de vácuo, podemos especular sobre a origem da maior coisa que podemos conhecer: o universo. Talvez o próprio universo tenha começado a existir a partir do nada — uma flutuação do vácuo, gigantesca, que hoje conhecemos por *big-bang*. Surpreendentemente, as leis da física permitem esta possibilidade. Aristóteles pensava que o universo sempre tinha existido. Mas o seu cuidadoso leitor Tomás de Aquino discordava dele, pensando que o mundo era uma *creatio ex nihilo* — uma criação a partir do nada. O universo inteiro podia ser uma representação do nada, do vácuo.

O desenvolvimento da física neste século é bastante irónico. O século XIX e o princípio do século XX foram caracterizados por uma perspectiva materialista que sustentava uma distinção clara entre

aquilo que existia no mundo e aquilo que não existia. Essa distinção ainda hoje existe, mas o seu significado foi alterado. O que não existe, o nada ou o vácuo, é uma espécie de brincadeira do «eterno Autor dos enigmas». Os físicos teóricos e experimentais estudam hoje o nada, o vácuo. Mas esse nada contém todo o ser.

¹ Em todo este capítulo se utiliza uma linguagem semiclássica para a descrição do átomo, certamente para facilidade de visualização. É claro que, em rigor, não faz sentido afirmar que o eletrão roda em torno do núcleo atómico, pois isto implicaria que ele tivesse uma trajetória clássica, o que não é possível, à luz dos princípios de indeterminação de Heisenberg e da descrição do eletrão por uma onda de probabilidades. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 22

Identidade e Diferença

Tweedledum e Tweedledee decidiram batalhar.

LEWIS CARROL, Through the looking glass

O mundo industrial da produção em massa cerca-nos de objetos que parecem ser idênticos. Vejo no supermercado filas de latas de comida idênticas, produto de uma civilização automatizada. As peças de um automóvel, funcionalmente idênticas, podem ser substituídas. Espanta-me o facto de a experiência de um mundo de coisas idênticas ser muito recente; no mundo antigo, os objetos eram manufaturados e, assim, diferentes. Mesmo as moedas antigas, supostamente idênticas, eram diferentes, exceto para o observador descuidado.

A tendência da mente humana é procurar as diferenças. As coisas idênticas provocam confusão, mesmo terror, ao amesquinhar o nosso sentimento de unicidade. Creio que há qualquer coisa de desagradável nas fotografias a preto e branco que Diane Arbus tirou de crianças gémeas, geralmente vestidas de igual. As crianças nunca parecem felizes. Aquilo que é desagradável é a ameaça à nossa identidade; essas crianças são como latas num supermercado, ou como peças de automóvel.

Muitas pessoas sentem-se pouco à vontade quando em face de objetos idênticos. Talvez exista uma base biológica para este sentimento, porque a sobrevivência humana dependeu por vezes da nossa capacidade de distinguir pequenas diferenças. Se analisarmos de perto objetos «idênticos», daremos em geral por pequenas diferenças: arranhões ou incisões. Todos os objetos macroscópicos têm diferenças discerníveis, e este facto é, de alguma forma, reconfortante. Mas, ao entrarmos no micromundo das moléculas e dos átomos, entramos no mundo da identidade absoluta. Não vale a pena procurar diferenças, porque duas moléculas ou dois átomos, no mesmo estado de energia, são absolutamente idênticos. Os átomos não têm marcas de modo a poderem ser distinguidos.

Se dermos mais um passo e nos colocarmos ao nível das partículas elementares como o eletrão, então não há absolutamente diferença nenhuma. As partículas quânticas não têm estrutura interna que as distinga; dois eletrões são absolutamente idênticos, como o são dois fótons. Na verdade, toda a variedade do universo material é inteiramente feita de partículas completamente idênticas. Foi a natureza, e não os industriais do século XIX, que pela primeira vez utilizou o princípio das peças substituíveis.

O facto de um eletrão ser absolutamente idêntico a qualquer outro tem importantes consequências físicas, que vamos agora explorar.

A nossa história começa com Leibniz, o filósofo que formulou pela primeira vez o princípio da identidade dos indiscerníveis, que afirma

que, se for impossível estabelecer diferenças entre dois objetos, eles serão idênticos. É uma definição possível de identidade e aquela que pode ser considerada mais óbvia. Implica, entre outras coisas, que trocar as posições de dois objetos idênticos não altera o estado físico do sistema físico por eles constituído. Ainda que seja filosoficamente interessante, essa «simetria» em relação à troca de objetos idênticos não tem consequências observáveis na física clássica. Mas, com a invenção da teoria quântica, em 1926, a identidade dos indiscerníveis adquiriu um significado notável. Os físicos aperceberam-se não só de que as partículas quânticas, como o eletrão e o fóton, são absolutamente idênticas entre si, mas também de que a consequência desta identidade é a existência de um novo tipo de força entre elas. A identidade dos indiscerníveis tem por consequência uma força! Sem estas forças, chamadas «forças de troca», a química e os átomos, tal como os conhecemos, não poderiam existir; nós próprios não estaríamos aqui. Com a ajuda dos conceitos básicos da teoria quântica e da matemática elementar podemos mostrar como é que a identidade das partículas dá origem a estas novas forças de troca.

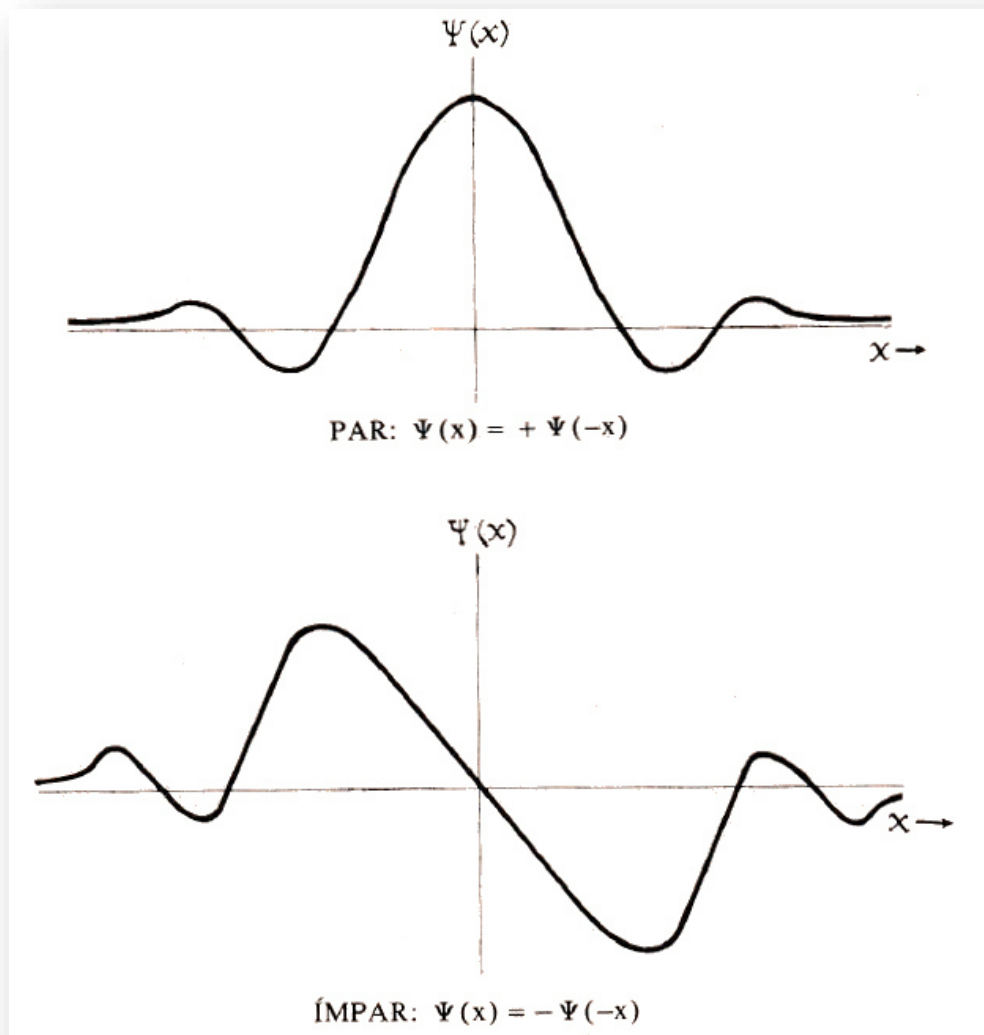
Imaginemos que há duas partículas idênticas, como dois eletrões ou dois fótons, em dois pontos do espaço, x_1 e x_2 . De acordo com a teoria quântica, estas duas partículas são completamente descritas por uma onda de probabilidades cuja forma depende dos pontos x_1 e x_2 ; matematicamente, a forma é função destes dois pontos. Na realidade, a forma da onda de probabilidades que descreve as partículas dependerá de $x = x_1 - x_2$, distância entre as duas partículas, e designaremos esta forma para a onda por $\Psi(x)$.

Ainda que as duas partículas sejam completamente descritas pela forma de onda de probabilidades $\Psi(x)$, devemos recordar que, segundo a teoria quântica e a interpretação estatística de Born, a probabilidade $P(x)$ de encontrar as partículas separadas por uma distância x *não* é igual à forma da onda $\Psi(x)$, mas sim à intensidade da onda, $P(x) = [\Psi(x)]^2$, obtida elevando ao quadrado a forma da função de onda. Como é a probabilidade que podemos medir e observar, é na realidade o quadrado, ou intensidade, da função de onda que tem significado físico.

Utilizando estas ideias sobre a interpretação estatística da função de onda, podemos agora aplicar a identidade dos indiscerníveis. Este princípio assegura que, se trocarmos as posições das duas partículas, não devemos observar nenhuma diferença, pois elas são idênticas. Trocar as partículas significa matematicamente trocar x_1 com x_2 e vice-versa. Assim, a distância que separa as partículas, $x_1 - x_2 = x$, passa para $x_2 - x_1 = -x$, isto é, passa a ser a distância simétrica.

A função de onda $\Psi(x)$ é uma função de x , e, portanto, também o é o seu quadrado, a probabilidade $P(x) = [\Psi(x)]^2$. Se a probabilidade de encontrar duas partículas idênticas não se altera quando as trocamos, não podemos observar nenhuma diferença física. Portanto, o princípio da identidade dos indiscerníveis implica que a probabilidade $P(x)$ não se altera pela troca das duas partículas. Matematicamente, isto pode exprimir-se da forma

$$P(x) = P(-x)$$



Funções de onda par e ímpar em função da separação entre partículas idênticas. Note-se que, para uma função de onda par, a probabilidade (dada pelo quadrado da função de onda) de encontrar duas partículas no mesmo ponto ($x = 0$) é máxima, enquanto para a função de onda ímpar essa probabilidade é nula.

O que é que isto implica relativamente à forma da função de onda $\Psi(x)$? Uma possibilidade é que a função $\Psi(x)$ seja uma função par da distância relativa x : ela não se altera quando se substitui x por $-x$. Matematicamente, isto exprime-se por

$$\Psi(x) = + \Psi(-x) \text{ (par)}$$

Um exemplo de uma função deste tipo está representado na figura. Há, no entanto, outra possibilidade; como $(-1)^2 = +1$, podemos ter também uma solução ímpar para a função de onda: ela troca de sinal quando se substitui x por $-x$. Matematicamente, tem-se

$$\Psi(x) = -\Psi(-x) \text{ (ímpar)}$$

Esta possibilidade está também representada na figura. Ambas as possibilidades satisfazem a relação

$$[\Psi(x)]^2 = [\Psi(-x)]^2$$

Concluimos, assim, que a identidade dos indiscerníveis implica que a forma da função de onda que descreve duas partículas idênticas seja uma função par ou ímpar da distância que as separa. Até aqui, isto parece ser um mero truque, nada tendo a ver com as forças. Mas agora devemos perguntar-nos qual destas duas possibilidades — a função de onda par ou ímpar — é realizada por partículas idênticas reais. Acontece que *ambas* são realizadas, mas cada uma para um diferente tipo de partículas quânticas. Para explicar isto teremos de fazer um pequeno desvio e de dizer algumas palavras sobre o *spin* das partículas.

Todas as partículas quânticas, como os fótons, os elétrons, os neutrões, os prótons e até mesmo os *quarks*, têm um *spin* bem definido. Podemos imaginá-los como pequenos piões. Uma consequência notável da relatividade restrita e da teoria quântica, que não tentaremos demonstrar, é que o *spin* das partículas está

quantizado. O *spin* não pode ser arbitrário; pode apenas tomar valores discretos. O *spin* destas partículas, em unidades especiais de *spin*, pode tomar os valores

$$0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2...$$

A quantidade de *spin* pode assim ser inteira (0, 1, 2...) ou semi-inteira (1/2, 3/2, 5/2...), distinção essencial em mecânica quântica. As partículas de *spin* inteiro, como o fóton (que tem *spin* 1), e as partículas de *spin* semi-inteiro, como o elétron (que tem *spin* 1/2), comportam-se de formas muito distintas.

Vemos, portanto, que há duas famílias de partículas, uma com *spin* inteiro e outra com *spin* semi-inteiro. Na nossa discussão da troca de duas partículas idênticas descobrimos que a identidade dos indiscerníveis conduz a duas possibilidades para a função de onda: par ou ímpar. Existe um célebre teorema na teoria quântica, o teorema das estatísticas do *spin*, que podemos agora formular: partículas de *spin* inteiro são sempre descritas por uma função de onda par e partículas de *spin* semi-inteiro são descritas por uma função de onda ímpar. Assim, ambas as funções de onda (par e ímpar) têm importância física: cada uma aplica-se a uma diferente família de partículas.

É agora simples ver como a identidade dos indiscerníveis pode conduzir a forças entre partículas idênticas. Suponhamos que temos dois fótons idênticos separados por uma distância x . O fóton tem *spin* 1, portanto a função de onda que descreve os dois fótons deve ser uma função par de x , isto é, $\Psi(x) = \Psi(-x)$. Como é uma função

par de x , não precisa de se anular para $x = 0$, que corresponde a dois fótons idênticos no mesmo ponto do espaço. Isto indica que há uma probabilidade diferente de zero de dois fótons estarem no mesmo ponto do espaço. Se a probabilidade de estarem no mesmo ponto é maior do que a que corresponde a estarem afastados, há aparentemente uma «força» que os atrai. De facto, não há «força» alguma, mas sim uma maior probabilidade de os fótons estarem próximos do que afastados. Como é que uma probabilidade se pode manifestar como uma força?

Recordemos a nossa discussão do lançamento de um par de dados. Havia uma probabilidade máxima para a saída de um 7 e mínima para a saída de um 2 ou de um 12. Poderia então parecer, após muitas tentativas, que os dados eram mais «atraídos» para o 7 do que para o 2 ou o 12. Este exemplo é bastante geral: se um acontecimento tem uma elevada probabilidade, parece haver uma «força» atrativa que faz com que ele ocorra. Reciprocamente, se a probabilidade de um acontecimento é baixa, tudo se passa como se houvesse uma «força» repulsiva que impede que ele ocorra. São apenas probabilidades, mas parecem-nos ser «forças», aquilo que os físicos chamam «forças de troca». Na teoria quântica, essas forças de troca adquirem significado físico.

Vimos que a identidade dos indiscerníveis e a teoria quântica implicam uma força atrativa entre os fótons. Se tivermos um gás constituído por muitas partículas idênticas que, como o fóton, tenham *spin* inteiro, e se o arrefecermos a uma temperatura muito baixa, de forma que o movimento das partículas seja menor, estas forças atrativas começam a predominar. Formar-se-á uma

condensação destas partículas (a chamada «condensação de Bose-Einstein») por causa da atração, fenómeno observado experimentalmente. Aquilo que poderia parecer uma prestidigitação com probabilidades tem realidade física.

Mas as implicações são ainda mais surpreendentes se considerarmos duas partículas de *spin* semi-inteiro, como eletrões. A sua função de onda deve ser ímpar relativamente à troca de posições, isto é, $\Psi(x) = -\Psi(-x)$; assim, se tentarmos colocar dois eletrões no mesmo ponto do espaço de forma que a separação entre eles, x , seja zero, concluímos que $\Psi(0) = -\Psi(0) = 0$. A função de onda deve ser zero quando a distância entre os eletrões é nula, pois o único número que é simétrico de si próprio é o zero. Concluimos que a probabilidade de encontrar dois eletrões no mesmo ponto do espaço é zero, ao contrário do que acontecia para fotões. Se tentarmos colocar um par de eletrões num mesmo ponto do espaço, interagem como se exercessem entre si uma força de repulsão. A regra de não se poderem encontrar dois eletrões no mesmo ponto do espaço é chamada «princípio de exclusão de Pauli».

O princípio da exclusão de Pauli explicava a tabela periódica dos elementos químicos numa base teórica. De acordo com este princípio, dois eletrões não podiam ocupar o mesmo lugar na mesma órbita em torno do núcleo atómico. À medida que se juntam mais eletrões ao átomo, para construir os diferentes elementos químicos, cada novo eletrão deve ir ocupar um novo estado. Quando isto foi feito utilizando o princípio de exclusão de Pauli, tornou-se claro que a tabela periódica dos elementos químicos, descoberta por Mendeleev, podia ser explicada; a teoria quântica

dava assim conta das propriedades dos elementos. Durante mais de um século, desde a descoberta dos elementos químicos, tinha-se procurado uma explicação; agora ela existia.

Mas a teoria quântica ultrapassou o estabelecimento de uma base teórica de compreensão da tabela periódica. O modo como os átomos se combinam para formar moléculas podia também ser finalmente compreendido. Os vários átomos que constituem uma molécula podem partilhar eletrões. Nessa partilha entra em jogo a propriedade «ímpar» da função de onda eletrónica, bem como a sua correspondente força de troca; estas forças de troca ligam os átomos em configurações moleculares particulares. A compreensão das regras destas forças de troca conduziu à teoria da ligação química, formulada, entre outros, por Linus Pauling. Esta descoberta assinala o início da química quântica. Químicos e físicos podem, hoje em dia, calcular os ângulos e as distâncias entre os átomos componentes de uma molécula e comparar os seus cálculos com os resultados obtidos experimentalmente através de difração de raios X para essas mesmas distâncias e ângulos.

A teoria quântica e o novo papel desempenhado pela identidade dos indiscerníveis forneceram a base fundamental para a compreensão de toda a química. É claro que algumas moléculas orgânicas são gigantescas e podem dobrar-se ou enrolar-se em torno de si próprias de forma muito complexa. Os cientistas não compreendem completamente as formas destas macromoléculas. Mas isso deve-se ao facto de elas serem extremamente complicadas, e não a uma falta de compreensão das forças químicas fundamentais. Os computadores são uma ferramenta essencial para

resolver o problema da estrutura destas moléculas a partir dos dados. A explicação da estrutura das mais complicadas moléculas pela teoria quântica fundamental é apenas uma questão de tempo.

A teoria quântica aprofundou imensamente a nossa compreensão da identidade dos indiscerníveis e do problema da identidade e da diferença. A identidade absoluta das partículas quânticas nas mãos de um Deus-que-joga-aos-dados assume um novo significado, fornecendo novas forças entre as partículas. Estas forças de troca são essenciais na ligação dos eletrões aos núcleos no sentido em que dão origem às leis da química. De facto, sem a força de troca entre os eletrões (consequência do «passe de mágica» das probabilidades quânticas), os átomos não poderiam ligar-se e nós não estaríamos aqui. É um dos truques mais subtis do Deus-que-joga-aos-dados.

A analogia entre a linguagem e o mundo das partículas quânticas sempre me fascinou. A língua inglesa baseia-se no alfabeto, um conjunto de vinte e seis caracteres, e mais alguns sinais de pontuação. Através de uma disposição ordenada, essas letras podem formar palavras e frases. Ainda que uma letra **a** seja idêntica a qualquer outra letra **a**, as palavras e as frases podem ser diferentes; está aberto um conjunto riquíssimo de possibilidades. Da mesma forma, no nosso universo há apenas alguns blocos de construção fundamentais: *quarks*, leptões e gluões. Estas são as letras do alfabeto da natureza. Com este pequeno alfabeto podem formar-se palavras: os átomos. As palavras são unidas, com a sua gramática própria (as leis da teoria quântica), para formar frases: as moléculas. Em breve temos livros e bibliotecas inteiras formadas

por «frases» moleculares. O universo é como uma grande biblioteca em que as palavras são os átomos. Admiremos aquilo que foi escrito com essa centena de palavras! Os nossos próprios corpos são livros dessa biblioteca, especificados pela organização das moléculas. O universo como literatura é, claro está, apenas uma metáfora; tanto o universo como a literatura são organizações de objetos idênticos. Eles são sistemas de informação.

Vemos agora que o significado da identidade absoluta posta em evidência pela teoria quântica é o de explicar as forças que mantêm o mundo coeso. Da identidade surgiu a diferença: a diferença que distingue qualquer coisa de todas as outras coisas no nosso mundo.

CAPÍTULO 23

A Revolução das Teorias de Campos de Gauge

A natureza parece tirar partido das representações matemáticas simples das leis de simetria. Quando pensamos na elegância e na maravilhosa perfeição do raciocínio matemático envolvido e o comparamos às complexas e profundas consequências físicas, somos levados a conceber um sentimento de enorme respeito pelo poder das leis de simetria.

C.N. YANG, conferência do Prémio Nobel

Qualquer pessoa que tenha contatado, ainda que superficialmente, com a física fica impressionada com a simplicidade e a beleza extremas das leis da natureza. Como podem as leis da física ser simples se o mundo é tão complicado? A resposta a esta pergunta é uma das descobertas de Newton. Ele compreendeu que todas as complicações do mundo estão na especificação das condições iniciais: das posições e das velocidades de todas as partículas num mesmo instante de tempo.

As leis da física que descrevem a forma como o mundo evolui a partir dessas condições iniciais podiam ser, e eram, muito simples. Esta conceção, que separa as complexas condições iniciais das simples leis da física, subsistiu até aos nossos dias.

No entanto, isto não explica por que é que as leis da física são tão simples. Apenas a nossa experiência, adquirida ao longo de

séculos, apoia a nossa convicção na simplicidade das leis físicas, convicção que foi recentemente reforçada pelo êxito das teorias quânticas relativistas de campos.

As novas ideias ventiladas pelas teorias relativistas do campo quantizado — antimatéria, a nova física do vácuo, partículas idênticas e forças de troca — transformaram a forma como os físicos pensam a realidade. Os físicos teóricos aperceberam-se de que a ideia segundo a qual a realidade material consistia num conjunto de campos fornecia a chave para a compreensão das interações fundamentais entre os *quanta*: as interações forte, eletromagnética, fraca e gravitacional. Eles esperavam que a matemática da teoria do campo desse uma descrição detalhada das partículas quânticas, da mesma forma que, séculos antes, Newton tinha descoberto que a matemática das equações diferenciais fornecia uma descrição das partículas vulgares e clássicas. O desenvolvimento da teoria quântica levou os físicos a novos ramos da matemática como espaços de Hilbert de dimensão infinita, teoria dos operadores e álgebra das matrizes, confirmando mais uma vez a notável concepção de que as leis fundamentais da natureza são especificadas em termos de uma matemática extremamente bela.

Mas aquilo que acima de tudo impressionou os físicos foi o papel profundo das simetrias, descritas pela matemática da teoria de grupos, na clarificação das leis das interações quânticas. À medida que os físicos compreenderam as simetrias matemáticas da teoria dos grupos, descobriram que elas exigiam a existência das interações que tinham observado entre os campos e os *quanta* associados. A notável concepção segundo a qual a própria simetria

implica a existência dos glúons que transportam as interações entre *quarks* e glúons é o tema deste capítulo. É um exemplo de como as belas e simples ideias de simetria estão presentes nos fundamentos das complexas interações quânticas, ideias que, justamente por serem simples e belas, podiam ser apreendidas e apreciadas pela mente.

Depois da invenção da teoria relativista de campo quantizado, no início da década de 1930, alguns físicos matemáticos dedicaram-se ao seu desenvolvimento como teoria matemática autónoma, enquanto outros aplicaram a teoria de campo à realidade, ao filme tridimensional dos *quarks*, léptons e glúons. Estes físicos procuravam teorias específicas para descrever as partículas quânticas, teorias que lhes permitissem realizar cálculos comparáveis com observações experimentais. Guiados por experiências, muitas das quais realizadas nos grandes laboratórios de aceleradores, estes físicos teóricos acabaram por formular as teorias de campo, como a eletrodinâmica quântica, que descrevia as interações de fótons e eletrões, e a cromodinâmica quântica, que descrevia a interação forte. O trabalho intelectual investido na construção destas teorias abrange cinco décadas e prossegue ainda hoje em dia. Mas o consenso atual dos físicos é o de que a teoria do campo representa um grande triunfo na tentativa de compreensão da realidade material. Os físicos podem agora descrever precisamente em linguagem matemática as interações dos *quarks*, léptons e glúons. O raciocínio matemático tinha permitido à mente humana abarcar a mais larga costa na viagem ao interior da matéria. Como se deu este espetacular triunfo da

física? Quais foram as ideias cruciais que conduziram ao sucesso da teoria do campo?

As modernas teorias de campo nasceram na tentativa de unificar a mecânica quântica e a relatividade numa só teoria. Os físicos teóricos debruçaram-se, na década de 1930, sobre este problema, através do estudo de fótons e elétrons. O problema gigantesco que lhes foi posto era o de conceber uma teoria relativista de campo quantizado que fosse matematicamente consistente e experimentalmente correta e que descrevesse a interação entre estes dois *quanta*.

Quando os físicos tentaram pela primeira vez calcular a interação entre fótons e elétrons, obtiveram, a partir dos seus cálculos, números infinitos, respostas que eram absurdas. O que poderia estar errado? A razão pela qual estas quantidades infinitas surgiam pode ser vista, a partir da nossa imagem dum campo quântico, como um colchão de molas tridimensional. Recordemos que as molas tinham de ser infinitamente pequenas e de preencher todo o espaço. Isto significa que, por mais pequena que seja a região de espaço que consideremos, existe sempre nela um número infinito de molas que podem vibrar. Estas vibrações correspondem a *quanta* virtuais; o facto de todos estes *quanta* poderem existir até nas mais pequenas regiões do espaço significa que, se calcularmos a influência desses *quanta* virtuais sobre a massa do elétron, obtemos como resposta um valor infinito, o que é absurdo.

Alguns físicos pensaram que a teoria de campo quantizado não fazia sentido devido a este problema das quantidades infinitas. Mas

outros estavam convictos de que as ideias básicas estavam corretas e podiam fazer-se funcionar. Eles conseguiram por fim dominar estas quantidades infinitas através de um considerável esforço matemático chamado «processo de renormalização». Esse processo funciona da maneira que se segue.

Suponhamos que um homem se pesa numa balança; o seu peso é, por exemplo, 80 kg. Após uma boa refeição, o seu peso aumenta 1 kg. Mas o homem decide reajustar a escala da balança de modo a continuar a marcar apenas 80 kg. Este reajustamento da escala é o processo de renormalização. Uma boa imagem para a quantidade de renormalização exigida pelas técnicas de cálculo das teorias de campo quantizado pode ser dada por uma pessoa que tivesse engordado uma quantidade infinita e reajustasse então a escala por uma quantidade infinita, de modo a obter um resultado global finito. Surpreendentemente, para algumas teorias de campo, este processo pode ser efetuado de uma forma matematicamente coerente, sendo estas teorias, por isso, chamadas «teorias de campo quantizado renormalizáveis».

O processo de renormalização mostrou aos físicos teóricos que algumas teorias relativistas de campo quantizado faziam sentido porque eram insensíveis à estrutura da matéria a muito curtas distâncias. Como aprendemos no capítulo sobre os microscópios para a matéria, distâncias mais curtas são sondadas por partículas de maiores energia e movimento; portanto, distâncias extremamente curtas, que correspondem a movimentos extremamente elevados, estão fora do alcance dos métodos experimentais. Julian $\dagger$ Schwinger, um dos inventores do

processo de renormalização, notou que, «de alguma forma, o processo de renormalização removeu a referência desequilibrada aos movimentos extremamente elevados que as equações não renormalizadas contêm. As equações renormalizadas fazem uso apenas da física que está já bem estabelecida». Os comentários de Schwinger sublinham que a importância do processo de renormalização residia no facto de a interação dos fótons com os eletrões a baixas energias e movimentos, que podia ser estudada experimentalmente, pode agora ser descrita matematicamente, sem necessidade de um conhecimento detalhado do que acontecia a energias muito elevadas. Por razões ainda desconhecidas, a natureza escolheu as teorias renormalizáveis para descrever as interações quânticas. Parece, pois, que o mundo real se apropriou da matemática com a qual sabemos lidar.

No final da década de 1940, os físicos teóricos possuíam pela primeira vez uma teoria de campo que obedecia simultaneamente aos princípios da teoria quântica e da teoria da relatividade. Foi chamada «eletrodinâmica quântica» e teve um sucesso espantoso. Através do processo de renormalização, os físicos podiam agora calcular com confiança as interações dos fótons virtuais com os eletrões e comparar os resultados com a experiência. O acordo foi notável. À medida que os físicos experimentais refinavam as medições das propriedades eletromagnéticas dos eletrões, os físicos teóricos calculavam essas mesmas propriedades e confrontavam os seus resultados com os dados experimentais, número a número. De muitos pontos de vista, este triunfo da eletrodinâmica quântica foi semelhante ao triunfo da física clássica de Newton aplicada aos movimentos dos planetas: as medições astronómicas incrivelmente

precisas eram explicadas com cálculos matemáticos realizados a partir da teoria. E, tal como o êxito experimental da teoria de Newton convenceu os físicos de que a física clássica estava correta, também o êxito experimental da eletrodinâmica quântica convenceu os físicos de que a teoria de campo aplicada aos fótons e elétrons estava correta. Todos esses exóticos *quanta* virtuais e a nova física do vácuo não eram meros artifícios de um formalismo matemático, um produto da nossa imaginação, mas eram, na realidade, necessários para compreender racionalmente as propriedades da matéria. De todas as modernas teorias quânticas de campo, a eletrodinâmica quântica é o modelo de êxito.

Estimulados por este sucesso da teoria do campo, os físicos teóricos voltaram-se em seguida para o problema de encontrar uma teoria semelhante para os *quanta* que possuem a interação forte — os hádrões. Nessa altura, pelos anos 50 e 60, os físicos não sabiam que os hádrões eram formados por *quarks*. Eles supuseram pura e simplesmente que cada hádrão tinha um campo fundamental associado. Mas, ao aplicar a teoria do campo às interações fortes dos hádrões, falharam redondamente em fazer progressos. Porquê?

Em primeiro lugar, havia um enorme número de hádrões, e todos eles interagiam entre si de formas complicadas. As interações eram tão complexas que nunca era possível considerar o caso simples da interação entre apenas dois hádrões; todos eles participavam no fenómeno. Em segundo lugar, a interação entre hádrões era cerca de cem vezes mais forte do que a interação entre fótons e elétrons; era tão forte que se tornava difícil compreendê-la matematicamente.

Devido a estas dificuldades, muitos físicos teóricos (talvez mesmo a maioria) pensaram por algum tempo abandonar a teoria do campo e substituí-la por uma abordagem completamente diferente, chamada «teoria da matriz S»¹. Os defensores da teoria da matriz S sentiam que o problema da teoria do campo residia em introduzir na física objetos — os campos fundamentais — que estavam para além do alcance experimental. A teoria da matriz S foi, pelo contrário, inventada para empregar apenas quantidades experimentalmente observáveis; ela tentava relacionar um conjunto de medidas sobre as interações hadrónicas com outros conjuntos de medidas semelhantes. A esperança dos teóricos da matriz S era nunca serem forçados a introduzir na teoria conceitos que não estivessem relacionados com quantidades experimentalmente observáveis. Os teóricos de campo não se importavam de introduzir tais conceitos, desde que conseguissem calcular as quantidades observadas.

De muitos pontos de vista, a teoria da matriz S foi buscar a sua inspiração à filosofia da física de Ernst Mach; a física é uma ciência que trata de objetos e acontecimentos mensuráveis, e assim os físicos deveriam retirar todos os conceitos teóricos que não correspondessem a entidades observáveis. A teoria da matriz S era machiana, enquanto a teoria de campo não era. É interessante recordar neste contexto a carta de Einstein ao seu amigo, o filósofo Solovine, em que descrevia como tinha inventado a relatividade generalizada. Einstein, que a princípio era machiano, contestou mais tarde as posições estritas de Mach, defendendo que «o mero conjunto dos fenómenos registados nunca é suficiente; deve sempre ser adicionada uma invenção livre do espírito humano

[...]». Einstein continuava, dizendo que o físico teórico deve estar preparado para dar um salto intuitivo a partir dos dados experimentais, de forma a estabelecer um postulado absoluto que não pode, ele próprio, ser diretamente testado, mas a partir do qual se podem deduzir logicamente consequências testáveis. O postulado do campo, contrariamente à teoria da matriz S , representava um tal salto intuitivo a partir do mundo da experiência — um salto de que alguns físicos desconfiavam.

Podemos hoje ver retrospectivamente que a razão pela qual a teoria do campo quantizado não conseguiu, nos anos 50 e 60, dar uma descrição adequada da interação forte não foi o estar essencialmente errada, mas sim o ter sido mal aplicada. Os campos fundamentais das interações fortes não correspondiam aos hádrões, mas aos *quarks* e glúões. Em meados dos anos 70, os físicos conseguiram finalmente inventar uma teoria de campo correta para a interação forte, a cromodinâmica quântica, que se baseava na interação dos *quarks* e glúões. A sua descoberta exigiu não só a confirmação experimental do facto de os hádrões serem constituídos por *quarks*, mas também o desenvolvimento de conceitos matemáticos profundos que relacionassem as simetrias abstratas com a ideia dos campos em interação. Como é que os físicos teóricos imaginaram a teoria da força forte?

Não foi através de um ataque direto ao problema. Por vezes, o progresso na compreensão dos problemas físicos surge, não pela explicação direta de experiências, mas pela exploração de novos conceitos matemáticos que apenas se relacionam com a experiência de uma forma indireta. Essas explorações matemáticas são

parcialmente efetuadas pelos físicos teóricos, porque, na expressão de Dirac, «Deus utilizou matemática maravilhosa para criar o mundo». Guiados pela experiência no que diz respeito aos pormenores, mas fazendo apelo à «matemática maravilhosa» das simetrias e à sua relação com a teoria do campo na construção do quadro concetual, os físicos teóricos formularam no decorrer da década de 1970 as teorias de campo para as interações fraca e forte. É uma realização notável da conceção segundo a qual a mente humana pode conhecer a realidade e provar este conhecimento com os dados experimentais.

Para compreender estes feitos recentes da física teórica teremos de explorar primeiro o conceito de simetria. A simetria tem a ver com a forma como os objetos podem ficar inalterados se os transformarmos. Por exemplo, se uma esfera perfeita for rodada em torno de um eixo que passe pelo seu centro, ficará inalterada: a esfera tem simetria de rotação em torno de qualquer eixo. Se rodarmos de um determinado ângulo a esfera em torno de um eixo e em seguida a rodarmos de outro ângulo em torno de outro eixo, o resultado global é equivalente a uma só rotação em torno de um eixo; quaisquer duas rotações são equivalentes a uma rotação. Os matemáticos podem descrever estas operações de rotação em termos de equações algébricas, de forma que a simetria inicial da esfera possa ser especificada algebricamente: constituiu-se assim uma álgebra de Lie, que deve o seu nome ao matemático Sophus Lie.

Estas ideias de simetria resultaram num dos mais belos ramos da matemática, chamada «teoria dos grupos de Lie». Todas as

simetrias possíveis, como esferas em rotação em espaços com um número arbitrário de dimensões, foram completamente classificadas pelo matemático francês Elie Cartan. Surpreendentemente, essas elegantes simetrias matemáticas têm aplicações profundas nas teorias de campo que regem o mundo quântico.

Chen Ning Yang, físico sino-americano, e Robert Mills, americano, deram o primeiro grande passo em 1954, passo que conduziu à revolucionária teoria de campo de *gauge*. Explorando as simetrias geométricas já desenvolvidas pelos matemáticos, as álgebras de Lie, descobriram que, se se impusesse uma simetria desse tipo em cada ponto do espaço, era automaticamente exigido um novo campo. Isto era extraordinário: a imposição de uma simetria exigia a existência de um novo campo, que foi chamado «campo de Yang-Mills» ou «campo de *gauge*». *Gauge* significa «padrão de medida» e a simetria de Yang-Mills significava que se podia escolher uma *gauge* diferente em cada ponto do espaço.

Como pode uma simetria, como a simetria de rotação de um disco em torno do seu eixo, exigir a existência de um campo? Para compreender este facto sem matemática, imaginemos uma folha de papel plana infinita, que vamos pintar em vários tons de cinzento, que vão desde o branco até ao negro. Para decidir o tom de cinzento que vamos utilizar temos um disco que pode rodar em torno do seu eixo e que tem marcados, ao longo do seu perímetro, os números de 1 a 12, como um relógio; assim, podemos determinar quanto é que o disco foi rodado (ele tem um ponteiro, tal como um relógio). Se o ponteiro indica 12, devemos pintar a folha de branco; 3

corresponde a um cinzento intermédio; 6 é negro; 9 é de novo o cinzento intermédio; e voltando a 12, temos de novo o branco. À medida que rodamos o disco vamos passando continuamente por todos os tons de cinzento possíveis.

Suponhamos que regulamos o ponteiro para 4 e pintamos a folha de cinzento-escuro. Como a folha de papel tem um tom uniforme, não podemos identificar a região local da folha em que estamos, se olharmos apenas para ela. Matematicamente, diríamos que a folha possui uma invariância global: se nos deslocarmos globalmente sobre ela, a sua aparência não muda. Esta invariância é, evidentemente, indiferente ao tom de cinzento escolhido: podíamos ter regulado o ponteiro para o 2 em vez de para o 4.

No contexto desta imagem, a ideia de uma simetria de *gauge* pode ser facilmente entendida. Suponhamos que nos movemos sobre a folha, levando connosco o disco. À medida que nos movemos, rodamos continuamente o ponteiro do disco da forma que quisermos, e a posição do ponteiro em cada ponto indica o tom de cinzento de que esse ponto deve ser pintado. No fim olhamos o resultado: a folha não é já uniforme; ela tem todos os tons de cinzento, desde o branco ao negro, em diferentes zonas; já não é globalmente invariante.

No entanto, a invariância perdida pode ser restaurada se sobrepusermos à nossa folha de papel pintada uma outra folha de plástico transparente com os tons de cinzento exatamente complementares aos da folha em pontos correspondentes: quando o papel é mais escuro, o plástico é mais claro e vice-versa. A

combinação resultante é de novo uniforme: a simetria global é recuperada.

Nesta imagem, a folha de papel corresponde a um campo quântico. Recorde-se que descrevemos um campo quântico em termos de um reticulado tridimensional de molas; teríamos de imaginar a pintura destas molas tridimensionais em lugar da folha bidimensional. Regular o ponteiro para uma dada posição é equivalente a escolher uma *gauge* e rodar o ponteiro do disco à medida que nos deslocamos corresponde àquilo que os físicos chamam «transformação local de *gauge*». Podemos imaginar simetrias mais complexas do que a do disco: a rotação de uma esfera em torno de três eixos diferentes seleciona cores diferentes para o reticulado tridimensional de molas. A folha de plástico que restabelece a invariância é o campo de Yang-Mills; ele compensa exatamente a liberdade de rodar o disco ou a esfera em cada ponto do espaço.

Mesmo a nossa imagem simples permite transmitir a ideia principal: o campo de Yang-Mills, ou de *gauge*, é necessário para restabelecer a invariância se quisermos conservar a liberdade de realizar uma rotação de *gauge* em cada ponto do espaço. A cada grau de liberdade da rotação de *gauge* — um para rotações de um disco, três para uma esfera — corresponde um campo de *gauge*, de forma que um campo de *gauge* pode ter múltiplos componentes. A ideia do campo de *gauge* de Yang-Mills colocava assim o conceito de simetria num plano ainda mais fundamental do que o de campo: os campos de *gauge* eram consequências de simetrias.

Como é que os outros físicos utilizavam este desenvolvimento? Muitos físicos teóricos admiravam a beleza geométrica do conceito de campo de *gauge*, mas não faziam a menor ideia da forma como ele se poderia aplicar ao mundo das partículas quânticas que tentavam compreender; para eles, era belo, mas inútil.

A teoria de campo de Yang-Mills era, de alguns pontos de vista, semelhante aos trabalhos sobre geometria do matemático do século XIX Bernard Riemann, que generalizaram a ideia de espaço plano para a de espaço curvo. Os físicos não faziam a menor ideia de como se poderia aplicar a geometria riemanniana à física, até que Einstein a utilizou na sua teoria da relatividade generalizada.

Os físicos desejariam que o conceito de campo de *gauge* fosse utilizado pela natureza porque, tal como a geometria riemanniana, estava baseado num conjunto extremamente belo de ideias, e à natureza devia ser conferida a utilização da matemática mais maravilhosa. Mas havia dois grandes obstáculos no modo de aplicar as teorias de *gauge* à física. O primeiro destes obstáculos era que a simetria dos campos de *gauge* parecia implicar que estes tinham de ter longo alcance e atingir distâncias macroscópicas. Os únicos campos que tinham esta propriedade eram o eletromagnético e o gravitacional, e estes campos já eram explicados pelas teorias de campo conhecidas. Sendo assim, onde estavam os campos de *gauge* na natureza? O segundo obstáculo era que ninguém sabia como construir uma teoria quântica matematicamente consistente a partir dos campos de *gauge* e aplicar em seguida o processo de renormalização, que tão bons resultados dava na eletrodinâmica quântica. Surgiram novas quantidades infinitas, não ultrapassáveis

pelo velho processo de renormalização, quando os físicos teóricos tentaram quantizar o campo de *gauge*.

Foram necessários vinte anos para que os físicos teóricos conseguissem ultrapassar estes dois obstáculos. Mas, quando eles foram ultrapassados, no início dos anos 70, começou uma nova revolução na física: a revolução das teorias dos campos de *gauge*. Hoje em dia, os físicos creem que todas as interações fundamentais — as interações forte, eletromagnética, fraca e gravitacional — se baseiam em campos de *gauge*. Os glúons destas interações são os *quanta* associados aos campos de *gauge*.

O primeiro problema consistia na razão pela qual não eram observados campos de *gauge* se a simetria de Yang-Mills entrava realmente na descrição do mundo físico. Os físicos descobriram que uma simetria podia ser quebrada, de modo que as diferentes componentes do campo de *gauge* podiam manifestar-se de formas muito diferentes. Esta ideia de uma «simetria de *gauge* espontaneamente quebrada» foi aplicada com sucesso à construção de uma teoria de campo de *gauge* para os glúons fracos. Como segunda resposta para esta pergunta, os físicos descobriram que, se as simetrias de *gauge* permanecessem exatas, os seus campos associados permaneceriam completamente ocultos ou confinados no interior de outros *quanta*. Pensou-se que estes campos de *gauge* confinados seriam os glúons «coloridos», portadores da interação forte. Deste modo, a razão pela qual não se observam na natureza as simetrias dos campos de *gauge* é que, ou essas simetrias são quebradas, ou, se o não são, permanecem ocultas.

Houve grandes avanços no conceito de quebra de simetria em meados da década de 1960; a ideia básica era bastante simples. As equações que descreviam as interações dos campos de *gauge* com outros campos tinham de possuir a simetria de Yang-Mills, mas a solução das equações não. Como são as soluções das equações que descrevem o mundo real, a simetria de *gauge* não tinha de se manifestar diretamente. Os físicos referem-se a essas soluções assimétricas como «simetria espontaneamente quebrada» — é como a simetria de uma pirâmide humana de acrobatas: é simétrica, mas não estável. A tendência natural — e é isso que é interessante — é para haver uma quebra espontânea de simetria.

Foi a ideia de uma quebra espontânea da simetria que levou Steven Weinberg e Abdus Salam a construir, em 1967, uma teoria de campos de *gauge* para a unificação das interações eletromagnética e fraca; esta teoria tornou-se o paradigma de todas as futuras teorias de campo unificado. Muitas das ideias utilizadas na formulação desta teoria de campo unificado eram já conhecidas, conforme comentou Weinberg: «Neste ponto somos imediatamente conduzidos a um antigo tipo de simetria sugerido algures nas profundezas do passado por Schwinger e Glashow, mais tarde por Salam e Ward, e por mim ressuscitada no artigo de 1967.» Pela primeira vez, Weinberg e Salam mostraram como esta ideia de quebra de uma simetria de *gauge* podia conduzir a uma teoria de campo com consequências experimentais corretas. Glashow, Weinberg e Salam partilharam o Prémio Nobel de 1979 pelo seu trabalho.

A ideia básica desta notável teoria de campo é a de que é a quebra espontânea de uma simetria que dá origem à diferença entre as interações eletromagnética e fraca. Na situação simétrica há quatro glúons desprovidos de massa. Mas, após a quebra espontânea de simetria, apenas um destes glúons permanece sem massa; esta partícula é identificada com o fóton, portador da interação eletromagnética. Os outros três glúons adquirem uma enorme massa, uma centena de vezes superior à do próton. Estes são os glúons portadores da interação fraca, geralmente chamados W^+ e W^- , duas partículas de igual massa e de cargas elétricas simétricas, e Z^0 , um glúon fraco eletricamente neutro. As diferentes massas dos quatro glúons inicialmente desprovidos de massa refletem a quebra de simetria. Steven Weinberg resumiu assim esta ideia:

Mesmo que uma teoria postule um elevado grau de simetria, não é necessário que [...] os estados das partículas possuam essa simetria [...] Nenhuma ideia na física me parece tão promissora como a de ser possível uma teoria possuir um alto grau de simetria que está oculto no plano da nossa vida normal.

Como é que uma simetria se pode quebrar espontaneamente? Abdus Salam dá o seguinte exemplo: suponhamos que se convidam pessoas para jantar a uma mesa redonda. Em cada lugar há um guardanapo, colocado entre os pratos de jantar. Se não conhecêssemos as regras sociais, poderíamos pensar que o nosso guardanapo é tanto o que está à nossa esquerda como o que está à nossa direita: a situação é simétrica. No entanto, se um dos convidados escolhe o guardanapo que está à sua direita, todos os outros devem fazer o mesmo. A simetria esquerda-direita é assim

«quebrada espontaneamente». A simetria do modelo de Weinberg-Salam é mais complexa, mas a ideia é semelhante: a solução de equações simétricas pode ser assimétrica. A assimetria é responsável pelas diferentes massas dos glúons e pela diferença de intensidades entre as interações eletromagnética e fraca.

Os glúons não poderiam, sozinhos, quebrar espontaneamente a simetria e adquirir diferentes massas. O modelo de Weinberg-Salam introduziu outro *quantum* chamado «partícula de Higgs», devido a Peter Higgs, o físico teórico que mais cedo se apercebeu da sua importância no processo da quebra espontânea de simetria. A partícula de Higgs é como a pessoa que empurra a pirâmide simétrica de acrobatas, ou que é a primeira a escolher um guardanapo: o seu papel é quebrar a simetria perfeita. Portanto, além dos glúons fracos, o W^+ , o W^- e o Z^0 , têm de existir partículas de Higgs, e muitos físicos teóricos estão convictos de que todas estas partículas hipotéticas serão descobertas assim que forem construídos aceleradores capazes de atingir a energia necessária para a sua criação. Essa será uma tarefa para a física experimental dos anos 80².

A teoria de Weinberg e Salam mostrou aos físicos como as ideias geométricas da simetria de *gauge* podiam ser utilizadas para resolver um problema real de física: a unificação das interações eletromagnética e fraca. Mas, quando o seu trabalho foi publicado, quase ninguém prestou atenção. Como é que isso pôde suceder? Ele não foi ignorado pelo facto de Weinberg e Salam serem físicos obscuros; eles eram já bem conhecidos por outros trabalhos. A razão pela qual o seu trabalho foi ignorado foi que o segundo grande

obstáculo para que as teorias de simetrias de *gauge* funcionassem, a inexistência de um processo de renormalização, não tinha sido ultrapassado. Muitos físicos pensaram que, se se quisessem calcular processos quânticos nesse modelo, surgiria toda a espécie de quantidades infinitas e a teoria tornar-se-ia absurda. Esta desagradável situação não tardaria a alterar-se.

O primeiro grande avanço surgiu em 1969, com os trabalhos dos físicos matemáticos soviéticos Ludwig Faddeev e V. N. Popov, que desenvolveram uma nova e poderosa técnica matemática para descrever matematicamente o problema quântico para teorias de campos de *gauge*. Prolongando o seu trabalho, um jovem físico holandês chamado Gerard't Hooft mostrou em 1971, por cálculos diretos, a forma como modelos de teorias de campo do tipo da de Weinberg-Salam eram renormalizáveis — e aí começou o entusiasmo. A prova formal de que a teoria de campo de Yang-Mills era renormalizável surgiu em 1972, da autoria do físico americano Benjamim W. Lee, em colaboração com o físico francês Jean Zinn-Justin. Estes desenvolvimentos matemáticos colocaram o processo de renormalização para teorias de campo de *gauge* de Yang-Mills a par com o da teoria eletromagnética. O obstáculo final para a construção de teorias de campos de *gauge* realistas tinha sido afastado e a revolução das teorias de campos de *gauge* estava a caminho.

Com o conceito de campo de *gauge* firmemente estabelecido na teoria unificada das interações fraca e eletromagnética, os físicos teóricos tentaram aplicá-lo a outra das quatro interações fundamentais: a interação forte. Os físicos experimentais tinham já

confirmado que os hádrões (as partículas que podem interagir através da interação forte) eram constituídos por *quarks*. Mas o que é que ligava os *quarks* entre si no interior dos hádrões? E aqui cintilou na mente dos físicos teóricos a ideia dos campos de *gauge*: porque não ligar os *quarks* entre si através de um novo conjunto de glúons cuja existência fosse requerida por uma simetria de *gauge*? A exploração desta ideia conduziu à criação da teoria de campo de *gauge* para a interação forte, chamada «cromodinâmica quântica».

A ideia básica da cromodinâmica quântica é a de que cada *quark* tem um novo tipo de carga — uma carga de «cor». Os *quarks* não são, na realidade, coloridos; esta é apenas uma forma de os físicos visualizarem as três novas cargas atribuídas aos *quarks*. Em vez de um só *quark up* havia agora *quarks up* vermelho, *up* azul e *up* amarelo — as três cores primárias. A introdução destas três cargas suplementares permitiu aos físicos postular uma nova simetria entre os *quarks*: uma simetria de cor. Esta simetria era semelhante à simetria rotacional de uma esfera no espaço tridimensional: cada uma das três direções espaciais correspondia a uma das três cores primárias: vermelho, azul e amarelo. Se a esfera fosse rodada, as três diferentes cores misturar-se-iam e a simetria de cor perfeita significava que as três cores primárias tinham de ser misturadas em partes iguais. Uma mistura das três cores primárias em partes iguais produz branco — uma composição incolor. A exigência de uma invariância de cor implicava que apenas pudessem existir as combinações de *quarks* coloridos para as quais a mistura das cores desse um resultado incolor. Estas combinações incolores de *quarks* coloridos (os antiquarks possuem as cores complementares às cores primárias) correspondem exatamente aos hádrões

observados. A invariância exata de cor reproduzia as regras para construir os hádrões a partir dos *quarks*!

Era agora clara a forma de aplicar a ideia da simetria de *gauge* de Yang-Mills à interação forte. Postulava-se que a simetria de cor dos *quarks* era uma simetria exata; isto implicava a existência de oito glúões coloridos, semelhantes ao fóton, que se acoplam às cargas de cor dos *quarks*. Mas, contrariamente ao fóton, que, por não possuir carga elétrica, não se acopla a si próprio, os oito glúões coloridos interagem entre si. Os glúões coloridos interagem não só com os *quarks*, mas também entre si! Os glúões coloridos são a verdadeira origem da interação forte.

De acordo com a cromodinâmica quântica, a física das interações fortes resume-se ao acoplamento entre as cargas de cor dos *quarks* e os oito glúões coloridos; toda a complexidade dos hádrões pode ser explicada por esta ideia das simetrias de *gauge*. Os glúões coloridos proporcionam as ligações que encerram os *quarks* no interior dos hádrões, de forma que as cargas de cor estão permanentemente confinadas. Os *quarks*, como são coloridos, estão confinados. Os oito glúões, como são coloridos, estão também confinados. Apenas os hádrões, que são combinações incolores de *quarks* coloridos e de glúões, podem existir como partículas isoladas, e é justamente isso aquilo que observamos no mundo real. Se esta ideia está correta — e há cada vez mais provas de que está —, toda a física das interações fortes é devida a forças completamente ocultas. O filme a três dimensões dos hádrões é a preto e branco; mas, se espreitarmos para dentro dos hádrões, para os *quarks*, o filme é a cores.

Vemos assim que a natureza utilizou realmente a belíssima matemática das simetrias dos campos de *gauge* de duas formas diferentes. No caso da teoria de campo de *gauge* das interações fraca e eletromagnética, ou modelo de Weinberg-Salam, a natureza quebrou a simetria de *gauge* exata de uma forma elegante. Neste caso, os *quanta* do campo de *gauge* (o fóton e os glúons fracos) podem ser diretamente observados. A outra forma segundo a qual a natureza utilizou as teorias de campo de *gauge* foi na interação forte responsável pela coesão interna dos *quarks*, em que a simetria de *gauge* de cor permanece exata, mas completamente oculta. Todos os objetos coloridos, *quarks* e glúons, se ligam permanentemente no interior de hádrões incolores. A invenção destas teorias de campo e a sua aplicação assinalaram o primeiro triunfo da revolução dos campos de *gauge*.

Esta revolução é um exemplo da fecundação mútua entre a matemática pura e a física. Os princípios de simetria abstratos foram inventados por matemáticos que mal podiam antever a sua aplicação aos problemas mais fundamentais da física. Podem ser dados outros exemplos desta fecundação mútua: Newton, para resolver problemas físicos, inventou o cálculo diferencial e integral, que os matemáticos depois desenvolveram. Mas por que existe uma relação entre a matemática e a física? A matemática é uma invenção humana inspirada pela nossa capacidade inata para lidar precisamente com ideias abstratas, enquanto a física trata do mundo material, algo que não é de forma alguma criado por nós. A ligação entre a nossa lógica interna e a lógica da criação material parece não ser estritamente necessária.

Aplicando as elegantes simetrias matemáticas, os físicos aprenderam uma nova lição sobre o mundo natural: as simetrias implicam interações; e, o que não deixa de ser impressionante, essas interações são justamente aquelas que se observam nos laboratórios de física das altas energias. A revolução das teorias dos campos de *gauge* proporcionou aos físicos indicações profundas sobre a estrutura da realidade material: todos os glúões que transportam as interações são consequências de simetrias de *gauge*. Um desses glúões, o fóton — a própria luz —, é também consequência da simetria. Se pudéssemos regressar ao início dos tempos, à bola de fogo primordial de *quarks*, leptões e glúões, quando as simetrias de *gauge* não tinham ainda sido quebradas, em lugar de *Fiat lux* — «Faça-se a luz» — poderíamos ouvir «Faça-se a simetria».

¹ S provém do termo inglês *scattering*, que poderíamos traduzir por «dispersão » ou «difusão», ou, talvez melhor, por «espalhamento». No fundo, representa uma abordagem teórica mais fenomenológica do problema das colisões entre hádrons. (N. do T.)

² Conforme foi já anteriormente referido, foram descobertas no CERN, em 1983, as partículas W^+ , W^- e Z^0 . A partícula de Higgs permanece até hoje um enigma, quer teórico quer experimental: ainda não foi detetada e os próprios teóricos não sabem em que zona de energia ela deve ser procurada. No entanto, dado o sucesso do modelo de Weinberg-Salam, há poucas dúvidas de que ela existe. (N. do T.)

CAPÍTULO 24

O Decaimento do Protão

Devemos lembrar-nos [...] de que os princípios básicos da física teórica não podem ser aceites *à priori*, por muito convincentes que pareçam; em lugar disso, devem ser justificados a partir de experiências relevantes.

GERALD FEINBERG e MAURICE GOLDHABER (1959)

Muitos físicos gostam do ar livre. Alguns são colecionadores de cogumelos, outros observam os pássaros, outros ainda são alpinistas amadores cuja conceção de fim-de-semana repousante é escalar uma montanha. Alguns cursos de Verão e centros de investigação de física estão localizados perto de áreas montanhosas. Nunca vi impulsos recreativos tão uniformes noutras profissões, observação que pode motivar uma especulação sobre as relações entre a investigação em física e o alpinismo.

As pessoas nem sempre gostaram das montanhas. Apenas há algumas centenas de anos, as montanhas eram consideradas lugares horríveis e monstruosos que enchiam as pessoas de terror e medo. Os habitantes das montanhas eram vistos como horrendos demónios, como seres infra-humanos. Mas esta atitude deu lugar à atitude oposta, especialmente por causa dos escritores e pintores românticos do século XIX. Na perspetiva dos românticos, as montanhas eram lugares de beleza impossível, onde a claridade da

luz e a solitária grandeza dos altos picos abriam o coração do homem. Um alpinista tornava-se a imagem da inteligência consciente que desafia a eterna indiferença das forças da natureza. Confrontados com essas forças da natureza, a única coisa que nos pode valer é a vontade que faz mover os nossos membros. Apenas essa vontade é verdadeiramente nossa.

O alpinismo é análogo ao processo de investigação em física teórica. Ao trabalhar num problema de física, nunca se pode estar certo de atingir um resultado, porque há muitas indicações falsas e perigos imprevistos. De igual forma, no alpinismo não há a certeza de se atingir o cume da montanha; o caminho é muitas vezes desconhecido e atingem-se por vezes falsos cumes. Mas o importante é que, se chegarmos ao cimo, a vista é grandiosa. Não há comparação entre o que se vê perto do cume da montanha e o que se vê mesmo no topo. Acontece o mesmo com a resolução de um problema importante na física: a perspetiva que se obtém é enorme.

No decurso da última década foi resolvido um importante problema de física teórica: a quantização das teorias de campos de *gauge* e a aplicação destas teorias à dinâmica dos *quarks* e leptões. Foi esta a revolução das teorias de *gauge*. Uma consequência da resolução deste problema foi que os físicos aprofundaram a sua perspetiva sobre a estrutura fundamental da matéria. A partir deste pico podemos ver a unificação de todas as forças da natureza. Só o tempo pode dizer se se trata de um falso cume; por agora podemos desfrutar a vista.

De acordo com estas descobertas, os habitantes fundamentais do universo são os leptões e os *quarks*. As interações entre eles são mediadas por glúons, que são *quanta* que podem ser deduzidos a partir de uma simetria de *gauge* de Yang-Mills. Quatro glúons, o fóton e os W^+ , W^- e Z^0 , são os responsáveis pelas interações eletromagnéticas e fracas entre *quarks* e leptões. Oito glúons coloridos são responsáveis pela força forte que confina permanentemente os *quarks* no interior dos hádrons.

Os físicos teóricos tinham desenvolvido duas teorias para descrever as interações de *quarks*, leptões e glúons: a teoria de Weinberg-Salam, que unificava as interações eletromagnética e fraca, e a cromodinâmica quântica, a teoria dos glúons e *quarks* coloridos. Ambas estas teorias estavam baseadas no princípio da simetria de *gauge*. Os físicos foram imediatamente tentados a encontrar uma única simetria de *gauge* que integrasse tanto a teoria de Weinberg-Salam como a cromodinâmica quântica: uma grande teoria unificada das interações eletromagnética, fraca e forte. Não levaram muito tempo a descobrir uma. A teoria mais simples que unifica estas interações foi sugerida por dois físicos de Harvard, Howard Georgi e Sheldon Glashow, em 1977, e baseia-se numa única simetria de *gauge* do tipo Yang-Mills. A ideia fundamental da sua teoria, que já tinha sido sugerida antes do seu trabalho, é a de conferir o mesmo estatuto a *quarks* e leptões antes da quebra espontânea de simetria. A simetria de Yang-Mills que eles postularam dava origem a um conjunto de vinte e quatro glúons que interagiam com todos os *quarks* e leptões de forma simétrica. Esta simetria foi então quebrada por etapas. Na primeira etapa, doze dos vinte e quatro glúons adquiriram uma enorme massa. Eles

são chamados «gluões superpesados» e são bilhões de bilhões de vezes mais pesados do que o próton, de tal forma que nenhum acelerador poderá alguma vez criá-los. Os outros doze gluões correspondem aos quatro gluões do modelo de Weinberg-Salam e aos oito gluões coloridos da cromodinâmica quântica. A segunda etapa da quebra de simetria segue o padrão do modelo de Weinberg-Salam, no qual três dos quatro gluões — os gluões fracos — adquirem uma massa cerca de cem vezes superior à massa do próton, enquanto o fóton permanece desprovido de massa, tal como os oito gluões coloridos. Assim, o resultado final desta grande teoria unificada dos *quarks* e léptons corresponde ao mundo em que vivemos.

À primeira vista, este esquema de unificação das várias forças, sob a égide de uma única simetria espontaneamente quebrada, parece ser um mero exercício intelectual. A principal consequência da unificação das interações parece ser a existência de doze novos gluões superpesados que nunca poderão ser detetados; qual poderá ser a sua relevância? O que é facto, porém, é que existe uma consequência observável deste esquema de unificação das interações, uma consequência importante que entusiasma os físicos. Os gluões superpesados produzem interações que desestabilizam o próton, constituinte essencial do núcleo atómico.

Durante muito tempo, os físicos pensaram que o próton era absolutamente estável e não se podia desintegrar em partículas mais leves. Alguns pensaram até que a estabilidade do próton era um princípio básico da física teórica, um conceito *à priori*. A razão para esta confiança cega na estabilidade do próton pode ser

compreendida se recordarmos o facto de o protão ser o mais leve barião, sendo, portanto, constituído por três *quarks*; assim, ele deve ser estável porque não há nada mais leve em que os *quarks* possam decair. O protão é o produto final de todos os decaimentos dos bariões; até o neutrão, quando isolado, isto é, fora do núcleo, decai num protão.

Mas os glúões superpesados alteraram este estado de coisas, pois possuem características que nenhum dos outros glúões possui: eles podem transformar *quarks* em leptões. Isto significa que um dos *quarks* do protão se pode transformar num leptão, e o protão pode assim decair. Um modo de decaimento esperado para o protão (p) é que ele decaia num pião neutro (π^0) e num positrão (e^+), de acordo com o esquema $p \rightarrow \pi^0 + e^+$. Como a massa dos novos glúões superpesados é incrivelmente grande, a probabilidade de tal decaimento é extremamente pequena, mas não é nula. O tempo de vida do protão foi calculado pelos físicos teóricos utilizando a ideia de grande unificação, tendo sido concluído que é cerca de 1000 vezes superior ao limite inferior de 10 biliões de biliões de biliões (10^{28}) de anos que os experimentalistas tinham estabelecido para a vida média do protão. A previsão dos físicos teóricos de que o protão pode de facto decair conduziu os seus colegas experimentalistas a melhorar as suas experiências e a pesquisar mais profundamente o decaimento do protão. Estão agora a preparar-se experiências mais exatas, que detetarão o decaimento do protão mesmo que ele seja 1000 vezes menos frequente do que o anterior limite experimental. Se as teorias de *gauge* de grande unificação estão corretas, estas novas experiências deveriam observar o decaimento do protão.

Suponhamos que as ideias das teorias de grande unificação estão corretas e que os físicos experimentais acabarão por observar o decaimento do protão. O que é que isto significa? As implicações mais profundas são sobre a cosmologia; o decaimento do protão é o dobre a finados pelo universo. A maioria da matéria visível do universo — as estrelas, as galáxias, as nuvens de gás interestelar — é feita de hidrogénio, e o núcleo do átomo de hidrogénio é um único protão. Se o protão decai, então a própria substância do universo está lentamente a apodrecer, como que sofrendo de um cancro que afeta a própria matéria. Este apodrecimento da matéria, de acordo com estas teorias de grande unificação, levará um tempo extremamente longo: cerca de 1000 biliões de biliões (10^{21}) de vezes a idade atual do universo. Teremos muito tempo para explorar o universo antes de ele desaparecer.

A instabilidade do protão ajuda a explicar uma característica do universo — o facto de ele ser constituído em grande parte por matéria, e não por uma mistura igual de matéria e antimatéria. Seria muito agradável ao nosso sentido de simetria o existirem iguais quantidades de matéria e de antimatéria no universo; mas isto não parece acontecer. Como é que sabemos que as galáxias muito afastadas não são feitas de antimatéria? O problema em supor que existem iguais quantidades de matéria e de antimatéria no universo está em que, apesar de as galáxias de antimatéria estarem hoje muito afastadas da nossa, de acordo com a teoria do *big-bang*, elas deveriam estar muito próximas quando as galáxias se condensaram a partir da explosão primordial. As galáxias de matéria ter-se-iam aniquilado com as galáxias de antimatéria e o resultado global seria que hoje não existiriam quaisquer galáxias.

O universo parece, portanto, ser constituído principalmente por matéria, e não por uma mistura de matéria e antimatéria.

Se o protão é instável, parece ser possível existir uma simetria entre matéria e antimatéria na origem do universo, e o nosso sentido de simetria é assim restabelecido, facto sublinhado pelo físico soviético Andrei Sakharov ainda antes de as teorias de grande unificação poderem prever a instabilidade do protão. Se o protão é instável, isso significa não só que ele pode decair, como também que o processo inverso é possível: o protão pode ser construído a partir de outros *quanta*. Provavelmente, sob condições especiais, sintetizaram-se mais protões do que antiprotões na bola de fogo do *big-bang*, explicando assim o facto de o universo ser hoje constituído essencialmente por protões, e não por uma mistura, em partes iguais, de protões e de antiprotões.

A descoberta das teorias de *gauge* de unificação das interações eletromagnética, fraca e forte teve um grande impacto na cosmologia, especialmente na descrição dos primeiros minutos da criação do universo. Uma forma de imaginar a unificação das três interações é voltar ao início dos tempos, à altura do *big-bang*. A bola de fogo primordial era uma mistura de todos os *quarks*, leptões e gluões a enormes temperaturas, o que correspondia a energias ultraelevadas. A muito altas energias não existe distinção entre as interações eletromagnéticas, forte e fraca; elas estão todas unificadas e têm a mesma intensidade. As interações eram todas simétricas e iguais na altura da criação, mas, à medida que a bola de fogo se expandia, as temperaturas começaram a baixar e a simetria exata das interações quebrou-se espontaneamente. Com a

quebra da simetria tornaram-se visíveis as diferentes interações: em primeiro lugar, os glúões superpesados tornaram-se distintos dos glúões fracos e, em seguida, estes tornaram-se distintos do fóton e dos glúões coloridos, todos estes desprovidos de massa. Apenas estas partículas sem massa, o fóton e os glúões, nos recordam esse mundo de simetria perfeita. Esta quebra de simetria pode ser encarada como um «congelamento» das várias interações à medida que o arrefecimento do universo ia prosseguindo. O nosso universo de hoje é o fóssil gelado desses acontecimentos impressionantes.

Esta unificação das interações, apesar de nos ter proporcionado uma visão maravilhosa sobre a origem do universo, levanta novas perguntas. São estes os problemas com que os físicos teóricos se defrontam na década de 1980.

Os físicos não fazem a menor ideia da razão pela qual os *quarks* e os léptões existem. Os glúões, pelo contrário, puderam ser deduzidos a partir de uma simetria fundamental — a simetria de *gauge* de Yang-Mills. Mas não existe uma tal simetria no caso dos *quarks* e dos léptões; não sabemos por que é que a natureza os criou. Esta é, mais uma vez, a pergunta de Rabi: «Mas quem é que encomendou isto?» Têm sido feitas tentativas de unificar *quarks* e léptões postulando uma simetria muito grande, mas estes grandes grupos de simetria são tão difíceis de manejar que muitos físicos os consideram deselegantes. Como disse um teórico, «Se Deus escolheu realmente um destes grandes grupos de simetria, então Ele não é subtil, mas sim malicioso». O problema básico é que existem demasiados *quarks* e léptões para que todos eles possam

ser fundamentais. Talvez os *quarks* e os leptões não constituam o tal «nível último». A ideia de que eles possam ser objetos compostos está agora a ser explorada, mas sem grande sucesso.

Um problema relacionado com este é o da origem das massas dos *quarks* e dos leptões. Os *quarks* e leptões têm massas diferentes, que podem ser experimentalmente determinadas; mas ninguém faz a menor ideia da razão pela qual elas têm o valor que têm. Por exemplo, o *quark down* é ligeiramente mais pesado do que o *quark up*. Ninguém sabe porquê.

Temos descrito teorias de campo que unificam três interações: as interações forte, eletromagnética e fraca. Mas há quatro interações fundamentais! O que se passa com a gravidade? A gravidade é a mais misteriosa das quatro interações. Apesar de o gravitão, o *quantum* de gravidade, ser também consequência de uma simetria de *gauge*, os físicos não conseguiram construir uma teoria de campo unificado que inclua a gravidade. Ironicamente, foi a gravidade que Einstein tentou unificar com a interação eletromagnética nos anos 30. Einstein não teve êxito, e este problema está ainda em aberto. No entanto, houve recentemente um apreciável progresso. Os físicos conseguiram prolongar a teoria da gravidade de Einstein (a relatividade generalizada) edificando uma nova teoria, chamada «supergravidade», que, para lá do gravitão, possui um novo *quantum* gravitacional chamado «gravitino». Os físicos teóricos estudam atualmente as teorias de supergravidade para tentar resolver o último (e o primeiro) dos problemas da unificação das quatro interações: a gravidade.

Provavelmente serão necessários novos conceitos fundamentais antes de se resolver este problema.

As teorias de grande unificação ainda são especulativas e permanecem por provar, nomeadamente por meio do decaimento do protão. Mas, se estiverem certas, representam um enorme passo em frente na tentativa de compreender o universo. A vista que os físicos conseguem ter a partir do cume destas teorias de campo unificado permite-lhes ver o início do universo e o *big-bang*. A compreensão da origem do universo é o maior desafio intelectual posto às ciências físicas; o conhecimento de como tudo foi criado levar-nos-á às fronteiras da física e, provavelmente, a uma nova concepção da realidade.

CAPÍTULO 25

O Quantum e o Cosmo

O esforço para a compreensão do universo é uma das muito poucas coisas que elevam a existência humana um pouco acima do nível da farsa e lhe dão algo do encanto da tragédia.

STEVEN WEINBERG

As origens e os destinos são algumas das maiores preocupações humanas. Todas as crianças fazem perguntas aos pais sobre o seu nascimento e morte. Mas, mesmo quando tentamos responder a essas perguntas, estamos condicionados pela história das comunidades humanas e pela história natural do nosso planeta. Qual é a origem do Sol e da Terra e qual será o seu fim? À medida que nos interrogamos sobre as nossas origens e o nosso fim, aproximamo-nos do problema análogo para as estrelas, para as galáxias e para o universo: «Quem o encomendou? De onde é que surgiu? Como é que terminará?».

Todas as civilizações abordaram estas perguntas, tentando responder-lhes em função da sua experiência. As respostas a estas perguntas são muitas vezes os temas dos mitos e o conteúdo da religião, tal como são celebrados na tradição de qualquer comunidade humana. Mas a nossa civilização dá valor à aquisição e à exploração do conhecimento enquanto bem essencial e, portanto, para responder a estas perguntas, devemos voltar-nos para a

ciência. Aqui tomamos conhecimento de que aquilo que a ciência experimental nos pode ensinar sobre o universo está limitado pela tecnologia existente. Apenas podemos conhecer aquilo que os nossos instrumentos podem revelar.

Depois da segunda guerra mundial surgiram, pelo menos, dois grandes desenvolvimentos tecnológicos que influenciaram estes problemas. O primeiro foi o desenvolvimento dos radiotelescópios e dos sistemas eletrónicos auxiliares que exploram componentes do espectro eletromagnético até aí invisíveis. O segundo foi o advento da física nuclear e da física das partículas elementares enquanto ciências experimentais. Estes avanços tecnológicos e científicos ajudaram-nos muito a estabelecer a atual concepção sobre a origem do universo, de tal forma que há apenas dez anos era impossível contar a história do *big-bang* tal como a conhecemos hoje. Pode dizer-se com segurança que aprendemos mais sobre a origem do universo nos últimos dez anos do que nos séculos anteriores.

A forma como os cientistas abordam o problema da origem do universo pode ser imaginada considerando um julgamento em tribunal. A razão pela qual é necessário um julgamento neste ramo da ciência é que há só um universo e a sua criação é única. Os cientistas não podem provar a sua teoria no próprio local porque o acontecimento em questão é único e está terminado. A origem do universo é como um crime que ocorreu no passado; já não está a acontecer e tudo aquilo que os cientistas podem fazer é reunir provas que indiquem o que se passou e tirar as melhores conclusões possíveis. O juiz poderia ser um antigo diplomata da ciência que não tivesse interesses dependentes do resultado do julgamento. O

júri é constituído por representantes das várias profissões científicas. Aquilo que está em julgamento são as várias teorias sobre a origem do universo. Os advogados, na sua maioria físicos teóricos e astrofísicos, apresentam os seus argumentos a favor de uma conceção específica da criação, chamando as suas testemunhas, os físicos experimentais, a depor; estes apresentam os seus dados.

Algumas pessoas defendem que nem sequer há necessidade de julgamento: não houve criação do universo; ele sempre existiu no estado em que o vemos hoje. Este ponto de vista, que chegou a ser bastante defendido, representa o chamado «modelo do estado estacionário para o universo»: não há início nem fim; o universo é um eterno equilíbrio. A razão pela qual o modelo do estado estacionário podia ser defendido há uma década é que havia realmente pouquíssimos dados sobre a origem do universo. Mas hoje a situação é muito diferente.

A conceção atual da criação, chamada «modelo standard do *big-bang*», sustenta que todo o universo se originou numa enorme explosão. Toda a matéria — todas as estrelas e galáxias — esteve, no passado, concentrada numa região muito pequena, num caldo cósmico primordial. Este caldo de matéria expandiu-se rapidamente — explodiu. Ao fazê-lo, arrefeceu, permitindo que os núcleos, depois os átomos e, muito mais tarde, as galáxias se condensassem a partir dele. Esta explosão está em curso ainda hoje, com a diferença de que a temperatura do universo é agora muito menor. Contrariamente à nossa sensação de que os céus são imutáveis, o universo foi, e continua a ser, local de grandes mudanças.

Há dois grandes conjuntos de provas experimentais nos quais se apoia a cosmologia do *big-bang*.

O primeiro é a descoberta da expansão do universo por Edwin Hubble, em 1929-31. Ele observou que o desvio para o vermelho da luz que nos chega de galáxias longínquas é proporcional à sua distância. A sua conclusão baseia-se no facto de um átomo que se afasta de nós a alta velocidade, tal como um átomo de uma dessas galáxias, ter as suas linhas espectrais desviadas para a zona do vermelho — é simplesmente um desvio provocado pelo efeito de Doppler, como o desvio na frequência do apito de um comboio à medida que se afasta. Como o desvio para o vermelho é proporcional à velocidade, concluímos que a velocidade com que uma galáxia distante se afasta de nós e a distância a que se encontra são também proporcionais. A expansão uniforme do universo é certamente a conclusão mais simples que se pode extrair dos dados de Hubble. Todas as outras interpretações exigem um novo efeito exótico para o qual não há hoje quaisquer indicações.

A segunda grande descoberta experimental foi a da radiação cósmica de fundo de micro-ondas, descoberta por Arno A. Penzias e Robert W. Wilson, em 1964. Estes investigadores dos Bell Laboratories descobriram que o espaço vazio e negro do universo não é absolutamente frio; ele possui uma temperatura de 3 kelvin¹ acima do zero absoluto. Esta temperatura é devida a um banho de radiação de fótons que preenche todo o espaço. A distribuição de frequências, ou cores, desses fótons foi medida e coincide com a da curva de Planck para a radiação de um corpo negro a uma

temperatura de 3 kelvin. Neste caso, o corpo negro é todo o universo.

A interpretação desta radiação é a de que ela é um banho de calor deixado pelo *big-bang*, é como observar o calor das rochas que rodeiam um fogo de campo apagado e concluir que esteve acesa uma fogueira há pouco tempo. Houve uma altura em que o universo era um caldo de matéria concentrada, a temperaturas de bilhões de graus. Nessa altura explodiu e foi arrefecendo até à temperatura atual em consequência da sua expansão. A sua temperatura continua ainda a baixar, mas agora muito lentamente. A existência desta radiação cósmica de fundo convenceu muitos dos cientistas do júri da correção do modelo do *big-bang*. O universo foi criado a partir de uma explosão; ele não existiu desde sempre.

Os astrofísicos e os cosmólogos construíram um modelo teórico da criação do universo. Eles começaram a contagem do tempo cerca de um centésimo de segundo depois da criação, porque, antes dessa altura, as temperaturas eram tão altas e as energias tão elevadas que seria necessário extrapolar para lá das teorias atuais da física das altas energias, o que seria muito especulativo. Após o primeiro centésimo de segundo, os físicos julgavam compreender a física que descreve a expansão suficientemente bem para dizer qual era a situação e qual a sua evolução.

No primeiro centésimo de segundo, a temperatura do caldo primordial era de 100 bilhões kelvin, um caldo bastante quente que consistia essencialmente de eletrões, positrões, fótons, neutrinos e antineutrinos. Estas partículas iam sendo continuamente criadas e

destruídas à medida que interagiam. A densidade e a temperatura deste caldo eram tão elevadas que era igualmente provável um elétron e um positrão aniquilarem-se, formando dois fótons, ou dois fótons colidirem, dando origem a um par elétron-positrão. Para lá destes elétrons, neutrinos e fótons havia ainda uma pequena contaminação de prótons e nêutrons, no caldo primordial, totalizando cerca de um bilionésimo do número de fótons. Atenção a esta pequena impureza do caldo, porque a partir dela se formarão todas as galáxias, estrelas e, em última análise, a Terra.

Depois de passado o primeiro décimo de segundo, o universo arrefeceu para cerca de 10 bilhões de kelvin; após catorze segundos, a temperatura era já de 1 bilhão de kelvin. Esta temperatura era suficientemente baixa para que fosse perturbado o equilíbrio entre fótons e neutrinos, por um lado, e elétrons e pósitrons, por outro; se os pósitrons se aniquilassem, não voltariam a ser criados. Tudo o que permanecia eram fótons, elétrons e neutrinos. Depois de passarem três minutos, a temperatura do universo baixou suficientemente (ou seja, as partículas tinham uma menor agitação) para que a pequena contaminação de prótons e nêutrons pudesse formar os núcleos. Os primeiros núcleos a serem formados foram os mais leves, os de deutério e de hélio. Utilizando as leis da física nuclear, os físicos podem calcular a quantidade de hélio e de outros elementos que foram desta forma produzidos e chegam à conclusão de que a quantidade de hélio produzida no *big-bang* é de cerca de 27% de toda a matéria do universo, o que está de acordo com os dados experimentais. Estes cálculos e o acordo com as observações conferiram grande credibilidade ao modelo do *big-bang*.

Somente após 100 000 anos — o universo já era então bastante velho — a temperatura era suficientemente baixa para que os eletrões se combinassem com os núcleos para formar átomos. Começaram a condensar-se grandes nuvens de matéria atômica proveniente da explosão, das quais se viriam a formar estrelas e galáxias. No interior das estrelas começaram a ser produzidos os elementos mais pesados, como o carbono e o ferro, através de um processo chamado «nucleossíntese». Depois de alguns biliões de anos, o universo era já bastante parecido com aquilo que é hoje. Agora tem uma idade que está entre os 10 e os 20 biliões de anos. A Terra, por seu lado, tem apenas entre 4 e 5 biliões de anos e a vida na Terra surgiu há cerca de 2,5 biliões de anos.

Tudo o que vemos à nossa volta são fósseis. Tal como as rochas profundas são fósseis cuja formação remonta à criação do nosso planeta, também os núcleos e os átomos são fósseis do *big-bang*. Houve uma altura em que eles foram criados: não existiram desde sempre. Nós somos um mundo fóssil, congelado a temperaturas muito baixas relativamente à temperatura do caldo de matéria primordial que deu origem a tudo.

Esta imagem da origem do universo é passível de algumas críticas sérias, mas relativas, em geral, aos pormenores, e não à ideia em si. Tal como o modelo heliocêntrico que Copérnico propôs para o sistema solar há séculos, o modelo do *big-bang* parece estar essencialmente correto. Com novas tecnologias experimentais prestes a entrar em funcionamento — o conjunto extremamente grande de antenas de rádio no Novo México² e o telescópio espacial —, o «modelo standard do *big-bang*» pode ser provado mais

profundamente. Podemos ter algumas surpresas, mas seria muito inesperado se fossem alteradas as características principais deste relato da criação.

Apesar da explicação qualitativa e quantitativamente muito satisfatória que o modelo do *big-bang* dá para o presente estado do universo, os físicos são tentados a olhar para lá do primeiro centésimo de segundo. Aqui têm de especular com base naquilo que sabem da física das altas energias e das ideias das teorias de unificação de campos de *gauge*.

Parece certo que havia prótons e neutrões no caldo primordial no primeiro centésimo de segundo, uma pequena contaminação. No primeiro milionésimo de segundo eles não poderiam ter existido. Os prótons e os neutrões são eles próprios fósseis, misturas congeladas de glúons e *quarks* coloridos. No primeiro milionésimo de segundo, especulam os físicos, o caldo era constituído pelas partículas fundamentais que hoje conhecemos, os léptons, os *quarks* e os glúons, em interação mútua. A temperaturas ainda mais elevadas, correspondentes a instantes anteriores, *quarks* e léptons podem ter-se transmutado uns nos outros — interações que nesses tempos «quentes» teriam criado a assimetria entre matéria e antimatéria e que hoje se manifestariam através da instabilidade do próton. A temperaturas mais elevadas e, portanto, em instantes ainda anteriores, toda a distinção entre as interações se perde; é um universo de simetria perfeita.

Como é que ocorreu este *big-bang*? Qual foi a origem do caldo primordial de *quarks*, léptons e glúons? De onde é que eles vieram?

Esta não é certamente uma pergunta a que os físicos possam responder com confiança, baseados na teoria e na experiência. Contudo, podemos especular. Há uma resposta que me atrai particularmente, baseada nas leis da física que hoje conhecemos. A resposta à pergunta «De onde veio o universo?» é que ele veio do vácuo. Todo o universo é uma mera expressão do nada. Como pode o universo ser equivalente ao nada? Olhemos para todas estas estrelas e galáxias! No entanto, se analisarmos cuidadosamente esta possibilidade, concluimos que o universo, mesmo na sua presente forma, pode ser equivalente ao nada.

Uma característica notável do universo atual é que, se somarmos toda a energia do universo, o resultado é praticamente zero. Em primeiro lugar, há a energia gravitacional da atração mútua entre as várias galáxias. Este termo é proporcional à massa das galáxias. Como é necessário fornecer energias para afastar as galáxias, isto dá origem a um enorme termo negativo no nosso saldo de energias. Do lado positivo está toda a energia sob a forma de massa de todas as partículas do universo. Isto dá outro número enorme, cerca de um fator de dez inferior à energia negativa. Se os dois números fossem iguais, a energia total do universo seria zero e não seria necessária energia para criar o universo.

Os astrónomos procuram a «massa ausente» que faria com que a energia total fosse zero. Há muitas possibilidades para a existência desta massa oculta. As galáxias têm muita da sua massa em grandes halos invisíveis. Talvez haja grandes buracos negros invisíveis no centro das galáxias. O mais recente candidato a eventual fonte da massa ausente é a possibilidade de os neutrinos

possuírem uma pequena massa. É difícil de afirmar categoricamente, mas pode acontecer que não tenha sido contabilizada uma fração importante da massa-energia, e, nesse caso, a energia total do universo poderia ser zero.

Até há pouco tempo, a explicação da origem dos prótons do universo constituía um obstáculo à ideia de que o universo foi criado a partir do vácuo.

Mas, com a possibilidade teórica da instabilidade do próton, esta objeção é ultrapassada. A presente assimetria entre matéria e antimatéria não reflete o estado inicial da bola de fogo primordial, que podia ter simetria perfeita. Parece, portanto, possível que todas as objeções à ideia de que o universo possa ser uma representação do vácuo podem ser afastadas. Mas como pode o vácuo transformar-se espontaneamente numa bola de fogo de *quarks*, léptons e glúons — o *big-bang*?

Parece que o vácuo é estável. Da mesma forma, porém, pareceu que os átomos eram estáveis, mas não são: os núcleos atômicos podem desintegrar-se espontaneamente numa reação espetacular que se manifesta através da radioatividade. De acordo com as leis da teoria quântica, há uma probabilidade de que núcleos, que de outro modo seriam estáveis, se desintegrem. Acredito ser possível que o vácuo seja instável de um modo análogo: há uma minúscula probabilidade quântica de que o vácuo se converta numa explosão do tipo da do *big-bang*. Não existe explicação para um decaimento nuclear concreto; apenas pode ser dada uma probabilidade para que ele ocorra. Se esta ideia estivesse correta, não seria necessária

nenhuma explicação para dar conta do acontecimento concreto do *big-bang*. Como não há ninguém que esteja à espera deste acontecimento, mesmo se ele tiver uma probabilidade infinitesimal, mas diferente de zero, é certo que ele virá a ocorrer. O nosso universo é uma criação do Deus-que-joga-aos-dados.

Ainda que os cientistas discutam os pormenores do início do universo, foi alcançado um consenso sobre as suas características gerais. Se analisarmos agora o problema do fim do universo, não encontramos um consenso semelhante: se regressássemos ao nosso tribunal de cientistas, não encontraríamos acordo. Enquanto o nascimento do universo deixou indicações dispersas sobre aquilo que sucedeu, não existem ainda indicações seguras sobre o que pode vir a suceder. Discutir o fim do universo é como especular sobre um crime que ainda não ocorreu. Poderíamos até encontrar alguns indícios de que estava para ser cometido um crime, mas, por muitos que fossem, não poderíamos ter a certeza de que ele iria ocorrer. O máximo que os cientistas podem fazer é reunir provas sobre o acontecimento que vai ocorrer e construir depois argumentos compatíveis com esses dados.

Os físicos creem que há apenas dois fins para o universo — fogo ou gelo; nós seremos ou assados ou congelados. Estes dois argumentos remontam às duas soluções que Alexander Friedmann encontrou para as equações de Einstein; recordemos que ele demonstrou que o universo só podia ser aberto ou fechado. No cenário do universo aberto, este continua indefinidamente a sua expansão. No caso do universo fechado, ele prossegue a sua expansão até um limite bem definido e volta depois a contrair-se.

A questão de vivermos num universo aberto ou fechado é puramente experimental e só pode ser respondida quando existirem dados. Os desvios para o vermelho observados para as galáxias distantes seguem a lei de Hubble (o desvio para o vermelho é proporcional à distância) até às galáxias mais longínquas. Isto significa que o universo se expande a uma taxa uniforme; não está a acelerar nem a abrandar. Através de medições cuidadosas de desvios em relação a uma expansão uniforme é possível determinar se o universo é aberto ou fechado.

Há, porém, outra forma de determinar se o universo é aberto ou fechado, através da medição rigorosa da densidade total de massa do universo. Neste momento parece não haver massa suficiente para fazer abrandar a expansão e poderíamos concluir que o nosso universo é aberto. Mas pode existir «massa ausente» — matéria invisível — que pode alterar esta conclusão. No argumento do universo fechado, este continuará a expandir-se durante talvez dezenas de biliões de anos. Nessa altura, a expansão pára e inicia-se a contração. A luz das galáxias distantes será desviada para o azul, em vez de para o vermelho. Depois de biliões de anos, o céu estará cada vez mais quente. O filme tridimensional do *big-bang* é agora projetado de trás para a frente, e tudo acaba por coalescer numa sopa de matéria igual à que existia na altura da criação. A questão de o universo poder, neste ponto, «ressaltar» e reexpandir-se depende de física ainda não muito bem compreendida. Mas é pouco provável que a humanidade, ou o que ela se tornar, possa sobreviver ao colapso e à oscilação subsequente. Se o universo é fechado, o nosso fim será a destruição pelo fogo. Algumas pessoas

pensam que a economia é «a ciência deprimente», mas eu creio que a cosmologia merece mais esse título.

No cenário do universo aberto, o universo prossegue indefinidamente a sua expansão e as galáxias afastam-se cada vez mais. Aparentemente, esta é uma alternativa moderada à morte pelo fogo. Mas é claro que o universo, mesmo se for aberto, não pode permanecer tal como é hoje. Há processos físicos, conhecidos ou imaginados, que implicam a deterioração do universo se lhe for dado suficiente tempo para envelhecer. Já referimos o facto de estarem a decorrer neste momento experiências para determinar se o protão é ou não estável. Se for observado o decaimento do protão, isso significa que o universo, tal como o conhecemos, terminará, na melhor das hipóteses, por altura do tempo de vida do protão. Atacado por um cancro cósmico, o universo apodrecerá.

Mesmo que o protão seja muito mais estável do que as nossas teorias indicam, podem ocorrer outros desastres. O universo é um lugar traiçoeiro. As estrelas de pequena massa arrefecem em cerca de 100 000 biliões (10^{14}) de anos e os planetas escapam às órbitas das estrelas, por colisão com outras estrelas, em cerca de 1 milhão de biliões (10^{15}) de anos. As galáxias têm um limite máximo para o seu tempo de vida e as suas estrelas que giram em torno do centro a mais elevadas velocidades sairão das suas órbitas em cerca de 10 biliões de biliões (10^{19}) de anos. Aquilo que sobrar será provavelmente absorvido por grandes buracos negros que se supõe estarem no centro das galáxias.

Os buracos negros podem desempenhar um papel importante no fim do universo, porque muita da matéria que hoje vemos pode acabar dentro de buracos negros. Mas a teoria moderna dos buracos negros, desenvolvida pelo físico inglês Stephen Hawking, implica que mesmo os buracos negros são instáveis e irradiam energia. Num dos argumentos, o fim do universo consiste em buracos negros separados por grandes distâncias e ondas eletromagnéticas e gravitacionais de grande comprimento de onda, formas de energia a partir das quais não se pode fazer nada de interessante. Esta seria a crise energética definitiva; um mundo frio e cruel que acaba, «não com uma explosão, mas com um gemido» — um grande gemido.

Em qualquer dos cenários, a espécie humana, se não se extinguir antes, terá muito tempo para meditar nas coisas com calma. Há apenas uma década, os físicos teriam de pedir desculpa por andarem a pensar sobre a origem e o fim do universo, porque, na ausência de dados experimentais concretos, se tratava necessariamente de pensamento especulativo. Hoje a situação é diferente; há dados e saberemos ainda mais no futuro próximo. A descoberta das leis dos *quarks*, dos leptões e dos glúões e os avanços nos instrumentos astronómicos proporcionam ferramentas poderosas para decodificar o enigma do universo.

É inútil tomar uma atitude otimista ou pessimista em relação ao problema do fim do universo. Tenho consciência de que é difícil deixarmos de projetar os nossos desejos no universo; mesmo as pessoas mais inteligentes o fazem. Mas o otimismo, a fé na nossa capacidade para sobreviver, foi-nos programada por um processo

evolucionário que tem apenas 1 bilhão de anos e está condicionado pelo ambiente da Terra. Pode não ser apropriado para os períodos de tempo que nos esperam. Esses intermináveis períodos de tempo condicionarão a vida de forma imprevisível.

Os físicos não sabem ainda se existem realmente leis últimas que exprimam as condições finais de toda a existência. Talvez não haja leis absolutas que governem o universo e a vida no universo. Até ser escrito o último capítulo da física, podemos vir a ter muitas surpresas. Presumivelmente, a vida poderia ser capaz de alterar essas leis da física que hoje parecem implicar a sua extinção, juntamente com a do universo. Se assim for, não poderia a vida ter um papel mais importante na cosmologia do que o que se considera hoje? Este é um problema sobre o qual vale a pena refletir.

De facto, pode ser o único problema sobre o qual vale a pena refletir.

¹ A escala de temperaturas de Kelvin, ao contrário das normais escalas Fahrenheit ou centígrada, começa no zero absoluto (a mais baixa temperatura), de forma que 0 kelvin corresponde a cerca de *menos* 460 graus Fahrenheit, ou *menos* 273 graus celsius.

² Por vezes designado por VLA, do inglês *very large array*. (N. do T.)

PARTE TRÊS

O Código Cósmico

*As rodas do céu, sobre a tua cabeça, mostram-te as suas
eternas glórias, e, apesar disso, os teus olhos permanecem
no chão.*

DANTE

CAPÍTULO 26

As Características da Lei Física

Não é teu dever terminar o trabalho; no entanto, também não é teu direito desistir dele.

RABBI TARFON, Pirke Avoth

Há muitos anos, estando eu acampado nas High Sierras da Califórnia, olhava para as estrelas que apareciam por detrás das montanhas. Quando estava quase a dormir, vi uma mancha esbranquiçada, mas muito ténue, no céu noturno; rapidamente me apercebi de que se tratava da galáxia de Andrómeda, a maravilhosa espiral de sóis. Era uma mancha difusa, a única galáxia, dentre milhões, que pode ser vista a olho nu; eu estava a olhar através do espaço intergaláctico. Horas mais tarde acordei e vi que a galáxia de Andrómeda, juntamente com as constelações habituais, se tinha deslocado no céu noturno. Noite após noite observei o movimento periódico das estrelas.

Os movimentos celestes, ao contrário das voltas caprichosas da vida humana e das modas sociais, prosseguem com segurança serena. Não era por acaso que os antigos sacerdotes, ao procurarem ordem na Terra, olhavam para as estrelas. Eles compreenderam que a profunda mensagem do movimento regular das estrelas é que é possível adquirir algum conhecimento correto

sobre o universo. Seguindo os planetas, a Lua e o Sol, ano após ano, eles aprenderam que o seu movimento não é aleatório, mas sim que possui padrões: existe ordem no céu. E esta ordem celestial pode ser utilizada para determinar as estações do ano e as cheias anuais do rio Nilo, observações que deram origem à ideia da lei física. Para além do mundo de aparências caprichosas estava outro mundo que podia ser ordenado pelas nossas mentes.

A procura das leis naturais é um jogo criativo que os físicos jogam com a natureza. Os obstáculos no jogo são as limitações das técnicas experimentais e a nossa ignorância e o objetivo é descobrir as leis físicas, a lógica interna que rege todo o universo. A pesquisa das leis naturais pelos cientistas proporciona-lhes o antigo entusiasmo da caçada; eles perseguem caça grossa — a própria alma do universo.

O que são as leis físicas? Como sabemos do que é que estamos à procura? A resposta última a estas perguntas não pode ser dada; faz ainda parte da natureza da investigação do físico. Mas as leis fundamentais que governam o mundo da experiência normal são conhecidas. Se compararmos a exploração da realidade à exploração da Terra, poderemos dizer que os físicos já exploraram os prados e os luxuriantes vales verdes. Hoje exploramos os desertos da realidade, zonas muito distantes da experiência humana imediata: o início e o fim do universo e o mundo das partículas subatômicas. Eles desconhecem se estão perto do objetivo final de descobrir as leis últimas da natureza; isso vai depender daquilo que eles descobrirem.

Ainda que os físicos não conheçam as leis últimas da natureza, ou mesmo a forma que elas tomarão, encontraram ao longo dos séculos características — quase definições — das leis físicas. Elas são muito interessantes porque nos dão indicações sobre aquilo que procuramos, não em pormenor, mas nas suas linhas gerais. Estas características das leis físicas não são arbitrárias; elas refletem a relação da nossa mente com o mundo que ela tenta descrever. Vou descrever algumas dessas características das leis físicas:

1. Natureza invariante;
2. Universalidade e simplicidade;
3. Caráter completo;
4. Relação com a observação e com a experiência;
5. Relação com a matemática.

Analisemos estas características uma a uma.

1. Natureza Invariante

Uma lei física é uma proposição que afirma que algo permanece sempre igual, ou seja, é invariante. A ação é sempre igual à reação; a velocidade da luz no vácuo é uma constante universal; a energia total é sempre conservada. As leis físicas são, portanto, diferentes

das «leis» sociais, que apenas estipulam invariâncias. A diferença entre a lei social e a lei física é a diferença entre o «não farás» e o «não poderás fazer». Ninguém será preso por violar a lei da conservação da energia. No entanto, não é óbvio que haja no mundo natural das leis físicas verdadeiras invariâncias. No mundo vemos apenas mudança, muitas vezes mudança caótica. Por que será então razoável supor que esta mudança está sujeita a leis?

Ao refletir sobre este problema, Newton teve a intuição crucial de separar conceitualmente o estado real do mundo, que pode ser muito complicado, das leis que descrevem a forma como esse estado se altera, que podem ser bastante simples. A aparência complicada do mundo não é essencial para a compreensão das suas invariâncias (as leis físicas), que dão uma descrição pormenorizada de como o mundo se pode alterar.

A ideia de que para lá do mundo mutável existe um mundo imutável é espantosa. Consideremos um disco que roda em torno do seu eixo. À medida que ele se move, a sua aparência permanece a mesma, porque o disco tem uma simetria: as rotações em torno do seu eixo deixam-no inalterado. Este exemplo ilustra a conceção moderna de invariância ou lei física; ela é uma consequência da simetria. Se um objeto possui simetria, como o disco no nosso exemplo, podemos movê-lo sem o alterar; simetria implica invariância. É esta a razão pela qual os físicos procuram novas simetrias; sabem que, se descobrirem uma nova simetria, automaticamente terão descoberto uma nova invariância, algo que não se pode alterar.

A forma mais acessível para compreender a simetria é através de um objeto simétrico. Mas o conceito de simetria pode também aplicar-se ao espaço físico. Se eu pegar num objeto e o deslocar através do espaço vazio, não noto diferença alguma. Esta translação de um objeto é como a rotação de um disco; é uma transformação que deixa o estado físico do sistema inalterado. A invariância translacional é uma simetria do espaço físico e significa que as leis da física são aplicáveis a acontecimentos independentemente da sua localização espacial. Quem tenha percorrido grandes distâncias em autoestradas conhece esta invariância translacional. Pode-se passar uma noite num hotel, viajar 800 km e passar a noite num quarto de hotel idêntico.

Outra simetria ou invariância das leis físicas é a sua invariância relativamente à translação no tempo. Os resultados de medições de quantidades como a carga do eletrão ou a intensidade do campo gravítico não devem depender de a medição ser realizada na segunda-feira ou na quarta-feira. Mas qual o significado destas simetrias do espaço e do tempo? Elas parecem simples e, no entanto, têm profundas consequências.

A matemática Emmy Noether, já neste século, descobriu as consequências mais profundas das simetrias na física. Ela mostrou que a cada simetria da física — como as simetrias de translação relativamente ao espaço e ao tempo — corresponde uma lei de conservação. Se medirmos a energia total de um sistema físico fechado (a soma de toda a energia do movimento, da energia potencial, da energia sob a forma de calor, da energia química, e assim por diante), o resultado total permanece inalterado, ainda

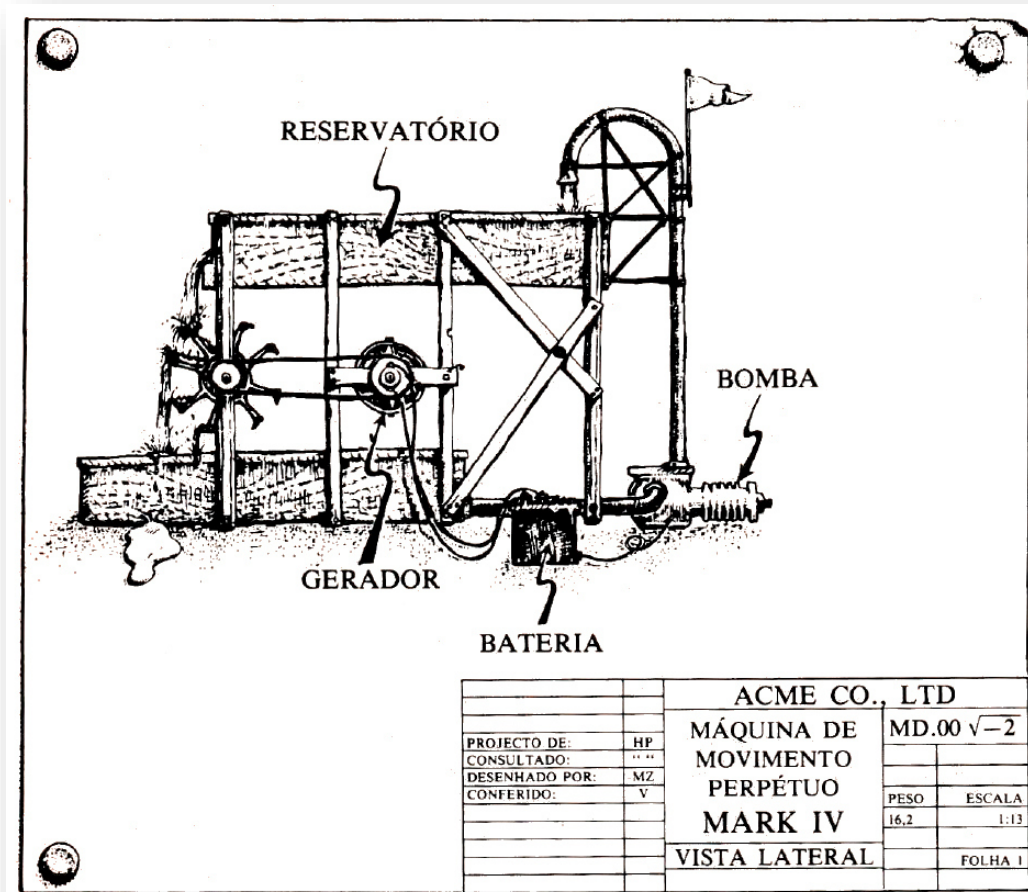
que algumas formas de energia, como a energia do movimento, possam ser transformadas noutras formas, como calor. A conservação da energia total é um facto rigorosamente observado. O que é surpreendente (e é este o ponto fundamental do trabalho de Noether) é que a conservação da energia é uma consequência da simetria relativamente às translações no tempo.

Como é isto possível? O que é que a invariância das leis físicas de segunda para quarta-feira tem a ver com a conservação da energia? Para compreender a resposta a estas perguntas vou supor que, pelo contrário, as leis da física podem mudar com o tempo; em particular, vou supor que a lei da gravidade pode mudar. Supondo o impossível, compreenderemos o possível. Usando esta lei da gravidade, que se pode alterar, mostrarei como se pode construir uma máquina de movimento perpétuo, um aparelho que gera energia de graça e que viola assim a lei de conservação de energia. A conclusão a extrair é que, como isso é impossível, a premissa da qual parti — a de que as leis da física não são invariantes relativamente à translação no tempo — tem de ser falsa. A natureza inalterável das leis da física conduz imediatamente à conservação da energia.

Imaginemos que um moinho de água transfere água de um reservatório mais elevado para outro mais baixo. A roda do moinho está ligada a um motor elétrico e a um gerador elétrico; este, por sua vez, está ligado a uma bateria, que armazena a eletricidade. Supomos que a lei da gravidade muda com o tempo: à segunda-feira, a gravidade é mais forte do que à quarta-feira e mais para o fim da semana é de novo mais forte. Nos dias em que a gravidade

é mais forte fazemos com que a água se escoe a partir do reservatório superior, de forma a fazer funcionar o gerador e a armazenar assim energia elétrica na bateria. Nos dias em que a gravidade é mais fraca, a água pesa menos; ligamos então o motor e, utilizando a energia armazenada na bateria, bombeamos a água para o reservatório superior. Como a água pesa menos, executámos menos trabalho ao transportá-la para cima do que ela nos forneceu quando foi transferida para baixo, de forma que ficámos com saldo positivo de energia. Conseguimos construir uma máquina de movimento perpétuo — a conservação da energia é violada se supusermos que a lei da gravidade muda com o tempo. Por outro lado, se a lei da gravidade e todas as outras leis físicas não se alteram com o tempo, pode mostrar-se que a energia deve ser exatamente conservada.

Hoje os físicos procuram novas simetrias, generalizações da ideia de simetria espaço-temporal, sabendo que elas implicam novas leis de conservação. A ideia de invariância, que era a antiga concepção de lei física, transformou-se, na física moderna, na ideia de simetria, e a tarefa dos físicos teóricos atuais é descobrir as simetrias do mundo. Muito da história da física moderna é a descoberta de novas simetrias.



Projeto de uma máquina de movimento perpétuo, solução para as necessidades energéticas do mundo. Uma tal máquina funcionaria realmente se as leis da física não fossem invariantes em relação à translação no tempo, isto é, se elas pudessem modificar-se de dia para dia. Este exemplo ilustra o teorema de Noether: uma invariância das leis da física, como a da translação no tempo, implica uma lei de conservação, como, neste caso, a da conservação da energia.

2. Universalidade e Simplicidade das Leis Físicas

Há muitos anos perguntei a T. D. Lee, um físico nascido na China a quem foi atribuído o Prémio Nobel, quais tinham sido as suas experiências educacionais antes de ir para Chicago estudar com o físico Enrico Fermi. O que é que o tinha impressionado mais profundamente quando, na China, se encontrara pela primeira vez com a física? Lee respondeu sem hesitar que fora o conceito da universalidade das leis físicas aquele que mais o tinha

impressionado; a ideia de que as leis físicas se pudessem aplicar aqui na Terra, na sala em que estamos, ou em Marte, era para ele nova e aliciante.

Um exemplo é a lei da gravitação universal de Newton, lei que não é apenas válida em certos momentos, mas sim indiferente ao tempo. Mas a lei da gravitação de Newton unificava a gravidade na Terra com a gravidade nos céus; ela é indiferente ao local. O grande salto de Newton foi aperceber-se de que era aplicável a mesma regra à órbita da Lua em torno da Terra ou à queda de uma maçã no jardim da sua mãe. Gosto de imaginar que Newton, sentado no jardim da sua mãe, viu a Lua e compreendeu que ela também estava a cair, como a maçã, para a Terra. Só a força centrífuga devida ao movimento orbital da Lua a impede de cair sobre nós: se detivermos a Lua, ela cairá como uma maçã. Foram necessários milhares de anos para que a mente humana se preparasse para esta ideia. Sabemos hoje que a lei de Newton é também válida para o movimento das galáxias, cujo diâmetro é de anos-luz; a lei da gravitação é universal.

Esta universalidade das leis físicas é talvez a sua característica mais profunda — todos os acontecimentos, e não apenas alguns, estão sujeitos à mesma gramática universal da criação material. Este facto é bastante surpreendente, pois não há nada menos evidente na variedade da natureza do que a existência de leis universais. Só com o desenvolvimento do método experimental e do seu sistema de interpretação concetual se pôde verificar a ideia singular de que a variedade da natureza é consequência de leis universais.

A palavra «teoria» provém do grego «ver». A atividade do físico teórico é compreender a lógica interna da natureza. As suas interpretações da natureza são chamadas «teorias»; elas são imagens do mundo material realizadas para o tornar compreensível, e, para o conseguirem, devem ser simples.

A ideia da simplicidade das leis físicas é um pouco difícil de compreender para o leigo, porque a física lhe parece muito complicada. Mas a característica notável da física é que toda a complicação surge, de uma forma lógica, a partir de alguns conceitos elementares, mas profundos, como uma árvore a partir de uma semente. Pode levar anos para que um estudante se aperceba da simplicidade das leis fundamentais. Faz parte integrante do pensamento do físico profissional a convicção de que a simplicidade emerge depois de terminada a luta. Como observou Einstein, «O objetivo da ciência é, em primeiro lugar, a compreensão concetual e a interligação, de uma forma tão *completa* quanto possível, das experiências dos sentidos em toda a sua diversidade e, em segundo lugar, a realização deste objetivo *utilizando um mínimo de conceitos e relações primárias*, procurando a maior unidade lógica possível na imagem do mundo, isto é, a simplicidade lógica dos seus fundamentos».

3. Carácter Completo

Na *Cabala*, conjunto de escritos místicos judeus, o *yetzer harah*, ou «impulso maligno», é o pecado de desejar ser completo. Apenas Deus conhece completamente; a tentativa humana de imitar Deus e atingir o conhecimento completo é pecado. No entanto, os físicos

procuram este carácter completo, porque sabem que uma grande teoria não pode ser uma imagem parcial da natureza; ela deve fornecer as leis completas para uma classe de acontecimentos. Por exemplo, a teoria da relatividade generalizada descreve todos os efeitos gravitacionais, e não apenas aqueles relativos a campos gravitacionais fracos. O objetivo final dos físicos é dispor de uma teoria unificada de toda a física.

Historicamente, os vários ramos da física, cada um descrevendo um aspeto bem definido da natureza, desenvolveram-se simultaneamente. A eletricidade e o magnetismo, dantes considerados entidades físicas separadas, foram unificados pela teoria eletromagnética de Maxwell. O espaço e o tempo foram unificados pela teoria da relatividade de Einstein. Hoje, os físicos teóricos que trabalham nas teorias de campo quantizado descobriram as «grandes teorias de campo unificado» que unificam as forças nuclear forte, nuclear fraca e eletromagnética e esforçam-se agora para incorporar a força da gravidade nesta unificação. Se atingissem este objetivo, a física, tal como a conhecemos, estaria completa. Este antigo sonho da razão parece estar quase ao nosso alcance.

Ainda que hoje seja concebível que a física realize este sonho e chegue assim ao fim, não creio que isso aconteça. Há poucas hipóteses de os físicos virem a dispor no futuro próximo de uma teoria de *toda* a natureza, apesar de muitos dos fenómenos da nossa experiência imediata poderem ser explicados. O resultado de todas as unificações em teorias físicas é subir a um novo pico e, a partir daí, ter uma nova visão da natureza. Torna-se aí evidente o

provincianismo da nossa posição anterior e podem formular-se novas perguntas — e, enquanto puderem ser feitas perguntas profundas, sabemos que não terminámos o nosso trabalho.

4. Relação com a Observação e com a Experiência

Desde os tempos de Francis Bacon, no início do século XVII, «ciência» significa ciência experimental. Bacon difundiu a ideia de que a única forma de estudar a natureza cientificamente é fazendo experiências. Uma experiência pode ser controlada, isto é, as suas condições podem ser sistematicamente alteradas. Está para além da simples observação, que é meramente passiva e na qual não se faz qualquer tentativa para alterar as condições de observação. A observação passiva e precisa é o primeiro passo; a experiência ativa é o segundo.

Antes de ser compreendida a importância da observação precisa, os fisiólogos europeus da Idade Média interessados na classificação dos mamíferos conheciam a existência dos elefantes. Mas nunca tinham visto nenhum. A dimensão destas grandes criaturas pôs a questão de como os elefantes copulavam. Os escritores imaginativos sugeriram várias soluções; talvez os elefantes copulassem de costas, ou talvez mergulhassem na água, onde o seu enorme peso seria aliviado. Um escritor sugeriu que o elefante macho escavava um grande buraco para a fêmea. Estrabão, o antigo geógrafo grego, escreveu que o elefante macho, ao copular, fecunda a fêmea «pela descarga de uma matéria gordurosa através do tubo respiratório que possui entre as têmporas». Nenhum destes escritores teve oportunidade de observar os animais, que executam

o ato com considerável elegância. O exercício da imaginação pode ser importante; mas não é observação científica.

A teoria física sem experiência é vazia. A experiência sem teoria é cega. São os experimentadores que fazem com que os teóricos permaneçam honestos. Eles compreendem que a honestidade a toda a prova, a persistência tenaz, a paciência, a abertura, a precisão e a sorte podem ter como resultado a descoberta de novos fenômenos naturais. Os físicos experimentais descobriram a radioatividade (desintegração do núcleo atômico noutras partículas), o efeito fotoelétrico (emissão de eletrões quando a luz atinge uma placa metálica) e os espectros de riscas atômicos (as diferentes cores da luz emitida pelos átomos) e desenvolveram as experiências de colisões de partículas que levaram os teóricos à invenção da teoria quântica. Estas descobertas não puderam ser explicadas pela antiga física newtoniana, e entre 1900 e 1926 tornou-se evidente que era necessária uma nova teoria física. A invenção da moderna teoria quântica mostra que as transformações do pensamento não ocorrem espontaneamente, mas são motivadas por circunstâncias empíricas. Surpreende-me o modo como muitas vezes a nossa mente resiste às ideias novas e, contudo, quando disposta ou motivada, é capaz de rápida adaptação.

Qual a relação entre teoria e experiência? Não é simplesmente a de o teórico propor uma hipótese e o experimentador a verificar ou destruir, apesar de por vezes poder consistir nisso. Mas, mais frequentemente, o experimentador descobre uma nova realidade. São bons exemplos as descobertas que nos abriram as portas ao mundo atômico: a radioatividade e efeito fotoelétrico e os espectros

atômicos. O teórico deve então realizar um salto com a imaginação, combinando novos dados com novas ideias teóricas. A nova teoria pode, por seu lado, sugerir experiências que testem as suas hipóteses de base. A relação entre teoria e experiência é como uma dança em que algumas vezes é um dos parceiros que conduz e outras vezes é o outro.

No campo da astrofísica, os teóricos estão necessariamente à frente dos experimentadores. Eles fazem modelos teóricos do interior das estrelas, do núcleo das galáxias, de sistemas estelares com buracos negros e dos primeiros segundos do *big-bang*. Estas relações do universo não são facilmente acessíveis com a tecnologia atual e é difícil adquirir dados experimentais. Com a entrada em funcionamento dos grandes conjuntos de radiotelescópios e do telescópio espacial poderão ser obtidas novas informações sobre a estrutura destes objetos astrofísicos. Entretanto, os astrofísicos teóricos estão ansiosos por novos dados experimentais.

No caso da física das altas energias, pelo contrário, os experimentadores estão muitas vezes à frente dos teóricos. Há enormes quantidades de dados experimentais sobre colisões de prótons e elétrons que produzem novas formas exóticas de matéria, dados que são apenas parcialmente compreendidos. Nós, teóricos, julgamos ter uma teoria fundamental que pode explicá-los todos, ou, pelo menos, grande parte deles. Aqui, o problema não está em não existirem a teoria ou os dados, mas sim em que as complexidades matemáticas das equações são tão grandes que apenas se consegue estabelecer contato entre teoria e experiência nalguns pontos, e nesses existe acordo entre elas. Talvez os

poderosíssimos computadores eletrônicos dos anos 80 permitam aos físicos uma comparação detalhada dos recentes desenvolvimentos teóricos em física das partículas elementares com a experiência.

A relação entre teoria e experiência é uma simbiose. A teoria proporciona o quadro concetual que torna a experiência inteligível. A experiência introduz os teóricos em novos domínios da natureza que por vezes exigem uma revisão da própria concepção de natureza.

5. Relação com a Matemática

A ambiguidade sempre me fascinou. Na nossa vida emocional utilizamos a ambiguidade com o fim de evitar confrontações pessoais, pelo menos temporariamente. Na vida emocional, a ambiguidade pode ser simplesmente indesejável, mas na ciência é um desastre! Esta é uma das razões pelas quais as leis físicas se exprimem na linguagem precisa e quantitativa da matemática. A matemática pode tornar as afirmações do teórico precisas, e não ambíguas, e elas podem assim ser provadas pela experiência.

Uma característica importante das teorias modernas é que as suas conclusões são, mais do que passíveis de confirmação, passíveis de refutação. Uma teoria pode apoiar-se em leis muito gerais; mas, a partir dessas leis, devemos ser capazes de deduzir propriedades extremamente específicas do mundo, como o movimento de um eletrão no seio de um campo magnético. Só

podem ser comprovadas previsões específicas, e não ambíguas. Uma teoria não pode estar certa geralmente, a menos que, em casos específicos, se não possa demonstrar que está errada. Esta vulnerabilidade epistêmica está no coração da ciência experimental. De facto, a essência do método científico é a vontade de pôr à prova as nossas ideias.

Para ser falsificável, uma teoria deve ser logicamente precisa, e não ambígua. De outra forma, não pode sequer estar errada! Para possuir esta precisão, a física exprime-se na linguagem da matemática. Como comentou Heisenberg, «a ciência deu um importante exemplo de que é possível realizar uma extensão extraordinária dos fundamentos mais abstratos do nosso pensamento sem ter de incorrer em qualquer falta de clareza ou precisão».

Como é sequer possível formular as leis da natureza em termos de equações matemáticas? Eugene Wigner, um físico teórico da Universidade de Princeton, especulou sobre a relação muito particular entre a matemática e a física num ensaio intitulado «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences»¹. O mundo físico é quantificável, o que quer dizer que o podemos medir e atribuir-lhe quantidades. Um exemplo é a lei de Boyle, descoberta há três séculos. Podemos medir a pressão P , a temperatura T e o volume V em que se encontra contido um gás. Mas por que deverá existir uma relação algébrica como a lei de Boyle, $P \times V = T$, que afirma que o produto da pressão de um gás pelo volume que ele ocupa é proporcional à temperatura? Estas fórmulas demonstram o êxito notável da matemática na descrição

dos fenómenos físicos. Mas a razão deste êxito não é clara. «Não podemos escapar à sensação», escreveu Heinrich Hertz, um físico alemão do século XIX, «de que estas fórmulas matemáticas têm uma existência independente e uma inteligência própria, de que elas são mais sábias do que nós, mais sábias ainda do que aqueles que as descobriram, e de que obtemos mais delas do que inicialmente lhes tínhamos dado». As fórmulas que exprimem leis da natureza impõem restrições ao mundo, talvez mesmo a Deus. Einstein disse que uma das razões pelas quais trabalhava em física era determinar se Deus podia ou não ter tido alguma alternativa a criar o mundo tal como o conhecemos.

Os físicos acreditavam que conseguiam capturar toda a natureza na sua rede de matemática. Tudo o que tivesse ocorrido, até ao mais ínfimo pormenor, podia ser determinado. Mas, surpreendentemente, com a moderna teoria quântica foi abandonada a ideia de uma descrição matemática de toda a natureza. Acontecimentos quânticos individuais, como a desintegração de um núcleo atómico, não estão sujeitos a nenhuma lei matemático-física; só a distribuição desses acontecimentos, médias tomadas em relação a um grande número deles, está sujeita às leis da teoria quântica. As leis da física não são deterministas, mas sim estatísticas, descoberta que implica o fim da descrição matemática de toda a natureza.

A física traz uma compreensibilidade maravilhosa ao cosmo. Como podemos compreender um universo que não inventámos? O filósofo Kant pensava que a lógica interna da natureza correspondia à lógica interna da mente humana e que esta era a razão pela qual

a natureza era compreensível. Se há uma correspondência entre a natureza e a mente humana, não é certamente um acidente da evolução biológica. O cérebro humano, em todo o seu esplendor, é, apesar de tudo, produto da evolução; faz parte da natureza e está sujeito a leis físicas.

Quais são os limites da ideia de compreensão das leis da natureza? Podemos imaginar a construção de uma grande inteligência artificial, de um grande computador cuja tarefa seria descobrir as leis da natureza. Mas as operações do computador estariam limitadas pelas leis da natureza. Por exemplo, como a velocidade da luz é finita, ela leva um tempo finito a transmitir informação de um extremo do computador para outro. Estas limitações de qualquer computador real podem igualmente limitar as suas operações de uma forma fundamental e impedi-lo de encontrar as leis essenciais da natureza que determinam as suas próprias operações. Será que este facto constitui uma limitação no seu funcionamento lógico? Se assim for, pode ser uma fronteira do nosso conhecimento das leis da natureza. Penso que este problema de determinar os limites do conhecimento como consequência da estrutura material de qualquer inteligência real fará parte da física do futuro.

Ao refletir sobre as relações entre as leis físicas, as teorias e o mundo natural, descobri a seguinte analogia: suponhamos que uma nave espacial, produto de uma civilização extraterrestre avançada, aterra no nosso planeta. Os cientistas começam a estudar a nave e descobrem que ela é um computador gigante. Em primeiro lugar estudam o *hardware*, as peças de que é feito o computador, e

tentam determinar qual o seu esquema de funcionamento. Mais tarde começam a compreender que há uma lógica na sua conceção e inventam teorias do computador, imagens de que tipo de programas, de *software*, podem ser executados pelo computador, e estas teorias refletem as invariâncias de conceção, ou leis, do computador.

Imaginemos a seguir que o universo é um computador gigante e que aquilo que vemos é apenas o seu *hardware*. A conceção deste computador está a ser descoberta pelos físicos, através das suas teorias que nos dizem que tipo de programas pode ser executado pelo computador e verificado pela experiência. As leis físicas são as invariâncias, os elementos que não se alteram, em todos os programas possíveis.

A analogia computador-universo pode ser levada muito longe. Certa vez, de visita a um laboratório perto de Moscovo, descrevi a analogia computador-universo a um colega soviético e por graça sugeri que talvez aquilo que consideramos *hardware* do universo seja *software* de outro ponto de vista. Depois de pensar um pouco, o meu colega replicou: «Não há *software* sem *hardware*!» Eu concordei — não faz sentido falar em forma sem conteúdo.

Descrevi algumas características das leis físicas, como a sua universalidade, o seu carácter completo e a sua relação com a matemática. No entanto, a procura das leis físicas é uma atividade humana, que faz entrar em jogo elementos subjetivos e psicológicos. O processo de investigação científica não é evidente nas publicações ou nas conferências; ele pode mais frequentemente

encontrar-se nas discussões entre um pequeno número de investigadores sobre os temas de interesse atual. Tais discussões entre cientistas, bem como os períodos solitários de reflexão individual e de trabalho duro, são os momentos criativos que produzem os saltos intelectuais cruciais para a ciência.

Uma característica predominante no processo de investigação científica é a agressão intelectual, que se manifesta no desejo de conhecer e de aplicar a inteligência pessoal na resolução do enigma do universo. Nenhuma grande ciência foi descoberta com o espírito da humildade. É indispensável para o processo de investigação científica um sentido saudável do ego e uma certa intolerância intelectual. Um colega meu queixava-se certo dia da personalidade arrogante de outro físico teórico que tinha acabado de fazer um excelente trabalho. Respondi-lhe: «Não, não percebeste nada. Ele tem as características de um messias; é uma pessoa brilhante, autoconfiante e agressiva que se apropriará das ideias dos outros pensando que são suas. As suas capacidades estão ao nível das suas ambições.» Não é surpresa para os cientistas que esses homens possam servir a busca da verdade ao mesmo tempo que realizam as suas ambições. Não é por a humildade ser uma responsabilidade que devemos ter cuidado com ela, mas sim porque ela é muitas vezes fraudulenta num cientista criativo, servindo de disfarce à agressividade. Certa vez alguém referiu um jovem físico a Einstein como sendo muito humilde, ao que ele respondeu: «Como é que ele pode ser humilde? Ele ainda não fez nada!»

Os físicos levam o seu trabalho a sério. Se não o fizessem, provavelmente ninguém o faria, porque ele está muito longe da

experiência humana imediata. Mas essa seriedade e a dedicação que eles põem no trabalho são acompanhadas de um notável sentido de humor. É como se o universo fosse um quebra-cabeças que é necessário resolver. Sem o humor e a alegria da criatividade, a investigação tornar-se-ia insuportável. O humor abre o espírito; liberta a tensão da concentração e revela a vulnerabilidade de uma compreensão meramente intelectual. Os físicos gostam muito de fazer piadas sobre o seu trabalho e as suas implicações. Parece-lhes por vezes que «o eterno Autor dos enigmas» poderia ser também um brincalhão.

Ouvi uma vez uma história segundo a qual os físicos, ao morrerem, vão para uma academia divina onde o seu objetivo é construir as leis da natureza. Mas há uma regra que eles devem observar: qualquer lei que eles façam não pode contrariar as leis já descobertas e verificadas pelos seus colegas na Terra. A lenda diz que Pauli, um dos críticos mais ferozes da história da física, está lá agora a colocar armadilhas intelectuais e a preparar truques de física para ludibriar as nossas melhores tentativas!

Para ser um bom físico teórico é necessário ter uma boa preparação matemática e uma excelente intuição física. Não podemos subestimar o papel da intuição e da imaginação nas ciências. Alunos que obtêm bons resultados nos exames não se tornam necessariamente os cientistas mais criativos. Num exame propõe-se um problema específico para resolver, mas, no mundo real da investigação teórica, o problema é identificar o problema. Nessa altura, ele pode ser precisamente formulado de modo a ser

possível aplicar as técnicas matemáticas habituais para o atacar. É necessária imaginação para formular as perguntas certas.

Os físicos teóricos nadam num mar de ideias. Qual delas é escolhida para trabalhar? Como perguntou Einstein, «Se o investigador fizesse o seu trabalho sem qualquer opinião preconcebida, como seria ele capaz de escolher alguns factos de entre a imensa abundância da experiência mais complexa e como conseguiria seleccionar justamente aqueles que são suficientemente simples para que as leis da natureza sejam evidentes?» Esta «opinião preconcebida» é uma parte essencial da investigação científica: é a parcialidade que conduz a imaginação aos factos relevantes. Como Richard Feynman, um dos inventores da eletrodinâmica quântica, me disse no mais puro sotaque nova-iorquino, «*To do physics ya gotta have taste*»². E o gosto, o instinto para trabalhar nos problemas certos, não pode ser ensinado.

A imaginação necessária para resolver os grandes problemas da física inclui um elemento de «loucura», qualquer coisa de estranho ou mesmo de ultrajante. A relatividade restrita e a teoria quântica possuíam esta loucura. Uma vez, Pauli foi ao Pupin Laboratory da Universidade de Colúmbia dar uma conferência sobre a nova teoria não-linear das partículas elementares, formulada por Heisenberg. Niels Bohr estava na assistência e depois da conferência comentou que a nova teoria não podia estar correta porque não era suficientemente louca. Dentro em pouco, Bohr e Pauli estavam em extremos opostos de uma mesa, com Bohr dizendo «Não é suficientemente louca» e Pauli respondendo «É suficientemente louca». Teria sido difícil a um leigo compreender o que é que estava

em jogo para esses dois físicos e que não eram eles que estavam loucos. Tanto Bohr como Pauli sabiam que a loucura da teoria quântica está correta.

Todas as criações humanas profundas são belas e as teorias físicas não são exceção. Uma teoria feia tem uma espécie de deselegância concetual que é difícil de aceitar por muito tempo. É este o fundamento do apelo à estética na construção da teoria física. Quando os físicos compreenderem realmente a lógica interna do cosmo verão toda a sua beleza; a nossa atração para o belo, para aquilo que é coerente e simples, está no centro da capacidade humana de compreender racionalmente o mundo material.

Se a versão definitiva de uma teoria física profunda é necessariamente bela, os critérios que presidem à sua construção não podem ser exclusivamente estéticos. Quando surgem ideias novas, elas podem parecer estranhas e bizarras; se estiverem corretas, porém, a sua beleza será mais tarde descoberta. Quando alguém observou a Einstein que a sua teoria da relatividade generalizada era muito elegante, Einstein respondeu, citando Ludwig Boltzmann, um físico de uma geração anterior: «A elegância é para os alfaiates!»

A beleza está no olhar do observador. A estética visual da geometria é cara a alguns de nós; para outros, a beleza está no mundo abstrato dos símbolos. Na física quântica moderna, o sentido estético é concetual, ao contrário de em épocas anteriores, em que a visualização do mundo natural desempenhava um papel importante. Em vez de imagens temos simetrias descritas pela

matemática. O mundo quântico das partículas elementares organiza-se de acordo com princípios de simetria complexos e belos.

A mente do físico busca a simetria. Mas, tendo-a descoberto, torna-se fácil reconhecer a falha na simetria perfeita. Raramente as simetrias na natureza são perfeitas; elas são quebradas, frequentemente de forma simétrica. É esta falha na simetria, como o erro indispensável num tapete persa, que atrai a mente e nos dá novas indicações sobre a dinâmica do mundo. Do ponto de vista da física moderna, todo o mundo pode ser considerado como manifestação de uma simetria quebrada. Se as simetrias da natureza fossem perfeitas, nós não existiríamos.

De tempos a tempos, nas ciências, surge um verdadeiro génio. Não me refiro aqui ao génio em poder técnico; isso pode ser notável, mas muitas vezes superficial. Um génio é alguém que, como os antigos profetas, está em contato direto com Deus. É uma espécie de loucura, com a diferença de estar correta.

O matemático Mark Kac distingue dois tipos de génios, aqueles a que chama «génios normais» e aqueles a que chama «génios extraordinários». O génio normal é alguém como o leitor ou como eu, mas com as capacidades de se concentrar, de criar e de recordar muito superiores às nossas. O seu raciocínio criativo pode ser comunicado. Os génios extraordinários são bastante diferentes. Não é nada clara a forma como eles pensam. Eles parecem ser governados por um conjunto de regras da sua própria invenção, e, contudo, chegam a conclusões extraordinárias. Eles não conseguem

descrever como é que chegaram a elas; o seu raciocínio parece tortuoso. O génio normal pode ter muitos alunos, mas o génio extraordinário raramente tem alunos, porque não pode comunicar os seus métodos de solução.

A esmagadora maioria dos cientistas não é constituída por génios ou pessoas quase geniais; mas isso não inibe de forma alguma a sua criatividade ou a sua utilidade. As regras para a criatividade na ciência nunca foram escritas e não podem na realidade ser aprendidas num livro. A prática da investigação científica é transmitida de geração em geração pelos cientistas, numa espécie de cadeia carismática; é um ensino pelo exemplo, e não pelo livro. Estando implícito, este conhecimento tácito é facilmente alterado pelas sucessivas gerações — aspeto invisível, mas importante, da investigação científica.

O estabelecimento da lei nas ciências físicas é uma atividade frustrante, que provoca um sentimento de piedade racional, o reconhecimento de que se luta com um enorme problema. Sempre pensei que Albrecht Dürer, na sua gravura *Melancholia*, retratou o espírito da investigação racional. A gravura representa um anjo contemplativo rodeado pelos instrumentos da ciência, um quadrado mágico sobre uma parede. É a imagem de uma consciência cujo isolamento é semelhante ao das estrelas.

¹ Poderia traduzir-se, de uma forma livre, por «A eficácia absurda da matemática nas ciências naturais». (N. do T.)

² Expressão distorcida com o significado de «Para fazer física é preciso ter gosto», em tradução literal. (N. do T.)

CAPÍTULO 27

O Código Cósmico

Meu amigo, toda a teoria é cinzenta e a árvore dourada da vida é verde.

GOETHE, Fausto

O que é o universo? É um filme cósmico a três dimensões no qual todos somos atores involuntários? É uma anedota cósmica, um computador gigante, uma obra de arte de um Ser Supremo, ou apenas uma experiência? O problema de tentar compreender o universo é o não termos nada com que o possamos comparar.

Não sei o que é o universo, ou se ele tem alguma finalidade, mas, como muitos físicos, tenho de encontrar um modo de pensar sobre ele. Einstein acreditava ser errado projetar as nossas necessidades humanas sobre o universo, porque este é indiferente a elas. Steven Weinberg concorda: «[...] quanto mais sabemos sobre o universo, mais se torna evidente que ele não tem finalidade nem sentido.» Como a rosa de Gertrude Stein, o universo é o que é o que é. Mas afinal o que «é»? A pergunta não se desvanecerá.

Penso que a mensagem está escrita num código, um código cósmico, e a tarefa do cientista é tentar decifrar esse código. A ideia

de que o universo é uma mensagem é muito antiga e remonta à Grécia, mas a sua versão moderna foi elaborada pelo empirista inglês Francis Bacon, que afirmou existirem duas revelações. A primeira é-nos dada através das escrituras e da tradição e conduziu o nosso pensamento durante séculos. A segunda provém do próprio universo e só agora começámos a ler esse livro. As frases deste livro são as leis físicas, as invariâncias postuladas e confirmadas pela nossa experiência. Se há pessoas que afirmam terem-se convertido por uma leitura das Escrituras, eu diria que o livro da natureza também tem os seus convertidos. Podem ser menos evangélicos do que os convertidos pelas Escrituras, mas partilham uma convicção profunda de que existe ordem no universo e que essa ordem pode ser conhecida.

Muitos cientistas têm escrito sobre a sua primeira experiência de contato com o código cósmico, isto é, a ideia de ordem para lá da experiência imediata. Esta experiência surge muitas vezes nos primeiros anos da adolescência, quando se dá a integração da vida emocional e cognitiva do ser humano. Einstein disse que a sua conversão, nessa idade, de uma perspetiva religiosa para uma perspetiva científica alterou completamente a sua vida. Newton, que defendeu posições religiosas heterodoxas ao longo de toda a sua vida, tinha também uma conceção do código cósmico; para ele, o universo era um grande enigma que tinha de ser resolvido. Isidor Isaac Rabi, um físico atómico, contou-me que se interessou pela primeira vez pela ciência quando requisitou numa biblioteca alguns livros sobre movimentos planetários. O facto de a mente humana poder conhecer coisas tão imensas que não eram por ela imaginadas constituía para ele motivo de espanto e admiração.

Maravilhava-o. Eu próprio me lembro, quando adolescente, de ler a biografia de Einstein, o livro de George Gamow *One, Two, Three... Infinity*¹ e o *Exploring the atom*, de Selig Hecht, e de decidir nessa altura ser um físico. Pensei que não podia existir nada de mais gratificante que eu pudesse desejar do que tentar resolver o enigma do cosmo. Para mim, a física, que explora o início e o fim do espaço, do tempo e da matéria, realizava essas ambições.

Se aceitarmos a ideia de que o universo é um livro lido pelos cientistas, deveríamos agora analisar como é que a sua leitura influencia a nossa civilização. Os cientistas libertaram uma nova força no nosso desenvolvimento político, social e económico — talvez a maior força até agora libertada. Conhecendo a estrutura do universo, cientistas e engenheiros inventam novos aparelhos e novas tecnologias que alteram radicalmente o mundo em que vivemos. O que distingue este novo conhecimento é que a sua fonte está para além das instituições humanas: ele provém do próprio universo. Pelo contrário, a literatura, a arte, o direito, a política e mesmo os métodos científicos foram por nós inventados. Mas nós não inventámos o universo, a química dos nossos corpos, os átomos ou as ondas eletromagnéticas, descobertas que influenciam profundamente a nossa história e as nossas vidas. Poderia acontecer o código cósmico, revelado na arquitetura do universo, ser, na realidade, um programa de evolução histórica?

Arnold Toynbee afirmou que cada civilização era a reação a um desafio. Os Romanos tinham o desafio de manter o domínio de um vasto império; a sua reação foi inventar um estado moderno. Da mesma forma, os Egípcios enfrentaram o desafio do sistema

ecológico do rio Nilo construindo um complexo sistema de irrigação e uma estrutura política para o manter. O maior desafio à nossa civilização é dominar o código cósmico. As forças que a ciência descobriu no universo podem aniquilar-nos. Podem também proporcionar a base para uma nova e mais gratificante existência humana. Ninguém sabe qual será a nossa reação a este desafio, mas certamente atingimos as frases do código cósmico que podem pôr fim à nossa existência ou, alternativamente, proporcionar o nascimento da humanidade no universo.

Disse certa vez a um amigo indiano que a pobreza, a ignorância e o desespero do seu subcontinente eram consequência das crenças filosóficas e religiosas dos Indianos (ou seria ao contrário?). O meu amigo replicou que alguns intelectuais indianos pensavam que as grandes guerras do Ocidente, guerras que ceifaram milhões de vidas, eram fruto da filosofia, da ciência e da tecnologia ocidentais. O desafio à nossa civilização, que surgiu com o nosso conhecimento das energias cósmicas que alimentam as estrelas, do movimento da luz e dos eletrões através da matéria, da complicada ordem molecular que forma a base da vida, deve ser enfrentado através da criação de uma ordem moral e política que regule estas forças, pois, caso contrário, seremos destruídos. Serão necessários os nossos mais profundos recursos de razão e compaixão.

O nosso conhecimento recente proporciona também oportunidades ricas, complexas e muitas vezes confusas. Podemos pensar que usamos a nossa liberdade ao fazermos as opções que entendemos, mas as próprias opções estão circunscritas por limites clarificados pela ciência moderna. O estado do universo, do mundo

e da vida humana é olhado por muita gente como produto da ciência, em lugar da descoberta da ciência. É uma sensação que tem por consequência um sentimento de alienação provocado pelo mundo tecnológico.

Em 1965, passeava eu com alguns amigos pelas ruas de Boston, quando encontrei uma senhora de idade com olhos claros e vivos. Usava um vestido feito à mão; pertencia, disse-mo depois, a uma pequena comunidade que rejeitava o uso de máquinas (escreviam, por exemplo, com penas). A senhora, que era poetisa, disse-me que o seu pequeno grupo continuava a acreditar no espírito humano, mas via esse mesmo espírito corrompido pela vida e pela tecnologia modernos. Ela explicou que um espírito demoníaco invadira a Terra havia cerca de trezentos anos, com o objetivo de a destruir. Todo o mal começou quando as melhores mentes de entre filósofos, cientistas e líderes sociais e políticos foram capturadas. Brevemente ficariam à solta os monstros da ciência, da tecnologia e do industrialismo. Lembrei-me de William Blake, também ele poeta, que se lamentava da cegueira de Newton. A conquista estava quase terminada, dizia ela; muito poucos resistiam à queda.

A senhora perguntou-me o que é que eu fazia e, quando lhe disse que era físico, fui recebido com um olhar de horror. Eu era, portanto, um «deles», um inimigo. Senti uma enorme distância entre nós. Um ano mais tarde, a Counterculture² florescia na América; tinha-se instalado uma nova revolta contra a ciência.

Alguns anos mais tarde falei com um jovem que sofria de perturbações mentais. De um modo muito agitado, ele descreveu-

me como seres extraterrestres tinham invadido a Terra. Eram formados de uma substância mental, viviam nas mentes humanas e controlavam-nas através da criação da ciência e da tecnologia. Estes seres teriam o objetivo de gozar uma existência autónoma na forma de computadores gigantes, e não teriam então necessidade dos humanos; isso assinalaria o seu triunfo e o fim da humanidade. Pouco depois foi hospitalizado porque não conseguia afastar esta visão.

A velha poetisa e o jovem estão corretos na sua perceção de que a ciência e a tecnologia vieram do «exterior» da experiência humana. Eles foram sensíveis a esta perceção de uma forma muito excessiva. O que nos é exterior é o universo enquanto revelação material, mensagem a que eu chamo «código cósmico» e que programa hoje em dia o desenvolvimento económico e social da humanidade. O que pode ser apercebido como ameaçador neste contato é que os cientistas, ao lerem o código cósmico, penetraram na estrutura invisível do universo. Vivemos hoje uma revolução científica comparável à que ocorreu quando Copérnico demoliu o mundo antropocêntrico, revolução que começou com a invenção da teoria da relatividade e da mecânica quântica, no início deste século, e que ultrapassou muitas pessoas. Pela própria natureza dos fenómenos que estuda, a ciência tornou-se cada vez mais abstrata. O código cósmico tornou-se invisível; o invisível influencia o visível.

A transformação irreversível dos padrões da existência humana pela ciência constitui uma perturbadora experiência de que muitas pessoas nem se apercebem porque estão demasiado próximas dela. Muitos de nós vivemos em grandes cidades com milhões de

habitantes que pura e simplesmente não poderiam ter existido há alguns séculos, devido aos problemas de fornecimento de alimentos e de higiene. Aceitamos a tecnologia como parte das nossas vidas porque a nossa sobrevivência depende dela. Os peritos e os cientistas asseguram-nos que tudo irá correr bem porque ela é apoiada pelas regras da razão. Mas outros, como a poetisa, veem a razão como ferramenta do demónio, como instrumento para a destruição da vida e da fé simples. Eles veem o cientista como destruidor do espírito humano, enquanto o cientista considera os aliados da poetisa cegos para as exigências materiais da sobrevivência humana. O que nos divide é a diferença entre aqueles que privilegiam as intuições e os sentimentos e aqueles que privilegiam o conhecimento e a razão — recursos diferentes da vida humana. Ambos os impulsos estão dentro de nós; mas por vezes não conseguimos uma síntese útil, e o resultado é um ser incompleto.

No século XIII, a filosofia escolástica tentou reconciliar a fé com a razão. Não teve êxito, mas do seu fracasso nasceu uma nova civilização: o mundo moderno, no qual a dialética entre fé e razão continua de pé. Não devemos optar por um dos termos da dialética: ela deve ser considerada como uma oposição que transforma a vida. A capacidade de realização só pode vir através da fé e dos sentimentos. Mas a capacidade de sobrevivência só surge através da razão e do conhecimento.

Será a ciência moderna hostil à nossa humanidade? Max Born, um dos criadores da teoria quântica, exprimiu a sua preocupação sobre a permanência da aventura científica nos últimos trezentos

anos. A ciência contemporânea, pensava ele, não tem um lugar fixo e sólido na vida humana, ao contrário da política, da religião ou do comércio. Ele perguntava se o gênero humano podia alguma vez abandonar a ciência. Se isso acontecesse, seria cortado o nosso ainda frágil laço ao código cósmico, erro que poderia custar-nos a existência. Creio que os historiadores do futuro verão a civilização contemporânea como reação à descoberta dos mundos das moléculas, dos átomos e das extensões inimagináveis do espaço e do tempo. O desafio é o de trazer estes domínios invisíveis à nossa consciência e tornar humanos os enormes poderes que neles encontramos.

«Ciência» é outro nome para «conhecimento», e ainda não descobrimos nenhum limite para o conhecimento, ainda que tenhamos descoberto muitos outros limites. Mas o conhecimento não é suficiente. Ele deve ser temperado por um sentido de justiça, pela vida moral e pela nossa capacidade para o amor e para servir a comunidade. A ciência traz-nos uma apreciação renovadora da condição humana: as limitações da nossa existência no universo. Através da expansão do conhecimento científico tomamos conhecimento não só dos avanços das nossas possibilidades materiais, mas também das suas limitações intrínsecas.

O livro do Génesis conta-nos a história dos nossos primeiros pais, que foram criados pelo Senhor e colocados num jardim paradisíaco. Havia duas árvores, a árvore do conhecimento e a árvore da vida, e o Senhor proibiu-os de comer o fruto da árvore do conhecimento. Os nossos primeiros pais provaram o conhecimento e conheceram, assim, o bem o mal. Eles podiam agora tornar-se, como o Senhor,

potencialmente donos de um conhecimento infinito. O Senhor expulsou-os do jardim antes de eles terem provado o fruto da árvore da vida e terem assim uma vida infinita. A humanidade enfrenta uma visão de conhecimento infinito a partir de um estado de existência finita.

A ciência não é inimiga da humanidade, mas sim uma das mais profundas expressões do desejo humano de realizar este conhecimento infinito. A ciência mostra-nos que o mundo visível não é matéria nem espírito; o mundo visível é a organização invisível de energia. Não sei quais serão as próximas frases do código cósmico. Mas parece certo que o recente contato humano com o mundo invisível dos quanta e com a vastidão do cosmo modelará o destino da nossa espécie ou daquilo em que esta se tornar.

Eu costumava escalar altas montanhas, com neve e gelo, apoiado lateralmente em grandes rochas. Quando estava a descrever uma das minhas aventuras a um amigo mais velho, este perguntou-me: «Por que é que te queres matar?» Eu protestei; disse-lhe que as recompensas que queria eram a vista, o prazer e sentir que usava o meu corpo e a minha habilidade contra a natureza. O meu amigo replicou: «Quando tiveres a minha idade, verás que estavas a querer matar-te.»

Muitas vezes sonho com quedas. Esses sonhos são comuns para os ambiciosos e para os alpinistas. Há pouco tempo sonhei que me agarrava a uma rocha que subitamente se desprende. Tentei agarrar-me a um arbusto, mas ele cedeu e, num terror gelado, caí

no abismo. De repente apercebi-me de que a minha queda era apenas relativa; não havia fim para ela. Encheu-me uma sensação de prazer. Compreendi que aquilo que eu representava, o princípio da vida, não pode ser destruído. Está inscrito no código cósmico, na ordem do universo. À medida que continuei a cair no vazio, abracei a abóbada celeste, cantei a beleza das estrelas e reconciliei-me com a escuridão.

For the essence and the end
Of his labor is beauty, for goodness and evil are two things
and yet variant, but the quality of life as of death and of light
As of darkness is one, one beauty, the rhythm of that Wheel,
and who can behold it is happy and will praise it to the people³.

ROBINSON JEFFERS, *Point Pinos and Point Lobos*.

¹ Traduzido para português sob o título Um, Dois, Três... Infinito. (N. do T.)

² Movimento de reação contra os valores do racionalismo científico que surgiu nos EUA e cujo expoente máximo foi Theodor Rosak. (N. do T.)

³ Numa tradução livre, este poema pode interpretar-se como se segue:

Porque a essência e o fim
Dos seus trabalhos é a beleza, porque o bem e o mal são duas coisas muito
diferentes, mas a qualidade da vida, tal como a da morte ou da luz
Tal como a da escuridão, é uma só, a beleza, ritmo dessa Roda,
e quem consegue vê-la é feliz e enaltece-la-á aos povos.

(N. do T.)

Bibliografia

O leitor interessado em aprofundar algum do material discutido neste livro pode consultar as obras abaixo referidas. Esta bibliografia contém apenas uma pequena fração da literatura sobre física moderna; não está de forma alguma completa, mas serve de introdução. Quase todos estes livros e artigos foram escritos por físicos, facto que reflete a minha própria parcialidade na seleção. Todos estes livros, ainda que alguns utilizem matemática, contêm material acessível e de interesse para o leitor geral.

Amaldi, Ugo, *Particle Accelerators and Scientific Culture*, publicação do CERN, 79-06, Genebra, 1979.

Asimov, Isaac, *Science, Numbers and I*, Nova Iorque, Garden City, 1968.

Bernstein, Jeremy, *Einstein*, Nova Iorque, Viking Press, 1973.

Bohr, Niels, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Nova Iorque, John Wiley and Sons, 1958.

Born, Max, *The Born-Einstein Letters*, Nova Iorque, Walker and Co., 1971.

Childs, H., *An American Genius: The Life of Ernest Orlando Lawrence*, Nova Iorque, Dutton, 1968.

Clark, Ronald W., *Einstein, The Life and Times*, Nova Iorque, World Publishing, 1971.

Cline, Barbara L., *The Questioners: Physicists and the Quantum Theory*, Nova Iorque, Thomas Y. Crowell, 1973.

Davis, P. C. W., *The Forces of Nature*, Nova Iorque, Cambridge University Press, 1979.

— *The Physics of Time Asymmetry*, Berkeley, Califórnia, University of California Press, 1974.

- Dirac, P. A. M., «*The Evolution of the Physicist's Picture of Nature*», in *Scientific American*, 208, Maio de 1963.
- Drell, S. D., «*When Is a Particle*», in *American Journal of Physics*, 46, Junho de 1978, p. 597.
- Einstein, Albert, *Ideas and Opinions*, traduzido para o inglês por Sonja Bargmann, Nova Iorque, Crown Publishers, 1954.
- *The Evolution of Physics*, com Leopold Infeld, Nova Iorque, Simon and Schuster, 1938.
- Feinberg, Gerald, *What Is the World Made Of? Atoms, Leptons, Quarks and Other Tantalizing Particles*, Nova Iorque, Doubleday, 1977.
- Feynman, R. P.; Leighton, Robert B.; e Sands, Matthew, *The Feynman Lectures on Physics*, vols. I, II e III, Nova Iorque, Addison-Wesley Publishing Co., 1963.
- «*Structure of the Proton*», in *Science*, 183 (1975).
- Frank, Philipp, *Einstein: His Life and Times*, Nova Iorque, Alfred A. Knopf, 1947.
- Gamow, George, *One, Two, Three... Infinity*, Nova Iorque, The Viking Press, 1947.
- Gell-Mann, M., e Rosenbaum, E. P., «*Elementary Particles*», in *Scientific American*, 197, Julho.
- Glashow, Sheldon, «*Quarks with Color and Flavor*», in *Scientific American*, 233, n.º 4 (1974), p. 38.
- Heisenberg, Werner, *Physics and Beyond*, Nova Iorque, Harper and Row, 1971.
- Hoffmann, Banesh, *Albert Einstein, Creator and Rebel*, com a colaboração de Helen Dukas, Nova Iorque, The Viking Press, 1972.
- *Albert Einstein: The Human Side*, com Helen Dukas, Princeton, Princeton University Press, 1979.

- Holton, Gerald, «Constructing a Theory: Einstein's Model», in *The American Scholar*, vol. 48, n.º 3 (1979).
- *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*, Cambridge, Harvard University Press, 1973.
- *The Scientific Imagination: Case Studies*, Nova Iorque, Cambridge University Press, 1978.
- Klein, Martin J., *Paul Ehrenfest*, Amsterdão, Holanda do Norte; Nova Iorque, American-Elsevier, 1970.
- McMillan, E., «Early Accelerators and Their Builders», in *IEEE Trans. Nuclear Science*, 20, Junho de 1973.
- Miller, Arthur L., *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
- Pais, Abraham, *Subtle Is the Lord*, Nova Iorque, Oxford University Press, 1982.
- Particles and Fields*, coletânea de artigos publicados em *Scientific American*, com uma introdução de William J. Kaufmann III, São Francisco, W. H. Freeman and Co., 1980.
- Polkinghorne, J. C., *The Particle Play: An Account of the Ultimate Constituents of Matter*, São Francisco, W. H. Freeman and Co., 1979.
- Rosen, Joe, *Symmetry Discovered*, Nova Iorque, Cambridge University Press, 1975.
- Schilpp, Paul A. (ed.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Tudor Publishing Co., 1949.
- Schwitters, Roy F., «Fundamental Particles with Charm», in *Scientific American*, 237, n.º 4 (1977).

- Segre, Emilio, *From X-Rays to Quarks, Modern Physicists and Their Discoveries*, São Francisco, W. H. Freeman and Co., 1980.
- Trefil, James S., *From Atoms to Quarks: An Introduction to the Strange World of Particle Physics*, Nova Iorque, Charles Scribner's Sons, 1980.
- Teller, Edward, *The Pursuit of Simplicity*, Malibu, Califórnia, Pepperdine University Press, 1980.
- Weinberg, Steven, *The First Three Minutes*, Nova Iorque, Bantam Books, 1979.
- «Unified Theories of Elementary Particle Interaction», in *Scientific American* 231 n.º 1 (1974), p. 50.
- «The Search for Unity: Notes for a History of Quantum Field Theory», in *Daedalus*, 106 (1977).
- «The Forces of Nature», in *American Scientist*, 65 (1977).
- Weisskopf, Victor W., *Knowledge and Wonder*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1979.
- «Three Steps in the Structure of Matter», in *Physics Today*, 23, Agosto de 1969.
- «The Development of the Concept of An Elementary Particle», in *Proceedings of the Symposium on the Foundations of Modern Physics*, Loma-Koli (Finlândia), 1977 (ed. V. Karimäki), B1, n.º 14 (publ. Universidade de Joensuu, 1977).
- Wilson, R., «From the Compton Effect to Quarks And Asymptotic Freedom», in *American Journal of Physics*, 45 (1977).
- Wolf, Harry (ed.), *Some Strangeness in the Proportion*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.