

Quarks, léptons e o Universo

As mais belas ideias sobre
matéria e energia, tempo e espaço

Alberto Reis



CBPF
Centro Brasileiro
de Pesquisas Físicas

Quarks, léptons e o Universo
as mais belas ideias sobre
matéria e energia, espaço e tempo

Alberto Reis

2025

A334 Reis, Alberto.

Quarks, léptons e o Universo: as mais belas ideias sobre matéria e energia, espaço e tempo/Alberto Reis. - Rio de Janeiro: CBPF, 2025

208 p.

ISBN 978-85-99957-07-3

1. Partículas (Física Nuclear).
2. Matéria. 3. Energia. 4. Espaço e tempo.
I. Título

CDD 539.72

Núcleo de Informação C&T e Biblioteca – NIB/CBPF
Fátima Silva – CRB/7 5277 e Valéria Vasconcelos

Capa - fotografia da galáxia NCG 4144 - NASA

Este livro é dedicado a todas as
minhas professoras e professores

Tempos atrás, prometi às minhas queridas Aline Lacerda e Luciana Heymann que escreveria sobre a Física de Partículas em uma linguagem acessível. Passaram-se algumas décadas, e elas talvez nem se lembrem da promessa, mas como eu poderia esquecer?

Sou eternamente grato à minha leitora mais fiel e maior incentivadora, a minha amada irmã Lylian Reis, cujas sugestões melhoraram bastante todos os capítulos do livro.

Agradeço também ao meu caro amigo de velhas batalhas, Mario Novello, pela leitura do manuscrito, e às minhas queridas Raphaella Daros, pelos seus comentários, e Patricia Daros, anfitriã insuperável, em cuja magnífica varanda boa parte do texto foi escrito.

Sumário

1	Introdução	5
2	Partículas de luz	13
3	O quantum	29
4	Radioatividade	42
5	Átomos	54
6	Mecânica Quântica	65
7	Quarks e Léptons	95
8	Relatividade	123
9	Estrelas	144
10	Expansão	158
11	Bang? Ou Bounce?	172
12	Ordem	184
13	O Universo invisível	197
14	Epílogo	209

Capítulo 1

Introdução

Nossa espécie vagueia pela Terra há pelo menos 200 mil anos. Os humanos desse passado remoto tinham a mesma anatomia atual, eram pessoas como você e eu, com as mesmas características físicas e, provavelmente, com as mesmas capacidades cognitivas. Vestidos com roupas que usamos, passariam despercebidos no metrô. Sabemos disso não só pelos registros arqueológicos, mas sobretudo pela Genética Molecular. Avanços tecnológicos muito recentes tornaram possível decifrar o código genético contido no DNA retirado de fósseis dos nossos antepassados remotos, um feito que rendeu o Prêmio Nobel de Medicina de 2022 para Svante Paabo. Podemos seguir as inúmeras migrações das populações ao longo do tempo e descobrir como nós, humanos, ao que tudo indica partindo da África, ocupamos os quatro cantos da Terra, nos miscigenando continuamente ao longo do caminho.

É muito provável que, assim como nós, nossos ancestrais se encantassem com o céu estrelado das noites limpas. Longe das luzes da cidade e da poluição, a visão da Via Láctea nas noites de Lua nova é uma experiência impactante, inesquecível.

Diante desse deslumbramento, é possível que nossos antepassados longínquos já fizessem perguntas cujas respostas ainda buscamos. O que há lá fora no Universo? De que são feitas todas as coisas? Como chegamos até aqui? Para onde estamos indo? São perguntas que ainda deverão ser feitas por muito tempo.

Ao longo de milênios, a Humanidade procurou respostas em um mundo mágico, habitado por deuses e espíritos que criaram todas as coisas e que regiam tanto a vida terrena como os fenômenos naturais. Nos tempos modernos, a Ciência substituiu a magia pela Matemática. Sobretudo nos últimos 130 anos, construímos uma representação da Natureza baseada em experimentos e medições muito precisas feitas em sofisticados laboratórios e observatórios, terrestres e espaciais. As imagens do Observatório Espacial James Webb trazem surpresas, causam assombro e deslumbramento.

Olhar para o céu nos ensinou muitas coisas. Descobrimos que a Via Láctea é apenas mais uma entre bilhões, ou mesmo trilhões de outras galáxias, separadas por uma vastidão difícil de conceber. Aprendemos também que em qualquer direção que apontemos antenas e telescópios, vemos sempre a mesma coisa: a mesma matéria que temos aqui na Terra, feita dos mesmos elementos químicos, compostos pelos mesmos átomos. "Assim na Terra como no céu", da tradição católica, vale também para a Astronomia.

Descobrimos também que vivemos em um Universo em que tudo se move. As galáxias se afastam continuamente umas das outras, tão mais rapidamente quanto mais distantes entre si elas estiverem. O Universo está em expansão, e isso significa que, no futuro, as galáxias estarão mais distantes entre si. Significa também que no passado elas estiveram mais próximas. Se pudéssemos inverter o sentido do tempo, veríamos o Universo encolher. Recuando o suficiente, chegaríamos a uma

era primordial, quando ainda não havia estrelas e planetas, nem mesmo átomos, havia apenas energia e uma infinidade de partículas elementares, a matéria prima desorganizada, da qual são feitas todas as coisas que podemos ver.

Mas não é possível recuar no tempo indefinidamente. Há um limite, além do qual não se sabe ao certo o que aconteceu. Podemos afirmar com segurança que a expansão do Universo começou há 13,8 bilhões de anos, mas não sabemos como tudo surgiu, se a matéria e a energia surgiram juntas com o espaço e o tempo. A expressão “idade do Universo”, frequentemente usada, se refere na verdade ao início da expansão.

Se a história do Universo coubesse em um ano, nossa espécie teria surgido um pouco depois de 23:50 do dia 31 de dezembro. Colombo chegaria à América faltando apenas um segundo para meia-noite. Temos uma boa ideia do que aconteceu durante o ano, mas não sabemos, e talvez nunca saibamos o que aconteceu exatamente à zero hora do dia 1º de janeiro e nos instantes que imediatamente se seguiram. É possível chegar muito perto, mas não podemos afirmar se houve ou não um começo de tudo.

Há basicamente duas hipóteses sobre a evolução do Universo, com variantes. A ideia mais popular é a do *Big Bang*: teria havido, de fato, um momento inicial quando o tempo, o espaço, a matéria e a energia surgiram. Mas nas últimas décadas, uma outra hipótese surgiu, a do *Big Bounce*, o grande ricochete, segundo a qual o Universo seria eterno. Tempo e espaço não teriam sido criados, sempre teriam existido. O Universo teria passado por uma fase de contração até atingir um volume mínimo, quando então teve início a expansão que vemos hoje. Os físicos do CBPF, Mario Novello em particular, deram grande contribuição para a formulação dessa hipótese.

Parece, no entanto, não haver dúvidas que a expansão teve início a partir de um estado de densidade inimaginável, quando

o volume do Universo era microscópico. Ao longo do livro, me referirei a esse momento como o *Big B*, o início da expansão.

Há um limite físico sobre o que é possível observar diretamente. A luz é incrivelmente rápida: em um segundo, um raio luminoso percorreria uma distância equivalente a sete voltas e meia em torno da Terra. Nada se propaga mais rapidamente. Mas apesar de a luz ser muito rápida, sua velocidade é finita, e isso tem muitas consequências. A luz do Sol, por exemplo, leva cerca de oito minutos para percorrer a distância até a Terra, e um pouco mais para chegar à Marte. Pense em uma galáxia muito, muito distante. A luz que vemos hoje viajou pelo espaço durante milhões ou mesmo bilhões de anos, o tempo necessário para percorrer a imensidão do espaço que nos separa. Desde o *Big B*, o Universo se expande continuamente, e assim, no momento em que a vemos, a galáxia longínqua está muito mais distante.

Olhar para o céu, portanto, é uma forma de viajar no tempo. Mas é uma viagem apenas para o passado, um passado tão mais remoto quanto mais distantes forem as estrelas e galáxias. Mas com um limite. O Universo tem uma “idade—o tempo transcorrido desde o início da expansão—, e a velocidade da luz é finita. A combinação desses dois fatores nos limita a observar uma porção limitada do Universo. Objetos muito distantes, cuja luz leve mais tempo para chegar até nós do que a “idade” do Universo, só serão visíveis no futuro. Assim, quando falo de Universo eu me refiro apenas à parte observável.

Ainda há, claro, muitas lacunas. Paradoxalmente, nossa ignorância aumenta à medida que o conhecimento avança. Mas é incrível que em uma existência tão curta os humanos tenham aprendido tanto sobre o que aconteceu nos últimos 13,8 bilhões de anos. Mais incrível ainda é o fato de não ter sido necessário sair do entorno do nosso pequeno, maravilhoso e maltratado

planeta azul para descobrir a história do Cosmo e o lugar que ocupamos na sua vastidão. Para isso, foi necessário mergulhar nas profundezas da matéria, entender como ela se organiza na sua escala mais fundamental.

Quase toda a informação direta que temos sobre o Universo vem da luz visível, dos raios gama, raios-X, micro-ondas e das ondas de rádio que chegam do espaço. Esses mensageiros são formas distintas de uma mesma coisa: radiação eletromagnética, ondas que se propagam pelo espaço transportando energia e informação. A luz, no entanto, só começou a se propagar livremente pelo espaço cerca de 380 mil anos depois do *Big B*. Antes, a luz estava aprisionada no plasma primordial. O Universo era opaco. Usando a radiação eletromagnética, não é possível observar diretamente nada do que aconteceu antes desse momento.

Mesmo sem a informação trazida pela luz, é possível voltar um pouco mais no tempo, até muito perto do *Big B*. E eis aqui a *conexão cósmica*: para entender os momentos iniciais do Universo, assim como o nascimento e morte das estrelas, além de outros processos no Cosmo, é preciso usar o que aprendemos sobre a estrutura mais elementar da matéria. Esse conhecimento é adquirido nos experimentos com gigantescos aceleradores de partículas, como o LHC, do CERN, na Suíça. A conexão cósmica é o encontro entre o mundo do infinitamente pequeno e do inconcebivelmente grande, encontro com que vamos nos deparar muitas vezes ao longo desse livro.

Nos aceleradores estudamos as *partículas elementares* – os *quarks* e os *léptons* –, sobre as quais falaremos muito ao longo do livro. São as menores porções de matéria conhecidas. Tudo à nossa volta é feito a partir delas. Quarks e léptons, até onde sabemos, não têm uma estrutura interna, nem podem ser divididos em outras partículas ainda mais fundamentais. Assim, para todos os efeitos práticos, as partículas elemen-

tares podem ser consideradas pontinhos de matéria. Não se sabe ainda como elas surgiram, mas temos uma boa ideia sobre como tudo se formou a partir delas. Os quarks se juntaram para formar prótons e nêutrons, e estes se aglutinaram para formar núcleos atômicos, que capturaram elétrons formando átomos. Tudo o que vemos é feito de átomos: estrelas e planetas, galáxias, aglomerados de galáxias, superaglomerados de galáxias.

Os átomos também formam moléculas básicas, que se unem em grandes cadeias, dando origem à matéria orgânica, que forma a vida. A matéria se organiza de forma cada vez mais complexa. Curiosamente, o que dirige o movimento em direção a uma complexidade crescente é o acaso. Será a vida, ou a espécie humana o ponto final da complexidade?

O conhecimento é um processo cumulativo, mas em certas ocasiões avança muito rapidamente, atingindo um novo patamar. Podemos dizer que história do se sabe hoje sobre a estrutura da matéria remonta ao apagar das luzes do século XIX e das três décadas que se seguiram. Nesse período, a forma de ver o mundo mudou radicalmente. A combinação de descobertas surpreendentes e avanços teóricos sem precedentes culminou na criação das duas teorias que revolucionaram o mundo: a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade.

A Mecânica Quântica está por toda parte. Tornou-se uma espécie de “constituição” do microcosmo, estabelecendo um conjunto universal de princípios fundamentais que devem ser seguidos por todas as outras teorias físicas. A Mecânica Quântica está na base do moderno mundo digital. Graças à ela desenvolvemos a arte de conduzir elétrons como quisermos, arte que chamamos de eletrônica. A Mecânica Quântica é a teoria física que descreve os fenômenos microscópicos. Ela nos deu a ferramenta mais poderosa que a Humanidade criou: o domínio dos

átomos. A Mecânica Quântica foi obra de muitas mãos, desenvolvida ao longo de 25 anos em que a genialidade e ousadia de físicos teóricos foi associada a extraordinárias descobertas experimentais. Foram tempos de grande excitação.

A Teoria da Relatividade, ao contrário, foi obra de um só homem: Albert Einstein. A Mecânica Quântica foi criada para explicar uma série de fenômenos novos, mas Einstein partiu de um único fato experimental: a velocidade da luz é sempre a mesma, independente do movimento da fonte. A esse fato, Einstein adicionou uma hipótese, hoje em dia bastante natural: as leis da Física não dependem do observador. Usando apenas lápis e papel e os seus famosos “experimentos mentais”, situações hipotéticas com que ilustrava seu raciocínio, Einstein reinventou o tempo e o espaço.

Einstein criou a Teoria da Relatividade em duas etapas. A primeira, a Relatividade Especial, fez parte do seu “ano milagroso”, em 1905, quando publicou uma série de trabalhos que entraram para a história, um dos quais lhe renderia o Prêmio Nobel. Assim como a Mecânica Quântica, a Teoria da Relatividade também estabelece princípios que devem ser seguidos por todas as teorias. Mas a Relatividade Especial foi “apenas” um ensaio. Einstein buscava uma nova teoria da gravitação que substituísse a teoria de Newton, que reinava soberana há 250 anos e que, até então, havia sido muito bem sucedida.

Apesar do sucesso, a teoria da gravitação de Newton não satisfaz os princípios da Relatividade. A teoria de Newton se baseia em uma misteriosa ação à distância, transmitida de forma instantânea entre os corpos, como se estes fossem conectados por fios invisíveis. Newton sempre se esquivou de explicar os detalhes de como isso ocorria. A resposta veio em 1915. Após dez anos de um gigantesco esforço intelectual, Einstein apresentou ao mundo a forma final da sua Teoria da

Relatividade Geral, que em 1919 viria a ser confirmada no céu de Sobral, no Ceará, e o tornaria uma celebridade mundial.

O modelo atômico da matéria é uma grande, talvez a maior conquista da Ciência. Pode ser resumido em uma frase: *tudo o que vemos é feito de átomos*. Das estrelas ao seres vivos, encontramos sempre a mesma coisa, átomos, átomos, átomos. Do esforço coletivo para entender o que acontece no interior dos átomos surgiu a Mecânica Quântica. Enquanto a Teoria da Relatividade abriu o caminho para entendermos os mistérios do Cosmo, a Mecânica Quântica deu origem a um avanço tecnológico sem precedentes. Permitiu entender o mecanismo básico da vida, o código genético contido no DNA, confirmando a Teoria da Evolução de Darwin em nível molecular. Refundou a Química, abrindo caminho para a fabricação de novos materiais com propriedades fantásticas. Além disso, ampliou incrivelmente a capacidade de observar a matéria em escalas cada vez menores. E assim descobrimos que toda a complexidade, toda a diversidade do Universo se resume basicamente a três elementos constituintes, a três partículas elementares.

A Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade contêm as mais belas e, seguramente, as mais estranhas ideias sobre a natureza de todas as coisas, sobre o tempo e o espaço, a matéria e a energia. O objetivo deste pequeno livro é falar um pouco sobre como os deuses das pequenas coisas se conectam com os deuses das vastidões inimagináveis. Escrevo pensando em todas e todos os que talvez não tenham as melhores lembranças das aulas de Física, mas nem por isso deixaram de ter curiosidade sobre como a Natureza funciona. A elas e eles, convido para um passeio pelo mundo quântico, explorando a conexão cósmica.

Capítulo 2

Partículas de luz

“Todos esses anos de intensa reflexão não me aproximaram da resposta à pergunta: o que são os quanta de luz? Claro, hoje qualquer idiota acha que sabe a resposta, mas está apenas se enganando”. Albert Einstein

A fórmula química da água é bem conhecida: H_2O , uma molécula feita de dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio. Se pudéssemos nos reduzir ao tamanho de um átomo, em vez do líquido essencial para a vida veríamos uma infinidade de moléculas de H_2O separadas umas das outras, movendo-se aleatoriamente em todas as direções. À medida em que voltamos ao tamanho normal, a individualidade das moléculas se perde, e a água torna-se o fluido contínuo que forma rios e oceanos.

Sistemas feitos de um número muito grande componentes têm uma característica comum: o comportamento coletivo pode ser bastante diferente do comportamento de suas unidades individuais. O todo evolui de forma distinta das suas partes. Há exemplos de toda natureza. Pense em um estádio de futebol lotado. As câmeras de TV filmam as pessoas nos seus assentos esperando o jogo começar. Num dado momento,

a torcida organizada começa uma “ola”. Cada torcedor se levanta quando a “ola” se aproxima e volta a sentar quando ela se afasta. Visto de longe, o efeito coletivo é uma onda humana que percorre todo o estádio. Podemos pensar também em uma revoada de andorinhas. Os bandos são tão numerosos que formam uma nuvem densa. De perto, podemos seguir o voo de cada andorinha e ver como cada uma muda subitamente de direção. Vistas de longe, as andorinhas parecem formar um só corpo, que se move e deforma continuamente como um fluido. Com a luz acontece algo parecido. De uma certa forma, pode-se dizer que um raio luminoso é uma revoada de fótons, os *quanta* de luz.

O aspecto do mundo depende de quão perto o examinemos. O ar é feito de incontáveis moléculas de diferentes gases. Obviamente, não é possível descrever o vento seguindo a trajetória de cada molécula do ar. A linguagem matemática adequada varia de acordo com a escala de observação. Para cada escala há uma abordagem diferente, baseada em grandezas e conceitos específicos: a Mecânica Quântica, para os átomos; a mecânica dos fluidos, para o vento; a Mecânica de Newton, para o movimento dos astros no Sistema Solar; a Teoria da Relatividade, para a gravidade em escala cósmica.

Durante muitos séculos, sábios, filósofos e cientistas fizeram a pergunta “o que é a luz?”. Há 1100 anos, quando a Europa ainda estava mergulhada no obscurantismo da Idade Média, o astrônomo persa Ibn al-Haytam escreveu uma obra monumental, um tratado em sete volumes sobre ótica. Al-Haytam afirmava que a luz era um feixe de corpúsculos imateriais, ideia que seria compartilhada por Newton séculos depois, já no início da era moderna no Ocidente. No começo do século XIX, no entanto, a interferência entre feixes luminosos foi descoberta, e isso que levou a maioria dos cientistas a pensar que

a luz não seria um feixe de corpúsculos, e sim uma espécie de onda, pois só ondas sofrem difração e interferência. Ondas e corpúsculos são conceitos incompatíveis. A luz poderia ser um ou o outro, nunca os dois ao mesmo tempo.

É provável que você já tenha visto uma imagem do calçadão de Copacabana. O desenho formado pelas pedras portuguesas representa as ondas do mar, uma obra prima de Burlle Marx mundialmente famosa. Um padrão básico se repete ao longo dos quatro quilômetros de extensão da praia. Ondas são seqüências de oscilações que se repetem regularmente. Se estendem pelo espaço, transportando energia. As ondas são caracterizadas por três grandezas: o comprimento de onda (o tamanho do padrão que se repete); a *frequência* (quantos padrões se propagam por unidade de tempo); a *amplitude*, característica que diferencia uma marola de um vagalhão. Quanto maior for a frequência, menor será o comprimento de onda, e vice-versa. Mas o fato mais notável é que os fenômenos ondulatórios – difração, refração, interferência etc. – são comuns a *todos* os tipos de onda.

Durante muito tempo, a eletricidade, o magnetismo e a ótica foram considerados fenômenos inteiramente independentes, sem nenhuma relação entre si. Assim foi até 1864, quando o físico escocês James Maxwell publicou um trabalho extraordinário, que se tornou um dos pilares da Física. Maxwell mostrou que a eletricidade e o magnetismo são umbilicalmente ligados, como as duas faces de uma mesma moeda, manifestações distintas de uma única entidade, o *campo eletromagnético*. Newton, 180 anos antes, havia atribuído uma causa comum à queda dos objetos na superfície da Terra e ao movimento dos planetas em torno do Sol, fenômenos considerados sem relação aparente até então. De uma certa forma, Maxwell repetiu o feito de Newton ao unificar os fenômenos

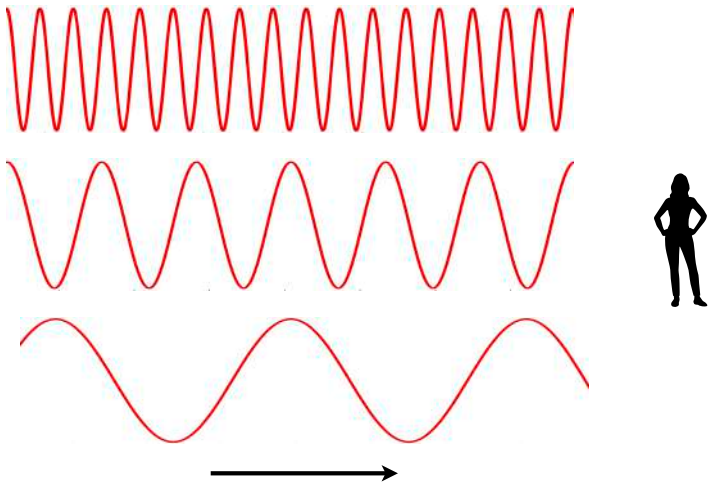


O desenho do calçadão da praia de Copacabana remete às ondas do mar. O tamanho do padrão que se repete é o comprimento de onda.

elétricos e magnéticos em uma única teoria, o eletromagnetismo.

Maxwell introduziu uma novidade na Física: o conceito de *campo* como o mecanismo que transmite a força que um corpo exerce sobre outro. Voltemos à gravidade. Segundo Newton. A força de atração mútua faz com que os corpos orbitem uns em relação aos outros, sem que haja contato físico entre eles, é uma misteriosa *ação à distância* que atua instantaneamente. Como ela é transmitida de um corpo ao outro?

Imagine que, subitamente, um cataclismo atingisse o Sol. Nós aqui na Terra só sentiríamos os efeitos cerca de oito minutos depois. Esse é o tempo necessário para a luz percorrer a distância que nos separa do Sol. Segundo Newton, sentiríamos instantaneamente os efeitos do cataclismo, o que é impossível. Em 1905, Einstein mostrou que nada pode se propagar mais rapidamente que a luz.

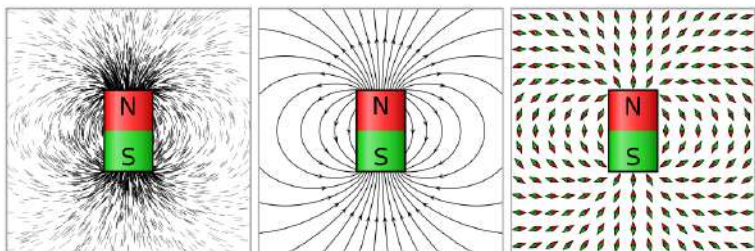


Ondas são caracterizadas pela frequência ou pelo comprimento de onda, e pela amplitude. No desenho acima, as ondas se propagam da esquerda para a direita. A onda superior tem menor comprimento de onda, e portanto maior frequência que as ondas inferiores.

Maxwell criou uma alternativa ao obscuro conceito de ação à distância instantânea: a ideia de que as forças entre os corpos se propagam através de um campo contínuo que preenche todo o espaço. Talvez seja essa a novidade de maior impacto introduzida por ele. Mas o que seria o campo gravitacional? A resposta a essa pergunta foi dada por Einstein em 1915, quando apresentou ao mundo a sua teoria da Relatividade Geral, a moderna descrição do que é a gravidade.

A ideia de campo é o ponto de partida de todas as teorias quânticas modernas. Os campos, porém, não são meros instrumentos matemáticos úteis, eles são reais, contêm energia. Todos os que já brincaram com ímãs sentiram com as mãos as forças de atração e repulsão, originadas do invisível campo magnético. Uma demonstração clássica em sala de aula con-

siste em limalhas de ferro espalhadas ao acaso sobre uma folha. Quando um ímã é posicionado debaixo da folha, as limalhas imediatamente se dispõem de acordo com as linhas de força, desenhando a forma do campo magnético do ímã.



A presença de um ímã modifica as propriedades do espaço em volta. O ímã cria um campo magnético ao seu redor. Bússolas dispostas no entorno do ímã mostram a direção em que a força magnética atua em cada ponto.

Assim como os ímãs criam campos magnéticos, as cargas elétricas são fonte de campos elétricos. Não se sabe qual é a origem da carga elétrica, sabe-se apenas que é uma propriedade que elétrons, prótons e outras partículas possuem. O que é mais relevante na Física, no entanto, é saber *como* essa propriedade se manifesta, como as partículas que a possuem se comportam em diferentes situações. Usando o conceito de campo, as teorias modernas permitem fazer cálculos muito precisos, que estão de acordo com os dados experimentais dentro de incertezas de uma parte em bilhões.

Imagine uma pequena esfera metálica que esteja fixa em um determinado ponto no espaço e que seja carregada eletricamente (um excesso de elétrons sobre prótons, ou vice-versa). A presença da esfera eletricamente carregada dá origem a um campo de forças que modifica as propriedades do espaço ao seu redor. Enquanto a esfera estiver em repouso, o campo elétrico gerado não se altera com o tempo.

Apesar de estarem umbilicalmente ligados, há uma diferença crucial entre os campos elétricos e magnéticos. O magnetismo sempre envolve *dois polos*, usualmente referidos como norte e sul. As linhas de campo magnéticas são fechadas, ou seja, começam em um polo e terminam no outro, como ilustrado no exemplo das limalhas de ferro. Já o campo elétrico tem apenas um polo, como no exemplo da bolinha carregada. As linhas de campo de um elétron isolado, por exemplo, são abertas, começam na partícula e se estendem radialmente até o infinito.

Se uma segunda esfera carregada for colocada perto da primeira, cada uma exercerá uma força elétrica sobre a outra, que tanto pode ser de atração, se as cargas das duas esferas forem opostas, como de repulsão, caso sejam do mesmo tipo. A força elétrica depende tanto da quantidade de carga (número de elétrons ou prótons em excesso) das duas esferas como da distância entre elas. Quanto mais próximas estiverem, mais intensa será a força que uma faz sobre a outra. A força elétrica é sentida mesmo a grandes distâncias, embora sua intensidade diminua rapidamente.

Se agora a primeira esfera é forçada a vibrar, oscilando continuamente entre dois pontos, o campo elétrico gerado muda com o tempo em cada posição. Mas a alteração no campo da primeira não atingirá a segunda esfera instantaneamente. A perturbação do campo se propaga pelo espaço na forma de uma onda. A informação sobre o movimento da primeira esfera é transmitida pelo campo elétrico com a velocidade da luz, e atinge a segunda depois de algum tempo. Imagine um lago tranquilo onde há uma flor boiando. Uma pedra atirada em um ponto qualquer do lago gera ondulações circulares que se propagam pela água e, após algum tempo, passam pela flor. Se pedrinhas de mesmo tamanho são jogadas em um intervalo regular, as ondas se propagarão continuamente. Toda in-

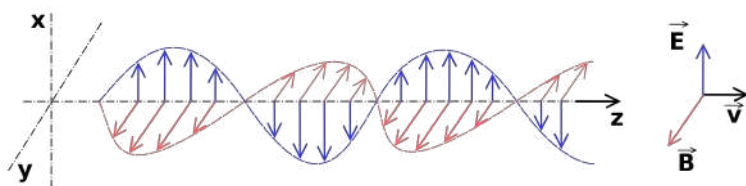
formação se propaga pelo espaço com velocidade finita, nunca superior à da luz no vácuo.

Campos magnéticos surgem de duas maneiras: ou são gerados por ímãs, materiais com propriedades magnéticas permanentes, ou pelo movimento de cargas elétricas (correntes elétricas). Os ímãs são feitos de alguns tipos específicos de materiais – ferro, níquel e cobre – que possuem uma propriedade originada no nível atômico, graças a interações entre os elétrons envolvendo uma propriedade quântica, o *spin*, sobre o qual falarei no Capítulo 5. O magnetismo nesses materiais é o efeito coletivo de um número muito grande de átomos, cada um atuando como um minúsculo ímã.

Desde o século XIX sabe-se que correntes elétricas que circulam em um anel metálico fazem com que ele vire um ímã. Se o anel puder girar livremente, ele se alinhará com o campo magnético da Terra, tal como a agulha de uma bússola. Agora pense em uma bobina metálica com um ímã no seu centro. Se o ímã girar em torno de si mesmo, o movimento vai gerar uma corrente elétrica na bobina, como nas usinas hidrelétricas (a energia mecânica da água em queda transforma-se em energia elétrica). Em resumo, quando um campo magnético em uma determinada região se altera com o tempo, surge um campo elétrico na mesma região, e vice-versa.

Assim, quando a esfera carregada do exemplo acima vibra continuamente em torno de um ponto de equilíbrio, como se estivesse presa a uma mola, o movimento oscilatório causa perturbações no campo elétrico no entorno da esfera. As perturbações se propagam pelo espaço como uma sequência de ondulações, no mesmo ritmo do movimento da esfera. Mas as ondulações do campo elétrico criam campos magnéticos, que também variam com o tempo e, da mesma forma, se propagam pelo espaço. Como vimos acima, campos magnéticos que mudam com o tempo geram campos elétricos, e vice-versa. Ou

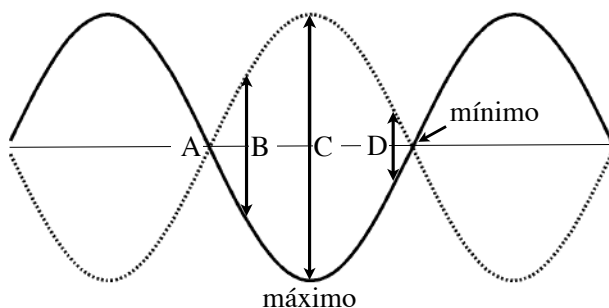
seja, o movimento vibratório da esfera causa oscilações dos campos elétrico e magnético, que ocorrem de forma sincronizada. A variação de um gera o outro, e vice-versa, em um processo que se autoalimenta. No vácuo, a perturbação inicial se propaga indefinidamente e de forma autossustentável, mesmo depois de a esfera parar de oscilar. Isso é o que chamamos de *onda eletromagnética*. *Grosso modo*, é assim que as antenas funcionam.



As setas azuis representam o campo elétrico, e as vermelhas, o campo magnético. O campo elétrico oscila na vertical, e o magnético na horizontal. A onda se propaga da esquerda para a direita. A oscilação do campo elétrico gera a oscilação do campo magnético e vice-versa.

Maxwell previu a existência de ondas eletromagnéticas, mas sua comprovação só ocorreu algumas décadas depois, já no fim do século XIX. A descoberta das ondas eletromagnéticas marcou o momento em que a disputa sobre a natureza da luz pareceu finalmente resolvida: a luz é uma onda eletromagnética, e não um feixe de corpúsculos. A ótica perdeu sua identidade própria. De disciplina independente, passou a ser um ramo do eletromagnetismo.

O conjunto das infinitas frequências que as ondas eletromagnéticas podem ter forma o *espectro eletromagnético*. Nossos olhos são sensíveis apenas a um pequeno intervalo do espectro, que corresponde às cores do arco-íris. Nesse curto trecho, cor da luz é determinada pela frequência da onda. A luz violeta tem frequência mais alta que a da luz vermelha, e por



Trecho de uma onda eletromagnética, mostrando o campo elétrico. Em cada ponto, o campo oscila para cima e para baixo. No ponto C, a intensidade do campo elétrico oscila verticalmente com a maior amplitude. Em todas as outras posições, o campo oscila com amplitudes menores. No ponto A, a intensidade do campo é sempre zero. O campo magnético oscila na direção perpendicular ao plano do papel de forma sincronizada com o campo elétrico.

isso transporta mais energia e tem maior poder de penetração. Fora desse intervalo, toda a *radiação* (o outro nome das ondas eletromagnéticas) é invisível ao olho humano. É bom lembrar que as cores, assim como os cheiros e os sabores, existem apenas no nosso cérebro. Se os nossos olhos fossem os únicos detectores de luz existentes, só conheceríamos uma pequena parte do espectro eletromagnético.

O espectro eletromagnético se estende para muito além e muito aquém do arco-íris. Num dos extremos do espectro estão os raios gama, que são as ondas eletromagnéticas de maior frequência (ou, equivalentemente, as de menor comprimento de onda). A seguir vêm os raios-X, ondas com frequências menores. Depois, em ordem decrescente de frequência, vêm a radiação ultravioleta, a luz visível, a radiação infravermelha, as micro-ondas e as ondas de rádio.

A teoria de Maxwell era um sucesso absoluto, mas assim como com a gravitação de Newton, nem tudo estava resolvido. Havia um problema, o *efeito fotoelétrico*. Quando uma superfície metálica é iluminada com luz de uma certa cor, elétrons são ejetados dos átomos das camadas mais superficiais. Convivemos rotineiramente com esse fenômeno. Nos elevadores modernos, o mecanismo que controla o fechamento das portas é baseado no efeito fotoelétrico. Apesar do sucesso da teoria de Maxwell, o efeito fotoelétrico não pode ser explicado admitindo que a luz seja uma onda eletromagnética.

O ano de 1905 entrou para a história como o “ano milagroso” de Einstein. Em 2005, o centenário desse ano singular, de inspiração genial, foi comemorado em vários países, inclusive no Brasil. Durante um intervalo de poucos meses, Einstein publicou uma série de trabalhos sobre a relatividade e a teoria quântica que estão nas fundações da Física moderna.

Curiosamente, Einstein, em 1905, era um modesto burocrata do escritório de patentes de Berna, na Suíça. Apesar de estar longe do ambiente acadêmico, para Einstein aquele foi um período quase idílico. Levava uma vida tranquila e com bastante tempo para pensar. Pode parecer estranho o fato de um gênio como Einstein não ter sido reconhecido imediatamente e não ter conseguido uma posição em uma universidade. A verdade é que, infelizmente, nem sempre o mérito é suficiente. Na Universidade de Zurique, Einstein foi um aluno “problemático”. Ele era avesso a qualquer forma de autoritarismo, e por isso teve atritos com quase todos os seus professores. A relação conflituosa de Einstein com seus professores teve um custo alto. As portas do mundo acadêmico se fecharam para ele. Até 1905, não havia tido oportunidades.

Quando terminou o curso universitário, Einstein passou por um período de grande aperto. Sobrevivia graças a uma mesada que seu pai lhe dava, que complementava com aulas

particulares. Einstein tinha um grande amigo, Marcel Grossmann, matemático, que havia sido seu contemporâneo na universidade. Anos depois, Grossmann o ajudaria a desbravar a complicadíssima geometria diferencial e chegar à teoria da gravidade. Graças ao pai de Grossmann, Einstein conseguiu o emprego no escritório de patentes. Apesar de não ter nenhuma conexão com o mundo acadêmico, aquele emprego era bastante conveniente: além de prover o sustento da sua família – sua primeira filha nasceu em 1902 –, dava-lhe todo o tempo e liberdade do mundo para pensar sobre o espaço e o tempo, a energia e a matéria.

Entre os artigos que publicou em 1905, Einstein apresentou a sua teoria para o efeito fotoelétrico, um trabalho que lhe renderia o Prêmio Nobel em 1921 (Einstein não ganhou o Nobel pela Teoria da Relatividade, pela qual é mais conhecido, mas pela sua contribuição à teoria quântica). A sua teoria afirmava que a luz consiste em um feixe de partículas de um tipo muito especial: os *fótons*, partículas imateriais (sem massa), pacotes individuais feitos de pura energia, em eterno movimento. São os *quanta de luz*.

Quando um feixe de luz de uma certa cor incide sobre uma superfície metálica, os fótons colidem com os átomos mais superficiais. Na verdade, colidem individualmente com os elétrons, arrancando-os dos seus átomos. É uma típica colisão entre duas partículas. Baseada nessa hipótese, a teoria de Einstein previa todas as propriedades do efeito fotoelétrico, que até então desafiavam a teoria de Maxwell. Mas a comprovação experimental só ocorreu vinte anos depois. Quando isso aconteceu, o “insight” absolutamente genial de Einstein já havia tido o reconhecimento merecido: um ano antes, ela recebeu o Nobel.

Mais adiante vou falar bastante sobre prótons e nêutrons. São as partículas que formam os núcleos atômicos. Não são

minúsculas bolinhas de bilhar rígidas e compactas, limitadas por uma superfície que separa o interior do exterior. Nenhuma partícula é assim, o microcosmo é muito diferente. Prótons e nêutrons são mais parecidos com nuvens mais ou menos esféricas, muito densas na região central e mais difusas na periferia. Embora não tenham forma e limites bem definidos, prótons e nêutrons ocupam um volume finito no espaço. São estados muito complexos. Em seu interior fervilham outras partículas ainda menores, os *quarks*, que acreditamos serem *elementares*, isto é, sem nenhuma estrutura interna. Até onde é possível observar, podemos dizer que os quarks, assim como os elétrons, são pontinhos de matéria, não têm um “tamanho”.

Os fótons também são elementares: não têm uma estrutura interna nem ocupam um volume no espaço, são pontinhos imateriais de pura energia. Mas o fato de não terem uma massa torna os fótons muito diferentes das demais partículas elementares. Usando campos eletromagnéticos adequados, é possível reduzir a velocidade de um elétron ou de um próton até que eles atinjam o repouso. Mas os fótons, nunca podem ser parados. Ao contrário, estão sempre em movimento e só mudam de velocidade quando atravessam um meio material. No vácuo, viajam sempre com a mesma velocidade, aproximadamente 300 mil quilômetros por segundo (a velocidade da luz), independente da energia que tenham.

A luz, portanto, tem uma “personalidade dupla”: ora se comporta como onda, como na difração, ora como corpúsculo, como no efeito fotoelétrico, mas nunca como os dois ao mesmo tempo. Quando a luz do Sol passa por um prisma e se divide nas cores do arco-íris, ela se comporta como uma onda. Mas nas colisões com átomos, a luz se comporta como se fosse um feixe de partículas. Essa é a *dualidade onda-partícula*, a ambiguidade no comportamento que está no coração de Física Quântica. O que determina o comportamento da luz é a relação entre o seu comprimento de onda e as dimensões dos

objetos com que ela interage. Assim, podemos dizer que um raio luminoso nada mais é do que uma “revoada” de fótons, um feixe contendo um número inimaginavelmente grande de *quanta* de luz. Vistos de uma certa distância, os fótons se propagam pelo espaço como uma onda eletromagnética, transportando energia, beleza e informação. Como as andorinhas.

Vamos ver mais adiante que a dualidade onda-partícula não é exclusiva da luz. Elétrons, prótons, nêutrons, ou quaisquer outras partículas subatômicas se comportam da mesma maneira. Em algumas situações, as partículas materiais interagem como ondas, em outras, como corpúsculos. Ondas e corpúsculos são conceitos “clássicos”, aplicáveis a coisas macroscópicas, mas são usadas para descrever os fenômenos em escala atômica porque é o que temos no nosso dicionário.

A Mecânica de Newton é precisa quando objetos se movem com velocidade pequena comparada à da luz, e cujas dimensões são muito maiores que as de um átomo. Nessas condições, as leis de Newton permitem seguir a trajetória de um corpo e determinar com exatidão sua posição e velocidade em qualquer instante futuro. Esse aspecto, o *determinismo*, é um dos pilares da Física do século XIX. É uma ideia muito poderosa. Se o mundo fosse uma mera coleção de partículas, e se soubéssemos a posição e a velocidade de cada uma em algum momento (o que, obviamente, seria impraticável), o futuro de todas as coisas estaria determinado. Seria um mundo sem muita graça.

A Mecânica de Newton teve inúmeros triunfos, alguns espetaculares, como a descoberta do planeta Netuno, em 1856. Sabia-se que a órbita do planeta Urano se desviava ligeiramente da trajetória prevista pelas leis da Mecânica. Esse desvio poderia indicar uma falha na teoria da gravitação Newtoniana. Urbain Le Verrier, um astrônomo francês, estava convencido de que as leis de Newton eram corretas. Partindo dessa premissa, supôs que a pequena anomalia na órbita de Urano

poderia ser causada pela existência de um planeta ainda desconhecido. Le Verrier calculou a órbita que o suposto planeta deveria seguir de forma a causar o desvio observado na trajetória de Urano. Enviou seus cálculos a um observatório na Alemanha, e tão logo chegaram ao seu destino, os telescópios foram apontados na direção indicada. E lá encontraram Netuno, exatamente na órbita prevista por Le Verrier.

O mundo microscópico, no entanto, é muito diferente. Dentro de um átomo, não existem trajetórias. Os elétrons não seguem órbitas bem definidas e previsíveis, como os planetas. É possível saber a probabilidade de um elétron se encontrar em determinada região, mas a localização exata é sempre desconhecida, até que se faça uma medição. Na verdade, o que faz sentido no microcosmo é conceito de *estado quântico* de uma partícula, isto é, o conjunto de propriedades que a caracterizam.

Medir implica necessariamente alguma forma de *interação* entre o sistema em observação e o observador (em geral, um dispositivo eletrônico, digital ou analógico). Interações, no mundo quântico, implicam colisões entre partículas elementares, cujos resultados não podem ser determinados *a priori*. Antes de uma medição, o máximo de informação a que temos acesso é a *probabilidade* de cada um dos resultados possíveis. Não há como prever com exatidão onde a partícula estará ou com que velocidade se deslocará em um instante futuro. A teoria quântica substituiu o determinismo e a previsibilidade das leis de Newton, por incertezas e probabilidades. Naturalmente, de manhã sabe-se exatamente a que horas e onde o Sol vai se por no fim do dia. Essa certeza desaparece quando lidamos com partículas subatômicas.

Em um dos seus trabalhos de 1905, Einstein descobriu a relação entre a energia dos *quanta* de luz (os fótons) e a

frequência da onda eletromagnética que eles formam. Einstein, dessa forma, reuniu em uma equação simples os aspectos microscópicos e macroscópicos. Quanto maior a energia dos fótons, maior é a frequência da onda. Assim, os fótons de um feixe de luz violeta têm mais energia do que os que formam a luz vermelha, na outra extremidade do espectro visível. Os raios gama são os fótons mais energéticos, e as ondas de rádio são os de mais baixa energia. Cor da luz, frequência da onda e energia dos fótons são diretamente relacionadas.

A radiação eletromagnética pode penetrar na matéria. O poder de penetração (a distância percorrida no interior da matéria até a radiação ser totalmente absorvida) depende da sua frequência. Quanto maior for a frequência, ou seja, quanto maior a energia dos fótons, mais profundamente a radiação penetrará em um corpo. Os raios gama são fótons com energia muito alta, e por isso têm o maior poder de penetração. Uma dose elevada dessa radiação pode ser fatal, destruindo os órgãos internos de um ser vivo. Os raios-X penetram nos tecidos moles, mas são absorvidos pelos ossos. A luz visível é absorvida pela pele, e as ondas de rádio são inofensivas. A energia transportada pelas ondas depende não só da frequência, mas também da amplitude (a característica que diferencia uma marola de um vagalhão).

Em resumo, a luz consiste em fótons, mas a resposta mais honesta à pergunta “o que *são* os fótons” é que não sabemos ao certo. O conhecimento avança quando fazemos as perguntas certas, para as quais alguma resposta é possível. A pergunta mais importante, nesse caso, é como a luz *se comporta* nas diversas situações, quando se comportará como uma onda ou como um corpúsculo. Assim podemos manipular a luz como quisermos, algo que fazemos com bastante destreza.

Capítulo 3

O quantum

No final de 1944, a derrota da Alemanha parecia inevitável. Meses depois do desembarque na Normandia, tropas inglesas, francesas e estadunidenses avançavam por um lado, enquanto a contraofensiva dos soviéticos vinha do outro. A Alemanha estava cercada e a guerra se aproximava do fim. Berlim, como outras cidades alemãs, era bombardeada constantemente. Certa noite, um bombardeio atingiu os arredores de Berlim, causando grande devastação, como sempre. Imagino que poucas coisas podem ser tão tenebrosas como um bombardeio noturno. Para os berlinenses, o bombardeio daquela noite pareceu durar uma eternidade, um pesadelo interminável. Quando cessou, restavam escombros, fogo e desespero. No cenário de desolação, um casal de anciãos caminhava com dificuldade, desviando-se como podiam dos enormes buracos e destroços espalhados por toda parte.

Os dois anciãos chamavam-se Marga e Max. Olhavam com perplexidade e desalento aquele cenário apocalíptico. De uma hora para outra, tudo o que lhes restava se resumia praticamente à roupa do corpo. A casa ficara para trás, em ruínas. Aos 86 anos, Max viu sua preciosa biblioteca, formada ao longo

de toda uma existência, ser consumida pelo fogo em poucos minutos.

Max e Marga eram casados há mais de 20 anos. Ela era sua segunda mulher. Muitos anos antes, ainda no século XIX, Max casara-se com Marie, seu grande amor desde a adolescência. O casamento com Marie foi repleto de afeto e harmonia, e dele nasceram duas filhas gêmeas, Emma e Grete, e dois filhos, Karl e Erwin. Max e Marie amavam a música. Ele era um exímio pianista, e sua casa era o local de encontro dos amigos, que frequentemente se reuniam em animados saraus musicais. Para aqueles jovens alemães, o futuro parecia brilhante.

Os anos felizes, no entanto, acabaram, deram lugar a uma série de infortúnios. Max tinha 51 anos quando sofreu o primeiro golpe: em 1909, perdeu sua amada Marie, levada pela tuberculose. Poucos anos depois, a Primeira Guerra Mundial eclodiu. Seu primogênito, Karl, alistou-se no exército alemão e foi enviado ao front. Em 1916, foi morto na batalha de Verdun. No ano seguinte, Emma engravidou. Max seria avô pela primeira vez. Mas novamente a alegria se transformou em tristeza: Emma faleceu ao dar à luz a sua primeira neta. Sua irmã, Grete, adotou a sobrinha, a quem amou como se fosse sua filha. Mas por pouco tempo: dois anos depois, Grete também faleceu ao dar à luz.

Max era um sobrevivente. Suportara estoicamente a perda da sua família, o horror do nazismo e das bombas, mas o destino ainda lhe reservava um último golpe mortal. No início de 1945, poucos meses antes da derrota da Alemanha, Max veria seu último filho, Erwin, ser fuzilado pela Gestapo, acusado de participar de um atentado contra Hitler.

Naquela noite tenebrosa, poucos sabiam que aquele senhor idoso, de olhar severo e triste, caminhando amparado pela mulher, era um dos cientistas mais importantes do século XX. Sua longa vida não havia sido marcada apenas por tragédias,

houve também momentos de glória. Vinte e quatro anos antes da noite em que perdeu sua casa, ele, Max Karl Ernst Ludwig Planck, o principal físico da Alemanha, havia recebido o Prêmio Nobel de Física. Na sessão de gala da Academia Real de Ciências da Suécia, Planck viu sua teoria revolucionária do *quantum* ser finalmente reconhecida.

No dia 14 de dezembro de 1900, Max Planck dirigiu-se ao Instituto de Física da Universidade de Berlim, como fazia todos os dias. Naquele dia haveria uma reunião regular da Sociedade Alemã de Física. Nela, Planck iria apresentar os resultados finais dos seus estudos sobre a radiação de corpo negro, um problema que desafiava os físicos havia muitos anos. Aquele não seria um dia qualquer, e a reunião entraria para a História, sem que Planck nem os demais participantes se dessem conta plenamente. Ali começou a revolução quântica, que, ao longo dos 25 anos seguintes, transformaria a Física e o mundo para sempre.

A Física Quântica é uma ruptura radical com o passado. Seus conceitos e princípios são completamente diferentes de tudo o que havia antes. É uma ironia do destino que o nascimento da nova Física não tenha sido obra de um jovem audacioso, mas sim de um conservador relutante chegando à meia-idade. Planck tornou-se conhecido como o “revolucionário hesitante”.

Planck foi um homem religioso. Nasceu em uma família luterana, de quem recebeu uma formação rígida que valorizava, sobretudo, a integridade moral, a austeridade e a disciplina. Para ele, não havia conflito entre ciência e religião. Ao contrário, a busca pelo absoluto, pelo que é universal aproximava uma da outra, e orientou a atividade científica de Planck durante toda a sua longa carreira. Em sua autobiografia científica, ele disse que “...o mundo exterior é algo independente

do homem, algo absoluto. A busca das leis que se aplicam a esse absoluto pareceu-me o mais sublime objetivo científico a ser perseguido na vida”.

Planck se apaixonou pela Termodinâmica quando ainda era um estudante do ensino médio. A Termodinâmica é a ciência que estuda as relações entre calor, temperatura, energia e trabalho mecânico. A primeira lei da Termodinâmica, que trata da conservação da energia, foi como uma revelação para o jovem Planck: um princípio universal, independente de qualquer ação humana, aplicável a todos os sistemas físicos, sem importar a sua natureza e composição. Um princípio que jamais havia sido violado.

Em suas memórias, Planck relata um episódio marcante. Quando ingressou na Universidade de Munique, aos 18 anos, teve uma entrevista com seu orientador, Phillip von Jolly. Quando Planck disse a seu professor que pretendia seguir a carreira de físico teórico, teve como resposta um conselho inesperado. Von Jolly disse a Planck que buscasse outra área, pois não havia mais nada de relevante a ser descoberto na Física, só restavam alguns poucos vazios a serem preenchidos. Na segunda metade do século XIX, o auge da era clássica, muitos físicos pensavam da mesma maneira. Eram os tempos de Newton e Maxwell, quando as teorias tratavam de coisas contínuas, de fenômenos que eram sempre precedidos por uma causa. A Física oferecia um mundo ordenado e previsível, onde tudo parecia se encaixar.

Imagine um cidadão do século XVII, uma época em que mulheres acusadas de bruxaria eram queimadas vivas, em que se acreditava a consciência estava no coração e que a visão se dava porque os olhos emitiam raios. Em um mundo ainda povoado pela magia e superstição, cometas e eclipses eram presságios de desastres. O Iluminismo ainda engatinhava, e a

Matemática pouco a pouco a pouco ganhava terreno. Depois de mais de mil anos sendo o centro do Universo, a Terra havia sido destronada por Copérnico, cedendo o seu posto ao Sol. Mas ninguém se surpreendia com o fato de os corpos caírem no chão quando soltos, e nem com os movimentos periódicos do Sol, da Lua e dos planetas, que eram conhecidos há milênios. Para uma pessoa daquela época, a queda dos corpos e o movimento dos astros celestes eram dois fatos sem nenhuma conexão.

Isaac Newton, em 1687, teve um *insight* absolutamente genial. Ele se deu conta de que a queda de objetos na Terra e o movimento dos astros tinham uma causa comum. Sua obra prima, *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, continha as leis da mecânica e do movimento, leis que estabelecem relações de causa e efeito para todos os fenômenos partindo apenas de princípios elementares. Os *Principia*, como a obra de Newton ficou conhecida, marcaram um ponto de inflexão. Desde então, a Mecânica de Newton, incluindo a sua lei da gravitação, reinou absoluta por quase 250 anos.

Na segunda metade do século XIX, James Maxwell produziu uma síntese espetacular, um segundo ponto de inflexão na Física. Com a sua teoria do Eletromagnetismo, Maxwell mostrou que a luz é uma onda eletromagnética. Assim, ele reuniu em um único conjunto de equações todos os fenômenos da ótica, da eletricidade e do magnetismo. Juntos, Newton e Maxwell explicavam o Universo conhecido.

No final do século XIX, certas ideias da Física haviam se tornado verdades inquestionáveis, autoevidentes. A *continuidade* deveria ser um dos princípios mais elementares de qualquer teoria física. Vivemos em um mundo feito de coisas contínuas, com que lidamos no nosso dia a dia. A noção de continuidade é parte constituinte da nossa intuição. Continuidade significa que na Natureza não há saltos, que é sempre

possível passar de um estado físico a outro de forma suave e progressiva, através de uma infinidade de pequenos passos sucessivos, tão pequenos quanto queiramos. Um objeto pode ser girado gradualmente, através de uma sequência de micro-rotações imperceptíveis. A água é um fluido contínuo e pode ser aquecida tão lentamente quanto se queira, através de uma sequência contínua de ínfimos aumentos de temperatura. No arco-íris, os tons se sucedem gradualmente do vermelho ao violeta, formando um espectro contínuo (apenas aparentemente, como vamos ver mais adiante).

O *determinismo* era outro princípio tido como autoevidente. Se as forças que atuam sobre um corpo são conhecidas, assim como a sua posição e velocidade em certo momento, seu movimento futuro estará totalmente determinado pelas leis da Mecânica. Podemos prever sua trajetória com exatidão. Em qualquer instante futuro, saberemos dizer precisamente onde o corpo estará e com que velocidade estará se movendo. O determinismo se baseia em relações de causa e efeito, e também está profundamente enraizado na nossa forma de pensar e ver o mundo físico. Um habilidoso jogador de sinuca, mesmo que não tenha tido aulas de Física, possui o domínio intuitivo das leis de Newton. Continuidade e determinismo são os alicerces das leis da Mecânica e do Eletromagnetismo.

Havia também a Termodinâmica, que trata das propriedades globais (volume, pressão, temperatura) de sistemas com muitos componentes, como um gás, por exemplo. A união entre Termodinâmica e a Mecânica de Newton, feita nas últimas décadas do século XIX, resultou na Mecânica Estatística, que aborda os sistemas com muitos corpos partindo de propriedades médias de seus componentes individuais. Usando as leis de Newton, a Mecânica Estatística, estabeleceu uma base mecânica para a teoria do calor. Essa união foi outra síntese fantástica. De fato, quando Planck era um estudante, a Física dava uma explicação para tudo. Ou melhor, quase tudo.

As crises fazem o conhecimento avançar e mudar de patamar. Novos paradigmas são introduzidos. No final do século XIX, a chamada Física Clássica, inesperadamente, viveu sua grande crise. Vou falar aqui de apenas um dos problemas que deram origem à Física Quântica, deixando outros para os próximos capítulos. O problema desafiador era explicar em detalhes como um corpo quente irradia energia, ou, em uma linguagem mais técnica, a forma do *espectro de radiação de corpo negro*. Era um enigma que já durava anos.

Os fenômenos da Natureza são sempre extremamente complexos, ainda que às vezes possam parecer simples. Criar modelos matemáticos que os representem com precisão é um eterno desafio para os físicos. Para que os problemas sejam tratáveis, quase sempre é preciso recorrer a aproximações e idealizações, desconsiderando, num primeiro momento, os detalhes não essenciais. O “corpo negro” é um exemplo dessas idealizações úteis.

O corpo negro é um objeto que absorve toda a radiação que incide sobre ele, sem refletir nada (por isso é “negro”). A energia absorvida faz a temperatura do corpo aumentar, e essa é uma regra universal. O corpo negro devolve a energia absorvida ao meio ambiente, agora sob a forma de *radiação térmica*: um conjunto de ondas eletromagnéticas de várias frequências. Na vida real não existem objetos que tenham exatamente essas características, mas há ótimas aproximações, como o interior de um forno doméstico, por exemplo.

A grande maioria dos objetos não emite luz própria. Podemos vê-los porque eles refletem a luz incidente sobre eles. Um objeto vermelho reflete sobretudo a componente vermelha da luz branca, que combina os infinitos tons do arco-íris. Quando a luz incide sobre um objeto qualquer, parte da sua energia é refletida e parte é absorvida. Quando um objeto absorve energia, ele aquece. Se ele estava inicialmente à mesma

temperatura do seu entorno, o objeto gradativamente esfria, devolvendo a energia recebida ao ambiente na forma de radiação térmica: calor. O que sentimos na pele quando nos aproximarmos de um objeto quente é energia irradiada por ele, e essa energia é transportada por ondas eletromagnéticas, em geral com frequências na faixa do infravermelho.

Um corpo pode ser aquecido de muitas maneiras, como, por exemplo, pela passagem de uma descarga elétrica, ou por compressão. Mas uma vez aquecido, todo corpo se comporta da mesma maneira: após um intervalo de tempo, a energia injetada é parcial ou totalmente devolvida ao ambiente na forma de radiação térmica. Há uma grande semelhança na forma com que os diferentes corpos, feitos de diferentes materiais, irradiam energia térmica (ou calor) e essa é a razão da importância do corpo negro. Ele estabelece um padrão comparativo.

O *espectro térmico* mostra como um corpo dispersa a energia térmica na forma de ondas eletromagnéticas das mais variadas frequências. Mais especificamente, os espectros são um registro da fração da energia total que cada onda irradia. Numa das pontas do espectro estão as ondas de alta frequência, que transportam muita energia, e por isso têm menor probabilidade de serem emitidas. Na outra ponta, ondas com frequência muito baixa têm muito pouca energia e também são menos prováveis, de forma que a maior parte da energia irradiada se distribui através de ondas de frequência intermediária. A frequência dominante, a que carrega a maior fração da energia, varia de acordo com a temperatura do corpo (vermelho, no caso do ferro em brasa).

A forma como a energia térmica irradiada se distribui pelas diferentes frequências depende basicamente da temperatura do corpo. Outros fatores, como o formato e o material de que o corpo é feito, pouco afetam o espectro. O corpo negro é o

caso ideal, em que só a temperatura importa. A forma como a energia irradiada pelo Sol se distribui entre a luz infravermelha e a ultravioleta, por exemplo, é bastante parecida com a de um ferro em brasa, e ambas são muito parecidas com a de um corpo negro. Pode parecer paradoxal, mas um corpo “negro” não é necessariamente um objeto de cor preta. Existem corpos negros brilhantes e coloridos.

Em resumo, medindo a energia transportada pelas ondas eletromagnéticas nas diversas frequências determina-se a forma do espectro térmico, que depende basicamente da temperatura segundo uma lei bem definida. A forma do espectro pode, portanto, ser usada como termômetro. Durante a pandemia, todos experimentamos um termômetro digital apontado para a testa, como se nós mesmos fôssemos um corpo negro.

É muito comum confundir calor e temperatura. Calor é *energia em trânsito* na forma de radiação eletromagnética, energia que flui espontaneamente de um corpo mais quente para um mais frio. Temperatura é uma medida da quantidade de energia contida em um corpo. Ao contrário do calor, a temperatura é uma propriedade, uma das características que definem o estado de um corpo. Não tem sentido, portanto, falar sobre “o calor de um corpo”. A expressão coloquial “hoje está um calor infernal”, infelizmente, algo cada vez mais recorrente, quer na verdade dizer “a temperatura hoje está muito alta”.

Quando ouvimos música, nossos ouvidos captam ondas sonoras de muitas frequências, algumas com intensidade maior que outras. Nesse aspecto, a radiação térmica, ou calor, se assemelha à música: é formada por um conjunto de ondas eletromagnéticas que têm inúmeras frequências, cada onda com uma intensidade distinta, ou seja, carregando uma fração específica da energia.

Na sua maior parte, a radiação térmica é invisível ao olho humano. A luz visível corresponde a apenas uma faixa muito limitada de frequências no espectro das ondas eletromagnéticas. O tom avermelhado do ferro em brasa se deve ao fato de as ondas com frequências em torno da luz vermelha transportarem a maior fração da energia irradiada. Até o dia 14 de dezembro de 1900, acreditava-se que a radiação térmica fosse uma sucessão contínua de infinitas frequências, estendendo-se do infravermelho ao ultravioleta de forma gradual, como em um arco-íris.

O corpo negro é um hipotético objeto que irradia energia térmica de forma universal, independente do material de que ele é feito ou de qualquer outra propriedade (algo bem ao gosto de Planck). Em 1900, reproduzir teoricamente o espectro da radiação do corpo negro era um problema na fronteira do conhecimento e tinha uma relação direta com a nova Mecânica Estatística. Planck se dedicou a esse problema durante anos, tentando resolvê-lo usando as leis da Física conhecidas. Em vão.

Somos frutos do tempo em que vivemos, da cultura em que estamos imersos, e esse fato condiciona a nossa maneira de pensar e de ver o mundo, inevitavelmente. De certa forma, somos prisioneiros da nossa própria história. Os cientistas não são diferentes. Planck nasceu e foi educado durante a segunda metade do século XIX, e sua formação se deu em um mundo harmoniosamente sustentado pela Mecânica de Isaac Newton e pelo Eletromagnetismo de James Maxwell. Assim, não surpreende que Planck fosse tão apegado à Física Clássica e aos princípios de continuidade e determinismo. Afinal, ele era um conservador. Quando Planck conseguiu finalmente resolver o problema do corpo negro, sentiu um grande desconforto com o resultado. A solução se baseava em uma hipótese fundamental que ia contra tudo o que acreditava.

Planck, no entanto, era uma pessoa extremamente racional. Não lutaria contra os fatos para salvar suas convicções. Sua teoria explicava com precisão a radiação do corpo negro, e isso era um fato. Com toda a certeza ele havia encontrado a solução. Mas como encaixá-la no contexto da Física Clássica? Ao chegar à reunião da Sociedade Alemã de Física, em dezembro de 1900, Planck estava atormentado por muitas dúvidas. Até então, não havia percebido plenamente as implicações da sua descoberta, nem tinha como saber que havia iniciado uma revolução na Física.

O corpo negro usado nos experimentos do final século XIX (e usado ainda hoje nos cursos universitários de Física) é uma espécie de forno: uma cavidade oca, revestida internamente por um material altamente absorvente e isolada termicamente do ambiente externo. No interior da cavidade, ondas eletromagnéticas de diferentes frequências se propagam em todas as direções. Quando as ondas atingem as paredes internas da cavidade, elas não são refletidas como a luz em um espelho. Ao contrário, são (quase) totalmente absorvidas. Após um curtíssimo intervalo de tempo, a radiação absorvida pelas paredes internas é devolvida ao interior da cavidade.

O processo de absorção e emissão de radiação se repete continuamente, de forma que após algum tempo, todo o interior da cavidade, incluindo as paredes internas, atinge um estado de equilíbrio térmico (um termômetro colocado em qualquer parte dentro da cavidade mede sempre a mesma temperatura). Uma pequena abertura na cavidade permite que um pouco da radiação térmica escape para o exterior e que seu espectro seja analisado. As características do espectro dependem apenas da temperatura no interior da cavidade. Nenhum outro aspecto importa.

Planck conseguiu chegar à solução admitindo uma hipótese radical: as moléculas das paredes internas do forno só podem

vibrar de algumas maneiras bem específicas, o que implica poderem absorver apenas um conjunto finito de frequências. Isso contraria frontalmente a Física Clássica, que afirma que as moléculas podem vibrar com qualquer frequência. Ir na contra-mão da Física conhecida foi o ato corajoso de Planck.

Eis em que consiste a teoria de Planck, vista numa escala microscópica. As moléculas são formadas por átomos. Planck pensou um modelo simples para representar as paredes internas da cavidade. Supôs que em cada molécula as ligações entre os átomos funcionariam como minúsculas molas, fazendo com que eles vibrassem continuamente, cada “mola” com vibrando com uma frequência diferente. As “molas”, no entanto, não poderiam vibrar de qualquer maneira, apenas com um conjunto finito de frequências, os seus *modos de vibração*. Como as moléculas só podem absorver radiação eletromagnética cuja frequência seja igual a um de seus modos de vibração, o interior do forno conteria apenas ondas eletromagnéticas com um conjunto *discreto* (limitado, contável, finito) de frequências, e não um conjunto contínuo, como o arco-íris. Com essa hipótese, Planck conseguiu finalmente explicar o espectro da radiação de corpo negro.

A descoberta de Planck foi a primeira evidência de que em escala atômica a Natureza perde o aspecto contínuo e se torna granular, descontínua. Mas ninguém, nem mesmo Planck estava preparado para aceitar o fato de o mundo microscópico ser regido por leis muito diferentes. Abandonar a ideia da continuidade da Natureza não seria um passo trivial. No seu discurso em Estocolmo, na cerimônia de premiação do Nobel, Planck admitiu que durante anos tentou, inutilmente, compatibilizar sua descoberta com a Física Clássica.

Na Física moderna há algumas constantes fundamentais. A velocidade da luz no vácuo (representada pela letra c) e a carga elétrica do elétron (representada pela letra e) são alguns

exemplos. Planck introduziu uma nova constante fundamental, a constante h , conhecida como a constante de Planck. É a constante mais importante no mundo quântico. Ela significa a menor quantidade possível de uma grandeza física chamada *ação*, diretamente ligada à energia. Planck se referiu à constante h como o *quantum de ação*.

O valor da constante h é incrivelmente pequeno. De certa forma, a constante de Planck define a escala em que efeitos quânticos se tornam relevantes, separando o mundo macroscópico do microscópico. O fato de o valor de h ser tão pequeno explica o porquê de os efeitos quânticos não serem percebidos no nosso dia a dia. Mas em escala atômica a constante de Planck está presente em praticamente tudo: na estrutura mais profunda da matéria, na estabilidade dos átomos e moléculas, na radiação eletromagnética etc.

Apesar de ter dado o primeiro passo, Planck não tomou parte dos desenvolvimentos posteriores da teoria quântica. Nos anos que imediatamente se seguiram, nada de importante na Física Quântica aconteceu. A descoberta de Planck não teve muita repercussão, pois o *quantum* era uma ideia muito extravagante para ser aceita prontamente, sem reservas. No meio acadêmico, a teoria de Planck foi recebida com frieza cordial.

Na sua autobiografia científica, Planck afirmou que “[...] uma nova verdade científica nunca triunfa por conseguir convencer os adversários, mostrando-lhes a luz, mas porque esses adversários morrem e surge uma nova geração para a qual essa verdade é familiar”. E foi, de fato, o que aconteceu. A resistência da “velha guarda” foi vencida pelo trabalho de uma geração de jovens físicos geniais, a maioria nascida entre 1900 e 1902, uma geração formada nos novos tempos, em um ambiente repleto de novos fenômenos que não podiam ser explicados pelas leis conhecidas.

Capítulo 4

Radioatividade

No apagar das luzes do século XIX, a luminescência, um fenômeno que era conhecido há bastante tempo, ainda intrigava os cientistas. Sua origem era misteriosa, e só foi esclarecida com a criação da Mecânica Quântica. O fenômeno da luminescência consiste na emissão espontânea de luz quando os átomos de algumas substâncias são excitados de alguma forma (a luz é emitida quando os átomos se desexcitam). Há vários tipos de luminescência, dependendo da forma como os átomos das substâncias são excitados, mas o que nos interessa aqui é a fotoluminescência. Como o nome indica, a excitação atômica nesse caso ocorre quando a substância absorve fótons.

Algumas substâncias fotoluminescentes têm a propriedade peculiar de emitir lentamente a radiação absorvida. Podem irradiar a energia durante segundos, minutos ou mesmo horas. Por isso objetos feitos com substâncias fotoluminescentes brilham no escuro. Essas são as substâncias *fosforescentes*. A energia, entretanto, pode ser dispersada de forma muito rápida, imediatamente após ser absorvida. Nesse caso, as substâncias são *fluorescentes*, produzindo um brilho fugaz.

Maria Skodlowska e Pierre Curie se conheceram em Paris, apresentados por um amigo comum. Maria precisava de um espaço maior para os seus experimentos, e espaço não faltava no laboratório de Pierre. Ali ela instalou seus equipamentos. Logo se apaixonaram, e um ano depois, casaram-se. Era o ano de 1896. Marie Curie, como se tornou conhecida, estudava a fotoluminescência. Pierre investigava fenômenos diferentes, mas pouco a pouco, por amor e por interesse científico, ele acabou se envolvendo com o trabalho da mulher.

Não muito longe do laboratório de Marie e Pierre ficava o de Henri Becquerel. Assim como seu avô e seu pai, Henri se dedicava ao estudo da fosforescência. Ele queria saber se havia alguma relação entre os raios-X, descobertos no ano anterior, e a fosforescência. Ele empregava uma técnica simples: um filme fotográfico era totalmente envolvido por uma camada grossa camada de papel preto para impedir a passagem da luz ambiente. Sobre o filme coberto, colocava pedrinhas de substâncias fosforescentes, expostas à luz do Sol durante algumas horas. Quando ele revelava o filme, a silhueta das pedrinhas aparecia claramente. Algumas substâncias contendo urânio emanavam uma radiação diferente, capaz de atravessar o grosso papelão preto. Henri achava, erradamente, que a sensibilização do filme era causada pela fosforescência.

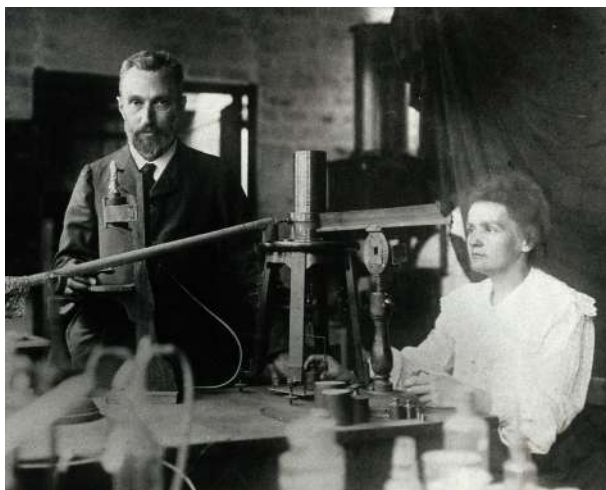
Certa noite, Henri preparou o seu experimento, que pretendia expor ao Sol no dia seguinte. Guardou o conjunto em um armário e foi para casa. Era inverno, e na manhã seguinte o Sol não apareceu. O tempo permaneceu nublado por alguns dias, impedindo que a amostra fosse iluminada pelo Sol. Mesmo assim, depois de alguns dias Henri resolveu revelar o filme. Para sua surpresa, o filme mostrava a silhueta das pedrinhas de urânio, mesmo sem elas terem sido expostas ao Sol. A sensibilização do filme fotográfico não dependia da luz solar.

Henri se convenceu de que estava diante de novo efeito, que interpretou erroneamente como uma nova forma de fosforescência, uma propriedade intrínseca dos sais de urânio, com a intrigante característica de ser emitida de forma espontânea, sem uma causa aparente. Assim foi descoberta a radioatividade, uma obra do acaso, algo que não tinha nenhuma semelhança com nada conhecido. O que era essa radiação e como era produzida permaneceria um mistério ainda por muitos anos.

A descoberta da radiatividade teve grande repercussão, ganhando as páginas dos jornais. A radioatividade virou o tema da moda, e muitos laboratórios passaram a se dedicar ao seu estudo. Dentre esses estava o laboratório de Marie e Pierre. Eles adotaram a técnica de Henri, fazendo um estudo sistemático e quantitativo da nova radiação usando diferentes tipos de amostras. O casal descobriu que além do urânio, outras substâncias também apresentam a mesma propriedade. Marie logo percebeu que a nova radiação deveria uma propriedade dos átomos, de cuja existência alguns ainda duvidavam. Para Marie, a emissão de radiação deveria ser causada por algum mecanismo ainda desconhecido no interior dos átomos. A radioatividade foi uma evidência de que os átomos não são elementares, embora ninguém soubesse o que havia dentro deles.

A radioatividade foi uma descoberta fundamental. Seus descobridores tiveram destinos tanto trágicos como gloriosos. Marie foi a primeira mulher a receber o Prêmio Nobel, concedido em 1903 a ela, a Pierre e a Henri. Pierre faleceu em 1906, aos 47 anos, atropelado por um veículo puxado por cavalos. Mesmo arrasada pela morte do marido, Marie seguiu adiante e continuou sua investigação sobre a radiatividade. Em 1911, ganhou um segundo Prêmio Nobel, o de Química, por ter descoberto dois novos elementos, rádio e polônio. Marie faleceu em 1934. Tinha 67 anos. Henri continuou seus estudos sobre

a radioatividade na École Polytechnique, em Paris. Faleceu em 1908, aos 56 anos. A causa de sua morte é desconhecida, mas em sua pele foram encontradas sérias queimaduras, típicas da manipulação de substâncias radioativas. Os riscos da manipulação dessas substâncias ainda eram desconhecidos, e é provável que a exposição excessiva à radioatividade tenha causado não só a sua morte como também a de Marie.



A Ciência uniu Marie e Pierre Curie. Eles viveram uma linda história de amor, interrompida precocemente pelo falecimento de Pierre por atropelamento. Marie veio a falecer por causa da elevada exposição à radioatividade. Tiveram uma filha, Irène Curie, que se casou com Frèdèric Joliot. Ambos ganharam o prêmio Nobel de Química, repetindo o que havia acontecido com Marie e Pierre.

Ernest Rutherford foi uma dessas pessoas com a rara capacidade de influenciar o mundo. O seu trabalho científico teve tanto impacto que ele se tornou um herói nacional da Nova Zelândia, sua terra natal (é sempre bom saber que há países em que cientistas são considerados heróis). Em 1895, quando

tinha 24 anos, Rutherford ganhou uma bolsa de estudos. Deixou sua terra natal e partiu para a Inglaterra. Seu destino era o prestigioso laboratório Cavendish, em Cambridge, onde Rutherford seria inevitavelmente atraído pela radioatividade.

Rutherford identificou dois tipos bem distintos de radiação emitida pelo urânio, que chamou de “raios” alfa e beta. A radiação alfa, como sabemos hoje, são átomos do elemento hélio despidos dos seus elétrons, ou seja, pequenos núcleos atômicos feitos de dois prótons e dois nêutrons. As partículas alfa têm um pequeno poder de penetração e eram absorvidas pela grossa camada de papel que cobria o filme fotográfico. Já a radiação beta, que é um elétron, podia atravessar facilmente a camada de papel e sensibilizar o filme, sendo a responsável pela imagem obtida por Henri Becquerel.

Rutherford fez outras descobertas importantes sobre a radioatividade: com o passar do tempo, as emanações diminuem de intensidade. Ele introduziu na Física o conceito de meia-vida, o tempo necessário para a intensidade da radiação se reduzir à metade. Além disso, mostrou que quando emitem radiação, os elementos radioativos se transformam em outros. As evidências de que no interior dos átomos haveria uma estrutura complexa se acumulavam.

Rutherford foi agraciado com o prêmio Nobel de Química, em 1908, pela descoberta da transmutação dos elementos. Mas, a sua contribuição mais importante ocorreu alguns anos depois: a descoberta do núcleo atômico. Rutherford é um caso único de um cientista que deu sua contribuição mais importante depois de receber um prêmio Nobel.

Em 1908, ano em que recebeu o Prêmio Nobel, Rutherford dirigia um laboratório em Manchester. Ele tinha um assistente brilhante, Hans Geiger (o criador do contador Geiger), que por sua vez era auxiliado por um estudante universitário

também brilhante, Ernest Marsden. Completava a equipe o técnico Willian Key. Rutherford propôs a Geiger e Marsden um experimento inédito: bombardear uma folha fina de ouro com partículas alfa, originadas de uma fonte radioativa (uma amostra do elemento *rádio*, de onde deriva o termo “radioatividade”). Geiger, Marsden e Key montaram e conduziram o experimento, supervisionados de perto por Rutherford.

A folha de ouro que servia de alvo deveria ser fina o suficiente para minimizar a probabilidade de a partícula alfa colidir com mais de um átomo. Assim, ao atravessar o alvo, as partículas alfa sofreriam apenas um leve desvio na sua trajetória. Continuariam a se mover para a frente, apenas com uma direção ligeiramente diferente. De fato, era isso o que acontecia.

Rutherford pediu a Marsden que procurasse por partículas alfa que fossem ricocheteadas pelo alvo, ou seja, que colidissem com os átomos e fossem mandadas de volta, invertendo a direção do movimento. Foi preciso observar um número muito grande de colisões para constatarem que em algumas delas as partículas alfa de fato ricocheteavam no alvo. E isso foi uma grande surpresa para todos, inclusive Rutherford. Nas suas palavras, “Foi o acontecimento mais incrível de toda a minha vida científica. É quase tão inacreditável como disparar uma bala de canhão sobre uma folha de papel e a bala voltar para você”.

Rutherford, com um “insight” genial, interpretou corretamente o resultado: as partículas alfa ricocheteiam porque colidem com um núcleo que concentra toda a carga elétrica positiva e 99% da massa do átomo. As colisões com os núcleos são muito raras porque eles são minúsculos, cerca de 10 mil vezes menores que o tamanho dos átomos. A estrutura interna dos átomos estava desvendada: um núcleo muito pequeno, com carga elétrica positiva, envolto por uma nuvem de elétrons.

Para se ter uma ideia das dimensões, tomemos o hidrogênio, o elemento mais leve, feito de um único próton cercado por apenas um elétron. Se um átomo de hidrogênio fosse do tamanho do Maracanã, o seu núcleo seria como uma bolinha de ping-pong no centro do gramado. Elétrons são apenas pontinhos de matéria, sem uma dimensão mensurável, sem ocupar um volume observável. Os átomos são um imenso vazio! Se pudéssemos nos reduzir à escala atômica, veríamos que a solidez das rochas é ilusória. A continuidade da matéria é apenas o efeito coletivo, macroscópico, de um número inimaginável de átomos.

A descoberta do núcleo atômico foi um ponto de inflexão na história da Ciência. Marcou o início de uma caminhada que levou ao domínio dos átomos, a ferramenta mais poderosa da Humanidade, para o bem e para o mal. Mas as grandes descobertas, ao mesmo tempo em que ampliam o conhecimento e alargam os horizontes, trazem sempre novas perguntas. A descoberta da estrutura interna dos átomos trouxe perguntas fundamentais: como os elétrons se distribuem dentro dos átomos? O que garante a sua estabilidade? A busca pelas respostas foi uma aventura intelectual sem precedentes e que culminou com a criação da Mecânica Quântica, em 1925. Mas sobre os átomos e a Mecânica Quântica, falarei nos próximos capítulos.

O experimento de Rutherford, Geiger e Marsden entrou para a história também por um outro motivo. O trio introduziu um novo método, o *espalhamento*, que desde então é utilizado em quase todos os experimentos modernos: pontas de prova são aceleradas e levadas a colidir com um alvo, cuja natureza se quer estudar. Depois da colisão, a informação sobre a estrutura interna do alvo é obtida analisando o que acontece com a ponta de prova e com os fragmentos do próprio alvo.

Em geral, as pontas de prova, ou sondas, são fótons de alta energia ou partículas subatômicas, produzidas usando fontes radioativas ou aceleradores, ou mesmo partículas vindas do espaço sideral, os chamados *raios cósmicos*. Quanto maior a energia da sonda, maior é o seu poder de resolução, mais detalhes do alvo podem ser observados. Assim, para estudar a estrutura da matéria em escalas cada vez menores, é preciso obter pontas de prova com energias cada vez maiores. As partículas do acelerador LHC são as pontas de prova de mais alta resolução produzidas em laboratórios. Só perdem para os raios cósmicos.

Marie Curie identificou a radioatividade como uma propriedade intrínseca dos átomos de certos elementos, como o urânio e o rádio. Rutherford deu um passo adiante ao mostrar que a radioatividade se deve a algo que acontece no interior dos núcleos atômicos. Em 1932, James Chadwick, discípulo de Rutherford, descobriu uma nova partícula neutra, cuja massa é muito próxima à do próton: o nêutron. Desde então sabe-se que os núcleos atômicos são formados por prótons e nêutrons.

Na maioria dos elementos químicos, os núcleos atômicos contêm mais nêutrons do que prótons. O número de prótons é sempre igual ao de elétrons, o que faz com que os átomos sejam eletricamente neutros. Um elemento químico é caracterizado pelo número de prótons em seu núcleo atômico, e suas propriedades químicas são determinadas pelos elétrons das camadas mais externas. Como os nêutrons não têm carga elétrica, núcleos de um mesmo elemento podem acomodar diferentes quantidades de nêutrons. Esses são os *isótopos*, variantes de átomos de um elemento com as mesmas propriedades químicas (isótopos têm sempre o mesmo número de prótons).

O carbono-12, por exemplo, tem um núcleo formado por seis prótons e seis nêutrons (o “12” é a soma do número de

prótons mais nêutrons). É a forma estável do carbono, encontrada em toda a matéria orgânica. Existem alguns isótopos, como o carbono-14, cujo núcleo tem os mesmos seis prótons do carbono-12, mas possui oito nêutrons. O carbono-14 tem as mesmas propriedades químicas do carbono-12, combina-se com outros elementos da mesma maneira. O núcleo do carbono-14, no entanto, é instável.

Com o passar do tempo, dentro do núcleo de carbono-14 um nêutron se desintegra de forma espontânea e imprevisível. A energia nunca se perde, e no lugar do nêutron surge um próton, que permanece dentro do núcleo, e um elétron, que é expelido (a radiação beta, descoberta por Rutherford). Depois da desintegração espontânea do nêutron, o núcleo passa a ter sete prótons e sete nêutrons. carbono-14 se transforma em outro elemento, o nitrogênio. O átomo original de carbono-14 se torna um átomo de nitrogênio-14. Junto com o elétron, outra partícula neutra e muito leve é expelida. É o neutrino, sobre o qual falarei depois.

A desintegração do nêutron em um próton, um elétron e um neutrino é um processo que ocorre espontaneamente. Não há nenhuma força que a cause. É um fenômeno puramente quântico, referido comumente como decaimento beta. Observando um único núcleo instável, é impossível prever quando algum nêutron vai se desintegrar. Mas quando analisamos um número muito grande de átomos, vemos que a taxa de desintegração segue uma lei matemática precisa. Todo elemento radioativo tem uma propriedade que o distingue dos demais: a meia-vida. Em uma amostra de um determinado elemento radioativo, pode-se prever em que momento metade dos seus átomos terão se transmutado.

Alguns núcleos atômicos muito pesados podem se dividir em outros mais leves e emitir partículas alfa e raios gama. Os núcleos, mesmo os mais simples, têm uma estrutura in-

terna bastante complexa. Algumas combinações de prótons e nêutrons são menos estáveis que outras, como o urânio-238, cujo núcleo tem 92 prótons e 146 nêutrons. Em casos como esse, o equilíbrio interno é delicado, o que torna o núcleo instável. Com o passar do tempo, os núcleos de urânio-238 se dividem espontaneamente em outros menores, com maior estabilidade, emitindo partículas alfa e raios gama.

Em geral, a transmutação dos elementos químicos ocorre em etapas. O urânio-238 se transforma em tório-234, emitindo uma partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons). O tório-234, por sua vez, se transforma em protoactínio-234, que se transforma em urânio-234, que se transforma em tório-230 e assim sucessivamente (lembrando que o número após o nome do elemento se refere à soma de prótons e nêutrons). Após várias etapas, o núcleo original de urânio-238 se transforma em um núcleo de chumbo-206, que é estável.

As cadeias de desintegração podem produzir radiações diferentes: alfa (núcleos de hélio), beta (elétrons) ou gama (fótons), mas as etapas não se sucedem com a mesma rapidez. Cada etapa tem sua própria meia-vida, e a diferença entre elas pode ser gigantesca. A meia-vida do urânio-238 é de 4,5 bilhões de anos, ou seja, levará o tempo de vida do Sistema Solar para que uma amostra de urânio-238 se reduza à metade. A transição do tório-234 para o protoactínio-234 tem meia-vida de aproximadamente 24 dias. Já a meia-vida do protoactínio-234 é pouco mais de um minuto.

Em 1986, o reator nuclear de Chernobyl, na Ucrânia, explodiu. Uma combinação de falhas de projeto, manutenção precária e imperícia dos operadores fez com que centenas de toneladas de material altamente radioativo fossem lançadas na atmosfera. Levada pelo vento, a radiação atingiu vários países da Europa. O principal isótopo radioativo liberado foi o céσιο-137, que é uma fonte de raios gama, de todas a radiação mais

nociva. Esse elemento tem um ponto de ebulição relativamente baixo e é altamente volátil em altas temperaturas, como as da explosão do reator. Para piorar, a meia-vida do céσιο-137 é de 30 anos. Um pouco menos da metade do céσιο liberado no acidente ainda continua ativa.

No ano seguinte à explosão de Chernobyl, houve o acidente em Goiânia. Numa atitude irresponsável de uma clínica médica, um equipamento de tratamento de câncer foi dispensado em um terreno baldio. No equipamento havia uma quantidade substantiva de céσιο-137, no estado sólido. O equipamento foi desmontado por moradores locais e vendido como sucata. A substância radioativa, cloreto de céσιο, brilha no escuro, o que atraiu a atenção de um morador. Encantado com o brilho azul da substância, distribuiu-a entre amigos e familiares. Crianças, por curiosidade, ingeriram a substância. Mais de 100 mil pessoas foram expostas à radioatividade, e centenas foram contaminadas.

O céσιο-137 é produzido em reações em que ocorre a *fissão nuclear*. Na maioria dos casos, núcleos pesados se dividem espontaneamente em dois núcleos menores, mais estáveis, liberando nêutrons e uma grande quantidade de energia. Em geral, a fissão espontânea ocorre muito raramente, mas pode ser induzida bombardeando os núcleos com nêutrons. Essa descoberta foi feita por Otto Hahn, na Alemanha, em 1938, quando o mundo se encaminhava aceleradamente para a II Guerra Mundial. Se a descoberta fosse feita alguns anos depois, não teria havido Hiroshima e Nagasaki.

O urânio-235 se divide em dois núcleos com aproximadamente a mesma massa, liberando nêutrons. Os produtos mais comuns são o céσιο, bário e o criptônio. Os nêutrons liberados atingem outros átomos de urânio, causando novas fissões e a emissão de mais nêutrons, que causam mais fissões e assim sucessivamente. Se a massa da amostra de urânio for maior que

um determinado valor, a *massa crítica*, ocorre uma reação em cadeia em que uma enorme quantidade de energia é liberada. Esse é o princípio físico em que se baseiam tanto os reatores como as bombas nucleares. Nos reatores, usa-se barras de carbono para absorver parte dos nêutrons, mantendo o ritmo da cadeia de fissão sob controle. Em geral, os elementos resultantes da fissão também são radioativos, com longa meia-vida. No caso dos reatores, são o chamado “lixo radioativo”, e sua estocagem é um sério problema ambiental.

Capítulo 5

Átomos

O modelo atômico da matéria é uma grande conquista da Humanidade, talvez a maior da Ciência. Um dos mais importantes físicos estadunidenses, Richard Feynman, disse certa vez que se houvesse um grande cataclismo que pusesse a perder todo o conhecimento, sendo possível salvar apenas uma única frase para que as gerações futuras recomeçassem, essa frase seria "Tudo é feito de átomos". Feynman disse essa frase antes que se descobrisse que no Universo há muito mais coisa do que podemos ver. É mais correto dizer que no Universo, tudo o que *vemos* é feito de átomos. Toda a diversidade do mundo cabe nessa ideia.

O Modelo Atômico da matéria é uma conquista relativamente recente. Até o final do século XIX, os átomos eram considerados os constituintes mais fundamentais de toda a matéria. Pensava-se que fossem indivisíveis. Havia, no entanto, algumas indicações em contrário. A descoberta da radioatividade e as misteriosas linhas espectrais sugeriam que os átomos poderiam ser mais complicados, poderiam ter uma estrutura interna. A suspeita se transformou em certeza quando o núcleo atômico foi descoberto, em 1911, mas a forma com-

plexa como os elétrons se distribuem no interior dos átomos só seria explicada pela Mecânica Quântica 15 anos depois. O modelo atômico da matéria tomou sua forma final em 1932, quando James Chadwick descobriu a existência do nêutron. Nessa época, meu pai já era vivo.

Os estudantes de hoje aprendem que tudo é feito de átomos. Aprendem também que átomos não são indivisíveis, não são elementares. Possuem uma estrutura interna bastante complexa: minúsculos núcleos, com carga elétrica positiva e que concentram 99.995% da massa do átomo, envolvidos por uma nuvem de elétrons, com carga elétrica negativa. Os átomos têm exatamente o mesmo número de elétrons e prótons, e por isso são eletricamente neutros.

Os núcleos atômicos também são compostos: dentro deles, prótons e nêutrons formam um emaranhado compacto. Sabe-se há muito que cargas elétricas de mesmo sinal se repelem. Em um núcleo de chumbo, 82 prótons estão compactados dentro do volume ínfimo, e por isso há uma força de repulsão elétrica gigantesca entre eles. Felizmente, a imensa maioria dos núcleos atômicos é estável. Para manter prótons e nêutrons juntos, formando estruturas que podem permanecer inalteradas indefinidamente, deve haver uma força atrativa muito mais intensa do que a repulsão elétrica. Essa é a chamada *força nuclear forte*. Se não fosse por ela, o Universo seria muito sem graça, contendo apenas átomos de hidrogênio.

Prótons e nêutrons tampouco são partículas elementares. São compostos por partículas menores que, até o presente, acreditamos serem indivisíveis: os *quarks*. São partículas com propriedades muito exóticas, como vamos ver mais adiante. Prótons e nêutrons são formados por três quarks, e estes são cercados por densas nuvens de *partículas virtuais*, sobre as quais também falarei mais adiante. Prótons e nêutrons pa-

recem átomos em miniatura, com três “núcleos” em vez de apenas um. São estruturas extremamente complexas.

A estrutura da matéria lembra um pouco as matrioskas, aquelas bonecas russas: as camadas se sucedem, e sempre atravessamos uma encontramos outra mais fundamental. Não temos como saber se chegamos à última camada, se identificamos as partículas mais elementares da Natureza. Na verdade, não há razão para achar que seja esse o caso. Nos últimos 110 anos, passamos dos átomos aos núcleos atômicos; dentro destes, encontramos prótons e nêutrons; agora, estamos nos quarks e nos *léptons* (o elétron é um lépton). O que virá a seguir?

Os átomos são incrivelmente pequenos, mas podemos medir seu “tamanho” aproximado. As aspas se devem ao fato de a noção de tamanho não ser muito bem definida em sistemas microscópicos. Não podemos, no entanto, medir o tamanho de um quark ou de um elétron, nem é possível registrar uma imagem de um elétron ou de um quark. Até onde a tecnologia atual alcança, podemos afirmar que são pontinhos de matéria. O que encontraremos quando for possível medir distâncias muito menores do que os limites atuais? Se houver alguma coisa dentro dos elétrons, as teorias atuais serão claramente insuficientes. Precisaremos criar novas.

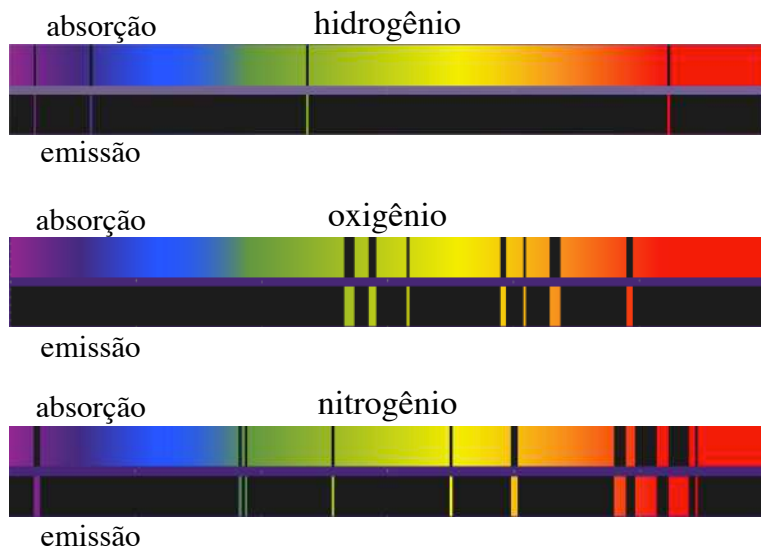
Muito se apendeu sobre os átomos analisando os *espectros*, as “impressões digitais” dos elementos químicos. Cada elemento tem seu próprio espectro, diferente de todos os demais. Os espectros são uma espécie de código de barras, onde estão guardadas preciosas informações sobre o que ocorre no interior dos átomos. O esforço para decifrar esse código tornou-se uma das mais belas páginas da história da Ciência.

O espectro mais conhecido é o arco-íris. A luz do Sol é uma combinação de luzes de muitas cores (cada cor corres-

ponde a uma onda eletromagnética de frequência específica). As gotículas de água suspensas na atmosfera agem como prismas. Quando a luz do Sol as atravessa, as diferentes cores se revelam, formando o espectro da luz visível. No arco-íris, as cores variam do vermelho ao violeta, aparentemente de forma contínua. Olhando bem de perto, no entanto, notam-se linhas escuras entre conjuntos de cores. O mesmo princípio é usado nos laboratórios, onde a luz do Sol é substituída pela luz característica de cada elemento químico que, ao atravessar um prisma, forma o seu “arco-íris” particular.

A mesma técnica básica é usada na análise dos espectros desde o século XIX. Um tubo de vidro é preenchido com um gás ou vapor de um determinado elemento químico. Uma descarga elétrica no interior do tubo excita os átomos, aquecendo o gás. O conjunto vira uma lâmpada: o gás aquecido emite uma luz característica, que passa por um prisma, e o espectro do elemento é registrado. Antigamente, o registro era feito em filmes fotográficos. Atualmente, utiliza-se modernos detectores de luz, semelhantes aos dos nossos celulares. Esse é o chamado *espectro de emissão*, que consiste em algumas linhas coloridas que se destacam sobre um fundo preto. As linhas são espaçadas entre si de forma aparentemente irregular.

Existe um segundo tipo de espectro. Em vez de aquecer o gás com uma descarga elétrica, a ampola é iluminada por um feixe de luz branca. Uma parte da luz incidente é absorvida pelo gás, e em seguida é reemitida em uma direção aleatória. A outra parte atravessa a ampola como se o gás não existisse, passa por um prisma e um outro tipo de espectro aparece. Esse é o chamado *espectro de absorção*, que lembra o arco-íris, mas é interrompido aqui e ali por linhas pretas, que são as cores que faltam. Assim como no espectro de emissão, as linhas se distribuem de forma aparentemente irregular.



Os espectros são as digitais de cada elemento. As linhas espectrais de absorção e emissão coincidem.

Crédito: NASA, James Webb Space Telescope.

Os dois tipos de espectro se complementam. Quando os dois espectros de um mesmo elemento são superpostos, as linhas coloridas do espectro de emissão preenchem exatamente as linhas pretas do espectro de absorção. A coincidência das linhas espectrais não é fortuita: reflete o fato de os átomos só poderem emitir ou absorver luz de determinadas cores. Como a cor da luz está diretamente ligada à energia que ela transporta, a existência das linhas espectrais significa que os átomos só podem absorver ou emitir energia em quantidades muito específicas.

Ainda no século XIX, a análise dos espectros se estendeu à luz das estrelas. Sabemos hoje que para onde quer que os telescópios sejam apontados, sempre se vê a mesma coisa: em todo o Universo visível, encontramos os mesmos elementos

químicos que existem na Terra. Tudo o que vemos à nossa volta, incluindo nós mesmos, é feito dos mesmos elementos químicos. O Universo está dentro de nós, somos feitos da mesma matéria das estrelas e dos planetas, organizada, no entanto, de uma forma muito especial. A vida é o exemplo mais eloquente da importância da *ordem* na Natureza.

A origem das linhas espectrais ainda era desconhecida no início do século passado. A sua própria existência e a notável coincidência entre as linhas dos espectros de emissão e absorção eram indicações de que os átomos tinham uma estrutura interior. O físico dinamarquês Niels Bohr encontrou a solução do mistério em 1913, depois de passar um período no laboratório de Rutherford (uma solução parcial, como veremos mais adiante). Mas um entendimento mais profundo teve que esperar pela criação da Mecânica Quântica. As linhas espectrais revelam como a energia no interior dos átomos se distribui entre os elétrons.

A Mecânica Quântica explica por que os átomos só podem emitir ou absorver energia em determinadas quantidades, ou seja, fótons com frequências específicas (ou, equivalentemente, luz de determinadas cores). No interior dos átomos, as nuvens de elétrons que envolvem o núcleo formam camadas sucessivas (mal comparando, como uma cebola), e cada uma possui uma energia bem específica. Na Natureza existem átomos com até sete camadas, correspondendo a sete níveis de energia. Nenhum átomo com mais de sete camadas de elétrons foi encontrado até agora. Cada camada pode acomodar um número específico de elétrons, que cresce à medida que a energia da camada aumenta. Com sete níveis de energia, a Mecânica Quântica nos diz que é possível acomodar até 128 elétrons. Se houvesse um elemento químico cujo núcleo atômico tivesse mais de 128 prótons, ele teria uma oitava camada que acomodaria os elétrons adicionais. Dentro de cada camada, todos

os elétrons têm aproximadamente a mesma energia, com diferenças muito sutis.

Imagine um teatro vazio, pouco antes de começar o espetáculo. No teatro há sete fileiras de assentos. Os espectadores entram e começam a tomar os seus assentos ordenadamente, iniciando pela fileira mais próxima ao palco. Cada fileira têm um número diferente de assentos. Os espectadores podem sentar onde quiserem, basta que haja assentos vagos. Depois de todos os assentos disponíveis da primeira fileira estarem tomados, os espectadores passam a ocupar a segunda fileira, e quando esta estiver totalmente preenchida, os assentos da fileira seguinte começam a ser ocupados, e assim sucessivamente.

Alguns espetáculos vão atrair pouco público, e a última fileira ocupada pode ficar incompleta. Outros espetáculos vão fazer mais sucesso, e as fileiras ficarão totalmente ocupadas. Qualquer que seja o espetáculo, os assentos são sempre os mesmos, estão sempre no mesmo lugar e são sempre ocupados da mesma forma. É mais ou menos assim que os elétrons ocupam seus “assentos” dentro dos átomos.

Agora vamos supor que exista uma segunda sala ao lado, separada por uma parede móvel, com assentos dispostos e ocupados da mesma maneira. Na última fileira ocupada da primeira sala há apenas dois espectadores. Na outra sala ocorre o contrário: na última fileira ocupada restam apenas dois lugares livres. Quando a parede é removida, os dois espectadores da última fileira da primeira sala percebem as vagas existentes na sala ao lado e migram para lá, completando a sua última fileira. Assim, nas duas salas todos os assentos das últimas fileiras ficam ocupados. Dessa forma, o cloro, um elemento tóxico (com um único “assento livre”), se une com o sódio, também nocivo (com um “espectador solitário”), para tornarem-se o sal que usamos na comida. Um casamento perfeito.

Os átomos são sistemas quânticos por excelência. Dentro deles, os elétrons não podem ter qualquer energia. Apenas alguns valores são possíveis, pois os elétrons se encontram sempre em alguma das camadas, e a cada camada corresponde um nível de energia específico. Quando um átomo absorve um fóton que tenha uma energia correta, o estímulo faz um elétron passar de uma camada à outra, mais externa e com maior energia, desde que na camada de destino haja um assento vazio. Mas essa transição se dá aos "saltos". Os elétrons "pulam" de camada em camada, nunca deslizam entre elas. As energias "corretas" dos fótons correspondem às diferenças entre os níveis de energias de quaisquer duas camadas. Os átomos só podem absorver fótons com essas energias. Para os demais, os átomos são transparentes.

Quando o átomo absorve um fóton ele se torna instável. Depois de um curto intervalo de tempo, um fóton é emitido em uma direção aleatória, imprevisível, com a mesma energia do fóton absorvido. O elétron, então, dá o salto contrário, voltando à sua camada original. Como existem apenas sete camadas, o número de saltos possíveis é limitado. Uma luz de cor diferente é emitida em cada salto, e é essa a origem das linhas coloridas do espectro de emissão.

Com o espectro de absorção ocorre algo parecido. Quando um feixe de luz atravessa um tubo de vidro contendo gás, os átomos absorvem apenas fótons com energias "corretas". Os demais passam pelos átomos como se estes não existissem, e, depois de atravessarem um prisma, vão formar um espectro parecido com o arco-íris. Quando os átomos do gás voltam ao seu estado de equilíbrio, os fótons que foram absorvidos são reemitidos em todas as direções, não só na do feixe de luz. Com isso, algumas cores ficam faltando no espectro, que correspondem aos fótons absorvidos pelos átomos. Essa é a origem das linhas pretas do espectro de absorção. Os átomos

atuam como filtros. São uma demonstração cabal de que o microcosmo funciona com leis bem diferentes.

Embora o número máximo de camadas (sete) seja o mesmo para qualquer tipo de átomo, a energia de cada uma varia de acordo com o elemento químico. Em átomos com muitos prótons, a atração eletromagnética que estes exercem sobre os elétrons é mais intensa. A energia de um elétron na terceira camada de um átomo de carbono não é exatamente igual à de um elétron na mesma camada em um átomo de ouro. Em outras palavras, a posição exata das linhas espectrais muda de acordo com o elemento químico, tornando os espectros as suas “digitais”.

Os “saltos quânticos” foram motivos de muita divergência. A ideia opôs alguns criadores contra a criatura. Einstein, por exemplo, jamais aceitou essa ideia. Não sem razão, pois trata-se de algo muito bizarro. É como se uma pessoa subitamente desaparecesse de um lugar e aparecesse imediatamente em outro. É certo que a Mecânica Quântica reproduz exatamente distribuição das linhas espectrais e outras propriedades dos átomos, as características do efeito fotoelétrico, o comportamento de sólidos em temperaturas muito baixas etc.. Einstein não tinha dúvidas de que a matemática estava correta, mas questionava a tradução da linguagem matemática para a linguagem falada.

O que incomodava Einstein era a impossibilidade de acompanhar movimento dos elétrons *continuamente* ao longo do tempo. Os elétrons, segundo ele, deveriam seguir trajetórias suaves e bem definidas entre uma camada e outra, deveriam deslizar por uma rampa, e não uma pular os degraus de uma escada. Para Einstein, a Mecânica Quântica, que ajudou a criar, não seria uma teoria errada, seria apenas incompleta. Faltava justamente a parte que descreveria a trajetória dos elétrons. Viver sem o conceito clássico de trajetória era difícil mesmo

para as mentes mais brilhantes. Mas, de fato, é impossível seguir um elétron dentro do átomo, o que é uma consequência de um dos princípios fundadores da Mecânica Quântica: o Princípio de Incerteza de Heisenberg.

Os átomos mais simples são o hidrogênio, o hélio e o lítio. Estes são os que foram produzidos no Universo primordial, há 13,8 bilhões de anos. Os demais elementos, com núcleos que contêm mais prótons e nêutrons, foram formados no interior das estrelas e espalhados pelo espaço sideral quando elas explodiram. Somos uma espécie de relíquias ambulantes de um passado muito remoto: cerca de 60% dos átomos que temos nos nossos corpos foram criados há 13,4 bilhões de anos. Os outros 40% são restos de estrelas, onde os demais elementos foram criados. A história do Universo está registrada em nossos corpos.

O hidrogênio é o elemento químico mais leve e mais simples: um único próton envolvido por um único elétron. É também o elemento mais abundante, correspondendo a mais de 90% de todos os átomos do Universo, ou 75% da sua massa. Seu espectro é o mais simples, mas mesmo nele se observam as linhas espectrais.

Os átomos são extremamente pequenos, tão pequenos que é difícil conceber. Mas os núcleos atômicos são 10.000 vezes menores, o que significa que os átomos são, basicamente, espaço vazio. É realmente estranho olhar para o Pão de Açúcar, feito de pura rocha, sólida, densa, e pensar que, observando bem de perto, veríamos um imenso vazio salpicado minúsculos pontinhos de matéria, muito distantes uns dos outros. A solidez e a impenetrabilidade são ilusórias. Na escala humana, ambas são o efeito combinado de uma quantidade inimaginável de átomos de vários tipos.

A Física Atômica estava apenas começando, mas a partir dos anos 1930 a fronteira do conhecimento deslocou-se para um escala menor, para dentro do núcleo atômico. Foi o início da era de ouro da Física Nuclear, que se estendeu por mais de duas décadas. O desafio era descobrir o que acontece naquele minúsculo volume ultradenso. Quais são as propriedades da força que mantém a coesão de prótons e nêutrons em um volume tão compacto? Aqui a conexão cósmica se manifesta. A Física Nuclear permitiu entender os mecanismos que geram a energia no interior do Sol e das estrelas.

Capítulo 6

Mecânica Quântica

“Posso dizer, seguramente, que ninguém entende a Mecânica Quântica.” Richard Feynman

Vivemos cercados por coisas contínuas e sólidas: o chão que pisamos, as paredes das casas, todas as superfícies e objetos que vemos ou tocamos etc. Sentimos a continuidade da matéria com nossas mãos e olhos. A continuidade que nos cerca não se resume ao que é tangível, a música é uma sucessão contínua de notas e acordes, assim como a luz do Sol é uma combinação de infinitas cores.

No nosso cotidiano, os objetos sempre ocupam um lugar no espaço e podem ser localizados com grande precisão a qualquer momento. Quando se movimentam, pode-se seguir suas trajetórias continuamente. Tudo à nossa volta se move de acordo com leis bem conhecidas, formuladas por Newton no final do século XVII. As leis de Newton são usadas até hoje na Astronomia e Astronáutica. No Sistema Solar, elas permitem prever com precisão as órbitas de planetas, satélites, cometas e asteroides. As missões espaciais são programadas com base em

cálculos que utilizam a Mecânica de Newton, desde a melhor data para o lançamento até a rota a ser seguida.

Apesar de as leis de Newton funcionarem muito bem, elas não são válidas tanto no macro como no microcosmo. No Cosmo, quando a luz passa nas vizinhanças de um objeto com massa muito grande, como o Sol, sua trajetória sofre um desvio que as leis de Newton não conseguem reproduzir. Mas a Teoria da Relatividade Geral de Einstein, sim. É a teoria correta da gravitação, sobretudo quando se trata do Universo em larga escala, da Via Láctea e além. Há mais de cem anos ela é confirmada diariamente, tanto por observações astronômicas como pelos nossos celulares (o GPS não funcionaria sem a Relatividade).

No microcosmo, a extremidade oposta, a Física Clássica também falha: segundo ela, os átomos sequer poderiam existir, não poderíamos estar aqui. Sabemos, desde o século XIX, que uma partícula carregada perde energia emitindo radiação quando é acelerada. Se os elétrons seguissem órbitas bem definidas no interior dos átomos, a aceleração devida à atração do núcleo faria com que os elétrons perdessem energia continuamente, se aproximando cada vez mais do núcleo até o colapso. Em escala atômica, com distâncias da ordem de $0,000.000.000,1$ m ou menores, a Natureza é quântica.

O cotidiano segue relações de causa e efeito. Estamos acostumados a prever as consequências de uma determinada ação. Relações de causa e efeito são importantes também para os cientistas, sejam eles físicos, químicos, biológicos, sociólogos etc.. Quando estudam algum fenômeno, sempre procuram descobrir e entender suas causas. Afinal, nada deveria acontecer sem alguma ação anterior. Os eventos do cotidiano têm também alcance limitado, afetam apenas uma região pequena do espaço e do tempo. Não são notados em grandes distâncias. Quando escovamos os dentes, não

causamos, naturalmente, nenhuma interferência na vida dos vizinhos. Apenas a gravidade tem o poder de afetar objetos muito distantes.

Desde o momento em que nascemos, e pelo resto da vida, lidamos o tempo todo com continuidade, determinismo, causalidade e localidade. São noções tão familiares que nem pensamos sobre elas. São tomadas como autoevidentes, moldam nossa intuição e o nosso modo de ver o mundo físico. Mas, na verdade, a Natureza brinca conosco, iludindo os nossos sentidos. Quando mergulhamos no mundo microscópico, tudo se torna radicalmente diferente. A Natureza segue outras leis e a matéria tem outro aspecto. O microcosmo é descontínuo, granular. Os átomos, como vimos, são um imenso vazio. Em qualquer montanha feita de pura rocha, há muitíssimo mais espaço vazio do que matéria. No interior dos átomos, elétrons “saltam” de uma órbita para outra e é impossível segui-los continuamente. Núcleos atômicos se desintegram espontaneamente, sem uma causa e sem que seja possível prever quando isso acontecerá. Definitivamente, a intuição e os sentidos não são bons guias para navegar pelo mundo quântico.

A Física Newtoniana é um limite da Relatividade. Se aplica quando as velocidades são pequenas comparadas à da luz e as distâncias não são muito grandes. É também um limite da Física Quântica, quando as escalas não são muito pequenas. Não existe uma fronteira separando o macroscópico do microscópico, não há um ponto crítico a partir do qual os efeitos quânticos se tornam subitamente relevantes. Eu me lembro de um filme que vi na minha adolescência, uma ficção científica ingênua e repleta de incongruências e que hoje faria meu filho adolescente dar gargalhadas. Mas na época, me impressionou muito.

No filme, um cientista embarca em um pequeno submarino, que em seguida é miniaturizado até ficar menor que uma

célula. Em seguida, o submarino é injetado em uma pessoa importante, gravemente enferma. O cientista leva um medicamento poderoso a um local específico no corpo do paciente. Ele guia o submarino com bravura através da correnteza dos vasos sanguíneos, desviando dos imensos e ameaçadores glóbulos vermelhos. Consegue escapar do ataque das células do sistema imunológico, monstros gigantes e assustadores. Depois de muitas peripécias, ele finalmente chega ao local certo, libera o medicamento e salva o paciente. O filme acaba com o heróico cientista voltando ao tamanho normal, sendo recebido em glória no laboratório, depois de uma transição suave entre o microscópico e o macroscópico.

Se o cientista fosse reduzido ainda mais, à um bilionésimo de metro, ele não mais veria as células ou as organelas que há no seu interior, veria apenas átomos e nada mais. Fotografar um átomo é impossível, mas existem outras formas de gerar imagens. Não sei se um dia será possível produzir imagens de átomos com boa resolução, mas é certo que dentro dele não há nada além de um núcleo minúsculo com toda a massa cercado por uma nuvem invisível de elétrons.

Apenas um parêntese: hoje, o submarino do filme é uma nanocápsula (escalas nanométricas são da ordem de um milionésimo de metro). Guiada por campos magnéticos, as nanocápsulas levam medicamentos para tratamento de câncer e os libera apenas nos locais afetados, aumentando significativamente a eficácia e reduzindo drasticamente efeitos colaterais. Esse tipo de terapia ainda está em fase de desenvolvimento, mas é bastante promissora.

Ao longo da história, as revoluções quase sempre foram precedidas por períodos de grande agitação e instabilidade. A inconformidade cresce até que algum evento seja o estopim da sua deflagração. A revolução quântica foi diferente. Ela

começou de uma forma inesperada, sem nenhum aviso prévio: no apagar das luzes do século XIX e em curta sequência, os elétrons, os raios X e a radioatividade foram descobertos. Eram fenômenos que não cabiam na moldura do conhecimento da época, cuja natureza era desconhecida. Pegaram os físicos de surpresa.

Em 1900, os principais postos nas universidades europeias eram ocupados por cientistas nascidos ao longo da segunda metade do século XIX, a era de ouro da Física Clássica. Formavam a “velha guarda” da Física. Eles chegaram à maturidade e cristalizaram sua visão de mundo antes de o *quantum* ser descoberto. Para eles, as ideias da nova teoria quântica eram esdrúxulas, absurdas, e eles as rejeitavam totalmente. Eram conservadores e se opunham veementemente aos jovens físicos “revolucionários”, nascidos junto com o *quantum*. A velha guarda não aceitava o fato de ser necessário criar algo inteiramente novo, diferente de tudo o que havia antes, outras ideias, novos conceitos. Como seria possível um mundo que não fosse feito de coisas contínuas, onde efeitos nem sempre precisam ser precedidos de uma causa, um mundo onde o futuro não poderia ser previsto? Que mundo é esse em que os elétrons atômicos pulam de uma órbita a outra sem que se possa segui-los?

Durante anos os físicos da velha guarda tentaram, inutilmente, explicar as propriedades dos átomos usando as leis da Física Clássica. Por fim, veio a capitulação. Não era possível lutar contra os fatos, o sucesso da teoria quântica era indiscutível. Ela reproduz exatamente as linhas espectrais e outras propriedades dos átomos, as características do efeito fotoelétrico, o comportamento de sólidos em temperaturas muito baixas etc.. Einstein não tinha dúvidas de que a matemática estava correta, mas questionava o seu significado. Assim, relutantemente, todos aceitaram a nova teoria como correta, e a interpretação e implicações das novas ideias se tornaram o centro

da disputa. Nesse momento, Niels Bohr se juntou aos jovens, mas Einstein, surpreendentemente, se aliou à velha guarda.

A Mecânica Quântica é uma ferramenta matemática poderosa. Não há teoria física que seja mais precisa e, seguramente, mais misteriosa. Os fenômenos do microcosmo têm uma natureza *probabilística*, e não determinista. Não se pode prever o exato momento em que um núcleo atômico instável vai decair. As equações da Mecânica Quântica permitem apenas calcular as probabilidades dos diversos resultados de uma medição, de uma colisão ou de uma desintegração. Einstein se recusava a admitir essa limitação. Segundo ele, “*a teoria produz um bom resultado, mas dificilmente nos aproxima do segredo do Criador. Estou, em todos os casos, convencido de que Ele não joga dados*”. Einstein deu contribuições valiosas para a construção da Mecânica Quântica. Para ele, não se tratava de uma teoria errada, estava apenas incompleta. O futuro não deveria ser regido pelo acaso.

Durante alguns anos, Bohr e Einstein travaram memoráveis duelos de “experimentos mentais”, situações hipotéticas envolvendo conceitos fundamentais, com as quais Einstein pretendia demonstrar a inconsistência lógica da Mecânica Quântica como uma teoria probabilística. Mas para todos os experimentos desafiadores de Einstein, Niels Bohr tinha uma resposta que desmontava os seus questionamentos. Esgrimindo seus argumentos com maestria, Bohr conseguiu convencer muitos, talvez a maioria dos físicos. Sua visão da Mecânica Quântica ficou conhecida como a *interpretação de Copenhagen*. Esse debate não se encerrou, e ainda hoje há interpretações alternativas.

Einstein, no entanto, nunca se convenceu. Até o final da vida manteve a firme convicção de que a teoria quântica estava incompleta. Einstein resistia a trocar a segurança do determinismo pela incerteza das probabilidades. Revolucionário aos 25 anos, Einstein agia agora como os conservadores que criti-

caram sua Teoria da Relatividade. Nem sempre os cientistas, mesmo os mais brilhantes, conseguem se desvencilhar das suas crenças e preconceitos.

A criação da Mecânica Quântica foi uma aventura intelectual sem precedentes, uma jornada épica que começou com a descoberta da radioatividade e do *quantum*, e se estendeu ao longo das três primeiras décadas do século XX. A Física viveu tempos muito intensos, quando descobertas experimentais e avanços teóricos se sucediam. Algo inteiramente novo estava sendo construído a partir dos eventos mais estranhos, como a luz se comportando como partículas, e partículas se comportando com ondas. Havia teorias específicas para alguns fenômenos, como o efeito fotoelétrico, a radiação de corpo negro ou as linhas espectrais. A Mecânica Quântica é uma síntese de todas elas. Esse foi um período tão rico na história da Ciência que merece ser conhecido e celebrado.

Tudo começou, como vimos, com a descoberta acidental radioatividade e dos raios X. Durante alguns anos, as novidades conviveram com um desafio antigo: explicar a radiação do corpo negro. Experimentos muito sensíveis propiciaram medidas precisas das características das ondas eletromagnéticas emitidas por um corpo negro, gerando dados de boa qualidade (o desafio tecnológico era medir a intensidade da radiação ao longo de todo o espectro de frequências). Analisando esses dados, Max Planck decifrou o enigma da radiação do corpo negro, em 1900, introduzindo a hipótese dos *quanta*.

Cinco anos depois, veio o *annus mirabilis* de Einstein. A hipótese de Planck tratava de uma propriedade da matéria até então desconhecida. Einstein deu um passo adiante, ao fazer a hipótese de que a própria radiação é feita de pacotes individuais, reintroduzindo a discussão sobre a natureza da luz, que ele descrevia como um feixe de corpúsculos. Com isso,

Einstein explicou os detalhes do efeito fotoelétrico. Com sua hipótese dos *quanta* de luz, que logo ficaram conhecidos como *fótons*, Einstein conseguiu resolver outro enigma: o comportamento da matéria em temperaturas muito próximas ao zero absoluto. No interior da cavidade que emulava um corpo negro não havia um conjunto de ondas, mas sim um “gás” de fótons.

O episódio seguinte aconteceu em 1911: Rutherford descobriu a existência dos minúsculos núcleos atômicos, revelando ao mundo o que há no interior dos átomos. Pouco tempo depois, Marie Curie identificaria nos núcleos atômicos a origem da radioatividade. A descoberta de Rutherford inaugurou uma nova era, a da Física Atômica, cujo foco era explicar como os elétrons se comportam dentro dos átomos, como eles se distribuem e como o conjunto pode ser um sistema estável.

Um jovem e talentoso físico dinamarquês, Niels Bohr, ganhou uma bolsa de estudos dada pela cervejaria Carlsberg, em 1911. Foi estudar na Inglaterra e passou um período no laboratório de Rutherford, onde teve o primeiro contato com as recentes descobertas da sua equipe. Dois anos depois, Bohr, de volta à Dinamarca, publicou os trabalhos que o tornaram famoso. Levando a ideia do *quantum* para dentro dos átomos, ele propôs uma explicação para o seu funcionamento. Bohr imaginava os átomos como miniaturas do Sistema Solar, uma imagem que apesar de incorreta, é tão poderosa que resistiu ao tempo. Ainda hoje é a representação mais comum dos átomos (está inclusive no logo do CBPF).

Bohr criou um modelo para o átomo de hidrogênio, o mais simples de todos, com um único elétron (as mesmas ideias básicas se aplicam aos átomos dos outros elementos, mas com mais de um elétron as coisas se tornam muito mais complicadas). Era uma explicação parcial. Faltavam ingredientes ainda desconhecidos, que só viriam a ser descobertos dali a uma década. Mesmo assim, Bohr conseguiu uma proeza: seu

modelo previa com boa precisão a posição das linhas no espectro do hidrogênio. Aos 28 anos, Bohr tornou-se uma celebridade.

Bohr partiu da suposição de que no interior dos átomos os elétrons só podem estar em um número limitado de órbitas ou camadas (hoje sabemos que são no máximo sete). A energia dos elétrons em qualquer das camadas é constante, ou seja, não perdem energia emitindo radiação. Se receberem o estímulo adequado, os elétrons podem pular para camadas mais externas, se nelas houver vaga. O átomo fica excitado e se torna instável. Logo volta ao seu estado original emitindo um fóton. Como há somente sete camadas, o número de saltos possíveis é limitado, o que faz com que as energias dos fótons emitidos pelos átomos tenham apenas alguns valores. Essa é a origem das linhas espectrais: cada linha corresponde a um salto entre duas camadas específicas, quando um átomo emite um fóton com energia bem definida.

A emissão do fóton é um típico fenômeno quântico: ocorre espontaneamente, sem que se possa prever quando e em que direção ele será emitido. A energia do fóton emitido é *quantizada*, isto é, só pode ter valores bem específicos. A radiação beta é outro exemplo de fenômeno quântico: dentro do núcleo, um nêutron se desintegra de forma espontânea e imprevisível, dando origem a um elétron (a radiação beta) e um antineutrino, que são expelidos pelo átomo. No núcleo, onde havia um nêutron agora há um próton.

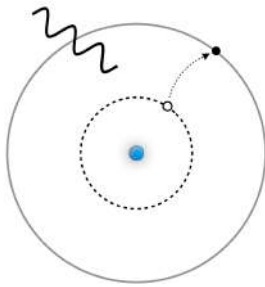
Bohr foi um físico diferente. Tinha uma abordagem menos matemática e mais intuitiva da Física, e com alguma frequência suas ideias flertavam com a filosofia. Ele era muito carismático, e ainda jovem se tornou um verdadeiro cidadão do mundo, respeitado e venerado onde quer que fosse. A fama rendeu-lhe um instituto próprio em Copenhague, para onde ele atraiu os grandes gênios da nova Física Quântica. Formou-se ali a

chamada “Escola de Copenhagen”, que desenvolveu uma interpretação da Mecânica Quântica que se tornaria hegemônica.

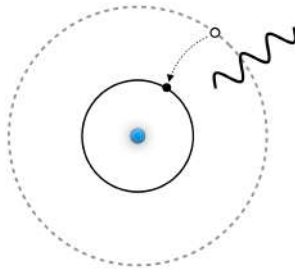
Ao longo da década de 1930, Bohr acolheu em seu instituto vários cientistas alemães que fugiam da perseguição nazista, especialmente os de origem judaica. A Dinamarca permaneceu uma nação neutra até 1940, quando o exército de Hitler cruzou a fronteira e tomou o país. Bohr manteve seu instituto funcionando até 1943, quando os alemães o tomaram. Avisado na véspera e temendo ser preso, Bohr conseguiu fugir à noite com a família em um pequeno barco, atravessando o canal que separa a Dinamarca da Suécia.

Bohr permaneceu na Suécia por pouco tempo. De lá seguiu para a Inglaterra, onde também ficou por um breve período. Seu destino final seriam os Estados Unidos. Apesar de ser um ativo pacifista, Bohr apoiou o projeto Manhattan, dirigido por Robert Oppenheimer. Estava convencido – e com razão, como depois se verificou – de que seu ex-pupilo Werner Heisenberg, que permanecera em Berlim, estaria desenvolvendo a bomba atômica alemã. Na corrida por uma arma tão poderosa, Bohr não hesitou em escolher o lado. O fascismo não poderia (e não pode) vencer.

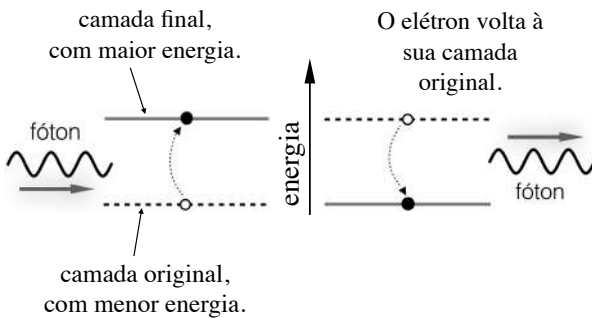
As linhas espectrais de elementos químicos com mais de um elétron, no entanto, continuavam sendo um enigma. Eram complexas demais para serem analisadas em detalhes com as ferramentas da época. O modelo de Bohr dava uma resposta ao problema das linhas do hidrogênio, mas não dava conta do átomo de hélio, o segundo mais simples, com apenas dois elétrons. E nem poderia. Bohr não levava em conta uma propriedade dos elétrons que só seria descoberta no começo dos anos 1920: o *spin*. Essa propriedade fundamental, comum a todas as partículas elementares, molda a forma como os elétrons se distribuem nos átomos maiores.



Um átomo de hidrogênio absorve um fóton. Um elétron "salta" para uma camada com mais energia.



Rapidamente o elétron retorna à sua camada original. Um fóton é emitido, com a mesma energia do que foi absorvido.



O *spin* é uma propriedade puramente quântica. Não há nada parecido no nosso mundo macroscópico e por isso é muito difícil falar sobre ele. Somos forçados a fazer analogias e usar imagens que não são muito realistas. De certa forma, o *spin* das partículas elementares está relacionado a rotações. No caso do elétron, o *spin* pode se manifestar de duas formas, que convencionou-se chamar *up* e *down*. Assim como a carga elétrica pode ser negativa ou positiva, o *spin* do elétron pode estar no estado *up* ou *down*. Um elétron atômico com *spin up* e outro com *spin down* estão em estados quânticos diferentes, mesmo que possam estar na mesma camada.

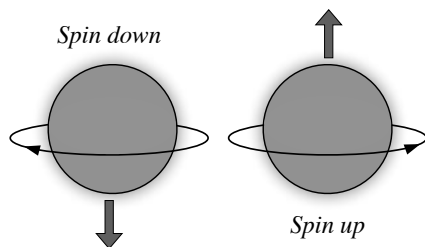
Elétrons são pontinhos de matéria, sem um tamanho mensurável, pelo menos até onde podemos alcançar. Falar de rotação de um ponto é algo sem sentido, mas imagine, apenas por um breve instante, que elétrons sejam minúsculas bolinhas compactas que giram sobre si mesmas, com a carga elétrica distribuída uniformemente no seu interior. O movimento de rotação da bolinha carregada cria um campo magnético como o de um ímã. Quando a bolinha atravessa uma região do espaço onde há um campo magnético, ela se comporta como a agulha de uma bússola, que sempre se alinha com o campo magnético da Terra. Nesse caso, o campo magnético da bolinha se alinha com o campo magnético externo. Os estados *up* e *down* seriam como duas bússolas, alinhadas com o campo magnético da Terra, mas uma aponta para o norte e a outra para o sul.

Imagine um ciclista passeando tão distraído que bate em um muro. Compare o impacto do pobre ciclista sobre o muro com o da colisão de um caminhão carregado de areia e com a mesma velocidade da bicicleta. O caminhão provavelmente destruiria o muro. Se o ciclista tivesse uma velocidade muito maior, sofreria consequências sérias. Todo corpo em movimento tem um *momento linear*, uma grandeza que está associada à força necessária para pará-lo. O momento linear depende tanto da sua massa como da velocidade. Tendo as mesmas velocidades, o momento linear do caminhão é muito maior que o da bicicleta por que esta é muito mais leve. O *momento angular* é uma grandeza física análoga ao momento linear, mas associado a movimentos de rotação.

É provável que você já tenha visto vídeos de patinadoras no gelo girando em torno de si mesmas. Quando abrem os braços ou estendem uma das pernas, giram mais devagar, mas quando se encolhem, giram mais rápido. Isso acontece porque o momento angular é uma grandeza cujo valor não muda com o tempo em situações em que o atrito pode ser ignorado. O momento angular depende de três fatores: a extensão espacial

dos corpos, as suas massas e velocidades de rotação. Diferentes combinações desses três aspectos podem resultar em um mesmo momento angular. No gelo, a patinadora desliza quase sem atrito, e quando gira, adquire um momento angular que é constante. Se ela abre os braços, sua velocidade tem que diminuir, e quando encolhe, a velocidade de rotação tem que aumentar para que a patinadora tenha sempre o mesmo momento angular.

A Terra orbita em torno do Sol, ao mesmo tempo em que gira em torno de si mesma. Por isso a Terra tem um momento angular *orbital* (rotação em torno do Sol) e um momento angular *intrínseco* (rotação em torno do seu eixo). Átomos não são pequenos sistemas planetários, nem elétrons são bolinhas minúsculas girando sobre si mesmas, mas ainda assim a analogia é útil. Quando estão dentro dos átomos, os elétrons têm um momento angular orbital, mesmo que não tenham órbitas bem definidas como os planetas, e o momento angular intrínseco, o *spin*. Nos dois casos, momento angular é quantizado, ou seja, só pode ter determinados valores.



O spin é uma propriedade puramente quântica. Não há nada parecido no mundo macroscópico. Está relacionado à forma como as partículas se comportam quando passam por campos magnéticos. Embora as partículas elementares não sejam pequenas bolinhas que giram sobre si mesmas, essa é uma analogia útil.

Os *estados quânticos* dos elétrons atômicos são definidos por quatro propriedades: a energia, o *spin* e outras duas ligadas ao seu momento angular orbital. Cada propriedade pode se manifestar apenas de algumas maneiras: sete valores possíveis para a energia (as sete camadas), dois estados de *spin* etc.. Ao todo, há 128 combinações dessas quatro grandezas, que são os estados possíveis para um elétron, os assentos do teatro atômico. Esse número seria maior caso houvesse átomos com oito camadas.

Então chegaram os anos 1920, provavelmente a década de maior efervescência na história da Física. Foi quando a teoria quântica finalmente tomou forma e se consolidou como a teoria do mundo microscópico. Nos Estados Unidos, em 1923, Arthur Compton fez um experimento que comprovou a existência dos *quanta* de luz de Einstein, demonstrando de forma irrefutável que a luz ora se *comporta* como ondas, na difração, ora como corpúsculos, no efeito fotoelétrico. Isso não significa que a luz *seja* ora onda, ora corpúsculo. As ondas eletromagnéticas de Maxwell são o efeito coletivo, macroscópico de um número imaginavelmente grande de fótons, os *quanta* de luz de Einstein. Em determinadas circunstâncias, os fótons se comportam coletivamente, em outros, agem individualmente.

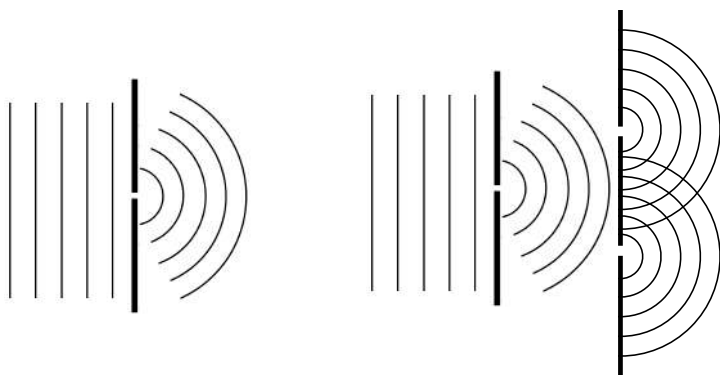
Ondas e corpúsculos são conceitos do nosso mundo macroscópico, que tomamos emprestado para explicar o comportamento de partículas subatômicas. No nosso dicionário, faltam palavras que definam o que um elétron *é*, mas isso não importa muito. No dicionário da Matemática, há palavras suficientes para descrever como os elétrons ou quaisquer outras partículas elementares se *comportam* nas mais diversas circunstâncias.

No mesmo ano de 1923, um jovem diletante de apenas 23 anos de idade, Louis-Victor-Pierre-Raymond, o sétimo duque

de Broglie, mais conhecido como Louis de Broglie, levantou a hipótese de que a dualidade onda-corpúsculo não seria exclusiva da luz, e sim uma característica comum a qualquer partícula subatômica. Assim como os fótons se comportam como partículas, os elétrons também poderiam se comportar como ondas, sofrendo difração. De Broglie fez essa afirmação bastante ousada na sua tese de doutorado, defendida na Universidade de Sorbonne.

A difração ocorre quando ondas atravessam uma abertura de tamanho próximo ao comprimento de onda. É um efeito comum a qualquer tipo de onda, independente da sua natureza. Uma série de fotos do Estreito de Gibraltar tiradas por satélites ilustram bem como os diferentes tipos de ondas se comportam da mesma maneira. O Estreito de Gibraltar é o ponto de maior aproximação entre a África e a Europa. Nas fotografias, se veem ondas muito longas vindas do Oceano Atlântico, chamadas sólitons, se propagando em direção ao Mar Mediterrâneo. As frentes de ondas no Atlântico formam longas retas paralelas e bem espaçadas. Quando passam pelo estreito, ocorre a difração. No Mediterrâneo, surgem ondas circulares, como no desenho abaixo. Se no meio de Gibraltar houvesse uma ilha dividindo o estreito em duas passagens, em cada uma haveria ondas circulares, que interfeririam. Difração e interferência são típicos fenômenos ondulatórios.

De Broglie foi bastante corajoso, mas seu orientador estava inseguro. Antes da defesa, enviou uma cópia da tese a Einstein. A reação foi positiva. Einstein ficou vivamente impressionado com o trabalho, e viu ali uma oportunidade para restaurar a continuidade na teoria quântica. As “ondas de matéria” de de Broglie poderiam vir a substituir os saltos quânticos de Bohr. Todos os tipos de onda possuem uma *equação de onda*, fórmulas matemáticas que descrevem como as ondas se propagam pelo espaço ao longo do tempo. Era preciso, portanto, encontrar uma equação de onda para as “ondas de matéria” de



A difração é um fenômeno ondulatório. No desenho acima, ondas cujas frentes (picos ou vales) são linhas retas, chamadas de “ondas planas”, aparecem como ondas com circulares do outro lado da fenda. Quando há duas fendas, ondas circulares se formam do outro lado das aberturas. As ondas se superpõem e ocorre o fenômeno da interferência.

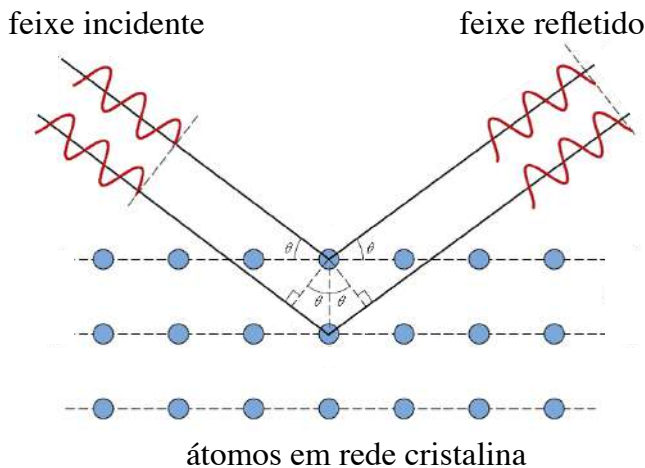
de Broglie. Einstein incentivou o austríaco Erwin Schrödinger a seguir esse caminho.

Um experimento importante havia sido realizado dez anos antes de de Broglie defender sua tese de doutorado. Willian e Lawrence Bragg (pai e filho) investigavam se a difração era apenas um efeito macroscópico ou se também ocorreria em escala atômica. Para isso, iluminaram um cristal com um feixe de raios X. Os átomos nos cristais ocupam os vértices de estruturas geométricas tridimensionais regulares – cubos, paralelepípedos tetraedros etc. – que se repetem em todas as direções. Um caso simples para ilustrar: imagine um cubo oco e sem as paredes laterais, apenas com as arestas; coloque ao lado de cada face do cubo, outro cubo idêntico; repita a operação muitas vezes e em todas as direções, formando uma rede tridimensional; no final, um observador em qualquer

ponto dentro da rede estará cercado por cubos idênticos, e em cada vértice há um átomo.

Os padrões geométricos dos cristais reais são mais complexos, mas o importante é que formam uma sucessão de camadas de átomos regularmente espaçadas. O experimento dos Bragg consiste em um feixe de raios-X que incide sobre um cristal em um certo ângulo. Os raios-X têm comprimento de onda comparável ao espaçamento entre os átomos, e com isso podem atingir camadas de átomos em diferentes profundidades. Nessas condições, cada camada reflete os raios X como espelhos refletem ondas luminosas. As ondas refletidas pelos “espelhos” nas diferentes profundidades no interior do cristal se superpõem, e sempre que duas ondas se propagam pela mesma região do espaço e ao mesmo tempo, há interferência entre elas. No feixe refletido, registrado em filme fotográfico, os Bragg observaram um padrão idêntico ao da difração. Difração e interferência, dois fenômenos típicos de ondas macroscópicas, ocorrem também em escala atômica.

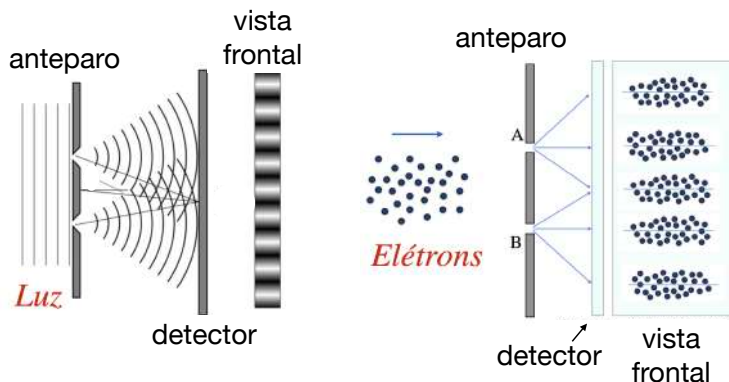
No dia da defesa da sua tese, de Broglie foi confrontado com a pergunta inevitável: como a uma hipótese tão inusitada poderia ser testada experimentalmente? Louis de Broglie esperava a pergunta e estava preparado: propôs realizar um experimento semelhante ao dos Bragg, substituindo os raios-X por um feixe de elétrons. O experimento sugerido por de Broglie foi realizado dois anos depois em diferentes laboratórios. Todos observaram o mesmo efeito: assim como os raios X, os elétrons também são refletidos pelas camadas do cristal como ondas refletidas em espelhos. No filme fotográfico, observa-se igualmente uma figura de difração. Estava definitivamente provado que elétrons e fótons se comportam de forma semelhante, ora como onda, ora como corpúsculo. De Broglie estava certo, e isso valeu-lhe o Prêmio Nobel de Física.



Difração de Bragg. Um feixe de raios-X incide sobre um cristal. O espaçamento entre os átomos é comparável ao comprimento de onda dos raios-X. Os átomos formam planos, e cada plano atua como um espelho. As ondas são refletidas pelos diferentes planos, o que cria uma defasagem entre elas. A defasagem causa interferência entre as ondas refletidas, originando um padrão de difração.

Existe um exemplo clássico para ilustrar a dualidade onda-partícula: o *experimento da dupla fenda*. Um feixe de luz incide sobre um anteparo onde há duas pequenas aberturas. A luz sofre difração em cada abertura, e depois do anteparo, as ondas difratadas interferem. Um padrão de claros e escuros se alternando aparece no detector. Se o feixe de luz é substituído por um feixe de elétrons, o mesmo padrão é observado: elétrons também se comportam como ondas.

A dualidade onda-partícula e a quantização da energia são características que os fenômenos na escala atômica têm em comum. Em 1925, os *quanta* de luz eram uma realidade. Não



O experimento da dupla fenda. À esquerda, um feixe de luz incide sobre um anteparo com duas pequenas aberturas. Se o feixe de luz (à direita) é substituído por um feixe de elétrons, o mesmo padrão é observado no detector.

havia mais dúvidas quanto aos resultados dos experimentos: átomos só absorvem ou emitem fótons com energias muito específicas; elétrons são refletidos em cristais como se fossem ondas luminosas; fótons colidem com elétrons como se fossem partículas. Unificar todos esses fenômenos em uma única teoria era um desafio à imaginação.

A revolução quântica atingiu o ápice entre 1925 e 1926. Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born, Pascual Jordan foram os principais protagonistas. Em julho de 1925, Heisenberg apresentou a Mecânica Matricial, a primeira versão de uma teoria quântica da matéria e da radiação, . Seis meses depois, foi a vez de Schrödinger. Seguindo um caminho e ideias totalmente diferentes, ele desenvolveu a sua versão da teoria quântica, a Mecânica Ondulatória.

Heisenberg nasceu em 1901, um ano depois do *quantum* de Planck. Ele cresceu e se formou no ambiente efervescente da nova Física. Era um mundo muito diferente do de Planck. Heisenberg tinha apenas 12 anos quando Bohr apresentou seu modelo atômico. Na década de 1920 ele e Bohr viveram uma intensa comunhão científica, interrompida com a ascensão do nazismo. Heisenberg tinha apenas 24 anos quando publicou a sua teoria quântica. Schrödinger era mais velho, tinha 39 anos em 1926.

As diferenças entre Schrödinger e Heisenberg iam muito além da idade. Schrödinger compartilhava a mesma crítica de Einstein: elétrons dando saltos quânticos dentro dos átomos era um disparate. No fundo, sua Mecânica Ondulatória era mais uma tentativa de incluir o *quantum* na Física Newtoniana. Heisenberg, ao contrário, era um jovem de espírito mais livre, sem âncoras ou preconceitos que o prendessem a um passado que não viveu. Não teve nenhuma dificuldade em aceitar o fato de o microcosmo ser radicalmente diferente de tudo o que era conhecido. Como Planck previra.

Novas leis deveriam ser descobertas para explicar como os elétrons transitam entre as órbitas atômicas, que descrevam como o estado de uma partícula evolui no tempo sem que se possa seguir a sua trajetória. Pode-se fazer várias medições consecutivas do estado quântico de um elétron atômico, mas é impossível saber o que acontece entre elas. O elétron não ocupa posições sucessivas e bem definidas ao longo do tempo, como um planeta girando em torno do Sol. Ele desaparece subitamente de uma órbita e surge imediatamente em outra. Não se sabe o que ocorre durante a transição, que dura um intervalo de tempo tão pequeno que não pode ser medido. No mundo microscópico não existe o conceito de trajetória.

Em um espetáculo de balé, às vezes as luzes se apagam por um breve intervalo, quando os bailarinos fazem uma “troca

rápida”. Quando as luzes são acesas novamente, aparecem vestidos com outro figurino. Tudo é muito rápido, e a plateia, naturalmente, não vê os bailarinos se trocarem. Os saltos quânticos são como uma troca ultra-rápida, em que a luz se apaga por um intervalo de tempo infinitamente pequeno.

Um outro conceito introduzido pela Física Quântica é o da imprevisibilidade, a negação do determinismo. Na escala atômica, os processos físicos, em geral, têm diversos desdobramentos possíveis. A Mecânica Quântica é a ferramenta que permite calcular a probabilidade de cada final possível. Analisando apenas um único evento, não é possível dizer o que acontecerá. Mas observando um número muito grande de eventos, pode-se determinar a probabilidade de cada resultado, e então comparar com o que a teoria prevê.

Essas ideias chocaram a maioria dos físicos, sobretudo os da velha guarda, incluindo Einstein. Mas a Mecânica Matricial de Heisenberg, aperfeiçoada por Max Born e Pascual Jordan, funcionava muito bem, reproduzia os resultados das observações experimentais com precisão. A matemática, bastante complicada, estava correta. Mesmo assim, o sentimento geral entre os físicos era de ceticismo. Abrir mão da capacidade de seguir continuamente a evolução de uma partícula no espaço e no tempo era pedir demais. Heisenberg, no entanto, conseguiu aliados importantes, como Niels Bohr e Paul Dirac.

Tanto a versão de Heisenberg como a de Schrödinger tinham como ponto de partida a dualidade onda-partícula. Heisenberg desenvolveu sua teoria tratando os elétrons como fossem partículas e se baseou na impossibilidade de seguir as suas trajetórias dentro do átomo. A Mecânica Ondulatória de Schrödinger, por outro lado, era uma teoria muito mais palatável, com uma matemática mais simples, mais elegante e intuitiva. Sua teoria se baseia no fato de qualquer partícula poder se comportar como onda. Apesar de tomarem cami-

nhos muito diferentes, Heisenberg e Schrödinger chegaram ao mesmo lugar: as duas teorias funcionavam igualmente bem. Ondas eram bem conhecidas há muito tempo, se propagam pelo espaço continuamente, e assim seria possível lidar com os fenômenos quânticos sem abrir mão da continuidade. Na visão de Schrödinger, a Natureza não daria saltos.

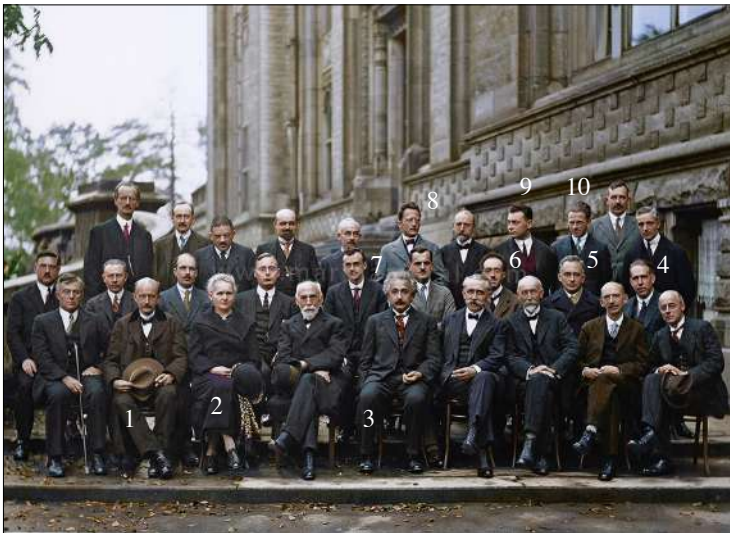
Schrödinger imaginava os elétrons como ondas estacionárias dentro dos átomos, como as das cordas de um violão. Seriam as “ondas de matéria” de de Broglie. A teoria ondulatória reproduzia as linhas espectrais com precisão, embora não explicasse como os elétrons passam de uma órbita à outra. O importante para Schrödinger é que ondas são coisas contínuas, e a teoria poderia ser complementada posteriormente com uma explicação para a transição dos elétrons entre as camadas atômicas. Por que então dar atenção a Heisenberg e suas maluquices, se Schrödinger oferecia uma alternativa tão mais interessante?

Na disputa entre as duas teorias da Mecânica Quântica não houve vencedores e vencidos. Pode parecer contraditório que duas teorias muito diferentes fornecessem os mesmos resultados. Mas logo ficou provado que ambas são matematicamente equivalentes. Como eu disse antes, a grande disputa se deslocou para o significado da teoria quântica. O que eram as ondas de Schrödinger? A Natureza dá saltos? Como interpretar as muitas novidades introduzidas pela teoria quântica?

Nessa disputa surge um personagem inesperado: o belga Ernest Solvay, um tipo raríssimo de empresário, infelizmente. Solvay fez fortuna com a indústria química, usando um processo inventado por ele mesmo. Gastou boa parte da sua riqueza financiando obras sociais, patrocinando artistas e cientistas. Solvay tinha grande atração pela Física. Em 1910, ele contactou um dos físicos mais respeitados, o progressista Hen-

drik Lorentz. Solvay propôs a Lorentz organizar um encontro científico reunindo os físicos mais importantes, com o objetivo de discutir a natureza dos novos fenômenos. A reunião aconteceu no ano seguinte, em Bruxelas. Posteriormente, outras reuniões semelhantes foram organizadas. Ficaram conhecidas como as conferências Solvay.

A quinta conferência Solvay ocorreu em 1927. De todas, foi a conferência mais notável, talvez a mais importante na história da Física. Seu tema: a nova teoria quântica e seu significado. Dentre os participantes havia apenas uma mulher, Marie Curie. No início, os conferencistas se dividiram em dois campos. De um lado, os jovens revolucionários, Heisenberg, Pauli e Dirac, apoiados vivamente por Max Born e Bohr. Do outro, Schrödinger, Einstein e de Broglie.



<https://marinamaral.com/portfolio/solvay-conference/>

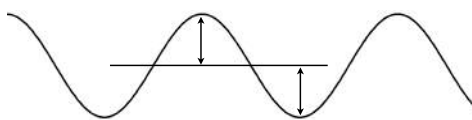
Os participantes da Conferência Solvay de 1927. Planck (1), Mme. Curie (2), Einstein (3), Bohr (4), Born (5), de Broglie (6), Dirac (7), Schrödinger (8), Pauli (9) e Heisenberg (10).

Durante todo o encontro, Bohr e Einstein travaram um duelo memorável. No jantar, todos se reuniam em torno da mesa onde Einstein desafiava Bohr e os jovens com um experimento mental que parecia ser o golpe fatal. No café da manhã, todos se reuniam novamente em torno da mesa de Einstein, ansiosos para ouvir a réplica de Bohr. Ele sempre tinha uma resposta que desmontava os argumentos de Einstein. Ao final da conferência, muitos se convenceram de que a interpretação correta da Mecânica Quântica era a dos jovens e de Max Born, defendida magnificamente por Bohr. Einstein, Schrödinger e de Broglie, no entanto, permaneceram fiéis às suas próprias ideias. Antes do final da década, a Mecânica Quântica tomara sua forma final, que usamos até hoje. Não houve vencidos: equação de Schrödinger é a equação fundamental da Mecânica Quântica, seguindo, porém, a interpretação de Born, Bohr e dos jovens revolucionários. É o que aprendemos hoje nos cursos universitários.

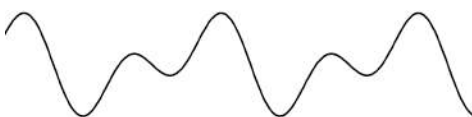
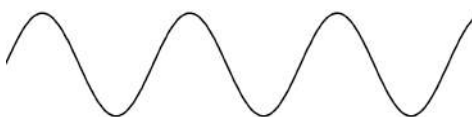
Eis a principal – e fundamental – diferença entre a interpretação de Schrödinger e a de Born. Schrödinger achava que as ondas *eram* as próprias partículas, coisas reais e não uma mera solução matemática da sua equação. As partículas, portanto, poderiam ser seguidas continuamente no espaço e no tempo. Para Born, a onda era apenas uma ferramenta para calcular probabilidades, como a de a partícula ser encontrada em uma região específica, ou a direção de voo de um elétron depois de colidir com outro elétron ou com um fóton. As ondas de Schrödinger transportavam matéria e energia, as de Born, apenas informação. A interpretação de Born, por fim, prevaleceu.

Pense nas ondas da Mecânica Quântica como *ondas de probabilidade*. Não *são* e nem substituem as partículas, mas contém toda a informação disponível sobre elas. A cada sistema quântico – um elétron ou um fóton, por exemplo – está associada uma função matemática, a onda de probabilidade,

que permite calcular a probabilidade de o sistema evoluir em determinada direção. Quando duas partículas se chocam, suas ondas de probabilidade se superpõem e se misturam, como num choque de duas ondas quaisquer. A superposição das ondas determina os destinos possíveis de cada partícula após a colisão. Ondas de probabilidade que se superpõem são um aspecto crucial na Mecânica Quântica.



Quando duas ondas ocupam, ao mesmo tempo, a mesma região do espaço, suas amplitudes em cada ponto se somam.



A onda resultante é, em geral, muito diferente das ondas originais.

Superposição de ondas. A amplitude de uma onda é a altura do pico (ou a profundidade do vale). Quando os picos e vales de duas ondas não coincidem, elas estão defasadas. Na superposição, a amplitude da onda resultante é a soma das amplitudes de cada onda em cada ponto.

A Física trata daquilo que pode ser medido. Toda teoria física deve ser capaz de fazer previsões que possam ser testadas em algum tipo de experimento. A Teoria da Relatividade Geral, por exemplo, faz diversas previsões, como desvios na trajetória da luz devido à curvatura do espaço-tempo, on-

das e lentes gravitacionais, a anomalia na órbita de Mercúrio etc.. Nos últimos 100 anos, todas as previsões foram testadas exaustivamente e confirmadas, e por isso a Relatividade Geral é aceita como a teoria correta da gravitação. Mas se em algum momento surgir uma falha, uma observação astronômica que não possa ser reproduzida pela Relatividade, teremos que buscar uma nova teoria, mais abrangente, que tenha a Relatividade Geral como um limite, assim como a Mecânica de Newton é um limite da Mecânica Quântica.

Observar algum sistema físico significa fazer algum tipo de medição sobre ele, o que implica alguma forma de interação que, de uma maneira ou de outra, sempre afeta o objeto medido. Em sistemas macroscópicos, esse fato quase sempre pode ser ignorado. Os radares, por exemplo, emitem sinais que são refletidos quando atingem um avião, retornando ao ponto de origem. Medindo o tempo total de propagação do sinal, e sabendo a direção em que ele foi emitido, determina-se a posição do avião. Os sinais de radar, obviamente, têm energia muito pequena comparada com a massa de um avião, de forma que seu impacto é imperceptível. O avião segue sua rota sem alteração. Mas em sistemas microscópicos, a observação pode ter um impacto considerável.

Imagine um radar em miniatura que seja capaz de emitir um único fóton de cada vez. Esse instrumento hipotético poderia ser usado para determinar a posição de um elétron, assim como os radares comuns fazem com os aviões. Nenhuma outra forma de interação teria menor impacto sobre o elétron. Mesmo assim, o fóton precisaria ter muita energia, comparável à massa de um elétron para poder “enxergá-lo”. Ocorre, no entanto, que o elétron é uma partícula muito leve, e a colisão com o fóton alteraria radicalmente o seu estado quântico. Ele seria lançado em uma direção aleatória e sua velocidade seria bastante alterada. Podemos calcular a probabilidade de cada

caminho possível, mas não há como determinar de antemão a direção e a velocidade do elétron após a colisão.

Para medir velocidade de qualquer objeto é preciso determinar a sua posição em dois instantes consecutivos. Isso significa que o micro radar deveria enviar outro fóton para realizar uma segunda medição. Mas em que direção o segundo fóton deveria ser lançado se não sabemos para onde o elétron foi lançado após a colisão com o primeiro fóton? Além disso, a colisão com o primeiro fóton mudaria completamente a velocidade do elétron, e assim seria impossível medir seu valor. Em resumo, se a posição do elétron for determinada com exatidão, nada se saberá sobre a sua velocidade, e vice-versa.

Heisenberg usou esse exemplo para ilustrar o que ficou conhecido como o *Princípio de Incerteza*, que implica um limite na capacidade de observação da Natureza. Se o experimento com o radar de Heisenberg fosse repetido muitas vezes, em cada uma o elétron tomaria uma direção diferente, com energia também diferente. Poderíamos instalar instrumentos que detectassem os elétrons depois das colisões, e assim seria possível determinar a frequência com que ele toma cada um dos caminhos possíveis. Mas analisando uma única colisão, é impossível prever a direção que o elétron tomará.

O Princípio de Incerteza está diretamente ligado à dualidade onda-partícula. Não implica apenas em uma limitação na capacidade de medir simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula. Trata-se, na verdade, de uma característica intrínseca a qualquer fenômeno ondulatório. Obviamente, os efeitos da Princípio de Incerteza não são notados no dia a dia, mas nas escalas atômicas torna-se um obstáculo intransponível. A tecnologia está em constante evolução, mas nunca será suficiente. Essa é uma limitação física.

O Sol vai se pôr logo mais, e amanhã de manhã brilhará novamente no céu. Obviamente não precisamos seguir o Sol continuamente para saber disso. Tampouco precisamos olhar a Lua para constatar que ela continua na sua órbita. Ambos existem mesmo que não estejamos olhando para eles. Essa certeza, no entanto, desaparece no mundo quântico. O debate sobre a interpretação da Mecânica Quântica envolveu a definição do que é realidade no microcosmo. Einstein e Schrödinger achavam que os sistemas quânticos estão sempre em um estado bem definido, mesmo que não estejam sendo observados em algum tipo de experimento. Bohr e Heisenberg, por outro lado, defendiam o ponto de vista de que pode-se fazer uma sequência de medidas em um sistema quântico, e em cada uma determinar o seu estado, mas entre duas medições, o sistema quântico não se encontra em um estado bem definido. Nada pode ser afirmado sobre o que ocorre com o sistema entre duas medições. Assim, não faria sentido a pergunta “O que acontece com o elétron *durante* a transição entre duas órbitas em um átomo?”.

Os físicos são pragmáticos, fazem cálculos com a Mecânica Quântica e usam os resultados nas mais diversas aplicações, sem se preocupar com o que acontece com um sistema quântico entre duas observações consecutivas. Desde Bohr e Einstein, outras formas de interpretar a Mecânica Quântica foram propostas, e todas chegam ao mesmo lugar. Mas para os não especialistas, a beleza não está nos números, e sim nas ideias.

Vamos revisitar o experimento da dupla fenda, que pode ser uma espécie de síntese das ideias centrais da Mecânica Quântica. Um feixe de fótons, ou de elétrons, é lançado sobre um anteparo. Se há apenas uma pequena abertura, no anteparo, do outro lado aparecem ondas de probabilidade difratadas, como as ondas que passam do Atlântico ao Mediterrâneo pelo estreito de Gibraltar. Se há duas pequenas aberturas, as

ondas difratadas oriundas de cada uma interferem. Se em algum ponto após o anteparo o registro da passagem dos elétrons ou fótons é feito em um filme fotográfico, veremos uma sucessão de claros e escuros, correspondendo às regiões onde há mais ou menos partículas detectadas, ou, seja, as regiões onde as probabilidades se somam ou se subtraem.

Elétrons são produzidos individualmente, como partículas, e assim são detectados. Cada um deixa um pontinho marcado no no filme fotográfico. Como não há informação sobre os elétrons (nenhuma medição é feita) entre a produção (antes do anteparo) e a detecção (depois do anteparo), não se sabe por qual das duas fendas cada um passou. Pode-se argumentar que o comportamento ondulatório observado na experimento da dupla fenda seja um efeito estatístico que resultaria da interação entre os muitos elétrons ou fótons do feixe. Mas a partir dos anos 1960, a tecnologia permitiu realizar experimentos não com feixes, mas com apenas um único elétron emitido por vez. Assim, cada elétron lançado sobre o anteparo é um evento independente e não há possibilidade de nenhum efeito coletivo. Depois de algum tempo, muitos elétrons foram lançados, um a um. No detector, observa-se o padrão usual de interferência.

A dualidade onda-partícula é uma propriedade intrínseca das partículas subatômicas. Sem nenhuma informação adicional, um elétron tem a mesma probabilidade de passar por qualquer uma das fendas. A interferência surge devido à interação dos elétrons com o aparato experimental e reflete o desconhecimento da evolução de cada partícula.

Mas podemos fazer um outro tipo de experimento de dupla fenda. Imediatamente após uma das fendas, instalemos um detector que sinaliza quando um elétron passa por ela. Sabe-se assim por que fenda o elétron passou. Veremos, ao final da passagem de muitos elétrons, que tendo essa informação adicional, os elétrons se comportam como uma partícula clássica.

No filme fotográfico não haverá nenhum sinal de interferência, destruída pela informação obtida pelo detector instalado em uma das fendas. A interferência depende de estarmos ou não “olhando”. Assim é a Mecânica Quântica, estranha, misteriosa e bela.

Capítulo 7

Quarks e Léptons

O final dos anos 1960 foi muito intenso. Um tsunami de movimentos libertários, anticoloniais, pacifistas, feministas, de resistência às ditaduras, de direitos civis varreu o mundo ocidental. Nos EUA, o movimento feminista, a luta da população negra por igualdade de direitos civis e a oposição à guerra do Vietnam envolveram milhões de pessoas e sacudiram as estruturas do país. Foi a época da contracultura, do movimento hippie e dos grandes festivais de rock. O mundo vivia em um estado de ebulição, e a Física não passou incólume. Na Califórnia, foi realizado um experimento semelhante ao de Rutherford, com resultado também semelhante. A existência de uma nova camada na estrutura da matéria foi revelada: os quarks.

A descoberta dos quarks inaugurou uma nova era na Física ao mostrar que prótons e nêutrons não são partículas elementares. Ao contrário, o interior dessas partículas é bastante complexo. Prótons e nêutrons são feitos de partículas ainda menores, os quarks, com propriedades nunca antes imaginadas. Como sou um físico experimental, gosto de afirmar que a descoberta dos quarks marcou o início da era contemporânea

na Física de Partículas. Outros provavelmente não concordarão. O que importa é que os quarks formam a camada mais profunda da estrutura da matéria, a camada onde estamos atualmente.

A transição entre a era moderna (1927-1968) e a contemporânea marcou o fim de um paradigma. Ao longo da era moderna, os experimentos estavam sempre à frente das teorias. Novos fenômenos eram descobertos, alguns de forma acidental, e os físicos teóricos tentavam desenvolver teorias que os explicassem. Com poucas e notáveis exceções, os resultados experimentais via de regra precediam as teorias que os explicariam. Ao longo dos anos 1960, no entanto, a ordem se inverteu. Desde então, os físicos teóricos fazem previsões e os experimentos são construídos para testá-las.

Há uma razão básica para essa mudança. No final da década de 1960 e início dos anos 1970, houve um avanço significativo na teoria que levaria ao Modelo Padrão, nossa melhor e mais precisa teoria da estrutura da matéria. Os teóricos se deram conta de que deveria haver seis tipos diferentes de quarks. Isso ocorreu logo após a confirmação de que os quarks são partículas reais. Descobriu-se também que as diferentes forças da Natureza poderiam se encaixar em um mesmo arcabouço matemático, e isso implicava a existência de novas partículas.

Assim, os experimentais tinham agora novas partículas para procurar. Estudar a matéria em escalas cada vez menores requer mais tecnologia e investimento. Os experimentos se tornaram cada vez maiores, mais sofisticados e mais caros. Para conseguir financiamento, é necessário ter uma boa justificativa teórica. Hoje em dia chegamos à era da precisão, onde cada pequeno passo adiante demanda um imenso esforço. Alguns experimentos atuais chegam a envolver milhares de pesquisadores, engenheiros, técnicos e pessoal de apoio administra-

tivo. São trabalhadores vinculados a instituições em dezenas de países. Os projetos levam dez, vinte anos entre a prancheta e o início da operação, e precisam ser atualizados a cada quatro ou cinco anos.

O modelo de grandes colaborações internacionais é dominante e não se restringe à Física. Redes colaborativas de pesquisadores de todas as áreas são formadas ao redor do mundo. É a forma como a Ciência contemporânea funciona em um mundo cada vez mais conectado, onde a fronteira do conhecimento está pulverizada em muitas áreas distintas. As descobertas acidentais tornam-se cada vez mais raras.

Durante boa parte da era moderna, os experimentos eram feitos por poucas pessoas, frequentemente por um só pesquisador (só recentemente a Ciência deixou de ser uma atividade essencialmente masculina). Os experimentos eram pequenos e, via de regra, cabiam em cima de uma mesa. Não havia uma divisão nítida entre teóricos e experimentais, como temos hoje. O volume e a diversidade do conhecimento, assim como a complexidade dos experimentos, eram muito menores nas primeiras décadas do século XX, quando pesquisadores arriscavam suas vidas subindo em balões, ou expondo-se continuamente à radiação. Pode-se dizer que aqueles foram os tempos heroicos da Ciência, a era romântica, quando a Física estava mais próxima da Arte. Na era contemporânea, está mais próxima da indústria. Ainda assim, a Ciência continua movida pela curiosidade.

Como se sabe, nas primeiras décadas do século XX a presença feminina na Ciência era reduzidíssima. Essa situação vem mudando ao longo dos últimos 100 anos, lentamente durante a maior parte desse período, e de forma acelerada mais recentemente. Nos cursos universitários de Física, Química, Biologia, há muitas professoras e alunas, embora a Ciência ainda seja uma atividade majoritariamente masculina. Atual-

mente, muitas instituições adotam ações afirmativas para reverter esse quadro.

Em meados dos anos 1950, os aceleradores de partículas entraram em cena. Desde então, são utilizados para produzir pontas de prova com muita energia e de forma controlada. Os aceleradores são instrumentos altamente sofisticados, mas o princípio de funcionamento é relativamente simples: dentro de um tubo onde há um alto vácuo, campos elétricos aceleram as partículas carregadas e campos magnéticos as mantêm na trajetória desejada. Durante uma década, novas partículas foram descobertas quase que semanalmente. Por volta da metade dos anos 1960, mais de cem haviam sido identificadas. Na virada do século XIX para o XX, o grande número de elementos químicos sugeria que os átomos talvez não fossem elementares. A história se repetiu: a profusão de partículas levou os físicos a suspeitar que talvez houvesse uma estrutura mais fundamental.

O ano de 1964 é de triste lembrança para a democracia brasileira, mas para a Física foi um ano magnífico. Duas das mais importantes descobertas do século XX, sobre as quais falarei mais à frente, ocorreram naquele ano. No mesmo ano e de forma independente, Murray Gell-Mann e George Zweig propuseram um modelo para classificar as inúmeras partículas. A ideia central era um tanto exótica, mas o fato é que funcionava muito bem. O modelo se baseia na hipótese de que prótons e nêutrons, bem como a maioria das outras partículas então conhecidas, são compostas por combinações de três “entidades” as quais Gell-Mann chamou de *quarks*.

Os físicos amam simetrias, não só por uma questão estética. Na Física, a ideia de simetria não se limita ao aspecto usual da geometria, é um conceito mais abstrato, que se aplica a certas operações matemáticas que podem ser feitas sobre as equações

sem alterar sua forma nem os seus resultados. Em 1918, a matemática alemã Emmy Noether demonstrou que as simetrias têm implicações profundas. Rotações e translações, por exemplo, estão associadas a leis de conservação do momento linear e angular. Gell-Mann e Zweig usaram as simetrias matemáticas da teoria de grupos para criar um esquema em que a grande maioria das partículas conhecidas se encaixavam, e que continua a ser usado até hoje. O esquema ficou conhecido como o modelo a quarks. Gell-Mann e Zweig postularam a existência de três entidades, a que chamaram *quarks*. As partículas seriam combinações dos três tipos de quarks e foram classificadas em “famílias”, de acordo com certas propriedades que elas têm em comum.

Os quarks imaginados por Gell-Mann e Zweig eram objetos muito estranhos, a começar pela carga elétrica. Até então, a carga elétrica do elétron era considerada o *quantum* de carga, a sua menor e mais fundamental unidade. Todas as partículas carregadas que podem ser observadas diretamente têm cargas que são ou iguais ou múltiplos inteiros da carga do elétron. Mas para o modelo de classificação funcionar, os quarks deveriam ter cargas elétricas que seriam *apenas frações* da carga do elétron.

Outra característica um tanto bizarra era o fato de os quarks não poderem ser observados diretamente. Não poderiam se propagar livremente pelo espaço, como elétrons ou prótons. Os quarks estariam sempre confinados no interior de prótons, nêutrons e outras partículas similares.

A princípio, a existência de partículas com propriedades tão exóticas não era levada muito a sério. Não poderiam ser partículas reais. Até mesmo Gell-Mann e Zweig consideravam os quarks como “pecinhas de lego matemáticas”, um artifício que, por alguma razão, funcionava bem. E então veio 1968. Para surpresa de muitos, uma versão moderna do expe-

rimento de Rutherford realizada na Califórnia demonstrou que prótons e nêutrons não são partículas elementares. Dentro deles encontram-se os quarks. Longe de serem apenas entidades matemáticas abstratas, os quarks são partículas reais, ainda que não possam ser observadas diretamente.

Quando minha filha era pequena, íamos muito à praia. Um dia, eu disse a ela que iria inventar um martelo muito potente, capaz de dividir um grãozinho de areia ao meio. O martelo seria tão potente que poderia dividir cada metade do grão de areia ao meio novamente, depois cada nova metade em duas partes etc.. E aí perguntava a ela se eu poderia dividir o grão de areia indefinidamente. A resposta de uma criança a essa pergunta fundamental, por incrível que pareça, é igual à dos cientistas: não sabemos ao certo quando chegaríamos ao limite.

A palavra *partícula* remete à noção intuitiva de uma pequena porção de matéria sólida. O diminutivo sugere o tamanho: uma partícula seria algo possível de se ver se tivermos um microscópio muito potente, como se fossem minúsculas bolinhas de bilhar, com uma superfície bem delimitada separando o seu interior do exterior. Partículas sub-atômicas são muito diferentes do que sugere o senso comum. Elas podem ser *elementares*, como os elétrons e os quarks ou *compostas*, como prótons e nêutrons. Mas são todas muito, muito pequenas. As partículas compostas ocupam um certo volume no espaço, suficiente para que se possa atribuir-lhes um “tamanho”. A razão das aspas é que prótons e nêutrons, apesar de ocuparem um volume finito, não têm uma forma bem definida, são mais parecidos com nuvens muito densas, com limites difusos e irregulares. Ocupam um volume entre 10 e 100 vezes menor que os núcleos atômicos. São de fato muito pequenas. Talvez nunca seja possível registrar uma imagem real de um próton.

As partículas elementares, por sua vez, são tão pequenas que sequer é possível medir seu tamanho, pelo menos com a tecnologia de que dispomos. Atualmente, o menor tamanho medido é da ordem de 0,000.000.000.000.000.001 cm. Se porventura as partículas elementares tiverem um volume, suas dimensões serão inferiores a esse valor. Há teorias sobre o que poderia existir além desse limite, mas o fato é que nada sabemos ainda. Supõe-se que as partículas elementares não tenham um conteúdo, nenhuma estrutura interna, e que sejam indivisíveis. Daí decorre o adjetivo “elementar”. Para todos os efeitos práticos, são “pontinhos de matéria”. Os elétrons são as partículas elementares mais conhecidas, mas, além dos quarks há outras, como os *neutrinos*, os *múons* e os *taus*.

Prótons e nêutrons são como minúsculas miniaturas de átomos, não com um, e sim com três “núcleos”, os quarks de Gell-Mann e Zweig. Cada quark dentro dos prótons e nêutrons é cercado por uma nuvem de partículas virtuais, que têm uma existência tão efêmera que só se observa seu efeito global. Hoje sabemos que existem seis tipos de quarks, mas bastam dois, os quarks do tipo *u* e *d*, para compor os prótons e nêutrons, e portanto toda matéria visível do Universo. Os outros quatro tipos de quarks são bem mais pesados e instáveis. Desintegram-se espontaneamente com uma meia-vida muito pequena numa sequência que invariavelmente termina em um quark *u* ou *d*.

Toda a matéria que vemos no Universo é feita de átomos. Cerca de 75% da massa da matéria visível corresponde aos átomos de hidrogênio, feitos de um único próton e um único elétron. Em seguida vêm os átomos de hélio, respondendo por aproximadamente 24%. Os restantes 92 elementos que ocorrem naturalmente, como o carbono, o oxigênio, alumínio, ferro etc. correspondem, juntos, a cerca de 1% do total. Há um átomo diferente para cada elemento químico, mas todos eles são feitos do mesmo material: prótons, nêutrons e elétrons. É realmente incrível que toda a diversidade da Natureza, da

multiplicidade dos seres vivos aos incontáveis planetas e estrelas, seja feita a partir de apenas três elementos: os quarks u e d e o elétron. Com esses constituintes fundamentais, a matéria pode se organizar de infinitas maneiras.

Frequentemente se confunde massa com peso ou com quantidade de matéria. Embora esteja relacionada a ambos, massa não é nem um nem outro. Peso é o efeito que sentimos devido à gravidade. Na Lua, os astronautas são mais leves porque lá a gravidade é menor que a da Terra. A quantidade de matéria, por sua vez, nada mais é do que o número total de átomos de um corpo. Quanto mais átomos, mais matéria.

A massa é outra coisa, é a propriedade dos corpos que define como eles reagem quando são submetidos a alguma força. É uma medida da *inércia*, ou seja, a resistência que os corpos oferecem para sair ou voltar ao repouso, ou então reduzir ou aumentar a velocidade. Quando uma força é aplicada a um corpo, a sua massa determina a aceleração que ele terá. Forças de mesma intensidade aplicadas a corpos com massas diferentes produzirão acelerações diferentes. A força necessária para empurrar um velocípede com uma criança não é suficiente para deslocar um ônibus.

As partículas elementares também têm massa. Não podemos, claro, medi-las diretamente, não podemos medir nem mesmo as massas das partículas compostas, mas há formas indiretas de fazer isso. Estudam-se as propriedades das partículas provocando violentas colisões entre elas, o que é feito com aceleradores, como o LHC, do CERN, na Suíça. As colisões entre partículas elementares revelam as forças que governam o microcosmo. É a técnica básica, herdada do experimento de Rutherford, que desvendou a estrutura dos átomos. Também foi assim que a estrutura dos núcleos, e posteriormente a dos prótons e nêutrons foi desvendada graças ao que sabemos do

microcosmo. Aprendemos muito sobre o Universo primordial, sobre a fonte de energia e a evolução das estrelas graças ao conhecimento sobre o microcosmo. Talvez em um futuro não muito distante seja possível saber se os elétrons e os quarks também têm uma estrutura interna, se no seu interior há partículas ainda mais elementares.

A origem da massa dos prótons e dos nêutrons é bastante intrigante. Em geral, o todo é igual à soma das partes. A massa de uma caixa de ovos é igual à soma das massas dos ovos e da caixa que os contém. Com as partículas subatômicas não é bem assim. Prótons são feitos de dois quarks u e um quark d . Somando as massas dos três quarks, chega-se a um resultado surpreendente: o total corresponde a apenas 1% da massa do próton. De onde vêm os outros 99%?

Uma das principais consequências da Teoria da Relatividade é a equivalência entre massa e energia. Uma pode se transformar na outra. Pois bem, os quarks estão eternamente aprisionados no interior das partículas compostas. Nunca se propagam livremente, como um elétron. Eles permanecem ligados entre si por um poderoso campo de forças, e é justamente a energia de ligação entre os três quarks, armazenada nesse campo de forças, a responsável por quase toda a massa de um próton ou um nêutron. Se massa e energia são equivalentes, energia também possui inércia. A massa de prótons e nêutrons, bem como a de todas as partículas compostas, não vem da matéria que existe dentro delas, e sim da energia que as mantém coesas.

Os nêutrons são ligeiramente mais pesados que os prótons. Quando estão dentro do núcleo, os nêutrons são estáveis (com algumas poucas exceções), mas se tornam instáveis quando se propagam livremente no vácuo, têm uma vida média de aproximadamente 15 minutos. Isso significa que um feixe de nêutrons se propagando livremente pelo espaço estaria redu-

zido a 0.000.000.000.001% depois de duas horas. Sempre decaem em um próton, um elétron e um neutrino.

Os prótons pertencem à família dos *bárions*, partículas feitas de combinações de três quarks. Os prótons são as partículas mais leves da sua classe, e por isso são os únicos estáveis. Prótons são eternos. Claro, podem ser destruídos em colisões violentas com outras partículas. Nesse caso, outros bárions são criados. No entanto, se esperarmos tempo suficiente, os bárions que surgem dessas colisões vão se desintegrar espontaneamente em uma cadeia que termina invariavelmente nos prótons. Um próton produzido nos primeiros segundos do Universo primordial e que tenha capturado um elétron, formando um átomo de hidrogênio, estará nesse momento vagando em alguma parte do espaço sideral, talvez fazendo parte de uma estrela, de um cometa ou mesmo dos nossos corpos.

A Mecânica Quântica foi criada pela necessidade de entender o que se passa dentro de um átomo. Os elétrons atômicos são muito rápidos, mas pode-se dizer que estão quase parados se comparados à velocidade da luz. A Mecânica Quântica dava conta de tudo o que era conhecido, pois situações em que a velocidade das partículas fosse próxima à da luz ainda não haviam sido observadas. Embora não houvesse nenhum desacordo com os resultados experimentais disponíveis, havia um conflito conceitual com a Relatividade Especial. Todas as teorias físicas devem obedecer os princípios estabelecidos pela Teoria da Relatividade, inclusive a Mecânica Quântica. As leis da Física não devem depender de quem observa. Quando a velocidade das partículas se aproxima da velocidade da luz, a Mecânica Quântica deixa de cumprir esse requisito. É uma teoria não relativística.

A incompatibilidade não durou muito. Foi resolvida em 1927 por Paul Dirac, um dos físicos mais geniais do século

passado. Há quem o considere ainda mais brilhante que Einstein. Dirac faz parte de uma geração de gênios: Wolfgang Pauli nasceu em 1900, Heisenberg em 1901 e Dirac em 1902. Tinha apenas 25 anos quando reuniu a Mecânica Quântica e a Relatividade em uma única teoria. Ele encarnava o estereótipo do físico, “um sujeito meio esquisitão”: calado, muito circunspeto e extremamente analítico (nesse aspecto, era um pouco parecido com o dr. Spock, da série *Star Trek*). Foi Dirac quem demonstrou que Schrödinger e Heisenberg diziam coisas iguais de maneiras diferentes.

A união da teoria quântica com a Relatividade teve uma consequência totalmente inesperada, revelou algo jamais imaginado. Dirac desenvolveu uma equação de onda que tinha a mesma forma e dava os mesmos resultados para qualquer observador, independente do seu movimento. Sua equação tinha quatro soluções, duas das quais representavam elétrons com energia positiva se propagando do passado para o futuro, como tudo o que conhecemos. As outras duas soluções representavam *elétrons com energia negativa se propagando do futuro para o passado!*

Eram tempos em que os físicos ainda tentavam digerir a Mecânica Quântica e assimilar os seus estranhos conceitos, como a imprevisibilidade e o comportamento ambivalente da luz e das partículas subatômicas. Aceitar a existência de partículas com energia negativa se propagando em direção ao passado era pedir demais. Assim, quando Dirac publicou sua teoria, poucos deram importância a essa previsão bastante exótica.

Dirac sabia que não se podia descartar as soluções com energia negativa. Era preciso descobrir o que elas representavam. É verdade que energia negativa não faz nenhum sentido, e nada viaja para o passado. Ocorre que, do ponto de vista matemático, uma partícula com *carga elétrica e energia nega-*

tivas viajando para o passado, equivale à uma partícula com carga elétrica e energia positivas viajando no sentido usual do tempo. Bastava apenas inverter a carga do elétron para que as soluções com energia negativa às soluções com energia positiva. Ou seja, *elétrons com carga positiva* também deveriam existir. Pela primeira vez a existência de uma nova partícula foi prevista por uma teoria. Assim veio à luz a antimatéria, inicialmente apenas como uma possibilidade teórica. Mas na Natureza, se algum processo pode ocorrer, se não há nenhuma lei que o proíba, então em algum momento ele vai acontecer.

Cinco anos se passaram até que, nos EUA, outro jovem, Carl Anderson, entrou para a História. Tinha 25 anos quando descobriu o antielétron previsto por Dirac, o que rendeu o Prêmio Nobel tanto para ele como para Dirac. O espanto foi geral. Havia desde sempre um “mundo paralelo”, como uma imagem do mundo real em um espelho, um mundo cuja existência havia sido completamente ignorada até aquele momento, e que de repente havia sido revelada. Por conta própria, o editor da revista onde a descoberta do antielétron foi publicada batizou a nova partícula de *pósitron*, e assim ficou até hoje. A todas as partícula elementares corresponde uma antipartícula, mas o pósitron é a única antipartícula que tem um nome próprio.

Dirac deduziu a equação fundamental da versão relativística da Mecânica Quântica. A equação admite quatro soluções distintas, e por isso é a forma matemática adequada para representar um “elétron”, onde as aspas significam que o termo pode representar tanto um elétron como um pósitron. O *spin* do “elétron” (Capítulo 5), não depende da carga elétrica, pode estar em dois estados quânticos distintos, *up* e *down*. As quatro soluções da equação de Dirac correspondem, portanto, às quatro combinações possíveis de carga elétrica e *spin*.

A existência da antimatéria era um segredo que a Natureza guardava caprichosamente, esperando pacientemente para ser desvendado. Dificilmente os pósitrons teriam sido descobertos antes, pois para os fótons não há diferença entre a carga negativa e a positiva. Fótons interagem com elétrons e pósitrons exatamente da mesma maneira. Hoje sabemos que para toda partícula elementar há uma antipartícula, cópias idênticas umas das outras, exceto pelas cargas, que são opostas. O pósitron é igual em quase tudo a um elétron, difere apenas pela carga elétrica, que é positiva.

Antiprótons são compostos por dois antiquarks u e um antiquark d . Têm as mesmas propriedades dos prótons, exceto a carga elétrica, que é negativa. Juntos, um pósitron e um antipróton formam um antiátomo de hidrogênio. Recentemente, o experimento ALPHA, no CERN, com participação importante de físicos brasileiros, conseguiu isolar antiátomos de hidrogênio e estudá-los. Encontraram níveis de energia dos átomos e antiátomos de hidrogênio são os mesmos. Em 2023, mostraram que o anti-hidrogênio e hidrogênio são atraídos pela gravidade da mesma forma. Combinando dois antiátomos de hidrogênio com um antiátomo de oxigênio teríamos uma anti-molécula de água, com exatamente as mesmas propriedades da água que conhecemos. Como o fóton não distingue elétrons de pósitrons, a Química da antimatéria é idêntica à da matéria.

Assim é a antimatéria, que nada tem de misteriosa além do nome. A antimatéria é como um reflexo da matéria no espelho. Você e seu antivocê seriam idênticos, indistinguíveis fisicamente, mas um simples aperto de mão destruiria ambos. O encontro entre a matéria e a antimatéria resulta na aniquilação total das duas, transformando-as em energia pura. Mas não corremos o risco de nos aniquilarmos com o nosso anti-eu. Não existe um anti-Universo paralelo. Podemos afirmar com segurança que vivemos num Universo feito apenas de matéria. Não há indícios de antimatéria em nenhuma parte, e

esse é um dos grandes enigmas da Física: como isso aconteceu, onde está a antimatéria?

Hoje em dia, a antimatéria é criada rotineiramente nos laboratórios. Surgem como produto de violentas colisões entre partículas. Feixes de antimatéria (pósitrons e antiprótons) são produzidos e usados como pontas de prova. Numa colisão entre um próton e um antipróton ambos se desintegram, mas a energia não desaparece, apenas se transforma em outra coisa. Depois da colisão, a energia do próton e do antipróton ressurge na forma de outras partículas.

Nos aceleradores, a forma mais eficiente de aproveitar a energia usada para induzir as colisões é acelerar dois feixes de partículas (ou de antipartículas) em direções opostas e jogá-los um contra o outro. Isso é feito nos *anáis de colisão*. São dois longos tubos circulares e paralelos (os do LHC têm 27 quilômetros de extensão), com alto vácuo no seu interior, e cercados por magnetos que mantêm as partículas na trajetória correta. Dispositivos elétricos aceleram as partículas ao longo da sua trajetória, e quando os feixes atingem a energia desejada, a colisão frontal entre eles é provocada. As colisões, no entanto, são muito improváveis. Para compensar, cada feixe contém um número astronômico de partículas, tornando as colisões frequentes. No LHC, há 40 milhões de colisões a cada segundo.

Chegamos ao ponto em que é necessário falar um pouco sobre como a teoria quântica da matéria trata colisões entre partículas elementares. Eis a ideia central: a colisão entre duas partículas sempre envolve uma terceira, que atua como uma espécie de mensageira. Esse é o conceito moderno de *interação*, uma colisão sempre mediada por uma terceira partícula, que só existe durante o curtíssimo intervalo de tempo em que cada partícula sente a influência da outra. Na Física de Partículas,

é isso que queremos dizer com o termo “força”. Usamos indistintamente os dois termos, mas com mais frequência falamos mais de interação, pois força remete à ideia de contato físico entre as partículas, que como vimos, não acontece na realidade, é um apenas um efeito macroscópico.

Imagine um rinque de patinação, onde dois patinadores deslizam um em direção ao outro. Um deles carrega uma bola pesada. Quando estão bem próximos, o que tem a bola a arremessa com força para o outro, que a segura. O resultado é que a trajetória de ambos muda de direção mesmo que não tenha havido contato entre eles. Nesse exemplo, a interação seria *repulsiva*, como a colisão entre dois elétrons. Mas se em vez de uma bola os patinadores trocarem entre si uma espécie de geleca grudenta, eles podem seguir juntos após o encontro, e nesse caso a interação seria *atrativa*.

Existem três tipos de força conhecidos, as três formas distintas de as partículas elementares interagirem entre si. Apesar de atuarem apenas em escala microscópica, seus efeitos fazem parte do nosso dia a dia. Se alguma das três não existisse, não estaríamos aqui.

A interação eletromagnética é a mais conhecida de todas. Sua partícula mensageira é o fóton. Apenas partículas com carga elétrica, como elétrons e prótons, interagem dessa forma. Partículas neutras, como os nêutrons, não são afetadas. A força eletromagnética mantém os elétrons ligados aos núcleos nos interior dos átomos, formando estruturas estáveis. É também o tipo de interação que une os átomos nas ligações químicas. Sem a força eletromagnética não haveria matéria, o mundo seria feito apenas de partículas esparsas.

A carga elétrica é uma propriedade intrínseca que muitas partículas possuem, mas sua origem é desconhecida. Essa propriedade se manifesta de duas formas, batizadas de carga *positiva* e *negativa*. A força eletromagnética entre cargas posi-

tivas e negativas é atrativa, mas é repulsiva entre duas cargas positivas ou duas negativas. A intensidade da força cresce exponencialmente à medida que duas partículas carregadas se aproximam uma da outra. Quando elas se afastam, a intensidade diminui rapidamente, mas nunca chega exatamente a zero. A força eletromagnética tem longo alcance, podendo atuar em grandes distâncias.

A força eletromagnética está em toda parte. Lidamos com ela no nosso dia a dia, mesmo sem nos darmos conta. Estamos continuamente sob a ação de forças eletromagnéticas quando andamos, seguramos uma caneta, nos apoiamos sobre uma mesa, deitamos para dormir etc.. A aparente continuidade da matéria, como vimos, é apenas o efeito coletivo de um número gigantesco de átomos interagindo via força eletromagnética. Imagine duas superfícies muito planas e polidas. Vistas com um microscópio, o que a olho nu parece uma superfície perfeitamente plana é, na verdade, bastante rugosa, como uma cadeia de minúsculas montanhas e vales. Em um nível ainda mais microscópico, chegaremos à estrutura atômica de cada uma. O contato entre duas superfícies quaisquer resulta da interação eletromagnética entre os átomos das camadas mais externas de cada uma, que não chegam a se tocar. Quando apertamos a mão de alguém não há contato entre os átomos de cada pessoa.

Nos anos 1920, já se sabia da existência de um segundo tipo de interação, a chamada *força nuclear*, que mantém os prótons e nêutrons unidos nos núcleos atômicos. Imagine o núcleo de um átomo de chumbo, com 82 prótons comprimidos em uma região muito pequena. A força de repulsão elétrica entre os prótons é imensa, e deveria fazer o núcleo explodir imediatamente. Felizmente isso não acontece. A estabilidade dos núcleos é a prova de que existe um outro tipo de interação, inicialmente chamada *força nuclear*, de caráter atrativo e mais

intensa que a eletromagnética, de forma a contrabalançar a repulsão elétrica entre os prótons.

Em 1937, Ideki Yukawa, um físico japonês, propôs um modelo para representar a interação entre prótons e nêutrons dentro dos núcleos atômicos. Já se sabia naquela época que a força nuclear não “enxerga” a carga elétrica das partículas. Uma força de mesma intensidade atua sobre dois prótons, dois nêutrons ou um próton e um nêutron. Por isso, nos referimos aos prótons e nêutrons que formam os núcleos atômicos como *nucleons*, dois lados de uma mesma moeda. Na teoria de Yukawa, quando dois nucleons estão muito próximos, trocam entre si uma terceira partícula, que só existe durante o curtíssimo intervalo de tempo que dura a interação. A massa da terceira partícula é maior que a do elétron e menor que a do próton, e por isso Yukawa chamou-a de *méson*. A partícula de Yukawa, hoje conhecida como méson pi, foi descoberta em 1947, em um experimento do qual o brasileiro César Lattes, um dos fundadores do CBPF, teve participação decisiva. Seguindo as regras da academia sueca, apenas o líder do laboratório, Cecil Powell, foi premiado. Foi o mais próximo ao um Prêmio Nobel que um físico brasileiro chegou.

A ideia de Yukawa é a forma atual de representar todos os tipos conhecidos de interação entre as partículas elementares. Em uma linguagem moderna, quando duas partículas elementares colidem, trocam entre si um ou mais *quanta*. No caso da interação eletromagnética entre dois elétrons, os *quanta* trocados são os fótons. Assim, os fótons tanto podem ser partículas se propagando livre e eternamente, como um feixe de luz no espaço sideral, como partículas extremamente efêmeras, confinadas em uma região muito pequena em que ocorre a interação entre dois elétrons.

A leitora e o leitor atentos talvez tenham percebido que há uma sutileza na força entre os nucleons (prótons e nêutrons).

Os nucleons são partículas compostas, minúsculas nuvens ultradensas de quarks. O conceito de interação via troca de *quanta* se aplica apenas às partículas elementares. A força entre prótons e nêutrons, na verdade, resulta da *interação forte* (como a força nuclear passou a ser chamada) entre os quarks de cada um. De forma semelhante aos elétrons, que trocam fótons entre si, os quarks também trocam entre si uma terceira partícula, chamada *glúon*, que são os portadores da interação forte. Tal como os fótons, os glúons também são partículas sem massa, ou seja, *quanta* de pura energia. Dentro do núcleo, os nucleons estão tão próximos que suas “nuvens” se sobrepõem. Os quarks de um nucleon interagem com os quarks de outro nucleon. Isso funciona como uma cola super poderosa, capaz de suplantando a repulsão elétrica dentro do núcleo e manter os prótons e nêutrons coesos.

De uma certa forma, a força que mantém os nucleons unidos se assemelha à força eletromagnética entre átomos em certos tipos de ligações químicas. Nos átomos, os elétrons não se distribuem em torno do núcleo com uma simetria esférica perfeita, e isso gera um campo de força eletromagnética *residual*, mesmo que não haja uma carga elétrica líquida em cada átomo (o número de elétrons é sempre igual ao de prótons). Nos núcleos atômicos, a força entre os nucleons também é uma espécie de efeito residual, mas de natureza distinta. Dentro dos núcleos, é a interação forte que domina, a força eletromagnética é quase sempre irrelevante.

Essas duas forças têm uma característica básica em comum e outras que são completamente distintas. Em comum, elas têm o fato de serem mediadas por partículas sem massa, fótons e glúons. Mas ao contrário dos fótons, *os glúons não podem se propagar livremente*, só são encontrados no interior das partículas feitas de quarks. Os glúons, assim como os quarks, vivem eternamente aprisionados dentro dos nucleons. A interação forte é uma exclusividade dos quarks, e mantém

todos eles permanentemente ligados no interior das partículas compostas. Já a interação eletromagnética atua mesmo se a distância entre as partículas for grande.

Tanto na interação eletromagnética como na forte, a intensidade da força varia dependendo da distância entre as partículas. Mas as forças eletromagnética e forte têm um comportamento oposto: quando os quarks tentam se afastar uns dos outros, a intensidade da força atrativa se torna irresistível, trazendo-os de volta como se estivessem conectados a uma mola muito rígida. Átomos, por sua vez, existem por causa da força eletromagnética e por isso podem ser ionizados, ou seja, elétrons podem escapar da atração do núcleo quando fótons energéticos os atingem. Prótons não podem ser “ionizados”: nem os quarks nem os glúons podem escapar do interior das partículas que eles formam.

O terceiro e último tipo de interação conhecida tem uma intensidade muito fraca, e só atua em distâncias ainda menores que as da força forte. É chamada *força nuclear fraca*, ou simplesmente interação fraca. O termo “força nuclear” tem razões históricas, pois a primeira manifestação da interação fraca ocorreu dentro do núcleo atômico. É a força responsável pela desintegração espontânea do nêutron, que se transforma em um próton, um elétron (a radiação beta) e um neutrino. Sem a interação fraca as estrelas não brilhariam. A interação fraca atua também em outros decaimentos, sobre os quais vou falar mais adiante.

Existem três partículas que atuam como mediadoras das interações fracas. Duas possuem carga elétrica, o W^+ , W^- . A terceira, o Z^0 , é neutra. A elas vou me referir simplesmente como W e Z. Ao contrário de fótons, glúons, o W e o Z são partículas que têm massa, e não é pequena: são entre 80 e 90 vezes mais pesadas que um próton. Assim como os fótons, o W e o Z podem se propagar livremente, mas têm uma meia-

vida muito pequena e se desintegram rapidamente. Todas as partículas mediadoras – o fóton, os glúons, o W e o Z – recebem o pomposo nome de *bósons vetoriais*. São partículas elementares que “existem” durante o curtíssimo intervalo de tempo de um decaimento ou de uma colisão.

As partículas elementares podem ser divididas em dois grupos: *constituíntes* (quarks e léptons) e *mediadoras* (fóton, glúons, o W e o Z). Existem seis tipos de quarks. Em ordem crescente de massa, os quarks são o *up* (*u*), *down* (*d*), *strange* (*s*), *charm* (*c*), *beauty* (*b*) e *top* (*t*). Os quarks *u* e *d* são estáveis, mas os outros quatro vivem apenas uma ínfima fração de segundo. São produzidos em colisões muito energéticas e se desintegram espontaneamente logo em seguida, transformando-se nos quarks mais leves. A matéria ordinária é feita de prótons e nêutrons, que são compostos pelos quarks *u* e *d*. Assim, os três constituíntes elementares do Universo são os quarks *u* e *d* e o elétron. Tudo o que pode ser observado diretamente é feito desses três elementos.

Resumindo: todas as partículas elementares sofrem a ação da força fraca, trocando um W ou um Z entre si, mas apenas os quarks podem interagir via força forte, trocando glúons entre si. Os quarks têm carga elétrica e por isso podem interagir também pela força eletromagnética, trocando fótons, mesmo que suas cargas sejam apenas frações da carga do elétron. Os quarks, portanto, são as únicas partículas elementares que podem interagir de todas as formas conhecidas.

Assim como os quarks, existem seis léptons: o elétron, o múon e o tau, cada um acompanhado pelo seu respectivo neutrino. Mas as semelhanças com os quarks param por aqui. O tau e o múon são versões mais pesadas do elétron. O múon tem uma massa 200 vezes maior que o elétron. O tau é o mais pesado, sua massa é mais de três mil vezes maior que a do o

elétron. O múon e o tau são partículas instáveis, com uma vida média que é uma pequena fração de segundo.

Existe uma regra geral: as partículas mais pesadas se desintegram espontaneamente em uma sequência de etapas até chegar à mais leve de todas, que por essa razão é estável. O tau é bem mais pesado que os outros léptons, e por isso ele pode se desintegrar de muitas formas diferentes. Qualquer que seja o modo de decaimento dos múons e taus, no final da cadeia sempre haverá um elétron.

A Terra é bombardeada continuamente por raios cósmicos: prótons, fótons, neutrinos ou mesmo núcleos atômicos produzidos em algum lugar no espaço sideral. São mensageiros dos processos dramáticos que ocorrem no cosmo, como a morte das estrelas, ou a formação de buracos negros, entre outros, e podem ter energias altíssimas. Eles vêm de toda parte. Quando chegam à Terra, colidem com as moléculas de ar nas camadas superiores da atmosfera, produzindo milhares de partículas secundárias. Dentre elas, muitos múons, as únicas partículas que vivem o suficiente para chegar à superfície da Terra. Observatórios são construídos para detectar esses múons, e através deles podemos estudar os raios cósmicos.

Os neutrinos são um capítulo à parte. Eles podem ser um subproduto dos reatores nucleares, podem ser criados na atmosfera, quando raios cósmicos colidem com o ar, ou ainda no interior do Sol, onde são produzidos abundantemente. Há ainda os que vêm do espaço, produzidos por outras estrelas, e os que foram criados no Universo primordial. São extremamente leves (até recentemente, acreditava-se que não tivessem massa). Além disso, não têm carga elétrica, e por isso não podem interagir via força eletromagnética. Só resta aos neutrinos a interação fraca. Isso significa que a probabilidade de um neutrino interagir com a matéria é extremamente pequena.

Neutrinos podem atravessar a Terra sem deixar rastro. Por isso, a detecção dessas partículas é bastante desafiadora.

Os neutrinos são “monogâmicos”: cada neutrino só interage com seu lépton. O neutrino do elétron não interage nem com o múon, nem com o tau. O neutrino do múon não vê outro lépton que não seja o múon. O mesmo vale para o neutrino do tau. Essa relação de fidelidade, no entanto, só ocorre quando os neutrinos participam de algum tipo de reação. Durante o tempo em que viajam livremente pelo espaço, sem qualquer interação, eles têm a incrível capacidade de trocar de identidade espontaneamente. O neutrino do elétron, por exemplo, se transforma no neutrino do múon, volta a ser o neutrino do elétron, se transforma novamente no do múon etc. Essa oscilação na identidade dos neutrinos é um fenômeno puramente quântico, descoberto há cerca de dez anos.

Em 2012, uma descoberta ganhou as páginas dos jornais mundo afora. Apareceu inclusive no jornalzinho da creche do meu filho. No CERN, em um evento transmitido pela internet para o mundo, foi anunciada a descoberta do *bóson de Higgs*. A pompa era justificada, afinal a busca pelo bóson de Higgs era um dos principais objetivos do acelerador LHC, uma máquina que levou dez anos para ser construída, custando cerca de cinco bilhões de euros. O bóson de Higgs era a peça que faltava para certificar a melhor teoria que temos, o *Modelo Padrão* das partículas elementares, que em linhas muito gerais acabei de descrever.

Pode parecer um exagero gastar tantos recursos em uma máquina para comprovar uma teoria bastante abstrata sobre algo que não vemos. Foram milhares de físicos, engenheiros e técnicos altamente qualificados trabalhando por muito tempo em um só projeto. Mas assim é a Física e a Astronomia contemporâneas. O Observatório Espacial James Webb levou 30

anos para ser construído e custou 30 bilhões de dólares. Tanto o acelerador como o satélite ampliaram nosso conhecimento sobre Universo e a matéria, seja na menor ou na maior escala. É difícil precificar o conhecimento. Nas décadas de 1920-1930, alguém poderia perguntar qualquer um dos criadores de Mecânica Quântica que utilidade ela teria. A pergunta causaria espanto a resposta seria simples: “nenhuma, só queríamos entender como os átomos funcionam”. Mas como seria a vida moderna sem ela?

Vendo por outro lado, todas as peças necessárias para a construção do acelerador foram encomendadas às empresas dos países membros, gerando renda, emprego e desenvolvimento tecnológico, com inovações em várias áreas e formação de mão de obra especializada. Os recursos retornam aos países que investiram no projeto LHC, e movimentam um setor estratégico para qualquer nação. No fim das contas, investir em Ciência fundamental é um bom negócio.

O Modelo Padrão reúne as teorias das três interações em um único arcabouço matemático, baseado nas propriedades matemáticas que elas têm em comum: suas simetrias. É uma teoria extremamente precisa e elegante, cujas previsões são confirmadas diariamente pelos resultados experimentais obtidos nos laboratórios ao redor do mundo. Faltava, entretanto, encontrar uma peça fundamental da teoria, o bóson de Higgs.

A descoberta foi importante porque o bóson de Higgs está diretamente ligado à origem da massa das partículas elementares. A busca pela origem da massa mobilizou físicos teóricos no início dos anos 1960. Dentre eles, havia um escocês, Peter Higgs, um estadunidense, Robert Brout e um belga, François Englert. Eles imaginaram um mecanismo muito engenhoso e complexo, que ficou conhecido como *mecanismo de Brout-Englert-Higgs*, ou, simplesmente, mecanismo de Higgs. Essa mecanismo foi usado com sucesso para explicar o fato de os

bósons W e Z terem massa e o fóton não, e está no coração do Modelo Padrão.

Imagine um lápis bem apontado e equilibrado na vertical, apoiado sobre a sua ponta. O equilíbrio é altamente instável e ele logo cairá sobre a mesa, ficando na posição horizontal. Enquanto estiver equilibrado na vertical, o lápis tem uma *simetria*: pode cair em qualquer direção. Todas são igualmente prováveis, mas ele sempre cairá em apenas uma delas. Ele pode ser equilibrado na vertical repetidamente, e em cada vez cairá em uma direção diferente. Apoiado na horizontal sobre a mesa, o lápis fica em equilíbrio estável, mas perde a simetria que tinha quando estava equilibrado pela ponta.

Uma situação parecida: uma pessoa, de olhos vendados está no centro de uma plataforma circular que gira lentamente. Em um momento escolhido ao acaso, a plataforma para de girar e a pessoa desce o degrau que a separa do chão. De um ponto mais alto, com mais energia gravitacional, ela passa a um ponto mais baixo, com energia menor. A pessoa pode descer em qualquer direção, pois todas têm a mesma probabilidade e a mesma energia gravitacional (a energia gravitacional só depende da altura: pense em uma pedra caindo de uma altura de um metro e outra idêntica caindo de uma altura de 10 metros). Quando ainda está na plataforma, existe uma simetria – todas as direções são igualmente possíveis –, que é quebrada no momento em que a pessoa toca o chão.

Pois bem, a hipótese física por trás do mecanismo de Brout-Englert-Higgs é a seguinte. O Universo começou a expandir a partir de um volume mínimo, ultra denso e quente. Todo o Universo é preenchido por um campo, o campo de Higgs. Assim como ocorre com campo eletromagnético, cada pequeno volume do espaço contém uma certa quantidade de energia associada ao campo de Higgs. Mas o campo de Higgs é diferente do campo eletromagnético. Este está, em última análise, as-

sociado a cargas elétricas. Uma partícula carregada quando é colocada na presença de um campo eletromagnético sofre uma força. Mas não há uma “carga” associada ao campo de Higgs. O efeito do campo de Higgs é de outra natureza.

O Universo expandiu e esfriou, e em um determinado momento, houve uma mudança brusca no estado energético do campo de Higgs, provocando uma *transição de fase*, como a água quando congela. Na transição, o campo de Higgs passa ao estado com a menor energia possível. Mas assim como existem infinitas direções em que o lápis pode cair, ou que a pessoa pode descer da plataforma, existem infinitos estados do campo de Higgs com a mesma energia mínima, e antes da transição de fase, todos são igualmente prováveis. Antes da transição, o campo de Higgs tinha a mesma simetria do lápis equilibrado pela ponta, ou da pessoa na plataforma. Quando o estado do campo de Higgs muda para um desses infinitos estados de energia mínima, a simetria que ele tinha é perdida. Nesse momento de transição, em que a simetria é perdida, os bósons W e Z adquirem massa, enquanto o fóton continua sendo o uma partícula imaterial.

O mecanismo de Higgs é uma ideia bastante engenhosa e complexa, e a sua premissa básica é a existência de um campo que permeia todo o Universo. Na visão moderna, as partículas elementares são estados excitados, os *quanta* dos campos, como caroços de um mingau. Os fótons são os *quanta* do campo eletromagnético. Logo, se o campo de Higgs realmente existe, deve haver partículas associadas a ele, os seus *quanta*. Essas partículas são os bósons de Higgs. Assim, a descoberta do bóson de Higgs confirmou a existência do campo de Higgs e do mecanismo pelo qual os bósons W e Z adquirem massa. Foi a cereja do bolo.

O campo de Higgs tem outra implicação: ele dá massa às demais partículas elementares. Faço aqui uma analogia cri-

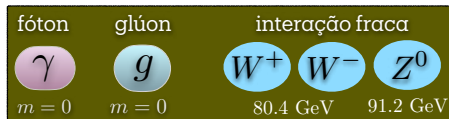
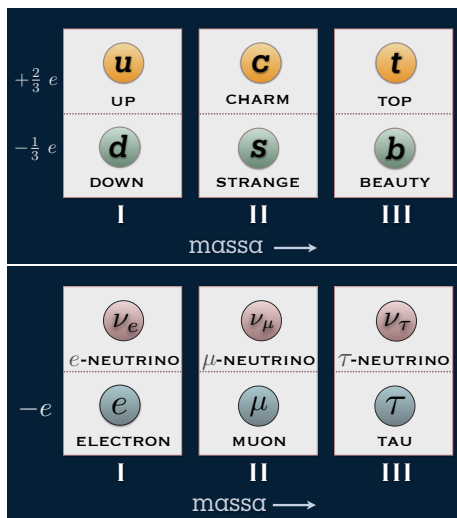
ada por pesquisadores do CERN. Imagine um salão de festas preparado para receber um convidado ilustre. Horas antes do evento, um funcionário atravessa rapidamente o salão vazio. Ele se dirige à mesa onde o convidado se sentará e verifica se está tudo certo. Perto do início da cerimônia, as pessoas vão chegando e o salão vai ficando cheio. Finalmente, o convidado entra na sala, já lotada, e tenta chegar à mesa destinada a ele. Mas ele caminha com dificuldade, o tempo todo cercado por admiradores. Ao atravessar a multidão, o convidado adquire uma inércia, algo que o funcionário não experimentou ao atravessar o salão vazio. As partículas ganham massa ao se propagar através do campo de Higgs, assim como o visitante ilustre ganha inércia ao ser cercado pela multidão de admiradores.

Apesar do sucesso do Modelo Padrão, sabemos que ele não é a última palavra. Há fenômenos que não são explicados pelo Modelo Padrão. Ao longo do restante do livro vamos falar sobre eles. De certa forma, nos encontramos em uma situação semelhante ao início do século passado, quando a Física Clássica não explicava a radioatividade, o corpo negro, o efeito fotoelétrico, a estabilidade dos átomos, dentre outros fenômenos do microcosmo.

Podemos resumir a Física de Partículas em dez pontos:

- Existem partículas elementares, como os elétrons, e compostas, como prótons e nêutrons;
- Há dois tipos de partículas elementares, os quarks e os léptons. Existem seis quarks e seis léptons diferentes;
- Para cada quark e cada lépton há um antiquark e um anti-lépton, com propriedades idênticas, exceto as cargas, que são opostas;

- Os quarks e os léptons são os constituintes da matéria. Mas apenas três compõem toda a matéria observável: os quarks u e d , que formam prótons e nêutrons, e os elétrons. Os demais são instáveis e decaem em cascata até os quarks u e d e o elétron;
- Quarks e léptons podem interagir de três formas diferentes, as interações fraca, eletromagnética e forte (em ordem crescente de intensidade);
- Todas as formas de interação entre partículas elementares envolvem uma terceira partícula mensageira, que são os bósons vetoriais W e Z , o fóton e os glúons;
- A estabilidade atômica é garantida pela interação eletromagnética entre os elétrons e o núcleo;
- A coesão dos núcleos é mantida pela interação forte;
- A interação fraca, responsável por alguns tipos de radioatividade, está na origem da cadeia de reações que produz a energia irradiada pelo Sol;
- a interação com o campo de Higgs é a origem da massa das partículas elementares.



A nova tabela periódica. O Modelo Padrão divide as partículas elementares entre constituintes – quarks e léptons – e mediadoras – os bósons vetoriais. A existência do bóson de Higgs comprova o mecanismo pelo qual as partículas elementares adquirem suas massas.

Capítulo 8

Relatividade

Certa tarde, em um dia normal de trabalho no departamento de patentes em Berna, Einstein estava sentado à sua mesa, diante da janela. Do outro lado da rua, um trabalhador consertava o telhado de um pequeno edifício. Einstein observava a cena atentamente. Então, teve o que ele chamou de “a ideia mais feliz da minha vida”: se um corpo caísse livremente, ele não sentiria o seu peso durante a queda.

Einstein contou esse episódio durante uma conferência no Japão, muitos anos depois. A princípio, a “ideia mais feliz” pode parecer um pouco trivial, quase óbvia. Mas aqui a genialidade fica explícita: Einstein percebeu naquele momento que um campo gravitacional é equivalente a um referencial acelerado. Em outras palavras, uma aceleração pode imitar a gravidade, e essa foi a chave para que ele elaborasse a sua teoria da gravitação, a Relatividade Geral. Depois de reinar por 230 anos, Newton seria destronado.

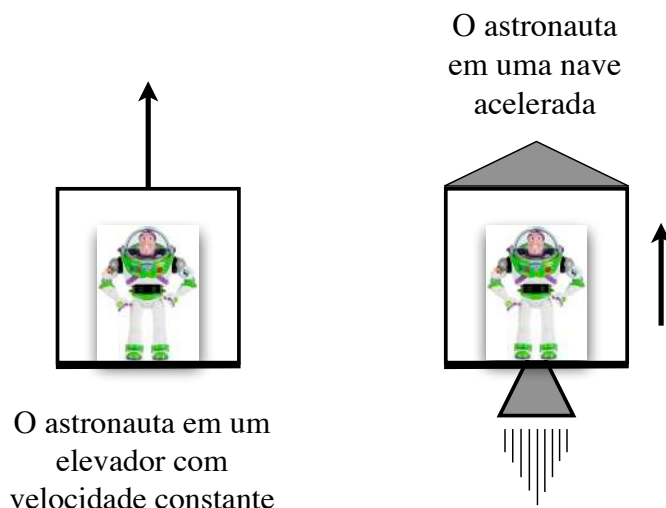
Explico melhor o parágrafo acima. Imagine um foguete estacionado em uma plataforma. Um elevador fechado, sem janelas, leva um astronauta até o topo do foguete, onde ele

embarcará no módulo que o levará ao espaço. O elevador é absolutamente silencioso e sobe com a mesma velocidade o tempo todo. O astronauta, ansioso, caminha pelo elevador. Sem ver o exterior, o astronauta não sabe dizer se o elevador está parado, subindo ou descendo com velocidade constante.

Agora imagine o astronauta em uma nave em algum lugar ermo do espaço sideral, longe de qualquer influência de gravidade. A nave segue em direção ao seu destino, viajando com velocidade constante. Em certo momento, o astronauta tem que executar uma manobra para corrigir a rota. Quando os motores são ligados, a nave sofre uma aceleração, o que faz com que o astronauta seja empurrado contra o piso da nave. Enquanto estiver atuando, a força dos motores impede que ele flutue. Se a aceleração for igual à da gravidade na Terra, ele poderá caminhar normalmente pela nave, como se estivesse em casa.

Assim como no elevador que sobe (ou desce) com velocidade constante, o astronauta dentro da nave com aceleração igual à da gravidade na Terra não saberia distinguir entre estar na nave ou em repouso na superfície da Terra. Se dentro da nave ele fizesse algum tipo de experimento, como medir o tempo de queda de um objeto, ele obteria o mesmo resultado que teria na superfície da Terra. Conclusão: qualquer campo gravitacional pode ser simulado por um referencial acelerado. Ou, dito de outra forma, qualquer aceleração equivale à ação de um campo gravitacional. Einstein construiu a Teoria da Relatividade Geral partindo dessa constatação: a equivalência entre aceleração e gravidade.

Durante alguns anos, dei aulas para jovens no ensino médio. Em cada turma eu fazia a mesma pergunta: por que os astronautas flutuam quando estão em uma estação espacial na órbita da Terra? Invariavelmente, os alunos respondiam de bate-pronto: ora, porque lá não há gravidade! Olhavam para mim como se eu tivesse feito uma pergunta óbvia, que qualquer



Sem contato com o exterior, esteja em um elevador que se desloca com velocidade constante ou em uma nave com aceleração igual à da gravidade na superfície da Terra, o astronauta não saberia dizer se está parado ou em movimento. Ele se sentiria como se estivesse em casa.

criança saberia responder. Então eu fazia uma outra pergunta: mas por que a Lua, que está muito mais distante, orbita em torno da Terra? Nesse momento eles se davam conta de que nem tudo é tão simples como parece ser. Na verdade, os astronautas flutuam porque estão o tempo todo em queda livre. Um corpo em queda livre não sente seu peso, a ideia mais feliz de Einstein. Os astronautas não despencam lá de cima porque a estação espacial tem também uma *velocidade tangencial*. Se a gravidade fosse subitamente “desligada”, a estação seguiria em linha reta, indefinidamente. A combinação do movimento tangencial, em linha reta, tendendo a fugir da órbita, com a queda livre, cuja direção é voltada para o centro da Terra, resulta na trajetória circular da estação.

Einstein criou a Teoria da Relatividade em duas etapas. Na primeira, que publicou em 1905, tratou do caso especial de observadores que se movem sem aceleração. Os termos *sistema de referência*, ou simplesmente *referencial*, são usados para designar o lugar de onde se observam as coisas, onde as medições são feitas. No metrô, quando o trem trafega com velocidade constante ou está parado numa estação estamos em um referencial *inercial*. Dentro de um ônibus urbano no Rio de Janeiro, os motoristas aceleram e freiam bruscamente, fazem curvas em alta velocidade e, se estão com bom humor, até param nos pontos para os passageiros subirem e descerem. Seria fácil dizer que os ônibus são um exemplo de referencial *não inercial*. A diferença entre os dois tipos de referencial é a aceleração. Os ônibus cariocas poderiam ser absolutamente silenciosos e sem janelas, transitando por ruas perfeitamente lisas, e conduzidos com suavidade. Ainda assim, saberíamos identificar os momentos em que o ônibus acelera.

Na estação espacial, quando um astronauta joga algum objeto para outro, uma ferramenta, por exemplo, ambos veem o objeto se deslocar em linha reta com velocidade constante. Em uma nave muito distante de qualquer galáxia e com os propulsores desligados, os astronautas veriam exatamente a mesma coisa. As leis da Física são as mesmas para os astronautas em queda livre ou em movimento sem aceleração. Esse é o Princípio de Relatividade: as leis da Física não dependem do observador. Einstein havia partido desse princípio para criar a Relatividade Especial. O adjetivo “especial” se refere ao fato de que, inicialmente, esse princípio valeria em referenciais inerciais, ou seja, não acelerados. Dez anos depois, Einstein publicou a Teoria da Relatividade Geral, em que generalizou o Princípio de Relatividade para qualquer observador, acelerado ou não.

Na teoria de Newton, a massa dos corpos é a fonte da gravidade. Todo corpo exerce uma atração gravitacional, que

é tão mais intensa quanto maior for a sua massa. Mas seja na teoria de Newton ou na de Einstein, a gravidade na superfície de um planeta depende não só da sua massa, mas também do seu raio. A Lua tem uma massa cem vezes menor que a da Terra, aproximadamente, mas tem um raio um pouco mais de três menor. A combinação desses dois fatores faz com que na superfície da Lua a gravidade seja apenas cerca de seis vezes menor que na superfície da Terra. A massa do Sol é cerca de um bilhão de vezes maior que a da Terra, mas se a superfície do Sol tivesse temperaturas amenas, lá um astronauta pesaria apenas 28 vezes mais. Mesmo assim, não seria nada agradável.

A gravidade, segundo Newton, é uma força que é transmitida instantaneamente por uma misteriosa ação à distância. A gravitação de Einstein é radicalmente diferente. Não é propriamente uma força, e sim um efeito geométrico. A presença de matéria ou de energia *deforma* o espaço e o tempo. A gravidade é o resultado dessa deformação, ou curvatura. Einstein reinventou o espaço e o tempo ao introduzir a ideia de um *espaço-tempo com curvatura*. Mas antes de entrar em mais detalhes sobre isso, falemos um pouco sobre a Relatividade Especial.

Uma descoberta crucial – e surpreendente – foi feita em 1887. Naquela época, havia um consenso sobre a natureza da luz: uma onda eletromagnética. Todas as ondas precisam de um meio para se propagar, e com a luz não haveria de ser diferente. O meio de sustentação da luz seria o hipotético éter luminífero, um meio no qual o Universo estaria imerso, permitindo que a luz se propagasse no vácuo. O éter seria uma espécie de fluido com propriedades fantásticas: sem peso, homogêneo e isotrópico, perfeitamente elástico, e indetectável por experimentos baseados na Mecânica. O éter também definiria um referencial absoluto, um palco estático em relação

ao qual tudo se movesse. Havia a expectativa de que através de experimentos envolvendo a luz, sua existência poderia ser comprovada.

Albert Michelson e Edward Morley, nos EUA, elaboraram um experimento bastante engenhoso para detecção do éter, e que entraria para a história, um clássico exemplo de “atirar no que viu e acertar no que não viu”. O experimento explorava o movimento da Terra ao redor do Sol. Esperavam medir uma pequena diferença na velocidade da luz fazendo medições com seis meses de intervalo, quando, no referencial centrado no Sol, a Terra se move em sentidos contrários. Para surpresa geral, Michelson e Morley não detectaram o éter. Em vez disso, mostraram que a velocidade da luz é sempre a mesma, não importa se a fonte luminosa está se movendo ou não! O experimento de Michelson e Morley foi um dos mais cruciais na Física, e abriu o caminho para a revolução no conceito de espaço e tempo nos anos seguintes.

Uma pessoa apressada em um aeroporto caminha sobre uma esteira rolante. Sua velocidade em relação ao piso do aeroporto é, obviamente, maior do que teria se não usasse a esteira. Mais precisamente, a velocidade da pessoa em relação ao piso do aeroporto é a soma das velocidades com que ela se move sobre esteira e desta em relação ao piso. Agora imagine um foguete viajando quase à velocidade da luz. Na frente do foguete, um sinal luminoso é emitido na mesma direção em que ele se desloca. Se para a luz valesse a mesma regra para somar velocidades, um observador na Terra veria a luz se propagar quase duas vezes mais rápido. Michelson e Morley mostraram que sinal luminoso emitido pelo foguete se propagaria sempre com a mesma velocidade. A velocidade da luz no vácuo é sempre a mesma, esteja a fonte em repouso na Terra ou se deslocando em alta velocidade. É uma constante universal.

Esse aparente paradoxo foi resolvido pelo jovem Einstein em 1905, quando apresentou ao mundo a teoria da Relatividade Especial. Nela estava contida uma ideia bastante radical: o tempo não é absoluto, depende do movimento do observador. Cada um tem seu próprio tempo. Einstein usou um exemplo simples para demonstrar esse fato. Ele imaginou uma pessoa sentada na plataforma de uma estação de trem. Em certo momento, dois relâmpagos caem sobre a ferrovia, um à direita e outro à esquerda da estação. O observador na plataforma está exatamente à mesma distância dos dois raios, de forma que a luz de cada relâmpago chega a ele no mesmo momento. Para ele, os relâmpagos foram simultâneos.

Se o tempo fosse absoluto, se fosse o mesmo para qualquer observador, independente do seu movimento, dois eventos simultâneos em um referencial seriam simultâneos em qualquer outro. Einstein então imaginou um segundo observador dentro de um trem que se desloca em linha reta e em alta velocidade. Os raios caem sobre a ferrovia no exato momento em que o trem passa pela plataforma. A velocidade da luz é muito alta, mas não é infinita, e por isso o clarão de cada relâmpago leva um tempo para percorrer a distância até um observador.

Durante o tempo em que a luz se propaga, o trem se aproxima do ponto onde um dos relâmpagos caiu. Tendo que percorrer uma distância menor, a luz desse raio leva menos tempo até chegar ao observador dentro do trem. Mas o trem também se afasta do ponto onde o outro raio caiu, e nesse caso a luz tem um caminho maior a percorrer. Levará mais tempo até alcançar o observador no trem. Conclusão: para o observador do trem, os dois raios não atingirão os trilhos simultaneamente, ele verá primeiro um, depois o outro. O que é simultâneo para um observador não é para nenhum outro.

Definir simultaneidade pode parecer trivial, mas é assim apenas para eventos que são espacialmente próximos. Pense

em como saber se dois eventos são simultâneos quando estão a trilhões de quilômetros de distância, em movimento relativo com altíssima velocidade. Einstein, não fez nenhum experimento complexo nem usou resultados experimentais. Apenas com o raciocínio lógico e seus famosos experimentos mentais, ele mostrou que o tempo absoluto, visto com o mesmo andamento para todo e qualquer observador era apenas uma ilusão.

Agora imagine que o observador na plataforma deixa cair uma bolinha de uma certa altura e mede o tempo que ela leva até chegar ao chão. Dentro do trem, o segundo observador repete o mesmo experimento, medindo o tempo de queda da mesma altura e usando um cronômetro idêntico ao do primeiro. Encontra, naturalmente, o mesmo valor para o tempo de queda, pois as leis da Física são as mesmas para qualquer observador. A situação muda quando o *tempo de queda no trem é medido pelo observador da plataforma, e vice-versa*. É disso o que trata a Relatividade, *como dois observadores em movimento veem um mesmo fenômeno*.

No instante em que o observador do trem solta a bolinha, um raio luminoso viaja até ao observador da plataforma. Quando a informação chega, ele dispara o cronômetro. Quando a bolinha atinge o piso do trem, outro raio luminoso viaja até o observador da plataforma, que marca o tempo transcorrido entre os dois sinais. Mas durante o tempo de queda o trem se afastou da plataforma, de modo que o segundo raio luminoso terá uma distância maior a percorrer e, portanto, levará um tempo maior para chegar ao observador da plataforma. Assim, o tempo de queda da bolinha no trem, medido pelo observador da plataforma, será *maior* que o medido pelo observador no trem, e vice-versa. Em resumo: o tempo de queda na plataforma, medido pelo primeiro observador, é igual ao tempo de queda no trem, medido pelo segundo observador. Mas quando um mede o tempo de queda no referencial do outro, sempre encontrará um valor maior. Ou seja, quando um olha para o

cronômetro do outro, vê os ponteiros se moverem mais lentamente. Esse efeito é conhecido como *dilatação do tempo*.

É claro que a velocidade de um trem normal é insignificante comparada à da luz, mas isso não invalida o argumento. Como se trata de um “experimento mental”, podemos imaginar que o trem se desloca com qualquer velocidade, tão rápido quanto queiramos. Quanto maior a velocidade do trem, maior será o efeito da dilatação do tempo.

Convivemos diariamente com a relatividade do tempo, sem nos darmos conta disso. A Terra é continuamente bombardeada por *raios cósmicos*, partículas com altíssima energia que vêm do espaço sideral. O campo magnético da Terra desvia as partículas de menor energia para os polos, causando as auroras boreais e austrais. A atmosfera é um escudo protetor que absorve quase toda a radiação, e assim impede que os raios cósmicos cheguem ao nível do mar, o que seria fatal para a vida no planeta. Quando penetram na atmosfera, os raios cósmicos colidem com as moléculas de ar. As colisões ocorrem tipicamente entre 10 e 15 quilômetros de altitude. São colisões extremamente violentas, em que milhares de outras partículas são criadas. A maioria delas não chega à superfície da Terra: as partículas se desintegram espontaneamente, ou são absorvidas pela atmosfera. Se as partículas fossem visíveis, seria um espetáculo grandioso, o céu noturno estaria sempre luminoso.

Dentre as milhares de partículas produzidas nas colisões dos raios cósmicos com o ar, há um tipo especial: os múons, dos quais falamos no capítulo anterior. Os múons também são instáveis, mas com meia-vida “longa”, aproximadamente 0,000.002 segundos, significativamente maior que a das outras partículas. Mesmo viajando praticamente à velocidade da luz, os múons percorreriam, em média, cerca de 600 metros antes de se desintegrar. Assim como as outras, não deveriam chegar à superfície da Terra. Mas chegam, e em grande quantidade:

a cada minuto e a cada centímetro quadrado, um múon atinge o nível do mar. Por sorte, são inofensivos: os múons têm a capacidade de atravessar grandes espessuras de material sem serem percebidos, e assim passam pelos nossos corpos sem causar dano. O fato de detectarmos múons na superfície da Terra é uma demonstração de que o tempo não é absoluto.

O andamento do tempo é sempre o mesmo em qualquer referencial. Relógios iguais medem o tempo da mesma forma em qualquer referencial. Os ponteiros sempre se movem com a mesma velocidade. No entanto, *um mesmo evento observado em dois referenciais diferentes não têm a mesma duração*. A Teoria da Relatividade nos diz *como um observador em determinado referencial vê o andamento de relógios em outros referenciais*. A diferença depende apenas da velocidade relativa entre eles. Quanto maior a velocidade, maior será o efeito.

Imagine dois cronômetros idênticos, dados a um observador fixo na Terra e a outro que se move junto com os múons. A velocidade dos ponteiros no cronômetro no referencial da Terra é igual à do cronômetro que se move com os múons. Esse fato não surpreende, afinal os cronômetros são idênticos. A diferença surge quando um vê o cronômetro do outro. O observador em repouso na Terra vê os ponteiros do cronômetro dos múons se moverem em câmera lenta. Para ele, o tempo no referencial dos múons passa mais devagar. Isso significa que para o observador na Terra, o tempo de voo do múon é menor. Por isso muitos múons têm tempo suficiente para atingir o solo antes de se desintegrar. Como não há nenhum referencial privilegiado, absoluto, o observador no referencial dos múons também vê os ponteiros do cronômetro na Terra se moverem em câmera lenta. Ambos estão certos, não há nada de errado, pois *os efeitos da relatividade do tempo só surgem quando um observador vê o andamento do tempo no cronômetro do outro*.

Assim como o tempo, as distâncias também são relativas. Imagine duas barras de ferro idênticas, cada uma em um referencial diferente, que se movem com uma certa velocidade relativa. No primeiro referencial, onde uma das barras está em repouso, um observador mede o seu comprimento. Um segundo observador, munido de uma régua idêntica à do primeiro, também mede o comprimento da sua barra, que também está em repouso no seu referencial. Os dois obtêm os mesmo valor, pois com barras e réguas idênticas, não haveria outra possibilidade. No entanto, *quando o observador no primeiro referencial mede o comprimento da barra que está no segundo referencial, encontra um valor menor, e vice-versa.* Esse efeito é conhecido como *contração do comprimento*.

Medir algum comprimento parece um ato trivial, basta usar uma régua. Mas como a velocidade da luz é imensa, não nos damos conta de que medir o comprimento de uma barra rígida implica dois eventos simultâneos: uma extremidade da barra coincide com um ponto na régua no mesmo instante em que a outra extremidade coincide com outro ponto. Se tanto a régua como a barra estão em repouso, o ato de medir é realmente trivial. Mas tudo muda se a régua está em movimento em relação à barra, ou vice-versa, pois eventos simultâneos em um referencial o não serão em nenhum outro. Mas assim como a dilatação do tempo, a contração do comprimento só é significativa para velocidades muito altas, comparáveis à da luz.

Voltando ao exemplo dos múons, também podemos entender porque eles chegam à superfície da Terra pensando na contração do comprimento. Do ponto de vista de um observador que se move junto com os múons, é a Terra que se aproxima rapidamente. Assim, para os múons, a distância entre o ponto em que eles são produzidos e a superfície da Terra é menor, e por isso eles gastam menos tempo na viagem.

Foram necessários alguns anos para que os físicos entendessem que os corpos não encolhem, nem se movem em câmara lenta em referenciais diferentes. As barras, claro, não encolhem fisicamente, da mesma forma que o movimento não altera a velocidade dos ponteiros dos relógios em cada referencial. Dilatação do tempo e contração do comprimento resultam apenas da forma como medimos as coisas. Trata-se apenas do efeito de *como um observador vê o outro*, e que depende essencialmente da velocidade relativa entre os dois.

O comprimento de uma barra medido em um referencial em que ela está em repouso é o *comprimento próprio*. Qualquer outro observador medirá um comprimento *menor* que o comprimento próprio. Da mesma forma, o tempo de queda de um objeto medido em um referencial em que ele está inicialmente em repouso é o *tempo próprio*. Qualquer outro observador medirá um tempo de queda *maior*. Isso explica o fato de a velocidade da luz ser constante: o fator que dilata o tempo é compensado pelo mesmo fator que comprime as distâncias. Em resumo, comprimentos de objetos e intervalos de tempo entre eventos medidos em um determinado referencial serão sempre diferentes quando medidos por outros observadores, quaisquer que sejam os referenciais em que eles estejam.

Assim como a Mecânica Quântica, a Teoria da Relatividade também foi uma ruptura radical: tempo e espaço são intimamente ligados, formam uma unidade, o espaço-tempo. Cada observador tem seu próprio tempo. Cada observador mede um comprimento diferente de um mesmo objeto. Antes de Einstein, acreditava-se que, além do tempo, espaço também seria absoluto. Achava-se que o espaço seria imóvel, imutável. O espaço absoluto implica a existência de um referencial privilegiado, o repouso absoluto, em relação ao qual tudo se move. O espaço seria apenas um palco onde os fenômenos acontecem. Foram dois absolutos que desabaram a um só golpe: o movi-

mento relativo de dois observadores afeta a forma como um vê o tempo e as distâncias no referencial do outro.

Tudo está em movimento, e todo movimento é relativo, pois não há nenhum referencial privilegiado. Todos são equivalentes, e as leis da Física não dependem de quem observa, são as mesmas para todos. Observadores medem distâncias e intervalos de tempo de forma diferente porque a luz se propaga com velocidade *finita*. Se ela se propagasse instantaneamente, com velocidade infinita, não haveria nenhum efeito relativístico, todos teríamos o mesmo tempo e os comprimentos seriam os mesmos vistos de qualquer referencial. A dilatação do tempo e a contração do comprimento se compensam, garantindo que a velocidade da luz seja sempre a mesma.

A Relatividade Especial é diferente das outras teorias. É um conjunto de princípios que devem ser seguidos por *todas* as demais teorias físicas, quânticas ou não. A Relatividade Especial nos diz como os fenômenos físicos são vistos por diferentes observadores em movimento relativo *sem aceleração*. Todos encontram o mesmo resultado quando fazem o mesmo experimento porque não há referenciais especiais, todos são igualmente bons.

Os efeitos da relatividade, no entanto, só são percebidos quando as velocidades envolvidas forem muito altas, próximas à da luz, assim como os efeitos quânticos só se manifestam na escala atômica. Partindo de um único fato experimental – a velocidade da luz é sempre a mesma, independente do referencial inercial (sem aceleração) em que é medida – e uma ideia – as leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais – Einstein mudou para sempre o que entendemos por tempo e espaço.

As consequências da Relatividade Especial não se restringem a abolir a noção de tempo e espaço absolutos. É provável que você já tenha visto a imagem de Einstein com a língua para

fora, junto com a fórmula mais conhecida da Física, $E = mc^2$. Essa fórmula nos diz que energia e massa são equivalentes, uma pode ser convertida na outra e vice-versa. A matéria pode se desintegrar e virar energia pura, que, por sua vez, pode se transformar em matéria. Esse é o desdobramento mais importante da Relatividade Especial, pois está diretamente ligado à nossa própria existência. A equivalência entre massa e energia é a razão pela qual as estrelas brilham.

Existem outros desdobramentos da Relatividade Especial. Objetos que se movimentam com velocidades próximas à da luz ficam mais pesados. Quanto mais próximos estiverem da velocidade da luz, mais pesados ficam, maior tem que ser a força para aumentar ainda mais sua velocidade. No limite, para atingir a velocidade da luz, seria necessário fornecer aos corpos uma energia infinita, pois eles teriam uma massa também infinita. Em outras palavras, nenhum corpo que tenha massa pode atingir a velocidade da luz no vácuo. Nada se propaga mais rápido que ela.

Dez anos de esforços foram necessários para Einstein dar o passo final, generalizando os conceitos da Relatividade Especial para todos os referenciais, incluindo os que têm aceleração. A versão final da Relatividade Geral ficou pronta em 1915, contando com a inestimável colaboração de Marcel Grossmann. Foi um desenvolvimento puramente teórico, usando apenas lápis, papel, muito suor e a sua mente privilegiada. Quatro anos depois da publicação da Relatividade Geral, suas previsões foram confirmadas por medições feitas aqui no Brasil.

O fato é que a aceleração complica tudo. Estabelecer a relação entre referenciais não inerciais (com aceleração) e a gravidade foi um passo genial dado por Einstein, tão genial quanto o de Newton ao associar uma mesma causa para a

queda dos corpos e as órbitas dos planetas. Einstein tinha não só uma intuição física extraordinária, como também uma grande facilidade para cálculos matemáticos. Mesmo assim, lutou muito até dominar a complexa geometria diferencial em espaços curvos, e assim conseguir unir todas as suas ideias em uma teoria consistente, capaz de fazer previsões que poderiam ser testadas. A dificuldade matemática está no fato de que *massa e energia deformam o espaço e o tempo*. A Relatividade Geral mostra como a presença matéria e da energia alteram as propriedades do espaço-tempo. Mas mostra também como a matéria e a energia se propagam em um espaço-tempo deformado.

Se vivêssemos em um mundo em duas dimensões, seria possível caminhar apenas para a direita ou esquerda, para frente ou para trás. Não teria sentido falar “para cima” ou “para baixo”, não enxergaríamos uma terceira dimensão. Se o espaço nesse mundo hipotético fosse uma superfície plana, como uma folha de papel, valeria a geometria de Euclides: a menor distância entre dois pontos é uma linha reta, a soma dos ângulos internos de qualquer triângulo seria 180 graus e retas paralelas serão sempre paralelas. Podemos pensar em nosso mundo tridimensional como infinitas folhas de papel superpostas. A geometria de Euclides valeria em qualquer direção.

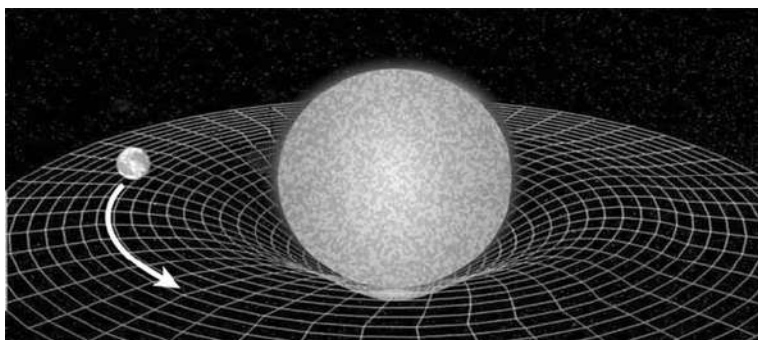
A Terra é redonda (embora ainda haja quem duvide), e por isso, exceto quando voamos, somos limitados a nos deslocar sobre uma superfície esférica, onde a menor distância entre dois pontos não é uma reta e sim uma linha curva, mais precisamente um arco de circunferência. Tome a linha do equador e dois meridianos quaisquer. As três linhas formam um triângulo com vértice em um dos polos. Triângulos em uma superfície esférica são diferentes: a soma dos seus ângulos internos é *maior* que 180 graus. Na vizinhança imediata da linha do equador os meridianos são linhas verticais, e, portanto, paralelas, mas ao contrário da geometria de Euclides, não serão

sempre paralelas, pois se encontrarão no polo. Em superfícies curvas, a geometria não é mais Euclidiana.

É difícil imaginar um espaço tridimensional curvo, mas pode-se ter uma ideia do que é a deformação do espaço ficando em duas dimensões. O globo terrestre é objeto tridimensional, mas sua superfície é bidimensional. Bastam duas coordenadas, latitude e longitude, para localizar um ponto de forma precisa. Sobre a superfície esférica, as trajetórias são sempre linhas curvas. Agora imagine que no lugar da Terra haja apenas uma superfície invisível, mas que ainda assim nos limite a ir de um ponto a outro seguindo trajetórias que são sempre curvas. Isso seria um espaço curvo em um mundo com apenas duas dimensões.

Pense em um colchão de espuma grande e bem macio. Sobre ele, jogamos um objeto muito pesado, uma bola de boliche, por exemplo. No entorno do objeto, o peso da bola de boliche deforma o colchão, fazendo que a sua superfície não seja mais plana. A superfície do colchão é bidimensional, mas é uma analogia muito usada para ilustrar como a presença de um corpo muito pesado, como uma estrela, causa deformação semelhante, só que em quatro dimensões: o espaço tridimensional /it e o tempo. Como vivemos em um mundo em que o espaço é tridimensional, podemos ver a curvatura de uma superfície em duas dimensões, mas não temos como imaginar um espaço quadridimensional de onde veríamos a curvatura do espaço em três dimensões.

No magnífico filme *Interestelar*, uma missão espacial viaja à procura de um planeta habitável, pois a vida na Terra tornou-se inviável. No caminho, há um buraco negro. A nave principal fica a uma distância segura, enquanto uma equipe em um módulo auxiliar pousa em um dos planetas tidos como promissores. O planeta está condenado. O buraco negro tem uma gravidade tão intensa que, num futuro não muito dis-



É muito difícil imaginar uma deformação do espaço em três dimensões. A ilustração mostra o que aconteceria em um espaço bidimensional.

Crédito: NASA

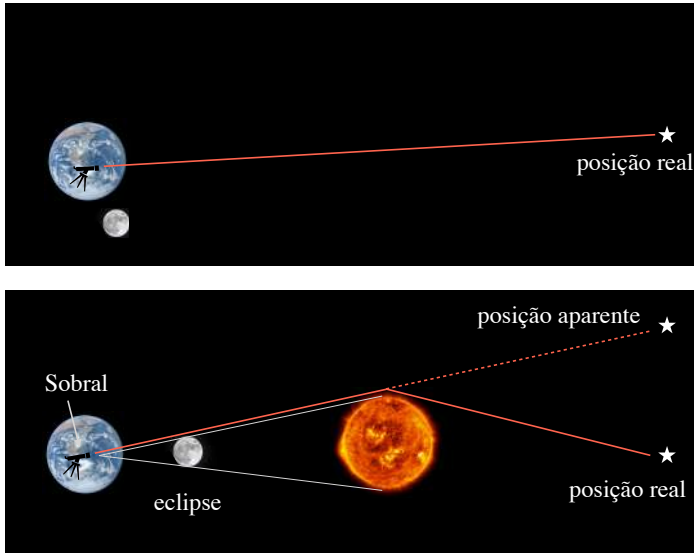
tante, vai engoli-lo. Um problema retém os astronautas por algumas horas no planeta, e quando voltam à nave, veem que a tripulação envelheceu mais de 20 anos. A gravidade faz o andamento do tempo ser mais lento.

O GPS é um sistema usado diariamente por bilhões de seres humanos e que não funcionaria sem a Teoria da Relatividade. Uma rede de satélites gira permanentemente em torno da Terra, de tal forma que em qualquer parte do mundo um bom número deles sempre é visível. A posição na Terra é determinada pelo tempo de chegada do sinal de cada satélite visível ao receptor dos nossos celulares. A precisão, em tempo real, é de alguns metros (para usos militares, a resolução é inferior a um metro). Para chegar a uma resolução tão grande, dentro de cada satélite há um relógio atômico ultrapreciso que emite sinais em intervalos de um bilionésimo de segundo. A medida do tempo de chegada dos sinais é ligeiramente afetada pelo movimento dos satélites, que se deslocam a milhares de quilômetros por hora. Além disso, os satélites estão sob a ação da gravidade da Terra, o que retarda ligeiramente o andamento

dos seus relógios ultraprecisos em relação aos terrestres. A Teoria da Relatividade permite levar em conta esses efeitos, sem os quais a precisão do GPS seria de centenas de metros.

Einstein pensou em uma forma de comprovar o efeito da matéria sobre o espaço e o tempo. Todos os corpos, inclusive a luz, seguem as trajetórias possíveis ao longo do espaço, assim como nós estamos restritos a caminhar sobre a superfície esférica da Terra. Se no entorno de uma estrela o espaço tem uma curvatura, a luz tem uma trajetória curva ao passar próximo a ela. O Sol tem massa suficiente para curvar o espaço ao seu redor e, assim, causar um desvio observável na trajetória da luz de estrelas distantes. Einstein propôs usar estrelas cujas posições fossem bem conhecidas, medidas à noite, e medir as suas posições durante o dia, quando a luz que elas emitem chega até nós passando próxima ao Sol. Se a luz se curva ao passar pelo Sol, as estrelas apareceriam durante o dia em uma posição diferente. As medidas feitas de dia seriam comparadas com as posições conhecidas das estrelas, medidas à noite, sem a interferência do Sol. Usando a Relatividade Geral, Einstein poderia prever qual seria o desvio nas posições devido à curvatura do espaço causada pelo Sol.

Tal observação, naturalmente, só poderia ser feita durante um eclipse total, quando a Lua se interpõe entre o Sol e a Terra, transformando o dia em noite. A primeira oportunidade surgiu em 1914. Haveria um eclipse total do Sol e local ideal para a observação seria a Crimeia, território que então pertencia ao Império Russo. Uma expedição alemã, liderada pelo astrônomo Erwin Finley-Freundlich, foi enviada à Crimeia para fotografar o eclipse e, assim, testar a previsão de Einstein. Mas Finley-Freundlich não deu muita sorte. Durante os preparativos, dias antes de o eclipse ocorrer, eclodiu a Primeira Guerra Mundial. Alemanha de um lado, Rússia do ou-



A luz de uma estrela sofre um desvio ao passar perto do Sol. Durante o dia, sua posição aparente é diferente da sua posição real, que pode ser medida em um eclipse do Sol. A diferença pode ser confrontada com a previsão da Relatividade Geral.

tro. O astrônomo alemão e sua equipe agora era considerados inimigos, e assim foram presos e tiveram seus equipamentos confiscados.

O eclipse seguinte ocorreu em 1919. Seria um eclipse especial, pois o Sol estaria na linha de visão de um aglomerado de estrelas da constelação Touro. Muitas estrelas brilhantes poderiam ser observadas. Um ano antes, os astrônomos do Observatório Nacional, no Rio de Janeiro, liderados pelo seu diretor, Henrique Morize, previram a data do eclipse e os melhores lugares para observá-lo. Dentre eles, estavam a ilha de Príncipe, na costa africana, e a cidade cearense de Sobral. Morize enviou um relatório detalhado a várias instituições ao

redor do mundo. O astrônomo inglês Arthur Eddington, da Royal Astronomical Society, comprou a ideia.

Eddington organizou duas expedições. A principal foi enviada à ilha de Príncipe, com Eddington à frente. Como “*bac-kup*”, uma segunda expedição foi enviada à Sobral. Expedições dessa natureza, envolvendo o envio de equipamentos delicados a lugares de difícil acesso, envolvem uma logística complexa, o que demanda de um planejamento muito detalhado e implica um custo elevado. Vale lembrar de que se tratava de uma expedição inglesa, envolvendo vultosas quantias dos contribuintes ingleses, na qual cientistas ingleses tentariam comprovar a teoria de um cientista alemão, um ano depois da mais sangrenta guerra envolvendo os dois países até então. Foi uma demonstração de que a Ciência é uma forma de convivência harmoniosa e colaboração pacífica entre os povos. Por isso é triste ver, mais de um século depois das expedições de Eddington, cientistas russos serem aliados de colaborações internacionais como punição pela invasão da Ucrânia.

Os ingleses desembarcaram em Belém e dali rumaram para o interior do Ceará. No começo do século passado, essa não era uma viagem simples. O governo e os astrônomos brasileiros, liderados por Henrique Morize, providenciaram todo o suporte logístico aos colegas ingleses, incluindo vacinação contra a febre amarela. A expedição chegou a Sobral algumas semanas antes do eclipse, com câmeras fotográficas muito sensíveis aco- pladas aos seus telescópios.

Chegou finalmente o grande dia, mas o céu amanheceu nublado. Todos estavam tensos, mas pouco a pouco as nuvens e as aflições se dissiparam. O Sol apareceu e, na hora prevista, começou o eclipse. Durou apenas cinco minutos, suficientes para mudar para sempre os conceitos de espaço e tempo. Na ilha de Príncipe, Eddington não teve a mesma sorte. Lá, o tempo permaneceu encoberto durante quase todo o eclipse.

Mas as fotos do céu de Sobral bastaram para a confirmação espetacular da Relatividade Geral. Einstein estava certo.

Einstein tornou-se uma celebridade mundial. Seu rosto virou a imagem da Ciência. Apareceu com destaque nas capas dos jornais de todo o mundo, desfilou em carro aberto pelas ruas de Nova Iorque, saudado pela multidão. Em 1925, visitou o Brasil, passando uma semana no Rio de Janeiro. Embora tenha se encantado com a miscigenação do povo brasileiro, não guardou as melhores recordações da visita. A Ciência por aqui ainda estava na primeira infância, e ele estava todo o tempo cercado por políticos e militares, que o tratavam como a uma ave rara.

Em resumo, tanto a matéria como a energia deformam o espaço e alteram o andamento do tempo. A luz é imaterial, mas tem peso. A matemática envolvida na Relatividade Geral é bastante complexa, mas a ideia básica foi resumida nas palavras do físico John Wheeler: *“a matéria e a energia dizem ao espaço-tempo como se curvar; o espaço-tempo curvo diz à matéria e à energia como se mover”*.

A fonte dos campos eletromagnéticos são cargas elétricas e correntes. O campo gravitacional, ao contrário, não tem fontes: *é o próprio espaço*. A gravidade não é exatamente uma força como o eletromagnetismo ou as forças nucleares, é um efeito da geometria do espaço-tempo. Luz e matéria se propagam pelo cosmo seguindo os caminhos determinados pela curvatura do espaço-tempo.

Capítulo 9

Estrelas

As Escolas de Física do CBPF, onde eu trabalho, são muito concorridas. A seleção dos participantes é feita buscando uma igualdade na participação de alunas e alunos. Essa postura institucional do CBPF é adotada em um número cada vez maior de instituições de pesquisa. Atualmente, a promoção da igualdade de gêneros é uma política dos grandes laboratórios, como o CERN, por exemplo. Embora a participação feminina na Física ainda seja menor que a masculina, houve avanços significativos nas últimas décadas.

No início do século passado, a situação era muito diferente. Naquela época, a cidadania plena das mulheres ainda era um sonho muito distante. Elas sequer tinham o direito de votar, e não surpreende que houvesse pouquíssimas cientistas mulheres. Em laboratórios e universidades de grande prestígio, a elas não era permitido participar de cursos e programas de estudos avançados. A pesquisa científica era uma atividade para homens. Mas as cientistas mulheres, mesmo sendo muito poucas, deram contribuições fundamentais para o avanço do conhecimento. Cecilia Payne foi uma delas.

Payne nasceu na Inglaterra, em 1900. Seu grande sonho era se tornar astrônoma e astrofísica, mas para realizá-lo teria que lutar muito, seria preciso superar obstáculos quase intransponíveis para uma mulher naqueles tempos. Com muita determinação e depois de muita insistência, Payne ganhou uma bolsa de estudos na Universidade de Cambridge. Ao final do curso, no entanto, não recebeu um diploma: a Universidade de Cambridge só passaria a dar diplomas a mulheres em 1948.

Payne logo percebeu que não teria como realizar seu sonho na Inglaterra. Novamente sua persistência foi recompensada: conseguiu uma bolsa para terminar sua formação nos Estados Unidos, onde foi trabalhar no observatório Universidade de Harvard. Cecília Payne estava destinada a entrar para a história da Astronomia. Em 1925, apresentou sua tese de doutorado que continha uma descoberta fundamental, a solução de um mistério que durava décadas: de que são feitas as estrelas? Tinha apenas 25 anos de idade.

Os astrônomos da época supunham que o Sol teria a mesma composição dos planetas, uma vez que todo o Sistema Solar surgiu de uma única e gigantesca nuvem. O Sol, portanto, deveria ser rico em ferro e alumínio, como a Terra. Após analisar um número muito grande de espectros da luz de estrelas, Payne descobriu que, ao contrário da crença generalizada, o Sol e os planetas têm composição muito diferente. As estrelas são imensas bolas de gás incandescentes. São feitas basicamente de hidrogênio e hélio, este último um elemento raro na Terra. Dos demais elementos, há apenas traços.

A descoberta de Payne foi contestada ferozmente pelos principais astrônomos da época. O tempo passou, mais informações foram obtidas e, quatro anos depois, todos tiveram que reconhecer que Payne estava correta. A tese de doutorado de Payne foi considerada a mais brilhante na Astronomia. Ultrajado pela hipótese de vir a ter uma mulher no corpo do-

cente, Abbot Lowell, o reitor da universidade, jurou que enquanto fosse vivo ela jamais seria contratada. O que de fato aconteceu. Apenas em 1950 ela conseguiu o posto de professora na Universidade de Harvard, mesmo assim com salário menor que o de seus colegas homens.



Cecilia Payne (1900-1979)

Espalhadas pelo Cosmo, há gigantescas e densas nuvens – as nebulosas – feitas principalmente de hidrogênio e hélio, além de uma variedade de micropartículas de poeira e gelo. As nebulosas foram formadas ao longo de eras pela contínua ação da gravidade. São os berçários das estrelas. A formação de estrelas a partir dessas gigantescas nuvens é um processo bastante complexo, mas pode ser resumido da seguinte forma: lentamente, a gravidade torna as nuvens mais e mais densas; a gravidade acelera as partículas, fazendo com que a temperatura aumente continuamente (em um gás, a temperatura é uma grandeza que mede a energia média das suas moléculas); quando os prótons (núcleos dos átomos de hidrogênio) adquirem energia suficiente, tem início uma complexa cadeia de

reações termonucleares, em que núcleos de hélio são formados e energia é liberada. É basicamente assim que nascem as estrelas. O prefixo “termo” se refere ao fato de a fusão do hidrogênio em hélio só ocorrer em temperaturas muito altas.

A temperatura alta – milhões de graus Celsius – é necessária para que a estrela acenda por uma razão simples: a força nuclear, que mantém prótons e nêutrons ligados nos núcleos atômicos, só atua quando essas partículas estão muito próximas. Mas para se aproximar o suficiente para que a força forte aja, dois prótons precisam ter muita energia, pois só assim conseguem vencer a barreira da repulsão elétrica entre eles. Afinal, são partículas com a mesma carga elétrica. Para atingir a energia necessária, a temperatura no interior da estrela deve ser de milhões de graus Celsius.

A fusão do hidrogênio em hélio tem um subproduto fundamental: fótons. São produzidos abundantemente, e essa é a origem da luz das estrelas. O conhecimento sobre a física dos núcleos atômicos permitiu entender os complexos processos que ocorrem no interior das estrelas, as usinas onde são formados quase todos os elementos químicos. Vemos aqui, novamente, a conexão entre a microfísica e o Cosmo.

As reações de fusão nuclear liberam uma quantidade de energia muito superior a qualquer reação química. Isso é uma consequência da Teoria da Relatividade de Einstein. A fórmula mais famosa da Física, $E = mc^2$ (m é a massa e c é a velocidade da luz), exprime o fato de a matéria poder se converter em energia e vice-versa. Na região mais central do Sol, os prótons vagueiam quase livres, sofrem apenas a ação da força nuclear forte. Em um processo muito raro, quatro prótons se fundem. Mas para formar um núcleo de hélio (dois prótons e dois nêutrons), é necessário que dois dos quatro prótons se convertam em dois nêutrons, uma transição altamente improvável. No entanto, o número de prótons no interior do Sol é

imaginavelmente grande e compensa largamente a baixíssima probabilidade de núcleos de hélio serem formados.

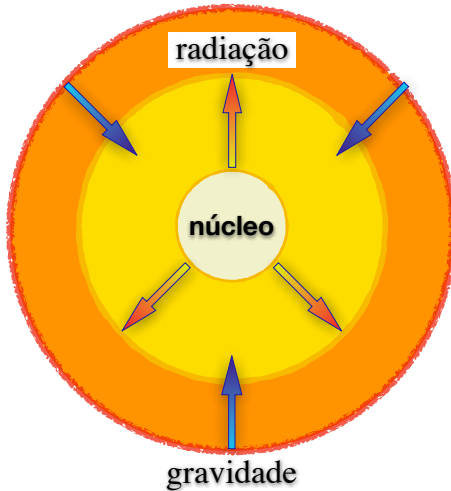
A massa do núcleo de hélio é ligeiramente *menor* menor que a soma das massas dos quatro prótons iniciais, e essa pequena diferença é convertida em energia. Como o quadrado da velocidade da luz é um número gigantesco, mesmo uma pequena diferença nas massas se converte em uma grande quantidade de energia, liberada sob a forma de fótons e neutrinos. Essa é a *fusão de hélio*, o processo fundamental que acontece no interior das estrelas, a origem da luz que nos ilumina.

Há estrelas de todos os tamanhos, desde as muito pequenas, do tamanho de Saturno, até as gigantes, milhares de vezes maiores que o Sol. Todas têm um tempo de vida finito. Quanto maior for a estrela, menor será o seu ciclo de vida. Em todos os casos, a geração de energia começa sempre da mesma forma: átomos de hidrogênio se fundindo no núcleo estelar, formando hélio e irradiando energia. Quando o estoque de hidrogênio acaba, a estrela se aproxima do fim, e que acontece a seguir depende da sua massa. As estrelas muito maiores que o Sol têm um final dramático.

O interior das estrelas, assim como o dos planetas, é dividido em camadas. Quanto mais internas, mais quentes. A fusão do hidrogênio ocorre na região central, o núcleo estelar, onde a temperatura atinge os milhões de graus Celsius necessários. A energia irradiada pela fusão do hidrogênio gera uma pressão para fora que equilibra a ação da gravidade. Sem a pressão da radiação, a gravidade faria a estrela desabar rapidamente sobre si mesma. Esse duelo de titãs mantém a estabilidade das estrelas como o Sol por alguns bilhões de anos, até que tudo mude.

Na Via-Láctea, a imensa maioria das estrelas são parecidas com o Sol. Suas massas variam entre metade e algumas vezes a massa do Sol (os astrônomos usam a massa do Sol

O interior do Sol



A fusão do hidrogênio ocorre no núcleo, onde a temperatura é de cerca de cinco milhões de graus

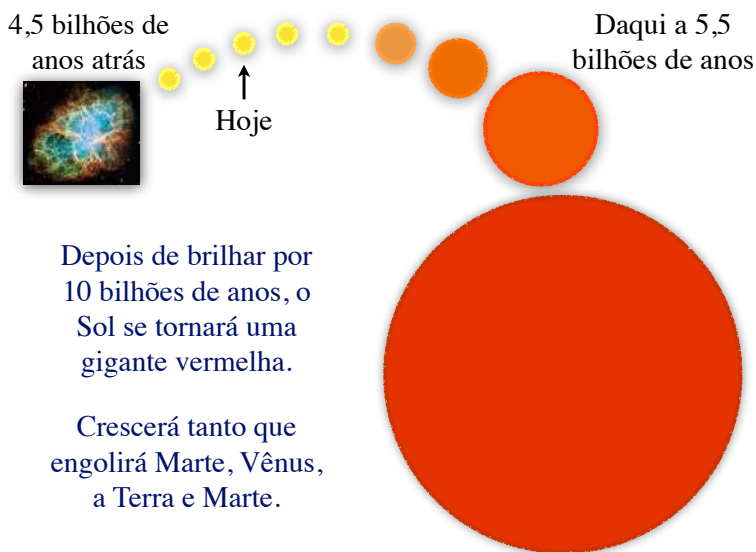
A pressão exercida pela radiação do núcleo compensa a pressão exercida pela gravidade

O interior do Sol, como o de todas as estrelas, é dividido em camadas. Na região central, o núcleo estelar, a temperatura é cerca de cinco mil vezes mais alta do que na superfície. A radiação produzida no núcleo exerce uma força para o exterior que compensa a compressão da gravidade.

como unidade). Quando o estoque de hidrogênio armazenado no núcleo do Sol ou de estrelas semelhantes é consumido, a estrela esfria. A temperatura agora não é mais suficiente para a fusão do hélio. As reações termonucleares cessam e uma nova etapa começa. A gravidade, vencendo momentaneamente a luta contra a pressão da radiação, faz a estrela encolher. A contração reaquece rapidamente o núcleo estelar. A maior temperatura permite que a fusão do hélio gerando carbono e oxigênio ocorra. Na fusão do hélio em carbono e oxigênio libera mais energia que a do hidrogênio em hélio, e a radiação vence a gravidade: a estrela cresce, empurra para fora as suas camadas mais externas. A estrela se torna uma *gigante vermelha*. Daqui a pouco mais de cinco bilhões de anos, será esse

o destino do Sol. Seu diâmetro expandirá tanto que varrerá a Terra do mapa.

Durante aproximadamente um bilhão de anos o Sol será uma gigante vermelha. Muito antes de engolir a Terra, um pequeno aumento na temperatura do Sol causará a evaporação de todos os oceanos. A radiação intensa tornará a vida na Terra impossível, eliminando até mesmo as bactérias mais resilientes. Durante essa fase, a zona habitável se deslocará para as órbitas de Júpiter e Saturno. Então, quando não houver mais hélio para as reações de fusão, a fase gigante vermelha do Sol chegará ao fim.



Desde a formação do Sol, transcorreram-se 4,5 bilhões de anos. Ele vai permanecer como é hoje por mais 5 bilhões de anos. A partir de então, se tornará uma gigante vermelha. Permanecerá nessa fase por mais um bilhão de anos, quando se tornará um anã branca.

Boa parte da matéria do Sol se dispersará lentamente pelo espaço sideral, formando uma nebulosa planetária. Esse será o destino da maioria das estrelas da Via Láctea.

Após a fase gigante vermelha, resta da estrela apenas um miolo denso, feito essencialmente de hélio. Sem energia suficiente para as reações de fusão, a gravidade age agora sem oposição, e segue esmagando o caroço remanescente. Se a massa do miolo for no mínimo metade da massa original, chega um momento em que a força esmagadora da gravidade encontrará uma oposição. É uma oposição quântica.

Ao comprimir o caroço, a gravidade diminui o espaço entre os átomos. Reduz também o espaço disponível para os elétrons dentro dos átomos. Em certo momento, entra em ação um efeito quântico: dentro de um átomo, dois elétrons não podem estar simultaneamente em um mesmo estado quântico. Esse é o *Princípio de exclusão de Pauli*. A contração avassaladora causada pela gravidade torna os átomos mais próximos. Em certo ponto, o elétrons passam a oferecer resistência à pressão da gravidade. O astrofísico estadunidense Kip Thorne, vencedor do Prêmio Nobel, usa uma alegoria para ilustrar esse efeito, comparando a reação dos elétrons com a claustrofobia. À medida que a gravidade comprime o que resta da estrela, os átomos tornam-se muito próximos. Confinados em regiões cada vez menores, os elétrons se tornam “claustrofóbicos” e exercem uma pressão para fora cada vez maior. Quando a pressão para fora exercida pelos elétrons se iguala à pressão para dentro feita pela gravidade, um novo equilíbrio é atingido. A estrela se torna uma *anã branca*, uma estrela incrivelmente densa, rica em carbono e oxigênio, formados durante a compressão. Estima-se que na fase anã branca reste apenas metade da massa original do Sol. As anãs brancas são extremamente densas. O Sol terá um de diâmetro um pouco maior que o da Terra.

No interior de uma anã branca, entretanto, há ainda muita energia térmica acumulada. A energia térmica se dispersará lentamente, e o que restar do Sol continuará brilhando por muitos bilhões de anos. Quando finalmente tiver dissipado a energia térmica acumulada, o Sol apagará definitivamente. Seus restos mortais serão uma *anã negra*, um objeto celeste ultradenso, invisível e inerte.

Existem outros tipos de estrelas, maiores e mais luminosas que o Sol, bolas gigantes de hidrogênio e hélio com uma temperatura infernal. As estrelas gigantes têm um diâmetro que vai de dezenas a milhares de vezes o do Sol. No interior das estrelas gigantes, a temperatura é muito superior à do Sol, há energia suficiente para reações termonucleares gerarem elementos mais pesados, como potássio, magnésio, titânio etc. que temos nos nossos corpos. Nessas reações, muita energia é liberada. A pressão da radiação empurra as camadas mais externas da estrela, e todas se tornarão supergigantes vermelhas. Mas seu fim será glorioso. Estão destinadas a propiciar um dos espetáculos mais fantásticos e assombrosos da Natureza.

A energia que as reações nucleares liberam é maior na fusão de núcleos mais pesados, mas o limite é o núcleo de ferro. Nele, prótons e nêutrons estão mais fortemente ligados do que nos núcleos de qualquer outro elemento químico. Reações envolvendo núcleos de ferro consomem energia, em vez de liberá-la. Os elementos mais pesados fazem com que o núcleo estelar das supergigantes, além de muito mais pesado, seja bem menor que o da estrela original. No final da fase supergigante vermelha, a combinação da massa e do diâmetro do núcleo estelar torna a sua atração gravitacional irresistível. As camadas externas da estrela colapsam. Camadas de matéria com vários milhões de quilômetros de extensão desabam em um intervalo de alguns segundos. Durante o colapso, a tempera-

tura se torna incrivelmente alta. Uma caótica e incontrolável cadeia de reações termonucleares é detonada, causando uma explosão apocalíptica: as *supernovas*.

Na explosão das supernovas, temperaturas absurdamente altas são atingidas, e é nesse momento que os núcleos atômicos mais pesados que o ferro (cobre, chumbo, ouro, urânio etc.) são forjados. Esse material é lançado violentamente no espaço sideral, e talvez venha a fazer parte de alguma nebulosa. Dentro dos nossos corpos, há cerca de 40 elementos mais pesados que o ferro, restos de explosões de estrelas gigantes. A morte violenta dessas estrelas contribuiu para o surgimento da vida na Terra e, quem sabe, em outros cantos do Universo.

Durante muitos dias, ou até mesmo semanas, as supernovas brilham intensamente, competindo com a luz da própria galáxia. Aos poucos o seu brilho vai diminuindo, mas continua intenso durante meses. Após a explosão da supernova, o que resta da magnífica estrela é um corpo esférico com massa maior que a de uma anã branca e um diâmetro de apenas algumas dezenas de quilômetros. Os elétrons não mais oferecem resistência suficiente para deter a gravidade. Os átomos são espremidos até que os elétrons sejam absorvidos pelos prótons, formando nêutrons.

Os nêutrons, como os elétrons, possuem a propriedade do *spin*, e assim estão sujeitos à mesma limitação, ou seja, dois nêutrons em um núcleo atômico não podem estar simultaneamente no mesmo estado quântico. A “claustrofobia” dos nêutrons, tal como a dos elétrons, impõe a última e definitiva resistência à compressão da gravidade. Se a massa remanescente na esfera for menor que duas vezes a massa do Sol, a resistência oferecida pelos nêutrons terá força suficiente para impedir o colapso total da estrela. Formam-se então os objetos mais compactos do Universo, as *estrelas de nêutrons*, cujas massas são algumas vezes maiores que a do Sol, concentradas em uma esfera com 10 ou 20 quilômetros de raio. Mas se a



Fotografia da explosão de uma supernova, registrada em 1994.

Crédito: NASA/ESA,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=407520>.

massa remanescente for muito maior que a do Sol, algo muito mais assustador acontecerá.

Um ditado popular diz que tudo o que sobe, cai. Uma pedrinha jogada para o alto atinge uma certa altura, para e depois volta ao ponto de partida. Estamos acostumados a esse fato desde que nascemos, é tão banal que sequer pensamos sobre ele. Afinal, vivemos todos presos à Terra pela ação da gravidade. A altura que um objeto atinge quando é lançado verticalmente para cima depende da velocidade com que é arremessado. Quanto maior for a velocidade do lançamento, mais alto ele chegará. Nenhuma novidade.

No século XVIII, havia um cientista inglês, John Mitchell, que era intrigado com esse fenômeno corriqueiro. Refletindo sobre ele, chegou a uma conclusão surpreendente. Se um objeto fosse arremessado com velocidade suficiente, seria desacelerado pela gravidade, mas não seria parado. Escaparia para

sempre. Mitchell calculou a velocidade com que um objeto deveria ser lançado de forma a escapar da atração da gravidade terrestre, seguindo indefinidamente pelo espaço sideral. Essa é a *velocidade de escape*.

A velocidade de escape varia de acordo com a massa do planeta ou da estrela. Depende também do diâmetro do corpo celeste. Se o Sol tivesse um diâmetro menor, na sua superfície a velocidade de escape seria maior. Quanto mais compacto for um objeto, maior será a atração da sua gravidade. Na Terra, a velocidade de escape é de 11 km/s. Essa é a velocidade que um foguete precisa atingir para colocar um satélite em órbita ou seguir rumo à Lua, à Marte ou à qualquer outro lugar. A Lua tem uma massa e raio bem menores. A velocidade de escape na sua superfície é de 2,4 km/s, enquanto que na superfície do Sol é de 615 km/s.

Mitchell conhecia muito bem tanto as leis de Newton como a teoria corpuscular da luz (como Newton, Mitchell imaginava a luz como um feixe de corpúsculos). Ele concluiu que poderiam existir corpos celestes tão compactos, com massa tão grande que nem mesmo a luz conseguiria escapar da sua gravidade. Se uma estrela como o Sol tivesse toda sua massa concentrada em uma esfera de apenas 20 km de diâmetro, ela seria invisível. Mesmo que brilhasse intensamente, a sua luz estaria aprisionada. Mitchell imaginou que deveria haver muitas estrelas escuras espalhadas pelo Cosmo.

A leitora ou o leitor atentos talvez se perguntem como seria possível identificar um corpo celeste invisível. Essa, na verdade, é uma ótima pergunta. Podemos identificar qualquer corpo celeste pelos efeitos causados pela sua gravidade. Assim foi descoberto o planeta Netuno. Todo corpo massivo deforma o espaço-tempo, afetando o que há em seu redor. Assim, a presença de objetos invisíveis pode ser detectada pelos efeitos gravitacionais que causa sobre os corpos visíveis ao seu redor.

Mais adiante vamos falar de outro fato desconcertante, descoberto graças aos seus efeitos gravitacionais.

As “estrelas escuras” de Mitchell se aproximam do que hoje chamamos de *buracos negros*. Há inúmeros espalhados pelo Universo, inclusive na nossa Galáxia. São monstros cósmicos famintos de matéria e energia que as estrelas supergigantes nos deixam como herança. Não sabemos o que há dentro deles, pois nenhuma informação escapa. Uma sonda enviada para dentro de um buraco negro faria uma viagem sem volta. A existência de buracos negros é uma das consequências da Relatividade Geral. Sua gravidade é irresistível, devoram tudo ao seu redor.

A “borda” de um buraco negro, ou *horizonte*, na linguagem moderna, é uma linha a partir da qual a velocidade de escape se torna maior que a velocidade da luz. O que quer que cruze esse limite, será fatalmente engolido. O horizonte de um buraco negro é o ponto de não retorno, onde o próprio tempo congela.

Como um observador, a uma distância segura, veria um objeto ser engolido por um buraco negro? O andamento do tempo é afetado pela gravidade, quanto maior ela for, mais devagar ele transcorrerá quando observado a uma distância segura. Então, algo inesperado aconteceria. O observador distante veria o objeto se aproximar do horizonte cada vez mais lentamente (a gravidade intensa retarda o tempo). Exatamente no horizonte, o observador veria o objeto imóvel, congelado para sempre! O objeto não ficaria imóvel, seguiria seu destino fatal. A sua queda é inevitável, mas não seria assistida pelo nosso observador distante.

A Relatividade Geral havia sido testada com sucesso no âmbito do Sistema Solar. Muitos, no entanto, desconfiavam que talvez ela não fosse correta em escalas maiores, onde não havia ainda sido testada. Para estes, buracos negros não deveriam existir, a previsão deveria estar errada. Após os anos

1960, as evidências foram se acumulando, e desde então muitos buracos negros foram descobertos. Recentemente, até mesmo uma imagem do entorno imediato de um buraco negro foi registrada e levada pela internet a todos os recantos do planeta. Os buracos negros são invisíveis, mas é possível observar o último suspiro de um corpo celeste sendo tragado por um. Nos momentos que antecedem o trágico fim, jatos de radiação são emitidos.

Se não sabemos o que há dentro dos buracos negros, pelo menos sabemos como eles se formam. São o resultado da evolução das estrelas supergigantes, dezenas ou centenas de vezes maiores que o Sol. Essas estrelas se tornarão supergigantes vermelhas. Depois de a supernova explodir, espalhando toda sorte de elementos químicos pelo espaço, basta que a massa do miolo que resta seja maior que um valor crítico (cerca de três vezes a massa do Sol) para que o destino final da estrela esteja selado. Com uma massa muito grande, nem mesmo a pressão para fora exercida pelos nêutrons conseguirá deter a pressão da gravidade. A estrela se contrairá indefinidamente, esmagada pela gravidade irresistível. Assim surgem os buracos negros.

Capítulo 10

Expansão

No princípio era o caos e a escuridão. Do caos criou-se a ordem, e da escuridão se fez a luz. Com algumas variações, assim começam mitos de criação de Povos que jamais souberam da existência uns dos outros, separados no tempo e no espaço. A semelhança das narrativas sugere que a indagação sobre como tudo à nossa volta surgiu talvez seja tão antiga quanto a própria Humanidade.

A Cosmologia é o ramo da Física que estuda o Universo como um todo, na sua maior escala. Ao longo dos últimos 50 anos, o avanço da tecnologia permitiu fazer observações astronômicas cada vez mais detalhadas e precisas, e isso tornou a Cosmologia uma ciência com sólida base observacional. As informações mais recentes, analisadas em conjunto, permitem reconstituir a evolução do Universo com um bom grau de certeza, embora haja ainda muitas lacunas, e futuras descobertas podem mudar radicalmente nossa visão atual. Na verdade, os primeiros resultados do Observatório Espacial James Webb indicam que talvez seja esse o caso.

Existe um consenso entre os físicos: o Universo está em expansão. Começou quando seu volume era ínfimo e a densidade de energia, inimaginável. Desde então, seu volume aumenta continuamente. Há sólidas evidências sobre isso, evidências de várias naturezas. Todas indicam que a expansão teve início há 13.8 bilhões de anos. Na verdade, a expressão “idade do Universo” se refere apenas ao início da expansão, pois não se sabe o que houve antes, ou mesmo se houve um antes. Talvez nunca saibamos. Os desafios teóricos e experimentais são enormes, de modo que a história do Universo permanecerá como um tema fascinante por muito tempo.

Einstein acreditava que o Universo era estático, infinito e eterno. Era essa a imagem que se fazia até 1929, ainda que não houvesse observações astronômicas que sustentassem esse ponto de vista. Então, uma descoberta mudou completamente a visão de mundo corrente: o Universo, ao contrário do que se acreditava, está em expansão: as galáxias estão se afastando umas das outras. Como sempre acontece em ocasiões como essa, uma descoberta fundamental traz novas e difíceis questões. A história, dessa vez, começa com uma jovem astrônoma estadunidense, Henrietta Swan Lewitt.

Lewitt ingressou na Sociedade para Instrução Colegiada de Mulheres, da Universidade de Harvard. Obteve seu diploma em 1892, e então voluntariou-se para trabalhar no Observatório Astronômico da universidade. Depois de alguns anos trabalhando de graça no observatório, Lewitt finalmente passou a receber um salário. Seu trabalho era bastante tedioso: analisar e catalogar milhares de fotografias de estrelas e galáxias tiradas por câmeras acopladas aos telescópios. A tarefa requeria paciência e olhos atentos aos pequenos detalhes, para a qual o diretor do observatório, Edward Pickering, resolveu apostar em uma equipe só de mulheres.

Analisando as fotografias, Lewitt fez uma das descobertas mais fundamentais da Astronomia, e com ela criou um método para medir distâncias de estrelas longínquas. A ideia é relativamente simples, sobretudo depois de ter sido pensada. A *luminosidade* absoluta de uma fonte luminosa, também chamada de magnitude ou brilho intrínseco, é quantidade total de energia que a fonte irradia em todas as direções. A luminosidade absoluta pode ser medida posicionando um detector muito próximo à fonte. À medida que nos afastamos da fonte luminosa, vemos o seu brilho diminuir segundo uma lei matemática bem conhecida. Quando a fonte está distante, o brilho que se mede é a *luminosidade aparente*. Há uma relação simples entre as três variáveis, os brilhos intrínseco e aparente da fonte e a sua distância ao observador. Conhecendo duas, determina-se a terceira. Assim, conhecendo a luminosidade absoluta e medindo o brilho aparente, pode-se determinar a distância da fonte luminosa. No caso das estrelas e galáxias, a dificuldade era determinar a luminosidade absoluta de objetos muito distantes.

Existe um tipo de estrela com uma propriedade muito peculiar. São as Cefeidas, estrelas gigantes cujo brilho varia regularmente com o tempo, oscilando entre um máximo e um mínimo devido aos complexos processos nucleares no seu interior que fazem a estrela pulsar. As Cefeidas estão por toda parte, inclusive na Via Láctea. Algumas estão suficientemente próximas para que suas distâncias sejam medidas com boa precisão. Medindo o seu brilho aparente, e conhecendo a distância, pode-se determinar a luminosidade intrínseca.

No acervo do observatório havia centenas de fotografias de Cefeidas. Lewitt analisou cuidadosamente várias séries de fotografias de muitas Cefeidas tiradas em dias diferentes, o que permitia determinar o período de oscilação luminosa de cada uma, que varia entre 1 e 50 dias. Lewitt descobriu uma relação entre a frequência com que o brilho das Cefeidas oscila e as suas

luminosidades absolutas. As duas características, frequência de oscilação e brilho intrínseco, estão relacionados por uma lei matemática simples. Quanto maior o brilho intrínseco, mais longo é o período de oscilação. Assim, medindo a frequência com que o brilho aparente varia, algo razoavelmente simples, pode-se determinar a luminosidade absoluta da estrela e, conseqüentemente, saber a que distância está de nós. Lewitt comparou distâncias conhecidas com os valores obtidos com seu método (essa é a forma básica de calibrar um instrumento). Assim foi que a jovem Henrietta Lewitt inventou um método preciso para medir distâncias de galáxias longínquas observando as Cefeidas nelas contidas. Sua descoberta viria a mudar radicalmente a forma de ver o Universo.



Henrietta Leavitt (1868-1921).

Existe no céu muita coisa além de estrelas e planetas. As nebulosas, por exemplo. São imensas nuvens de gás e micro grãos de poeira encontradas no espaço interestelar, uma

espécie de berçário de estrelas. Algumas nebulosas são visíveis a olho nu. São conhecidas desde a Antiguidade, mas não se sabia o que elas são. Até o início dos anos 1920, eram consideradas parte da nossa galáxia. Em 1923, Edwin Hubble, provavelmente o maior astrônomo estadunidense, revelou ao mundo que o Universo não se resume à Via-Láctea, é muito maior do que se supunha. Usando o método criado por Lewitt, Hubble descobriu que muitas nebulosas estão a imensas distâncias de nós, distâncias muito maiores que o tamanho da nossa galáxia. Mostrou que a Via-Láctea é apenas uma entre bilhões, ou mesmo trilhões de outras galáxias. Guardadas as devidas proporções, pode-se comparar o impacto da descoberta de Hubble com a surpresa dos europeus quando souberam da existência de um continente imenso, com enormes cidades e civilizações sofisticadas e muito antigas.

Seis anos depois de revelar a vastidão do Cosmo, Hubble fez outra descoberta ainda mais espetacular. Usando novamente o método de Lewitt para medir distâncias, Hubble constatou que o Universo não é estático. Ao contrário, nele tudo está em movimento: o Universo está se expandindo. As galáxias se afastam continuamente uma das outras, e o fazem tão mais rapidamente quanto mais distantes entre si elas estiverem.

Uma evidência de que o Universo está em movimento é acessível a todos os que podem olhar para o céu à noite. Se Universo fosse estático, infinito e eterno, como acreditava Einstein, em qualquer direção que olhássemos sempre veríamos várias galáxias, por mais distantes que estivessem. O céu noturno deveria ser uniformemente preenchido por corpos celestes brilhantes, deveria ser bastante luminoso. Por que então o céu noturno é escuro?

Não se sabe exatamente quando essa pergunta foi feita pela primeira vez, mas, curiosamente, uma resposta parcial foi sugerida no século XIX por um poeta, Edgar Allan Poe. Segundo

ele, o Universo não seria eterno, teria surgido em algum momento no passado. Poe se baseou no fato de a velocidade da luz ser finita. Assim, a luz de estrelas muito distantes não teria tido tempo suficiente para chegar até nós. Poe, em 1848, não sabia que o Universo está expandindo. Isso só seria revelado 80 anos depois. Por isso sua resposta, embora na direção correta, é incompleta. De fato, não há informação que se propague instantaneamente. A luz da estrela mais próxima, a *Proxima Centauri*, leva cerca de quatro anos para chegar aqui.

Quanto mais distante estiver uma galáxia, mais tempo será necessário para que sua luz chegue aos nossos telescópios. Em outras palavras, a luz de galáxias distantes que vemos hoje foi emitida há muito tempo, talvez antes mesmo de a Via Láctea existir. Olhamos para o céu e sempre vemos o passado. Muita coisa aconteceu desde então. Em um Universo em expansão, a luz de corpos distantes viajou muito tempo até chegar a nós. Durante esse tempo, eles seguiram se afastando continuamente. As galáxias distantes cuja luz vemos hoje não estão mais no mesmo lugar, estão muito mais longe.

Pode-se afirmar com bastante segurança que a expansão do Universo teve início há 13,8 bilhões de anos, mesmo que não se saiba exatamente como tudo começou, ou mesmo se houve um começo. A “idade” do Universo estabelece um limite: só é possível ver objetos celestes cuja luz levou no máximo 13,8 bilhões de anos para chegar até nós. A luz da galáxia mais distante já observada foi emitida há pouco menos de 13,4 bilhões de anos. Quando olhamos para ela, vemos Universo na sua infância.

Distâncias podem ser medidas usando unidades de tempo. Um *ano-luz* é a distância que a luz percorre em um ano. Para ir de um extremo ao outro da Via Láctea, a luz levaria 100 mil anos. Sua extensão, então, é de 100 mil anos-luz. Uma galáxia cuja luz tenha sido emitida há 13,8 bilhões de anos, afastou-

se da Terra durante todo esse tempo. Atualmente, está cerca de 46 bilhões de anos-luz de distância. Ou seja, quando falo em Universo, me refiro ao que é possível observar: tudo o que esteja contido em uma esfera centrada na Terra e com raio de aproximadamente 46 bilhões de anos-luz.

Seja o Universo finito ou não, não temos como saber o que há além do que é possível observar. É razoável supor que seja uma extensão do que conhecemos. As observações astronômicas levam a crer que vivemos em um Universo que, observado em escala muito grande, é isotrópico (o mesmo aspecto em qualquer direção) e homogêneo (o mesmo aspecto em qualquer distância). A consequência imediata é que qualquer observador, onde quer que esteja, verá o mesmo que vemos daqui da Terra, pois não existe um centro a partir do qual a expansão do Universo começou. Um observador na galáxia mais distante também veria, como nós, uma porção do Universo contida em uma esfera centrada em sua posição e com raio de aproximadamente 46 bilhões de anos-luz. Se o Universo se estende indefinidamente, a luz de galáxias que estão além do nosso limite de visão ainda estará a caminho da Terra. Na verdade, seria muito pretensioso supor que o Universo se resume apenas ao que podemos observar, que não há nada além.

O Universo não expande ocupando um espaço externo, imutável e que sempre existiu. Não existe um lado de “fora” do Universo, não há uma “plateia” de onde se pode assistir ao Universo evoluir, uma passarela por onde ele desfila majestosamente (hoje é Carnaval no Rio de Janeiro). *O espaço é criado à medida que o Universo se expande.* As galáxias se afastam umas das outras não por que se movem muito rapidamente, e sim porque é o próprio espaço que está continuamente expandindo, se “esticando” como um elástico. As galáxias se afastam umas das outras, mas não saem da sua vizinhança

imediate, são levadas pela expansão do espaço como se fossem troncos de árvore na correnteza de um rio.

A imagem de um padeiro fazendo um pão com passas talvez dê uma ideia aproximada do que é a expansão. Após misturar os ingredientes, incluindo as passas, o padeiro deixa a massa descansar para que o fermento aja. Horas depois, a massa dobrou de tamanho. Todas as passas estão agora mais distantes entre si do que estavam horas antes, sem, no entanto, terem se deslocado através da massa. Desde o início da fermentação, cada passa permanece no mesmo lugar, o que se move é a massa. Sob a ação do fermento, a massa se multiplica, sempre aumentando seu volume. Não se sabe exatamente que fermento provoca a expansão do Universo.

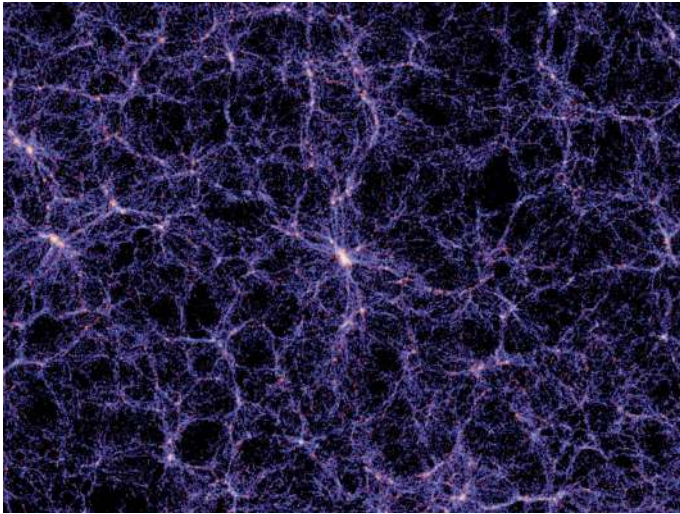
A expansão do Universo, no entanto, só é percebida em escalas muito grandes. Não afeta o destino da Via Láctea e nem o das galáxias próximas. A Via Láctea e suas vizinhas formam um aglomerado de galáxias. Movem-se continuamente umas em relação às outras, girando em torno de um centro de massa, umas se aproximando, outras se afastando da Via Láctea, uma dança local que não sofre nenhuma influência perceptível da expansão do Universo.

Zoom é o nome de um livro que eu adoro, já dei de presente a muitas crianças. Não há texto, só ilustrações, uma por página. A primeira imagem é um pouco estranha, não se pode dizer o que é. Na página seguinte, um primeiro zoom: a figura da página anterior é a crista de um galo. Virando a página novamente, um novo zoom e vemos outra cena: o galo da página anterior está em cima de uma cerca, observado por duas crianças em uma janela. Na ilustração seguinte, as crianças e a janela estão em uma casa em uma fazenda. Mudando a página, vemos que a casa, na verdade, faz parte de um jogo de montar com que uma menina brinca. Mais uma

página e vemos que menina está na capa de uma revista, apoiada no colo de um menino que dorme no convés de um navio. De página em página, o zoom continua. O desenho de uma página é sempre um detalhe da ilustração da página seguinte. Nas últimas páginas, vemos a Terra, azul, linda, flutuando no espaço, diminuindo de tamanho até virar um pontinho. É como veríamos a Terra se estivéssemos em Marte.

E se continuássemos o zoom? À medida que as páginas fossem viradas, veríamos o Sistema Solar, e em seguida a Via Láctea, o aglomerado de galáxias de que ela faz parte, o super aglomerado, englobando o nosso e outros aglomerados “próximos”. Seguindo o zoom, veríamos que toda a matéria do Universo esta concentrada em algumas regiões formando filamentos que se conectam, entremeados por imensos vazios. É curiosa a semelhança entre essa teia cósmica e uma rede de neurônios. Essas imagens são feitas com as observações astronômicas feitas na Terra. Os humanos ainda não saíram do Sistema Solar. Em 1977, duas sondas, Voyager I e II, foram lançada numa missão exploratória do Sistema Solar. Uma missão sem retorno. Nesse momento, elas estão no limite que separa a parte mais exterior do Sistema Solar do espaço interestelar. Simulações numéricas do Universo em larga escala são feitas baseadas nas informações disponíveis atualmente, mas, como sempre, há muitas perguntas importantes ainda sem resposta, e sempre haverá espaço para mudanças no nosso entendimento. Entretanto, o quadro geral está bem estabelecido. À medida que o zoom prossegue, o Universo vai se tornando cada vez mais homogêneo e isotrópico.

Quanto ao destino do Universo, não se sabe ainda se ele continuará a expandir eternamente ou se, em algum momento, parará de crescer e começará a encolher. Em uma expansão sem aceleração, as *distâncias* entre as galáxias aumentam em um ritmo uniforme. Mas com aceleração, a *velocidade* da expansão aumenta continuamente, e com isso as distâncias cres-



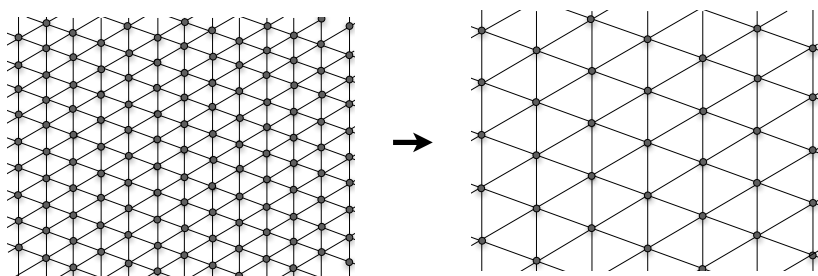
Simulação numérica do Universo em larga escala. Cada ponto luminoso representa uma galáxia. Nos nós da teia estão os super aglomerados de galáxias.

Crédito: Project Horizon, European Southern Observatory.

cem cada vez mais rapidamente, como os preços em um país com inflação alta. Há apenas 25 anos descobrimos que o Universo está expandindo de forma acelerada. Mais ainda, tem sido assim desde alguns bilhões de anos. Se não houver reversão, num futuro felizmente muito distante (alguns bilhões de anos), as galáxias estarão tão longe uma das outras e se afastando com velocidades tão altas que não mais se verão. Fora do disco da Via Láctea, o céu ficará quase que completamente negro.

Não se sabe se o Universo é infinito ou não, se sempre existiu ou se teve um começo. Mas não existem fronteiras mesmo em um Universo finito. O Universo pode ser finito e ilimitado, pois não há um “lado de fora” . Se o Universo for finito, uma nave que parta da Terra e viaje sempre em uma única direção, retornará ao ponto de partida em algum momento num futuro

longínquo, como uma pessoa que se desloca ao longo da linha do equador terrestre, sempre na mesma direção. Já em um Universo infinito, uma nave que parta da Terra e siga sempre na mesma direção jamais retornará ao ponto de partida. As observações astronômicas indicam que essa última é a hipótese mais provável.



Imagine um reticulado que se estende em todas as direções, tendo uma esfera em cada vértice. Se esticássemos o reticulado de forma uniforme e em todas as direções, a distância entre as esferas aumentaria, embora elas se mantenassem nos vértices.

O som da sirene de uma ambulância parece mais estridente quando ela se aproxima velozmente, e mais grave quando se afasta. Ao se aproximar, o comprimento de onda do som fica ligeiramente menor – som mais agudo, e ao se afastar, o comprimento de onda fica ligeiramente maior – som mais grave. São efeitos do movimento da fonte. Essa distorção no som é conhecida como efeito Doppler, acontece com qualquer tipo de onda, e é tão mais intenso quanto maior for a velocidade da fonte. A luz das galáxias que se afastam sofre o mesmo efeito. Nesse caso, o comprimento de onda se torna ligeiramente mais longo e a luz fica mais avermelhada. Quanto mais rapidamente a galáxia estiver se afastando, mais acentuado será o desvio para o vermelho.

As linhas espectrais do hidrogênio são medidas com grande precisão nos laboratórios na Terra. Na luz das galáxias distantes, ricas em hidrogênio como todas as outras, as linhas espectrais apresentam claramente um desvio para vermelho. É possível estimar a velocidade de afastamento de uma galáxia medindo o desvio para o vermelho das linhas espectrais. O desvio para o vermelho é uma prova inequívoca de que o Universo não é estático.

Hubble mediu o desvio para o vermelho de cerca de 40 galáxias longínquas, cujas distâncias haviam sido determinadas com a técnica desenvolvida por Henrietta Lewitt. Ele descobriu que a velocidade de afastamento de uma galáxia é proporcional à sua distância em relação à Terra. Quanto mais distante estiver, maior é o desvio para o vermelho, o que é equivalente a dizer que mais rápido a galáxia se afasta. Essa descoberta tem implicações profundas, revolucionando o modo de ver o Universo.

Há um episódio marcante na história da Física. A Teoria da Relatividade de Einstein havia sido confirmada em Sobral, no Ceará, e embora poucos entendessem a intrincada matemática (geometria diferencial de espaços curvos), ela passou a ser aceita como a teoria correta da gravitação. Einstein virou o rosto associado à Ciência.

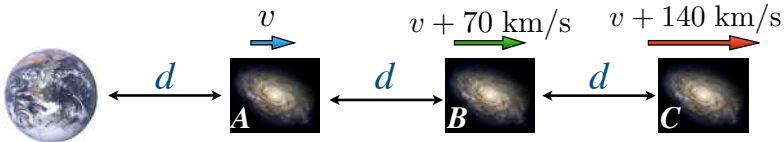
Ironicamente, apesar da revolução que causou ao mostrar que o espaço-tempo é curvo, Einstein via o Universo da mesma forma que Newton: estático, eterno e infinito. Havia dificuldades conceituais sérias na teoria da gravitação de Newton. Como dois corpos poderiam atrair um ao outro sem que houvesse contato físico? Que mecanismo transmitiria a força entre eles? Se todos os corpos se atraem, por que o Universo não colapsa, o que o mantém estático? Newton se esquivava em responder a essas perguntas. Havia outra dificuldade capital na gravitação de Newton: a força entre dois corpos é transmitida instantaneamente. Se algo acontecesse com o Sol, sentiríamos

o efeito no mesmo instante. Mas nenhuma informação pode ser transmitida com velocidade superior à da luz.

Einstein havia respondido todas essas questões com a Relatividade Geral, em 1915. E então, em 1917, ele percebeu que a sua teoria tinha uma implicação que para ele era um defeito desagradável: o Universo não poderia ser estático, tudo teria que estar em movimento. Movido pelas suas convicções, Einstein adicionou um novo termo à sua equação, a *constante cosmológica*, que desempenharia o papel de uma “antigravidade”, um efeito de caráter repulsivo que equilibraria a atração da gravidade, tornando o Universo estático, como ele achava que deveria ser.

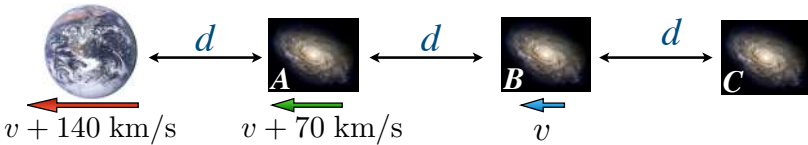
O físico soviético Alexander Friedmann era um dos poucos que conseguiam navegar pela complexa matemática da Relatividade Geral. Em 1922, Friedmann demonstrou que o Universo tornado estático pela constante cosmológica seria altamente instável. À menor perturbação, ele necessariamente se expandiria ou se contrairia. Seu artigo, apesar de ter sido publicado em uma prestigiosa revista alemã, não teve muita repercussão. Recebeu de Einstein uma crítica ácida. Cinco anos depois, o padre belga Georges Lemaître, sem ter conhecimento do trabalho de Friedmann, chegou à mesma conclusão. Lemaître foi mais além, propondo que a expansão do Universo seria a causa do desvio para o vermelho das linhas espectrais. Einstein, assim como fizera com Friedmann, descartou o estudo de Lemaître.

E então, veio a descoberta de Hubble, em 1929: o Universo não é estático, como pensava Einstein, mas está em expansão. Einstein lamentou profundamente ter maculado sua equação introduzindo a constante cosmológica. Mais tarde, admitiu que esse havia sido o maior erro científico que cometeu em toda a sua vida. Mesmo os maiores gênios não estão livres de preconceitos.



Lei de Hubble: a cada 3,2 milhões de anos-luz de distância, a velocidade aumenta de 70 km/s

Não há referenciais privilegiados no Universo!



A lei de Hubble: a galáxia A se afasta da Terra com certa velocidade. A galáxia B, a 3,2 milhões de anos-luz de distância de A, se afasta da Terra com uma velocidade maior, 70 km/s a mais que a de A. A galáxia C, a 3,2 milhões de anos-luz de distância de B, se afasta da Terra com uma velocidade ainda maior, 140 km/s a mais do que a de A. A velocidade de afastamento aumenta sempre de 70 km/s a cada 3,2 milhões de anos-luz de distância. A relação entre distância e velocidade permite estimar quando a expansão do Universo teve início.

Capítulo 11

Bang? Ou Bounce?

O título deste capítulo resume uma questão fundamental: O Universo teve um início, quando tempo e espaço, matéria e energia foram criados? Ou vivemos em um Universo que sempre existiu? Esse é o problema fundamental com que a Cosmologia moderna se depara.

A visão de um Universo estático, infinito e eterno foi superada quando Hubble descobriu a expansão. Se olharmos para o futuro, veremos as distâncias entre as galáxias aumentarem, mas se invertêssemos a seta do tempo e olhássemos para o passado, veríamos o Universo encolher. Segundo a ideia do *Big Bang*, no limite o Universo se resumiria a um ponto, com densidade infinita, no qual nenhuma Física seria possível: a singularidade, que daria início ao tempo, ao espaço e a tudo o que existe. Nada haveria antes desse momento. Não haveria sequer sentido em pensar em um “antes”, seria o mesmo que perguntar a uma pessoa como ela era antes de nascer.

Apesar de não ser possível lidar com a singularidade, a hipótese do *Big Bang* tornou-se hegemônica. Mas há 50 anos, com uma contribuição decisiva dos cosmólogos do CBPF, li-

derados por Mario Novello, a hipótese do *Big Bang* passou a competir com a do *Big Bounce*, o grande ricochete, segundo a qual o Universo sempre existiu. Ao contrário do *Big Bang*, no *Big Bounce* há, sim, sentido em falar do “antes”: o volume mínimo do Universo foi atingido ao final uma fase anterior de contração. A partir desse momento, teve início a atual fase de expansão. Evita-se assim o problema da singularidade.

A ideia do *Big Bounce* é a minha favorita, mas não temos ainda como saber o que de fato ocorreu, se houve ou não um início. É possível que no futuro os cosmólogos consigam descobrir meios para testar as duas hipóteses. Em todo caso, há um consenso sobre o fato de a expansão ter tido um início a partir de um volume mínimo, de densidade inimaginável, há 13,77 bilhões de anos atrás. Chamo esse momento de *Big B*.

A história da Ciência está repleta de descobertas acidentais. Procura-se uma coisa, acha-se outra. Assim foi com um dos achados mais importantes da história da Astronomia, em 1964. É a prova mais contundente sobre a expansão do Universo. Dois astrônomos estadunidenses, Arno Penzias e Robert Wilson, eram funcionários de um laboratório de pesquisas privado, pertencente à companhia telefônica AT& T. O laboratório, *Bell Labs*, havia sido fundado em 1925. Os dois astrônomos estudavam a radiação proveniente do centro da Via Láctea. Essa radiação consiste em ondas eletromagnéticas na frequência de rádio (comprimentos de ondas que variam entre alguns milímetros e muitos quilômetros).

Essa é uma medida difícil porque o sinal compete com um ruído de fundo causado pela interferência das ondas de rádio da atmosfera. Penzias e Wilson, no entanto, eram bastante habilidosos e conseguiram contornar boa parte da interferência. Restava porém um ruído, ondas eletromagnéticas na frequência de micro-ondas, que não conseguiam de forma alguma eliminar.

Penzias e Wilson ficaram intrigados com um fato: o ruído tinha exatamente a mesma frequência e intensidade, qualquer que fosse a direção para onde apontassem a antena. Os dois astrônomos logo se deram conta de que essa radiação não poderia ser originada da Via Láctea. Ela parecia vir de toda parte, como se preenchesse todo o Universo.

Certo dia, Penzias comentou casualmente o problema com um amigo, que também era astrônomo. O amigo imediatamente se lembrou de um seminário recente, quando um jovem astrofísico, James Peebles, apresentou uma previsão teórica: como consequência da expansão a partir de um estado ultradenso, o Universo deveria estar uniformemente preenchido por uma radiação justamente na frequência de micro-ondas. Estava explicada a origem do misterioso ruído.

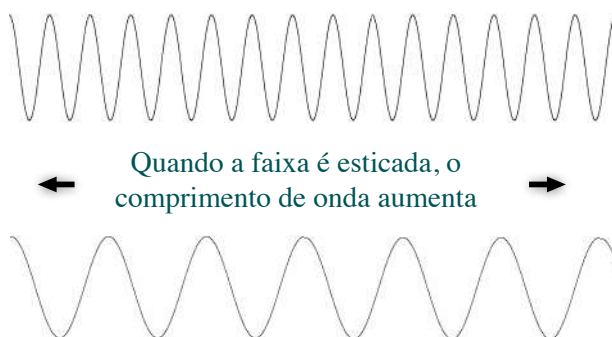
Assim foi feita uma das descobertas mais importantes (talvez a mais importante) da Astronomia. Todo o Universo está preenchido por uma radiação distribuída de forma incrivelmente uniforme. Essa radiação, conhecida como *radiação cósmica de fundo*, é uma relíquia do Universo primordial, fótons que vagam livremente pelo cosmo há 13.4 bilhões de anos, quando os primeiros átomos se formaram. Até chegarem aos nossos telescópios e antenas, esses fótons perderam a maior parte da sua energia à medida que o Universo expandia. Hoje são partículas de energia muito baixa, e estão por toda parte. Muito do que sabemos hoje sobre a evolução do Universo se deve a essa descoberta.

No capítulo 3 vimos que o espectro térmico pode ser usado como um termômetro. Analisando a luz do Sol, obtém-se um espectro bem parecido com o de um corpo negro, o que permite determinar a temperatura na sua superfície. A radiação cósmica de fundo embora seja muito uniforme (flutuações da ordem de uma parte em dez mil) é feita de fótons com uma distribuição de frequências. Satélites sofisticados mediram o

espectro da radiação de fundo, que é idêntico ao de um corpo negro a uma temperatura de $-271,3^{\circ}\text{C}$. Essa é a temperatura do espaço sideral.

No capítulo anterior falei sobre o efeito Doppler: quando uma fonte luminosa, ou sonora, se afasta de um observador, as ondas que chegam a ele têm um comprimento de onda ligeiramente maior. A fonte emite ondas continuamente, sempre com a mesma frequência, mas à medida que ela se afasta, as ondas têm uma distância cada vez maior a percorrer. Assim, chegam ao observador com uma frequência um pouco menor. Quanto maior a velocidade da fonte em relação ao observador, menor será a frequência, ou equivalentemente, maior será o comprimento de onda.

No caso dos fótons, o que causa o alongamento do comprimento de onda é a expansão do espaço. Imagine uma faixa elástica, como as usadas nas academias de ginástica. Desenhe sobre ela uma onda. Quando a faixa é esticada, a onda desenhada se alonga, ficando com um comprimento de onda maior, como na figura abaixo.



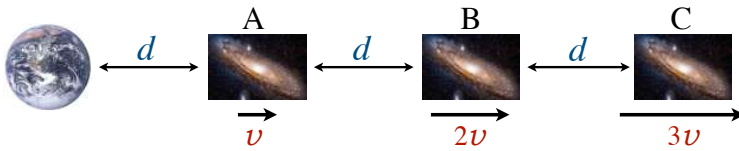
A expansão do espaço causa um aumento no comprimento de onda das ondas eletromagnéticas. Os fótons perdem energia.

Em resumo, podemos afirmar com segurança que no futuro as galáxias estarão mais distantes entre si. Com a mesma

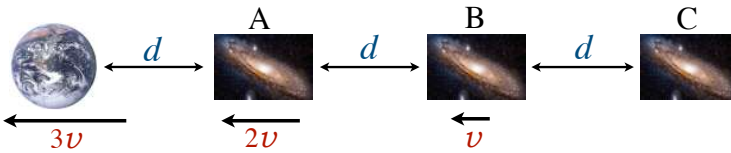
segurança, podemos dizer que no passado as galáxias estiveram mais próximas. O Universo sempre esteve em movimento, e se fosse possível inverter a direção do tempo, veríamos o Universo encolher em vez de expandir. Infelizmente, não é possível (pelo menos ainda) recuar indefinidamente no tempo para saber se houve ou não um momento da criação.

Quilômetros não são boas unidades para medir distâncias astronômicas. Há outras unidade mais adequadas. Usa-se bastante o *ano-luz*, que é a distância que a luz percorre durante um ano. É uma distância tão grande que é difícil imaginar: em um ano há 30,8 milhões de segundos, e a cada um a luz percorre 300.000 quilômetros, ou seja, um ano-luz equivale a 9.366.192.000.000 km, cerca de 60 mil vezes a distância entre a Terra ao Sol. Difícil conceber. Na Via-Láctea, uma galáxia mediana, a luz leva um pouco mais de cem mil anos para ir de uma extremidade a outra. Numa escala cosmológica, um ano-luz é um piscar de olhos: se o raio do Universo visível fosse igual à altura do Pão de Açúcar (cerca de 400 m), um ano-luz seria a espessura de um fio de cabelo.

A Cosmologia parte da premissa de que nós não ocupamos um lugar privilegiado no Universo. Esse é o *Princípio Cosmológico*. Levando em conta que por muitos séculos a Terra foi considerada o centro do Universo, o Princípio Cosmológico pode ser visto como uma demonstração de humildade. Observado em larga escala, o Universo é isotrópico e homogêneo. Aqui da Terra vemos as galáxias se afastarem. A mesma visão teria qualquer observador, esteja ele em qualquer galáxia e em qualquer momento, no passado ou no futuro. Por isso o termo *Big Bang* pode ser enganoso, pois remete à ideia de uma explosão, um evento centrado em um único ponto, como os fogos de artifício. O Universo não tem um centro a partir do qual as galáxias se afastam. Não existe nenhum ponto privilegiado.



Não existem referenciais privilegiados!



A galáxia **A** está a uma distância d da Terra, e se afasta de nós com velocidade v . A galáxia **B** está a uma distância duas vezes maior, e se afasta com o dobro velocidade. Da mesma forma, a galáxia **C**, três vezes mais longe da Terra do que a galáxia **A**, se afasta com velocidade três vezes maior. Como não há referenciais privilegiados, um observador na galáxia **C** veria a galáxia **B** se afastar com velocidade v , a galáxia **A** com velocidade $2v$ e a Terra com velocidade $3v$.

Voltemos no tempo até uma era em que ainda não havia estrelas nem galáxias. Havia apenas matéria e energia em estado puro: uma “sopa”, ou plasma, como chamam os físicos, com partículas elementares – fótons e glúons, quarks e antiquarks, elétrons e pósitrons, neutrinos – todas movendo-se caoticamente e colidindo umas com as outras continuamente. O plasma primordial é a matéria prima a partir da qual tudo se formou. Há 13,8 bilhões de anos, o Universo era um bebê.

Hoje o espaço sideral é gelado, mas nem sempre foi assim. Nos momentos iniciais da expansão, a temperatura do plasma era inconcebivelmente alta, e densidade era tão absurdamente grande que os quarks podiam circular livremente por todo o espaço. Mas, à medida que a expansão seguia, os quarks

logo seriam aprisionados dentro de prótons e nêutrons. As partículas carregadas eram tantas que formavam um obstáculo intransponível para a luz. Os fótons eram constantemente absorvidos, reemitidos para em seguida serem novamente absorvidos, reemitidos etc., como alguém que chega atrasado a um show de rock e tenta chegar perto do palco, movendo-se no meio da multidão compacta. Os fótons só podiam se propagar por curtíssimas distâncias, e por isso o Universo era opaco.

A liberdade dos quarks durou muito pouco, estava com os segundos contados. À medida que o volume do Universo aumentava, a densidade diminuía e ele esfriava. Poucos segundos depois do *Big B.*, as partículas elementares estavam mais distantes entre si e as colisões entre elas se tornavam menos frequentes. Os quarks não podiam mais se propagar livremente. Condenados a viverem juntos eternamente, aprisionados pelos glúons, formaram os prótons e nêutrons que, junto com os elétrons, compõem toda a matéria que vemos no Universo atualmente, inclusive a dos nossos corpos.

Bastaram poucos minutos para que os primeiros núcleos atômicos fossem formados: além do hidrogênio, cujo núcleo contém um próton apenas, havia o deutério, que é uma forma de hidrogênio com 1 próton e um nêutron, e hélio (dois prótons e dois nêutrons). Era basicamente isso. A “sopa cósmica” ia se tornando cada vez mais rala, embora ainda houvesse muitos elétrons e pósitrons bastante energéticos vagando pelo espaço, colidindo com prótons, nêutrons e núcleos recém-formados.

Depois dos frenéticos primeiros minutos, passaram-se milhares de anos sem que nada muito relevante acontecesse. Trezentos e oitenta mil anos depois do *Big B.*, a energia dos elétrons havia diminuído o suficiente para que os núcleos pudessem capturá-los. Assim se formaram os primeiros átomos, quase todos do elemento mais simples, o hidrogênio (um próton e um elétron), que é o combustível das estrelas. Cerca de 60%

dos átomos que compõem os nossos corpos são átomos de hidrogênio, que têm 13.4 bilhões de anos de idade. O Universo primordial está dentro de nós.

Desde o início da expansão, a matéria se organizou de formas cada vez mais complexas, etapa por etapa: de quarks a prótons e nêutrons; de prótons e nêutrons a núcleos; de núcleos a átomos. Os átomos são a base de tudo o que existe. Deles viriam as moléculas simples, depois outras cada vez mais complexas. Em algum momento, surgiram moléculas feitas de bilhões de átomos, tão complexas que podiam se replicar mediante o estímulo químico correto. Em algum momento posterior, as moléculas gigantes se conectaram. Houve um hiato, ainda inexplicado, e agora, além de replicar, as moléculas gigantes conectadas adquirem uma nova habilidade: metabolizar. Mas isso é assunto para daqui a pouco.

Tudo indica que a formação dos átomos ocorreu durante um curto intervalo de tempo (numa escala de tempo cósmico, naturalmente), 380 mil anos depois do *Big B.* Pode-se dizer que os átomos surgiram em toda parte praticamente ao mesmo tempo. Os elétrons, agora presos aos núcleos, formaram átomos neutros, e não mais impediam os fótons de se propagarem. A partir de então, *fiat lux*: os fótons puderam se mover livremente pelo espaço. O Universo tornou-se transparente. Esses fótons formam a radiação cósmica de fundo que vemos hoje, e por essa razão o seu estudo remete a esse momento crucial na evolução do Universo.

A radiação de fundo é a luz mais antiga que os telescópios registram. Isso implica um limite para o que pode ser observado diretamente, pois praticamente toda a informação que nos chega do espaço vem na forma de ondas eletromagnéticas: raios gama, raios X, luz, infravermelho, micro-ondas e ondas de rádio. Para saber o que aconteceu durante os 380 mil anos transcorridos entre o *Big B.* e o momento da libertação dos

fótons é preciso fazer extrapolações, usando o conhecimento sobre a estrutura mais elementar da matéria, adquirido nos grandes aceleradores de partículas.

As extrapolações podem ser feitas porque sabemos razoavelmente bem como a matéria e a energia se comportam em condições extremas. Ao longo dos últimos 100 anos, nosso conhecimento sobre o microcosmo aumentou enormemente. As teorias atuais, no entanto, mesmo sendo bastante detalhadas e precisas, têm limitações, e só nos permitem recuar com segurança até certo ponto, instantes depois do *Big B.* Pelo menos por enquanto.

Há muita informação codificada na radiação cósmica de fundo. O que mais impressiona é a sua uniformidade: o mesmo aspecto em qualquer direção. A uniformidade, no entanto, não é perfeita. É possível identificar regiões onde a radiação é mais intensa do que a média, e outras onde a intensidade é menor. Entretanto, as diferenças entre a maior e a menor intensidade são mínimas, apenas uma parte em 10.000. Ainda assim, essas ínfimas variações contêm muita informação, e existem instrumentos sensíveis o suficiente para detectá-las.

A uniformidade indica que no momento em que a radiação se desvencilhou da matéria, 380 mil anos-luz depois do *Big B.*, o Universo estava em equilíbrio térmico: tinha a mesma temperatura e composição em toda parte. As pequenas flutuações na intensidade da radiação de fundo significam que naquela era remota havia também pequenas flutuações na distribuição de matéria. Apesar de as diferenças de densidade serem minúsculas, são elas que deram origem às estrelas, planetas e galáxias.

O experimento ALPHA, de que falei no capítulo 7, superou um enorme desafio tecnológico para criar um antiátomo de hidrogênio (um antielétron ligado a um antipróton). Conservar átomos de antimatéria é mais difícil do que criá-los, pois estão cercados por átomos de matéria. O contato entre a matéria e a antimatéria é fatal para ambas. Aniquilam-se mutuamente, gerando energia pura na forma de fótons. No experimento, os físicos conseguiram preservar o antiátomo durante tempo suficiente para mostrar que as propriedades dos átomos e antiátomos de hidrogênio são idênticas. A única diferença entre prótons e antiprótons, entre elétrons e pósitrons (os antielétrons) é a carga elétrica. O que se chama de matéria e antimatéria é mera convenção. A matéria poderia ser feita de prótons com carga negativa e elétrons com carga positiva. O mundo seria o mesmo. A antimatéria e a matéria são como imagens refletidas num espelho. Não notaríamos nenhuma diferença se vivêssemos em um Universo de antimatéria.

Se não houvesse nenhum contato, os antiátomos de hidrogênio seriam eternos, como são os átomos desse elemento. Mas quando um elétron colide com um pósitron, ambos se aniquilam, dando origem a fótons. Quando um quark e seu respectivo antiquark colidem, também desaparecem deixando em seu lugar um glúon ou um fóton.

Se mudarmos a seta do tempo, um fóton pode se transformar em um par elétron-pósitron, assim como um glúon pode se transformar em um par quark-antiquark. Matéria e energia podem se transformar uma na outra. No microcosmo, vale a reversibilidade: a transformação matéria \rightarrow energia tem a mesma probabilidade da reversa energia \rightarrow matéria. As partículas e suas antipartículas são sempre criadas juntas, e quando colidem, ambas desaparecem. Um fóton não se transforma em dois elétrons, ou em dois pósitrons, tampouco um glúon gera dois quarks ou dois antiquarks, assim como dois

elétrons ou dois quarks não podem se aniquilar gerando um fóton ou um glúon. A conservação da carga elétrica – a carga elétrica total é a mesma nos estados inicial e final – é uma lei universal.

A simetria entre matéria e antimatéria faz com que a nossa própria existência seja um dos grandes enigmas da Física contemporânea. Se a matéria e a antimatéria são sempre criadas ou destruídas aos pares, deveria haver no Universo primordial a mesma quantidade de elétrons e pósitrons, prótons e antiprótons, nêutrons e antinêutrons etc.. Rapidamente matéria e antimatéria se aniquilariam. O Universo então seria completamente sem graça deveria ser feito apenas de luz. Felizmente não foi o que aconteceu, pois a vida é maravilhosa. Até onde podemos ver, no Universo só há matéria. Como chegamos até aqui, como a matéria sobrepujou a antimatéria? Não se sabe ao certo, mas para que isso tivesse acontecido, em algum momento, bem no início do Universo primordial, deve ter havido um pequeno excesso de partículas sobre antipartículas. Digo pequeno porque esse excesso é quase insignificante. Para cada um bilhão de antiprótons, deveria haver um bilhão mais um próton. Graças a esse um próton a mais, cuja origem ainda desconhecemos, vivemos nesse planeta magnífico, do qual cuidamos tão mal.

Outra condição necessária é que bem no início da expansão, alguma força da Natureza, ainda desconhecida, agiu sobre a matéria de forma ligeiramente diferente do que sobre a antimatéria. Em 1964, além da descoberta da radiação de fundo e do surgimento da ideia de quarks, houve outra descoberta fundamental: a força nuclear fraca age de forma ligeiramente diferente sobre partículas e antipartículas. É uma diferença muito sutil, mas que pode ser observada diretamente (esse tem sido o meu “ganha-pão”, meu principal tema de pesquisa). Na verdade, a antimatéria é *quase* simétrica à matéria.

No entanto, a diferença entre a forma como a força fraca age sobre a matéria e a antimatéria tem um impacto muito pequeno, e nem de longe é suficiente para explicar a origem de tudo o que existe à nossa volta. A assimetria entre matéria e antimatéria originada pela força nuclear fraca precisaria ser muitíssimo mais intensa do que é, de forma que o próton a mais surgiu de um processo que ainda não conhecemos. Outros mecanismos devem necessariamente existir. O mecanismo principal ainda está por ser descoberto, e essa é a razão de a assimetria entre a matéria e a antimatéria ser um tema de pesquisa tão fascinante. Como vemos, o mundo do infinitamente pequeno está intimamente ligado ao do infinitamente grande.

Capítulo 12

Ordem

Não se sabe ainda como a matéria do Universo foi criada, qual foi a origem das partículas elementares. Esse, como vimos, é um dos grandes enigmas, mas para o que vamos discutir aqui isso não importa muito. Podemos partir de um momento em que as partículas já existiam. Mais precisamente, podemos começar a narrativa no momento em que os quarks perderam a sua liberdade, ficando aprisionados para sempre dentro de prótons e nêutrons, o que, ao que tudo indica, ocorreu segundos após o *Big B*. Desde então e sob a ação da gravidade e da força eletromagnética, há uma lenta e contínua evolução da matéria em direção a uma ordem cada vez mais complexa, sobretudo quando pensamos na vida como um processo físico.

Curiosamente, o principal agente na formação de estruturas cada vez mais complexas é o acaso. Não há, no mundo físico, um roteiro pré-determinado. Na raiz de todos os processos, estão as interações fundamentais entre as partículas elementares. Quando duas partículas se chocam, ou quando uma partícula instável se desintegra, muitos desdobramentos podem acontecer. Analisando um número muito grande de reações, pode-se identificar todos os resultados possíveis e com

que frequência ocorrem. No entanto, quando observamos uma única colisão, ou um único decaimento, não é possível prever qual dos caminhos será tomado. É a essência da natureza quântica do microcosmo, um mundo regido por probabilidades.

A complexidade requer tempo, pois estruturas mais complexas invariavelmente se formam a partir de outras mais simples. Moléculas, por exemplo, se formam a partir de átomos, e estes se formam a partir de elétrons, prótons e nêutrons, que se formam a partir de quarks. Os biólogos, obviamente, não descrevem as células em termos de interações eletromagnéticas e fortes envolvendo quarks e elétrons, e sim usando moléculas ou organelas como unidades. Cada degrau na escala de complexidade tem suas unidades adequadas, e estas são construídas a partir do efeito coletivo de outras unidades menores, mais fundamentais.

A matéria se transforma continuamente, mas, ao mesmo tempo, é permanente. Os átomos de hidrogênio, por exemplo, existem desde o *Big B*. Antes dos nossos corpos, já pertenceram a muitos outros objetos, não só a vegetais, animais ou rochas, mas também a asteroides, cometas e estrelas que já desapareceram. Somos, portanto, feitos de material reciclado. Você já deve ter ouvido alguém dizer que somos poeira de estrelas. Assim é.

Não há conhecido na Natureza nada mais simples do que as partículas elementares: pontinhos de matéria (ou de energia pura, como os fótons e glúons), sem nenhuma estrutura, pelo menos até onde é possível observar. Tudo o que vemos é feito a partir delas. Não importa o quão complexa seja uma estrutura, em última análise será sempre uma combinação de apenas três componentes, os quarks *up* e *down* e os elétrons. É incrível que

toda a diversidade do Universo, incluindo a vida, seja formada combinando apenas três constituintes.

Os seres humanos são as estruturas mais complexas que existem (pelo menos assim achamos), mas decompondo cada célula, cada molécula, átomo, núcleo atômico, chegamos aos quarks *up* e *down*, que formam prótons e nêutrons, e aos elétrons. Prótons e nêutrons formam a primeira camada da matéria. Embora sejam as unidades básicas do núcleo atômico, a camada seguinte na escala de complexidade, os nucleons (prótons e nêutrons) são eles mesmos sistemas bastante complexos. A existência dos prótons é conhecida desde 1920, mas ainda hoje o que acontece no seu interior é estudado, sempre revelando surpresas, como a origem da sua massa, por exemplo. Apenas 1% da massa do próton corresponde à soma das massas dos seus três quarks constituintes. Os outros 99% vêm da energia envolvida nas interações frenéticas e incessantes que ocorrem em seu interior, mantendo seus três quarks eternamente confinados.

Prótons, assim como os nêutrons, são partículas compostas por três quarks. Pertencem à família dos *bárions*. Para cada bárion existe um antibárion, composto por três antiquarks, um clone espelhado. Existe uma lei de conservação empírica, até hoje não violada: o número total de bárions e antibárions que participam de uma reação qualquer é sempre o mesmo, não muda depois que a reação ocorreu. Na contabilidade, cada antibárion compensa um bárion. Quando um próton colide com um antipróton, por exemplo, ambos se aniquilam. Se houver bárions no estado final, sempre haverá um número igual de antibárions. Em uma colisão muito energética entre dois prótons, dezenas, ou mesmo centenas de partículas podem ser produzidas, mas entre elas sempre haverá dois prótons, dois nêutrons, ou um próton e um nêutron. Dois bárions no estado inicial, dois no estado final, uma contabilidade seguida à risca.

Prótons não se desintegram espontaneamente. Um novo tipo de interação deveria existir para que isso ocorresse. É certo que podem ser destruídos em colisões muito violentas, mas em seu lugar aparecem nêutrons ou bárions mais pesados. Todos são instáveis, e, cedo ou tarde, decaem gerando novos prótons. Os nêutrons, ligeiramente mais pesados que os prótons, só são estáveis quando estão dentro dos núcleos atômicos. Fora deles, se desintegram com uma vida-média de cerca de 15 minutos. Quando um nêutron desaparece, surgem em seu lugar um próton, um elétron e um antineutrino. Os prótons são os bárions mais leves que existem, e por isso não podem se desintegrar sem que a lei de conservação seja violada.

Algo semelhante acontece com os elétrons e pósitrons, que são os léptons carregados mais leves. Também existe uma lei de conservação empírica para os léptons. O número de léptons mais antiléptons é o mesmo antes e depois de qualquer reação da qual participem (assim como cada antibárion “anula” um bárion, cada antilépton “anula” um lépton).

Os taus, os léptons mais pesados, se desintegram espontaneamente, e múons aparecem em seu lugar. Os múons, por sua vez, decaem produzindo elétrons (assim como antimúons se desintegram formando pósitrons). Em geral, múons e taus são produzidos em colisões, mas duram muito pouco. As meias-vidas de ambos são frações ínfimas de um segundo. Portanto, as únicas partículas elementares estáveis são os quarks *up* e *down*, aprisionados dentro dos prótons, e os elétrons.

Prótons e nêutrons se unem formando núcleos atômicos, a segunda camada. Dentro do núcleo, os nucleons estão tão próximos que suas “nuvens” estão tão próximas que se superpõem. Quarks de um próton ou de um nêutron trocam glúons com quarks de outro próton ou nêutron, o que funciona como uma poderosa “cola” (a palavra glúon vem de *glue*, que

em inglês significa cola). A Física Nuclear, entretanto, descreve os núcleos atômicos em termos de prótons e nêutrons. Analisar o comportamento de núcleos atômicos a partir de quarks, antiquarks e glúons seria tão difícil como descrever o vento seguindo as moléculas de ar.

De todos os núcleos atômicos, o do hidrogênio é o mais simples: um único próton. Há duas variantes, ou dois isótopos, em que o próton é acompanhado por um ou dois nêutrons (deutério e trítio, respectivamente). O hidrogênio corresponde a cerca de 75% da matéria observada no Universo. Outros 25%, aproximadamente, são do elemento químico hélio, cujo núcleo têm dois prótons e dois nêutrons. Todos os demais núcleos conhecidos respondem por menos de 1%.

Os quarks se organizam em prótons e nêutrons, que se organizam em núcleos, que capturam elétrons formando os átomos, e estes podem se organizar de infinitas maneiras. Nessa terceira camada, os átomos são as unidades relevantes. Formam estrelas e sistemas planetários, nebulosas, galáxias, aglomerados de galáxias, superaglomerados de galáxias. Mas formam também moléculas, com dois, três ou bilhões de átomos. Se você, cara leitora, caro leitor, guardar uma única ideia desse livro, que seja essa: toda a matéria do Universo visível é feita de átomos. Aguarde o próximo capítulo para entender o significado do adjetivo “visível”.

Como já disse em outros capítulos, os átomos de hidrogênio, tanto em nossos corpos como no interior das estrelas, foram produzidos no Universo primordial. Exceto pelo hélio e por uma ínfima quantidade de outros elementos leves, todo o resto foi forjado no interior das estrelas. Bilhões de bilhões de estrelas nasceram, brilharam e morreram, espalhando matéria pelo espaço sideral. Antes de chegar aos nossos corpos, a matéria passou por muitas outras etapas na escala da complexidade.

Em todas elas, uma mesma regra é observada: sistemas sempre evoluem espontaneamente para estados de menor energia.

O átomo de hidrogênio tem um próton e um elétron. Dois átomos muito próximos permanecem unidos compartilhando os dois elétrons, como em um condomínio onde os moradores não têm uma residência fixa, cada noite dormem em uma casa diferente. O estado ligado tem menor energia que o de dois átomos isolados. Forma-se assim o hidrogênio molecular, H_2 . Assim, ao longo de eras, moléculas cada vez mais complexas foram formadas em encontros casuais entre moléculas mais simples em nebulosas.

A Química moderna é baseada na Física Atômica. O que acontece dentro do núcleo é irrelevante. A unidade básica são os átomos, e nestes, os elétrons mais externos são o que realmente importa. Muitos átomos são mais estáveis quando a última camada é preenchida por oito elétrons. Não se trata de um número mágico, mas de uma configuração em que na última camada há o mesmo número de elétrons com *spin up* e *down*. Um átomo de oxigênio, por exemplo, tem seis elétrons na última camada e por isso é um elemento altamente reativo, ávido pelos elétrons que lhe faltam para completá-la. O hidrogênio, por sua vez, tem apenas um elétron (nesse caso, a última camada estaria completa com apenas dois elétrons), de forma que dois átomos de hidrogênio se combinam facilmente com um átomo de oxigênio, compartilhando elétrons e formando uma molécula de água. Uma união que satisfaz a ambos.

Em geral, os elementos que têm menos de quatro elétrons na última camada se combinam com os que têm mais de quatro. O sódio tem apenas um, que gentilmente compartilha com o cloro, que tem sete, e assim ambos se unem formando cloreto de sódio, o sal de cozinha. Mais um casamento feliz. E então, temos o carbono, o elemento mais versátil e o

quarto mais abundante no Universo. Com quatro elétrons na última camada, o carbono está presente em milhões de compostos diferentes. Uma unidade composta por seis átomos de carbono dispostos em um arranjo hexagonal é bastante comum em moléculas orgânicas mais complexas, possibilitando infinitas combinações.

Os átomos de carbono em estado puro se organizam de muitas maneiras, formando diferentes padrões geométricos. Substâncias tão diferentes como o grafite e o diamante são feitas do mesmo material, carbono puro, e se distinguem apenas pela *ordem* em que os átomos se dispõem. Simples variações na ordem geram materiais com propriedades muito diferentes, apesar de serem feitos do mesmo elemento. No início desse século, o avanço da nanotecnologia propiciou a descoberta de uma nova forma de os átomos de carbono se organizarem: o grafeno, uma película com apenas um átomo de espessura. Nessa película, os átomos formam hexágonos que se conectam como em uma colmeia. O grafeno tem propriedades extraordinárias: extremamente leve, rígido, condutor de eletricidade e 100 vezes mais resistente que o aço.

O Universo é um infindável ciclo de nascimento, vida e morte. A matéria está em contínua transformação, e se reorganiza de formas cada vez mais complexas. É um padrão que se observa desde o início da expansão. Mas a complexidade precisa de tempo. No espaço sideral, a probabilidade de dois átomos de hidrogênio se chocarem com um de oxigênio e formar uma molécula de água é ridiculamente pequena. Mas se há uma quantidade inimaginavelmente grande de átomos reunidos em uma nuvem, ao longo de bilhões de anos mesmo o que é muito raro pode acontecer muitas vezes.

A pequena probabilidade de encontro é compensada pela grande quantidade de participantes e pelo tempo disponível.

Recentemente, o telescópio espacial James Webb revelou a existência de moléculas orgânicas complexas em galáxias a 12 bilhões de anos-luz de distância, ou seja, o telescópio captou uma luz emitida há 12 bilhões de anos, quando o Universo tinha cerca de 10% do seu volume atual. Depois da formação dos átomos de hidrogênio e hélio primordiais, “bastaram” um bilhão e meio de anos para surgirem moléculas com dezenas, ou mesmo centenas de átomos.

No nosso caso, que mais nos interessa, somos frutos de uma grande nuvem de gás – H_2 , na sua maioria, um pouco de hélio e traços de elementos mais pesados – além de poeira cósmica. A formação do Sistema Solar é uma longa e intrincada história, que foge ao objetivo deste livro. O importante aqui é que o funcionamento do Sol foi desvendado a partir do conhecimento adquirido sobre as reações envolvendo partículas. Colisões entre partículas são estudadas usando aceleradores, como o LHC, do CERN, na Suíça, onde há um bom número de cientistas brasileiros participando dos experimentos realizados ali. As colisões entre dois prótons foram estudadas à exaustão, sabe-se com precisão quais são os resultados possíveis e com que probabilidade ocorrem. Colisões entre dois prótons que ocorrem no interior das estrelas são como as produzidas no LHC, a mesma Física envolvida. Embora tenhamos um bom conhecimento sobre essas colisões, o interior das estrelas ainda guarda muitos mistérios.

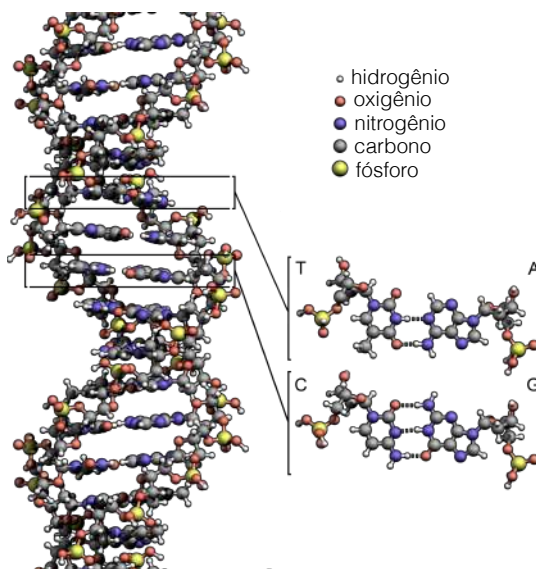
A região mais interna do Sol fervilha com as colisões envolvendo prótons e nêutrons. É daí que vem a luz que nos ilumina: a matéria se convertendo em energia, possibilitando a existência da vida. Mas para isso, é preciso que quatro prótons convirjam para o mesmo ponto, ao mesmo tempo, e com a energia correta. Não só isso. Nessa colisão tão rara, a probabilidade de que ela resulte no produto que nos interessa diretamente é muito pequena. Apesar disso, o Sol brilha, afinal ele é quase todo feito de prótons.

Não se sabe como a vida surgiu. Essa é uma das grandes questões que a Ciência busca responder. Erwin Schrödinger, um dos fundadores da Física Quântica, escreveu um livro que se tornou um clássico, com o provocativo título “O que é vida?”. No livro, lançado em 1944, Schrödinger afirma que a vida, ainda que não saibamos sequer como defini-la precisamente, é o resultado de processos físicos e químicos. O livro de Schrödinger inspirou físicos, químicos e biólogos a desvendar o código da vida, o que levou à descoberta da estrutura do DNA. Não sabemos como a vida surgiu, mas podemos afirmar com segurança que antes de surgirem estruturas que metabolizam e se reproduzem houve uma infinidade de etapas. Chegamos até aqui após uma longa sequência de eventos altamente improváveis.

Pense nos bilhões de átomos de hidrogênio, carbono, nitrogênio, oxigênio e fósforo que se combinam em uma molécula de DNA, uma estrutura extremamente complexa. São tantos átomos que se uma molécula do DNA humano fosse esticada, teria um pouco mais de 2 metros de comprimento. Qual seria a probabilidade de bilhões de átomos se combinarem em uma estrutura tão elaborada?

A estrutura do DNA foi descoberta em 1953. Foi um episódio que gerou controvérsias, pois os descobridores, James Watson e Francis Crick, teriam analisados dados obtidos por Rosalind Franklin sem a sua permissão explícita. A descoberta da estrutura levou ao entendimento da sua função e revelou o “mistério da vida”. Rendeu a Watson e Crick o Prêmio Nobel de Medicina em 1962. Infelizmente, Franklin faleceu um ano antes, vítima de um câncer no ovário (o Prêmio Nobel só é agraciado a pesquisadores vivos). Apesar dessa fatalidade, sua contribuição à descoberta fundamental da Biologia moderna é reconhecida.

Na molécula do DNA, os átomos estão ordenados em longas seqüências na forma de duas hélices entrelaçadas, como os corrimões de uma escada em caracol. A disposição dos átomos segue uma ordem muito específica, e um estímulo químico apropriado dá início a uma reação em cadeia que termina com a criação de uma réplica da molécula de DNA original. As hélices se separam e uma cópia de cada uma é feita com a matéria prima disponível no núcleo da célula. Esse é o mecanismo básico de reprodução, comum a todos os seres vivos, de Einstein à mais ínfima bactéria.



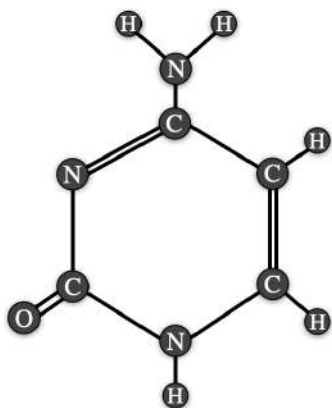
Trecho de uma molécula de DNA, com os cinco elementos químicos essenciais.

Crédito:

Zephyris, commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15027555.

A molécula de DNA é feita de átomos individuais, mas as unidades usadas para descrevê-la são açúcares, fosfatos (os corrimões da escada) e quatro bases – adenina (A), citosina (C), timina (T) e guanina (G). As bases são moléculas muito

mais simples, formadas por poucos átomos. No DNA, elas se pareiam de um modo bem específico, T apenas com A e C apenas com G. O número de bases e a ordem em que estão dispostas determinam como será o ser vivo a ser formado.



A estrutura molecular de uma das bases, a citosina, que forma a molécula de DNA

T ——— A
 T ——— A
 C ——— G
 T ——— A
 C ——— G
 T ——— A
 T ——— A
 C ——— G
 C ——— G

As bases se pareiam de um modo específico. A ordem da sequência determina as características físicas

Estima-se que a vida surgiu cerca de 500 milhões de anos depois de a Terra ter se formado. Esse teria sido o tempo necessário para que átomos de hidrogênio, carbono, nitrogênio, oxigênio e fósforo formassem açúcares, fosfatos e bases nitrogenadas, e para que estes viessem a formar moléculas complexas como o DNA. Há evidências de que parte da matéria prima do DNA não tenha se formado aqui, e sim vindo do espaço em asteroides e cometas que bombardearam a jovem Terra de forma inclemente por um longo período.

Cada indivíduo é único. Não há dois iguais. Mas toda a diversidade humana está contida em apenas 0,4% do DNA. Os outros 96,6% são idênticos em todos os seres humanos. Traços como cor da pele, textura do cabelo, formato dos olhos, nariz e boca, bem como outros pequenos detalhes, derivam de um número reduzido de genes. Por isso, quando eu tenho

que preencher em um formulário o campo “raça”, escrevo a resposta óbvia: humana.

O acaso permeia toda a história do Universo. Se fosse possível retornar à nuvem primordial que deu origem ao Sistema Solar e começar tudo de novo, seria extremamente improvável que estivéssemos aqui novamente narrando a mesma história. Retrocedendo aos primeiros instantes do Universo, seria altamente improvável que a própria Via Láctea se formasse.

Tudo indica que o Universo se expandiu a partir de um estado primordial em *equilíbrio térmico*. Isso significa que em todas as regiões do espaço a temperatura, composição e densidade eram as mesmas. Essa uniformidade, no entanto, não impedia que houvesse regiões que, na infância do Universo, continham um pouquinho mais de matéria e outras com um pouquinho menos do que a média. Essas ínfimas variações de densidade, de apenas uma parte em 10 mil, deram origem às galáxias, e tinham um caráter puramente estatístico. Se a história do Universo fosse um ciclo que se repetisse muitas vezes, em cada uma delas as variações de densidade ocorreriam em regiões diferentes, e em cada ciclo a evolução tomaria rumos distintos.

Durante muitos bilhões de anos, a matéria evoluiu formando estruturas cada vez mais complexas. É bom frisar que não há nada que indique que somos o produto final desse processo. Ao longo das eras, a Natureza esteve diante de inúmeras bifurcações, com uma infinidade de caminhos possíveis. A complexidade de uma molécula de DNA pode parecer, para muitos, o resultado de um projeto. Mas a evolução da matéria não segue um roteiro previamente determinado, ela tem um caráter essencialmente estatístico, regido por probabilidades. Uma combinação de acaso e tempo em escala cósmica.

A gravidade é a responsável pela formação das galáxias, estrelas e planetas que vemos no céu, mas, no limite, são os processos em escala microscópica que determinam como a ordem evolui. O Universo é muito vasto, e provavelmente se estende para além do que podemos ver, de forma que é possível que a vida tenha surgido em muitos lugares, desaparecido e surgido novamente em muitos outros. Se assim foi, é possível que a vida tenha tomado formas diferentes, não necessariamente baseadas no carbono, como na biosfera terrestre. Em todos os casos, seria sempre um “acidente” altamente improvável.

Capítulo 13

O Universo invisível

Na época em que a infância era analógica, as crianças se divertiam com brinquedos simples, como girar rapidamente uma pedrinha amarrada a um barbante. Se o giro fosse rápido demais, o barbante arrebentaria e a pedra sairia na tangente. A velocidade de giro máxima que o barbante suporta é aquela em que a força centrífuga chega ao seu limite de resistência. E há também um limite mínimo, abaixo do qual a pedrinha não gira. Da mesma forma, existem velocidades mínima e máxima para manter satélites em órbita.

Essa imagem ajuda a entender o movimento das estrelas da Via Láctea. As galáxias se formam a partir de imensas nuvens de gás pela lenta e permanente ação da gravidade. Elas não são homogêneas. Algumas partes têm mais matéria que outras, o que faz com que, à medida que nuvem se condensa, ela gire em torno do que será o centro da galáxia. Das regiões mais densas vão surgir estrelas e planetas, que herdaram movimentos de rotação (sem atritos, o momento angular não se perde com o tempo). Ou seja, em uma galáxia, tudo gira em torno de algum centro.

Em escalas menores, as galáxias não se distribuem no de forma homogênea, elas se agrupam formando aglomerados em que todas giram em em torno de um centro de massa. A Via Láctea faz parte de um aglomerado com centenas de outras galáxias. Um observador externo ao aglomerado veria o Sol se deslocar com uma composição de movimentos, o de rotação em relação ao centro da Via Láctea combinado com a rotação da galáxia em relação ao centro do aglomerado. É o que se chama de movimento local, que se distingue do movimento de expansão, em que as galáxias são arrastadas quando o espaço se “estica”.

Imagine um disco de vinil girando em um toca-discos, em cima de uma mesa. O disco tem uma velocidade de rotação constante: a cada segundo, sempre um mesmo ângulo é percorrido. Agora trace uma linha reta partindo do centro até a borda. Sobre essa reta, marque dois pontos quaisquer que estejam a diferentes distâncias do centro. À medida que o disco gira, cada ponto executa um movimento circular semelhante ao da pedrinha amarrada ao barbante. Como o disco é rígido, os dois pontos sobre a reta têm a mesma velocidade de rotação, mas o ponto mais afastado do centro sempre percorre uma distância maior que a do ponto mais próximo. O ponto mais distante tem, portanto, a mesma *velocidade de rotação*, mas maior *velocidade tangencial* (a velocidade com que a pedrinha seria arremessada se o barbante arrebentasse). Em um disco rígido, quanto mais afastado do centro estiver um ponto, maior será a sua velocidade tangencial.

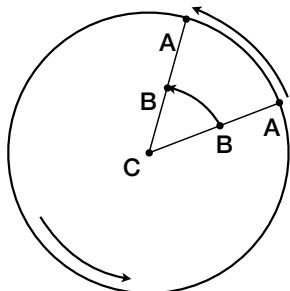
Nas galáxias acontece algo semelhante. As estrelas giram em torno do centro galáctico, cada vez mais rapidamente à medida que a distância aumenta. Mas existe uma diferença crucial: galáxias não são corpos rígidos. Assim, a partir de uma certa distância ao centro, as leis da Mecânica mostram que a velocidade das estrelas deve diminuir à medida que nos aproximamos das extremidades da galáxia, onde ela se torna mais

rarefeita. A gravidade é o “barbante” das estrelas, mantendo as estrelas coesas na galáxia. As estrelas mais periféricas sofrem menor ação da gravidade, e por isso deveriam se mover mais lentamente. Se as estrelas mais periféricas fossem muito rápidas, a força centrífuga superaria a atração da gravidade. Nesse caso, elas seriam lançadas para fora da galáxia, tal como acontece com uma pedrinha quando o barbante arrebenta.

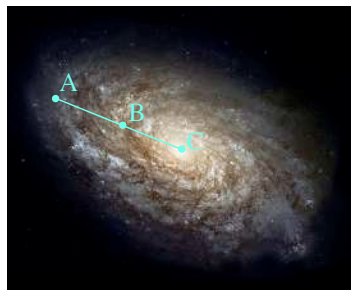
Nos anos 1970, havia telescópios, instrumentos e métodos sensíveis o bastante para medir a velocidade das estrelas com boa precisão. As medições resultaram em tabelas mostrando como a velocidade de rotação das estrelas varia em função da sua distância ao centro galáctico. Essas tabelas podem ser representadas na forma de gráficos, conhecidos como *curvas de rotação*. As curvas de rotação revelaram um segredo assombroso: no Universo, há muito mais matéria do que podemos ver. A que conhecemos, a matéria feita de átomos, corresponde a apenas 15%, aproximadamente, da matéria do Universo. Há cinco vezes mais um tipo de matéria invisível, cuja natureza é um mistério, chamada (impropriamente) *matéria escura*. A frase “Tudo é feito de átomos” se restringe apenas a uma pequena porção da matéria do Universo!

A história da descoberta da matéria escura merece ser contada. Começou nos anos 1930 e o protagonista foi Fritz Zwicky, um controverso astrofísico suíço radicado nos EUA. Zwicky era uma usina de ideias, algumas delas disparatadas ou incorretas, e outras geniais. Foi ele quem primeiro propôs a existência das estrelas de nêutrons e explicou a origem das supernovas (ele cunhou o nome de ambas). E foi ele também quem primeiro falou de matéria escura.

Zwicky, em 1933, estudava o aglomerado Coma, que está a 320 milhões de anos-luz da Terra e reúne cerca de mil galáxias. Surpreso, observou que muitas galáxias se moviam com velocidades centenas de vezes acima do que a gravidade permitiria. Era como se a pedrinha girasse muito mais rápido do



Em um disco rígido, a velocidade de rotação é a mesma para todos os pontos. Um ponto na borda percorre uma distância maior que outro em uma posição intermediária. Por isso, a velocidade tangencial do ponto A é maior que a do ponto B.



Crédito: NASA

<http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-1999-25-a-full.tif>

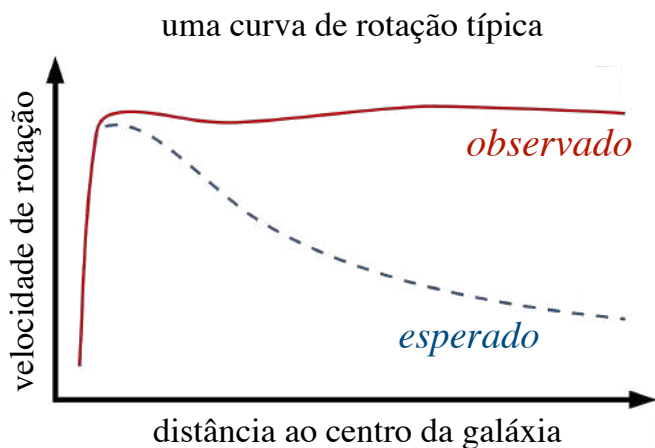
Galáxias não são discos rígidos. Estrelas a diferentes distâncias do centro da galáxia terão tanto velocidades tangencial como de rotação distintas.

que permitia o limite de resistência do barbante sem que ele arrebentasse. Apesar da alta velocidade, as galáxias não eram arremessadas no espaço, e o aglomerado permanecia unido. Zwicky concluiu, acertadamente, que somente a existência de grandes quantidades de uma matéria invisível explicaria como as galáxias atingiam altas velocidades e ainda assim permaneciam no aglomerado. Na verdade, deveria haver muito mais dessa matéria invisível do que a luminosa, que podemos observar diretamente. Zwicky batizou essa matéria invisível de *matéria escura*.

A descoberta de Zwicky não despertou muito interesse, em parte pela sua personalidade polêmica, e em parte por faltarem mais evidências. Zwicky, provavelmente, havia cometido algum erro. Assim, por cerca de trinta anos a matéria escura ficou esquecida em um canto.

O interesse pela matéria escura ressurgiu no início dos anos 1970. Vera Rubin, uma das mais notáveis astrônomas de todos os tempos, e Kent Ford fizeram um estudo minucioso das ve-

locidades das estrelas da nossa vizinha galáxia de Andrômeda. Construíram a curva de rotação e tiveram a mesma surpresa de Zwicky. Na parte mais central da galáxia, a velocidade das estrelas crescia com a distância ao centro, como esperado, mas nas regiões periféricas, em vez de diminuir, as velocidades continuavam a crescer.



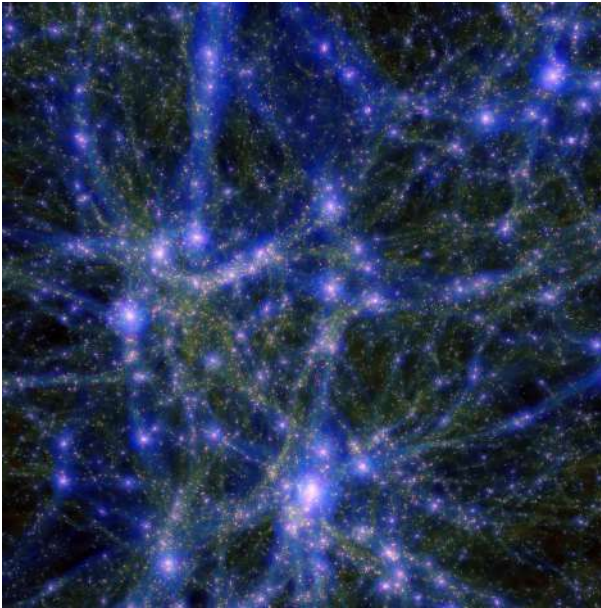
Nas imediações do centro da galáxia, a velocidade de rotação das estrelas aumenta com a distância, como em um disco rígido. À medida que a distância das estrelas ao centro aumenta, a densidade de matéria se torna menor. A velocidade de rotação de estrelas periféricas deveria diminuir, caso houvesse apenas a matéria visível. Mas, ao contrário, a velocidade permanece alta, o que indica a presença de uma matéria invisível, mas que produz efeito gravitacional: a matéria escura.

Vera Rubin é um ícone da luta pela participação feminina na pesquisa científica. Formou-se astrônoma em uma escola só para mulheres. Depois de uma tentativa frustrada de fazer o doutorado em Princeton, que até 1975 só admitia homens no programa de pós-graduação, conseguiu uma bolsa na Univer-

sidade de Cornell. Terminou sua formação fazendo doutorado na Universidade de Georgetown, onde só podia se reunir com seu orientador nos corredores.

Em 1965, Vera Rubin ingressou no Instituto Carnegie, uma das instituições que mantinham o Observatório Palomar. Curiosamente, é o mesmo observatório em que Zwicky, trinta anos antes, havia descoberto a anomalia nas velocidades no aglomerado Coma. No começo, a vida não foi fácil. Ela teve que lutar muito até conseguir acesso ao telescópio. Dentre outros motivos, havia um prosaico: a direção do Observatório alegava que mulheres não eram admitidas porque não havia banheiros femininos. Rubin resolveu esse problema de forma trivial, simplesmente desenhando uma saia numa folha de papel e colando na porta de um dos banheiros. Foi a primeira mulher a usar o telescópio. Em sua longa carreira, vivendo em um ambiente acadêmico masculino, Vera Rubin quebrou muitas barreiras. Sua trajetória foi uma inspiração para outras cientistas mulheres, abrindo caminhos para uma maior participação feminina em pesquisas científicas.

Desde os trabalhos de Vera Rubin, outras evidências contundentes da existência da matéria escura foram obtidas, e hoje não restam dúvidas sobre isso. Não se sabe como a matéria escura surgiu nem de que ela é feita, mas é um fato que sem ela não seria possível explicar a evolução do Universo, a formação das estruturas em larga escala e a radiação cósmica de fundo. A matéria escura permeia todo o Universo, mas é muito difícil saber como ela se distribui. Há muitos estudos em andamento que se utilizam de mapeamentos detalhados do Cosmo, feitos com satélites. O que se pode afirmar com segurança é que ela corresponde a 85% da matéria do Universo. Mas é bastante inquietante não saber o que ela é.



Observado em larga escala — distâncias da ordem de bilhões de anos-luz — o Universo tem a forma de uma imensa teia cósmica. O espaço intergaláctico não é vazio, ele ocupado pela matéria escura, cuja ação gravitacional provoca a aglomeração de galáxias (pontos brilhantes) nos filamentos e nós da teia.
Crédito: European Space Agency, ESA – Projeto Horizon

A natureza da matéria escura é um dos grandes mistérios da Física e da Astronomia. Sabemos que nossos corpos são feitos de prótons e nêutrons, o que chamamos de *matéria bariônica*, ou *luminosa*. Toda a matéria visível é feita do mesmo material. Mas não temos matéria escura no nosso organismo. A dificuldade no estudo da matéria escura se deve ao fato de ela não interagir de nenhuma forma conhecida. Não interage com fótons, nem com glúons ou com os bósons W e Z. Na verdade, matéria invisível seria um nome mais apropriado.

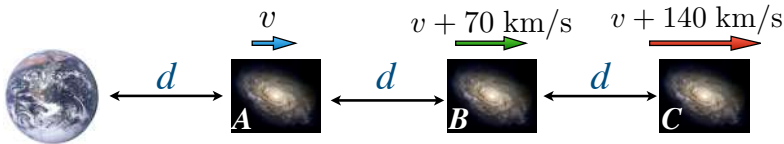
De que é feita a matéria escura? Novos tipos de partículas? Existe a antimatéria escura? Há muitas outras perguntas que mostram o quão pouco sabemos. Temos alguma segurança em dizer o que a matéria escura *não* pode ser, ms apenas hipóteses sobre o que é. Talvez ela tenha mais de uma identidade, seja feita de diferentes componentes. A mera existência da matéria escura é uma prova contundente de que o Modelo Padrão das partículas elementares é incompleto.

O mundo microscópico é bem mais complexo do que imaginávamos. Sabe-se apenas que novas partículas e novas forças devem existir. Há várias teorias sobre o que seria a Física além do Modelo Padrão. Todas preveem a existência de novas partículas. Então, é natural que, nos modelos de composição da matéria escura, as principais candidatas sejam essas partículas hipotéticas. Com base nas previsões das diferentes teorias, vários experimentos foram montados, estão em fase de montagem ou ainda em planejamento, envolvendo estratégias e técnicas variadas. Apesar dos esforços, até agora nenhum indício foi encontrado.

Bem, é preciso fazer uma ressalva. Existe um experimento, DAMA, realizado na Itália, que afirma ter detectado a matéria escura. É um resultado controverso, pois nenhum outro experimento confirmou o achado do DAMA. Mas também deve-se considerar que nenhum outro experimento utilizou a mesma técnica. No momento em que escrevo, um novo experimento, SABRE, está sendo construído. Usará a mesma técnica do DAMA, mas terá maior sensibilidade. Espera-se que em poucos anos o experimento SABRE confirme ou refute os resultados do DAMA.

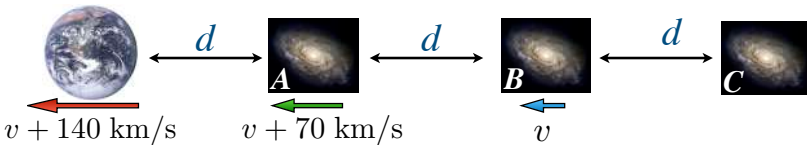
No começo do século passado, a extraordinária astrônoma Henrietta Lewitt inventou um método bastante engenhoso e eficaz para medir distâncias astronômicas, usando as estre-

las Cefeidas. Alguns anos depois, Edwin Hubble utilizou o método de Lewitt para fazer uma das descobertas mais impactantes da Astronomia: o Universo está em expansão, e a velocidade com que uma galáxia se afasta da Terra é proporcional à sua distância, ou seja, quanto mais distante ela estiver, mais rapidamente se afasta. É importante lembrar que a Terra não ocupa um lugar privilegiado no espaço. Um observador em uma galáxia distante também veria as demais galáxias, incluindo a Via-Láctea, se afastarem com velocidade proporcional à distância.



Lei de Hubble: a cada 3,2 milhões de anos-luz de distância, a velocidade aumenta de 70 km/s

Não há referenciais privilegiados no Universo!

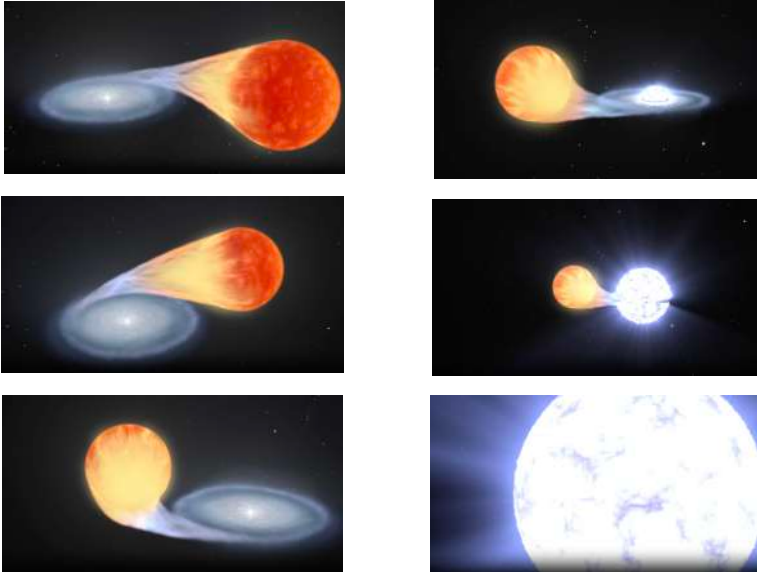


O método de Lewitt, no entanto, só permite medir com segurança distâncias menores do que 100 milhões de anos-luz, o que nos limita a observar o que acontece no nosso “quintal”. Até algumas décadas atrás, portanto, a relação entre velocidade de afastamento e distância encontrada por Hubble havia sido testada apenas em galáxias “próximas”. Mas o Universo é muito mais vasto, e para testar a lei de Hubble em escalas de bilhões de anos-luz, seria necessário desenvolver um novo método, descobrir uma nova “vela padrão”, com maior alcance do que as Cefeidas.

Para muitas anãs brancas, não existe a solidão desolada do espaço sideral. Existem sistemas binários, em que duas estrelas orbitam em torno uma da outra a uma distância segura. Uma das estrelas pode ser bem maior que a outra. A estrela maior evolui mais rapidamente, passa pela fase gigante vermelha até se tornar uma anã branca que, com sua gigantesca gravidade, “engorda” sugando avidamente a matéria da segunda estrela. A massa da anã branca aumenta continuamente, causando um aumento na pressão da gravidade. Chega o momento em que a gravidade supera a resistência dos elétrons “clausrofóbicos” (Capítulo 6). A anã branca é comprimida bruscamente, e com isso a temperatura do seu interior aumenta terrivelmente. Então, tem início uma cadeia de reações nucleares que culmina em uma espetacular explosão, a supernova. Essas são as supernovas do tipo 1A.

Nos sistemas binários, as anãs brancas explodem quando suas massas atingem um limite bem determinado. Todas as anãs brancas são muito parecidas, com o mesmo limite da quantidade de matéria que podem absorver das suas companheiras. Por isso, quando explodem, seu brilho característico (a luminosidade absoluta) é bem conhecido. As supernovas tipo 1A são objetos celestes extremamente luminosos, o que possibilita que sejam observados mesmo estando a grandes distâncias. São as “velas padrão” necessárias, que permitem medir distâncias muito maiores do que é possível com as Cefeidas.

As supernovas 1A são raras. Na Via-Láctea, ocorrem uma vez a cada 50 anos. Por isso, entre o final dos anos 1980 e meados da década de 1990, duas equipes independentes foram formadas para caçá-las em outras galáxias. Nessa época, a Astronomia já havia se tornado uma atividade colaborativa multinacional, e as duas equipes reuniam astrônomos de vários países. Ao todo, as duas equipes encontraram 50 supernovas, distantes até seis bilhões de anos-luz. A essa altura já havia



Crédito: NASA — Goddard Space Flight Center Conceptual Image lab

A sequência de imagens mostra a evolução de um sistema binário. Uma das estrelas é uma anã branca e a outra uma gigante vermelha. A anã branca captura matéria de sua companheira, ficando cada vez mais densa, até atingir um limite. Então, explode espetacularmente.

telescópios muito sofisticados, inclusive na órbita da Terra, além da tecnologia digital para o registro de imagens e análise de espectros. Já havia também computadores poderosos para o processamento dos dados.

Março de 1998. A equipe liderada por Adam Riess publica seus resultados: o Universo não só se expande, como o faz cada vez mais rapidamente. A outra equipe, liderada por Brian Schmidt e Saul Perlmutter, logo confirma o achado. Hubble havia mostrado que nas nossas “vizinhanças” o Universo se expande em ritmo constante, com uma proporção entre distâncias e

velocidades relativas. Mas em escalas cosmológicas essa proporção se desfaz. O Universo cresce de forma acelerada.

Esse resultado, totalmente inesperado, chocou a comunidade dos astrônomos e físicos, inclusive os integrantes das duas equipes. Em um Universo com apenas matéria e energia, a gravidade deveria frear a expansão em algum momento. O espaço se “esticaria” até certo ponto para depois “encolher”, como uma faixa elástica.

A descoberta da expansão acelerada do Universo rendeu o Prêmio Nobel de 2011 a Brian Schmidt, Adam Riess e Saul Perlmutter. É um achado com implicações profundas. Atualmente, muitos físicos se dedicam a estudar esse fenômeno, cuja causa ainda é desconhecida. Chamamos temporariamente a causa da aceleração por um nome inapropriado, a *energia escura*, cuja natureza é outro grande enigma.

Há, portanto, quatro componentes no Universo: matéria bariônica (nós), energia, matéria escura e energia escura. Mapeamentos detalhados da distribuição das galáxias assim como das minúsculas variações da radiação cósmica de fundo (ver Capítulo 10) revelam o quanto de cada componente existe: 73% de energia escura; 23% de matéria escura; apenas 4% de matéria ordinária, feita de átomos. Após mais de cem anos de esforços, partimos dos átomos e chegamos aos quarks, apenas para nos darmos conta de que no Universo há muito mais coisa do que imaginávamos. Tudo o que aprendemos corresponde a uma pequena fração do que existe. Do resto, pouco sabemos.

Capítulo 14

Epílogo

Jovens audaciosos, geniais e radicalmente criativos como Einstein, Bohr, Dirac e Heisenberg, entre outros, transformaram o mundo no início dos anos 1900. Protagonizaram uma revolução na Física que se desdobrou em transformações profundas em outras ciências naturais. A revolução quântica propiciou a revolução tecnológica que transformaria o nosso modo de ver e viver o mundo. Os tempos mudaram e os grandes heróis da Física se foram. A fase romântica da Física ficou para trás.

O conhecimento hoje é imensamente mais vasto e profundo do que há 100 anos. Torna-se cada vez mais diversificado e especializado. A formação de um cientista hoje requer muito mais tempo, pois hoje o volume de informações necessárias para a pesquisa na fronteira do conhecimento é incomparável ao do tempo dos jovens gênios. A especialização, inevitável, dificulta aos cientistas ter uma visão global do conhecimento acumulado. Há 100 anos, um físico brilhante poderia trabalhar em diversos temas não diretamente relacionados. Hoje isso ainda é possível, mas é muito mais difícil. O universo temático

da Ciência aumenta ao mesmo tempo em que se torna mais restrito para os cientistas.

A Física segue evoluindo, obviamente. Notáveis avanços ocorreram nas últimas décadas. Mas o conhecimento cresce e se ramifica como uma árvore frondosa. Nada impede que se descubram fenômenos jamais imaginados, que confrontem a Mecânica Quântica e/ou a Teoria da Relatividade. Mas é cada vez mais improvável que descobertas dessa natureza sejam feitas por indivíduos geniais. A Ciência hoje é uma obra coletiva, feita por muitos heróis anônimos.

Descobrir a natureza da matéria escura, dominar o processo de fusão controlada (uma fonte inesgotável de energia “limpa”), desvendar a história do Universo, tornar realidade a computação quântica em larga escala, são apenas alguns exemplos de conquistas que podem, uma vez mais, mudar o rumo da História. Em algum momento no futuro, talvez mesmo no intervalo de uma geração, elas poderão ser realizadas, mas quase que certamente as conquistas serão feitas por colaborações internacionais de milhares de cientistas, engenheiros e técnicos.

A Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade são contemporâneas, uma surgida do estudo do microcosmo, e a outra, do estudo do Cosmo. Nunca houve um salto no conhecimento tão grande como no primeiro quarto do século XX. E é notável a conexão íntima entre a Física do infinitamente pequeno e a do imaginavelmente grande, que vimos em vários momentos ao longo desse livro.

O conhecimento é a mais poderosa força de transformação. Pense como a vida no final do século XIX e início do século XX era dura, mesmo para os mais abastados. De forma generalizada, vivia-se mal uma existência que era muito mais curta: em média, a expectativa de vida era de apenas 47 anos (hoje é de 76 anos). Para a imensa maioria das pessoas, o dia a dia era

feito de má alimentação, quase sempre em condições precárias de moradia e higiene, e em meio à ignorância (o analfabetismo era alto). Imagine viver em um mundo sem eletricidade, água encanada (havia em poucos lugares), sem telefone, rádio e televisão, sem automóveis e aviões, sem antibióticos e vacinas, cozinhando com carvão, sem aquecimento no inverno nem ar condicionado no verão. Num intervalo de poucas décadas, tudo se transformou profundamente, uma mudança em grande parte movida pelo salto na compreensão da Natureza.

Em comparação com o início do século passado, a vida inegavelmente melhorou muito, ainda que não tenha sido da mesma forma e no mesmo grau para todos. Há ainda muitas regiões do planeta assoladas pela miséria e pela desigualdade. Se pararmos para pensar no que hoje torna a vida mais longa, mais fácil, segura e confortável, encontraremos a Mecânica Quântica por toda a parte, dos celulares às vacinas, das lâmpadas led aos computadores e à internet, dos painéis solares à engenharia genética, do laser à tomografia computadorizada.

A Mecânica Quântica é encontrada em todo canto porque é a ferramenta que propiciou à humanidade a forma mais profunda e radical de interferir na Natureza: ter o controle dos átomos. Tudo o que vemos é feito de átomos. Sabendo manejá-los, o mundo torna-se ilimitado. A Mecânica Quântica desencadeou uma revolução tecnológica em muitas áreas. A Química, que trata das possíveis conexões entre os átomos dos diferentes elementos, foi reinventada, permitindo aos químicos definir quantitativamente os arranjos mais estáveis, ou a energia necessária para quebrar diferentes moléculas.

Graças à Mecânica Quântica, o microscópio eletrônico foi criado, permitindo visualizar pequenos detalhes no interior das células. A descoberta da estrutura do DNA, que levou tanto a Biologia como a Medicina a patamares jamais imaginados,

não teria sido possível sem a Mecânica Quântica, que também está por trás dos sofisticados equipamentos médicos modernos. Sem ela não haveria tratamento contra vários tipos de câncer, ou a vacina contra a Covid. A Mecânica Quântica transformou a Química, e ambas se introduziram definitivamente na Biologia.

A Ciência dos Materiais, com suas conexões com a Química moderna, também está baseada na Mecânica Quântica. A miniaturização e a pesquisa de novos materiais, sobretudo os nanoestruturados (o grafeno, por exemplo), leves e super resistentes, com as mais diversas aplicações, está revolucionando a tecnologia.

Não é minha intenção fazer aqui uma lista exaustiva das aplicações da Mecânica Quântica, quero apenas ilustrar com alguns exemplos como ela faz parte do dia a dia do nosso mundo digital. Seu potencial transformador não se esgotou, pelo contrário. A tecnologia que está sendo desenvolvida no presente torna muito difícil imaginar como será a vida daqui a algumas décadas.

Se durante os anos 1920 alguém perguntasse que utilidade teria a Mecânica Quântica ou a Teoria da Relatividade, a resposta seria *nenhuma*. A mesma pergunta poderia ser feita hoje, por exemplo, a respeito das pesquisas em Física de Partículas. Que utilidade teria a descoberta do bóson de Higgs? A resposta seria a mesma. Esse é o papel da pesquisa em Ciência fundamental: expandir o conhecimento, sem a preocupação com sua aplicação imediata. Cedo ou tarde, de uma forma ou outra, ela virá.

Nenhum país se desenvolveu, nenhuma sociedade moderna ofereceu segurança e conforto aos seus cidadãos sem um investimento significativo e contínuo em pesquisa básica, o conhecimento pelo conhecimento, sem outra preocupação que não fosse a curiosidade de entender como a Natureza funciona. No

Brasil, isso não será diferente. Cabe aos cientistas divulgar amplamente o conhecimento adquirido, não só como algo importante na formação da cidadania, como também uma forma de convencer a sociedade da importância de investimento em pesquisa científica básica.

