



Gigantes da Física

UMA HISTÓRIA DA FÍSICA MODERNA
ATRAVÉS DE OITO BIOGRAFIAS

Richard Brennan

DADOS DE COPYRIGHT

Sobre a obra:

A presente obra é disponibilizada pela equipe [Le Livros](#) e seus diversos parceiros, com o objetivo de oferecer conteúdo para uso parcial em pesquisas e estudos acadêmicos, bem como o simples teste da qualidade da obra, com o fim exclusivo de compra futura.

É expressamente proibida e totalmente repudiável a venda, aluguel, ou quaisquer uso comercial do presente conteúdo

Sobre nós:

O [Le Livros](#) e seus parceiros, disponibilizam conteúdo de domínio público e propriedade intelectual de forma totalmente gratuita, por acreditar que o conhecimento e a educação devem ser acessíveis e livres a toda e qualquer pessoa. Você pode encontrar mais obras em nosso site: [LeLivros.Info](#) ou em qualquer um dos sites parceiros apresentados [neste link](#).

Quando o mundo estiver unido na busca do conhecimento, e não mais lutando por dinheiro e poder, então nossa sociedade poderá enfim evoluir a um novo nível.



Richard P. Brennan

GIGANTES DA FÍSICA

Uma história da física moderna através de oito biografias

Tradução:

Maria Luiza X. de A. Borges

Revisão técnica:

Hélio da Motta Filho

*Doutor em física e pesquisador
do Centro Brasileiro de Pesquisas
Físicas (CBPF/CNPq)*

Henrique Lins de Barros

*Doutor em física e diretor
do Museu de Astronomia
e de Ciências Afins (MAST/CNPq)*

edição revista



SUMÁRIO

Apresentação à edição brasileira

Prefácio

Introdução: Sobre os ombros de gigantes

1 Isaac Newton

2 Albert Einstein

3 Max Karl Ernst Ludwig Planck

4 Ernest Rutherford

5 Niels Henrik David Bohr

6 Werner Karl Heisenberg

7 Richard Phillips Feynman

8 Murray Gell-Mann

Epílogo: O porquê da física

Cronologia da física

Glossário

Bibliografia

Índice remissivo

É a aventura mais perseverante e grandiosa da história humana — essa busca de compreender o universo, como opera e de onde veio. É difícil imaginar que um punhado de habitantes de um pequeno planeta que gira em torno de uma estrela insignificante numa pequena galáxia possa ter por objetivo uma completa compreensão do universo em sua totalidade, um grãozinho de criação acreditando realmente ser capaz de compreender o todo.

Murray Gell-Mann

Uma coisa que aprendi numa longa vida: que toda a nossa ciência, confrontada com a realidade, é primitiva e infantil — e no entanto é o que temos de mais precioso.

Albert Einstein

Minha mensagem é que a ciência é uma atividade humana, e a melhor maneira de compreendê-la é compreender os seres humanos individuais que a praticam.

Freeman Dyson

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Carolyn F. Brennan pelas ilustrações que acompanham o texto, bem como por sua revisão crítica do manuscrito. Sou também profundamente reconhecido a minha editora, Emily Loose, por suas significativas contribuições.

APRESENTAÇÃO À EDIÇÃO BRASILEIRA

A contribuição do cientista tanto para a ciência quanto para a história da humanidade muitas vezes demora algumas décadas para ser assimilada, o que torna o cientista uma pessoa mais distante e, de certa forma, mais inacessível. Além disso, sua contribuição é dada num mundo de linguagem própria, muitas vezes cheio de equações, de fórmulas ou de conceitos precisos e nada comuns.

A radical revolução da física no início do século XX continua promovendo avanços, embora já tenha mudado conceitos básicos de nossa cultura: espaço, tempo, determinismo. Um novo panorama surgiu, desde a escala submicroscópica das partículas elementares até as elaboradas teorias e ideias sobre o Universo. Mas continuamos conhecendo pouco da história de seus protagonistas, do aspecto humano e do contexto social no qual as revolucionárias leituras do mundo real se deram.

Será que as grandes teorias ou os experimentos relevantes não preservam em si algo de seus autores? Esses cientistas foram, sem dúvida, pessoas singulares; mas terão sido tão diferentes de nós? Foram, ou são, pessoas cheias de ideias que estão em permanente evolução, ou são obstinadas e possuem uma força de vontade férrea? Terão nossos mesmos defeitos e fraquezas diante do problema que os aflige ou são seguros e sólidos na defesa de seus argumentos? Jogam, como se diria, “honestamente” ou se deixam cair na convidativa tentação de utilizar o seu celebrado nome para derrubar os argumentos de seus competidores?

* * *

Gigantes da física apresenta a vida de oito cientistas que, com seu trabalho e personalidade, deixaram marca indelével na história da ciência: pessoas comuns, com falhas e virtudes, mas todas com um toque de genialidade que os distingue dos demais seres humanos.

Não se trata de um livro de ciência, e sim de um livro sobre ciência, que busca através da vida de cientistas mostrar seus trabalhos e contribuições para a humanidade. A descrição de fatos científicos é feita com o cuidado de proporcionar ao leitor uma leitura simples e em linguagem coloquial, sem os rigores técnicos que tornariam o assunto difícil para o leigo.

Uma série de alterações em relação à primeira edição desse livro foi introduzida com o intuito de melhor adaptar o texto para um público brasileiro, tornando-o mais acessível. Mantiveram-se, naturalmente, as ideias e abordagens originais, bem como o estilo narrativo do autor.

A leitura de *Gigantes da física*, acreditamos, será agradável e dará subsídios aos interessados para um maior aprofundamento dos assuntos abordados. Se o leitor tiver sua curiosidade aguçada e seu interesse pela física estimulado, nosso objetivo terá sido plenamente alcançado.

Hélio da Motta Filho

PREFÁCIO

Mencione as palavras *física* e *história* na mesma frase e os olhos do leitor mediano vão perder o brilho. No entanto, a história da evolução do pensamento humano, especialmente na física, é uma crônica dramática repleta de personagens curiosos e descobertas empolgantes. O objetivo fundamental deste livro é mostrar que física e história podem ser ao mesmo tempo estimulantes e incitadoras do pensamento.

Este livro apresenta o perfil de oito físicos que contribuíram de maneira relevante para a revolução que ocorreu na física no século XX e levou a toda uma nova compreensão da realidade — das leis do universo. A física é a ciência que trata da matéria, da energia, do movimento e da força — tudo desde a imensidão do cosmo até a menor partícula indivisível da natureza. Como atividade intelectual, ela é a busca das leis fundamentais da natureza e nenhum fenômeno no universo lhe é alheio. A abrangência de nosso tema, portanto, depende da capacidade que tenhamos, como escritor e leitor, de expandir nossas imaginações.

Além de ideias, porém, vamos estar tratando de pessoas — um conjunto de personalidades multifacetadas que são os atores neste palco. Especificamente, escolhi Isaac Newton, Albert Einstein, Max Planck, Ernest Rutherford, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Richard Feynman e Murray Gell-Mann, cada um dos quais representa um grande avanço ou mudança na visão do mundo. Esses homens partilham uma paixão intelectual comum por conhecer e compreender — assim como os grandes artistas são compelidos a criar. Quais foram as qualidades humanas singulares de cada um desses cientistas que os tornaram tão notáveis e tornam cada uma de suas histórias tão fascinante? Todos eles foram pensadores excepcionalmente originais que, em todos os casos, desviaram-se claramente do pensamento anterior para fornecer ao mundo concepções inteiramente novas da realidade e novas verdades para considerar. Eles são, em suma, aquelas pessoas que conduziram o mundo intelectual, por vezes com relutância, à continuidade de ideias, observações, especulações e sínteses que constituem o corpo de conhecimento hoje chamado *física moderna*. Que significado tem isso para nós? De minha parte, sou um entusiasta confesso da ciência e como tal posso ser acusado de ter uma visão extremamente estreita da história. Afirmo, contudo, que é quase impossível exagerar as contribuições desses oito cientistas. Elas são, a meu ver, muito mais notáveis que todos os reis, rainhas, generais e políticos que são os temas usuais da história. Quase tudo à nossa volta na Idade Moderna, de automóveis a eletrodomésticos, do avião a jato a usinas elétricas, deve sua existência em alguma medida a esses cientistas.

Isaac Newton é popularmente conhecido como o homem que viu uma maçã cair de uma árvore e a partir disso, de uma maneira ou de outra, elaborou as leis dos movimentos celestes. Suas contribuições — a mecânica e o cálculo — só podem ser verdadeiramente apreciadas quando vistas como precursoras da Idade da Máquina e da Revolução Industrial. As teorias revolucionárias de Max Planck introduziram a eletrônica quântica, sem a qual a indústria moderna não existiria. O legado conjunto desses homens é surpreendente.

Este livro é destinado à mais extraordinária das criaturas, o “leigo inteligente” — o não

cientista que pode jamais ter feito um curso de história da ciência, mas que ainda assim possui curiosidade intelectual para refletir sobre como chegamos à nossa concepção atual do mundo natural, e, igualmente interessante, quem foram os cientistas que nos trouxeram a este ponto. Este livro, portanto, é a história da física contada através de biografias abreviadas que se concentram nas personalidades dos físicos e em suas realizações científicas. Está escrito em linguagem não técnica e minha meta é explicar e interpretar a obra desses notáveis cientistas numa linguagem compreensível a todos. Nenhum conhecimento em ciência ou matemática é exigido do leigo para este guia. Estou de pleno acordo com Timothy Ferris, autor de livros sobre ciência, quando disse: “A dificuldade para se compreender uma obra de ciência, em contraposição a uma obra de arte, é frequentemente exagerada.” Newton, Einstein e Gell-Mann não deveriam ser mais amedrontadores que Shakespeare, Tolstoi ou Mozart. Todos eles representam um desafio intelectual e prometem uma rica recompensa pelo esforço. Este livro é para aqueles que não se deixam derrotar por tentativas de perscrutar e compreender o incrível mundo em que vivemos e que estão dispostos a pagar um pequeno preço em pensamento e esforço pelo ingresso.

Aliás, o título original deste livro em inglês (*Heisenberg Probably Slept Here*)^a vem de um adesivo avistado num carro no *campus* do MIT^b, e ele prova que, malgrado certos indícios em contrário, as pessoas versadas em ciências não deixam de ter certo senso de humor. Werner Heisenberg, é claro, foi o formulador do princípio da incerteza, pelo qual a exatidão da medida é substituída pela imprecisa probabilidade.

Porque começar com Isaac Newton e não com um físico do século XX? Se pensarmos na física como um esforço para encontrar um conjunto unificado de leis que governam a matéria, o movimento e a energia no nível microscópico ou subatômico, na escala humana do cotidiano e até na mais ampla escala cósmica extragaláctica, veremos que as realizações de Newton abrangem toda essa extensão, do micro ao macro, recobrando também o território intermediário da física aplicada do dia a dia. Hoje, a ambiciosa meta da física encontra-se quase realizada. Embora ainda não se tenha alcançado uma teoria completamente unificada dos fenômenos físicos, um conjunto notavelmente reduzido de leis físicas fundamentais parece capaz de explicar todos os fenômenos conhecidos.

A física desenvolvida até a virada do século XX, aproximadamente, é conhecida como *física clássica* e é capaz de explicar os movimentos dos objetos que se movem lentamente com relação à velocidade da luz, além de fenômenos como o calor, o som, a eletricidade, o magnetismo e a luz. Os desenvolvimentos da física moderna, como a relatividade e a teoria dos quanta, modifica a compreensão desses fenômenos na medida em que se aplicam tanto a velocidades mais altas e a objetos imensos quanto aos diminutos elementos constitutivos da matéria, como elétrons, prótons e nêutrons.

Em seu livro *Sonhos de uma teoria final*, o físico Steven Weinberg exprime isso da seguinte maneira: “É com Isaac Newton que o sonho moderno de uma teoria final [da física] realmente começa.” Newton nos fornece, portanto, o ponto de partida lógico para nossa aventura intelectual rumo ao espaço, o tempo e o desconhecido. Para montar o cenário para o grande homem, algumas palavras de prólogo — um breve sumário da física pré-newtoniana — são necessárias.

^a Heisenberg provavelmente dormiu aqui. (N.R.T.)

^b Instituto de Tecnologia de Massachusetts. (N.R.T.)

INTRODUÇÃO

SOBRE OS OMBROS DE GIGANTES

Em 1676, um modesto Isaac Newton escreveu numa carta a Robert Hooke, colega cientista e rival de longa data: “Se enxerguei mais longe que outros homens, foi porque me ergui sobre ombros de gigantes.” O resumo que se segue diz respeito a alguns dos gigantes a que Newton se referiu.

Sem dúvida havia física antes de Isaac Newton. Mesmo antes dos gregos antigos — na China, no Egito e na Mesopotâmia, para citar apenas três localizações geográficas —, pessoas esforçavam-se para compreender as leis naturais do estranho mundo em que viviam. Os árabes, por exemplo, deram à civilização seu atual sistema de numeração. As célebres pirâmides, cuja construção demandou um incrível conhecimento de matemática, já eram bastante antigas quando os gregos começaram a discutir filosofia e ciência. Do ponto de vista ocidental, no entanto, os gregos foram os mais importantes dos primeiros cientistas, os protótipos dos físicos, por assim dizer.

Alguns historiadores identificaram Tales de Mileto (640-546? a.C.) como o primeiro filósofo e o primeiro cientista. Para merecer essa honra, ele apresentou novas perspectivas sobre a maneira de se tentar compreender o mundo natural. Em primeiro lugar, Tales não recorreu ao animismo; isto é, não dizia que chove porque o deus da chuva está zangado ou que os mares são profundos porque os deuses assim determinaram. Em segundo lugar, fez a audaciosa afirmação de que o cosmo era algo que a mente humana podia compreender. Seu feito mais espetacular, e que provou sua tese, foi a previsão de um eclipse para 585 a.C. — ele realmente ocorreu. Tales pôs o mundo intelectual na senda da reflexão sobre o modo como as coisas funcionavam, uma senda que continua sendo trilhada em nossos dias.

Tales foi sucedido por Pitágoras (c.582-c.500 a.C.) e seus seguidores, que descobriram que o mundo real pode ser compreendido em termos matemáticos — de fato, talvez *mais bem* compreendido em termos matemáticos. A escola pitagórica, que sobreviveu ao mestre por várias centenas de anos, afirmava que o universo é a manifestação de várias combinações de razões matemáticas. Foi dito que os pitagóricos se desviaram da religião para a matemática e terminaram transformando a matemática numa religião. Sua intuição original, contudo, é considerada um dos mais importantes avanços na história do pensamento humano. Desde Pitágoras, a matemática tem sido a *lingua franca* da ciência. Ela pode, no entanto, ser traduzida numa linguagem mais compreensível. O próprio Pitágoras é considerado também o primeiro homem de que se tem notícia a ensinar que a Terra era uma esfera e ainda a postular que a Terra se move — ambas noções radicais.

A explosão de conhecimento grega continuou com as obras de, entre outros notáveis, Euclides, Aristarco, Arquimedes e Eratóstenes. Euclides (c.300 a.C.), cujo nome é sem dúvida quase sinônimo de geometria, escreveu um manual chamado *Elementos* que se tornou o padrão durante séculos. Após a invenção da imprensa, foi objeto de mais de mil edições, razão pela qual Euclides é considerado o mais bem-sucedido autor de livro-texto de todos os tempos. O que fez a grandeza de Euclides foi sua capacidade de apreender todo o

conhecimento acumulado na matemática desde os dias de Tales e de codificar esses dois séculos e meio de esforços numa única obra. Os axiomas de Euclides, como “O todo é igual à soma das suas partes”, ou “Uma linha reta é a menor distância entre dois pontos”, eram outrora considerados leis matemáticas. No século XIX, os cientistas foram capazes de entender que, na verdade, axiomas são apenas afirmações admitidas, e não verdades absolutas. Pouco se sabe sobre a vida de Euclides, mas uma anedota diz respeito à sua resposta ao rei Ptolomeu do Egito quando este, ao estudar geometria, perguntou-lhe se não podia tornar sua demonstração um pouco mais fácil de entender. Euclides respondeu, inflexível: “Ó rei, para se viajar pelo país há vias régias e vias para os cidadãos comuns; na geometria, porém, há uma só via para todos.” Com frequência, esse pensamento é expresso na forma mais curta: “Não há via régia para a geometria.”

Aristarco de Samos (c.260 a.C.) é geralmente considerado o mais bem-sucedido dos astrônomos gregos. Aristarco calculou o tamanho real da Lua ao observar o tamanho da sombra projetada pela Terra durante um eclipse da Lua. A mais revolucionária de todas as suas ideias foi a sugestão de que os movimentos dos corpos celestes poderiam ser mais facilmente interpretados caso se admitisse que todos os planetas, entre os quais a Terra, giram em torno do Sol. Essa hipótese heliocêntrica era demasiado radical para ser aceita pelos sábios da época e o livro de Aristarco sobre esse assunto não sobreviveu.

Entre os gregos temos, em seguida, Arquimedes (287?-212 a.C.), reputado o mais eminente cientista e matemático da Antiguidade. Sob muitos aspectos, foi o primeiro cientista a ser também um engenheiro por ter voltado muitas de suas teorias para o uso prático. Por exemplo, Arquimedes formulou o princípio da alavanca. Demonstrou com detalhes matemáticos que um pequeno peso a certa distância de um fulcro (ou ponto de apoio) iria equilibrar um grande peso próximo do fulcro e que os pesos e as distâncias estavam em proporção inversa. Conta-se que, a propósito do princípio da alavanca, Arquimedes teria dito: “Dê-me um ponto de apoio e posso mover o mundo.”

Atribui-se também a Arquimedes a invenção de uma bomba de água na forma de um cilindro helicoidal que, quando girado, era capaz de mover água de um nível para outro, mais alto. Até hoje esse dispositivo é conhecido como o “parafuso de Arquimedes”. Em seu tempo, Arquimedes se notabilizou sobretudo como inventor de armas de guerra, catapultas e assemelhados. Foi de fato um complexo militar-industrial num só homem. Atualmente, porém, Arquimedes é mais conhecido popularmente pela divertida história de sua descoberta do princípio que leva o seu nome. O que se conta é que o protetor de Arquimedes, o rei, pediu-lhe que verificasse se uma coroa recém-enviada pelo joalheiro era de fato toda de ouro, como devia ser, ou se continha uma mistura enfraquecedora de prata. Devia fazer isso sem danificar a coroa de maneira alguma. Arquimedes não tinha a menor ideia sobre como levar a cabo essa tarefa até que um dia, ao entrar em sua banheira cheia, percebeu que a água transbordou. Diz a lenda que ao fazer essa observação ele pulou fora da banheira e saiu correndo nu pelas ruas de Siracusa em direção ao palácio gritando: “Eureca, eureka! (Achei!)”. Dessa observação casual, ele havia feito a brilhante dedução de que a quantidade de água deslocada era igual em volume à porção de seu corpo que estava submersa na banheira. A partir disso, concluiu que se mergulhasse a coroa do rei na água poderia descobrir o volume da coroa pelo aumento do nível da água. Em seguida poderia comparar o volume da coroa com o volume de igual peso de ouro. Se os volumes fossem iguais, a coroa era de ouro puro. Se tivesse uma mistura de

prata (que é menos densa que o ouro^a), a coroa teria um volume maior. Como uma nota de pé de página a esta famosa anedota, caberia observar que se descobriu que a coroa em questão era em parte de prata e o joalheiro foi executado.

Outro famoso pensador grego de interesse é o astrônomo, geógrafo e historiador Eratóstenes (276?-195? a.C.).^b Ele era o sábio encarregado da Biblioteca em Alexandria, e tutor do filho do rei Ptolomeu III. O mais importante de tudo, porém, e a razão de sua inclusão na maior parte das listas dos cientistas importantes da Antiguidade, foi sua façanha de determinar o tamanho da Terra. Ele o fez observando o fato de que, no dia do solstício de verão, o Sol ficava diretamente acima da cidade de Siena, no sul do Egito, na mesma hora em que estava a sete graus do zênite em Alexandria. Por raciocínio, concluiu que a diferença se devia à curvatura na superfície da Terra entre as duas cidades. Caso a distância entre as cidades fosse conhecida com certo grau de precisão e caso se admitisse que a Terra é uma esfera com igual curvatura em todas as partes de sua superfície, seria possível calcular o diâmetro da Terra. Usando este método, Eratóstenes calculou a circunferência da Terra em pouco mais de 40 mil quilômetros, o que é quase correto.^c O problema foi que ninguém acreditou nos seus números na época porque fazê-lo era admitir que o mundo então conhecido ocupava apenas uma pequena porção da superfície total da Terra, e grande parte desta era mar. Os outros três quartos da superfície da Terra ou eram inteiramente cobertos de água ou continham vastas terras desconhecidas — e essas duas alternativas eram ambas inaceitáveis na época.

Do tempo dos antigos às grandes descobertas de Nicolau Copérnico, Johannes Kepler e Galileu Galilei, passaram-se cerca de 1.700 anos — séculos durante os quais as teorias de Cláudio Ptolomeu (127-151 d.C.) dominaram o mundo pensante. Na versão da realidade de Ptolomeu, a Terra está no centro do universo e todos os planetas giram à sua volta em órbitas circulares de vários tamanhos, dependendo da distância que os separa da Terra. Essa teoria era clara e sistemática. Podia até ser usada na previsão das órbitas dos planetas, embora com escassa precisão, e era, é claro, completamente errada. Só 1.700 anos mais tarde fizeram-se observações dos planetas com precisão suficiente para levantar dúvidas sobre a versão do universo de Ptolomeu.

O astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) foi quem deu a partida na revolução científica que haveria de destronar a ciência grega e introduzir o homem pensante num caminho mais produtivo. Em 1507, ele observou que as tabelas das posições planetárias poderiam ser calculadas com maior precisão caso se admitisse que o Sol, e não a Terra, era o centro do universo. Essa não era uma ideia completamente nova — Aristarco havia sugerido essa ideia radical muitos anos antes. Mas foi Copérnico que elaborou um sistema com todos os detalhes matemáticos para demonstrar e sustentar o novo conceito. A nova ordenação dos planetas proposta por Copérnico, do Sol para fora — Mercúrio, Vênus, Terra e Lua, Marte, Júpiter e Saturno — substituiu a tradicional ordem centrada na Terra e forneceu uma solução simples e coerente para o problema até então mal resolvido de por que Mercúrio e Vênus sempre apareciam perto do Sol.

O sistema copernicano explicou também o enigmático movimento dos planetas, em particular o aparente movimento retrógrado de Marte, Júpiter e Saturno. Se a Terra estava se movendo em torno do Sol numa órbita menor que as de Marte, Júpiter e Saturno como Copérnico propôs, ela iria periodicamente passar à frente desses planetas, fazendo com que

parecessem estar se movendo para trás no céu noturno. Além disso, o fenômeno da precessão (ou ocorrência antecipada) dos equinócios podia agora ser explicado por um balanço da Terra à medida que ela gira em torno do seu eixo. Os equinócios, você deve estar lembrado, ocorrem quando o Sol cruza o plano do equador da Terra, fazendo com que noite e dia tenham iguais durações na Terra inteira. Isso acontece duas vezes por ano, por volta de 21 de março no caso do equinócio da primavera e de 21 de setembro, equinócio de outono.^d O problema era que esses eventos estavam ocorrendo um pouco mais cedo todos os anos e isso não podia ser explicado pelas velhas teorias ptolomaicas. Seria possível explicar melhor as estações na Terra se esta se movesse em torno do Sol uma vez por ano e tivesse, como de fato tem, seu eixo inclinado em relação ao Sol.

Durante a maior parte de sua vida, Copérnico se absteve de publicar na totalidade suas extraordinárias concepções. *De revolutionibus* só foi publicado em 1543 e, por ironia, foi objeto de amplo descaso na época. As ideias expressas na obra de Copérnico eram excessivamente radicais para serem levadas a sério. Durante décadas, houve poucos indícios na Europa de que uma concepção sem precedentes fora proposta e de que uma mudança drástica na visão do mundo fazia-se agora necessária. A Igreja Católica Romana por certo prestou atenção à natureza herética da obra de Copérnico e, como ela contradizia claramente os ensinamentos da Igreja sobre um universo centrado na Terra, proibiu-a. Só em 1835, quase 300 anos após a morte de Copérnico, o livro foi retirado da lista de livros proibidos. Quatro anos mais tarde, quando uma estátua de Copérnico foi inaugurada em Varsóvia, nenhum padre católico se dispôs a officiar na ocasião.

Apesar de tudo, dois jovens astrônomos de diferentes partes do mundo logo se converteram às ideias de Copérnico: Kepler na Áustria e Galileu na Itália. Johannes Kepler (1571-1630) era o herdeiro de um vasto conjunto de observações astronômicas de uma precisão sem precedentes acumulado por Tycho Brahe (1546-1601), o astrônomo dinamarquês que foi seu mentor e seu predecessor na posição de matemático e astrólogo do sacro imperador romano. Usando esse tesouro de dados e fortalecido pela fé na teoria copernicana, Kepler empenhou-se na descoberta das leis matemáticas que iriam resolver o problema do comportamento dos planetas. Por mais notável que fosse a concepção heliocêntrica de Copérnico, os dados observáveis ainda não se ajustavam perfeitamente à teoria. Kepler dedicou dez anos de trabalho árduo e paciente à investigação empírica dos movimentos dos planetas e às leis matemáticas subjacentes a esses movimentos. Fez tudo isso inteiramente sozinho, sem o apoio de ninguém e compreendido apenas por poucos. O golpe de gênio de Kepler foi descobrir que a verdadeira forma da órbita da Terra em torno do Sol era uma elipse e não um círculo perfeito como havia sido postulado. Fez isso calculando as relações posicionais da Terra, de Marte, e do Sol, para concluir que somente uma órbita elíptica corresponderia aos dados observáveis. Feito isso, Kepler passou a calcular as órbitas e os movimentos dos demais planetas conhecidos. Foi um trabalho monumental, especialmente em se considerando as limitações da matemática na época. Além de descobrir que as observações correspondiam precisamente a órbitas com forma de elipses, Kepler descobriu que cada planeta se movia numa velocidade proporcional à distância que o separava do Sol.

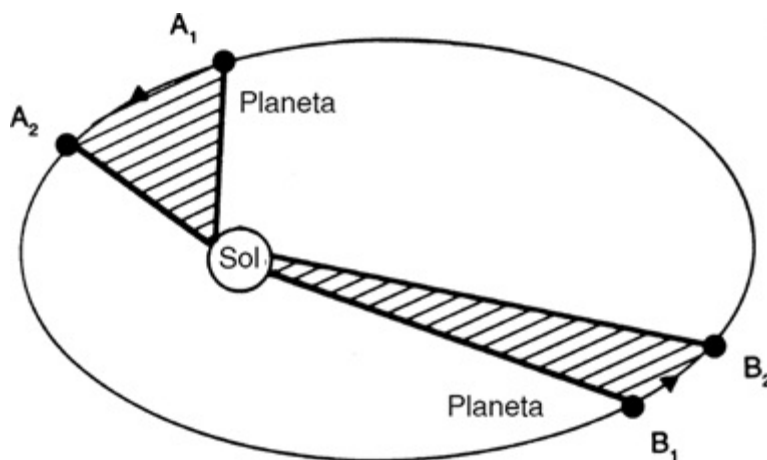
Com base nesses achados, Kepler desenvolveu um conjunto de três leis: (1) Os planetas orbitam em torno do Sol em órbitas elípticas, com o Sol num dos dois pontos focais da elipse. (2) A linha que une o Sol e um planeta varre áreas iguais em tempos iguais. (3) O cubo da

distância média entre um planeta e o Sol é proporcional ao quadrado do tempo que ele leva para completar uma órbita.

A segunda lei pode ser expressa também da seguinte maneira: quando um planeta está se movendo pela extremidade externa de sua elipse, a linha que o une ao Sol será mais longa e o planeta estará se movendo mais lentamente; à medida que o planeta move-se mais perto do Sol, a linha ficará mais curta e o planeta se moverá mais depressa. Essas mudanças na velocidade significam que a área varrida pela linha que une o sol a um planeta, em qualquer período de tempo, quer o planeta esteja próximo ou longe do Sol, permanecerá a mesma.

A terceira lei de Kepler também admite outra formulação: se a distância média entre o Sol e qualquer planeta fosse elevada ao cubo e se o tempo que esse mesmo planeta leva para completar sua órbita fosse elevado ao quadrado, a razão dos dois números resultantes seria sempre a mesma, não importa qual fosse o planeta envolvido. Para todos os efeitos, as leis de Kepler introduziram ordem e harmonia à concepção de universo da humanidade.

Quando jovem, Kepler ganhava a vida como professor de matemática numa cidadezinha da Áustria. Para suplementar seus magros ganhos, distribuía calendários astrológicos que previam, entre outras coisas, o tempo, o destino de príncipes, os riscos de guerra e de insurreições dos turcos. Sua fama se espalhou e por fim ele passou a calcular horóscopos para o imperador Rodolfo e outros membros preeminentes da corte. A pseudociência da astrologia continuou sendo a fonte de renda de Kepler quando tudo mais falhava. Consta que ele teria dito: “Prognosticar é, pelo menos, melhor que mendigar.” Apesar de suas incursões pela cartomancia, Johannes Kepler assegurou seu lugar entre os gigantes como o primeiro homem a discernir a real arquitetura do sistema solar e a formular leis que preveem com precisão os movimentos dos planetas.



SEGUNDA LEI DE KEPLER O tempo entre A_1 e A_2 é igual ao tempo entre B_1 e B_2 . A velocidade entre A_1 e A_2 é maior quanto maior a proximidade do Sol.

Aproximadamente na mesma época em que Kepler estava publicando suas leis do movimento planetário em Praga, Galileu Galilei (1564-1642), universalmente conhecido apenas por seu primeiro nome, virou seu recém-construído telescópio para o céu que cobria Pádua, na Itália. Ele não inventara o telescópio; o dispositivo fora criado na Holanda em 1608. No entanto, ele montou para si um telescópio melhor em 1609 e foi o pioneiro de seu uso como instrumento astronômico.

Antes de se voltar para observações astronômicas, Galileu estivera empenhado em firmar

sua reputação como o primeiro físico experimental do mundo. Fez experimentos com tudo que lhe passou pela cabeça: com o som, com a luz, com a temperatura e, o que foi mais importante, com o movimento. Segundo uma história interessante, que infelizmente não passa de um mito, Galileu deixou cair objetos de diferentes pesos da inclinada Torre de Pisa para demonstrar que caíam sobre a Terra com a mesma velocidade^f. Essa história não é mencionada por Galileu em nenhuma de suas anotações; na verdade, foi atribuída a ele anos mais tarde. Seja como for, o experimento, tivesse ele sido efetuado, não teria tido os resultados presumidos, porque objetos de diferentes pesos só caíam no mesmo intervalo de tempo no vácuo.

O que Galileu de fato fez foi estudar como os objetos se movem; não deixando que caíssem livremente da torre ou de qualquer outro lugar, mas usando um plano inclinado. Fazendo bolas de diferentes pesos rolar por um plano inclinado abaixo, tornou o movimento mais lento até o ponto em que podia medi-lo. Não era um experimento perfeito porque havia atrito envolvido e objetos mais pesados seriam mais afetados que outros mais leves. Galileu fez o possível para eliminar esse fator, polindo a tábua inclinada até deixá-la lustrosa. Começou com uma inclinação suave e em seguida repetiu o experimento com inclinações crescentes, até que a velocidade se tornou grande demais para ser medida com alguma precisão. Galileu foi capaz de extrapolar os resultados desses experimentos com planos inclinados, concebendo um experimento hipotético mental para conjecturar o que ocorreria a objetos numa queda livre. Descobriu que um objeto em queda não cai simplesmente — ele cai cada vez mais depressa ao longo do tempo. Em outras palavras, ele se acelera, e a aceleração (aumento da velocidade) é constante. Além disso, Galileu observou que a taxa de aumento da velocidade é a mesma para todas as esferas, seja qual for seu peso ou tamanho. Sendo um matemático, expressou todas as suas conclusões numa fórmula que é conhecida como a *Lei da queda dos corpos*. Não precisamos detalhar a matemática ou a fórmula, mas cabe simplesmente assinalar que hoje se considera que as observações e deduções de Galileu deram início à ciência da mecânica e que tiveram enorme influência sobre Isaac Newton.

Nas noites de 4 a 15 de janeiro de 1610, reputadas por muitos como as mais importantes na história da astronomia, Galileu fez observações assombrosas com seu recém-construído telescópio. Essas observações puseram ao alcance da astronomia as primeiras provas qualitativamente novas que ela conhecera desde a Antiguidade. Galileu interpretou cada uma de suas observações — as crateras e montanhas na superfície da Lua, as manchas móveis no Sol, as quatro luas que giram em torno de Júpiter, as fases de Vênus, as diferentes estrelas quase inacreditavelmente numerosas da Via Láctea — como poderosa evidência que vinha corroborar os conceitos de Copérnico e refutar a velha teoria ptolomaica. Com o telescópio de Galileu, a *teoria heliocêntrica* tornou-se o *fato heliocêntrico*. O universo copernicano não mais poderia ser descartado como mera conveniência de cálculo.

Em 1632, Galileu publicou seus achados num livro chamado *Diálogo sobre os dois maiores sistemas do mundo* e imediatamente passou a ter problemas com a Igreja Católica Romana. A propósito, a despeito de sua importância trata-se de um livro longe de ser sisudo. Está cheio do que hoje se chamaria de piadas batidas e zombarias. A zombaria, contudo, fazia-se à custa da Igreja e do papa Urbano VII, e foi aí que os problemas começaram. Galileu foi levado perante a Inquisição sob acusações de heresia. As questões consideradas no julgamento pouco tinham a ver com teorias científicas. Na verdade, Copérnico, a concepção heliocêntrica, e uma Terra que se movia não foram discutidos em momento algum. A questão

central do julgamento foi a obediência ao papa. Galileu havia tentado separar os domínios da Igreja e do Estado ao dizer: “A religião nos diz como chegar ao Céu, não como o Céu chegou lá”, mas fracassou.

Como parte de seu esforço para convencer Galileu do erro de seus procedimentos, o inquisidores levaram o arrogante astrônomo, então com quase setenta anos, até as masmorras e lhe mostraram o ecúleo. Galileu não foi realmente torturado. Duas vezes, porém, foi ameaçado de tortura. É possível também que tenha sido lembrado de que em 1600 o papa Clemente VIII enviara o desventurado astrônomo italiano Giordano Bruno, que também desenvolvera ensinamentos e pensamentos ligados a teoria heliocêntrica, para a fogueira por heresia. Com pouca escolha, Galileu renunciou às suas ideias e foi condenado a prisão domiciliar pelo resto de seus dias. A história de que Galileu, após sua abjuração, levantou-se do chão onde estava ajoelhado e sussurrou “*E pur si muove*” (“Apesar disso, se move”) é mais um mito que só emergiu em 1761, cerca de 130 anos após o julgamento.

Enquanto esteve sob prisão domiciliar, nada do que Galileu escreveu pôde ser publicado. A doutrina proibida de um universo heliocêntrico não devia ser discutida, e Galileu não tinha permissão para falar sequer com protestantes. O resultado de tudo isso foi o fim da investigação científica católica. O grande contemporâneo de Galileu, René Descartes, levou a advertência a sério, parou de publicar na França e mudou-se para a Holanda. O Vaticano tardou até 1985 para reconhecer que Galileu foi um cientista notável e injustiçado pela Igreja. Em 1986, Sua Santidade o papa João Paulo II apelou para uma “concordia frutífera entre ciência e fé”. Atualmente, a Igreja católica mantém astrônomos e outros cientistas para aconselhá-la no tocante ao mundo físico.

Para que outros avanços na compreensão humana do universo natural se produzissem, era preciso, contudo, que a Revolução Científica se deslocasse para o norte da Europa, e ela o fez. Galileu morreu, ainda prisioneiro em sua casa em Arcetri, perto de Florença, em 1642. No dia de Natal do mesmo ano, na aldeia de Woolsthorpe, na Inglaterra, nasceu Isaac Newton.

^a A densidade da prata é de 10,5 g/cm³ enquanto a do ouro é de 19,5 g/cm³. (N.R.T.)

^b Para uma descrição de vários dos experimentos mencionados pelo autor, ver Michel Rival, *Os grandes experimentos científicos*, Rio de Janeiro, Jorge Zahar, 1997. (N.R.T.)

^c As medidas de Eratóstenes forneceram o valor de 250.000 estádios para a circunferência da Terra, que corresponde a cerca de 46.000km. O valor real é de 39.941km mostrando a excelente estimativa realizada por Eratóstenes. (N.R.T.)

^d No hemisfério Sul estas datas correspondem ao equinócio do outono e da primavera, respectivamente. (N.R.T.)

^e Galileu escreve, em seu livro de 1610, *A mensagem das estrelas* (MAST/Salamandra, trad. C. Ziller, 1987): “Há cerca de dez meses chegou aos nossos ouvidos a notícia que um certo belga havia produzido um ‘óculo’ com o qual os objetos visíveis ainda que muito longe do olho do observador se discerniam claramente como se estivessem próximos.” (N.R.T.)

^f A queda em questão não se dá em velocidade constante: os corpos são acelerados. O alegado experimento demonstraria que os dois corpos, se largados simultaneamente, atingiriam o solo ao mesmo tempo. A velocidade de ambos seria igual em cada instante de tempo, pois ambos experimentariam a mesma aceleração. (N.R.T.)

ISAAC NEWTON

*A natureza e suas leis ocultavam-se nas Trevas,
Deus disse “Que Newton se faça”, e fez-se a Luz.*

Alexander Pope

Isaac Newton foi chamado o gênio científico preeminente, o intelecto supremo da Idade das Luzes. Que espécie de homem foi ele para despertar tal admiração? Quando seu célebre livro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Princípios matemáticos de filosofia natural) — ou, simplesmente, *Principia* — veio a público pela primeira vez em 1686, ele assombrou o mundo do conhecimento. Nesse livro, Newton resolveu o maior problema na história da ciência até aquela data — o problema da mecânica do universo.

Na verdade ele havia resolvido o problema básico 20 anos antes, durante umas férias de 17 meses que uma peste o forçou a passar no interior do Lincolnshire, na Inglaterra. Em seguida, o jovem Newton retornou a Cambridge para ensinar matemática no Trinity College. Cumpria suas obrigações tranquilamente e, podemos supor, bem, mas não publicava nada de seu trabalho. Ao que parece, vivia num enorme enfado nessa época. Não se sentia inclinado a contar para o resto do mundo o que havia descoberto durante aquela breve estada no campo. Mais ainda, em razão da complexidade de seus cálculos, ele precisou inventar um sistema de matemática inteiramente novo — hoje chamado de *cálculo*. Também sobre isso não falou com ninguém. Ali estava sem dúvida um cientista estranho.

Para nós, que vivemos numa época em que tudo se publica às pressas — e muitas vezes prematuramente —, a ideia de descobrir as leis básicas que governam o universo e guardá-las em segredo parece absurda. Por que o briguento e mal-humorado Newton relutava tanto em partilhar suas descobertas? Em *Uma breve história do tempo*, seu grande best-seller, Stephen Hawking observou que “Newton não era um homem agradável” e que era dado à “desonestidade e ao sarcasmo”. O comportamento característico de Newton não podia ter se originado de um fracasso em ser reconhecido e reverenciado em seu próprio tempo, porque o foi. De fato, Newton foi o primeiro cientista inglês a ser armado cavaleiro por um soberano britânico. Por que então, segundo a voz corrente, Newton era tão excêntrico? O conhecimento de alguma coisa sobre a formação desse homem extraordinário ajudará a encontrar a resposta.

PRESSÁGIO DE SUCESSO

No dia de Natal de 1642, Hannah Newton (nascida Ayscough), de Woolsthorpe, perto de Grantham, no Lincolnshire (cerca de cem quilômetros de Cambridge), deu à luz seu primeiro

filho. Chamou o menino de Isaac em homenagem ao pai dele, um agricultor que morrera dois meses antes, aos 36 anos. Era um bebê prematuro, tão pequeno e frágil que a mãe temeu que não passasse do primeiro dia. Era tão miúdo que, como ele contou a seu biógrafo muitos anos mais tarde, “podiam pô-lo numa panela de um litro”. Segundo a lenda familiar, duas criadas enviadas para buscar alguma coisa para o recém-nascido na localidade próxima de North Witham sentaram-se num umbral à beira do caminho, dizendo que não havia razão para pressa já que o menino estaria morto antes que pudessem voltar. Mas ele viveu e, embora fosse ocasionalmente acometido por doenças e tenha sido um hipocondríaco durante a vida toda, Newton contrariou a predição delas e viveu até os 84 anos. Nessa altura, muitos devem ter pensado que foi seu mau gênio que o manteve vivo por tanto tempo.

Isaac não teve uma infância feliz. Quando tinha três anos, sua mãe se casou com Barnabas Smith, um abastado pastor com o dobro da idade dela, e o menino foi mandado para a casa da avó materna, com quem passou a morar.

Ficou separado da mãe durante nove anos, até a morte do padrasto em 1653. É evidente que a separação afetou gravemente o desenvolvimento de sua personalidade e quase certamente moldou suas atitudes em relação às mulheres. Ele pouco se envolveu com elas durante toda a sua vida. A julgar por seus diários e anotações, dedicou pouco tempo até a pensar sobre as mulheres (em contraste com seu contemporâneo e também diarista Samuel Pepys, que obviamente dedicou pouco tempo a pensar sobre qualquer outra coisa). Newton nunca se casou, embora provavelmente tenha ficado noivo pelo menos uma vez (talvez duas), e parece ter concentrado sua atenção exclusivamente no trabalho.

Alguns historiadores examinaram a ancestralidade de Newton em tentativas de explicar seu brilhantismo como uma herança genética, mas essas investigações foram infrutíferas. O ramo da família Ayscough de que a mãe de Newton provinha, embora em geral mais instruída e de maior projeção social que os Newton, não produziu mais ninguém de algum mérito excepcional. Quanto aos Newton, ainda que fossem agricultores bastante bem-sucedidos, tinham pouca, ou nenhuma, educação formal e eram na realidade analfabetos — todos assinaram seus testamentos, redigidos por escribas da aldeia, com uma cruz. A própria Hannah sabia escrever um pouco, a julgar por alguns fragmentos de bilhetes que enviou a Isaac quando este se encontrava em Cambridge. Ela assinou seu próprio testamento, mas não é provável que tivesse muita educação formal, nem que pusesse fê nela.

O importante para nossa história é que Newton foi criado quase inteiramente pelos Ayscough e, por causa disso, provavelmente abraçou um conjunto de expectativas diferente do que teria tido se seu pai ainda vivesse. No seio da família Ayscough havia membros instruídos, em especial o reverendo William Ayscough, que morava a apenas alguns quilômetros de distância. É possível que para os Ayscough fosse natural que o garoto devesse receber pelo menos uma educação básica, ao passo que é duvidoso que os Newton teriam considerado isso necessário.

Se não transmitiram a Isaac uma tradição de estudos, os Newton deixaram-lhe uma propriedade. Quando se casou novamente, Hannah teve o cuidado de reservar a renda dessa propriedade paterna para Isaac. Além disso, como parte de seu contrato de casamento, insistiu em que seu segundo marido transferisse outra gleba para o jovem Newton. Se por um lado se pode dizer que, na condição de jovem viúva, Hannah deserdou emocionalmente seu bebê, não há dúvida de que, financeiramente, ela fez por ele o melhor que podia.

Quase todas as anedotas sobre os anos da infância de Newton vêm de duas fontes: o dr. William Stukeley, amigo do físico na velhice e seu primeiro biógrafo, e John Conduitt, marido da sobrinha por afinidade de Newton, que fez anotações para uma pretendida biografia. Embora tivessem entrevistado muitas pessoas que haviam conhecido Newton quando criança, tanto Stukeley quanto Conduitt valeram-se do próprio Newton para a maioria dos casos que mais tarde viraram lendas. Stukeley e Conduitt relataram a crença popular corrente na época de que um nascimento no dia de Natal era presságio de futuros êxitos e que os filhos póstumos possuíam poderes extraordinários que os destinavam ao sucesso e à boa sorte.

Se tinha conhecimento dessas duas crenças populares e se sua mãe lhe falara sobre sua sobrevivência quase miraculosa como bebê, Newton podia sem dúvida pensar que fora escolhido pelo destino para a grandeza. Muito cedo, sabia que era diferente: parecia preferir a própria companhia à de outras crianças e raramente brincava ou praticava esportes com elas. Quando brincava com outras crianças, era em geral com meninas e não com os arruaceiros filhos dos agricultores da vizinhança. Segundo as pessoas entrevistadas por Stukeley, Isaac era introspectivo, tímido, temperamental e extremamente nervoso. Por outro lado, demonstrava habilidade manual e engenhosidade na construção de brinquedos mecânicos como relógios de água, reproduções em miniatura de moinhos de vento, pipas e relógios de sol.

Os nove anos que Newton passou em Woolsthorpe, separado da mãe, foram um período penoso. Conta-se que o jovem Isaac subia no campanário da igreja para avistar a aldeia próxima de North Witham, a nova residência da mãe, de quem sentia muita saudade. Havia, é claro, sua avó, Margery Ayscough para substituí-la, mas quando se avaliam os efeitos de seus primeiros anos de vida, é importante registrar que Newton nunca evocou qualquer espécie de lembrança afetuosa dela. Nem mesmo sua morte, alguns anos mais tarde, foi objeto de comentário.

Que importância teve tudo isso na modelagem do caráter do futuro gênio? Há alguns indícios documentais para sustentar a teoria de que essa importância foi de fato considerável. Em 1662, aos 19 anos, Newton passou por período de fervor religioso, durante o qual compilou uma lista de 58 pecados que esperava expiar mediante atos de confissão. O décimo terceiro desses pecados é revelador: “Ameaçar meu pai e minha mãe Smith de pôr fogo neles e na casa que os cobre.”

Em seu livro *Um retrato de Isaac Newton*, o professor Frank Manuel concluiu que o segundo casamento da mãe foi o episódio mais crítico de toda a vida de Newton. Segundo a análise de Manuel, baseada numa perspectiva freudiana, o sentimento de privação dominou a vida dele. Newton foi roubado de seu bem mais precioso, e passou o resto de sua vida encontrando substitutos sobre os quais dar vazão à raiva que não fora capaz de expressar contra o verdadeiro objeto de seu rancor, Barnabas Smith. Manuel considera que a atitude exorbitante de Newton para com seus rivais Robert Hooke, John Flamsteed e Gottfried Wilhelm Leibniz, bem como sua total impiedade para com os infelizes falsificadores que encontrou mais tarde na vida, podem ser explicadas pelas frustrações sofridas por Newton quando criança. É uma interpretação interessante dos fatos, o problema é que há muito poucos fatos. Qualquer que tenha sido a causa, Newton se tornou um homem angustiado, com uma personalidade neurótica.

Quando o reverendo Barnabas Smith morreu, em 1653, Hannah mudou-se de volta para Woolsthorpe. Newton tinha dez anos quando a mãe voltou. Agora, contudo, um meio-irmão e

duas meias-irmãs partilhavam a atenção dela. Cabia a Newton desempenhar o papel do irmão mais velho, zelando por seus meios-irmãos mais novos e ajudando-os. Obviamente esse não era um papel do seu agrado, mas teve curta duração. Menos de dois anos depois, Isaac foi enviado para uma escola secundária em Grantham.

A introdução prévia de Newton à educação formal fizera-se por meio de duas pequenas escolas de Skillington e Stoke Rochford, aldeias próximas o bastante de Woolsthorpe para que o jovem estudante fizesse a pé o caminho de ida e de volta todos os dias. Não há registro de quem foram seus professores ou do que aprendeu com eles. Newton não os menciona em nenhuma das entrevistas que deu mais tarde a Stukeley ou Conduitt. É possível que a capacidade de observação de Newton e sua curiosidade em relação ao mundo à sua volta ainda estivessem por se manifestar. É possível também que o introvertido menino Isaac vivesse num mundo povoado por seus próprios devaneios, pouco afetado pelo que quer que os professores estivessem tentando lhe ensinar. Fosse qual fosse o caso, seu professor na King's School, em Grantham, ficou tão pouco impressionado com o novo pupilo (e com os conhecimentos que acumulara) que não só o destinou à série inferior como o incluiu entre os últimos nela. Newton teria de iniciar sua verdadeira educação formal no nível mais baixo, ou perto dele.

Cerca de 11 quilômetros ao norte de Woolsthorpe, Grantham era longe demais para o jovem estudante ir a pé para a escola todos os dias. Tomaram-se providências para que Isaac ficasse alojado na casa do sr. Clark, o boticário da aldeia. A mulher de Clark era muito amiga da mãe de Isaac e seu irmão Joseph, um médico, era professor assistente na King's School. Isaac teria um quarto no sótão só para ele e, livre das tarefas agrícolas, passou a ter tempo para empreender vários projetos que lhe pareciam de interesse.

A educação formal de Newton estava agora nas mãos de um certo Henry Stokes, diretor da King's School. Não se sabe muito sobre o sr. Stokes porque ele morreu aos 53 anos, uma década antes de seu célebre discípulo se tornar famoso. Ele próprio tivera uma excelente formação e tinha renome como educador. Que espécie de educação recebiam os alunos da King's School? O currículo incluía provavelmente a Bíblia, latim e grego, literatura clássica e uma pequena medida de instrução em aritmética. Os especialistas parecem pensar que Newton não havia estudado geometria antes de ingressar em Cambridge. Era um grau de instrução matemática notavelmente reduzido para alguém que haveria de inventar o cálculo apenas quatro anos depois de deixar a escola secundária. Como Newton foi capaz de conceber o cálculo sem um completo conhecimento da cultura matemática da época? Este é um dos grandes mistérios não resolvidos que cercam Newton. Mas, seja o que for que lhe tenham ensinado na King's School, não há dúvida de que os interesses intelectuais de Newton foram despertados e cultivados sob o olhar aguçado de Henry Stokes.

Uma característica importante da educação nas escolas secundárias no século XVII era o ensino da Bíblia. É sabido que Isaac estudou a Bíblia nas línguas clássicas e desenvolveu um interesse pelas questões teológicas que perdurou por toda a sua vida. O latim foi outro elemento essencial da educação formal de Newton. Era a linguagem da ciência e da matemática em todo o mundo ocidental e o domínio que dela adquiriu não só permitiu a Newton estudar por conta própria como lhe forneceu o meio para se comunicar com a comunidade douta da época.

Como já se mencionou, Newton começou sua educação sendo classificado quase no nível

mais baixo da classe. Mas, aproximadamente na mesma época, teve lugar um acontecimento importante que ajudou a moldar a carreira acadêmica subsequente de Newton. Tal como Newton evocou o evento cerca de 70 anos mais tarde, numa manhã ele e um garoto se atracaram numa briga a caminho da escola, tendo o outro “chutado-lhe a barriga, com força”. Assim que as aulas do dia terminaram, Isaac desafiou seu agressor para uma luta e ganhou — apertou o rosto do oponente contra a parede da igreja, esfregou-lhe o nariz nela e o obrigou a se dar por vencido. Mas essa humilhante vitória física não foi o bastante. O adversário em questão (tratava-se muito provavelmente de Arthur Storer) era o melhor aluno da escola e Newton resolveu derrotá-lo academicamente tal como o fizera fisicamente. Assim, finalmente motivado, Isaac ascendeu rapidamente à condição de melhor aluno da escola. Esta história tem um quê de verdade, especialmente quando se considera que um dos pecados que Newton listou em 1662 foi “Bater em Arthur Storer”.

Em Grantham, Newton tornou-se um leitor voraz de tudo em que conseguia pôr as mãos — provavelmente sobretudo livros religiosos, o que pode explicar o interesse por teologia que alimentou a vida inteira. Mais ou menos na mesma época, desenvolveu um interesse por medicina e química, que pode ser atribuído a Clark, seu senhorio, bem como ao irmão deste, Joseph, um médico local. O ambiente de Grantham estimulava a curiosidade natural de Isaac, e ele fez progressos.

Suas proezas acadêmicas, no entanto, não impressionaram sua mãe, e quando Newton estava com cerca de 16 anos Hannah resolveu trazê-lo de volta para casa para assumir a ocupação mais prática de administrar a propriedade de Woolsthorpe. (Num perfil biográfico, Isaac Asimov se refere a Newton como “o pior agricultor do mundo”.) O diretor da escola que Newton estava deixando, Henry Stokes, tentou convencer Hannah de que o lugar certo para o garoto era a escola. Pensando que o problema era dinheiro, Stokes chegou a oferecer uma dispensa dos 40 xelins cobrados anualmente de todos os meninos não nascidos em Grantham. Isto representaria um sacrifício considerável para um professor de recursos modestos. Mas o problema não era dinheiro e Hannah era teimosa. Os planos que de há muito acalentava para o filho estavam se desintegrando. Ela recorreu ao irmão, o reverendo William Ayscough, em busca de conselho. Quando até ele apoiou a ideia de Newton retornar à escola e se preparar para uma educação superior, Hannah finalmente consentiu.

A maioria dos biógrafos de Newton afirma que ele não foi reconhecido como gênio na primeira fase de sua vida. Talvez tenham razão, mas parece que seus mentores reconheceram nele algo de especial. Os esforços que fizeram no seu interesse foram muito além do que o dever impunha. Conta-se que, quando Newton deixou Grantham definitivamente, Henry Stokes pôs seu brilhante pupilo diante da turma e, com lágrimas nos olhos, fez um discurso veemente em seu louvor para motivar os outros meninos a seguir-lhe o exemplo. Assim foi que, no verão de 1661, aos 18 anos, Newton viajou cem quilômetros ao sul, até a cidade universitária de Cambridge, para um novo mundo e uma nova vida.

CAMBRIDGE

Todas as pessoas instruídas com quem o jovem Isaac tivera contato estreito haviam se

graduado na Universidade de Cambridge: seu tio William Ayscough estudara no Trinity College, seu professor Henry Stokes frequentara Pembroke e Joseph Clark fora aluno do Christ's College. Assim, provavelmente houve pouca dúvida sobre que instituição ele frequentaria.

Em 1661 Cambridge tinha mais de 400 anos de existência. Originalmente fora o que hoje chamaríamos de uma ramificação da Universidade de Oxford, mais antiga. Mas Cambridge havia se multiplicado várias vezes em tamanho e chegara a ter mais de três mil matrículas na época em que Newton lá chegou. Cambridge havia ultrapassado Oxford e se tornara não só o coração do puritanismo inglês como o centro da vida intelectual inglesa.

Duas faculdades dominavam o cenário de Cambridge naqueles dias: o St. John's College e seu vizinho, o College of Undivided Trinity (fundado por Henrique VIII em 1546). Newton frequentou Trinity, como o fizera seu tio, o reverendo William Ayscough. Acredita-se que Newton teve outro padrinho na pessoa de Humphrey Babington. Professor adjunto em Trinity, ele era irmão da senhoria de Newton em Grantham. Ao que parece, Babington ficara impressionado com Newton quando o conhecera na casa da irmã e se tornou um forte aliado do estudante carente de outros amigos.

Newton precisava de todo o apoio que pudesse conseguir. Ingressou em Trinity na qualidade de *subsizar*, um estudante pobre que ganhava sua subsistência fazendo tarefas servis para professores e alunos mais abastados. Os *subsizars* estavam no nível mais baixo da rígida estrutura social de Cambridge. Por que Newton teve de suportar essas condições não é claro. Sua família era bastante próspera pelos padrões rurais da época e não havia necessidade econômica de que ele ocupasse a posição de criado/estudante. Possivelmente Hannah ainda não aceitara por completo as ambições acadêmicas do filho e decidira pô-lo à prova.

Os *subsizars* não tinham permissão para comer com seus colegas estudantes nem para se sentar com eles na capela. Algumas faculdades tinham até becas especiais para os alunos pobres para que os alunos “fidalgos” pudessem evitar ser vistos conversando ou caminhando com eles.

Essa condição inferior teve um único efeito visível sobre Newton — tornou-o ainda mais esquivo do que já era. Em casa ele teria tido seus próprios criados e, como herdeiro da propriedade, uma posição social muito acima daquela a que estava relegado em Cambridge. Se estava sendo posto à prova, ele a venceu. Era em Trinity que iria ficar, o que quer que acontecesse.

O rigoroso estilo de vida puritano de Newton o teria isolado dos colegas de todo modo. Cambridge tinha seu quinhão de tentações para os estudantes nos arredores do *campus*. Tabernas, cafés e prostíbulos abundavam. Os bacharelados estavam proibidos de frequentar essas distrações, mas não havia como impor essas leis. O diário e as anotações do próprio Newton não indicam uma vida desregrada. Quando se permitia um pudim na sobremesa ou mesmo um pouco de vinho, anotava a despesa.

A cidade à parte, o que se passava na Universidade? Oficialmente, pouco de novo ou de inovador. Como milhares de outros bacharelados, Newton começou sua educação superior mergulhando em Aristóteles e Platão. Naquela altura, o movimento hoje conhecido como a “revolução científica” estava bem avançado e muitas das obras fundamentais para a ciência moderna haviam sido lançadas. O sistema heliocêntrico do universo fora exposto por Copérnico e Kepler. Galileu havia confirmado essa teoria e lançado os fundamentos de uma

nova mecânica, erguida sobre o princípio da inércia. Filósofos como René Descartes haviam articulado uma nova concepção da natureza como uma máquina complexa, impessoal. No tocante ao que se ensinava nas universidades da Europa, porém, era como se todas essas novas ideias não tivessem sido expressas. Os currículos em Cambridge e nos demais lugares eram solidamente baseados no aristotelismo, a antiga teoria geocêntrica do universo, e numa visão mais qualitativa que quantitativa da natureza. Como de costume, contudo, Newton não prestou muita atenção à rotina estabelecida. Desde seus primeiros dias na faculdade, agiu mais como um pós-graduado que como um calouro. Lia o que queria ler e estudava o que lhe interessava. Trinity sempre adotou o sistema de tutoria e o tutor de Newton, um fidalgo chamado Benjamin Pulleyn, estava muito ocupado em supervisionar um número recorde de graduandos. Não há nenhum indício de que o tutor tenha tido muita influência sobre o pupilo ou de que este tenha causado alguma impressão no tutor. Pulleyn pôs Isaac na trilha compulsória das leituras clássicas e depois pouco se ocupou dele. Mais tarde Newton encontrou seu próprio caminho, e um caminho que levou a René Descartes, Sir Francis Bacon, Galileu Galilei e Johannes Kepler. Há claros sinais de que eles, e não os cursos oficiais, influenciaram profundamente o futuro cientista.

Em algum momento de 1663 ou 1664, Newton escreveu em seu caderno a máxima “*Amicus Plato amicus Aristoteles magis amica veritas*” (Platão é meu amigo, Aristóteles é meu amigo, mas meu melhor amigo é a verdade). Chegara a um ponto importante de seu desenvolvimento intelectual. Sob essa máxima e numa seção nova de seu caderno de estudante, Newton listou uma série de questões (*Quaestiones quaedam philosophicae*) que abrangiam todas as áreas da ciência natural e da teologia que lhe interessavam. Trata-se de um conjunto extremamente revelador de indagações e interesses, claramente indicativo da propensão de Newton para compreender e de sua obsessão de saber.

Embora não tenha registrado o fato em suas *Quaestions*, Newton já iniciara seus estudos matemáticos nessa ocasião. Começando com Descartes e a geometria, passou rapidamente para técnicas algébricas. Em pouco mais de um ano havia dominado a literatura da matemática e começado a se mover para territórios novos, dele próprio. Em seus últimos dois anos no Trinity, Newton passou a sofrer a influência de Isaac Barrow, professor da faculdade e o primeiro matemático em Cambridge a reconhecer sua inteligência.

Embora seus escritos sobre matemática tenham sido decisivos no despertar de Newton para esse estudo, a influência de Descartes foi muito além desse campo. O intelectual francês e os demais filósofos mecanicistas da época concebiam a realidade física como inteiramente composta de partículas de matéria em movimento e afirmavam que todos os fenômenos na natureza resultam de interações mecânicas das partículas. Os registros no diário de Newton e suas anotações mostram que ele conhecia a fundo todas as obras de Descartes e que considerava essa nova abordagem um meio melhor de explicar a natureza que a filosofia aristotélica que prevalecia na época.

Qual era exatamente a nova abordagem de Descartes? Uma das ironias da história das ideias é que a busca de certeza no mundo empreendida por Descartes fundava-se no princípio de que tudo deve ser posto em dúvida. Descartes recebera a melhor educação que podia ser obtida na Europa em seu tempo. Foi uma educação que incluiu um estudo exaustivo da lógica aristotélica e da ciência física. Mas quando se formou, aos 20 anos, percebeu que, afora algumas verdades matemáticas, não sabia nada com certeza. Por quê, perguntou a si mesmo,

não poderia conhecer todas as coisas com aquela mesma certeza matemática? Como os pitagóricos de tantos séculos antes, o jovem intelectual francês pensava que a matemática devia ser o caminho para a verdade. Assim, mergulhou no estudo da matemática e foi recompensado pela descoberta de uma ferramenta matemática essencial — a geometria analítica — que se provou de uso mais fácil que a antiga geometria de Euclides. Sem essa ferramenta, Newton não teria podido formular as leis da gravitação universal ou escrever os *Principia*.

Em 1639, após muita reflexão e leitura, Descartes publicou sua pequena obra-prima filosófica, *Discurso sobre o método de conduzir corretamente a razão e buscar a verdade nas ciências* (ou, simplesmente, *Discurso*). Nessa influente obra ele documentou a história de seu desenvolvimento intelectual — como começou a duvidar da verdade do que lhe haviam ensinado, até que chegou à simples conclusão de que tudo podia ser posto em dúvida exceto uma coisa, a saber, a existência da dúvida, já que ele duvidava. *Dubito ergo sum* (Duvido, logo existo)^a foi sua maneira de formular essa conclusão. A partir disso passou à descoberta de um método que permitisse alcançar uma certeza semelhante em outros domínios, com base na redução de todos os problemas a uma forma e uma solução matemáticas. Quando se pudesse primeiro reduzir um problema à forma matemática e em seguida aplicar o número mínimo de axiomas, ou proposições evidentes por si mesmas, para configurá-lo, seria possível chegar a um conjunto de equações algébricas. Então as equações seriam resolvidas pela aplicação das regras da álgebra e o resultado seria conhecimento correto. Descartes via o universo como um enorme e complexo mecanismo, semelhante ao de um relógio, posto em movimento pela mão de Deus, mas um universo que, uma vez em movimento, funcionaria para sempre sem a assistência de Deus. Descartes, afirmam alguns historiadores, tornou Newton possível.

Sir Francis Bacon, o mais famoso desertor do Trinity College, também teve grande influência sobre Newton. Como Descartes, Bacon era um rebelde em relação ao dogma estabelecido. Insistia em que a abordagem científica básica devia mudar do raciocínio dedutivo para o indutivo. Quem buscava o conhecimento, sustentava ele, não mais devia começar pelas definições abstratas e distinções verbais para, a partir destas, deduzir soluções concretas. Quando se fazia isso, insistia, obrigava-se os fatos a corroborar noções preconcebidas. Em vez disso, devia-se começar com dados concretos, preferivelmente encontrados por meio de experimento, e raciocinar indutivamente a partir desses dados para chegar a conclusões reais, gerais e empiricamente apoiadas. Os experimentos que Newton fez posteriormente com a luz e o som ilustram a influência de Bacon em seus métodos.

Quando Newton recebeu seu grau de bacharel, em abril de 1665, encerrou-se, sem reconhecimento, o que pode ter sido a mais notável carreira de graduação na história da universidade. Como Newton programava seu próprio curso tanto em filosofia natural quanto em matemática, e como confinara o progresso de seus estudos aos próprios cadernos, sua carreira acadêmica completou-se, oficialmente, sem qualquer distinção.

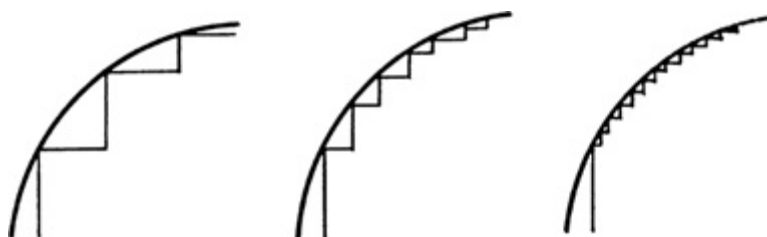
No mesmo ano, 1665, uma ressurgência da temida peste negra obrigou as universidades da Inglaterra a fecharem as portas. Isaac Newton deixou Cambridge para uma permanência forçada em casa, na pacata aldeia de Woolsthorpe. Já tendo sido considerado inapto para o trabalho no campo, o jovem estudante pôde se entregar à sua leitura e reflexão solitárias. Montou para si um misto de estúdio e quarto de dormir com as paredes forradas de livros, a janela dando para o pomar de macieiras, e pôs-se a trabalhar. É provável que a essa altura já tivesse concebido todas ou a maioria das peças do quebra-cabeça que iria se transformar nos *Principia*.

Galileu definira a lei dos corpos em queda e medira com precisão a força da gravidade ao nível do mar.^b Kepler descrevera as trajetórias elípticas dos planetas e postulara que uma força estranha emanada do Sol impele os planetas em seus cursos. Ademais, Kepler derivara leis precisas para a cinemática do Sol e de seus planetas. Bacon mostrara que a verdadeira base do conhecimento era o mundo natural e a informação que este fornecia através dos sentidos humanos. Descartes ensinara a Newton como aplicar métodos matemáticos a problemas físicos. O que faltava ao rapaz naquela ocasião, portanto, era tempo, desejo e capacidade mental para repensar todo o conhecimento que herdara. O destino, com as precauções médicas do século XVII, proporcionaram-lhe o tempo.

A geometria analítica de Descartes foi uma ferramenta poderosa no trato de um universo *estático*. Newton havia concluído que o que se fazia necessário era uma maneira de quantificar a operação de um mundo *dinâmico*, um mundo em constante movimento. Diante disso, mostrou-se à altura do desafio: inventou os cálculos diferencial e integral, um marco na história da matemática. O cálculo é a mais eficaz ferramenta matemática de que se dispõe para a resolução de problemas que envolvam variações infinitesimais em taxas de movimento e para a determinação da trajetória de um corpo no espaço. O cálculo se funda na ideia de considerar quantidades e movimentos não como definidos e imutáveis, mas como dinâmicos e flutuantes. Na verdade, de início Newton chamou seu novo método matemático de *fluxões*.

Ao desenvolver o cálculo, Newton fez uso de um princípio que aprendera com Descartes: quando um problema parecer vasto e complicado demais, decompõe-o em pequenos problemas e resolva um por um. É isso que o cálculo faz. Decompõe um problema de dinâmica em um enorme número de degraus e em seguida sobe os degraus, cada um deles um problema passível de solução, um por um. Quanto maior for o número de degraus em que um problema é decomposto, mais precisos serão os resultados finais.

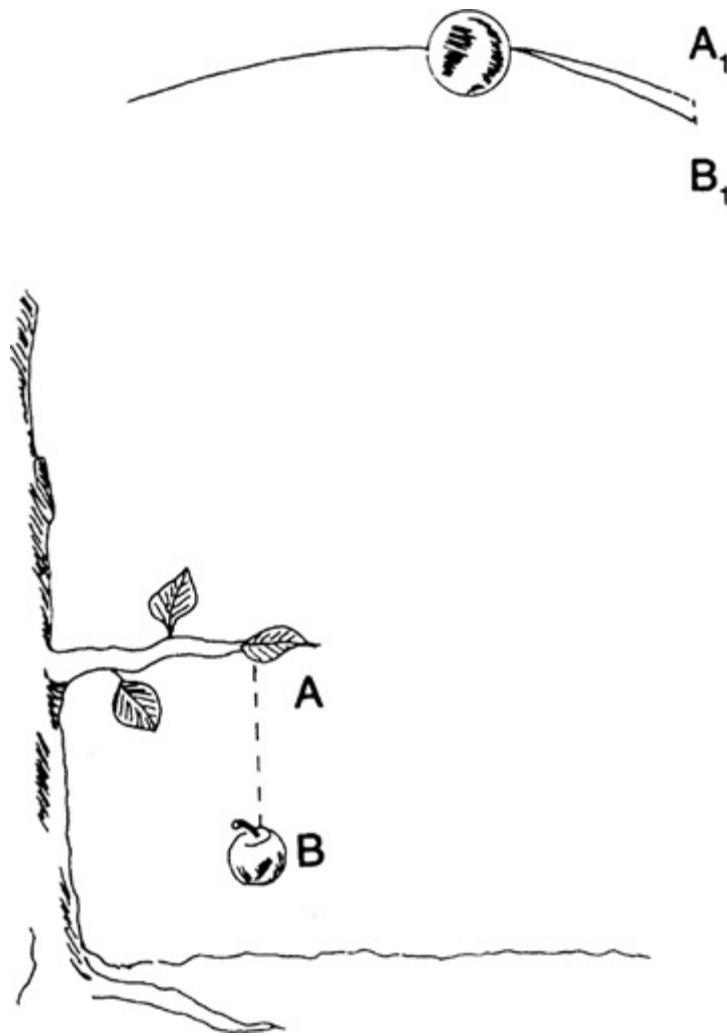
A história de que a ideia da gravitação universal foi sugerida a Newton pela queda de uma maçã parece verdadeira. William Stukeley, o primeiro biógrafo de Newton, relata que ouviu o caso dele próprio.



PRINCÍPIO DO CÁLCULO O cálculo decompõe uma mudança ou movimento num grande número de degraus. Quanto maior for o número de degraus em que a curva é decomposta, mais precisa será a resposta.

Ao observar o fato, Newton deu um salto mental intuitivo e fez a si mesmo uma pergunta básica: e se a mesma força responsável pela queda da maçã se estendesse à órbita da Lua? Em primeiro lugar, presumiu que a Lua estava caindo em direção à Terra em resposta ao puxão para baixo (vertical) da gravidade da Terra, mas jamais se chocava com esta por causa do puxão mais forte do Sol. Considerou que a Lua, à medida que cai em direção à Terra, é também puxada, no grau exatamente necessário para compensar a queda e carregá-la em torno da curvatura da Terra em sua órbita elíptica. Em segundo lugar, imaginou que a força gravitacional emanaria do centro de um corpo (a Terra, neste caso) e não de sua superfície. Tentou então quantificar a diferença entre a força exercida sobre a maçã e aquela exercida sobre a distante Lua. Realizou esta última tarefa tomando por base a terceira lei do movimento planetário de Kepler, chegando ao que se tornou conhecido como a *lei do inverso do quadrado*. A força gravitacional diminui com o quadrado da distância sobre a qual se propaga. Se a maçã estivesse 60 vezes mais próxima do centro de gravidade da Terra do que a Lua (como de fato está), a força gravitacional exercida sobre a maçã seria 60 ao quadrado, ou 3.600 vezes mais forte que aquela experimentada pela Lua. Inversamente, portanto, a Lua deveria cair ao longo de sua órbita $1/3.600$ avo do que a maçã cai no mesmo tempo. A partir dessas suposições, Newton pôde calcular a órbita exata da Lua.

A elaboração matemática de tudo isso confirmou a magnífica intuição de Newton de que a mesma força que puxa a maçã para baixo, puxa a Lua. Em seguida, ele deu mais um passo gigantesco para a humanidade ao pressupor que aqueles mesmos princípios matemáticos se aplicavam a todos os corpos — planeta, lua ou asteroide — no universo. De fato, Newton tomara o quadro geral do universo de Descartes e o tornara rigorosamente matemático e preciso. Havia feito nada menos que construir a primeira síntese moderna sobre o universo físico, uma visão fundada na mecânica, em que tanto as menores partículas quanto os maiores corpos celestes movem-se todos de acordo com os mesmos princípios matemáticos.



RACIOCÍNIO DE NEWTON A mesma força que puxa a maçã para baixo puxa também a Lua. Mas, como a Lua está 60 vezes mais longe da fonte de gravidade que a maçã e como a gravitação diminui com o quadrado da distância, a Lua deveria cair ao longo de sua órbita $1/3.600$ avos do que o faz a maçã na mesma quantidade de tempo. Ele estava certo, é claro, e trabalhando a partir desse começo chegou a quantificar as leis do movimento sobre todos os corpos físicos — um esquema comum para a dinâmica terrestre e celeste.

Nesse mesmo período de 17 meses, além de desenvolver o cálculo e dar os primeiros passos rumo à descoberta da lei da gravidade, Newton chegou a importantes descobertas sobre as propriedades da luz e da cor — descobertas que mais tarde formariam a base da *Óptica*, seu artigo capital a respeito. Como pudera realizar tudo isso tão jovem e trabalhando basicamente sozinho? Newton recordaria mais tarde: “Naquele tempo eu estava na plenitude de minha idade para a invenção e me ocupei de matemática e filosofia mais do que em qualquer outra época.”

Feito isso, Newton guardou todos os seus artigos e não falou com ninguém sobre seus feitos monumentais. Propuseram-se várias explicações para esse estranho comportamento. Ele não gostava de chamar atenção. Valorizava sua privacidade acima de tudo o mais e talvez temesse que a publicação de suas ideias lhe trouxesse notoriedade. Além disso, é possível que não estivesse seguro acerca de seus números. Eles se ajustavam suficientemente bem para convencê-lo de sua hipótese, mas, em razão de algumas estimativas imprecisas sobre a distância até a Lua ou o raio da Terra, talvez receasse submeter seus cálculos aos olhos críticos de seus pares. Newton não tinha porque se preocupar. Na realidade, não tinha pares.

É preciso observar aqui que nem todos os historiadores acreditam que Newton tenha feito tudo isso em sua curta estada de 17 meses no campo. Situam essa crença na categoria de mito,

ao lado da história da queda da maçã. Na verdade, há pouca documentação para sustentar, seja a história do “Ano dos Milagres”, sejam as opiniões de seus críticos, exceto o fato de o próprio Newton (ainda que 50 anos mais tarde) ter recordado os eventos dessa maneira. Na ausência de prova em contrário, é opinião deste autor que se deveria aceitar a palavra de Newton como expressão do que aconteceu e do momento em que aconteceu.

Quando Cambridge reabriu, em 1667, Newton para lá voltou e foi escolhido para uma bolsa de estudos no Trinity College. Dois anos depois, seu mentor, Isaac Barrow, demitiu-se da cátedra de “Lucasian Professor of Mathematics” (posição hoje ocupada por Stephen Hawking) e indicou Isaac Newton como seu sucessor. Esse passo, de suma importância na carreira acadêmica, é ilustrativo da estreita relação que unia Barrow e Newton.

Newton estabelecia poucas relações íntimas com pessoas de sua idade. No entanto, era atraído por homens mais velhos e cultos como Clark, Stokes e Babington. Em Trinity, Isaac Barrow fez o papel de seu mentor. Mais de 12 anos mais velho que Newton, ocupava uma posição de relevo na rígida hierarquia acadêmica. Os dois homens tinham em comum uma formação puritana rigorosa, bem como o amor pelo conhecimento e, com o tempo, Barrow adquiriu uma aguda percepção do talento matemático de Newton. Em cartas, Barrow referiu-se ao professor mais jovem como “meu amigo” e como um “gênio extraordinário”.

É possível que Barrow tenha deixado sua cátedra por reconhecer que Newton era potencialmente um matemático mais notável que ele. É mais provável, contudo, que Barrow fosse um homem de considerável ambição e tivesse os olhos em posições mais elevadas. De todo modo, quando surgiu a oportunidade ele deixou Cambridge para se tornar capelão de Carlos II (o qual, pelo que diz a história, precisava de um). Quatro anos mais tarde, Barrow estava de volta a Cambridge, tendo sido nomeado reitor do Trinity College pelo rei. Newton passou a ter um protetor ainda mais altamente situado do que antes. Infelizmente a situação não duraria muito. Barrow ficou doente numa viagem a Londres e procurou alívio no ópio. Morreu aos 47 anos, vítima, aparentemente, de uma *overdose*.

Nesse meio tempo seu protegido estava firmando sua própria reputação no campo da matemática. Newton, o professor, não era menos excêntrico do que o fora Newton, o estudante. Tornou-se conhecido como “o sujeito esquisito que mora perto do portão” (seus aposentos localizavam-se junto ao Great Gate, na entrada do Trinity College). Era visto pelo campus metido em roupas desleixadas, a peruca torta, sapatos surrados e uma gola manchada. Parecia não se importar com coisa alguma afora o seu trabalho. Ficava tão absorto em seus estudos que frequentemente se esquecia de comer. Pelo menos em uma ocasião, registrou em suas anotações ter esquecido também de dormir: vendo-se incapaz de resolver um problema relativamente simples de aritmética, deu-se conta de que não deitava havia dias e, com relutância, recolheu-se ao seu quarto de dormir.

Excêntrico ou não, Newton trabalhava com afinco. Ao longo dos anos, desenvolveu o campo da geometria analítica, completou seus esforços preliminares com relação ao cálculo, realizou um trabalho pioneiro em óptica e (como os historiadores descobririam anos mais tarde) efetuou inúmeras experiências em alquimia. Fez tudo isso sem chamar muita atenção sobre si, não publicando artigo algum. Talvez se referisse a seu trabalho em alguma de suas raras preleções, mas de todo modo poucos professores ou estudantes as assistiam. Seus colegas acadêmicos achavam difícil, se não impossível, acompanhar o encadeamento de suas ideias. Seu criado doméstico contou a biógrafos posteriores que Newton, quando se via num

auditório vazio, “falava para as paredes” ou caminhava de volta para seus aposentos, claramente não abalado e ansioso por retomar seu trabalho. Seu isolamento, contudo, logo teria fim.

Em 1660, Carlos II, um pretensso físico amador, criou a Royal Society de Londres, uma organização independente que se tornou o principal centro da atividade científica inglesa durante os séculos XVII e XVIII. Os membros da sociedade ainda não tinham ouvido falar muito de Isaac Newton, mas tinham notícias de um novo telescópio que ele fizera. Sempre habilidoso na construção de aparelhos científicos, Newton viu-se precisando de um novo telescópio com que observar os cometas e os planetas. O único tipo de telescópio disponível na época era o de refração, com uma grande lente curva na extremidade anterior e uma ocular nos fundos. Newton não gostava desses telescópios por causa da tendência que tinham a introduzir cores espúrias. Assim sendo, imediatamente iniciou a montagem de um novo tipo de telescópio que, em vez de uma lente, usava um espelho curvo para coletar a luz. A ideia desse novo telescópio não fora concepção sua, mas ele foi o primeiro a montar efetivamente um. Mais eficiente e de fabricação mais fácil, o “refletor de Newton”, como foi chamado, tornou-se o telescópio mais popular no mundo. Newton montou três deles e, quando a Royal Society pediu para ver o invento, mandou-lhe um de presente. Impressionada, a Royal Society prontamente elegeu Newton como um de seus membros. Era o início de uma longa e por vezes tempestuosa relação.

Satisfeito com a entusiástica acolhida da Royal Society ao seu telescópio, Newton sentiu-se suficientemente encorajado para apresentar um breve artigo sobre a luz e as cores. O estudo da luz e da óptica, que fora uma marca central da revolução científica, era um assunto de especial interesse para Newton desde o hiato dos anos da praga em 1665-1666. A contribuição de Newton dizia respeito às cores e à sua relação com a luz branca. O saber convencional da época sustentava que as cores surgem de uma modificação da luz que, em sua forma primitiva, mostra-se branca. Durante sua permanência na fazenda de sua mãe, Newton realizara uma série de experimentos em que o espectro de um estreito feixe de luz era projetado através de um prisma sobre a parede de um quarto escuro. Observou que um raio de luz que atravessa um prisma é refratado (defletido ou curvado) e que diferentes partes dele sofrem refrações diferentes. O resultado não é meramente uma mancha de luz mais ampla, mas uma banda de cores consecutivas: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul e violeta. Quando a luz refratada passava por um segundo prisma, as diferentes cores se recombinavam para formar luz branca. Essa descoberta o levou à conclusão de que a luz não é homogênea e sim complexa e que o fenômeno das cores surge da decomposição de uma mistura heterogênea em seus componentes simples. Concluiu ainda que a luz consiste de partículas minúsculas.

Os cientistas ingleses e do continente europeu tiveram reações que variaram entre o ceticismo e a oposição virulenta diante das conclusões de Newton, que pareciam invalidar a teoria ondulatória da luz prevalecente. Uma oposição especial veio de Robert Hooke, o brilhante e acrimonioso secretário (e de fato o principal cientista) da Royal Society e do cientista holandês Christian Huygens. Newton jamais esquecia um inimigo e esses dois antagonistas foram objetos especiais de seu ódio ao longo de décadas.

Logo do início da controvérsia das cores, Newton respondeu pacientemente às objeções com novas explicações, mas sua paciência era limitada. Quando seus argumentos adicionais produziram reações ainda mais negativas, ficou irritado e jurou que nunca mais publicaria

nada. Na verdade, chegou a ameaçar abandonar por completo a investigação científica. A troca irrestrita de ideias que caracteriza o debate científico não era para Newton. Ao se defrontar com qualquer tipo de crítica, refugiava-se na solidão e no silêncio. Com as chamadas mentes superiores da Royal Society revezando-se no ataque à sua desconcertante teoria da luz, o leão ferido se recolheu à toca para lamber suas feridas.

Newton permaneceu em isolamento intelectual até 1675, quando, numa visita a Londres, chegou-lhe aos ouvidos que Hooke finalmente aceitara sua teoria das cores. Encorajado por essa notícia, aventurou-se a publicar um novo artigo sobre a cor, além de um segundo texto intitulado “Uma hipótese para explicar as propriedades da luz”. A reação de Hooke a esse artigo foi declarar que Newton o roubara dele. Newton explodiu novamente. Intermediários controlaram a disputa e seguiu-se, entre Newton e Hooke, uma troca de cartas formais, gelidamente polidas, que não escondem a completa ausência de afeição entre os dois homens.

Nessa mesma ocasião Newton envolveu-se também em uma outra controvérsia com um círculo de jesuítas ingleses radicado em Liège. As objeções dos padres ao trabalho de Newton careciam de mérito, mas o que enfureceu Newton foi a alegação deles de que seus experimentos estavam errados. Essa controvérsia perdurou até 1678, quando uma explosão final de Newton pôs fim à correspondência.

Ao que parece, Newton teve o primeiro de seus dois colapsos nervosos em 1678 e no ano seguinte sua mãe morreu. Durante seis anos ele se furtou a qualquer intercâmbio intelectual, exceto quando outros iniciavam uma correspondência, que ele sempre interrompia tão logo quanto possível. Quando finalmente retornou à ciência, foi com sua contribuição máxima para o nosso conhecimento do universo.

OS “PRINCIPIA”

Talvez Newton jamais tivesse retornado ao mundo intelectual, não tivesse sido pelo jovem astrônomo Edmund Halley. Graduado pelo Queen’s College, Oxford, Halley firmara ali uma reputação de notável sábio. Depois de Oxford, passou dois anos na ilha de Santa Helena, no Atlântico Sul. Ali fez observações astronômicas e conseguiu catalogar os astros do hemisfério sul com uma precisão e uma completeza nunca antes alcançadas. O rei Carlos II aplaudiu seu trabalho e a Royal Society o elegeu membro em 1678. À sua frente estendia-se uma carreira notável, abrilhantada por sua identificação do cometa periódico que desde então levou seu nome. Importantes para a presente narrativa foram seu tato e afabilidade. Era ao mesmo tempo famoso e apreciado entre seus colegas.

Em agosto de 1684, Edmund Halley, que estava encontrando dificuldades com um problema de dinâmica orbital, visitou Newton em Cambridge. Isso por si só era extremamente inusitado. Havia algum tempo que cientistas europeus vinham tentando iniciar uma correspondência com o eminente matemático sem muito sucesso. Newton ficou claramente lisonjeado com o fato de o renomado astrônomo Halley ter ido até Cambridge para lhe pedir conselho.

Esse importante encontro fora precedido por uma conversa, no mês de janeiro anterior, de Halley com Christopher Wren e Robert Hooke, famosos arquiteto e astrônomo,

respectivamente. Eles haviam almoçado juntos em Londres em uma de suas tabernas favoritas e discutido a força da gravidade e as órbitas elípticas dos planetas. O problema era que não conseguiam demonstrar a conexão entre a força e as órbitas de uma maneira matemática precisa. Halley e Wren confessavam não ser capazes de fazê-lo. Hooke afirmou que tinha um meio para isso, mas não diria a ninguém qual era. Todos eram da opinião de que a lei do inverso do quadrado podia explicar as órbitas elípticas de Kepler, mas não conseguiam prová-las. Encerraram o almoço apostando quem conseguiria ser o primeiro a provar a conjectura.

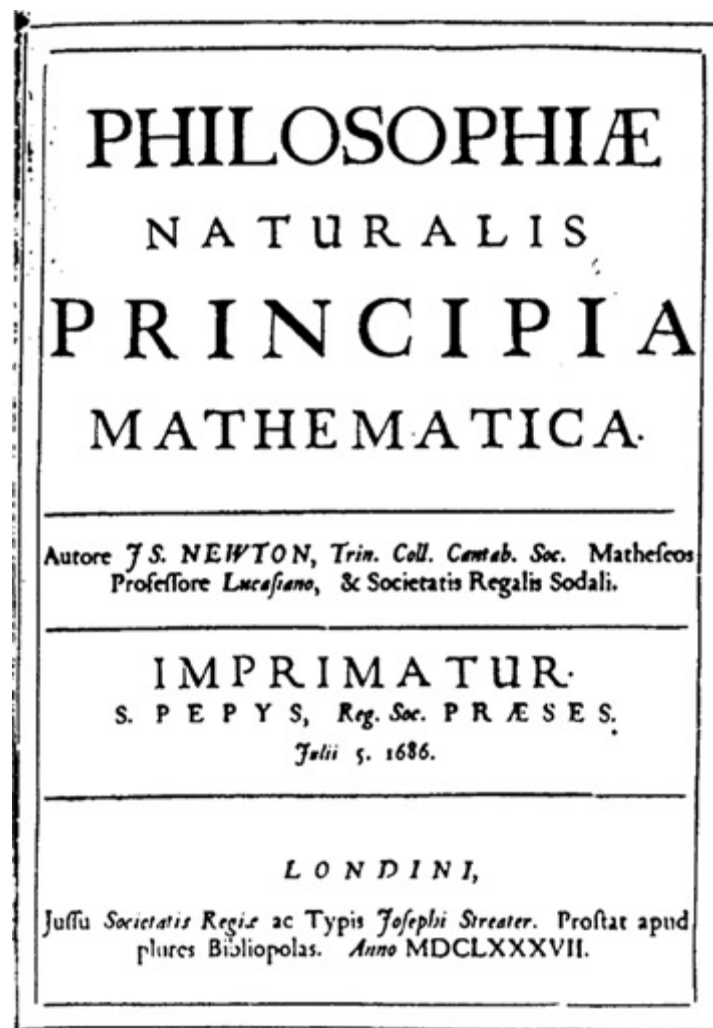
Após esperar por sete meses que Hooke revelasse seu sistema secreto, Halley resolveu visitar o mais famoso matemático da época e pedir sua ajuda. Estivera com Newton uma vez antes e, é claro, sabia de sua fama desagradável; mas certamente Halley tinha também confiança em suas próprias habilidades diplomáticas.

Por ocasião desse encontro, Halley tinha 28 anos e Newton, 42. Apesar da diferença de idade, Halley não teve medo de envolver Newton numa provocante discussão intelectual. Perguntou a Newton se era possível provar matematicamente que os planetas giravam em torno do Sol em órbitas elípticas. A resposta espantosa de Newton foi que isso não só era possível, como ele já o fizera anos antes. Quando Halley pediu para ver os cálculos, Newton deu uma rápida busca em várias das muitas pilhas de papel que se espalhavam pelos seus aposentos mas não conseguiu encontrá-los. Disse a Halley que os escreveria de novo e os enviaria para ele. É bem possível que Newton soubesse exatamente onde os papéis podiam ser encontrados, mas quisesse verificar seus números uma última vez antes de submetê-los ao julgamento de Halley.

Qualquer que tenha sido a razão, mais três meses se passaram antes que Newton enviasse seus cálculos a Halley. Grande parte desse tempo foi gasta na elaboração de um tratado de nove páginas que ele intitulou *Sobre o movimento dos corpos giratórios (De motu*, como era chamado em latim). Quando Halley recebeu esse novo artigo, ficou assombrado mais uma vez. Não só continha a solução para o problema original que ele propusera como muito mais. Na verdade, o curto artigo continha o germe matemático de uma ciência geral da dinâmica. O pequeno tratado não enunciava a lei da gravitação universal, nem continha qualquer das três leis newtonianas do movimento. Era, contudo, um começo brilhante, o precursor da *magnum opus* que estava por vir. Se aquilo era uma amostra representativa, que mais se poderia encontrar naquelas pilhas de papel aparentemente desorganizadas no alojamento de Newton? Para seu grande mérito, Halley reconheceu a imensa importância do trabalho de Newton e não demorou a ir a Cambridge uma segunda vez. Ali, convenceu Newton a organizar aquelas pilhas de papel, aqueles esboços e diagramas aparentemente misturados, aquelas intermináveis colunas de algarismos, e começar a trabalhar no livro definitivo sobre a gravitação e a dinâmica do sistema solar.

Assim que começou a rever e ampliar seu pequeno artigo original, Newton ficou obcecado. Halley desencadeara o esforço, mas agora Newton estava plenamente envolvido. “Agora que estou envolvido no assunto”, escreveu ele ao astrônomo John Flamsteed, “ficaria feliz em conhecer-lhe o âmago antes de publicar meu artigo.” Para chegar a esse âmago, Newton praticamente se isolou da sociedade humana. De agosto de 1684 até a primavera de 1686, sua vida foi completamente devotada ao trabalho que mais tarde seria conhecido como os *Principia*.

Seu secretário na época, Humphrey Newton (nenhum parentesco), escreveu que Newton “comia muito frugalmente, e mais, muitas vezes se esquecia completamente de comer, de tal modo que, ao ir a seu quarto, encontrava sua comida intacta”. Era um homem possuído. Novamente seu secretário relata que ele costumava “se debruçar para escrever sobre sua escrivaninha de pé, sem se dar ao trabalho de puxar uma cadeira para se sentar”. É também de Humphrey Newton que vem a fama de ser Newton desprovido de senso de humor. O secretário contou que, ao longo dos cinco anos em que o serviu, viu o grande homem rir apenas uma vez. Tendo emprestado um exemplar de Euclides a um conhecido, este lhe perguntara que utilidade o estudo daquele livro teria para ele, “coisa de que Sir Isaac achou muita graça”. Numa ocasião posterior, Isaac Newton foi ouvido repreendendo Edmund Halley por perder tempo com um dito espirituoso enquanto trabalhavam juntos num experimento.



Página de rosto dos *Philosophiæ naturalis principia mathematica* — 1686.

Para escrever os *Principia*, Newton teve de sintetizar todo o trabalho que havia feito ao longo dos 20 anos precedentes. Teve de recalcular, rever e repensar todos os problemas e teve ainda de coletar novos dados — todos os novos dados astronômicos em que pudesse pôr as mãos. Provavelmente sabia que esse trabalho seria sua obra magna, a soma total de tudo que ele sabia ou era capaz de descobrir sobre o mundo natural.

O livro não se destinava a ser um campeão de vendas no sentido atual da expressão. Newton queria se comunicar com uns poucos escolhidos, uma elite intelectual, cujo número procurou reduzir a um mínimo absoluto por todos os meios possíveis. Escreveu em latim

clássico e não fez nenhum esforço para facilitar o entendimento de sua complicada matemática. O livro só chegou a ser publicado graças aos esforços incansáveis de Edmund Halley. Quando surgiam problemas em Cambridge, Halley ia até lá para encorajar Newton e instigá-lo. Quando surgiam obstáculos à publicação na Royal Society em Londres, ele os superava com diplomacia e pródigos esforços. No final, entrou com seu próprio dinheiro para cobrir o custo da impressão e da distribuição, com que a Royal Society concluía não poder arcar.

Os rascunhos dos *Principia* que restaram ilustram o dito de que genialidade é 1% de inspiração e 99% de transpiração. Os rascunhos se caracterizam menos por súbitos e brilhantes achados que por um trabalho contínuo sobre problemas específicos. Quando, anos mais tarde, lhe perguntaram como havia descoberto as leis da dinâmica celeste, Newton respondeu: “Pensando nelas sem cessar.”

Finalmente publicados em 1687, *Philosophiae naturalis principia mathematica* consistia de três livros: o Livro I expõe uma dinâmica geral dos corpos que operam na condição teórica de nenhum atrito e nenhuma resistência. O Livro II ocupa-se basicamente dos problemas mais práticos relativos aos movimentos dos corpos sólidos suspensos num meio fluido, isto é, o movimento dos corpos quando há atrito e resistência. É no Livro III que Newton revela seu gênio de maneira mais extraordinária. Ali ele apresenta sua descrição quantitativa exata dos movimentos dos corpos celestes. Essa descrição é baseada nas três leis do movimento de Newton: (1) que um corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme a menos que seja compelido por uma força a ele aplicada a mudar esse estado; (2) que a mudança no movimento (a mudança da velocidade vezes a massa do corpo) é proporcional à força aplicada; (3) que para toda ação há uma reação igual e oposta.

Um exemplo da primeira lei seria um projétil em movimento, que continuará a se mover numa linha reta a menos que seja retardado pela resistência do ar ou que sua trajetória seja curvada para baixo por uma força (identificada por Newton como a gravidade). Outro exemplo é um pião que gira e continuará girando, a menos que seja retardado por atrito com a superfície sobre a qual sua ponta gira ou pela resistência do ar. Os vastos corpos dos planetas ou dos cometas, encontrando pouca ou nenhuma resistência no espaço, persistem em seus movimentos, sejam eles retos os curvos, para sempre. Newton refinou ainda mais sua primeira lei com o conceito de *massa*, inventado por ele. No universo newtoniano, todo objeto é caracterizado por sua massa, e massa possui *inércia*, a tendência de um objeto a resistir a qualquer mudança em seu estado de movimento.

A segunda lei do movimento de Newton afirma que uma força maior induz uma maior mudança de movimento e que múltiplas forças produzem uma mudança que é uma combinação das diferentes intensidades e direções das várias forças. Uma mudança no movimento é expressa como *aceleração*, definida como a mudança na velocidade com o tempo. A segunda lei de Newton — força é igual a massa vezes aceleração — é expressa na primeira equação aprendida por todos que estudam física:

$$F = ma$$

Esta foi chamada de a mais útil lei física jamais escrita. Aparentemente simples, a equação é de um poder espantoso e por vezes terrivelmente difícil de resolver.

Também na segunda lei, Newton introduziu o conceito de força centrípeta. *Centripetal* é uma palavra que ele próprio cunhou e definiu como “o que busca o centro”, em contraposição à palavra *centrifugal* de Christian Huygens, que designava o que foge do centro.

A partir da terceira lei de Newton, pode-se ver que a força gravitacional é mútua. As atrações que dois corpos exercem um sobre o outro são sempre iguais, embora se exerçam em direções opostas. A maçã é atraída pela superfície da Terra, mas a Terra também é atraída pela maçã. A Terra exerce uma força gravitacional sobre a Lua e, ao mesmo tempo, está sujeita a uma força gravitacional desta. A quantidade de força gravitacional exercida por cada corpo — a maçã, a Lua ou a Terra — é diretamente proporcional à massa desse corpo.

O exame do movimento circular com base nessas leis forneceu uma fórmula para a medida quantitativa da força centrípeta necessária para desviar um corpo em movimento de seu caminho reto para um determinado círculo. Quando substituiu por essa fórmula a terceira lei de Kepler, Newton descobriu que a força centrípeta que retém os planetas em suas órbitas em torno do Sol deve diminuir com o quadrado da distância que separa o planeta do Sol. Newton batizou a força em questão de *gravitas* (literalmente, “peso”). A lei da gravitação universal, que Newton também confirmou a partir de outros fenômenos como as marés e as órbitas dos cometas, declara que cada partícula de matéria no universo atrai todas as outras com uma força proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre seus centros.

A mecânica newtoniana tornou-se o alicerce da estrutura sobre a qual se erguem todas as camadas das ciências físicas e da tecnologia. A física newtoniana foi, acima de tudo, um triunfo do *reducionismo* — o ato de tomar um fenômeno complexo, neste caso o cosmo, e explicá-lo mediante a análise dos mecanismos físicos mais simples, mais básicos que estão em operação durante o fenômeno. Ademais, representou uma mudança na perspectiva do pensamento humano, uma transição de uma sociedade estática que espera que alguma coisa aconteça para uma sociedade dinâmica que busca compreender, pois que compreensão implica controle.

Os *Principia* tiveram um impacto estrondoso no mundo pensante. Voltaire os explicou numa obra popular, John Locke admirou a obra imensamente e até críticos célebres como Christian Huygens e Gottfried Leibniz participaram do louvor à magnitude e extensão da obra. Em sua “Ode a Newton”, anexada como introdução ao documento, Halley disse numa passagem: “Mais perto dos deuses nenhum mortal pode chegar.”

Outros, no entanto, tiveram um pouquinho mais de dificuldade em apreciar a obra. Ao receber seu exemplar, o dr. Humphrey Babington, padrinho de Newton em Cambridge, queixou-se de que levaria uns sete anos para entender alguma coisa ali. O próprio Newton contou que ao cruzar com ele na rua, em Cambridge, um estudante teria dito: “Lá vai o homem que escreveu um livro que nem ele nem mais ninguém entende.”

Porque a Igreja estabelecida não atacou Newton como o fizera com seus predecessores Copérnico e Galileu? Não foi porque sua lógica e sua matemática eram inatacáveis, pois as de Copérnico e Galileu também o eram. Os tempos haviam mudado, sem dúvida, e a Igreja estava mais receptiva a ideias novas. E, o que foi ainda mais importante, ela não via no homem profundamente religioso que era Newton qualquer ameaça à ortodoxia. Newton construiu seu sistema cosmológico sobre o pressuposto da existência de Deus. A matéria não podia ser explicada por si mesma, necessitando de um primeiro organizador, um criador, um arquiteto

supremo. Se o universo era um imenso e belo relógio, era preciso que tivesse havido um relojoeiro. Deus estabelecera o mundo físico e suas leis, e descobrir que leis eram essas era um empreendimento tanto científico quanto religioso. De fato, Newton via a ciência como uma forma de culto. O Newton público não teve nenhuma dificuldade com a Igreja estabelecida. Secretamente, como hoje se sabe a partir de seus escritos não publicados, ele de fato questionava os ensinamentos ortodoxos, mas teve o cuidado de não deixar um sinal sequer de suas dúvidas transparecer em seus textos publicados.

Os *Principia* foram o feito monumental de Newton. Só se venderam algumas centenas de exemplares, mas a maioria dos historiadores o qualifica como um dos mais importantes livros jamais escritos. A publicação da grande obra não mudou a personalidade de Newton, mas a magnitude de sua realização fez do ex-recluso o objeto da atenção do público pelo resto de sua vida. Na qualidade de figura pública de projeção internacional, chegara para ele a hora de se mudar para um palco mais amplo.

PARLAMENTO, LONDRES, FAMA E CONTROVÉRSIA

Quase simultaneamente à publicação dos *Principia*, Newton ajudou a comandar a resistência à tentativa do novo rei Jaime II de catolicizar Cambridge. Essa controvérsia levou Newton a frequentes viagens a Londres, onde travou conhecimento com um círculo mais amplo e mais urbano de pessoas. Ele incluía o filósofo John Locke e um jovem admirador chamado Nicolas Fatio de Duillier, um brilhante matemático de origem suíça e residente em Londres, que iria estabelecer uma estreita relação com o físico recém-envolvido pela fama.

Fatio de Duillier tinha apenas 25 anos quando conheceu Newton. Os dois tornaram-se amigos de maneira quase instantânea — uma estreita amizade instantânea não era algo que se teria podido esperar do ex-recluso. De fato, uma vez, ao voltar a Londres para uma sessão do Parlamento, Newton escreveu para Fatio perguntando se haveria um quarto para ele onde Fatio se alojava. É sabido que Fatio e Isaac passavam bastante tempo juntos quando das viagens de Newton a Londres, que se tornaram mais longas e mais frequentes. A intensidade da relação dos dois pode ser percebida a partir do que escreviam um para o outro e, em cartas para terceiros, um sobre o outro. Por volta de 1693, ocorreu uma crise: Fatio adoeceu gravemente e, mais tarde, problemas financeiros familiares ameaçaram chamá-lo de volta à Suíça. Newton ficou extremamente perturbado. Sugeriu a Fatio mudar-se para Cambridge, onde ele o sustentaria. A sugestão deu em nada e mais tarde nesse ano a íntima relação e a correspondência terminaram. A ruptura foi súbita e nenhuma explicação chegou até nós.

Não há dúvida de que a separação teve um profundo efeito sobre Isaac Newton. Foi nessa época que ele sofreu seu segundo colapso nervoso. Seus amigos John Locke e Samuel Pepys temeram ambos por sua sanidade. O dois haviam recebido cartas acusatórias enfurecidas de Newton. Pepys foi informado de que Newton nunca mais o receberia nem lhe escreveria. Locke recebeu uma carta ainda mais estranha:

Sr.

Sendo da opinião de que o Sr. procurou me envolver com mulheres e por outros meios,

fiquei a tal ponto afetado que quando me disseram que o senhor estava doente e não iria viver respondi que melhor seria que estivesse morto.

Pepys e Locke lidaram com a situação com muito tato e comiseração. Locke foi a Cambridge para falar pessoalmente com Newton e assegurar-lhe sua amizade. Na altura em que esteve lá o pior do ataque de paranoia de Newton havia sido superado. Newton explicou que suas cartas furiosas se deviam a indisposição e falta de sono. Nunca se poderá saber com certeza a verdadeira causa do colapso de Newton. Ele sofreu outras pressões e estresses nesse período de sua vida, mas a malfadada ligação com Fatio parece certamente um fator provável.

A carreira política de Newton teve lugar numa fase de significativa mudança na relação entre a Coroa e o Parlamento, mas o próprio Newton desempenhou apenas um pequeno papel de apoio. Ele fora eleito para o Parlamento pela primeira vez em 1689 como resultado de sua corajosa resistência à autoridade estabelecida na questão entre Jaime II e Cambridge. Antes desse período na história inglesa, os reis governavam por “direito divino”. A partir da ascensão de Guilherme de Orange e sua mulher Maria, porém, os reis passaram a ser proclamados pelo Parlamento. Dizer que Newton desempenhou um papel menor na transformação da forma de governo inglesa numa monarquia constitucional talvez seja um exagero. Os registros da Câmara dos Comuns relativos a esse período não contêm uma única referência a Newton. Diz-se que falou apenas uma vez em todo o tempo que passou no Parlamento. Isaac Asimov, o falecido autor de livros sobre ciência, imaginou a cena em que a mente reputada a mais brilhante de toda a Europa se levantou pela primeira vez: um silêncio deve ter baixado sobre a assembleia quando o grande homem estava prestes a falar. Ficariam desapontados. Tudo o que ele fez foi pedir a um porteiro que fechasse uma janela nos fundos da sala por causa de uma fria corrente de ar.

Por menor que tenha sido o seu papel em importantes mudanças políticas, esse foi um período de expectativas crescentes para Newton. Estava com 46 anos e foi nessa época que encomendou ao mais afamado pintor do momento, Sir Godfrey Kneller, um retrato seu. Foi o primeiro, e possivelmente o melhor, dos muitos retratos que se pintariam de Newton e é uma mostra de sua autoestima nessa ocasião.

Também nessa época, o arcebispo de Canterbury ofereceu-lhe o cargo de reitor do Trinity. Newton foi forçado a recusar essa honra porque ela exigiria que ele se submetesse ao sacramento da ordenação e, como se sabe a partir de seus escritos secretos, ele acalentava dúvidas em relação ao protestantismo ortodoxo. Em particular, não aceitava a concepção da Trindade. Por essas razões, pôde perceber que sua carreira em Cambridge chegara a um impasse. Foi obrigado a se voltar para outros campos.

Sugeriu-se que Newton encontrasse um cargo em Londres e ele concordou prontamente. Por fim, mediante a ajuda do seu amigo Charles Montague (mais tarde Lord Halifax), Newton foi designado Administrador da Casa da Moeda. Isso ocorreu em 1696 e, embora não tenha deixado seu cargo em Cambridge até 1701, Newton não perdeu tempo em se mudar para Londres, ali centrando sua vida a partir de então. Newton chegara a Cambridge aos 18 anos e passara quase 35 anos ali. Deixou a cidade sem olhar para trás, voltou com pouca frequência e não se correspondeu com quase ninguém.

Como administrador e mais tarde presidente da Casa da Moeda, Newton obtinha uma renda elevada que, somada ao patrimônio pessoal herdado da mãe, fizeram dele um homem rico

quando de sua morte. Embora o cargo fosse encarado como uma sinecura e uma recompensa por serviços passados à Coroa, Newton o levou a sério. Um novo sistema de cunhagem estava por ser implantado e ele se ocupou ativamente desse projeto. Passou a se interessar pela falsificação e, com o tempo, tornou-se o terror dos falsificadores de dinheiro de Londres. Enviou muitos deles para o patíbulo e assistia pessoalmente aos enforcamentos.

Embora seus dias criativos na ciência estivessem terminados havia muito, Newton reinava em Londres como o patriarca da ciência inglesa. Em 1703 foi eleito presidente da Royal Society, que comandou magistralmente, se não tiranicamente. Um dos que sentiram a chibata de Sir Isaac Newton em sua inteira implacabilidade foi John Flamsteed, o astrônomo real.

A contenda Newton/Flamsteed centrou-se no controle dos dados que Flamsteed colheira nos anos que passara no Real Observatório de Greenwich. Newton havia precisado de informações de Flamsteed durante a preparação dos *Principia* e reconheceu essa dívida na primeira edição do livro. Na década de 1690, contudo, estava tendo dificuldade em obter dados de que precisava para um artigo sobre a teoria lunar. Newton aborreceu-se quando não conseguiu toda a informação que queria tão rapidamente quanto queria. Usando sua influência junto ao governo da rainha Ana, conseguiu ser nomeado dirigente de um novo órgão controlador (chamado “visitantes”) responsável pelo Observatório Real. Instalado nessa posição, o dominador Newton tentou forçar a publicação imediata do catálogo de astros de Flamsteed. A batalha continuou por dez anos, tempo em que Newton usou de todos os ardis sujos concebíveis para levar a melhor sobre seu rival. No fim das contas, conseguiu fazer com que Flamsteed fosse expulso da Royal Society. As observações de Flamsteed, o trabalho de sua vida, lhe foram tomadas e entregues ao seu rival de longa data, Edmund Halley, para publicação. Flamsteed reagiu e acabou obtendo ganho de causa nos tribunais. Conseguiu que o catálogo impresso lhe fosse devolvido e queimado antes de ser amplamente distribuído — melhor vê-lo destruído que nas mãos de Newton e Halley. Só depois da morte de Flamsteed seu assistente publicou uma versão autorizada do documento. O mero fato da morte de Flamsteed não deteve Newton. Ele eliminou sistematicamente todas as referências à ajuda dele nas edições posteriores dos *Principia*. No seu todo, esse foi um episódio vergonhoso na vida do grande cientista.

Pior ainda foi a infame batalha que Newton moveu contra Gottfried Leibniz em torno de qual dos dois inventara o cálculo. Leibniz era um opositor quase à altura de Newton. Hoje é universalmente reconhecido que Newton desenvolveu o cálculo antes que Leibniz começasse a se interessar por matemática. No entanto, ele manteve seu feito de 1665 em segredo e não publicou seu método. Mais tarde, Leibniz chegou ao cálculo de maneira independente e publicou seu trabalho em 1684. A acerbada rixa que se seguiu em torno de quem fora o primeiro a desenvolver o cálculo assumiu proporções internacionais, com a comunidade científica inglesa apoiando seu líder e os cientistas do continente tomando o partido de Leibniz. Logo a controvérsia se intensificou, com acusações de plágio de parte a parte. Nem Leibniz nem Newton tiveram a menor dignidade na condução dessa batalha. Acusações de desonestidade sempre haviam enfurecido Newton e essa não foi exceção. Ele escreveu vários artigos para revistas científicas em sua defesa, publicando-os sob os nomes de alguns de seus jovens seguidores. Como presidente da Royal Society, nomeou um comitê, que chamou de “imparcial”, para examinar a matéria. Em seguida, secretamente, Newton escreveu ele próprio o relatório final e mais tarde resenhou esse documento para a revista científica publicada pela

Royal Society. Não é preciso dizer que, com o baralho assim arranjado, Newton ganhou a mão.

O ódio de Newton por Leibniz perdurou mesmo após a morte do filósofo alemão. Nos 20 anos seguintes, quase todos os artigos que Newton escreveu sobre não importa que assunto continham pelo menos um parágrafo raivoso de ataque a Leibniz. “Segundos inventores”, disse desdenhosamente acerca de Leibniz, “não valem nada”.

Nesse meio tempo, as disputas perpétuas com Robert Hooke continuavam. Newton era tão sensível às críticas de Hooke que só depois que este morreu, em 1703, publicou *Óptica*, sua obra definitiva sobre luz e cores, embora ela representasse um trabalho feito 20 anos antes. Newton foi simplesmente incapaz de enfrentar críticas ao longo de toda a sua vida.

Os historiadores descobriram um outro aspecto um tanto desconcertante da personalidade de Newton. Hoje se tem praticamente certeza de que, em alguns artigos importantes, ele manipulou os números, como os da aceleração da gravidade e da precessão dos equinócios. Além disso, na segunda edição dos *Principia*, por exemplo, escolheu para a velocidade do som uma cifra que era a média de várias medidas que haviam sido realizadas. Em seguida trabalhou a partir destes números e os arranjou de modo a dar a impressão de que sua resposta fora alcançada mediante métodos matemáticos precisos. Convém observar que ele não falsificou dados experimentais; o que fez foi antes usar matemática desonesta para fazer suas conclusões parecerem mais precisas do que realmente eram.

Além do Newton público, havia um Newton secreto. Este foi descoberto, entre outros, pelo célebre economista John Maynard Keynes. À margem de seu trabalho acadêmico, Keynes interessava-se em investigar como trabalhavam os grandes cérebros. No exercício desse *hobby*, comprou por apenas 35 libras mais de 50 lotes de escritos de Newton num leilão realizado nas galerias da Sotheby and Company em Londres em 1936. Keynes dedicou então muitas horas a um exame atento dos documentos. Para seu pasmo, descobriu que Newton dedicara pelo menos tanto tempo ao metafísico, ao oculto, à alquimia e a minúcias bíblicas quanto à física. Constatou que a maior parte daqueles escritos eram “inteiramente mágicos e inteiramente desprovidos de valor científico”. Concluiu que Newton não fora realmente o primeiro dos cientistas modernos, mas sim “o último dos magos”. A maior parte desse material encontra-se hoje no Museu Hebraico em Jerusalém, não publicado e não lido.

Talvez caiba aqui uma palavra em defesa de Newton. A alquimia era uma ciência legítima no século XVII. Nessa época, todo investigador sério, na tentativa de penetrar as leis diabolicamente complicadas dos elementos químicos, tinha necessariamente de compreender a teoria dominante da época, que era a alquimia. Muitos historiadores da ciência recente lançaram um novo olhar sobre os alquimistas e sobre os últimos anos de Newton e perceberam que, como muitos alquimistas sérios, ele estava usando uma notação arcana que, a um exame mais rigoroso, representava observações científicas totalmente válidas.

Os defensores de Newton dizem que se muitos dos cadernos dos alquimistas fossem transcritos na linguagem científica moderna, correta, muitas reações químicas válidas seriam reveladas. É possível que, em seus últimos anos, Newton fosse não um mago, como Keynes sugeriu, mas um alquimista, como o era necessariamente todo cientista sério da época.

Quanto ao trabalho de Newton em teologia e estudos bíblicos, praticamente nada dele é lido atualmente. Voltaire, que foi o patrocinador e o defensor de Newton na França, resumiu o trabalho de Newton em seus últimos anos numa espirituosa observação: “Sir Isaac Newton

escreveu seu comentário sobre a Revelação para consolar a humanidade da imensa superioridade que tinha sobre ela em outros aspectos.”

Seja como for, é o Newton público e não o secreto que nos interessa aqui e o homem público tornou-se um sucesso. Em 1705 a rainha Ana, a popular sucessora ao trono britânico, fez uma visita a Cambridge acompanhada por toda a sua corte, inclusive seu príncipe consorte, Jorge da Dinamarca (sobre quem Carlos II fizera certa vez um indelicado comentário: “Eu o experimentei bêbado e o experimentei sóbrio e não há coisa alguma nele”). A comitiva real estava a caminho de atividades mais importantes no hipódromo de Newmarket, mas uma parada protocolar em Cambridge estava prevista. Ali a rainha conferiu títulos de doutor honorário e nomeou cavaleiros três notáveis cidadãos, entre os quais Isaac Newton, presidente da Casa da Moeda, presidente da Royal Society e filósofo natural extraordinário. A investidura foi seguida por um elegante jantar. Ele se realizou no Trinity Hall, onde o recém-nomeado cavaleiro, agora sentado à mesa de honra, havia servido como garçom em seus dias de estudante pobre. Agora ele era o primeiro homem de ciência a ser feito cavaleiro pela Coroa. O “sujeito esquisito que mora perto do portão” retornara a Cambridge em triunfo.

Como foi a vida de Newton nos longos anos que passou em Londres? Ele era um viciado em trabalho. Fosse na investigação secreta de matérias ocultas, na experimentação com várias abordagens à alquimia, ou no exame detalhado dos livros da Bíblia e da teologia esotérica, ele trabalhava. Não tinha nenhum gosto pelas tentações estéticas de Londres. Ao que parece não tinha nenhum ouvido para música, referia-se a esculturas como “bonecos de pedra” e encarava a poesia como uma “espécie de disparate inábil”. Pelo que se sabe, foi à ópera apenas uma vez. Mais tarde, disse que ouvira o primeiro ato com prazer, suportara o segundo e fugira no terceiro. Embora fosse um leitor prodigioso nos campos da teologia e da ciência, a literatura nada significava para ele. A biblioteca de Newton não continha uma só obra de Chaucer, Shakespeare ou Milton.

Newton, que ajudara a tornar a ciência e os cientistas respeitáveis e bem-vindos na altas rodas de Londres, adotou o estilo de vida dessa classe mais elevada. Mantinha uma carruagem e empregava seis criados. Sua fama tornara-se tal que todos os visitantes ilustres a Londres tentavam um encontro com o grande intelecto. Membros da família real eram sempre bem acolhidos por ele, mas outros tentavam uma audiência em vão. Entre os que foram repelidos estavam Benjamin Franklin e o filósofo francês Voltaire.

O perspicaz intelecto de Sir Isaac, contudo, não o protegeu da loucura financeira coletiva da chamada “Bolha do Mar do Sul” (*Great South Sea Bubble*), em 1720. Esse investimento insano custou ao grande cientista a fabulosa quantia de 20.000 libras, possivelmente um terço de sua fortuna líquida na época. Evidentemente o forte de Newton era a ciência, não a gestão financeira. Não muito antes de sua morte, Newton reconsiderou sua vida científica e resumiu-a da seguinte maneira:

Não sei o que posso parecer para o mundo, para mim mesmo, porém, pareço ter sido somente como um menino que brinca à beira do mar, tendo me distraído em encontrar vez por outra um seixo mais liso ou mais bonito que o comum, enquanto o imenso oceano de verdade se estende à minha frente, inteiramente desconhecido.

A história do empreendimento científico encerra episódios de importância monumental. A demonstração por Newton do modo como as forças gravitacionais podiam ser calculadas e de

que as mesmas leis se aplicam ao movimento no céu e na Terra deve ser reconhecida como um deles. Newton ensinou ao mundo que todas as coisas atraem todas as demais com uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa, e que os objetos reagem às forças com acelerações proporcionais a essas forças — estas são as leis da gravitação universal e do movimento de Newton. Elas explicam os movimentos de balas de canhão, foguetes, planetas, satélites, galáxias e objetos. Em essência, ele introduziu ordem no universo.

Deixamos a última palavra a Aldous Huxley. Falando sobre Newton, ele disse: “Como homem foi um fracasso; como monstro foi esplêndido.”

Newton morreu em Londres, em 20 de março de 1727, aos 84 anos e foi enterrado com grandes honras na abadia de Westminster. Era a primeira vez que se concedia tal privilégio a um homem de ciência, conhecimento ou arte na Inglaterra. A física não veria alguém da sua estatura intelectual por quase duzentos anos, até 1905, quando um então desconhecido funcionário de 26 anos do departamento de patentes de Berna, na Suíça, publicou suas reflexões sobre tempo, espaço, massa e energia.

^a A expressão consagrada atribuída a Descartes é *Cogito ergo sum* (Penso, logo existo). (N.R.T.)

^b O autor faz referência à determinação da aceleração da gravidade. (N.R.T.)

ALBERT EINSTEIN

*There was a girl named Miss Bright,
Who could travel much faster than light.
She departed one day,
In an Einsteinian way,
And came back on the previous night.^a*

Anônimo

Ao longo dos quatro últimos séculos, uma série de observações e experimentos astronômicos alterou radicalmente o modo como a humanidade vê o universo. Assim como o universo geocêntrico de Aristóteles foi substituído pelo universo heliocêntrico de Copérnico, Kepler e Galileu, assim também essa concepção foi modificada e quantificada pelo universo mecânico de Newton. E no início do século XX o universo de Newton foi substituído pelo de Einstein. Vivemos atualmente no universo de Einstein, quer o entendamos bem ou não. Não é preciso dizer que Albert Einstein figura como um dos gênios supremos de nosso tempo. Sua contribuição para nossa compreensão do tempo e seus esforços para conciliar a física das partículas com a física do espaço asseguram seu lugar na história da civilização. Mas que tipo de homem foi ele e, especificamente, o que nos ensinou?

As teorias da relatividade de Einstein (há duas, a teoria especial e a teoria geral) tornaram-se os primeiros assuntos científicos que a mídia de massa, que começava a emergir na década de 1930, tentou popularizar. Mas como até as mais simples explicações das teorias pareciam à imprensa contrárias ao bom senso e de difícil entendimento, a atenção se voltou para o próprio homem. Os refletores da mídia criaram uma espécie de caricatura, que se transformou na imagem popular de um cientista moderno. Einstein tinha um humor brincalhão que o tornava imensamente agradável. Uma vez, quando tinha mais de 70 anos, um repórter de *Seleções* perguntou-lhe qual a sua fórmula para o sucesso. “Suponhamos que X representa trabalho, Y representa divertimento e A representa sucesso”, respondeu Einstein, o criador da mais famosa equação matemática de todos os tempos. “Nesse caso A é a igual a X mais Y mais Z .” “Mas o que é Z ?” perguntou o repórter. “ Z significa manter a boca fechada”, brincou Einstein.

Ele se tornou um mito sem similar — o Einstein das roupas amarrotadas, da cabeça grande, do cabelo desgrenhado; o Einstein ingênuo e distraído, e no entanto obviamente dotado de uma mente superior. Um obstáculo para uma melhor compreensão de Einstein é que pensamos que já o conhecemos, quando tudo que realmente conhecemos é a imagem criada pela imprensa. Certa vez um Einstein perplexo comentou que não entendia porque era tão estimado e tão pouco compreendido. Para compreender Einstein verdadeiramente temos de fazer uma tentativa de compreender sua ciência.

A ciência, mais que qualquer outra coisa, foi a vida de Einstein; e para compreender o

homem é necessário acompanhar sua maneira científica de pensar. É possível para o leigo compreender as teorias da relatividade usando apenas um mínimo de matemática? Penso que sim, e penso também que essas teorias são de tal importância que devem fazer parte da educação de todo mundo. Mas esteja certo de que a relatividade, no nível em que vamos discuti-la, pode ser também extremamente divertida. Distorção do tempo, espaço curvo, o controverso “paradoxo dos gêmeos” — são todos exercícios interessantes para a mente.

O JOVEM EINSTEIN

Albert Einstein nasceu em Ulm, na Alemanha, no dia 14 de março de 1879, o primeiro dos dois filhos de Hermann Einstein e de Pauline, nascida Koch. No ano seguinte, a família se mudou para Munique, onde Hermann e um tio, Jakob Einstein, criaram uma pequena oficina eletromecânica. Uma filha, Maria, nasceu um ano depois. Sempre chamada Maja, seria a mais próxima de Albert ao longo de suas vidas. A família Einstein tinha recursos modestos; os negócios do pai nunca tiveram muito sucesso. Era, contudo, uma família culta — os Einstein gostavam de livros e de música e se orgulhavam de suas atitudes liberais, não dogmáticas. A aversão de Hermann pela autoridade, que se manifestaria na forma de uma aversão à religião, talvez tenha contribuído para moldar o desprezo que seu filho mais tarde manifestaria pelas convenções sociais, suas ideias independentes sobre a religião e até sua falta de reverência pela física instituída.

A principal fonte de recordações da família sobre os primeiros anos de Einstein é um ensaio biográfico escrito por sua irmã em 1924, depois que ele alcançara a fama. Ela contou a reação da avó ao ver o bebê Einstein pela primeira vez: “Pesado demais”, exclamou. O mesmo ensaio relata os temores despertados na mãe de Einstein pela parte posterior excepcionalmente grande e angular da cabeça do seu bebê (a forma incomum do crânio de Einstein tornou-se permanente). A família temeu também que Albert sofresse de alguma deficiência mental por causa de sua lentidão em aprender a falar. Ele não falou até os três anos e, segundo Maja escreveu, só adquiriu plena fluência em alemão aos dez anos de idade.

Antes que Einstein iniciasse sua vida escolar, teve lugar um evento transformador de que ele se lembraria a vida inteira. “Quando tinha quatro ou cinco anos”, disse ele, “experimentei um milagre quando meu pai me mostrou uma bússola. Tinha de haver algo profundamente oculto por trás de objetos — o desenvolvimento de nosso mundo de pensamentos é, em certo sentido, uma fuga do milagroso.”

Aos seis anos, Einstein entrou na escola pública. Embora nem sempre se desse bem com seus professores no primário, teve um bom desempenho acadêmico. Segundo um mito popular, Einstein foi um aluno medíocre em seus primeiros anos. Na realidade, suas notas eram excelentes e ele estava sistematicamente entre os primeiros da classe, embora a disciplina rígida e as técnicas de memorização o aborrecessem. Fora da classe, era uma criança quieta que não gostava de brincar com os colegas, preferindo brinquedos solitários que exigiam paciência e persistência. Uma de suas distrações favoritas era construir castelos de cartas.

Aos dez anos, Einstein foi transferido para uma escola secundária alemã típica, o Luitpold Gymnasium, onde foi submetido à disciplina severa e formalista usual na época. Reagiu a esse

sistema coercivo de ensino duvidando da autoridade, em particular da autoridade educacional. É quase certo que a atitude independente e questionadora que exibiu mais tarde em relação à ciência foi cultivada ali. Muitos anos depois, numa entrevista a seu biógrafo Banesh Hoffmann, Einstein brincou: “para me punir por meu desprezo pela autoridade, o Destino fez de mim uma autoridade.”

Einstein permaneceu no Luitpold Gymnasium até os 15 anos e continuou recebendo notas altas em matemática e latim. Tinha uma aversão natural por esportes ou ginástica, afirmando que a atividade física vigorosa o deixava atordoado e cansado. Essa atitude foi em parte responsável pelo fato de ter feito poucos amigos na escola e se sentir isolado e sozinho. Também junto a seus instrutores, nem sempre era benquisto. O professor de grego de Albert disse certa vez a Hermann Einstein que o campo profissional que Albert escolhesse não tinha a menor importância — ele fracassaria em qualquer um.

Dois acontecimentos especialmente dignos de nota ocorreram durante o tempo em que Einstein frequentou a escola secundária. Aos 12 anos, Einstein decidiu se dedicar à solução do enigma do “imenso mundo”. Embora ainda não o soubesse, havia se tornado um aprendiz de físico. Fora estimulado nesses interesses não só por seus professores mas por seus tios Jakob Einstein e Casar Koch, que encorajaram seu interesse pela matemática e pela ciência. No mesmo ano em que embarcou no estudo do “imenso mundo”, que tomaria sua vida inteira, Einstein comprou um livro sobre a geometria euclidiana, ao qual mais tarde se referiria como o “santo livro de geometria”. Fascinado pela precisão e a clareza da geometria, Einstein aprendeu-a sozinho antes que ela fosse ensinada em aula. Prosseguiu estudando cálculo diferencial e integral por conta própria.

Outra influência que se exerceu sobre Einstein nessa época foi a de Max Talmud, um amigo íntimo da família. Estudante de medicina com pouco dinheiro, Talmud jantava uma vez por semana com os Einstein. Ele deu a Albert livros sobre ciência, e mais tarde filosofia, que os dois discutiam durante muitas horas. Talmud, que anos mais tarde escreveu suas recordações desse tempo, disse nunca ter visto Albert lendo qualquer obra de literatura leve, não se lembrando tampouco de tê-lo visto na companhia de colegas de escola da sua idade.

A recreação que despertava maior interesse em Einstein, tanto naqueles primeiros anos de escola quanto mais tarde, era a música. Sua mãe, uma pianista bem-dotada, incentivava a música em casa. Maja estudou piano enquanto Albert escolheu o violino. Aprendeu também piano sozinho e tocou ambos os instrumentos a vida toda.

Em 1894 o negócio da família faliu e mudaram-se para Milão, na Itália. Albert continuou em Munique, aos cuidados de parentes, para terminar o secundário. Agora ainda mais infeliz na escola e sentindo falta da família, Einstein tornou-se indiferente ao trabalho acadêmico e suas notas começaram a declinar. Finalmente, um de seus professores pediu-lhe que deixasse a escola. Albert aceitou a sugestão de bom grado e, sem sequer comunicar a decisão aos pais, abandonou o Gymnasium sem o diploma.

Em seguida, muito feliz, juntou-se à família em Milão, onde foi estimulado por seus surpresos pais a pensar um pouco no futuro. Estando a família em dificuldades financeiras, ele sabia que se esperava que ele abrisse o próprio caminho. Se a carreira de sua escolha era a ciência, havia evidente necessidade de mais estudos. Seu maior problema era a falta de um diploma, sem o que não podia ingressar em nenhuma das universidades italianas.

Depois de algum tempo, Einstein teve notícia do Instituto Politécnico de Zurique, em que não era necessário diploma para ingressar. Era preciso, contudo, passar por exames de admissão. Em 1895, Einstein foi a Zurique para as provas. Embora tenha se saído bem nas partes de matemática e ciência, não foi aprovado nos exames. Foi um sério revés, mas ele o superou matriculando-se numa escola preparatória suíça em Aarau por um ano. Ali, pela primeira vez parece ter gostado da escola, apreciando o espírito liberal do lugar e a consideração dos professores. Submeteu-se novamente aos exames de ingresso na universidade em 1896 e foi devidamente admitido para um programa de estudos de quatro anos que o qualificaria como professor. Numa composição escrita nessa época, Einstein disse: “Imagino-me tornando-me professor naqueles ramos da ciência natural, escolhendo a parte teórica deles.” Já então conhecia seus pontos fortes.

No mesmo ano em que ingressou no renomado Instituto Politécnico, Einstein renunciou à sua cidadania alemã. Mediante o pagamento de alguns marcos, enviaram-lhe de Ulm um documento que declarava não ser ele mais um cidadão da Alemanha. Provavelmente teria pago muito mais de bom grado. Agora era um estudante sem nacionalidade em Zurique. No entanto, desde os primeiros dias na universidade havia economizado uma parcela significativa de sua modesta mesada com o objetivo de pagar por seus documentos de naturalização suíça, o que teve condições de fazer pouco depois.

Em seu primeiro ano na faculdade, Einstein aproximou-se dos colegas Marcel Grossman e Mileva Maric, uma moça bonita a quem chamavam Marity. Com esses amigos, ia por vezes à noite a um concerto ou a um espetáculo teatral. Era atraído também por um *Kaffeehaus* de Zurique em que os estudantes costumavam passar horas resolvendo os problemas do mundo. No geral, porém, era um estudante sério, e trabalhava. Numa carta a um amigo, escreveu: “O esforço diligente e a contemplação da natureza de Deus são os anjos que, aplacadores, fortalecedores, e contudo implacavelmente severos, haverão de me guiar em meio ao tumulto da vida.”

Embora em geral tivesse uma atitude madura para com o trabalho, Einstein tendia a se dedicar apenas aos projetos que lhe pareciam de interesse. Isaac Newton comportara-se de maneira semelhante em Cambridge mais de dois séculos antes. Mas o orientador de Newton mostrara pouco interesse por suas atividades. A situação de Einstein era diferente: era aluno de uma instituição que adotava as técnicas formais de aula e sua frequência (ou, o mais das vezes, ausência) em classe era notada. Consta que seu professor de física, Heinrich Weber, lhe teria dito: “Você é um rapaz inteligente, Einstein, muito inteligente. Mas tem um grande defeito, não permite que lhe ensinem coisa alguma.”

A independência de espírito e postura de Einstein tornaram-no em geral pouco apreciado entre os professores. Herman Minkowski, seu professor de matemática na Politécnica, lembrou-se dele como “um sujeito preguiçoso” que raramente aparecia na sala de aula. Einstein valia-se dos apontamentos de aula que lhe fornecia seu grande amigo Marcel Grossman, que mantinha um diário meticulosamente organizado. Estudava esses apontamentos só nas vésperas dos poucos exames e se saía bastante bem. Em pelo menos uma ocasião, recebeu uma advertência formal sobre seu descaso pelo trabalho de laboratório. Em outra ocasião, um de seus experimentos provocou uma explosão que quase destruiu o laboratório e

feriu-lhe gravemente a mão.

Einstein, como Newton, fiava-se não nos professores, mas nos estudos que fazia por conta própria. Mais uma vez, como no caso de Newton, a física clássica ensinada na sala de aula estava obsoleta. Para se manter em dia com uma ciência em rápida transformação, era preciso ler independentemente, o que Einstein fazia com um entusiasmo sem limites por novas ideias.

Em 1900, Einstein graduou-se pela Politécnica suíça e começou a procurar emprego. Recebera seu diploma em física ao mesmo tempo que três outros estudantes, os quais obtiveram imediatamente um cargo como professores assistentes na universidade. Einstein também esperara ser contratado como professor assistente, mas não foi. A decepção foi grande e ele nunca perdoou seu orientador acadêmico, professor Weber, por lhe ter acenado com um cargo de assistente e depois recuado. Ficou sem trabalho por algum tempo, o preço a pagar por sua falta de reverência para com os professores. De sua parte, eles devem ter raciocinado que, se Einstein não era capaz de mostrar entusiasmo pelo trabalho de classe, provavelmente não o mostraria pelo trabalho profissional.

Einstein não gostava de ser um fardo para a família, sobretudo porque ela ainda experimentava dificuldades financeiras. Por fim conseguiu trabalho como professor em meio expediente, mas era somente um emprego temporário.

Durante esse período difícil de sua vida, Einstein ficou separado por longos intervalos de sua companheira e colega da politécnica suíça, Mileva Maric, com quem encetara uma relação romântica logo no início de seus tempos de estudantes. Em 1902, tiveram um filho ilegítimo que parece ter sido entregue para adoção.

Finalmente, em junho de 1902, com a ajuda do amigo Marcel Grossman, Einstein conseguiu ser nomeado “perito técnico de terceira classe” do Departamento de Patentes da Suíça, em Berna. Agora podia planejar seu casamento com Mileva. Os pais dele opunham-se a essa união, talvez por causa da procedência católica de Mileva, ou simplesmente porque a mãe de Einstein jamais gostou dela. Foi somente no seu leito de morte que Hermann Einstein finalmente consentiu no casamento. Os jovens se casaram em janeiro de 1903 e Einstein se estabeleceu no novo emprego no departamento de patentes.

Einstein tinha de fazer muitas leituras e análises para se manter em dia com a física moderna. Quando estudante, lera Kirchoff e Hertz sobre o comportamento das correntes elétricas e das ondas eletromagnéticas. Estudara também as teorias da eletricidade de James Clerk Maxwell, as ideias de Ernst Mach sobre os conceitos básicos da física e as de Hendrik Lorentz sobre a teoria eletrônica da matéria.

Esses e outros influentes pioneiros da época, em particular Michael Faraday, tornaram-se os “gigantes” de Einstein. Como Newton, Einstein precisou de ombros sobre os quais se erguer. E ele iria reconhecer essa dívida. Numa conferência que deu em Londres em 1921, disse que a relatividade era “o resultado direto e, em certo sentido, a culminação natural do trabalho de Faraday, Maxwell e Lorentz”.

OS GIGANTES DE EINSTEIN

Embora desempenhem papéis secundários nesta narrativa, cada um dos gigantes de Einstein

poderia ser uma estrela em sua própria galáxia. Michael Faraday (1791-1867) foi o primeiro herói. Faraday era filho de um ferreiro e, embora tivesse pouca educação formal, foi o Thomas Edison de sua época. Aprendeu sozinho ciência suficiente para se tornar o físico experimental mais destacado de seus dias. Quando jovem, conseguiu o cargo de assistente de laboratório no Instituto Real da Grã-Bretanha. Ali permaneceu por 46 anos, terminando por se tornar o diretor do instituto. Sua fama se deve sobretudo à descoberta do fenômeno da indução eletromagnética. Essa descoberta foi inspirada por um experimento anterior (de Hans Christian Oersted) que mostrou que uma corrente elétrica deflete uma agulha magnética. Faraday teve a engenhosidade de planejar um experimento que exploraria a possibilidade do efeito oposto, isto é, o efeito que a força magnética poderia ter sobre uma corrente elétrica. Por causa da limitação de seus conhecimentos matemáticos, Faraday não compreendia nem confiava em modelos matemáticos como descrições apropriadas de fenômenos físicos. Por isso, desenvolveu modelos físicos para explicar resultados experimentais.

Faraday descobriu que a eletricidade e o magnetismo eram ambos transmitidos por meio de linhas de força, chamadas *campos*^b. Com essa descoberta foi inaugurada a teoria de campo, na época um importante avanço. (Hoje, quando alunos do secundário salpicam limalha de ferro ao acaso sobre um pedaço de papel que repousa num magneto, estão ilustrando como a limalha é atraída pelo campo magnético e estão repetindo um experimento de Faraday.)

A maior contribuição de Faraday para a física foi centrar a atenção da comunidade científica nos campos de força invisíveis, hoje o principal objeto de pesquisa em toda parte, do nível subatômico ao intergaláctico. Os estudos eletroquímicos de Faraday o convenceram também de que a matéria consiste de diferentes tipos de átomos, cada um dos quais é uma estrutura eletricamente equilibrada com números iguais de unidades positivas e negativas de carga elétrica. Ele foi, de certo modo, o primeiro físico atômico do mundo.

James Clerk Maxwell (1831-1879) começara a estudar eletricidade e magnetismo lendo os artigos de Faraday sobre esses assuntos. Aplicando seus prodigiosos talentos matemáticos, Maxwell obteve as equações que hoje levam o seu nome. Por meio dessas equações, demonstrou que eletricidade e magnetismo são aspectos de uma única força, o eletromagnetismo, e que a própria luz é uma variedade dessa força. Nesse momento, as áreas até então separadas da eletricidade, do magnetismo e da óptica foram unidas.

A descoberta de Maxwell de que a velocidade da propagação das ondas eletromagnéticas era exatamente igual à velocidade da luz levou-o à conclusão de que a luz nada mais é que um exemplo de radiação eletromagnética. Concluiu ainda que a eletricidade não precisa ficar confinada a fios, podendo ser disseminada na forma de ondas através do espaço, tal como a luz. Com essas conclusões, Maxwell abriu caminho para a comunicação por rádio (inicialmente dita *sem fio*).

O mundo científico manteve-se cético diante dessas ideias radicais até que Heinrich Hertz (1857-1894) efetuou uma série de experimentos, hoje famosos, que confirmaram todas as previsões teóricas da teoria de Maxwell. O eletromagnetismo se manifesta em ondas e todas elas têm um comprimento de onda, a distância entre suas respectivas cristas. Se as ondas eletromagnéticas fossem como ondas oceânicas, poderíamos visualizar as cristas a cerca de seis ou nove metros uma da outra^c. A diferença entre várias ondas eletromagnéticas — infravermelho, micro-onda, raios X, ondas de rádio — reside nos seus comprimentos de onda e nas suas frequências. A luz visível, que está no meio do espectro eletromagnético, consiste

de ondas eletromagnéticas cujos comprimentos correspondem, cada um, a diferentes cores, como o azul, o verde, o laranja e o vermelho.

Heinrich Hertz desenvolveu um método para gerar ondas eletromagnéticas e ao mesmo tempo medir sua velocidade. Mostrou que essas ondas tinham as mesmas propriedades de reflexão, refração e polarização que as ondas de luz e que podiam ser modificadas ou focalizadas. Hertz tomou as ideias de Maxwell, submeteu-as a uma série de experimentos rigorosos durante um período de dez anos e comprovou-as.

Einstein se inteirou desses avanços graças às suas leituras independentes. *Herr Professor* Weber, do Instituto Politécnico, não reconhecia Faraday ou Maxwell e muito menos dissertava sobre eles. Muitos anos mais tarde, Einstein expressou o valor que atribuía às equações de Maxwell, dizendo: “Maxwell deu a contribuição isolada mais importante do século XIX.”

Resta descrever o trabalho de mais dois atores coadjuvantes e o palco estará pronto para a entrada de Einstein. Começamos pelo físico teórico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928), o primeiro a sugerir o conceito do elétron. Ele havia estudado as equações de Maxwell relativas ao campo eletromagnético e procurara meios de estender esses achados matemáticos a outras áreas da física. Na década de 1880, considerava-se que os dois pilares da física eram a mecânica newtoniana e as equações da eletrodinâmica de Maxwell porque as duas únicas forças básicas da natureza conhecidas na época eram a gravitacional e a eletromagnética.

Os elétrons, como Lorentz mostrou, são essenciais para a estrutura dos átomos neutros (não carregados). Contribuem pouco para a massa total de um átomo, mas são necessários para fornecer as cargas elétricas negativas, compensando assim as cargas positivas dos prótons e tornando o átomo eletricamente neutro. Lorentz foi o primeiro a sugerir que a massa de uma partícula carregada cresceria com a velocidade, um conceito revolucionário. Einstein percebeu que o trabalho de Lorentz ao incorporar o elétron à física newtoniana-maxwelliana da época era fundamental para seu próprio trabalho. Os únicos físicos cujos nomes ele menciona em seu primeiro artigo sobre a relatividade são Maxwell, Hertz e Lorentz.

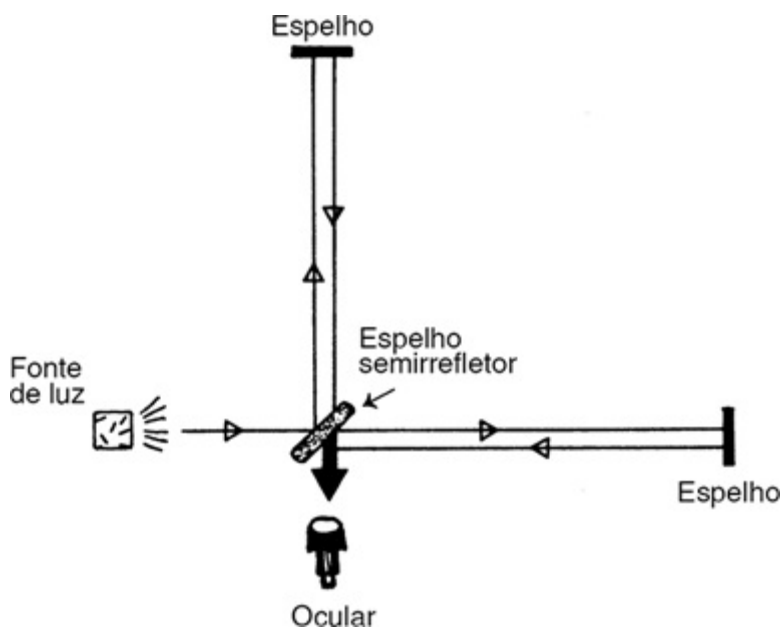
O EXPERIMENTO MICHELSON-MORLEY

O último papel coadjuvante decisivo é desempenhado pelo famoso experimento Michelson-Morley. Embora não tenha contribuído diretamente para as ideias de Einstein, foi esse experimento que preparou a comunidade científica para aceitar suas teorias.

Albert Michelson era um professor de física no que é hoje o Case Institute, em Cleveland, Ohio, e Edward Morley lecionava química perto dali, na Western Reserve University. Os dois se juntaram para planejar e conduzir um experimento destinado a medir a força do vento do éter. A ciência convencional da época afirmava que o espaço era preenchido por uma substância invisível chamada éter. Supunha-se a existência desse éter hipotético para explicar a propagação da radiação eletromagnética pelo espaço. Os físicos pensavam que um objeto que se movesse através desse éter certamente encontrava um “vento do éter” soprando na direção oposta. Michelson e Morley sabiam que a Terra, em sua órbita em torno do Sol, se movia numa velocidade de cerca de 30 quilômetros por segundo; conseqüentemente, era preciso criar um vento de éter com velocidade aproximadamente igual.

Em 1887, no laboratório de Morley, instalado num porão, os dois montaram um experimento que pretendia detectar e medir com precisão a força do vento do éter: Um feixe de luz foi opticamente separado em dois feixes perpendiculares entre si. Os dois feixes de luz foram refletidos e depois recombinados e postos em foco numa ocular. Um feixe de luz orienta-se paralelamente ao suposto movimento da Terra através do éter. A teoria que estava sendo posta à prova era a de que o feixe de luz que tivesse de se mover contra a força do vento do éter teria sua velocidade reduzida em relação à do outro feixe. A analogia usada por Michelson para explicar esse princípio comparava os dois feixes de luz com dois nadadores numa disputa de velocidade — um nadador teria de nadar contra a corrente e voltar, ao passo que o outro cobriria a mesma distância mas cruzando a corrente e voltando. Se não houver corrente, a disputa terminará empatada. Se houver alguma corrente, o segundo nadador vencerá sempre. (Caso o leitor se interesse, este raciocínio pode ser confirmado algebricamente.)

Para o pasmo dos dois experimentadores, não houve nenhuma diferença no tempo que os dois feixes levaram para percorrer as distâncias especificadas. Ou o éter estava se movendo com a Terra, o que era absurdo, ou simplesmente não existia. (Uma terceira conclusão que os resultados permitiam era que a Terra não se move, mas Galileu e outros os haviam convencido de que ela o faz.) Michelson e Morley repetiram o experimento várias vezes, sempre obtendo os mesmos resultados. Se o éter simplesmente não existisse, seria preciso repensar alguns conceitos de Newton, uma perspectiva assustadora. Isaac Asimov qualifica a observação Michelson-Morley de “o mais importante experimento que não deu certo de toda a história da ciência”. Ela tornou possível, no entanto, pensar que a física newtoniana poderia estar incompleta. Einstein não sabia do experimento Michelson-Morley na ocasião em que formulou as ideias subjacentes às suas teorias da relatividade. Por si só, através de experimentos mentais, concluiu que o éter não existia; e, quando chegou a hora, os resultados Michelson-Morley ajudaram a comunidade científica a aceitar a teoria de Einstein.



EXPERIMENTO MICHELSON-MORLEY A luz proveniente da fonte é dividida pelo espelho semirrefletor e se desloca ao longo de dois braços perpendiculares. Espelhos em cada extremidade refletem os feixes de luz. Os resultados negativos desse experimento indicam que o vento do éter não existe.

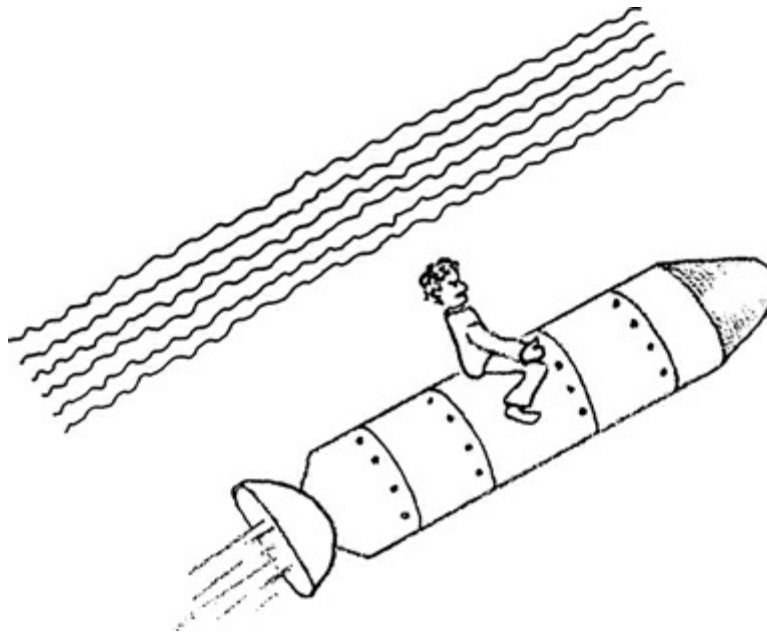
Em seus *Essays in Science*, publicados em 1934, Einstein disse: “A teoria da relatividade se assemelha a um prédio composto de dois pavimentos distintos, a teoria especial e a teoria geral. A teoria especial, sobre a qual a teoria geral repousa, aplica-se a todos os fenômenos físicos com exceção da gravidade; a teoria geral fornece a lei da gravitação e sua relação com as outras forças da natureza.” Vamos começar pelo primeiro pavimento e ir galgando aos poucos.

A TEORIA ESPECIAL DA RELATIVIDADE

Ao que se conta, Einstein gostava de seu trabalho no Departamento de Patentes da Suíça. Ele proporcionava segurança, muitas vezes era interessante e lhe deixava tempo e energia para desenvolver alguma reflexão séria e escrever sobre física. Em particular, Einstein estava pensando sobre muitos problemas enigmáticos que tinham a ver com luz e movimento. Em 1905 ele tinha 26 anos e era extremamente respeitado por seu trabalho no departamento de patentes. Embora seu salário fosse pequeno e seu casamento longe de ser perfeito, mais tarde ele se lembraria de seu tempo em Berna como um dos mais felizes de sua vida. Nessa época, acima de tudo, ele foi produtivo.

Em maio de 1905, Einstein concluiu um artigo que iria lhe valer o Prêmio Nobel 17 anos mais tarde. No mês seguinte, terminou um outro artigo que lhe asseguraria o doutorado pela Universidade de Zurique. Em seguida, publicou mais quatro artigos na prestigiosa revista alemã de física *Annalen der Physik*, o terceiro dos quais, hoje conhecido como *teoria especial da relatividade*, iria mudar para sempre a concepção que a humanidade tem do universo. Ele realizou todo esse trabalho sozinho, no quarto dos fundos de seu pequeno apartamento em Berna. O único período na história da física comparável a esse é a estada de Newton em Woolsthorpe, de 1665 a 1666.

Diferentemente dos *Principia* de Newton, documento reconhecido quase instantaneamente como revolucionário, a publicação da teoria especial da relatividade de Einstein não assombrou de imediato a comunidade científica. Para o dissabor de Einstein, o artigo foi em geral ignorado. Ali onde ele esperara controvérsia, houve silêncio. Em vez de centenas de cartas questionando ou aplaudindo suas ideias, recebeu uma — um bilhete do professor Max Planck, de Berlim, pedindo mais informação sobre algumas de suas ideias^d. Os poucos especialistas que compreenderam Einstein ficaram céticos e até eles se opuseram às suas chocantes conclusões, até que foi possível obter experimentalmente provas de suas teorias. Quanto à maior parte do *establishment* científico, seus integrantes estavam comprometidos com a mecânica newtoniana e o eletromagnetismo maxwelliano e não abriram mão facilmente de suas posições fortificadas. Afinal de contas, se a matemática de Einstein se sustentasse, muita coisa teria de ser repensada.



O FAMOSO EXPERIMENTO “GEDANKEN” DE EINSTEIN Aos 16 anos, Einstein se perguntara o que veria se pudesse correr atrás de um feixe de luz na velocidade da luz. Será que se veria a luz “imóvel”? Retornando a essa ideia em 1905, raciocinou que, como as equações de Maxwell mostravam que a velocidade era inerente à luz, não seria possível acelerar-se à velocidade da luz. Concluiu ainda que a velocidade da luz era constante — a mesma para todos os observadores, fosse qual fosse o movimento relativo destes. Einstein chamou essa ideia de sua “teoria da invariância”. Segundo Murray Gell-Mann, uma vez que Einstein chegou a essa conclusão, o restante da teoria especial da relatividade se encaixou logicamente.

Grande parte da teoria especial da relatividade surgiu de uma experiência de pensamento que ocorrera a Einstein quando ele tinha 16 anos. Na ocasião, ele perguntara a si mesmo o que veria se corresse atrás de um feixe de luz na velocidade da luz. A física newtoniana clássica dizia que veria luz em repouso. Pensando sobre isso em 1905, Einstein concluiu que essa resposta não podia ser correta. Ele sabia pelas equações de Maxwell que a luz era movimento, que a velocidade lhe era inerente. Percebeu que o conceito de espaço e tempo absolutos de Newton e as equações de Maxwell não podiam estar todos corretos. Resolveu esse paradoxo concluindo que não se pode acelerar a velocidade da luz e que a velocidade da luz era constante para todos os observadores, fosse qual fosse seu movimento relativo. Uma vez que chegou a essa conclusão, o restante da teoria especial da relatividade começou a ganhar forma. Por exemplo, a mecânica newtoniana presume que um objeto pode se mover em velocidade ilimitada desde que uma força suficiente seja usada para acelerá-lo. Einstein disse que nada pode se mover em velocidade maior que a da luz. Mostrou que haveria necessidade de uma quantidade infinita de energia para acelerar um objeto até a velocidade da luz e que isso era impossível porque a quantidade de energia disponível no universo é finita.

Einstein percebia que, para questionar os princípios newtonianos de espaço e tempo absolutos, impunham-se mudanças fundamentais no modo como o espaço e o tempo eram entendidos. O melhor meio de compreender a relatividade especial é o uso de experiências de pensamento, alguns deles desenvolvidos pelo próprio Einstein. Essa técnica será utilizada aqui para ilustrar os cinco efeitos relativísticos considerados mais importantes: (1) a relatividade da simultaneidade, (2) a dilatação do tempo, (3) a contração do comprimento em velocidades próximas à da luz, (4) o aumento de massa de um corpo em movimento rápido, e (5) a relação entre massa e energia.

Se eu tivesse de fazer uma síntese da teoria especial da relatividade para o caderno de um estudante de física, ela diria:

A velocidade da luz é sempre constante.

À velocidade da luz o tempo para.

À velocidade da luz, a massa é infinita.

$$E = mc^2$$

A propósito, a teoria especial da relatividade não afirma que tudo é relativo. Afirma apenas que algumas coisas que o mundo havia considerado absolutas, como o tempo e o espaço, são relativas e algumas coisas que o mundo havia considerado relativas, como a velocidade da luz, são absolutas. A teoria de fato sustenta que, para todos os sistemas de referência, a velocidade da luz é constante e, se todas as leis naturais forem as mesmas, tempo e movimento se revelarão ambos relativos ao observador. É fácil dizer isto, mas as implicações são profundas e os termos *relativo*, *absoluto* e *sistema de referência* requerem alguns exemplos que esclareçam os conceitos.

RELATIVIDADE

É fácil entender *tamanho* como um termo *relativo*. Uma coisa só é grande ou pequena em referência a alguma outra. Uma bola de basquete é grande comparada com uma ervilha, mas pequena comparada com a Lua. Não há como medir um objeto e dizer que ele é *absolutamente* grande ou *absolutamente* pequeno.

Velocidade é outro exemplo de termo relativo. Não se pode dizer que coisa alguma é rápida ou lenta sem compará-la com outra. Meu carro é rápido comparado com a minha bicicleta, mas lento quando comparado com uma espaçonave.

Para cima e *para baixo* são ambas expressões obviamente relativas. Aqui na Terra, *para cima* é a direção rumo ao céu, enquanto *para baixo* é a direção rumo ao centro da Terra. Mas, como as imagens de televisão de astronautas a bordo de um ônibus espacial mostraram, não há nenhum *para cima* e *para baixo* no espaço porque não há nenhum sistema de referência.

E quanto ao movimento? Será um termo relativo? Podemos ver de imediato que sim. Imagine um trem que segue para o leste a 160 quilômetros por hora. A bordo dele, um homem caminha na direção oeste a seis quilômetros por hora. Com que rapidez o homem está se movendo? Não podemos responder a essa questão a menos que escolhamos um sistema de referência. Com relação ao solo, o homem está se movendo para o leste a 154 quilômetros por hora; relativamente ao trem, contudo, está se movendo para o oeste a seis quilômetros por hora.

A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE

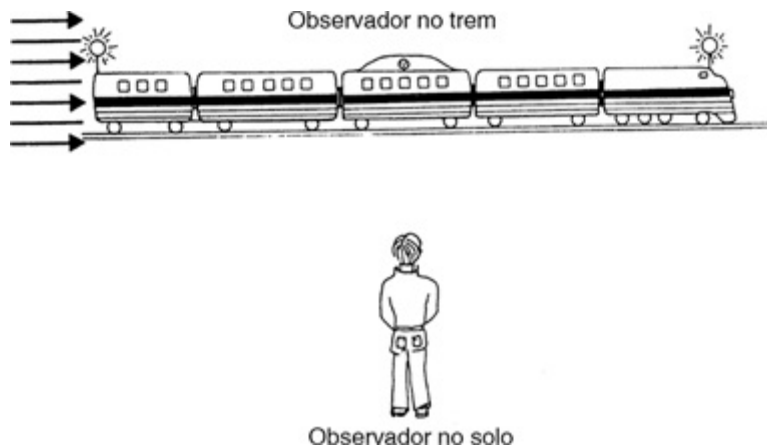
A *relatividade do tempo* é um conceito de apreensão mais difícil. O universo de Newton pressupunha que um tempo absoluto era marcado por um relógio universal invisível. Se fosse 1:02 na Terra, seria 1:02 em Vênus, Marte ou em qualquer outro lugar do universo. Einstein nos mostrou que isso não é verdade. Um dos exemplos que usou para ilustrar suas novas

ideias envolve eventos simultâneos. No universo de Newton, era possível afirmar que dois eventos ocorriam simultaneamente porque o tempo absoluto estava sendo medido pelo relógio universal. Einstein nos revelou que essa ideia de tempo absoluto e de eventos simultâneos produz um paradoxo. Se a velocidade da luz for absoluta (constante) sob todas as condições, há algo de errado com o conceito newtoniano.

Einstein chamou atenção para o fato de que a luz leva tempo para se mover de um ponto a outro e citou o caso de dois raios que caem perto de uma via férrea. Para uma pessoa postada junto da linha e a meio caminho entre os dois raios, os dois clarões pareceriam ocorrer exatamente ao mesmo tempo. Um observador que viajasse num trem rápido, porém, veria o raio à sua frente — aquele em cuja direção estava correndo — luzir antes daquele de que estava se afastando rapidamente. Para esse observador os dois raios cairiam em momentos diferentes. Considere agora um trem que avance na direção oposta. Um observador nesse segundo trem veria os dois raios caírem numa ordem oposta àquela vista pelo observador no primeiro trem. Einstein prosseguiu declarando que não há entre os três nenhum observador privilegiado — em outras palavras, todos estão certos. Assim, dois eventos são simultâneos em um sistema de referência mas não em outros dois. Não existe tempo absoluto, e não há nenhum relógio universal marcando o tempo em algum lugar do espaço.

Como este conceito é um pouquinho complicado, consideremos um outro exemplo. Imagine que um vagão de passageiros de um trem tem uma cúpula de observação. Nosso confiável observador está sentado no meio do vagão, num assento voltado para o lado. Duas grandes lâmpadas estão fixadas, uma na frente e outra na traseira do trem. Na posição em que está, nosso passageiro pode ver tanto a frente quanto a traseira do trem. Se for acionado um comutador que conecte as lâmpadas a uma fonte de energia, esse passageiro verá as duas se acenderem simultaneamente. Não faz nenhuma diferença que o trem esteja parado ou se movendo pelo trilho a 300 quilômetros por hora, porque relativamente ao passageiro o trem não está se movendo.

Suponhamos agora um observador imóvel^f que observa o trem passar. Admitindo que o passageiro e o observador imóvel estão face a face quando o comutador é acionado, nosso observador imóvel não verá as luzes se acenderem ao mesmo tempo. Mais precisamente, verá a luz traseira se acender primeiro e depois a dianteira. Lembre-se, a luz traseira está se movendo em direção a ele a 300 km/h, ao passo que a luz dianteira está se afastando dele na mesma velocidade. Por estar se movendo em direção a ele, a luz traseira terá de percorrer uma distância menor que a luz dianteira, que se afasta. Se a distância é menor e a velocidade da luz é constante em quaisquer circunstâncias, ele verá a luz traseira se acender antes que a luz dianteira. Portanto, dois eventos que parecem simultâneos do ponto de vista do passageiro do trem não o são aos olhos de um observador imóvel. E, o mais importante, ambos os observadores estarão certos. A simultaneidade é um fenômeno relativo.



A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE DE EINSTEIN Para um observador num trem em movimento, ambas as luzes parecem se acender ao mesmo tempo. Para um observador no solo, a luz traseira parece se acender ligeiramente antes da dianteira.

Para mais um exemplo desse princípio, considere os ônibus espaciais da ilustração. Do ponto de vista do observador que está na nave de comando, os sinais luminosos chegam às outras naves simultaneamente. No entanto, do ponto de vista de um observador que está na estação espacial, os sinais luminosos chegam à nave A bem antes de chegar à nave C.

Evidentemente, essas conclusões se baseiam na constância da velocidade da luz. Nesse caso, será a luz a única invariante para todas as coisas no universo? Aqui, o termo luz designa a porção visível de um espectro de radiação eletromagnética. Essa radiação inclui ondas de rádio, radar, luz infravermelha e ultravioleta e raios gama. Todos eles se propagam através do espaço na mesma velocidade e essa velocidade, pouco menos que 300.000 quilômetros por segundo, é constante, não importa qual seja o movimento da fonte da radiação. Imagine um projétil disparado para a frente, da dianteira de um avião a jato. A velocidade do projétil em relação ao solo é obtida somando-se sua velocidade à do avião. No caso da luz, contudo, a velocidade do feixe de luz (ou de qualquer outra radiação eletromagnética) não é afetada pela velocidade do objeto que emite o feixe. Se, em vez de disparar um projétil, o avião de nosso exemplo acender um farol dianteiro voltado exatamente para a frente, a velocidade da luz não se acrescenta à velocidade do avião. Essa concepção foi testada muitas vezes de vários modos diferentes e os resultados são sempre os mesmos — a velocidade da luz é constante.

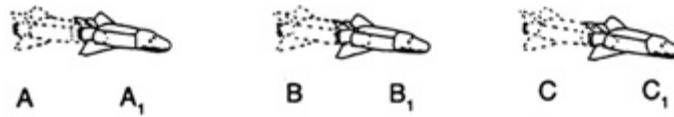
Quão veloz é veloz?

Velocidade da luz no vácuo = 3×10^8 metros por segundo, ou

300.000 quilômetros por segundo, ou 1,075 bilhão de quilômetros por hora

1% da velocidade da luz = 10,7 milhões de quilômetros por hora
 Velocidade do som no ar = 330 metros por segundo (Mach 1)
 Velocidade da bala ao deixar a boca de um rifle = 660 metros por segundo (Mach 2)

Velocidade de escape da Terra = 40.000 quilômetros por hora, ou 11 quilômetros por segundo



A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE DE EINSTEIN Imagine três ônibus espaciais (A, B e C) ultrapassando uma estação espacial nas profundezas do espaço. Essa flotilha está se movendo em linha reta e velocidade constante. A nave do meio (B) é o veículo de comando. A nave da frente e a de trás estão a igual distância da nave de comando. Num certo instante, B emite um sinal luminoso simultaneamente para trás, na direção de A, e para frente, na direção de C. Do ponto de vista de um observador na nave B, os sinais chegam a A e a C ao mesmo tempo. No entanto, do ponto de vista de um observador na estação espacial, o sinal luminoso chega a A bem antes de chegar a C.

MOVIMENTO UNIFORME

Movimento uniforme é movimento que não está mudando, nem acelerando nem desacelerando. A física clássica ou newtoniana deixou claro que se você está num veículo que se move uniformemente, digamos um vagão de trem, fechado em ambos os lados, não lhe permitindo ver a paisagem passar, não há nenhum experimento mecânico pelo qual você poderia provar que está se movendo. (Claro que estamos supondo uma viagem sem curvas,^g sons ou outros indícios de movimento). Se você atirasse uma bola no ar exatamente para cima dentro do trem, ela voltaria a cair em linha reta — quer o trem estivesse em movimento ou parado. Einstein desenvolveu essa ideia. Mostrou que não só somos incapazes de detectar o movimento do trem por meios mecânicos, como nos é impossível detectá-lo por qualquer outro experimento. A teoria especial da relatividade nos diz que não é possível medir o movimento uniforme de nenhuma maneira absoluta.

Tome, por exemplo, o caso de duas naves espaciais movendo-se uma em direção à outra

em velocidade uniforme. Nenhum meio permitiria aos astronautas em qualquer das naves determinar: (1) se sua nave está imóvel com a outra investindo contra eles, (2) se sua nave está avançando velozmente enquanto a outra está imóvel, ou (3) se as duas naves estão se movendo. Nenhum experimento com a luz ou com qualquer fenômeno elétrico ou magnético seria capaz de provar que qualquer dessas três opções é melhor que as outras duas.

Consideremos agora o que a relatividade do movimento pode nos dizer sobre a relatividade do tempo. Vimos como observadores diferem em suas estimativas do momento de ocorrência de um evento (como os raios ou as luzes de nossos exemplos anteriores), e que cada observação é tão “verdadeira” quanto as outras. O tempo, em outras palavras, é relativo ao sistema de referência do observador.

DILATAÇÃO DO TEMPO

Tendo demonstrado a relatividade do tempo, Einstein foi ainda mais longe e desafiou nossa imaginação com a ideia de dilatação do tempo. Previu que o tempo tal como marcado pelos relógios seria afetado pelo movimento e pela gravidade. Segundo o efeito de dilatação do tempo, os ponteiros de um relógio em movimento avançarão mais lentamente que os de um relógio imóvel.^h

Hoje, os guardiães mundiais do tempo oficial utilizam relógios atômicos de alta precisão baseados nas emissões de micro-ondas de césio 133. Esses aparelhos medem o tempo com precisão de um milionésimo de segundo por dia. Dispondo de instrumentos precisos, o mundo deveria ter um padrão absoluto pelo qual medir o tempo, certo? Errado. Mesmo com essas medidas tão sofisticadas, nenhum tempo absoluto pode ser determinado. Einstein não tinha conhecimento de relógios atômicos quando postulou sua teoria especial da relatividade, mas compreendera que há na marcação do tempo variações inerentes ligadas ao movimento.

As ideias de Einstein sobre a marcação do tempo foram confirmadas por um experimento realizado em 1971. Relógios de césio foram embarcados em dois aviões a jato que dariam a volta à Terra, um rumando para leste e o outro para oeste. No início e no fim das viagens, os relógios foram comparados com um relógio de referência do Observatório Naval dos EUA em Washington. No término do experimento, os relógios não coincidiam mais quanto à hora do dia. O relógio enviado para o leste perdera uma média de 59 nanossegundos (bilionésimos de segundos) em relação ao relógio de referência, e o enviado para oeste ganhara 273 nanossegundos. Esses resultados se aproximavam muito dos números previstos pelo cientista que conduziu o experimento. Posteriormente, outros exemplos confirmaram esse fenômeno com precisão ainda maior.

Segundo Einstein, a relatividade permite que eventos ocorram mais lentamente para um observador que para outro, até mesmo os eventos da vida, como o envelhecimento. O efeito do movimento de alta velocidade sobre o tempo conduziu ao famoso “paradoxo dos gêmeos”. Nesse exemplo teórico, um astronauta deixa seu irmão gêmeo na Terra e parte em alta velocidade para uma longa jornada rumo a astros distantes. Quando volta para casa, vê que o irmão é um ancião, ao passo que ele próprio está na flor da idade. Os relógios do astronauta — o atômico e o biológico — haviam registrado menos horas e anos que os relógios da Terra.

Outro exemplo do mesmo fenômeno é o “paradoxo do relógio”. Imagina-se que uma espaçonave tripulada está fazendo uma viagem interestelar para Arcturo, uma estrela de primeira grandeza a 33 anos-luz da Terra. Caso se desloque numa velocidade próxima à da luz (coisa só possível em ficção científica), a nave chegará às vizinhanças de Arcturo pouco mais de 33 anos após ter sido lançada, pelo tempo da Terra. Se voltar imediatamente, terão se passado cerca de 66 anos, pelo tempo da Terra. Como a nave se deslocou em alta velocidade relativamente à Terra, todos os processos a bordo tornaram-se mais lentos. Para a tripulação, a viagem de ida e volta a Arcturo não pareceria ter levado 66 anos. Para eles, essa jornada teria durado somente um dia. Quando a tripulação saísse da nave, de volta à Terra, descobriria que suas esposas, que eram jovens quando da partida, estavam agora 66 anos mais velhas ou haviam morrido. Alguns membros da tripulação veriam seus filhos e filhas cerca de 66 anos mais velhos, com mais idade que eles. Não espanta que os paradoxos dos gêmeos e o do relógio tenham gerado mais perplexidade e controvérsia que quaisquer outras ideias da teoria da relatividade.

Por mais absurdas que essas ideias possam parecer, o tempo relativístico de Einstein foi comprovado experimentalmente. Para testar o paradoxo dos gêmeos, os cientistas precisavam de um objeto com um período de vida curto, que pudesse ser medido com precisão. O experimento tentaria então prolongar esse período de vida por meio de uma viagem em alta velocidade. O mundo subatômico das partículas físicas forneceu o objeto. Muitas partículas subatômicas são instáveis, têm uma obsolescência incorporada e se desintegram após um tempo de vida fixado pela natureza. Os múons, primos mais pesados do elétron, revelaram-se um exemplo conveniente. Eles se desintegram em elétronsⁱ após um período de vida de dois milionésimos de segundo. Um experimento envolvendo a longevidade do múon foi conduzido no CERN, o imenso acelerador de alta energia próximo de Genebra, na Suíça. Nesse experimento, múons foram acelerados a 99,4% da velocidade da luz, enquanto se deslocavam numa órbita de 14 metros de diâmetro. Se os múons não fossem afetados pela alta velocidade, um múon típico faria de 14 a 15 viagens em torno do anel antes que sua vida de dois microssegundos expirasse. No experimento do CERN, uma partícula típica deslocando-se em velocidades próximas à da luz sobreviveu por tempo suficiente para fazer mais do que 400 órbitas. Sua vida fora ampliada quase 30 vezes, confirmando a teoria de Einstein.

CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO EM ALTAS VELOCIDADES

Essa parte da teoria de Einstein declara que caso um objeto se deslocasse numa velocidade próxima à da luz, ele pareceria para um observador fixo^k estar encurtando na direção do movimento. Em outras palavras, uma régua de um metro que se movesse numa velocidade próxima à da luz pareceria ter menos de 100 centímetros de comprimento. A *contração do comprimento* é mais um fenômeno relativístico que pode ser demonstrado por uma experiência de pensamento e comprovado no laboratório.

AUMENTO DA MASSA COM A VELOCIDADE

Einstein propôs uma outra teoria de difícil compreensão. Em velocidades próximas à da luz, não só o tempo se torna mais lento como a massa aumenta — um corpo em movimento tem sua massa aumentada à medida que sua velocidade aumenta até que, na velocidade da luz, a massa se torna infinita. A concepção de *massa que aumenta com a velocidade* foi igualmente bem demonstrada em aceleradores de partículas. À medida que as partículas se movem mais rapidamente, sua massa aumenta. De fato, a teoria é confirmada toda vez que um acelerador propulSIONA partículas a altíssimas velocidades. No acelerador linear de Stanford em Palo Alto, Califórnia, aceleram-se partículas a velocidades próximas à da luz nos primeiros centímetros da trajetória de 3,2 quilômetros. Durante esse processo, elas ganham energia e massa detectáveis mas, é claro, não têm sua velocidade mais aumentada.

Se tudo isso é verdade, você pode se perguntar, por que a massa de um automóvel não aumenta quando pisamos no acelerador? A resposta é que o efeito da massa aumentada só é relevante para objetos que se movam em velocidades próximas à da luz. A 90 quilômetros por hora (1,5 quilômetros por minuto), seu carro está andando, comparativamente à velocidade da luz, como uma lesma, e a mudança na massa é indetectável.

Em baixas velocidades, as leis do movimento permanecem quase exatamente como Isaac Newton as especificou. No que diz respeito à alta velocidade, porém, o universo pertence a Einstein. Nas palavras do matemático Herman Minkowski, “Doravante, o espaço por si só e o tempo por si só estão condenados a desvanecer gradualmente até se reduzirem a meras sombras, e apenas alguma espécie de união dos dois preservará uma realidade independente”.

“ $E = mc^2$ ”

Em seu artigo de 1905 sobre a relatividade, Einstein incluiu uma espécie de nota de rodapé matemática à teoria especial. Nesse texto, Einstein estabeleceu a relação entre massa e energia e forneceu uma fórmula para a quantificação dessa relação — a energia (E) de uma quantidade de matéria com determinada massa (m) é igual ao produto da massa pelo quadrado da velocidade da luz (c). Essa fórmula é geralmente expressa como $E = mc^2$. Quando essa ideia foi finalmente compreendida, ficou claro que uma pequena quantidade de massa continha enorme quantidade de energia. Em essência, massa é energia imobilizada. Os contemporâneos de Einstein questionaram essa teoria. “Você quer dizer”, perguntaram-lhe, “que há mais energia num pequeno bloco de chumbo, por exemplo, do que numa grande mina de carvão?” “Sim”, ele respondeu, “mas isso é apenas teoria, já que não há nenhum meio de utilizar essa energia, a menos que se conseguisse dividir o átomo e isso, como todos sabemos, é impossível.”

Einstein sabia que se fosse possível liberar essa energia lentamente, de uma maneira controlada, o mundo teria uma nova fonte de energia. Sabia também que se fosse possível liberar a energia subitamente, o mundo teria uma nova arma de potencial aterrador. Mas estava-se em 1905 e os potenciais, tanto o benigno quanto o mortífero, implicados pela equação de Einstein, embora teoricamente possíveis, estavam muito longe de ser tecnicamente realizáveis. Hoje, pensa-se na fórmula $E = mc^2$ sobretudo em ligação com a bomba atômica. De fato, com isso deixa-se escapar o principal impacto dessa famosa equação. Ela é uma explicação matemática para o brilho do Sol e de outras estrelas. É a fórmula para a fonte de energia da maior parte do universo. $E = mc^2$ foi uma notável reflexão posterior a ser anexada

à teoria especial da relatividade.

Hoje, é claro, o artigo que Einstein publicou em 1905 é aceito como uma enunciação do fato de ser a relatividade uma realidade, e não apenas uma teoria. A relatividade especial é tão fundamental para a ciência contemporânea quanto a existência de átomos.

APÓS A PUBLICAÇÃO DA TEORIA ESPECIAL DA RELATIVIDADE

As notícias sobre o trabalho de Einstein se espalharam muito lentamente pelas universidades do mundo. Einstein continuou trabalhando no departamento de patentes até 1909. Recebera vários aumentos salariais e agora sua posição era segura. Seu interesse, contudo, estava no mundo acadêmico da física teórica e quando lhe ofereceram o cargo de professor associado de física na Universidade de Zurique, aceitou prontamente.

De Zurique, Einstein transferiu-se para a Universidade de Praga onde lhe foi oferecido o cargo de professor titular e pouco depois, no inverno de 1912, retornou a Zurique, para ocupar um cargo na Politécnica. Os colegas se lembram dele nessa época como um homem feliz, encantado com os filhos, Hans Albert e Eduard. Em 1914, Einstein foi convidado para um cargo na Academia Prussiana, em Berlim, uma posição que lhe permitiria continuar suas investigações, exigindo apenas que fizesse preleções ocasionais na Universidade de Berlim. Aceitou e, apesar da guerra iminente, a família se mudou para Berlim. Mileva, contudo, não suportou morar ali. Como vinha experimentando dificuldades no casamento havia algum tempo, ela deixou Einstein, pegou os filhos e voltou com eles para a Suíça. Alguns anos depois, essa separação forçada levou ao divórcio.

Com a deflagração da Primeira Guerra Mundial, Einstein tornou-se um crítico franco do militarismo alemão. Nessa época era um pacifista e pensava que nenhuma guerra se justificava. (Modificou essas ideias em 1930, quando concluiu, com relutância, que era preciso deter Adolf Hitler.) Em 1916, em Berlim, juntou-se a movimentos contra a guerra e distribuiu panfletos nas esquinas. Sua nacionalidade suíça o protegia da retaliação oficial por essas ações. Durante esse tempo, ocupou-se fundamentalmente em aperfeiçoar sua teoria geral da relatividade, que publicou finalmente em 1916, em *Annalen der Physik*, sob o título “O fundamento da teoria geral da relatividade”. Ela foi denominada *geral* por ser uma generalização (ou extensão) da teoria especial. A teoria geral é considerada pelos historiadores da ciência um feito muito maior que a teoria especial, por monumental que esta fosse. No curto documento de 60 páginas, Einstein postulou que a gravidade não é uma força, como Newton dissera, e sim um campo curvo no contínuo espaço-tempo, criado pela presença de massa. Compreender o que exatamente ele quis dizer com isso pode ser um desafio, mas é possível.

A TEORIA GERAL DA RELATIVIDADE

Durante muitos anos, a teoria geral da relatividade foi vista como excessivamente opaca e

difícil mesmo para a maior parte dos cientistas, que dirá para nós outros. No entanto, no nível não matemático em que vou discuti-la aqui, sugiro que essa atitude é injustificada. Sugiro ainda que alguns episódios na história do empreendimento científico são de suma importância para nossa herança cultural. Em vez de objetos de arte, pinturas, escultura ou música, Einstein nos deixou ideias e conceitos científicos. Esses foram o legado que nos transmitiu e ignorá-los porque nos parecem complexos seria o mesmo que ignorar uma pintura de Michelangelo ou um concerto de Mozart.

Einstein demonstrou suas teorias matematicamente, mas, se quisermos, podemos nos concentrar nas ideias que formam a base da teoria, fiando-nos no que ele mesmo disse sobre as provas matemáticas (e, é claro, no que disseram muitos dos físicos que, ao longo dos anos, confirmaram seus números).

O que Einstein estava tentando fazer era gerar uma teoria da gravitação que se harmonizasse com a teoria especial da relatividade que ele desenvolvera em 1905. Nesse esforço, concebeu a ideia de que quando algo está em queda livre, tudo em seu interior parece sem peso. Por exemplo, quando o ônibus espacial em órbita está em queda livre na gravidade da Terra, os astronautas dentro dele se sentem sem peso. Na verdade, os astronautas pesam o que sempre pesaram, mas, como as leis que governam sua queda e a do ônibus espacial são as mesmas, eles parecem estar flutuando de um lado para outro dentro da cabine. Não estão caindo *em relação ao ônibus espacial*.

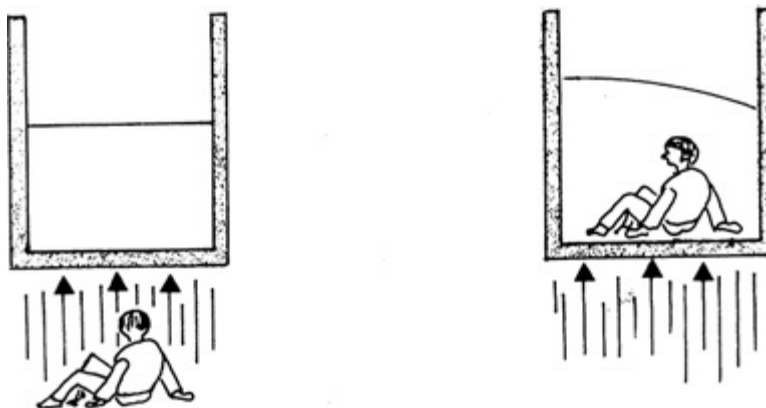
Que acontece em uma espaçonave que está se acelerando? Os motores estão ligados e gerando um empuxo, de tal modo que a nave não está mais despencando em queda livre. Se a nave estiver se acelerando à taxa de $1g$ (uma vez a aceleração da gravidade), um astronauta será capaz de ficar de pé no piso da nave e sentirá seu peso normal. Além disso, um objeto que ele solte vai cair em direção ao piso. Isso ocorre porque a nave está em aceleração para cima e, na verdade, o objeto está sendo deixado para trás.

Tudo isto é lógico e fácil de entender. Mas em seguida Einstein deu um salto intelectual criativo. Comparou a situação da espaçonave em aceleração com a de outra semelhante em repouso na superfície da Terra. Mostrou então que tudo se passa da mesma maneira. Os pés do astronauta estariam calcados sobre o piso, um objeto largado cairia em direção ao piso com uma aceleração de $1g$. De fato, se o astronauta não tivesse meios de olhar para fora, não teria como distinguir uma espaçonave pousada na Terra de uma em aceleração no espaço livre. Segundo Einstein, não se poderia realizar nenhum experimento nem fazer nenhuma medição capazes de revelar a diferença (pelo menos se esses experimentos ou medições fossem confinados ao interior da espaçonave). Expressa com precisão matemática, como o é na teoria geral da relatividade, essa ideia é o *princípio da equivalência* de Einstein.

Einstein concluiu que a razão por que gravidade e inércia (aqui usado no sentido de *estado de repouso*) parecem a mesma coisa é que *são* a mesma coisa. Vamos retornar ao elevador de Einstein, acelerando-se para cima no espaço numa taxa constante. Que faria um feixe de luz nesse elevador? Para um observador externo, ele cruzaria a cabine do elevador numa linha reta. Dentro dessa mesma cabine, porém, o feixe de luz pareceria curvar-se para baixo, porque o elevador está se acelerando para cima, afastando-se dele. Einstein concluiu que se as coisas em nosso elevador em aceleração se passam como num elevador em repouso num campo gravitacional, também a luz deve se curvar num campo gravitacional. Prosseguindo a partir dessa equivalência, Einstein concluiu que o espaço-tempo deve ser curvo.

ESPAÇO CURVO

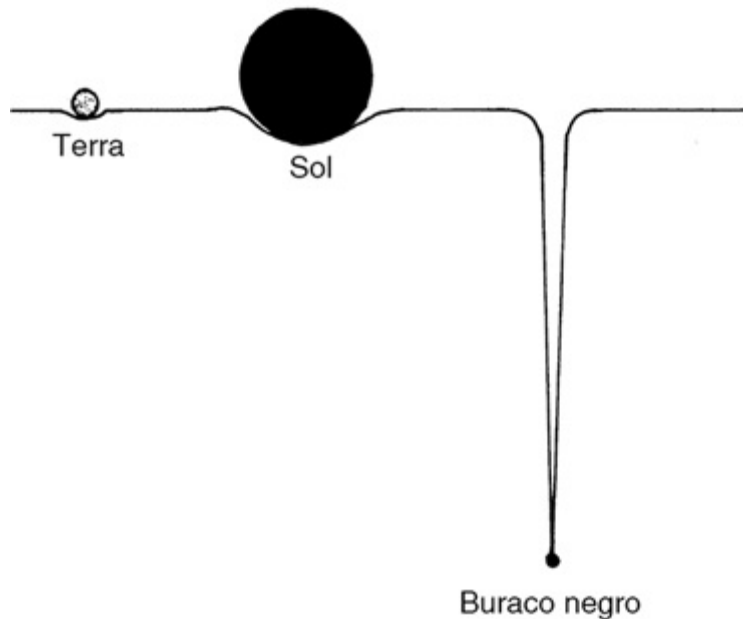
O espaço curvo não é de fato um conceito tão difícil quanto a princípio parece. Afinal de contas, a Terra é um globo esférico, em que a menor distância entre dois pontos não é uma linha reta como na velha geometria euclidiana de um mundo plano. Num globo, duas linhas paralelas (linhas longitudinais, por exemplo) podem se reunir e se encontrar (nos polos). Sabemos que a Terra parece plana em pequena escala, mas é de fato curva em grande escala. Na superfície de um globo, a menor distância entre dois pontos é o arco de um círculo máximo. Se, usando um globo, esticarmos um cordão, retesando-o tanto quanto possível, de São Francisco até Londres, ele descreverá o arco de um círculo máximo.



COMPORTAMENTO DE UM FEIXE DE LUZ NUM ELEVADOR EM ACELERAÇÃO NO ESPAÇO Para um observador externo, o feixe de luz aparece como uma linha reta. Para um observador que está dentro do elevador em aceleração, o feixe parece curvar-se para baixo.

Para nos ajudar a pensar sobre o espaço curvo, podemos imaginar uma membrana de borracha esticada e firmemente segura nas bordas. Se um objeto pesado, como uma bola de boliche, for posto sobre a membrana, formará uma depressão na área do peso. Se imaginarmos agora rolar uma bola de gude sobre a membrana, veremos que a trajetória dela tende a se curvar em direção à depressão. Podemos pensar na grande membrana de borracha como uma rede de acrobatas e supor que os pesos que usamos são estrelas, planetas ou buracos negros. Esta não é uma má imagem do espaço curvo, mas não mostra a redução da marcha do tempo.

A curvatura do espaço é tão pequena que seus efeitos são imperceptíveis exceto em distâncias relativamente longas. Ao percorrer a distância de Nova York a Los Angeles, um feixe de luz se curva apenas cerca de um milímetro por causa da curvatura do espaço induzida pela massa da Terra. Numa distância muito maior, porém, a curvatura é mais mensurável. Quando a supernova de 1987 foi detectada, cientistas calcularam que a pequena curvatura sofrida pela supernova enquanto se deslocava através da Via Láctea para alcançar a Terra era suficiente para retardar sua chegada em cerca de nove meses. Não fosse a curvatura do espaço, a supernova de 1987 teria sido visível a partir da Terra em 1986.



O ESPAÇO CURVO DE EINSTEIN Imagine uma membrana de borracha com as bordas bem esticadas. Se objetos como uma bola de beisebol ou de boliche forem postos sobre ela, formarão uma depressão relativa a seu peso.

SUMÁRIO DA TEORIA GERAL DA RELATIVIDADE

A essência do que Einstein mostrou na teoria geral é: primeiro, *gravidade e inércia* são duas palavras diferentes para a mesma coisa (o princípio da equivalência). Segundo, quando se pensa sobre o espaço, é preciso considerar quatro dimensões: comprimento, largura, altura e tempo. O tempo é a quarta dimensão e todo evento que tem lugar no universo é um evento que ocorre num mundo quadridimensional de espaço-tempo. Terceiro, o espaço-tempo é curvado pela presença de massas grandes como o Sol. Essa curvatura é o campo gravitacional. Um planeta, como a Terra, que se move em torno do Sol desloca-se numa órbita elíptica não porque é “puxado” pelo Sol, mas porque o campo (a depressão criada no espaço pela massa do Sol) é tal que uma elipse é o caminho mais curto possível que ele pode tomar no espaço-tempo.

EINSTEIN “VERSUS” NEWTON

De maneira geral, as equações formuladas por Einstein para definir a gravidade deram

resultados concordantes com a mecânica de Newton. No entanto, houve diferenças. Três discrepâncias assinaladas primeiro por Einstein foram experimentalmente confirmadas: (1) A órbita de Mercúrio não é uma elipse fixa. (2) A luz estelar que passa nas proximidades do Sol é defletida duas vezes mais que o previsto pela mecânica newtoniana.¹ (3) As marchas dos relógios dependem de sua localização num campo gravitacional. Como Richard Feynman gostava de ressaltar em suas palestras sobre física no Caltech.^m: “Sempre que se constatou que as previsões de Einstein diferiam das ideias da mecânica newtoniana, a Natureza escolheu Einstein.”

UNIVERSO EM EXPANSÃO, **BIG-BANG** E BURACOS NEGROS

Quase imediatamente após completar as equações de campo que confirmavam seus conceitos, Einstein percebeu que seus cálculos mostravam que o universo devia estar se expandindo. Como não acreditava totalmente nos próprios números — cabe lembrar que isso ocorreu cerca de 12 anos antes que o astrônomo americano Edwin P. Hubble e outros provassem o fato da expansão do universo — Einstein acrescentou um arredondamento monumental, sua constante cosmológica, para forçar os números a se conformarem a um universo estático. Mais tarde lamentou essa manipulação matemática — “foi a maior estupidez da minha vida”, disse.

Em 1922 o matemático russo Alexander Friedmann, ao resolver as equações cosmológicas de Einstein, percebeu que a expansão indicada pela fórmula deste implicava necessariamente uma explosão no início do tempo. A solução de Friedmann foi redescoberta em 1929 pelo padre Georges Lemaître e por George Gamow. Eles postularam a teoria de que o universo começou como um grumo superdenso de matéria que, por razões desconhecidas, explodiu, arremessando pelo espaço o material que se transformou nas estrelas e galáxias. Mais tarde Gamow batizou a teoria de o “Big-Bang”.

Outra teoria que emergiu diretamente das consequências das equações cosmológicas de Einstein foi a concepção de *buracos negros*. Mal se passara um ano da publicação da teoria geral, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild propôs uma explicação das equações de Einstein que levou ao que hoje é conhecido como a solução do buraco negro. Outros refinamentos foram feitos ao longo dos anos (por J. Robert Oppenheimer, Hartland Snyder e John Wheeler), mas a ideia do buraco negro remonta a Einstein e Schwarzschild.

COLAPSO NERVOSO

Além da teoria geral, Einstein publicou dois outros importantes artigos em 1917. Um deles tratava da emissão estimulada de luz, uma concepção que no devido tempo iria fornecer a base para os *lasers*. O segundo artigo tratava da estrutura do universo e é geralmente considerado a base da cosmologia moderna. O exercício de todo esse esforço intelectual ao longo de um curto tempo teve um preço. Como Newton e Maxwell antes dele, Einstein sofreu um colapso nervoso em decorrência do seu árduo trabalho intelectual. Sua saúde física também estava

precária e essa fase se prolongou por vários anos. Seus males físicos incluíam uma úlcera de estômago que foi um problema pelo resto de sua vida. No plano mental, o colapso foi breve e enquanto sua debilidade física perdurava Einstein foi notavelmente produtivo.

SEGUNDO CASAMENTO

Com a ajuda de Elsa Einstein Lowenthal, sua prima em segundo grau, Einstein recobrou lentamente a saúde. Ele se mudara para um apartamento ao lado do dela em Berlim e a prima cuidava de sua casa, preparando todas as suas refeições e cuidando dele de maneira geral. Os dois primos, que sempre haviam gostado um do outro, uniram-se muito. Em 1919, Albert, com seus 40 anos, e Elsa, com 43, se casaram. Embora fosse durar até 1936, quando Elsa morreu, esse casamento não foi nem particularmente afetuoso, nem especialmente feliz. Já se disse que a principal razão que levou Einstein a se casar com a prima foi a conveniência de ter suas camisas lavadas em casa. Elsa, de sua parte, gostava de ser a esposa de um grande homem. Cuidar de Albert e se deliciar com a fama dele eram seus prazeres. Albert, de sua parte, gostava que cuidassem dele e adorava as muitas festas realizadas em seu apartamento. Ao que parece, porém, Einstein não era um homem de fácil convívio e nem tudo era harmonioso. Muitos anos mais tarde, escrevendo para a família de Michele Besso, um amigo da vida inteira que acabara de morrer, Einstein disse: “O que eu mais admirava nele como ser humano era o fato de conseguir viver por muitos anos não só em paz mas também em permanente harmonia com uma mulher — um esforço em que fracassei duas vezes de maneira bastante vergonhosa.”

Provavelmente a principal razão porque era difícil viver com Einstein era sua paixão pelo trabalho. Possuía notável capacidade de concentração e era capaz de trabalhar continuamente por várias horas ou mesmo dias sobre o mesmo problema. Alguns dos tópicos que o interessavam permaneciam na sua mente durante décadas. Para relaxar, voltava-se frequentemente para a música e a navegação à vela, mas mesmo nesses momentos sua mente estava trabalhando. Sempre levava uma caderneta no bolso para anotar qualquer ideia que lhe ocorresse. Segundo Elsa contou, Einstein costumava descer para a sala, tocar algumas notas no piano, parar para fazer alguma anotação e em seguida retornar ao seu gabinete. Sua reputação de distraído não é puro mito. Sua mulher contou que muitas vezes o agasalhava com seu sobretudo e o deixava no vestíbulo, só para encontrá-lo lá parado meia hora depois, perdido em pensamentos.

Discutindo seus processos de pensamento ao desenvolver os princípios da relatividade, Einstein disse: “Por que cargas d’água fui eu que desenvolvi a teoria da relatividade? A razão, eu acho, é que um adulto normal nunca para para pensar sobre problemas de espaço e tempo. Essas são coisas em que pensou quando criança. Mas meu desenvolvimento intelectual foi retardado e, em consequência, só comecei a especular sobre espaço e tempo depois de grande. Naturalmente, vou mais fundo no problema que uma criança com capacidades normais.”

Embora a teoria geral da relatividade tenha sido publicada em 1916, despertando a atenção e o respeito do mundo dos físicos, Einstein só veio a conquistar o aplauso internacional em 1919, quando a Royal Society de Londres anunciou que organizaria uma expedição científica para testar uma das teorias de Einstein sob condições de eclipse. Einstein previra que a luz estelar que roçasse o Sol seria desviada pela gravidade do Sol em grau maior que o previsto pela física newtoniana. Um eclipse solar total iria ocorrer no dia 29 de maio de 1919, e durante sua ocorrência o Sol estaria posicionado contra as estrelas brilhantes do aglomerado das Híadas. O astrônomo inglês Arthur Stanley Eddington liderou uma expedição à ilha do Príncipe, ao largo da África ocidental, para observar o eclipse. Um segundo conjunto de observações foi feito a partir de Sobral, Brasil. Os resultados da expedição de Eddington confirmariam ou refutariam uma ideia fundamental da teoria de Einstein e cientistas espalhados pelo mundo inteiro esperavam os resultados com considerável expectativa.

Houvera uma confirmação prévia da teoria geral quando Einstein observara um fenômeno em relação ao qual a relatividade em geral funcionava melhor que a teoria de Newton. Físicos e astrônomos haviam ficado intrigados pelo movimento de Mercúrio em torno do Sol. A física newtoniana previa que o ponto de máxima aproximação entre Mercúrio e o Sol (seu *periélio*) mudaria a cada ano de Mercúrio.ⁿ Observações constataram que a atração da gravidade exercida por outros planetas estava movendo o periélio de Mercúrio, mas num grau intrigantemente maior do que o previsto pela teoria newtoniana. No curso de seu trabalho sobre a teoria geral, Einstein havia calculado o quanto o periélio de Mercúrio mudaria se o espaço-tempo fosse curvo. A resposta correspondia exatamente às observações e Einstein verificou que estava na trilha certa. Mas esse fora um caso em que primeiro vieram as observações, depois a confirmação matemática. O verdadeiro teste da teoria de Einstein seriam as observações feitas pelos astrônomos de Eddington.

É interessante comparar os comportamentos de Max Planck, o pai da física quântica, e de Albert Einstein na véspera do experimento do eclipse. Planck passou a noite toda em claro para saber se os resultados da expedição confirmariam as previsões de Einstein sobre o grau em que a luz se desviaria ao passar pelo Sol. Einstein, por outro lado, foi para a cama. Ele *sabia* que estava certo. Sobre seu grande amigo Max Planck, ele disse: “Se ele tivesse realmente compreendido como a teoria geral da relatividade explica a equivalência de massa inercial e gravitacional, teria ido se deitar como eu fui.”

No caso, a equipe britânica constatou que o grau de curvatura da luz foi exatamente o previsto por Einstein. Quando Einstein recebeu um telegrama anunciando o resultado positivo da expedição Eddington, um estudante para quem ele o mostrou lhe perguntou: “O que você teria dito se nada tivesse sido confirmado?” “Eu teria sido obrigado a me apiedar do nosso amado Senhor”, respondeu Einstein. “A teoria está correta.”^o

Em 1920, os sinais de perigo para Einstein na Alemanha eram evidentes. Ocorreu um

distúrbio durante uma de suas preleções na Universidade de Berlim, quando um grupo de estudantes nazistas interrompeu sua fala. Einstein tentou minimizar isso, dizendo que não houvera expressões de antissemitismo. Esse foi apenas o primeiro episódio de uma campanha anti-Einstein cada vez mais intensa movida pelo crescente partido nazista na Alemanha. Seu trabalho acabaria sendo condenado pelo partido como “física judia” e qualquer cientista alemão que mostrasse qualquer nível de compreensão ou aceitação das teorias da relatividade punha em risco, no mínimo, sua carreira acadêmica. Nessa altura, foi publicado na Alemanha um livro com o título *Cem cientistas contra Einstein*. O sempre confiante Einstein reagiu rindo e dizendo: “Se eu estivesse errado, bastaria um.”

Agora mundialmente famoso, Einstein era muito solicitado para aparições públicas, conferências e artigos sobre qualquer assunto sobre o qual se dispusesse a escrever. Viajou por toda a Europa durante esse período para falar sobre relatividade, geralmente chegando num vagão de trem de terceira classe, um violino debaixo do braço. Recusava muitos desses convites porque continuava interessado em fazer novos trabalhos em física. No entanto, não deixou de se envolver no movimento sionista, destinado a fundar uma nação judaica na Palestina e emprestou seu nome para atividades de levantamento de fundos para o pretendido estado judeu. Como parte desse esforço, visitou os Estados Unidos em 1921 juntamente com Chaim Weizmann, um colega cientista que mais tarde seria o primeiro presidente de Israel. Nessa viagem, todos os políticos ou celebridades nos Estados Unidos queriam ser fotografados ao lado de Einstein. Ao desembarcar na Europa após atravessar o Atlântico com Einstein, Chaim Weizmann disse aos repórteres: “Durante a viagem, Einstein ficou explicando sua teoria da relatividade para mim, vezes sem conta, e agora acredito que ele a compreendeu completamente.”

PRÊMIO NOBEL

Logo após a confirmação da teoria geral veio o Prêmio Nobel de Física de 1921. De fato o prêmio só foi concedido a Einstein em 1922 e, então, não pelas teorias da relatividade mas por suas contribuições à física matemática e especialmente por sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico. Pensou-se na época que o comitê do Nobel não conseguiu perceber como a teoria da relatividade havia melhorado a condição da humanidade, algo especificado por Alfred Nobel como condição para o prêmio. A reação de Einstein a essa honra é digna de interesse. Ele nem sequer a mencionou em seu diário ou em qualquer carta aos amigos. Alguns anos mais tarde, chegou a se esquecer de incluí-lo em uma lista das honrarias que recebera. Não é que não tivesse esperado o prêmio. Sabia que acabaria por ganhá-lo. Na verdade, ao se divorciar da primeira mulher, Mileva, prometera-lhe o dinheiro do Prêmio Nobel como pensão.

O GRANDE DEBATE

No início da década de 1920, Einstein conheceu Niels Bohr, o destacado físico dinamarquês.

Nessa ocasião, deram início ao seu grande debate sobre as implicações da teoria quântica — uma controvérsia que iria perdurar pelas três décadas seguintes. Ela seria um dos mais importantes diálogos científicos do século XX, embora a questão fosse mais filosófica que científica. Bohr acreditava num universo “probabilístico”, em que o acaso desempenha um papel na ocorrência dos eventos. Isso ofendia o senso de ordem de Einstein e contrariava suas crenças num universo “determinístico”, evidenciadas por suas tão profusamente citadas palavras: “Deus não joga dados com o universo.” Hoje a maioria dos físicos está de acordo com Bohr, mas Einstein nunca se convenceu.

Em 1927, durante uma visita aos Estados Unidos, Einstein compareceu a uma conferência no Observatório de Mount Wilson na Califórnia. Ali, o físico belga Abbé George Lemaître apresentou, pela primeira vez a uma prestigiosa audiência científica, sua teoria de um universo em expansão que se iniciara na explosão de um átomo primordial (hoje conhecida como teoria do Big-Bang). Einstein levantou-se de um pulo, aplaudindo. Declarou que aquela fora a mais bela e satisfatória explanação da criação que jamais ouvira e apressou-se em ir apertar a mão de Lemaître. Como se assinalou anteriormente, a teoria de Lemaître era um resultado direto das equações do campo cosmológico, formuladas por Einstein em 1917.

O ano do cinquentenário de Einstein, 1929, marcou o início de alguns reveses para o grande cientista. O primeiro artigo que publicara sobre uma teoria unificada de campo não fora bem recebido. Isso não o aborrecia excessivamente porque o considerava um trabalho preliminar e estava pronto para “voltar à prancheta”. O que realmente aborrecia Einstein era uma tendência ameaçadora nas questões mundiais. Ataques árabes a colonos judeus na Palestina, a crescente força dos nazistas na Alemanha, o enfraquecimento da Liga das Nações (que levou Einstein a abandonar seu Comitê para a Cooperação Intelectual em protesto contra sua timidez), a quebra da bolsa de valores nos Estados Unidos — tudo isso pressagiava uma crise de amplitude mundial. Mais importante no plano pessoal foi o colapso mental do filho mais novo, Eduard. O filho de Einstein estava sofrendo de uma esquizofrenia paranoide que duraria pela vida inteira. Mileva teve as últimas décadas de sua vida moldadas em grande parte por esse fato trágico, cuidando do filho e tomando providências especiais para ele. Eduard Einstein adorara o pai a distância, mas agora o acusava por tê-lo abandonado quando menino. O sofrimento de Einstein diante desse triste evento foi amenizado, ainda que só ligeiramente, por sua boa relação com o filho mais velho, Hans Albert.

A CHEGADA DOS NAZISTAS

Tendo permanecido na Alemanha até 1933, quando Hitler chegou ao poder, Einstein recebeu muitas ameaças de morte e foi frequentemente difamado em encontros encenados de cientistas “arianos” que rivalizavam-se na denúncia das “falhas fundamentais da teoria da relatividade”. Einstein considerou esses desvarios antissemitas lamentáveis do ponto de vista da ciência, mas reconheceu que se tornara um foco do ódio nazista e que chegara a hora de deixar a Alemanha para sempre. Pouco depois que partiu, os camisas-parda nazistas invadiram a casa de veraneio de Einstein, anunciando estar à procura de armas. Quando lhe contaram isso depois, Einstein, que nunca tivera uma arma na vida, achou graça. Como ele sabia muito bem,

e os nazistas não, suas ideias não estavam escondidas debaixo da cama. Mais tarde os nazistas declararam Einstein inimigo público, oferecendo um prêmio de 20.000 marcos por sua cabeça; sua casa e pertences foram confiscados.

Einstein não se enganava quanto ao perigo que Hitler representava e a ascensão do nazismo na Alemanha o fez mudar suas ideias políticas do pacifismo absoluto para uma aprovação condicional de guerras defensivas. Essa mudança filosófica pôs em dificuldades seus defensores pacifistas, que o acusaram de violar seus ideais.

MUDANÇA PARA OS ESTADOS UNIDOS

Perto do final de 1933, Einstein aceitou um cargo no Instituto de Estudos Avançados em Princeton, Nova Jersey. Com Elsa e uma assistente chamada Helen Dukas, que começara a trabalhar para ele em 1928, mudou-se para os Estados Unidos. À época em que chegou a Princeton, era um homem visivelmente envelhecido. Era como se alguma coisa tivesse morrido dentro dele. Não ria mais. Os problemas, pessoais e mundiais, haviam cobrado seu preço.

Afora algumas viagens pelos Estados Unidos, Einstein permaneceu em Princeton até sua morte em 1955. Seus 22 anos de trabalho em Princeton envolveram a busca de uma estrutura matemática capaz de unir o eletromagnetismo e a gravitação — a chamada “teoria unificada de campo”. Einstein recebeu algumas críticas por ter passado 22 anos trabalhando num problema para o qual nunca encontrou uma solução. A meu ver, essa crítica revela falta de compreensão do esforço científico. A essência da ciência não é simplesmente encontrar respostas, mas fazer perguntas. Hoje, uma grande escola de pensamento está reavaliando a grande investigação de Einstein. É possível que ele estivesse envolvido em algo importante, talvez a maior investigação filosófica de todos os tempos. O consenso atual entre os cientistas é que Einstein estava no caminho certo, mas teria cometido erros capitais com base no que se sabia então sobre a força nuclear.

A vida de Einstein em Princeton foi tranquila e em sua maior parte rotineira. Morava com a mulher (e, depois que ela morreu, com a irmã Maja) numa casa simples, de dois andares. Quase todas as manhãs, caminhava até o instituto. Nunca teve um carro. (Também nunca teve uma televisão, o que pode lhe ter dado uma vantagem injusta sobre nós outros em se tratando de reflexão constante acerca de árduos problemas teóricos.) No instituto, trabalhava em sua teoria unificada de campo, conversava com os colegas e mantinha uma correspondência de âmbito mundial sobre questões tanto científicas quanto políticas. Desde que suas necessidades imediatas estivessem atendidas, não parecia se importar muito com dinheiro. Seu salário no instituto era modesto e ele nunca escreveu um best-seller explicando suas teorias. Em suma, nunca capitalizou a própria celebridade. Para se divertir, tocava violino e velejava em seu barquinho num lago local.

Embora não envolvido ativamente em religião, Einstein possuía um senso genuíno do espiritual. “A ciência sem a religião é manca”, disse uma vez, “ao passo que a religião sem a ciência é cega”. Referiu-se muitas vezes a Deus em seus escritos, aludindo por vezes a ele como “o Velho”. Certa vez, discutindo a relação entre ciência e religião, disse: “Sutil é o

Senhor, mas não malicioso.” Parece-me que queria dizer que a natureza pode parecer ocultar segredos dos cientistas curiosos, mas esses segredos não são impenetráveis nem incompreensíveis. Ou seja, é difícil mas não impossível para a humanidade descobrir as leis da natureza.

Einstein acabou adquirindo a cidadania americana, mas sempre se considerou um cidadão do mundo. Levou adiante calmamente sua própria linha de pesquisa teórica, fora da corrente dominante da física, que passara ao seu lado. Ganhou um ar de inalterável serenidade e dizia que entre seus amigos europeus era conhecido como o “Grande Rosto de Pedra”. Nem a morte da mulher em 1936 pareceu perturbar sua calma aparente.

FISSÃO DO ÁTOMO

Em 1939, Niels Bohr levou a Einstein a notícia de que o físico alemão Otto Hahn havia dividido o átomo de urânio. Lise Meitner havia trabalhado em estreita ligação com Hahn antes de ser obrigada a fugir dos nazistas, e fora ela, que naquele momento morava na Suécia, quem divulgara a informação de que era possível dividir o átomo. Bohr sugeriu que se fosse possível realizar uma fissão controlada de átomos de urânio por reação em cadeia, isso poderia produzir uma explosão colossal. Einstein não se convenceu, mas outros físicos já começavam a pensar na viabilidade da fissão atômica e a temê-la.

No verão de 1939, o excêntrico físico húngaro Leo Szilard — outrora assistente de Einstein no Instituto Kaiser Wilhelm, na Alemanha — e seu colega Eugen Wigner foram à procura de Einstein em seu chalé de veraneio em Long Island, Nova York, e lhe transmitiram seus temores de que cientistas nazistas pudessem estar trabalhando no desenvolvimento de uma bomba atômica. Convencido do perigo, Einstein assinou a carta ao presidente Franklin D. Roosevelt que eles haviam trazido consigo. A carta fora escrita por Leo Szilard, mas ele e Wigner sabiam que seria necessário o prestígio de Einstein para produzir alguma reação de alto nível. Szilard andou com a carta no bolso durante meses antes de confiá-la ao financista Alexander Sachs, que deveria entregá-la em mãos ao presidente. Até hoje os historiadores se referem a esse documento como a carta Einstein/Roosevelt, mas o próprio Einstein declarou: “Na verdade atuei apenas como uma caixa postal”.

Dizia a carta: “Alguns trabalhos recentes de E. Fermi e L. Szilard levam-me a antecipar que o elemento urânio pode ser convertido numa nova e importante fonte de energia no futuro imediato.... Esse fenômeno conduziria também à construção de bombas....” Esta foi a recomendação que levaria ao início do Projeto Manhattan. Einstein não teve nenhuma participação no projeto de construção da bomba de Los Alamos, tampouco soube, antes de Hiroshima, que uma bomba de fissão nuclear havia sido construída.

ÚLTIMOS ANOS

Depois da Segunda Guerra Mundial, Einstein se uniu aos cientistas que buscavam maneiras de impedir qualquer uso futuro da bomba. Estimulou a formação de um governo mundial sob uma

constituição esboçada pelos Estados Unidos, a Grã-Bretanha e a União Soviética. Mais uma vez, o ex-recluso estava no palco mundial, mas suas ideias foram consideradas ingênuas por muitos e ele foi visto como um velhinho bem-intencionado que devotava seus últimos anos à tentativa de levar harmonia a um mundo que não estava pronto para a paz.

Em 1952, ofereceram-lhe a presidência de Israel, um cargo basicamente formal. Einstein declinou o convite, alegando estar velho e fraco demais para se mudar para Israel. Houve no Knesset quem se inquietasse com esse oferecimento. Talvez a essa altura Einstein estivesse desiludido com a política. “Equações são mais importantes para mim”, disse ele uma vez, “porque a política é para o presente, mas a equação é algo para a eternidade.”

Sua saúde estava agora deteriorada a tal ponto que ele não podia mais tocar violino ou velejar em seu querido barco. Em 19 de abril de 1955, aos 76 anos, Einstein faleceu durante o sono no Hospital Princeton. O último documento que assinou antes de morrer foi uma proclamação contra o uso de armas nucleares.

Einstein foi mais que um cientista, mais que um filósofo e mais que um estadista mundial. Ele havia admitido sua própria posição na história da física e reconhecido seu eminente predecessor em 1949, quando escreveu:

“Newton, perdoe-me; você encontrou o que na sua época era praticamente o único caminho possível para um homem com os mais elevados poderes de pensamento e criatividade. Os conceitos que você criou estão guiando nosso pensamento em física até hoje, embora saibamos agora que terão de ser substituídos por outros ainda mais afastados da esfera da experiência imediata, se pretendermos uma compreensão mais profunda das relações.”

Talvez algum dia, um jovem e atrevido físico venha a escrever: “Einstein, perdoe-me, você encontrou o que na sua época era praticamente o único caminho possível para um homem com os mais elevados poderes de pensamento e criatividade.” Ainda não aconteceu. Desde que nossa era espacial se iniciou, dezenas de experimentos testaram a relatividade, principalmente verificando previsões nela baseadas, e a teoria nunca falhou. Tampouco foi substituída por uma teoria mais poderosa da arquitetura do universo.

Transmissões de rádio feitas a partir de naves enviadas a Marte, Vênus e Mercúrio refinaram as medidas da curvatura da luz pelo Sol, levando-as a um grau de precisão de 0,1%, a partir de cerca de 20% em 1919. A descoberta dos pulsares em 1974 proporcionou aos cientistas uma nova referência de medida. (*Pulsares* são duas estrelas extremamente densas que giram rapidamente uma em torno da outra, emitindo um sinal de rádio a intervalos de 59 milésimos de segundo.) Usando os pulsares como um relógio celeste, os cientistas confirmaram a distorção do tempo, previsto pela teoria especial, e a distensão gravitacional das ondas luminosas rumo à cor vermelha, previsto pela teoria geral.

Num experimento ainda não realizado, a Universidade de Stanford planeja pôr em 1999 quatro giroscópios extremamente precisos num satélite que teria uma órbita polar. Se a teoria geral estiver correta, como a maioria dos cientistas acredita, os giroscópios vão mudar seu ângulo em relação a estrelas distantes por uma minúscula fração de um grau a cada ano.

Isso tudo não significa que a física como ciência esteja encerrada. Como vimos, a teoria geral diz respeito a uma força da natureza — a gravidade —, mas não incorpora as outras forças naturais como o eletromagnetismo e as forças que mantêm os átomos coesos. A busca de uma teoria mais completa, que vincule a relatividade geral ao *quantum* de relatividade, prossegue.

Mesmo que somente os matemáticos e físicos que dominaram as teorias da relatividade estejam em condições de compreendê-las plenamente, nós ainda podemos apreciar o sucesso monumental de Einstein — ele transformou para sempre o modo como contemplamos o universo.

Perfil biográfico

1879	Nasceu em Ulm, Alemanha
1902	Não conseguindo um cargo acadêmico, foi trabalhar como técnico no Departamento de Patentes da Suíça, em Berna.
1905	Publicou cinco artigos científicos, entre os quais o da teoria especial da relatividade e um adendo que dizia que energia contida por um corpo é igual à sua massa vezes a velocidade da luz ao quadrado ($E = mc^2$).
1911	Formulou o princípio da equivalência, que equipara gravidade e aceleração, uma pedra angular na teoria geral da relatividade.
1914	Mudou-se para Berlim para assumir um cargo na Academia Prussiana de Ciências.
1916	Publicou seu mais famoso artigo, “O fundamento da teoria da relatividade geral”.
1919	Eclipse solar fornece a astrônomos britânicos a primeira confirmação de que o espaço é curvado pela gravidade e que a luz se curva na presença de uma grande massa, como Einstein previra.
1922	Recebeu, um ano mais tarde, o Prêmio Nobel de Física, não pelas teorias da relatividade, mas por seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico.
1933	Após repetidos ataques de nazistas, deixou a Alemanha e foi para os Estados Unidos. Assumiu um cargo no Instituto de Estudos Avançados em Princeton, Nova Jersey, onde passou a residir.
1939	Assinou uma carta ao presidente Roosevelt, chamando-lhe a atenção para o potencial de um bomba atômica, no que foi seu único envolvimento no Projeto Manhattan.
1955	Faleceu durante o sono no Hospital Princeton.

^a Havia uma jovem garota chamada Miss Bright, Que conseguia viajar muito mais rápido que a luz. Um dia ela partiu, De um jeito einsteiniano, E chegou de volta na véspera.

^b O autor refere-se ao conjunto de linhas de forças. (N.R.T.)

^c O autor busca aqui, através de uma analogia, levar o leitor a imaginar como as cristas de ondas eletromagnéticas seriam visualizadas. Ao contrário das ondas oceânicas, as cristas das ondas eletromagnéticas podem se distanciar uma das outras por distâncias diversas, varrendo praticamente todos os valores imagináveis. (N.R.T.)

^d Esta única carta, um bilhete como diz o autor, foi entretanto muito significativa, pois Max Planck era um dos maiores físicos de seu tempo e o iniciador da teoria quântica, tão ou mais revolucionária que a própria teoria da relatividade. Max Planck é estudado no capítulo 3 (N.R.T.)

^e Esta restrição, na verdade, aplica-se à velocidade da luz no vácuo. Em outros meios, onde a luz viaja a velocidades menores, podemos ter objetos movendo-se mais rapidamente do que a luz. (N.R.T.)

^f Em relação à Terra. (N.R.T.)

^g Toda curva envolve uma força. (N.R.T.)

^h Relativo a um dado observador. (N.R.T.)

ⁱ Um ano-luz é a distância que a luz percorre em 1 ano. Seu valor é $9,461 \times 10^{12}$ km. (N.R.T.)

^j O múon desintegra-se em um elétron, um neutrino e um antineutrino. (N.R.T.)

^k Ou seja, um observador em relação ao qual o objeto está se movendo numa velocidade próxima a da luz. (N.R.T.)

^l Em 1803 o astrônomo Johann Georg von Soldner publicou um artigo onde calculava que a luz de uma estrela que passava raspando o sol sofreria um desvio de sua trajetória igual a 0,875 segundos de arco (3.600 segundos correspondem a um grau). Soldner utilizou a mecânica newtoniana e a teoria que supunha ser a luz constituída de corpúsculos. Em 1911 Einstein utilizou o princípio da equivalência e determinou que um raio de luz que passasse raspando o sol deveria sofrer um desvio de sua trajetória igual a 0,875 segundos de arco (o mesmo valor encontrado por Soldner cerca de cem anos antes). Somente em 1915 Einstein empregou a teoria da relatividade geral e calculou que o desvio deveria ser de 1,75 segundos de arco (o dobro do calculado anteriormente). É importante notar que Einstein desconhecia o trabalho de Soldner e que qualquer teoria da gravitação que seja compatível com o princípio de equivalência deve prever o desvio da luz ao passar perto do sol (ou de outro corpo que possua massa). A teoria da relatividade geral, entretanto, prevê um espaço curvo, que é o responsável pelo maior valor do desvio da luz. (N.R.T.)

^m Instituto de Tecnologia da Califórnia. (N.R.T.)

ⁿ Mercúrio leva 88 dias terrestres para completar uma revolução completa em torno do Sol. Este é o valor do ano de Mercúrio, significativamente menor do que o ano terrestre de 365 dias. (N.R.T.)

^o Einstein esteve no Brasil, de regresso da Argentina, em 1925. Durante sua estada visitou várias instituições, inclusive o Observatório Nacional, quando encontrou membros da expedição a Sobral, CE, para a observação do eclipse solar de 1919. No Brasil, Einstein escreveu: “A questão que minha mente formulou, foi respondida pelo radiante céu do Brasil.” (N.R.T.)

MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK

É como se uma pessoa pudesse tomar ou uma garrafa de cerveja ou cerveja nenhuma, mas fosse impedida por uma lei da natureza de tomar qualquer quantidade de cerveja entre zero e uma garrafa.

George Gamow sobre física quântica

A expressão *física quântica* parece um pouquinho assustadora a muitos não cientistas. Não precisa ser assim. Embora as implicações da teoria sejam complicadas, o conceito propriamente dito é de entendimento quase tão fácil quanto a analogia de George Gamow. Por outro lado, pode-se dizer que o impacto dessa teoria na física é comparável ao da relatividade. Embora muitos cientistas tenham se tornado famosos por aplicar a teoria quântica a diferentes fenômenos, um único homem foi responsável pela origem dessa doutrina radical, um homem que só foi um revolucionário muito a contragosto.

A física quântica começou no dia 14 de dezembro de 1900, quando o *Herr Professor* Max Karl Ernst Ludwig Planck, físico então com 42 anos, apresentou um novo e estranho conceito à imponente assembleia da Sociedade Alemã de Física. Esse dia seria considerado mais tarde como a data de nascimento do *quantum*.

Na preleção que fez esse dia, Planck, com sua fala mansa, apresentou um exercício matemático que elucidava um fenômeno que vinha atormentando os estudiosos da termodinâmica havia anos. Explicou por que a energia térmica nem sempre é convertida em luz ultravioleta invisível. Em si mesmo, isso não parece um feito revolucionário mas, no processo da investigação desse fenômeno, Planck havia descoberto que a matéria absorve energia térmica e emite energia luminosa de maneira descontínua — em outras palavras em quantidades discretas. Mais tarde ele chamou esses fragmentos de *quanta*, da palavra latina para “quanto”. A partir dessa descoberta, a revolução quântica na física estava em marcha.

O CIENTISTA DO CIENTISTA

Sob muitos aspectos, a vida de Max Planck apresenta um notável contraste com as de Newton e Einstein. Enquanto Newton e Einstein foram considerados gênios por quase todos, Planck foi um cientista consciencioso e diligente. Não foi nenhum meteoro no céu noturno da física. Além disso, enquanto Newton e Einstein foram misantropos, Planck foi um estimado e respeitado administrador acadêmico. E, em que pese a ideia corrente de que a física exige tanto do intelecto que os que dela se ocupam precisam fazer suas contribuições aos vinte e poucos anos, Planck só veio a imprimir sua marca mais notável na história da física aos 42 anos.

Planck nasceu em 1858 em Kiel, Alemanha, o sexto filho de Wilhelm Planck, um professor de jurisprudência na universidade local. Sua mãe, a segunda mulher de Wilhelm, vinha de uma longa linhagem de pastores. Max Planck poderia ter herdado alguns dos talentos do pai, entre os quais a capacidade de examinar grande número de indícios e distinguir os fatos relevantes dos irrelevantes. Se essa influência foi significativa ou não, a influência de uma sólida e instruída família de classe média alta pode sem dúvida ser percebida em sua carreira. Os Planck tinham a educação, a cultura e os valores familiares em alto apreço e legaram tudo isso ao filho. As cartas de Planck nos permitem vislumbrar o estilo de vida da família. Elas falam de férias passadas na estação de veraneio de Eldena, no mar Báltico, jogando croqué na relva, de noites dedicadas à leitura de romancistas como Sir Walter Scott, e de peças teatrais e saraus musicais promovidos pelos membros da família.

TEMPO DE ESTUDANTE

Planck cursou o secundário no Maximilian Gymnasium, em Munique, onde seu interesse pela ciência foi despertado. Ele atribuía a seu professor de matemática, Hermann Muller, o mérito de ter sido o primeiro a lhe fazer entender o significado das leis da física. Ao introduzir a lei da conservação da energia, por exemplo, Muller usava a imagem de um pedreiro que emprega grande quantidade de energia para erguer um pesado bloco de pedra. Explicava que a energia assim usada não é perdida e sim armazenada na pedra até que ela seja removida e caia na Terra. Esse princípio impressionou Planck por representar um absoluto — uma lei fundamental da natureza. Desse momento em diante, relata Planck em suas memórias, a busca de leis fundamentais da natureza pareceu-lhe a mais nobre investigação que um cientista podia empreender.

Como foi mencionado antes, Planck não era um prodígio. Seus professores no Maximilian Gymnasium o classificavam como um dos melhores alunos, nunca como o primeiro da classe. Não percebiam nele nenhum brilhantismo ou capacidade especiais, exceto sua atitude pessoal e extrema diligência. Seus dotes sociais, por outro lado, deviam ser de primeira ordem, pois era o preferido tanto dos colegas quanto dos professores.

Após se formar no Gymnasium em 1874, Planck ainda não decidira em que área queria continuar seus estudos. A essa altura, manifestara considerável talento em música, com excelente desempenho no piano e no órgão. Vinha considerando seriamente uma carreira musical até que procurou os conselhos de um músico profissional sobre a escolha. “Se você precisa *perguntar*”, respondeu-lhe o músico, “é melhor estudar alguma outra coisa!”

Finalmente Planck resolveu fazer um curso de graduação na Universidade de Munique, ingressando depois na Universidade de Berlim. Estudou física experimental e matemática e após se transferir para Berlim teve a oportunidade de assistir às aulas de dois físicos de renome mundial, Herman von Helmholtz e Gustav Kirchhoff. Planck atribuía a esses dois cientistas o despertar de seu interesse pela termodinâmica. Não dizia que haviam lhe ensinado grande coisa, mas, assombrado com a reputação que tinham, queria ser como eles, figuras respeitadas da comunidade acadêmica. Helmholtz e Kirchhoff não davam aulas particularmente brilhantes e Planck via seu interesse pela ciência oscilar durante suas

enfadonhas preleções. Como Newton e Einstein antes dele, Planck entregou-se ao estudo independente dos assuntos que o interessavam. Foi assim que veio a descobrir os tratados de termodinâmica de Rudolf Clausius. Ficou impressionado tanto com o estilo puro quanto com a clareza de raciocínio na obra de Clausius e passou a se dedicar à termodinâmica como seu campo principal. O estudo da segunda lei da termodinâmica tornou-se o tema da dissertação de doutorado que apresentou em Munique em 1879. Ele se decidiu pela termodinâmica a despeito do fato de Philipp von Jolly, seu professor na Universidade de Munique, o ter aconselhado a não tentar uma carreira em física, alegando que a descoberta da termodinâmica havia completado a estrutura da física teórica. Planck respondeu a Jolly que não tinha o menor desejo de fazer descobertas, tudo que queria era compreender e talvez aprofundar os fundamentos existentes da física.

O PROBLEMA DA ENTROPIA

A dissertação de Planck examinou os dois princípios da termodinâmica clássica. O primeiro enuncia a conservação da energia; o segundo estabelece uma direção no tempo mediante a definição de uma quantidade chamada *entropia*, que aumenta em todos os processos físicos reais. A *entropia* pode ser definida como uma medida do grau de desordem ou como a tendência ao colapso existente em todo sistema físico. O efeito da entropia crescente é que as coisas evoluem de um estado de ordem relativa para um de desordem, e essa desordem é acompanhada de uma crescente complexidade.

As ideias de Planck sobre a entropia e suas propostas de experimentos a realizar nesse campo não impressionou os eminentes orientadores acadêmicos. Planck afirmava que o professor Helmholtz nem sequer lera sua dissertação e sugeria também que Kirchhoff, embora a tivesse lido, não a apreciara. Nem mesmo Rudolf Clausius, a inspiração de Planck, mostrara o menor interesse e uma cópia da dissertação que lhe fora enviada para comentários ficou sem resposta. Em suma, uma estreia pouco auspiciosa para um homem que iria transformar fundamentalmente a física.

Planck acolheu a reação à sua dissertação com a serenidade que lhe era peculiar e retomou seu trabalho com zelo ainda maior. É verdade que sua carreira acadêmica sofreu um atraso de dois anos por motivo de doença, mas em 1879 foi-lhe concedido o doutorado *summa cum laude*.

Em 1880 ele ingressou no corpo docente da Universidade de Munique como professor associado e cinco anos mais tarde foi designado professor titular na Universidade de Kiel. Mais ou menos na mesma época, conheceu um jovem estudante de física chamado Wilhelm Wien que seria seu amigo e colaborador por mais de 40 anos. O trabalho experimental e teórico de Wien é que iria fornecer mais tarde o ponto de partida para a mais importante contribuição de Planck à ciência.

Em 1889, o ex-orientador de Planck, Gustav Kirchhoff, faleceu, deixando vaga a sua cátedra na Universidade de Berlim. Nessa altura, Herman von Helmholtz, o outro orientador de Planck, havia passado a admirar tanto a tenacidade do jovem quanto o trabalho que ele estava produzindo. Helmholtz contribuiu para que Planck obtivesse a cátedra de Kirchhoff. Ali

Planck ficaria, granjeando pouco a pouco reconhecimento, honras e finalmente a fama mundial, até se aposentar em 1926.

Foi na Universidade de Berlim que certo dia, tendo esquecido em que sala deveria dar aula, Planck deu um pulo à secretaria do departamento e perguntou: “Por favor, pode me dizer em que sala o professor Planck vai dar aula hoje?” “Melhor não ir lá, rapaz”, respondeu-lhe um funcionário com firmeza. “Você é jovem demais para compreender as aulas de nosso douto professor Planck.”

CORPOS NEGROS, CATÁSTROFE ULTRAVIOLETA E QUANTA

Instalado em sua cátedra, Planck se voltou para o problema físico clássico, suscitado pela primeira vez por Kirchhoff, da radiação do corpo negro. Um *corpo negro* é um objeto teórico que absorve todas as frequências da luz; por isso, quando aquecido, deveria irradiar todas as frequências da luz. Havia, contudo, um problema com a teoria do corpo negro. O número de diferentes frequências na faixa de alta frequência é maior que na faixa de baixa frequência. Se um corpo negro irradiasse igualmente todas as frequências de radiação eletromagnética, praticamente toda a energia seria irradiada na faixa de alta frequência. Essa situação teórica foi chamada de *catástrofe ultravioleta* porque a mais alta frequência de irradiação no espectro da luz visível é violeta e por consequência, teoricamente, um corpo negro aquecido deveria irradiar unicamente ondas luminosas ultravioleta. Eu disse “situação teórica” porque na realidade as coisas não se passavam dessa maneira (essa era a “catástrofe” da expressão) e a teoria da física da época não era capaz de explicar por quê.

Lancemos um rápido olhar sobre o contexto do problema. Embora soubessem que as coisas quentes irradiam e que o fazem em diferentes cores à medida que são aquecidas, os físicos não conheciam a exata relação entre calor e luz irradiada. A luz do sol produz um espectro de cores equilibrado, e quantidades iguais de todas as cores fazem com que ela pareça branca, ou sem cor. Quando a luz solar passa através de minúsculos prismas feitos de gotículas de água (pingos de chuva), a dispersão de cores resultante é chamada de espectro luminoso. Estudos mostraram que a cor característica de todo os objetos muda de uma maneira previsível à medida que ele é lentamente aquecido. Um ferrete aquecido, por exemplo, brilha inicialmente vermelho. Em temperaturas mais elevadas, começa a irradiar laranja-amarelo e em temperaturas ainda mais altas, irradia azul. Quanto mais quente fica um objeto, mais branca é a sua cor e mais equilibrado o seu espectro.

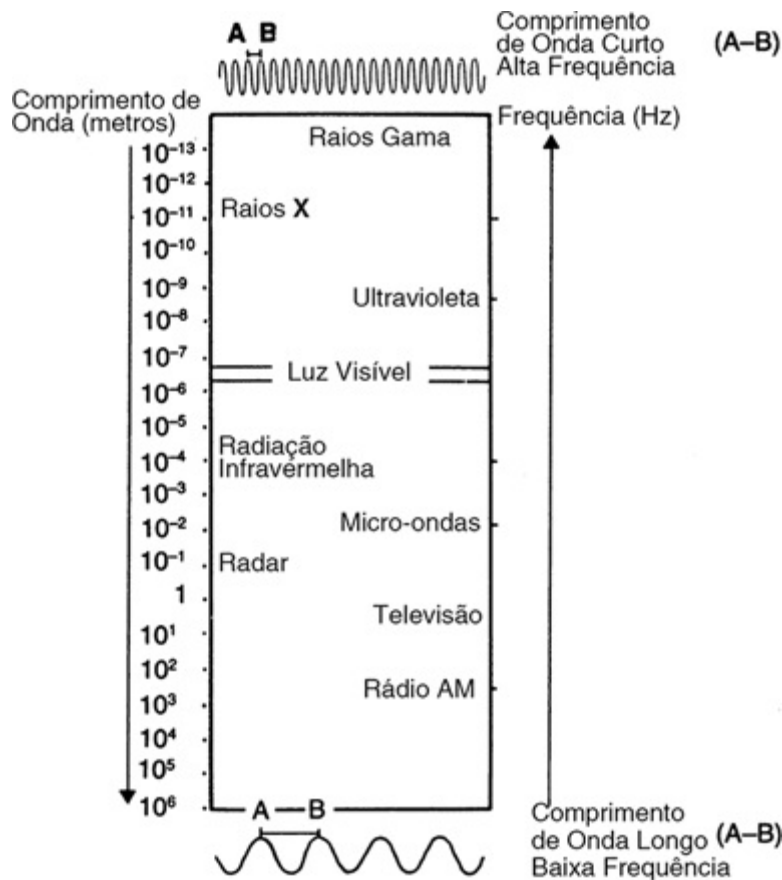
Os físicos concluíram que a conexão entre a temperatura de um material e a cor que ele emite devia ser de natureza mecânica. Sabiam que temperaturas mais elevadas produzem maior energia cinética ou movimentos mais rápidos. Num nível mais fundamental, isso significa que os átomos estão se movendo ou oscilando de um lado para outro mais rapidamente. Destes fatos, resultava que as diferenças de cor em materiais em diferentes temperaturas eram determinadas de alguma maneira pelos movimentos dos átomos que compunham o material aquecido. Os físicos concluíram também que a frequência da luz em diferentes temperaturas devia ser igual à frequência das vibrações dos átomos no material. Afinal, Maxwell mostrara que uma onda luminosa é na realidade oscilação eletromagnética.

Assim, parecia plausível que as diferentes cores da luz emitida por um objeto aquecido fossem causadas por diferentes frequências de vibração. Pensava-se, por exemplo, que a luz vermelha tinha uma taxa ou frequência de vibração mais baixa que a luz azul.

Como fica claro por esta explanação, a teoria dominante na época para a compreensão dos objetos aquecidos radiantes e as cores que emitiam fundava-se na definição ondulatória da luz. Segundo essa teoria, a energia luminosa emitida por um corpo radiante teria maior tendência a ser irradiada numa frequência mais alta que numa mais baixa. A razão disso é a relação direta existente entre a frequência de uma onda e seu comprimento. Quanto mais alta a frequência de onda, mais curto seu comprimento. Pensava-se que as ondas luminosas com comprimentos de onda muito curtos (frequências muito altas) prevaleceriam. Isso porque ondas curtas dispunham de mais meios de se inserir em qualquer volume de espaço do que ondas longas. O significado disso era que um ferrete aquecido ao rubro não deveria em absoluto ser vermelho, mas azul. Além disso, um ferro que irradiasse azul não deveria ser azul, devendo antes estar irradiando na faixa ultravioleta, de frequência realmente alta, sendo o ultravioleta, é claro, uma cor que vibra numa frequência mais alta que o violeta e é invisível ao olho humano. Em outras palavras, todo objeto aquecido deveria emitir sua energia eletromagnética acima das frequências ultravioleta. O fato de que na realidade objetos aquecidos não emitiam suas energias exclusivamente nas frequências mais altas constituía a chamada “catástrofe ultravioleta”. Era uma catástrofe porque Lord Rayleigh, a maior autoridade da época nos campos do comportamento do som e da luz, havia previsto que todo objeto aquecido logo emitiria toda a sua energia em frequências acima do visível, e os dados experimentais não correspondiam às teorias correntes — coisa que é sempre um problema em ciência. Hoje em dia, os cientistas tendem a chamar esse fenômeno de “a anomalia ultravioleta”. Encontrar a solução para esse enigma foi o desafio que Max Planck aceitou, sem suspeitar na ocasião de que encontraria uma solução que haveria de revolucionar os conceitos da física clássica.

Muitos desenvolvimentos modernos em física têm sido ligados a investigações das propriedades da radiação que se desloca através de um espaço vazio e, em particular, com as relações dessas propriedades com a matéria. A radiação é descrita em termos de seu comprimento de onda e frequência, isto é, a distância entre duas cristas de onda sucessivas e o número de cristas que chegam por segundo. Quando o comprimento de onda é curto, a frequência é alta, e vice-versa. Várias formas de radiação compõem o espectro eletromagnético, de ondas de rádio com comprimentos de onda muito longos (frequências muito baixas) a raios gama com comprimentos de onda muito curtos (frequências muito altas).

Todos os objetos irradiam energia. Quanto mais quentes, mais energia irradiam. Você e eu, por exemplo, emitimos cerca de 200 watts de radiação na região infravermelha invisível do espectro. Todos os objetos absorvem energia de seu ambiente. Se a temperatura do objeto é mais alta que a do ambiente, ele se esfria, porque irradia mais energia do que absorve. O termo técnico *corpo negro* significa um absorvedor ideal, aquele que absorve 100% da radiação que sobre ele incide. Ademais, esse corpo negro ideal deve, quando aquecido, irradiar todo tipo de radiação tanto quanto possível, mais do que o faria qualquer outro tipo de objeto na mesma temperatura.



ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO Energia irradiada em termos de comprimento de onda e frequência. Quando o comprimento de onda é curto, a frequência é alta, e vice-versa. Quanto ao comprimento de onda, as formas de radiação variam de menos que um bilionésimo de um micron no caso dos raios gama a muitos quilômetros de comprimento no caso das ondas de rádio.

Quando frio, um corpo negro parece negro porque não reflete nenhuma luz. Por isso os físicos gostam de usar esse corpo ideal como um padrão para medir radiação emitida. De particular interesse no tocante à radiação de um corpo negro é o espectro de cores da luz, isto é, que quantidade de luz ele emite nos vários comprimentos de onda. À medida que é gradualmente aquecido, um objeto emite primeiro uma fosca incandescência vermelha, depois, à medida que vai se aquecendo, um vermelho luminoso, depois amarelo, depois branco azulado e por fim branco brilhante. Esse deslocamento ao longo do espectro significa que, à medida que a temperatura se eleva, a intensidade máxima da luz está se movendo do infravermelho para o vermelho, para o amarelo, para o azul.

Em 1893, o físico Wilhelm Wein, amigo de Planck, desenvolvera uma teoria que produzira uma expressão matemática para a distribuição de energia da radiação do corpo negro, isto é, a quantidade de energia irradiada em cada comprimento de onda particular. Essa teoria fornecia uma fórmula que descrevia com precisão a distribuição da radiação da energia na extremidade violeta do espectro, mas, muito estranhamente, não na extremidade vermelha. Essa era a situação quando Planck começou a examinar a questão da catástrofe ultravioleta. As melhores teorias disponíveis eram capazes de explicar uma metade da radiação ou a outra, não as duas ao mesmo tempo.

A essa altura Planck havia aceitado, embora com relutância, a teoria atômica. Sabia que toda matéria era composta de átomos individuais, que naquele tempo se supunha serem os tijolos básicos da edificação da natureza. A energia, por outro lado, era concebida como contínua, irradiada em ondas; assim, por exemplo, os físicos falavam de ondas de calor, de som ou de luz.

Em 1900, Planck constatou que, para explicar a radiação do corpo negro, tinha de introduzir uma ideia completamente nova. Sugeriu que a energia, como a matéria, existia em pequenas unidades ou pacotes. Chamou a unidade de radiação de energia de *quantum* (a partir da palavra latina para “quanto”) ou, no plural, *quanta*.

Por analogia, podemos considerar que o *quantum* da moeda nos Estados Unidos é a moeda de um centavo, o *penny*. Não temos nenhuma denominação menor para dinheiro. Uma compra pode envolver vários centavos e poderia até incluir apenas um, mas seria inteiramente impossível comprar alguma coisa por uma fração de centavo. Planck mostrou que a energia só se manifesta em unidades fundamentais, indivisíveis, e que essas unidades só são ajustáveis em degraus sequenciais. Quando a energia de qualquer tipo de radiação eletromagnética muda de um valor para outro, ela o faz em saltos discretos (saltos quânticos), não havendo nenhum valor possível entre eles.

Planck soube o quanto sua ideia era revolucionária assim que a concebeu. No mesmo dia, levou o filho pequeno para um passeio e lhe disse: “Tive hoje uma ideia tão magnífica quanto aquelas do Newton.”

Planck postulou que a radiação só pode ser absorvida em números inteiros de *quanta*. A partir disso, demonstrou que a quantidade de energia num *quantum* depende do comprimento de onda da radiação. Quanto mais curto o comprimento de onda, mais energia tem o *quantum*. Em outras palavras, o conteúdo de energia do *quantum* é inversamente proporcional ao comprimento de onda.

O trabalho de Planck mostrou que um *quantum* de luz violeta (comprimento de onda curto, frequência alta) teria de conter duas vezes mais energia que um *quantum* de luz vermelha (comprimento de onda longo, frequência baixa). Consequentemente, quando um corpo negro irradia, ele não tende a emitir igualmente todos os comprimentos de onda. Frequências baixas são facilmente irradiadas porque só é preciso juntar uma pequena quantidade de energia para formar um *quantum* de radiação de baixa frequência. A emissão de radiação de frequência mais alta exige mais energia, e é menos provável que a energia adicional possa ser acumulada. Em outras palavras, quanto mais alta é a frequência, menos provável é a irradiação. Embora as frequências altas sejam muitas, suas exigências de energia quântica tornam sua radiação improvável e a conclusão é que a catástrofe ultravioleta simplesmente não existe.

A CONSTANTE DE PLANCK

Equações formuladas com base na teoria quântica de Planck explicaram precisamente a radiação de um corpo negro em ambos os extremos do espectro. O feito de Planck foi relacionar matematicamente o conteúdo de energia de um *quantum* à frequência da radiação. Se tanto a frequência quanto o conteúdo de energia do *quantum* fossem inversamente proporcionais ao comprimento de onda, os dois seriam diretamente proporcionais um ao outro. Planck expressou essa relação por meio de sua hoje famosa equação:

$$E = hf$$

Um *quantum* de energia, E , é igual à frequência, f , da radiação vezes a constante de Planck, h .

Essa constante, h , que é um número extremamente pequeno, é reconhecida atualmente como uma das constantes fundamentais do universo. Repetindo, os comprimentos de onda pequenos (altas frequências) requerem mais energia. Em qualquer temperatura dada, somente determinada quantidade de energia está disponível. Por isso, as altas frequências têm menor probabilidade de ser emitidas.

Não é só a constante de Planck que é pequena, o *quantum* também é. As unidades de radiação são tão pequenas que a luz, por exemplo, é percebida como contínua, tal como a matéria comum nos parece contínua ainda que saibamos que ela é composta de unidades discretas chamadas átomos.

Se a questão da radiação do corpo negro, que levou à teoria dos *quanta*, fosse a única que esta pudesse resolver, a teoria quântica não teria passado de uma curiosidade. Foi a utilidade que a teoria quântica apresenta em muitas diferentes áreas da física que a tornou tão importante.

A despeito de sua importância, a teoria quântica causou pouca impressão nos físicos quando anunciada pela primeira vez em 1900. O próprio Planck não acreditava realmente nela, suspeitando de que os resultados que obtivera podiam ser o produto de artifícios matemáticos sem nenhuma relação verdadeira com a natureza. Na verdade, sua própria teoria o perturbava. Não queria ver a física clássica destruída. Finalmente ele admitiu: “Temos de viver com a teoria quântica. E, acreditem-me, ela vai se expandir. Não será somente na óptica. Ela penetrará em todos os campos.”

Em 1918, a importância da teoria quântica já fora percebida e, em reconhecimento por seu trabalho, Max Planck foi contemplado com o Prêmio Nobel de física.

A FRONTEIRA

A teoria quântica da radiação de Planck, base da física quântica, foi publicada pela primeira vez, como indicamos, em 1900, tendo portanto precedido a teoria especial da relatividade de Einstein. Essa foi uma época de convulsão e transformação no mundo da física. Não apenas Einstein e Planck como Rutherford, Bohr e Heisenberg estavam levantando questões e sugerindo novas respostas. Para pôr toda essa atividade em alguma perspectiva, cabe observar que a física anterior à teoria quântica é chamada *física clássica* e a posterior é chamada *física moderna*. Max Planck, portanto, marca efetivamente a transição.

PLANCK E EINSTEIN

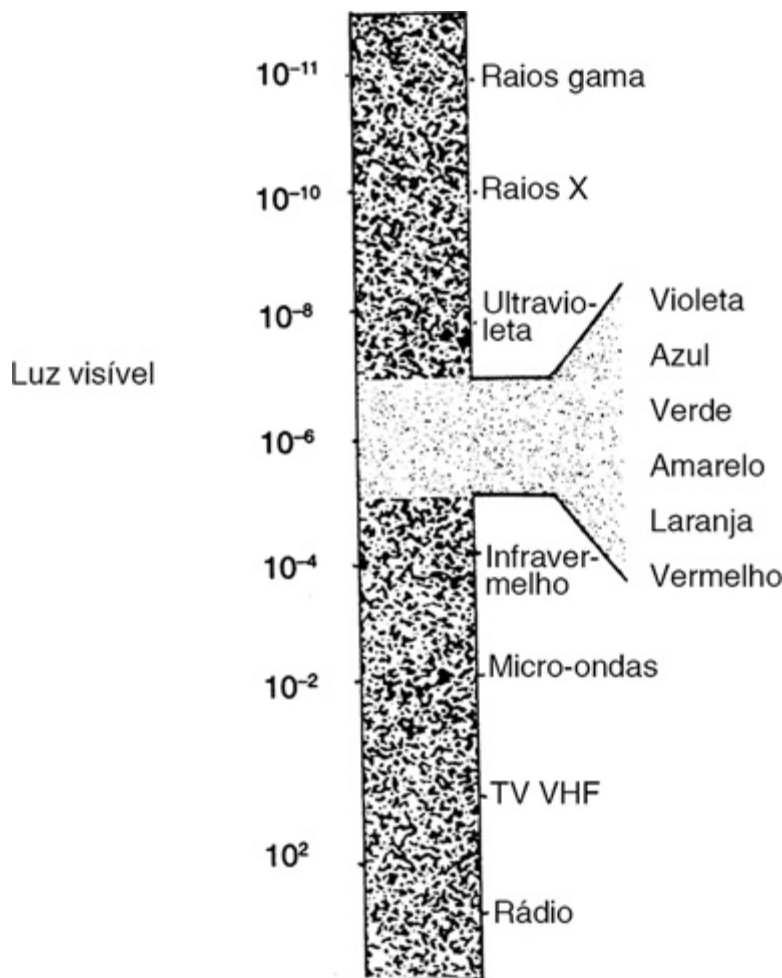
Contemporâneo de Einstein, Max Planck foi o primeiro membro do *establishment* físico acadêmico a reconhecer a importância das suas originais teorias. Como relatei no capítulo anterior, Einstein havia esperado uma reação generalizada, ainda que polêmica, à publicação, em 1905, de seu artigo que propunha a teoria especial da relatividade. Em vez disso, recebeu uma única carta. O remetente era Max Planck, da Universidade de Berlim, que pedia mais

detalhes da matemática de Einstein e algumas explicações adicionais a respeito. Einstein ficou encantado por receber a atenção de Planck que, com sua proposta dos *quanta* feita apenas alguns anos antes, havia se tornado um dos físicos mais renomados do mundo. Mais tarde, Planck usou o princípio da relatividade de Einstein em seu próprio trabalho. E, já em 1909, numa carta para recomendar Einstein à Universidade de Praga, escreveu: “Caso sua teoria se prove correta, como acredito que o fará, Einstein será considerado o Copérnico do século XX.”

A aprovação de Planck, que levou à gradual aprovação de outros expoentes da física, foi da máxima importância para a autoconfiança de Einstein. Os dois homens iniciaram uma correspondência que perdurou pelo resto de suas vidas e conduziu a uma importante colaboração em torno da teoria da luz.

A CONFIRMAÇÃO DA TEORIA DE PLANCK POR EINSTEIN

Assim como Planck percebera o valor de Einstein, este foi um dos primeiros a reconhecer as implicações da teoria quântica. Em 1905, ele aplicou a teoria quântica a um fenômeno observável que vinha intrigando os físicos havia algum tempo, o efeito fotoelétrico. Os cientistas haviam descoberto que, ao atingir certos metais, a luz fazia com que a superfície deles emitisse elétrons, exatamente como se a força da luz arrancasse os elétrons dos átomos. O que deixava os experimentadores perplexos era que o aumento da intensidade não produzia nenhum efeito. Para surpresa, descobriram que, embora o aumento da intensidade da luz não desse nenhuma energia a mais aos elétrons arrancados, a mudança do comprimento de onda (ou da cor) os afetava. A luz azul, por exemplo, fazia com que os elétrons fossem emitidos em velocidades maiores que a luz amarela. A luz vermelha, qualquer que fosse sua luminosidade, não era capaz de arrancar absolutamente nenhum elétron de alguns metais. Por que a cor da luz teria um efeito tão maior que a intensidade? Não havia resposta para esse enigma na física clássica.



LUZ VISÍVEL A porção do espectro eletromagnético que é visível ao olho humano é chamada luz. Cada cor — violeta, azul, verde, amarelo, laranja, vermelho — tem um comprimento de onda discreto medido em microns. O mais curto é violeta, 0,4 microns; o mais longo é vermelho, 0,7 microns.

Usando a teoria quântica de Planck, Einstein encontrou a resposta. Se a radiação assume a forma de pacotes de energia, como Planck teorizara, e essa energia é gasta na expulsão de elétrons, então a radiação de alta frequência deveria arremessar elétrons com mais energia que a radiação de baixa frequência. Einstein postulou que quanto maior for a energia do *quantum*, mais velocidade ele imprime ao elétron cuja emissão provocou. A luz vermelha, cujos *quanta* são muito pequenos, não tem nenhum efeito, porque só para arrancar um elétron de um átomo já é necessária certa energia mínima. Para a maioria dos metais, a energia dos *quanta* vermelhos é menor que esse mínimo. A luz violeta expulsa elétrons em baixa velocidade, a ultravioleta gera uma velocidade maior e raios X produzem elétrons muito rápidos. Interessante é que foi por essa explanação quântica do efeito fotoelétrico, não pela teoria da relatividade, que Einstein foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1921.

Outro que cedo se converteu à teoria dos *quanta* foi Niels Bohr. Em 1913 ele a incorporou à sua teoria da estrutura do átomo e elucidou muitas questões que a física pré-quântica não era capaz de resolver. Em três artigos publicados em 1913, Bohr expôs sua teoria quântica do átomo de hidrogênio. Por esse trabalho, ganharia o Prêmio Nobel em 1922. Três Nobel dados num período de cinco anos por trabalhos em campos quânticos marcaram a aceitação da física quântica pelo mundo da ciência.

A ironia, diz-se, é uma companheira constante da história, e assim foi na relação entre Planck e Einstein. Eles eram unidos pela física e profundamente separados por questões políticas e morais. Quando Planck foi eleito reitor da Universidade de Berlim em 1915, Einstein felicitou publicamente o corpo docente por sua escolha. Mais tarde, Planck ajudou a fundar o Instituto Kaiser Wilhelm para a Física em Berlim e nomeou Albert Einstein seu primeiro diretor. A função do instituto era realizar pesquisa pura, mas para receber recursos do governo era preciso ressaltar os benefícios militares potenciais. O ano, é claro, era 1914, e o governo alemão tinha a guerra em mente. Era difícil convencer que um instituto de pesquisa em física pura dirigido por um pacifista declarado como Einstein podia ajudar esforço de guerra alemão, mas Planck conseguiu.^a

Nessa fase, as famílias de Einstein e Planck ficaram muito próximas. Frequentemente jantavam juntas. Além disso, tanto Planck quanto Einstein gostavam de música e tocavam nas mesmas orquestras de câmara. Ao contrário de Einstein, Planck se deixou tomar pela febre patriótica daquele tempo e apoiou integralmente a posição alemã no que acreditava ser uma guerra defensiva e inevitável contra opositores perversos. Planck era pai de dois garotos em idade de servir ao exército e reitor de uma universidade que logo se despovoaria com a convocação tanto de estudantes quanto de professores jovens. Logo todos os filhos de Planck estavam envolvidos na guerra. As filhas gêmeas, Greta e Emma, haviam feito o curso de enfermagem da Cruz Vermelha e estavam esperando designação para hospitais militares. O filho mais velho, Karl, estava na escola de artilharia e o mais novo, Erwin, já estava na *front*. “Que tempos gloriosos estamos vivendo”, escreveu Planck à irmã. “É uma grande emoção para alguém poder se dizer um alemão.” Como os Planck conseguiam tolerar ver seu amigo Einstein distribuindo propaganda contra a guerra nas esquinas é um mistério. Talvez o considerassem um excêntrico incorrigível.

Em 1915, Planck experimentou pessoalmente os horrores da Primeira Guerra Mundial. Seu sobrinho, um físico, único filho de seu irmão, foi morto. Seu próprio filho Erwin fora feito prisioneiro e Karl foi ferido e veio a morrer em consequência.

No final de 1917 a derrota estava no ar e o governo alemão próximo do colapso. Mas, mesmo diante de toda a tragédia que recaía sobre sua família e da derrota iminente, Planck se recusou a assinar uma proclamação que pedia a abdicação do Kaiser, como Einstein fizera. Foi leal até o fim. Apesar das divergências políticas, a relação entre Planck e Einstein continuou cordial.

Tragédias familiares persistentes causaram grande sofrimento a Planck. Em 1917, sua filha Greta, que se casara com um professor em Heidelberg, morreu subitamente um mês após dar à luz. Sua irmã gêmea, Emma, foi para Heidelberg para cuidar do bebê e, em janeiro de 1919, casou-se com o viúvo. No final desse ano também ela morreria pouco depois de dar à luz. Essa dupla tragédia quase destruiu Max Planck. “Há momentos agora”, escreveu ele ao amigo Hendrick Lorentz, “em que duvido do valor da própria vida.”

Planck encontrou consolo para a tragédia pública e doméstica tanto no trabalho quanto junto aos netos, que ajudou a criar. Seus princípios quânticos estavam ganhando cada vez mais aceitação no mundo da ciência e haviam se expandido para praticamente todas as áreas da física. A constante h que ele teorizara passou a ser considerada uma constante fundamental da

natureza, o equivalente do c de Einstein, a velocidade da luz.

OS NAZISTAS E A “FÍSICA ALEMÃ”

Um novo período de especial importância na vida de Planck teve início na aurora da era nazista. Em 1930, Planck tornou-se presidente do Instituto Kaiser Wilhelm, de Berlim, que passou então a ser chamada Sociedade Max Planck. Já na casa dos 70 a essa altura, Planck gozava de um renome no mundo da ciência que só ficava aquém do de Einstein.

O período da dominação nazista na Alemanha foi difícil tanto para a ciência quanto para Max Planck pessoalmente. Estavam em jogo Einstein, por ser judeu, e as teorias da relatividade e a física quântica. Os antisemitas identificavam a relatividade e as teorias quânticas como obra decadente de judeus. Em contraposição, essa ala direitista exaltava as virtudes da física aplicada, chamada “física alemã”, opondo-a à contaminada física teórica ou judaica. Muitos cientistas alemães aderiram à facção nazista, e Planck se viu arrastado para essa luta vil. Tomou uma posição ambivalente. Por um lado, as importantes e prestigiosas sociedades científicas de que era um membro influente permaneceram em silêncio, não saindo em defesa de Einstein. Na intimidade, Planck condenava os ataques nazistas a Einstein como “imundície quase inacreditável”. Em público, tentava se manter fora do que chamava de “questões políticas”. Por outro lado, defendia vigorosamente as teorias da relatividade. Como presidente da Sociedade dos Cientistas e Médicos Alemães, propôs que Einstein fosse convidado para discursar durante a assembleia anual. Planck tinha a esperança de que a lógica irrefutável da ciência de Einstein pudesse ter sucesso. A princípio Einstein aceitou o desafio, mas foi obrigado a voltar atrás depois de receber ameaças de morte. Ao tentar separar a ciência da política das ruas Planck estava travando uma batalha perdida.

Em janeiro de 1933, Adolf Hitler tornou-se o chanceler do Reich e os nazistas assumiram pleno poder. Max Planck era secretário da Academia de Ciência e presidente do Instituto Kaiser Wilhelm, posições-chave no *establishment* científico em duas organizações que dependiam das verbas do Reich para subsistir. Planck viu-se obrigado a escolher entre renunciar a seus cargos e deixar o país ou permanecer e tentar moderar as políticas nazistas. Escolheu a segunda alternativa. Sua esperança era promover o interesse da ciência, mas não haveria soluções conciliatórias.

A essa altura Einstein havia decidido emigrar para os Estados Unidos. Cartas trocadas pelos dois físicos revelam suas diferentes atitudes com relação à conveniência de contemporizar com os nazistas, e eles terminariam por se dividir quanto a essa questão. Planck lutou longa e arduamente para proteger seus alunos e colegas judeus, mas afinal não conseguiu mais que adiar sua perseguição. Embora nunca tenha emprestado sua voz e prestígio ao regime nazista de maneira alguma, nunca se ergueu firmemente ou publicamente contra ele. Quando os nazistas expulsaram das universidades todos os professores e alunos judeus e Planck permaneceu em silêncio, Einstein rompeu a longa relação que os unia e nunca mais voltou a falar com ele.

Embora Planck nunca lhe tivesse feito oposição pública, o regime nazista alimentava sentimentos ambíguos em relação a ele. Por um lado, era um cientista de renome mundial e ele

e sua fama eram usados no esforço de propaganda nazista. Por outro, continuava a defender a relatividade (ainda que tivesse cessado de usar o nome de Einstein em conexão com as teorias). Essa foi uma típica concessão de Planck, que prejudicou sua reputação no exterior. Quando Planck completou 80 anos, Hitler enviou-lhe seus votos de felicidade, sendo que, ao mesmo tempo, Joseph Goebbels estava tentando provar que ele tinha um sexto de sangue judeu, não sendo portanto apto a conduzir a ciência alemã.

Apesar da idade, Planck manteve sua pesada carga horária de aulas durante os anos da guerra. Em 1943, já falava mais sobre filosofia e religião que sobre física. O filho e neto de pastores havia retornado à teologia. E haveria de precisar de grandes doses tanto de filosofia quanto de religião para consolá-lo no ano seguinte.

No início de 1944, um grande bombardeio aéreo sobre Berlim resultou na destruição do subúrbio de Grönewald, onde a família Planck morava havia muitos anos. Nada se salvou da casa de Planck. Ele perdeu sua biblioteca, seus arquivos, seus diários e todos os mementos de uma longa e produtiva vida na ciência. Ainda estava em boas condições físicas e mentais. Apenas um ano antes, escalara uma montanha de 3.000 metros. Permaneceu otimista mesmo depois de o bombardeio lhe ter custado todos os seus bens terrenos e, aos 86 anos, começou a trabalhar numa nova série de aulas.

No final de 1944, o último filho vivo de Max Planck, seu amado Erwin, foi preso em associação com o conluio para matar Hitler. Um tribunal nazista rapidamente o considerou culpado e o condenou à morte. Talvez Erwin não estivesse realmente envolvido na tentativa de assassinato, mas era fato que conhecia muitos dos conspiradores e não há dúvida de que simpatizava com a causa deles. É possível que o próprio Planck soubesse da tentativa de golpe. Ele e o filho eram muito ligados e ambos pertenciam ao clube onde os conspiradores se reuniam.

Planck usou todos os meios políticos a seu alcance para salvar o filho. Segundo um relato do que se seguiu, um oficial nazista de alta patente entrou em contato com Planck e propôs o seguinte arranjo: Planck ingressaria finalmente no partido nazista, somando à sua causa o ainda considerável prestígio internacional de que gozava. Em sinal de reconhecimento, tentariam comutar a sentença de Erwin num período de prisão. O ancião recusou. Em 23 de fevereiro de 1945 Erwin foi executado.

Planck ficou arrasado com essa perda. A uma sobrinha e um sobrinho, escreveu: “Ele era uma parte preciosa de meu ser. Era a minha alegria, meu orgulho, minha esperança. Não há palavras que possam descrever o que perdi com ele.”

O último ano da guerra na Europa foi extraordinariamente difícil para o velho cientista. Ele e sua segunda mulher foram novamente expulsos por um bombardeio da casa em que se haviam refugiado e tiveram de se esconder na mata e dormir em montes de feno. Finalmente, o idoso casal foi salvo por tropas americanas que avançavam pela área.

Depois da guerra, Planck tentou reconstituir a ciência alemã. Em primeiro lugar, aceitou um convite da Royal Society de Londres para participar da comemoração, adiada pela guerra, do tricentésimo aniversário de Isaac Newton. Único alemão convidado, Planck sentiu-se no dever de comparecer. Estava também intensamente envolvido na tentativa de reconstituir o Instituto Kaiser Wilhelm como um centro de pesquisas físicas. Nesse esforço ele foi bem-sucedido, dotando o centro de um quadro de físicos em sua maioria não nazistas, em desgraça havia muito tempo, e mudando o nome da organização para Instituto Max Planck. Foi nomeado

presidente, exercendo o cargo até que Werner Heisenberg o sucedeu. Planck retornou então para Göttingen, onde passou os últimos dois anos de sua vida, honrado e respeitado.

Poderia Planck ter feito mais em oposição ao regime nazista? Einstein, por exemplo, teve dificuldade em perdoá-lo pelo silêncio e a transigência que manifestou, ainda que com relutância, em face da destruição do professorado judaico. Ali onde Einstein vira a resistência como um imperativo moral, Planck tentara encontrar uma solução de compromisso e trabalhar no seio do sistema. Em retrospecto, a escolha de Planck foi um trágico fracasso, mas na época ele talvez pensasse estar fazendo o melhor que podia tanto para seu país quanto para a ciência. Em última análise, ele foi um homem bem-intencionado imprensado entre boa ciência e má política. Até Einstein reconheceu a importância de Planck como cientista. Em 1948, escreveu a seguinte tocante homenagem, intitulada “Tributo a Max Planck”.

Muitos tipos de homens se devotam à ciência, e nem todos no interesse da própria ciência. Há homens que ingressam em seu templo porque ele permite a exibição de talentos particulares. Para essa classe de homens a ciência é uma espécie de esporte em cuja prática exultam, tal como um atleta exulta no exercício de suas habilidades musculares. Há uma outra classe de homens que entram no templo para fazer a oferenda de sua massa encefálica na esperança de um retorno lucrativo. Esses homens só são cientistas graças a alguma circunstância casual que se ofereceu quando faziam sua escolha de carreira. Se as circunstâncias presentes tivessem sido outras, poderiam ter se tornado políticos ou empresários. Se um anjo de Deus descesse e expulsasse do templo da ciência todos os que pertencem às categorias que mencionei, temo que ele ficaria quase vazio. Mas alguns adoradores ainda permaneceriam — alguns de outras épocas e alguns da nossa. A estes últimos pertence o nosso Planck. E é por isso que o amamos.

A contribuição de Max Planck para a ciência fez dele um “cientista dos cientistas”, respeitado por colegas de todos os campos e de todas as nacionalidades. Em 1918, quando lhe foi conferido o Prêmio Nobel de Física, a ocasião foi marcada pelo unânime endosso de Albert Einstein, Niels Bohr, Ernest Rutherford e Werner Heisenberg — que poderiam todos ter merecido a honra, mas que concordaram incondicionalmente em que ela pertencia acima de tudo a Planck.

No dia 4 de outubro de 1947, aos 90 anos, Planck faleceu de um derrame. A história se lembrará dele por suas duas mais importantes descobertas: a física quântica e Albert Einstein.

O LEGADO DE PLANCK

Planck certamente não previu as implicações a longo prazo de sua descoberta conceitual. Nos capítulos sobre Newton e Einstein, falei de seus predecessores, os gigantes em cujos ombros se ergueram. No caso de Planck, seus descendentes intelectuais é que são importantes. No período entre 1900 e 1930, cientistas como Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Niels Bohr e Werner Heisenberg tomaram o conceito original de Planck e o desenvolveram, transformando-o no que hoje chamamos *mecânica quântica*. Nem Planck nem Einstein foram entusiásticos na aceitação dos desdobramentos lógicos de suas ideias originais, em particular

os três princípios fundadores da mecânica quântica: a dualidade onda-partícula, a natureza probabilística da realidade física e as resultantes incertezas inerentes a todas as medições físicas. Todos os três são importantes sinalizadores que guiam nosso caminho através do reino do muito pequeno. Como é através dessa terra estranha que iremos viajar pelo restante de nossa jornada, a introdução geral a esses fundamentos que se segue servirá como nosso passaporte para o “país do *quantum*”.

FUNDAMENTOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

Estranhos fenômenos ocorrem no mundo do muito pequeno. Um dos mais difíceis de entender é a dualidade onda-partícula. A física clássica faz uma distinção clara entre uma onda e uma partícula. No reino do muito pequeno, porém, essas distinções se todam. Numerosos experimentos mostraram que, no estranho mundo dos átomos, uma entidade física consegue de algum modo possuir uma característica dual, aparecendo por vezes como uma partícula e comportando-se por vezes como uma onda. Uma minúscula e precisa partícula e uma onda espalhada parecem ser dois conceitos inteiramente diversos, mas no mundo subatômico os dois parecem se fundir.

Planck e Einstein descobriram a dualidade onda-partícula da luz, mas não se deram conta de que essa concepção podia ser ampliada a todas as partículas subatômicas. O francês Louis de Broglie foi o primeiro a sugerir essa singular ideia em 1920. Ele fez essa sugestão especulativa e “absurda” em sua dissertação de doutorado e de início ela não foi bem recebida. De Broglie especulou que, se uma onda de energia luminosa podia se comportar como um punhado de partículas (fótons), então, se a natureza fosse verdadeiramente simétrica, como diziam alguns, elétrons e prótons talvez possuísem propriedades ondulatórias. De início a ideia foi rejeitada pelos orientadores acadêmicos de de Broglie e, não tivesse sido a reação favorável do próprio Einstein, ele talvez nunca tivesse recebido seu grau de doutor. Como hoje sabemos, de Broglie estava certo e sua hipótese foi confirmada por experimentos apenas três anos depois que a apresentou.

A física quântica nos impele para o mundo da filosofia. Uma árvore que cai na floresta faz algum som se não houver ninguém lá para ouvi-lo? Se definimos *som* como a sensação produzida pela estimulação dos órgãos auditivos por vibrações transmitidas através do ar, então sem a presença de um ouvido não há som. Outro exemplo: quando observamos uma estrela no céu noturno não estamos olhando realmente para a estrela, mas para a sua luz, a qual pode ter levado um milhão de anos para atingir nossos olhos (a estrela pode até não estar mais lá). Se definimos luz como radiação eletromagnética a que os órgãos da visão reagem, não há nenhuma luz (e nenhuma estrela) sem a presença dos olhos. O objetivo desta incursão pela filosofia é demonstrar que o observador desempenha um papel no observado, e é precisamente isso que a física quântica revela.

Se esse primeiro princípio da física quântica pode ser compreendido bem rapidamente, o segundo, que diz respeito à natureza probabilística da realidade física, é uma outra história. Ele afirma que as características ondulatórias de um objeto fornecem informação matemática sobre a probabilidade que ele tem de ser observado, detectado ou medido numa posição

particular. Esse conceito implica que o acaso desempenha um importante papel na realidade física. Durante 300 anos, a física clássica presumia a precisão rigorosa e o determinismo. Agora esse pressuposto básico estava em questão.

Que entendemos por determinismo? A física newtoniana descreve um mundo determinístico. Se você disparasse um projétil de um canhão, lançasse um foguete no espaço ou descobrisse um novo cometa no sistema solar, poderia prever as trajetórias desses objetos com total certeza. Em teoria, se você conhecesse as forças e as condições iniciais, tudo isso seria previsível. A teoria quântica põe essa certeza em questão. Ela afirma que as condições iniciais são inerentemente incertas. Em se tratando de prever a localização, a energia ou a velocidade de uma partícula, seria preciso contentar-se com probabilidades.

Para Einstein, essa teoria da realidade parecia completamente intolerável. Em carta ao amigo Max Born disse que, se era assim que o mundo funcionava, “preferiria ser um sapateiro, ou até um empregado numa casa de jogo a ser um físico”. Para os dois antigos defensores da fé, as coisas logo ficaram ainda piores.

Mas a teoria quântica fica ainda mais esdrúxula. A dualidade onda-partícula e sua interpretação probabilística levou ao passo lógico seguinte: a incerteza inerente à medida da posição de uma partícula. O princípio da incerteza, postulado por Werner Heisenberg em 1927, declara que partículas não podem ter sua posição e sua velocidade bem definidas. Quanto mais precisamente você medir a posição de uma partícula, menos precisamente poderá medir sua velocidade, e vice-versa. No mundo quântico, afirmou Heisenberg, uma partícula — não perturbada por qualquer tentativa de observá-la — pode estar em diferentes lugares ao mesmo tempo. Os físicos nos dizem que um único fóton que se desloca por um cristal segue simultaneamente todas as rotas ópticas possíveis através do material. Em outras palavras, o fóton se comporta com uma hoste de ondas, e o modo como ele emerge do cristal depende do modo como as ondas se reforçam e/ou se cancelam ao longo desses diferentes caminhos.

Se isto lhe parece misterioso, você está em boa companhia. Um aluno de Niels Bohr em Copenhague queixou-se a ele de que a física quântica o deixava tonto. Bohr respondeu que quando alguém diz que consegue pensar sobre física quântica sem ficar tonto, só mostra que não entendeu coisa alguma sobre ela.

Vimos que a revolução que Max Planck desencadeou com sua original concepção de que a energia se manifesta em pequenos pacotes conduziu a princípios que ele não concebeu nem aceitou totalmente durante sua vida: dualidade, probabilidade e incerteza. No entanto, esses princípios formam o fundamento atualmente aceito da mecânica quântica. Nos capítulos que se seguem, veremos que é sobre esse fundamento que a estrutura da física moderna se ergue.

A mecânica quântica é mais maluca que a teoria da relatividade, e nem os que a praticam, os próprios físicos, entendem plenamente o que se passa dentro do mundo do incrivelmente pequeno. Assim como tivemos de expandir nossas imaginações até o limite para compreender a imensidão do universo, assim também temos agora de exercitar nossa faculdade de imaginar na direção oposta para compreender o vertiginosamente pequeno. Nosso primeiro passo será voltar nossa atenção para o átomo, para seus núcleos, e para os homens que determinaram sua estrutura para nós.

^a De acordo com o biógrafo de Einstein, A. Pais, em dezembro de 1916 o imperador autoriza a designação de Einstein para a direção do Physikalische Technische Reichsanstalt. Em 1º de outubro de 1917 o Instituto Kaiser Wilhelm inicia suas atividades sob a direção de Einstein. Cf. *Sutil é o Senhor, a ciência e a vida de Albert Einstein*. Abraham Pais, Rio de Janeiro, Nova

ERNEST RUTHERFORD

Toda ciência é física ou coleção de selos.

Ernest Rutherford

Franco e desinibido, pisando calos sem ver a quem, Ernest Rutherford irrompeu no cenário da física na virada do século XX e se manteve no centro do palco por 30 anos. Seu trabalho marca o início da era da física nuclear, mas, ironicamente, uma de suas mais importantes contribuições para a ciência foi em geologia, campo sobre o qual pouco conhecia. A questão específica em pauta era a idade da Terra. Segundo A.S. Eve, seu biógrafo, Rutherford caminhava um dia pelo campus de Cambridge carregando uma pequena pedra preta quando encontrou um geólogo conhecido. “Diga-me”, perguntou ao colega, “que idade se supõe que a Terra tem?” A resposta foi que vários métodos levavam a uma estimativa de 100 milhões de anos. “Adams”, ele disse ao professor, “tenho absoluta certeza de que este pedaço de pechblenda^a na minha mão tem 700 milhões de anos de idade.” Pode-se imaginar a surpresa do geólogo.

A razão por que Rutherford podia fazer sua sensacional afirmação era que em 1905 ele ajudara a fundar a ciência da datação de materiais. Esse procedimento transformara enormemente o campo da geologia. E não foi apenas a geologia que mudou, mas a paleontologia, a antropologia, a arqueologia, na verdade todas as disciplinas científicas envolvidas na determinação da data de origem de uma rocha, espécime ou fóssil. A idade da Terra é um exemplo ilustrativo. Na década de 1920, graças à datação radiométrica, geólogos, físicos e astrônomos em geral já admitiam que a Terra tinha bilhões de anos de idade (a estimativa atual é 4,5 bilhões de anos).

Impõem-se aqui uma ou duas palavras sobre os termos *radiação* e *radioatividade*. *Radiação* é o termo mais amplo e significa tudo que é emitido de uma fonte. Na física atômica, *radiação* refere-se à radiação eletromagnética (raios X, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, micro-ondas, ondas de rádio). Na física nuclear, além das ondas eletromagnéticas (raios gama), ela inclui raios alfa (núcleos de hélio) e raios beta (elétrons). *Radioatividade* refere-se ao fenômeno de emissão espontânea de várias radiações (raios alfa, beta e gama) por núcleos instáveis.

O feito crucial de Rutherford foi conceber a ideia de determinar a meia-vida de substâncias, e assim sua idade precisa. *Meia-vida* designa o tempo necessário para metade de dada quantidade de material radioativo decair, isto é, liberar energia. Um átomo decai quando se desintegra, em outras palavras, quando passa da instabilidade para a estabilidade. Todas as substâncias radioativas tendem a formar substâncias estáveis com o tempo, e nesse processo emitem radiação. As meias-vidas podem variar de menos de um milionésimo de segundo a

milhões de anos. A meia-vida de qualquer substância particular é constante, não sendo afetada por condições físicas como pressão ou temperatura. Por isso, pode-se usar o processo de radioatividade no cálculo da passagem do tempo, medindo a fração dos núcleos que já decaíram. Como ocorre frequentemente na ciência, Rutherford havia feito essa descoberta quase por acidente, ao trabalhar sobre o fenômeno mais geral da radiação.

Ernest Rutherford faz um contraste muito interessante com Albert Einstein. Enquanto Einstein foi o teórico-modelo, trabalhando sozinho e fiando-se em experimentos mentais, Rutherford foi o maior dos experimentalistas. Sob esse aspecto, ele é frequentemente comparado com Michael Faraday, que não aceitava uma ideia enquanto não a pudesse demonstrar em condições de laboratório. Se por um lado Einstein permanecia na solidão e refletia profundamente sobre questões da física, Rutherford liderava equipes de colegas, a quem chamava de seus “garotos”, na realização de experimentos complexos no reino da física subatômica. Um neozelandês grandalhão e abrutalhado, com um basto bigode de pontas caídas e uma voz alta e estrepitosa, Rutherford ficou famoso por sua crença profundamente arraigada de que praguejar durante um experimento fazia-o funcionar melhor e, em vista dos resultados que alcançou, é possível que estivesse certo. Sob esse aspecto Rutherford era um discípulo de Mark Twain, que disse: “Em momentos de aflição, praguejar proporciona um alívio negado até à prece.”

A ciência recruta seus heróis nos mais variados meios e às vezes de sítios geográficos remotos. O caso de Rutherford, o homem que foi chamado o pai da energia nuclear, demonstra bem isso.

OS RUTHERFORD DE NELSON

Ernest Rutherford nasceu em Brightwater, perto de Nelson, na costa norte de South Island, Nova Zelândia, no dia 30 de agosto de 1871. Foi o quarto dos 12 filhos de James e Martha Rutherford, neozelandeses de primeira geração, que haviam sido levados da Escócia para lá quando crianças. Naquela época Nelson era um burgo pioneiro, com construções de madeira. Muitos anos mais tarde, quando, em reconhecimento por suas realizações científicas, recebeu um título de nobreza, Rutherford tornou-se “barão Rutherford de Nelson”, certamente o primeiro *peer*^b daquela pequena comunidade.

No início da década de 1870, Nelson era uma comunidade rural isolada, habitada sobretudo por trabalhadores imigrantes escoceses em busca de fazer uma vida nova num mundo novo. Sua sociedade, contudo, era moldada segundo as linhas das comunidades vitorianas que haviam abandonado. A educação era extremamente respeitada nessa sociedade. Além de fabricar e consertar rodas, o pai de Ernest, James, era construtor autodidata e lavrador. Sua mãe, Martha, era professora. O casal fez muitos sacrifícios para que os filhos pudessem receber uma boa educação.

A família Rutherford era grande — com 12 crianças — e todos participavam dos afazeres domésticos. Segundo o quadro da família que irmãos e irmãs de Rutherford traçaram mais tarde, já idosos, eles formavam uma família séria, devota e feliz. Eram cultos também. O bem que a Sra. Rutherford mais prezava era seu piano, e o marido, James, tocava violino. Todos

liam, e ouvir alguém ler em voz alta à noite era um entretenimento muito apreciado. Ernest desenvolveu um gosto por Dickens, bem como por histórias de revistas sensacionalistas e romances policiais, que continuou a ler pelo resto da vida.

O interesse de Rutherford cedo se estendeu à ciência. Aos dez anos, possuía um exemplar de um livro muito difundido, intitulado *Manual de física*, da autoria de um professor chamado Balfour Stewart. O livro de Stewart assemelhava-se aos livros de física sem mestre de nossos dias ao requerer o uso de materiais simples como moedas, pesos, velas e utensílios domésticos para demonstrar as ações dos princípios básicos da física. Evidentemente, o pequeno Rutherford achou esse livro fascinante, e ele deve ter contribuído significativamente para seu interesse pela física experimental. Sabemos também que, quando menino, Rutherford se fazia notar por sua habilidade manual. Mexia com relógios e fazia miniaturas das rodas d'água que seu pai usava em moinhos.

Em 1887, aos 16 anos, Ernest ganhou a primeira de suas muitas bolsas de estudo, dessa vez para o Nelson College, uma escola secundária “pública” particular, similar às equivalentes da Inglaterra. Ali, foi um bolsista destacado, um aluno estimado e um entusiástico jogador de rúgbi. Ganhou prêmios em história, línguas e matemática.

Uma segunda bolsa de estudo permitiu a Rutherford matricular-se no Canterbury College, em Christchurch, uma instituição fundada no ano em que ele nascera. Ali ele se concentrou em ciência e matemática e teve a sorte de ficar sob a autoridade de professores muito bons em ambas as matérias. Ao concluir seu curso de três anos, Rutherford recebeu o grau de bacharel e uma bolsa de estudo para matemática, o que lhe permitiu continuar no Canterbury por mais um ano, estudando em nível de pós-graduação. Recebeu seu grau de mestre em 1893, com honras de primeira classe em matemática, física matemática e ciência física.

Dando aulas em tempo parcial para prover o próprio sustento, Rutherford permaneceu ainda outro ano no Canterbury fazendo pesquisa em física e estudando as propriedades das ondas eletromagnéticas — ondas de rádio —, recém-descobertas pelo físico alemão Heinrich Hertz. Rutherford descobriu que, com um aparelho que ele mesmo projetara, podia detectar essas ondas mesmo depois que haviam atravessado paredes de alvenaria. É interessante notar que isso foi antes de Marconi começar seus experimentos sobre a comunicação sem fio.

Por vezes é fascinante voltar os olhos para as previsões de cientistas acerca de suas próprias descobertas e ver o quanto eles se enganavam. Nem Marconi nem Rutherford anteviram a notável extensão de usos a que essas ondas seriam aplicadas. Marconi previa que os usuários do rádio seriam companhias de navios a vapor, jornais e serviços navais que precisavam de comunicações direcionais, ponto-a-ponto. Rutherford pensava que as possibilidades comerciais de seu aparelho de comunicação sem fio ficariam limitadas à comunicação entre faróis, na costa, e navios que passassem ao largo. Nem mesmo o pioneiro da recente indústria radiofônica foi capaz de imaginar uma finalidade para a radiodifusão, exceto talvez ajudar os pregadores a fazer seus sermões. De todo modo, Rutherford concentrou seu trabalho não na comunicação sem fio mas antes no fenômeno da radioatividade. Esse seria seu campo de trabalho pelos 40 anos seguintes.

Quanto à sua vida pessoal, na época em que morou em Christchurch Rutherford conheceu Mary Newton, a filha de sua senhoria, e se apaixonou por ela. É digno de nota que, durante esse tempo, seu primeiro longo período longe de casa, ele adquiriu o hábito de escrever para a mãe pelo menos duas vezes por semana. Praticou essa correspondência durante toda a vida

da mãe, que viveu até os 92 anos. A mãe foi sem dúvida uma influência dominante na vida de Rutherford, e ter suas realizações na ciência e na vida aprovadas por ela parece ter sido o que mais valorizava.

Em 1895, como fruto de dois notáveis artigos sobre radioatividade, Rutherford ganhou uma importante bolsa de estudo, embora tivesse sido o segundo colocado. O primeiro lugar coubera a outro protegido neozelandês chamado J.C. Maclaurin. O prêmio só foi oferecido a Rutherford porque Maclaurin retirou sua candidatura, tendo decidido ficar na Nova Zelândia e se casar. A bolsa fora instituída com os lucros da famosa Grande Exposição de Londres, de 1851, e seus termos permitiam ao agraciado inscrever-se na instituição de sua escolha. Rutherford escolheu o Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, dirigido na época por J.J. Thomson, a maior autoridade mundial em fenômenos eletromagnéticos. Fazia pouco tempo que Cambridge alterara suas normas para admitir graduados de outras escolas e Ernest Rutherford tornou-se o primeiro assistente de pesquisa do laboratório.

Segundo uma história muito repetida, Rutherford estava em casa desencavando batatas quando sua mãe lhe levou a notícia de que ganhara a bolsa para Cambridge. Enquanto ela lhe falava, Rutherford continuou cavando até desenterrar um tubérculo. Então, jogando a pá de lado e erguendo a batata no ar, gritou: “Pronto! Esta é a última batata que vou desencavar!” E estava certo.

Naquele momento — final do século XIX — inaugurava-se um novo capítulo na compreensão humana da estrutura da matéria e Rutherford estava destinado a desempenhar um importante papel em sua escrita. Mas na verdade foi com duas descobertas acidentais, uma na Alemanha e outra na França, que o novo capítulo começou.

RADIOATIVIDADE

Talvez você se lembre da história dos príncipes de Serendip, que nunca conseguiam realizar o que pretendiam, mas sempre descobriam alguma coisa mais interessante pelo caminho. A história da ciência está repleta de exemplos de descobertas felizes por acidente, um caso notável sendo a descoberta dos raios X em 1895.

Num laboratório da Universidade de Würzburg, no sul da Alemanha, o físico Wilhelm Conrad Roentgen fazia experimentos com eletricidade num tubo de vácuo parcial. Seu interesse era estudar a luminescência produzida pelos raios catódicos. O laboratório estava escuro e, por acaso, Roentgen notou que uma tela que atravessava a sala, e que ele sabia ser revestida de bário, platina e cianeto, brilhava na escuridão toda vez que ele acendia o tubo, como se a luz do tubo a estivesse atingindo. Sabia que isso não era possível porque o tubo estava fechado numa caixa preta de papelão de onde a luz não podia escapar. Fosse como fosse, quando Roentgen desligava o tubo de raios catódicos o brilho cessava. Quando o ligava de novo, o brilho reaparecia. Levou o papel revestido para a sala ao lado e ele continuou a brilhar quando o tubo de raios catódicos era ligado. Roentgen concluiu que o tubo estava produzindo alguma forma de radiação que conseguia penetrar o papelão e até as paredes do laboratório. Ao pôr a mão entre o tubo e a tela, viu, para seu espanto, a imagem dos ossos de sua mão expostos, como se a carne tivesse se tornado translúcida.

Com esse experimento acidental, Roentgen havia descoberto o que chamou de raios X. Esses raios são uma radiação de comprimento de onda muito pequeno (de alta frequência), de fato a radiação de comprimento de onda mais curto conhecida até então. Poucos anos depois, Rutherford iria adiante, mostrando que os raios gama, associados com a radioatividade, têm comprimentos de onda ainda mais curtos.

Roentgen comunicou finalmente sua descoberta ao mundo num artigo publicado em dezembro de 1895. Os raios X foram recebidos não só com surpresa mas com escândalo. Lord Kelvin, na época o mais importante cientista da Inglaterra, qualificou-os, a princípio, de fraude bem elaborada. Durante algum tempo os recém-descobertos raios X foram chamados de raios Roentgen, mas como a maioria das pessoas que não falava alemão achava difícil pronunciar o nome, raios X tornou-se o termo mais popular. A despeito das dúvidas de Lord Kelvin, o uso médico dos raios X não tardou a se desenvolver. De fato, apenas quatro dias depois que a notícia de sua descoberta chegou aos Estados Unidos, os raios X foram usados para localizar uma bala alojada na perna de um paciente. Eles se tornaram um meio maravilhoso de explorar o interior do corpo humano porque atravessam facilmente os tecidos moles e tendem a ser detidos pelos ossos, que se compõem de cálcio e de átomos de fósforo, mais pesados. Quando uma chapa fotográfica é posta atrás do corpo, os ossos aparecem brancos, em contraste com as imagens mais escuras dos tecidos mais moles. Repentinamente tornou-se fácil detectar fraturas ósseas, assim como objetos estranhos nos corpos e cáries nos dentes. Os cientistas descobriram também que os raios X podiam ser usados para matar células cancerosas além do alcance do bisturi de um cirurgião. Infelizmente, descobriram também que radiação de alta energia podia *causar* câncer. Tragicamente, como se levou algum tempo para conhecer as propriedades nocivas dos raios X, pelo menos cem das primeiras pessoas que trabalharam com eles e com materiais radioativos morreram de câncer antes que esses efeitos fossem compreendidos.

Assim que foram descobertos, os raios X pareceram misteriosos a muita gente. Várias empresas ganharam muito dinheiro explorando essa perplexidade e vendendo “roupas de baixo à prova de raios X” para mulheres. Em Nova Jersey, chegou a ser apresentado na assembleia legislativa um projeto de lei que proibia o uso de binóculos de raios X no teatro. Aqueles misteriosos raios X foram vistos por muitos como uma ameaça à moralidade pública. A comunidade científica, é claro, teve uma visão diferente. Em 1901, Wilhelm K. Roentgen recebeu o primeiro Prêmio Nobel que contemplou o campo da física.

OS ELEMENTOS RADIOATIVOS

A outra importante descoberta que conduziu ao trabalho de Rutherford foi feita na França, em 1898, por Henri Becquerel. Mais uma vez, o acaso desempenhou um papel. Henri Becquerel descobriu que, de alguma maneira, um minério de óxido de urânio, chamado pechblenda, escurecia uma chapa fotográfica embrulhada e não exposta em seu laboratório. Os *raios Becquerel*, como vieram a ser chamados, penetravam objetos opacos à luz. Eles atraíram a atenção da jovem Marie Sklodowska Curie e seu marido Pierre, e os Curie fizeram deles o foco de seu trabalho. Marie Curie acreditava que a radioatividade de baixo nível de minérios

portadores de urânio resultava de quantidades muito pequenas de certas substâncias altamente radioativas. Seu marido, Pierre, deixou de lado sua própria pesquisa para ajudá-la no imenso trabalho de distinguir um vestígio elusivo em meio a uma enorme quantidade de matéria-prima. A pesquisa exigia que cada um dos elementos radioativos fosse isolado e tivesse seu peso atômico determinado, tarefa que só pôde ser cumprida mediante o processamento de toneladas de minério de pechblenda. Como lhes faltava espaço no laboratório, os Curie tiveram de improvisar um laboratório maior num barracão de madeira. Ali, sob um calor sufocante no verão e um frio de congelar no inverno, os Curie levaram persistentemente a cabo seus esforços capitais para isolar os elementos radioativos e determinar seus pesos atômicos. O resultado foi a descoberta de dois novos elementos, ambos altamente radioativos, a que deram os nomes de polônio e rádio. Por esse trabalho no campo da radioatividade, os Curie ganharam juntos o Prêmio Nobel de Física em 1903. Em vez de explorar comercialmente sua descoberta, os Curie puseram a fórmula do rádio à disposição da comunidade científica gratuitamente, de tal modo que a natureza da radioatividade pudesse ser mais estudada.

Depois que Pierre Curie morreu num acidente de trânsito, atingido por uma carroça puxada a cavalo, Marie Curie levou sua pesquisa adiante sozinha. (O Congresso de Radiologia realizado na Bélgica em 1910 homenageou a memória de Pierre Curie dando o nome de *curie* à unidade de medida da radioatividade.) Apesar do difundido preconceito contra mulheres na ciência física, Marie Curie foi eleita por unanimidade pelo Conselho Docente da Sorbonne para suceder a Pierre em sua cátedra na faculdade. Ela se tornou assim a primeira mulher a lecionar na Sorbonne e, em 1911, foi agraciada com o Prêmio Nobel de Química, tornando-se a primeira pessoa a ganhar dois prêmios Nobel.

Embora Marie não o compreendesse na época, os persistentes problemas de saúde e exaustão física que a afligiam deviam-se em grande parte à sua constante exposição aos efeitos debilitantes da radiação, que acabariam por levá-la à morte em 1934.

CAMBRIDGE

Logo que chegou a Cambridge, em 1895, Rutherford trabalhou sob a direção de Joseph John (J.J.) Thomson, um professor de física experimental que se empenhara muito em recrutá-lo. Como Rutherford, o renomado Thomson era um viciado no trabalho, tão devotado à sua pesquisa que deixava pouco tempo para qualquer outra coisa. Conta-se que um dia, a caminho de casa para o almoço, Thomson comprou uma calça nova, tendo se deixado convencer por um colega de que sua calça velha estava frouxa e puída demais. Em casa, ele vestiu a calça nova e voltou para o laboratório. Sua mulher, que estivera fazendo compras, achou a calça velha em cima da cama. Assustada, telefonou imediatamente para o laboratório, certa de que o marido, algo distraído, voltara para o trabalho sem vestir calça nenhuma.

Em pouco tempo Rutherford adquiriu renome em Cambridge. Ele levava consigo seu detector de ondas de rádio e o montara rapidamente para receber sinais de fontes situadas a até 800 metros de distância. Esse trabalho causou imediata impressão nos professores de Cambridge.

Thomson e a mulher fizeram todo o possível para ajudar Rutherford a se adaptar à vida

social e acadêmica um tanto peculiar, rigorosa, de Cambridge. De início, um pouco constrangido e na defensiva com relação a seus antecedentes “coloniais”, Rutherford havia despertado um ciúmezinho entre os membros da confraria do laboratório Cavendish com suas exibições de brilhantismo. Sua relação com Thomson foi importante e as cartas de ambos deixam claro que havia grande consideração de parte a parte.

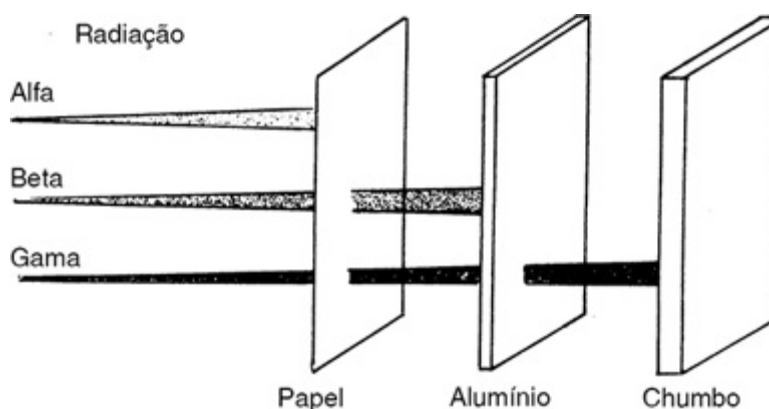
Thomson pediu a Rutherford que o auxiliasse no estudo dos efeitos que a passagem de um feixe de raios X por um gás produziria. Teria sido razoável que Rutherford hesitasse em participar desse trabalho, já que assumir essa responsabilidade o obrigaria a pôr de lado seu próprio trabalho sobre o receptor sem fio. (Cabe ressaltar que nessa época Rutherford estava ansioso para ganhar dinheiro suficiente para se casar com Mary Newton, cuja mão pedira dois anos antes, e ele via possibilidades comerciais limitadas para seu receptor.) Seu respeito por Thomson, somado ao desejo de trabalhar na vanguarda da ciência, porém, falaram mais alto. Cerca de dez anos mais tarde, a fama e a fortuna que teriam acompanhado a demonstração do potencial comercial da telegrafia sem fio couberam a Guglielmo Marconi. Mas a decisão de Rutherford foi compensadora a seu próprio modo. Thomson e Rutherford descobriram que os raios X produziam grandes quantidades de partículas eletricamente carregadas, ou portadoras de átomos ionizados, que se recombinavam para formar moléculas neutras. Saber mais sobre os átomos havia se tornado o maior desafio científico da época e a descoberta de Thomson e Rutherford foi o primeiro grande avanço.

O grande passo seguinte coube a Thomson. Acreditava-se até então que os átomos eram corpos elementares simples com várias formas geométricas. Thomson conseguiu mostrar que, ao contrário, os átomos eram mecanismos complexos, com grande número de partes em movimento. Especificamente, conseguiu demonstrar que os átomos dos vários elementos químicos consistem de partes positiva e negativamente carregadas, unidas pelas forças de atração elétrica. Thomson conjecturou que um átomo teria a carga elétrica distribuída de maneira mais ou menos uniforme, com grande número de partículas negativamente carregadas fluando em seu interior. A carga elétrica combinada das partículas negativas — elétrons, como ele os chamou — era igual à carga positiva total, de tal modo que o átomo em seu todo era eletricamente neutro. Por seu trabalho na identificação do elétron, Thomson ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1906.

A CONTRIBUIÇÃO DE RUTHERFORD

Logo no início de sua pesquisa, Rutherford imaginou um experimento que permitiria identificar dois tipos distintos de radiação. O experimento envolvia o estudo do modo como radiações radioativas penetram lâminas de alumínio. Ele descobriu que parte da radiação podia ser detida por uma lâmina de alumínio com 1/500 de centímetro de espessura, ao passo que o restante só podia ser detido por uma lâmina consideravelmente mais grossa. Chamou a primeira radiação, positivamente carregada, de *raios alfa*, raios extremamente poderosos na produção de ionização mas facilmente absorvidos. À segunda radiação, negativamente carregada, chamou de *raios beta*, os quais produziam menos radiação mas tinham maior capacidade de penetração. (*Alfa*, claro, é a primeira letra do alfabeto grego e *beta* é a

segunda.) Um terceiro tipo de radiação foi descoberto em 1900 pelo físico francês Paul Urich Villard. Ela tinha frequência extremamente alta e comprimento de onda curto, sendo portanto a mais penetrante de todas. Essa radiação foi chamada de *raios gama* (da terceira letra do alfabeto grego). Embora chamasse o fenômeno que descobrira de “raios”, Rutherford pensava que eles deviam se compor de partículas extremamente diminutas de matéria. Estava certo, e embora por vezes ainda se use o termo *raios*, sabe-se que as radiações alfa, beta e gama consistem de partículas velozes.^c



RADIAÇÃO Papel é suficiente para deter radiação alfa; alumínio deterá a radiação beta, é preciso chumbo para deter a radiação gama.

Levando adiante esse trabalho inicial, Rutherford veio a se tornar o maior expoente do campo rapidamente mutável da radioatividade. Ele e seus colegas descobriram que a radioatividade que ocorre naturalmente no urânio consiste na emissão, por um átomo de urânio, de uma partícula que se transforma num átomo do elemento hélio, e que o que resta não é mais um átomo de urânio mas um átomo ligeiramente mais leve de um elemento diferente. Novas pesquisas mostraram que essa transmutação era uma numa série que terminava com o isótopo estável de chumbo. Essa descoberta conduziu à conclusão de que o rádio era apenas um elemento da série radioativa. O termo *isótopo* (da palavra grega que significa “mesma posição”) refere-se aos membros de uma família de substâncias que partilham da mesma posição na tabela periódica mas diferem entre si no número de nêutrons que contêm. Essencialmente, os isótopos são variedades de um elemento específico — substâncias idênticas umas às outras em suas propriedades químicas mas diferentes na radioatividade.

Embora sua carreira profissional estivesse nessa altura muito bem encaminhada, Rutherford sentia que o esnobismo que imperava em Cambridge com relação aos que haviam se graduado em outras faculdades, especialmente nas colônias, tolhia seu progresso. E era de progresso que precisava, se quisesse se casar com Mary Newton. Procurou um cargo acadêmico em outro lugar e, armado de uma convincente carta de apresentação fornecida por J.J. Thomson, foi designado para a cadeira de física na Universidade McGill em Montreal, Canadá. No verão de 1900, foi à Nova Zelândia visitar os pais e se casou. O jovem casal fixou residência em Montreal, onde Rutherford ingressou no que era sem dúvida o melhor laboratório de física no Ocidente e retomou suas pesquisas sobre a radioatividade.

Trabalhando com um jovem químico chamado Frederick Soddy, Rutherford entregou-se à investigação de três grupos de elementos radioativos: rádio, tório e actínio. Logo descobriu que o tório ou seus componentes se desintegravam num gás que, por sua vez, se desintegrava num depósito desconhecido, também radioativo. Concluiu que a radioatividade era um

processo em que átomos de um elemento se desintegravam espontaneamente em átomos de um elemento inteiramente diferente, o qual permanecia igualmente radioativo. O artigo que Rutherford escreveu com Soddy sobre esse assunto foi criticado por muitos químicos que acreditavam na indestrutibilidade da matéria. Para alguns, a teoria postulada de que os átomos podiam se cindir para formar tipos de matéria inteiramente diferentes se assemelhava à alquimia medieval. Não demorou muito, porém, para que a qualidade do trabalho fosse reconhecida e a teoria alcançasse aceitação geral. Essa descoberta revolucionou a química por alterar a concepção básica da matéria como algo imutável, mostrando que todos os elementos radioativos sofrem transformação espontânea em outros elementos, até formar finalmente substâncias estáveis.

Rapidamente Rutherford, sempre um trabalhador infatigável, deu mais um passo. Em seus experimentos, descobriu que a radiação de uma substância ativa decrescia com o tempo e pôs-se a tentar compreender esse fenômeno e, se possível, a delinear uma fórmula capaz de prever o processo. Trabalhando com tório, Rutherford descobriu que a radiação decrescia com o tempo em progressão geométrica. No caso do tório, a radioatividade é reduzida à metade de seu valor original em um minuto. No minuto seguinte, decrescia em metade desse valor, de tal modo que após dois minutos restava apenas um quarto do valor original e, após três minutos, apenas um oitavo. Essa taxa de mudança (aumento ou decréscimo) é chamada *exponencial* porque as equações matemáticas que descrevem o processo envolvem a “função exponencial”. Para descrever esse processo, Rutherford introduziu o termo *meia-vida*. Assim, por exemplo, a meia-vida do rádio 226 (o isótopo isolado da pechblenda pelos Curie) é 1.620 anos. A meia-vida do urânio 238 é 4,51 bilhões de anos.

O procedimento da datação por carbono incorpora o fenômeno da meia-vida de uma maneira muito proveitosa. Como todas as coisas vivas sobre a Terra contêm carbono, e como a meia-vida do carbono 14, por exemplo, é 5.570 anos, essa substância é particularmente útil na determinação da idade de artefatos e amostras de muitos outros tipos. Após 5.570 anos, metade dos átomos de carbono 14 em qualquer amostra dada terá decaído em átomos de nitrogênio 14. Comparando-se a quantidade de carbono 14 com a de nitrogênio 14 numa amostra, é possível datar a amostra. Por exemplo, se três quartos do carbono 14 tiverem decaído em nitrogênio 14, pode-se concluir que o material em exame tem 11.140 anos de idade (5.570 para metade do carbono decair e 5.570 para o quarto seguinte — metade da metade restante — o fazer: $5.570 + 5.570 = 11.140$). A datação radiométrica tem uma ampla gama de aplicações em campos que se estendem da arqueologia e a paleontologia à astrofísica e a cosmologia, passando pela geologia e a geofísica.

Embora fazendo descobertas notáveis em seu laboratório, Rutherford tinha menos sucesso em sua função de professor. Lecionar estava entre suas obrigações na McGill e alguns estudantes o achavam enfadonho. Ele murmurava e gaguejava, perdendo-se em suas próprias fórmulas matemáticas no quadro-negro, e com muita frequência dirigia sua fala para um ponto acima das cabeças dos alunos. Alguns estudantes chegaram a preparar uma petição, solicitando que Rutherford baixasse o nível de suas aulas de tal modo que eles pudessem compreender. Por outro lado, saíram da McGill (e mais tarde de Cambridge) vários físicos eminentes que declararam depois que suas vidas e carreiras haviam mudado graças à natureza inspiradora das aulas de Rutherford. Ao que parece, as opiniões sobre a qualidade de seu ensino dependiam da qualidade dos seus alunos.

Durante seus nove anos na McGill, Rutherford escreveu 80 artigos científicos e fez muitas apresentações públicas. Em 1903 foi eleito para a Royal Society de Londres e em 1904 publicou seu primeiro livro, *Rádio-atividade*, que é reconhecido como o clássico nesse campo. Também em 1904, Rutherford sugeriu o uso da quantidade de hélio produzida pelo decaimento radioativo de minérios em rochas para medir a idade da Terra, o que era uma questão de considerável importância na época.

A então controversa obra de Darwin, *A origem das espécies*, publicada em 1859, exigia uma Terra com vários bilhões de anos de idade — só assim as várias espécies teriam podido se desenvolver como o fizeram. Lord Kelvin, um dos maiores cientistas da Inglaterra na segunda metade do século XIX, havia estimado a idade da Terra em apenas 500 milhões de anos. Evidentemente, um ou outro estava errado. A especialidade de Kelvin era termodinâmica, cujas primeira e segunda leis ele formulara: (1) a energia é conservada; isto é, a energia não é criada nem destruída, apenas muda de forma; e (2) alguma energia utilizável é sempre perdida nesse processo. A escala de temperatura absoluta que desenvolveu recebeu seu nome, escala Kelvin. Ele havia calculado a idade aproximada da Terra a partir da idade do Sol, estimada com base na liberação de calor. Kelvin teve o mérito, porém, de admitir que em seus cálculos poderia estar faltando algum fator desconhecido.

A partir de suas descobertas sobre o decaimento radioativo, Rutherford havia encontrado sua própria resposta para o enigma da idade da Terra e falou sobre o tema durante uma reunião da Royal Society. Afirmou que a Terra permanecia tépida por ser aquecida por elementos radioativos presentes nas rochas e em seu núcleo liquefeito e que a taxa de decaimento desses elementos comprovava a antiguidade da Terra e fornecia um meio para sua medição precisa. Rutherford encarava sua audiência com alguma apreensão, notando que Lord Kelvin estava na sala. Para seu alívio, Kelvin logo adormeceu, perdendo a maior parte de sua fala. Exatamente quando chegava ao fim de sua apresentação, porém, viu que Kelvin acordara e estava olhando furibundo para ele. Num átimo de inspiração, Rutherford pensou numa maneira de louvar Kelvin por sua contribuição para o problema. Lembrou que ele havia assinalado que a Terra poderia ter apenas 500 milhões de anos, *a menos que uma nova fonte de energia fosse descoberta*. “Essas palavras proféticas”, prosseguiu Rutherford, “referem-se ao que estamos considerando esta noite, o rádio”. Com esse golpe de diplomacia, Rutherford conquistou o decano da ciência inglesa e inclinou os pratos da balança em favor de uma Terra muito mais velha e para as ideias de Charles Darwin.

O crescente renome de Rutherford na comunidade científica deu lugar à oferta de cátedras em outras universidades. Embora estivesse feliz na McGill, Rutherford desejava retornar à Inglaterra, onde pensava que estaria mais próximo dos principais centros científicos do mundo. Quando o diretor do centro de pesquisas físicas de Manchester demitiu-se do cargo com a condição de ser sucedido por Rutherford, este considerou a posição e o laboratório atraentes demais para serem recusados. Em 1907 ele voltou para a Inglaterra para assumir seu posto na Universidade de Manchester, onde realizaria seu mais importante trabalho.

Se o Cavendish de Cambridge sob J.J. Thomson era o laboratório mais conceituado do mundo, Manchester sob Rutherford era sem dúvida o segundo. A fama cada vez maior de Rutherford atraiu para Manchester um grupo de estudantes de pesquisa extraordinariamente talentoso que deu contribuições significativas para a física e a química.

A família Rutherford encontrou uma casa que lhe convinha, a apenas poucos minutos de bonde da universidade, e logo se assentou no que o biógrafo de Rutherford, David Wilson, chama de o período mais feliz da vida do físico. Gostando de Manchester e de seu povo, ele se lançou no trabalho com o vigor que lhe era característico.

Em Manchester, Rutherford dirigiu um grupo que rapidamente desenvolveu novas ideias sobre a estrutura atômica. Foi a fase mais produtiva de sua vida acadêmica. Nessa época, a própria cidade era um centro cultural e intelectual e a universidade se ufanava de um corpo docente particularmente brilhante. Rutherford gostava da atmosfera de desafio acadêmico e se integrava bem com os historiadores, filósofos e escritores do campus. Se o tivessem qualificado de intelectual, teria zombado, mas seu caráter afetuoso e seu entusiasmo sem limites conquistaram-lhe amigos entre homens de muitas procedências diferentes.

Chaim Weizmann, que na época lecionava no departamento de química em Manchester mas já estava intensamente envolvido na causa sionista, tornou-se um amigo para toda a vida. Weizmann descreveu Rutherford nos seguintes termos: “Entusiástico, vigoroso, turbulento, parecia tudo menos um cientista. Falava de bom grado e veementemente sobre qualquer assunto sob o Sol, muitas vezes sem saber coisa alguma a respeito. Ao descer para o refeitório na hora do almoço, eu costumava ouvir a voz alta, cordial, rolando pelo corredor. Era completamente desprovido de qualquer conhecimento ou sentimento político, estando inteiramente tomado por seu notável trabalho científico. Era uma pessoa afável, mas não suportava tolos de muito bom grado.”

Weizmann, que foi também um grande amigo de Albert Einstein, escreveu sobre os dois cientistas: “Guardei a nítida ideia de que Rutherford não se impressionava muito com o trabalho de Einstein, enquanto este, por outro lado, sempre me falava de Rutherford nos termos mais elevados, chamando-o de um segundo Newton.” Como cientistas, os dois homens eram tipos marcadamente contrastantes — Einstein, todo raciocínio; Rutherford, todo experimento. Nunca reverenciando ninguém, muito menos os teóricos, Rutherford pronunciou uma frase célebre: “Eles iludem com seus símbolos, enquanto nós produzimos os verdadeiros fatos da Natureza.” Consta também que teria dito: “Oh, essa bobagem de relatividade. Nunca nos incomodamos com isso em nosso trabalho.” De fato, existe a história de que, numa conferência internacional que reuniu em Bruxelas os expoentes da ciência mundial, um colega europeu de Rutherford, Wilhelm Wien, tentou lhe explicar a teoria da relatividade. Rutherford resistiu e Wien, frustrado, exclamou: “Mas nenhum anglo-saxão é capaz de entender a relatividade!” Ao que Rutherford respondeu gritando: “Não! Eles têm discernimento demais para isso.”

Mas, a despeito de tudo que pudesse dizer de brincadeira, Rutherford tratava a obra de Albert Einstein e de Max Planck com respeito profissional. Parecia-lhe que, enquanto a teoria quântica de Planck tinha um impacto sobre seu próprio trabalho, a relatividade aparentemente não tinha uma relevância direta para a física atômica. A ciência de Rutherford e a ciência de Einstein eram tão diferentes em estilo que pouca compreensão real era possível entre eles. Einstein simplesmente não se interessava por partículas alfa e Rutherford não se interessava

pela dilatação do tempo, nem pelo espaço curvo.

Rutherford recebeu muitos prêmios por suas realizações em Manchester, culminando em 1908 com o Prêmio Nobel de Química. Essa honra foi de fato concedida em reconhecimento a seu trabalho sobre radioatividade desenvolvido quando estava no Canadá. Por se considerar um físico e não ter uma atitude reverente para com os químicos, o Nobel o deixou um tanto embaraçado. De fato, brincava acerca de sua “transmutação instantânea” de físico em químico. O prêmio envolveu, no entanto, uma deliciosa ironia. Ao descobrir a transmutação dos elementos, Rutherford rompera o limite entre a química e a física e prosseguira, guiando a física no domínio intelectual e acadêmico da química. Seus maiores opositores no mundo acadêmico eram químicos e sua escolha para o Prêmio Nobel de Química deve tê-lo divertido muito.

Receber o Prêmio Nobel foi importante para Rutherford, que ainda não tinha 40 anos, sob vários aspectos. Além de situá-lo entre os gigantes da ciência na época, trouxe consigo 7.000 libras. Naquele tempo, era uma soma considerável, equivalente para Rutherford a mais de cinco anos de salário. Pela primeira vez na vida, ele ficou razoavelmente rico. Presenteou os irmãos, as irmãs e os pais na Nova Zelândia, remetendo-lhes presentes em dinheiro e comprou seu primeiro automóvel, tendo passado um bom tempo aprendendo a dirigi-lo. Dali em diante, ele e Mary passaram a fazer frequentes viagens de férias pelo interior da Inglaterra.

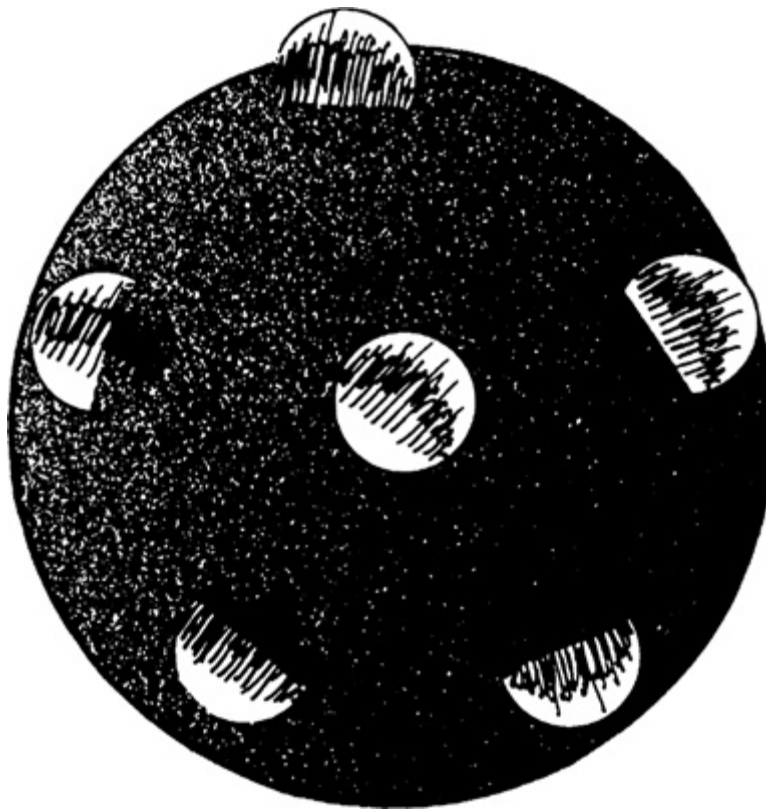
Em 1914 Rutherford foi sagrado cavaleiro e escreveu a um amigo que “estava satisfeito por seu trabalho ter sido reconhecido pelos poderes constituídos, mas a forma desse reconhecimento lhe parecia um pouco embaraçosa para um professor relativamente jovem (ainda não fizera 45 anos) e sem dinheiro.” O interessante é que, o que a maioria dos historiadores da ciência considera a mais importante contribuição de Rutherford para a física, ainda estava por vir.

DENTRO DO ÁTOMO

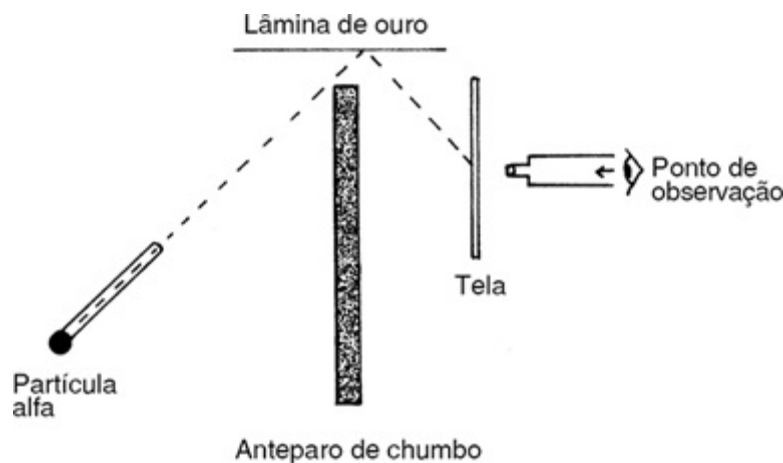
A noção de que toda matéria consistia de agregados de fragmentos tão minúsculos que seriam indivisíveis sempre foi controversa. Foi o filósofo grego Demócrito (460-370 a.C.) quem primeiro chamou esses fragmentos de *atomos* (palavra grega para “indivisível”). Durante séculos a ideia encontrou oposição, tanto por razões intelectuais quanto, por vezes, por decreto. Na França do século XVII, por exemplo, a crença na existência de átomos era punida com a morte. Ainda que por vezes isso leve um longo tempo, a ciência em geral sobrepuja a ignorância, e a teoria atômica preponderou, tornando-se a maneira aceita de explicar vários fenômenos experimentais. Que aparência tinham esses misteriosos átomos, quão pequenos eram, e seriam mesmo os tijolos indivisíveis na construção da natureza? Essas eram as perguntas capitais na ciência no início do século XX.

Rutherford fora um atomista desde os primeiros dias do debate científico e o desenvolvimento de uma representação precisa da aparência do átomo tornou-se o foco de sua pesquisa. Seu mentor, J.J. Thomson, descobriu que o átomo comporta partes distintas. Mostrou que eles consistiam de duas partes, positiva e negativamente carregadas, unidas pelas forças de atração elétrica. Como foi discutido antes, Thomson concebeu o átomo como uma carga

elétrica positiva distribuída de maneira mais ou menos uniforme com grande número de partículas negativamente carregadas flutuando por todo o seu interior. Esse era o que Thomson chamou de seu modelo “pudim de ameixas”^d da estrutura atômica. Era um modelo bastante razoável para a época, mas não conseguia explicar muita coisa no tocante a dados experimentais. Era necessário um modelo melhor, e Rutherford mostraria o caminho.



ÁTOMO PUDIM DE AMEIXAS J.J. Thomson sugeriu que os átomos consistiam de um número de elétrons negativamente carregados incrustados numa atmosfera positivamente carregada, como passas num pudim de ameixas.



EXPERIMENTO DE RUTHERFORD PARA PROVAR A EXISTÊNCIA DO NÚCLEO ATÔMICO Algumas partículas alfa disparadas contra uma fina lâmina de ouro são defletidas para a tela em vez de atravessar a lâmina.

Rutherford não estava de todo insatisfeito com o modelo de Thomson. Sabia que ele tinha suas deficiências, mas julgava-o basicamente correto. Ao longo dos anos, começando em Montreal e prosseguindo em Manchester, ele havia desenvolvido várias técnicas e ferramentas experimentais. Entre elas estava o que se poderia chamar de o primeiro acelerador de partículas. Usando esse aparelho, foi capaz de dirigir um feixe de partículas alfa (núcleos de

hélio) de uma fonte radioativa até um alvo, em geral uma lâmina metálica.

Em Montreal, Rutherford observara que, ao passar através de finas folhas de metal, partículas alfa velozes produziam imagens difusas em chapas fotográficas, ao passo que, quando não havia nenhuma obstrução à sua passagem, produziam uma imagem bem definida. Havia concluído que as partículas alfa talvez fossem defletidas por passar perto de átomos da lâmina metálica, mas não havia prova disso e cálculos posteriores lançaram dúvida sobre a conjectura. O fenômeno das imagens difusas tornou-se por muito tempo o objeto de experimentos planejados por Rutherford.

Entre os professores que trabalhavam sob a direção de Rutherford em Manchester em 1909 estava Hans Geiger (que desenvolveu o contador “Geiger”). Ele contou a Rutherford que um estudante chamado Ernest Marsden estava à procura de tema para um projeto de tese. Rutherford sugeriu que Geiger e Marsden trabalhassem juntos num experimento de espalhamento. Queria que bombardeassem finas folhas de ouro com partículas alfa e procurassem deflexões de vulto. Estava bastante convencido de que não ocorreria deflexão considerável alguma porque (admitindo que o modelo do átomo de Thomson estava correto) os elétrons dos átomos de ouro seriam a única coisa capaz de defletir as partículas alfa. Mas, sendo vários milhares de vezes mais leves que as partículas alfa, os elétrons teriam tanta dificuldade para defleti-las quanto uma bolinha de gude para defletir uma veloz bala de canhão. Era extremamente improvável, pensava Rutherford.

O alvo de lâmina de ouro no aparelho de Rutherford era cercado de todos os lados por telas de sulfeto de zinco. Quando atingida por uma partícula alfa, uma molécula de sulfeto de zinco emite um lampejo. Torna-se assim possível medir o ângulo de deflexão, se houver algum. Tratava-se, porém, de um experimento de difícil execução, que obrigava Marsden e Geiger a passar várias horas num quarto escuro para adaptar a vista e poder perceber os lampejos depois. Em seguida tinham de detectar e registrar o número e as posições dos lampejos. Rutherford, na qualidade de planejador do experimento e diretor do laboratório, delegou esse trabalho minucioso aos dois cientistas mais jovens, mas vez por outra aparecia, para examinar o trabalho e sugerir variações a serem experimentadas. Uma das sugestões de Rutherford foi que observassem se havia partículas sendo espalhadas para trás, em outras palavras, defletidas através de um ângulo de mais de 90 graus. Queria verificar se alguma partícula alfa atingia a lâmina de ouro e saltava para trás, em direção à fonte.

É possível que Geiger e Marsden tenham pensado que Rutherford estava ficando maluco com esse pedido, mas como ele era o chefe, cumpriram suas ordens. Para espanto geral, numerosas partículas alfa eram de fato refletidas para trás a partir da lâmina de ouro. Marsden transmitiu a notícia a Rutherford, cuja reação, hoje famosa, foi: “É sem dúvida o mais incrível evento que jamais me sucedeu na vida. É como se o sujeito disparasse um projétil de 40 centímetros num pedaço de papel de seda e ele voltasse e o atingisse.” Tinha de haver alguma coisa dentro do átomo para explicar esse incrível espalhamento para trás, alguma coisa maior que as partículas alfa que o estavam atingindo.

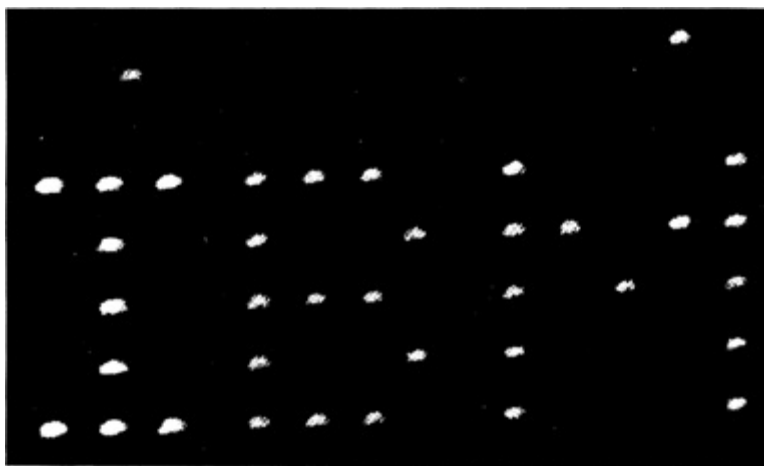
Nesse ponto, é interessante acompanhar o modo de pensar de Rutherford. Os resultados do experimento eram incompatíveis com a teoria vigente sobre o aspecto do interior de um átomo. Ou o experimento tinha uma falha, ou a teoria do átomo precisava ser revista. Os experimentos foram efetuados em 1909 e somente no início de 1911 Rutherford se dispôs a propor uma explicação. Chegou por fim à conclusão de que obviamente tinha de haver dentro

do átomo algo comparável em massa à partícula alfa, algo milhares de vezes mais pesado que o elétron. Rutherford referiu-se a esse “algo” como o *núcleo*.

Em maio desse ano, foi publicado seu artigo que anunciava a existência do átomo nuclear, o que significou o fim do modelo do pudim de ameixas de Thomson e o início da era da física nuclear.

O passo seguinte de Rutherford foi postular que o núcleo atômico continha partículas positivamente carregadas, a que chamou de *prótons* (do grego *protons*, “primeiras coisas”). Em 1919, demonstrou a existência dessas partículas arrancando-as fora de núcleos de nitrogênio por meio de partículas alfa. Mais tarde, sugeriu que os núcleos mais pesados tinham provavelmente um outro constituinte, a saber, uma partícula eletricamente neutra de massa quase tão grande quanto a do próton. Deu a essa partícula hipotética o nome *nêutron*. Chegou a essa conclusão ao observar que a maioria dos átomos parecia pesar cerca de duas vezes o que seria de esperar a partir da soma das massas dos prótons e dos elétrons neles contidos. Além disso, alguma coisa devia manter os prótons positivos unidos no núcleo. O nêutron que Rutherford postulou foi finalmente descoberto em 1932. Ele era um teórico muito melhor do que admitia. Quando dados experimentais não correspondiam à teoria vigente, era inventivo e original na produção de novas teorias compatíveis com eles.

Quão minúsculos eram os átomos? Usando o trabalho de Maxwell e a fórmula matemática concebida por Albert Einstein, o físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942) estimou o tamanho de moléculas de água, bem como o tamanho dos átomos que as compunham. Perrin publicou seus resultados em 1913. Os átomos, ele calculou, tinham *grosso modo* um centésimo de milionésimo de centímetro de um lado a outro. Em outras palavras, 100 milhões de átomos postos lado a lado se estenderiam por um centímetro, 250 milhões de átomos postos lado a lado se estenderiam por uma polegada. Se era possível medir os átomos, e ver o efeito de suas colisões, eles certamente existiam. A teoria atômica havia se tornado um fato atômico. Hoje, graças a um aparelho chamado microscópio de varredura por nivelamento, é realmente possível ver os átomos com os olhos e fotografá-los.



ÁTOMOS DISPOSTOS POR CIENTISTAS DA IBM PARA FORMAR O LOGOTIPO DA COMPANHIA. Por meio de um microscópio de varredura por nivelamento, átomos individuais foram usados para desenhar as letras. Na verdade, elas são cerca de 500.000 vezes menores do que aparecem nesta página.

O maior feito de Rutherford em Manchester — de fato, de toda a sua carreira — foi a descoberta da estrutura nuclear do átomo. Com ela, ele se tornou o Copérnico do sistema

atômico. É interessante que suas principais realizações científicas tenham ocorrido depois que recebeu o prêmio Nobel e que foi sagrado cavaleiro. A história da ciência não contém muitos outros exemplos dessa diligência e criatividade persistentes na carreira de um cientista. E Rutherford não parou por aí.

Durante a Primeira Guerra Mundial ele trabalhou nos problemas da detecção submarina por acústica subaquática. Evidentemente, entregou-se a esse trabalho à sua maneira peculiar. Em apenas alguns meses produziu três relatórios secretos que traçaram o mapa das operações militares subaquáticas naquele momento. Foi necessária a sua influência para levar a Marinha Real a trabalhar seriamente sobre os problemas da detecção subaquática e para orientar esses esforços quando eles se iniciaram. Embora o próprio Rutherford nunca tenha reivindicado esse crédito, alguns historiadores da ciência declaram que, para todos os propósitos, ele foi o coinventor do sonar.

CAMBRIDGE II

Em 1919, J.J. Thomson foi promovido, passando a reitor do Trinity College, e Rutherford tomou seu lugar no Laboratório Cavendish. Embora as contribuições experimentais de Rutherford dali em diante não tenham sido tão copiosas quanto em anos anteriores, sua influência sobre estudantes de pesquisa continuou importante. Na palestra feita na Royal Society em 1920, ele especulou sobre a existência do nêutron e de isótopos de hidrogênio e de hélio; essas três especulações vieram todas a ser provadas por pesquisadores integrantes do Laboratório Cavendish.

Entre 1925 e 1930 Rutherford foi presidente da Royal Society e, em seguida tornou-se presidente do conselho consultivo para o governo britânico em ciência e tecnologia. Esses dois postos envolviam ambos muitas aparições públicas e cerimônias protocolares, de que ele parecia gostar. Em geral permanecia fora da política, embora tenha sentido que não podia permanecer inativo quando a Alemanha nazista expulsava centenas de intelectuais judeus. Durante esse período, encabeçou o Conselho Acadêmico de Assistência, que procurava obter auxílio financeiro e empregos para esses refugiados.

Mais que qualquer outro homem, Rutherford formou as concepções que hoje prevalecem no tocante à natureza da matéria. Ele foi sem dúvida o maior físico experimental de seu tempo e o maior desde Michael Faraday. Dúzias de sociedades científicas e universidades fizeram dele seu sócio honorário ou lhe conferiram graus honorários. Em 1925, o rei Jorge V o distinguiu pessoalmente com a Ordem do Mérito, graça limitada a alguns dos mais eminentes ingleses vivos. Por honrar a ciência britânica, foi feito nobre (barão Rutherford de Nelson) em 1931, passando a ocupar um assento na Câmara dos Lordes. Rutherford gostava imensamente da fama, do acesso aos líderes mundiais, e de todo o aparato do sucesso mundano. Num discurso, ele contou a seguinte história: “Eu estava de pé no salão em Trinity quando entrou um clérigo. Eu lhe disse, ‘Sou Lord Rutherford’; ‘E eu sou o arcebispo de York’, ele respondeu. E tenho a impressão de que nenhum de nós dois acreditou no outro.”

Por outro lado, Rutherford insistia na informalidade entre seus colegas cientistas. Num jantar da Royal Society, pouco depois de ter se tornado nobre, ouviu sem ser notado Niels

Bohr referir-se a ele na terceira pessoa como Lord Rutherford. Segundo o relato de Bohr, Rutherford investiu furioso contra ele, gritando: “Você me chamou de Lord?” Assim repreendido, Bohr disse que nunca mais fez aquilo de novo. De fato, suas muitas funções públicas não o mantinham afastado de seu laboratório e ele fazia frequentes rondas para “animar” sua equipe, como ele dizia.

Em 1937, Rutherford morreu subitamente de uma hérnia estrangulada não detectada. Tinha 66 anos e ainda era um homem vigoroso. O escritor e cientista inglês C.P. Snow lembra que, numa tranquila manhã de outubro em Cambridge, quando ele e alguns outros pesquisadores trabalhavam no velho Laboratório Cavendish, alguém enfiou a cabeça no vão da porta e disse: “O professor morreu.” Eles ficaram aturdidos e ninguém sentiu nenhuma necessidade de perguntar ao portador da notícia a quem ele se referia.

Antes de Rutherford, o átomo era, para usar suas palavras, “um sujeito simpático e resistente, vermelho ou cinza, segundo o gosto do freguês”. Agora era um sistema solar em miniatura que envolvia incontáveis partículas e, suspeitava-se, continha ainda mais mistérios por desvendar. Rutherford havia dado ao mundo um novo modelo de átomo. Planck havia introduzido a ideia dos *quanta*. Agora, era preciso alguém para juntar essas ideias. E, de fato, elas logo seriam reunidas pelo brilhante físico dinamarquês e o mais famoso aluno de Rutherford, Niels Bohr.

^a O principal minério de urânio. (N.R.T.)

^b *Peer*: um nobre inglês. (N.R.T.)

^c Os raios gama são emissões eletromagnéticas que podem ser descritas por fótons. (N.R.T.)

^d O termo original em inglês é *Plum Pudding* (pudim de ameixas) que é uma receita típica de natal que leva vários ingredientes como farinha, passas, cidra, laranja, groselha e amêndoas entre outros mas não leva ameixas. É um pudim de realização trabalhosa e demorada, dando como resultado final uma massa na qual as passas aparecem incrustadas e distribuídas por toda a massa. Embora *Plum* também signifique passas quando usada em um bolo, o termo consagrado em português é pudim de ameixas. (N.R.T.)

NIELS HENRIK DAVID BOHR

Esquecendo o uso ocasional de um par de esquis, a bicicleta era o meio de locomoção favorito de Niels Bohr. A marcha relativamente lenta do veículo, baseada num equilíbrio de variáveis dinâmicas que não se consegue explicar adequadamente em poucas palavras é, penso eu, uma boa introdução ao caráter de Niels Bohr.

Edward Teller, “Niels Bohr e a ideia de complementaridade”, 1969

Certo dia em 1962, dois amigos cientistas, Abraham Pais e um colega não identificado, estavam discutindo sobre Niels Bohr, pouco depois da sua morte. O companheiro de Pais confessou que na verdade não entendia a essência do trabalho do físico dinamarquês. “Você o conheceu bem”, disse a Pais. “Que fez ele exatamente?” Se um cientista estava confuso com o trabalho de Bohr, você pode certamente perguntar o que se pode esperar de um leigo. Na verdade, porém, as realizações de Bohr podem ser descritas com bastante facilidade.

Um dos feitos mais importantes de Bohr foi mostrar que não era possível descrever a estrutura do átomo unicamente segundo a física clássica; era preciso lançar mão da teoria quântica. Em poucas palavras, Bohr tomou a imagem do átomo de Rutherford de um lado e a teoria quântica de Planck de outro e, em 1913, aos 27 anos, uniu-as para formar a imagem contemporânea de um átomo. Por isso recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1922.

O HOMEM

A educação de Bohr foi quase boa demais para ser verdade, sem nenhuma história de negligência ou de qualquer tipo de sofrimento na infância. Bohr nasceu em Copenhague em 1885. Seu pai foi Christian Bohr, um professor de fisiologia na Universidade de Copenhague. Sua mãe, Ellen Adler Bohr, provinha de uma família judaica opulenta, proeminente nos círculos financeiros e parlamentares da Dinamarca. A família Bohr incluía Jenny, a irmã mais velha, Niels e o caçula Harald. Segundo todos os relatos, o lar dos Bohr era intelectualmente estimulante e proporcionava uma atmosfera familiar aconchegante e amorosa.

Os Bohr recebiam um grande rol de visitantes, alguns dos quais eram colegas de Christian Bohr na universidade. Ainda menino, Niels ouvia muitos debates animados sobre assuntos que iam da filosofia e a física até a teologia e a política. Essa livre troca de ideias deve certamente ter estimulado Niels e os irmãos e os encorajado a aprender a expressar os próprios pensamentos.

Os Bohr não frequentavam a igreja. Embora viesse de uma família judaica, Ellen

concordara em que os filhos fossem criados como cristãos. Em consequência, Niels, a irmã Jenny e o irmão Harald foram batizados logo após o nascimento, mas a família só ia à igreja na véspera do Natal, e mesmo isso só porque todos os seus conhecidos o faziam.

Niels e Harald sempre foram extraordinariamente ligados. Brincavam juntos, lutavam juntos e estudavam juntos nos tempos de escola e mais tarde na vida mantiveram assídua correspondência. Em 1891, Niels foi matriculado na Gammelholms Latin-og Realskole em Copenhague, onde ele e Harald ficariam até que estivessem preparados para se submeter aos exames para ingresso na faculdade. Os colegas de escola lembram-se de Niels como um menino alto, um tanto turbulento e forte como um urso. Ele foi lembrado também como uma criança um pouco rebelde e irritadiça, que vez por outra se envolvia em brigas no pátio da escola. Mas Niels era também um aluno consciencioso. Tinha bom desempenho na escola e, embora nunca alcançasse o primeiro lugar, ficava no terceiro ou quarto na turma de 20 alunos. Interessava-se por todas as matérias, mas matemática e física eram as preferidas. Os esportes constituíam também um importante interesse e Niels e Harald integravam ambos o time de futebol da escola. Tanto Niels quanto Harald foram aprovados com honras no *Studenterexamen*, o exame final que permitia aos alunos ingressar na universidade.

Em 1903, Bohr se matriculou na Universidade de Copenhague, onde estudou física, além de se destacar como exímio jogador de futebol. (Seu irmão caçula era ainda melhor e, em 1908, fez parte do time olímpico de futebol da Dinamarca.) Também no plano acadêmico Niels se distinguiu na universidade, ganhando uma medalha de ouro da Real Academia Sueca de Ciências e Letras por análises teóricas e experimentos ligados à determinação da tensão de superfície da água. Em 1911 ele se doutorou com uma tese sobre a teoria eletrônica dos metais que enfatizava as inadequações da física clássica para tratar o comportamento da matéria no nível atômico. (Nesse texto, começava a focalizar sua atenção no que iria ser o trabalho de sua vida.)

Em seguida Bohr viajou para a Inglaterra para trabalhar, como pós-graduado, sob a direção do célebre J.J. Thomson em Cambridge. Sabia pouco inglês quando chegou a Cambridge e para suprir a deficiência leu *As aventuras de Pickwick* de Charles Dickens com um dicionário na mão. Dickens tornou-se um dos seus autores favoritos. A língua, porém, foi apenas um dos problemas de Bohr em Cambridge. Nem tudo andou bem para ele no Laboratório Cavendish. Thomson mostrou pouco interesse pelo seu trabalho. Bohr lhe dera uma cópia de sua tese de doutorado assim que chegara, na esperança de receber algum comentário ou incentivo; mas Thomson deixou-a sobre a mesa, sem a ler. Talvez tenha sido melhor assim, porque ela continha vários comentários críticos à teoria do átomo de Thomson. Fosse como fosse, Bohr ficou desiludido com a indiferença de Thomson. Intrigado com a teoria do átomo de Rutherford, resolveu tratar de conseguir uma transferência para Manchester. Ali as coisas se passaram de maneira muito diferente.

A relação de Bohr com Rutherford estabeleceu um padrão para toda a sua vida científica posterior. Os dois homens tornaram-se amigos desde o primeiro encontro e permaneceram ligados pelo resto de suas vidas. Quando se considera que Rutherford era o mais rematado experimentalista, com pouca consideração por teóricos, e Bohr o mais rematado teórico intelectual, com pouca necessidade de qualquer instrumento além de um quadro-negro, parece estranho que esses dois tenham se entendido assim tão bem.

Para seu grande mérito, Rutherford reconheceu o brilhantismo de Bohr de imediato e desde

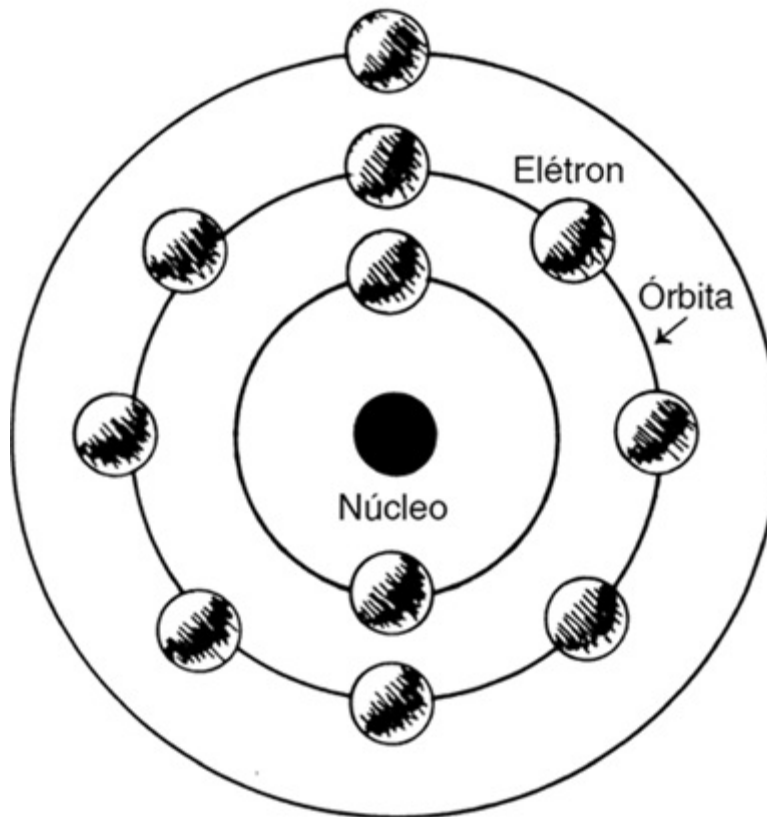
o início encorajou-o de todas as maneiras que podia. A primeira estada de Bohr em Manchester foi relativamente curta, de março a julho de 1912, mas foi crucial na moldagem de sua abordagem à física e à condução de projetos de pesquisa em física. O método de Rutherford de combinar seu próprio programa de pesquisa em andamento com a orientação de físicos mais jovens causou forte impressão em Bohr e influenciou seu próprio estilo. (Quando, na meia-idade, dirigiu um centro de pesquisas físicas em Copenhague, Bohr modelou seu método colegiado de gestão pela experiência que tivera em Manchester.) Em suma, foi Rutherford que elevou Bohr ao nível máximo da física mundial.

Em 1912 Bohr retornou à Dinamarca, onde foi nomeado professor assistente na Universidade de Copenhague. Com a carreira começando a ganhar forma, casou-se com Margrethe Norlund. Os dois haviam se conhecido, segundo ela se lembrou, num jantar — ele se sentara ao seu lado mas não dissera uma palavra. Depois Bohr fez uma visita a Margrethe e ao irmão, de quem era amigo, na casa de campo dos Norlund. Mais tarde ela esteve na casa de Bohr em Copenhague e em 1910 já estavam noivos. A influência que ela exerceu sobre Niels e a ajuda que lhe deu é evidente desde o início da relação dos dois. O manuscrito para a defesa da tese de doutorado de Niels, por exemplo, traz a letra dela. O casamento provou-se uma união sólida e feliz, uma fonte permanente de harmonia e força para Niels, que era a quintessência do homem devotado à família. Os Bohr tiveram seis filhos, quatro dos quais chegaram à idade adulta.

O ÁTOMO DE BOHR

Uma vez estabelecido em Copenhague, Bohr continuou a pensar sobre as implicações radicais do modelo nuclear do átomo proposto por Rutherford. Tratava-se da ideia do átomo nuclear, uma espécie de sistema solar em miniatura, com os elétrons girando em torno de um núcleo semelhante ao Sol. Era um modelo engenhoso, que respondia a muitas questões, e encontrava aceitação geral entre os físicos. Ele envolvia, contudo, um grande problema, o que os cientistas chamam de uma anomalia. O ponto anômalo era: o que mantinha os elétrons em seu lugar no átomo nuclear? Se os elétrons são negativamente carregados e o núcleo é positivamente carregado, e se cargas opostas se atraem, os elétrons deveriam cair no interior do núcleo.

A teoria eletromagnética mostra que um objeto eletricamente carregado, quando gira à maneira do elétron em torno do núcleo, emite radiação eletromagnética, perdendo energia nesse processo. Segundo a teoria, à medida que perde energia o elétron iria espiralar para o interior até finalmente cair dentro do núcleo. Mas tal não acontece. Ao contrário do que reza a teoria, os elétrons não caem dentro do núcleo. Os átomos permanecem estáveis por períodos indefinidos, e nisso reside a anomalia.



O ÁTOMO DE BOHR Os elétrons mais afastados do núcleo têm energia mais elevada que os mais próximos e podem se mover de uma órbita para outra.

Um dos muitos físicos de quem esse problema tirava o sono, Niels Bohr adotou uma abordagem original para buscar uma explicação. Concluiu que, com ou sem teoria, o elétron não irradiava energia enquanto estava em órbita. Por outro lado, tanto a teoria quanto os indícios experimentais mostravam que o hidrogênio, por exemplo, de fato irradiava energia quando aquecido — energia que muitos físicos acreditavam ser proveniente dos elétrons. De onde essa energia realmente vinha? Essa foi a questão que Bohr decidiu que devia resolver.

Segundo os colegas de Bohr, seu maior trunfo era a capacidade de identificar, e explorar, falhas na teoria. Desenvolvendo essa aptidão, ele a transformou numa metodologia científica rigorosa. Costumava colecionar casos de falha, examinar cada um minuciosamente e identificar aqueles que pareciam incorporar o mesmo defeito. Em seguida, concebia uma hipótese para corrigir o defeito, conservando tanto quanto podia da teoria original defeituosa. Empurrando e puxando continuamente teoria e resultados experimentais até que uma nova teoria emergisse, Bohr geralmente tinha êxito. Era um método intrincado que exigia não só gênio criativo como a capacidade de suportar a ambiguidade, a incerteza e a aparente contradição.

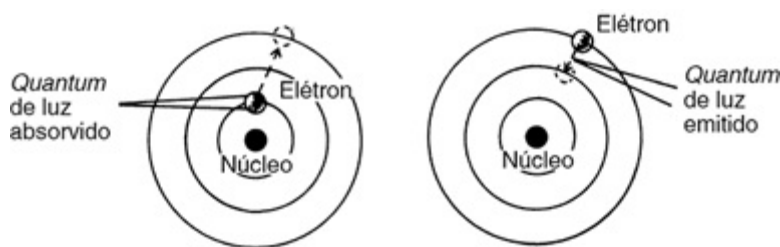
Em 1913, usando esse método, Bohr concebeu um modelo do átomo que era uma variação do de Rutherford, mas explicava a misteriosa anomalia dos elétrons. Perguntou a si mesmo como um átomo de hidrogênio podia irradiar energia quando aquecido e absorvê-la quando esfriado, sem contudo colapsar. Concluiu que, enquanto permanecia na mesma órbita dentro do átomo de hidrogênio, o elétron *não* irradiava energia. Como alternativa, sugeriu que o elétron podia assumir uma posição estável em qualquer das diferentes órbitas das diferentes distâncias do núcleo. Sempre que estivesse numa órbita particular, o elétron não ganhava nem

perdia energia. Quando mudasse de órbita, contudo, iria ou absorver ou emitir energia. Elétrons que estão mais afastados do núcleo têm maior energia e um elétron pode saltar para um nível mais alto absorvendo energia. Isso ocorreria em altas temperaturas ou quando fótons com energia suficiente atingissem o átomo. Inversamente, um elétron emitiria energia na forma de radiação quando caísse num nível mais próximo do núcleo. Isso ocorreria quando houvesse uma lacuna num nível mais baixo.

Porque Bohr pensou em “degraus” de órbitas? Por que um elétron nunca está numa órbita a meio caminho entre um nível e outro? Bohr estava se valendo da teoria quântica de Planck. Propôs que um átomo só pode absorver ou emitir quanta — energia de quantidade fixa — e que essas quantidades de energia são exatamente suficientes para enviar elétrons para a órbita seguinte.

Bohr propôs-se então a explicar por que um elétron se comporta dessa maneira, estabelecendo uma nova conexão entre matéria e luz. Sugeriu que, quando se movem de um nível de energia para outro, os elétrons desprendem ou absorvem “pacotes” de radiação na forma de luz. Esses pacotes são chamados *fótons*, ou *quanta*. Quanto mais curto é o comprimento de onda da radiação, mais alta é a energia do fóton. Ele calculou então as energias precisas envolvidas no salto de um elétron de uma órbita permissível para outra.

É mais fácil compreender a teoria de Bohr considerando os fascinantes indícios que ele usava em sua defesa. Esses indícios vêm de um campo de estudos conhecido como *espectroscopia*, o estudo dos espectros de luz emitidos por átomos de diferentes elementos. O interior do átomo é invisível ao olho humano, mas a espectroscopia fornece uma janela (alguns autores a compararam a uma janela de vitral), que é composta do espectro luminoso. Todo objeto de temperatura superior ao zero absoluto emite radiação; quanto mais quente ele estiver, mais elevada será a frequência dessa radiação. O atributo importante dessa radiação, que permite a análise química, é que a radiação emitida por diferentes átomos e moléculas é uma marca distintiva, como uma impressão digital. Cada impressão, ou espectro, se distingue por picos e vales em posições que são características das substâncias químicas que emitem a radiação.



O MOVIMENTO DO ELÉTRON NO ÁTOMO DE BOHR Os elétrons que absorvem energia saltam para uma órbita mais alta. Quando saltam para uma órbita mais baixa os elétrons emitem energia.

Em 1859, o físico alemão Gustav Kirchhoff encontrou uma conexão entre linhas espectrais e elementos químicos. Descobriu que, quando vários elementos eram aquecidos, cada um deles emitia um espectro de luz diferente. Kirchhoff e seu colega Robert Bunsen (o inventor do bico de Bunsen) conseguiram assim identificar elementos por suas linhas espectrais. Agora a ciência tinha uma ferramenta para examinar a composição química de qualquer objeto que emitisse luz. De fato, é por esse meio que os astrônomos analisam atualmente, no tocante aos elementos que as constituem, a composição de estrelas distantes.

Mas que tem tudo isto a ver com a determinação da estrutura do átomo? Em sua análise do problema do elétron, Bohr havia selecionado o átomo de hidrogênio para um estudo detalhado em razão de sua simplicidade (um elétron em órbita em torno de um próton). Considerando as linhas espectrais do hidrogênio, Bohr postulou que ocorre radiação quando um elétron salta de um nível de energia para outro mais baixo e que a energia do fóton emitido é a diferença entre os dois níveis de energia. Um elétron saltaria de uma órbita para outra quando absorvesse ou emitisse energia. Supondo que essa energia era convertida em luz, ele calculou os comprimentos de onda correspondentes. Comparou estes últimos ao conhecido, mas não compreendido, espectro do hidrogênio, e a correspondência foi exata.

O hidrogênio tem três linhas bastante vívidas em seu espectro visível: uma vermelha, uma azul-verde e uma azul. Bohr explicou que as emissões dos átomos são aquilo que aparece na forma das linhas espectrais características do hidrogênio. A linha vermelha aparece quando o elétron salta da terceira órbita para a segunda; a linha azul-verde quando ele salta da quarta órbita para a segunda.

O século XIX vira o acúmulo de espectros belamente observados de muitos elementos, mas, até Bohr, pouco se compreendera deles. Quando soube em que grau a teoria correspondia aos dados das linhas espectrais, Albert Einstein qualificou o achado de Bohr como uma das grandes descobertas da física.

A teoria de Bohr representou a primeira aplicação da teoria quântica a um campo que a física clássica sempre considerara exclusividade sua — a física da matéria. Desse ponto em diante, os físicos ficaram conhecendo os limites da física clássica na escala do muito pequeno

— Einstein já lhes ensinara os limites da física clássica no domínio das velocidades ultra-altas. O esquema de Bohr foi também a primeira tentativa bem-sucedida de explicar a espectroscopia a partir da estrutura interna do átomo e de usar dados espectroscópicos para explicar a estrutura interna do átomo.

O ÁTOMO DE BOHR

De início, muitos físicos da velha guarda, entre os quais J.J. Thomson, ficaram céticos diante da teoria de Bohr; Rutherford, porém, defendeu-a vigorosamente e por fim a teoria foi aceita.

Em 1913, Bohr publicou três artigos sobre a física dos átomos, sendo que um deles, *Sobre a constituição de átomos e moléculas*, tornou-se um clássico em pouco tempo. Ele passou os anos de 1914 a 1916 em Manchester, novamente trabalhando sob os auspícios de seu mentor, Rutherford. Então, em 1916, foi-lhe oferecida uma cátedra em sua cidade natal de Copenhague, na Universidade da Dinamarca.

Naquele tempo, era costume os novos professores se apresentarem ao rei ou à rainha, numa audiência pública, pouco depois de serem designados. Trajes formais — fraque e luvas brancas — eram exigidos. Assim, lá foi Bohr visitar o rei Cristiano X. Quando Bohr foi levado à sua presença, o rei disse que era um prazer conhecer o famoso jogador de futebol, o que deixou Bohr numa posição incômoda. Sabia que o rei o estava confundindo com o irmão mais moço, Harald. Por outro lado, o protocolo proibia corrigir o monarca durante uma audiência pública. Bohr conseguiu murmurar alguma coisa sobre o fato de que jogava futebol,

mas seu irmão (membro do time olímpico de futebol da Dinamarca) é que era o *famoso* jogador. Aborrecido, o rei deu a audiência por encerrada e Bohr se retirou, andando para trás, como pedia o costume.

Mas, se encontrou dificuldade junto ao monarca, na universidade Bohr foi muito valorizado. A universidade criou para ele um novo Instituto de Física Teórica, que abriu suas portas em 1921. Niels Bohr ocupou o cargo de diretor pelo resto de sua vida.

O PRÊMIO NOBEL

Em novembro de 1922, a Real Academia de Ciências da Suécia concedeu a Niels Bohr o Prêmio Nobel de Física. Ele foi o sexto dinamarquês e o primeiro físico dinamarquês a receber essa honraria. Em nossos tempos de comunicação de massa, a concessão de Prêmio Nobel é manchete no mundo inteiro. Não era o que acontecia em 1922. Foi uma nota de um parágrafo na página quatro do *New York Times* que levou a notícia do prêmio de Bohr aos Estados Unidos, e a grafia do nome dele estava errada. Além disso, o nome que figurava no título da nota era o de Einstein, não o de Bohr — Einstein fora contemplado com o prêmio de física no ano anterior, o que estava sendo anunciado com atraso, ao mesmo tempo que a premiação de Bohr.

“KOPENHAGENER GEIST”

Bohr atraiu para o Instituto de Física Teórica de Copenhague muitos dos mais respeitados físicos teóricos do mundo. Sob sua direção, eles desenvolveram substancialmente as ideias da mecânica quântica. O grupo internacional de Bohr incluiu Oskar Klein, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, George Gamow, Lev Landau e Hendrik Kramers. O centro de equilíbrio para o estudo dos segredos da natureza deslocara-se claramente para Copenhague, onde os mais famosos cientistas do mundo se reuniam para consultar, debater, argumentar e simplesmente conversar sobre física. Para teóricos do mundo inteiro, visitar o instituto para ouvir Bohr falar e trocar ideias com ele era ao mesmo tempo uma obrigação e um prazer. Bohr usava uma técnica socrática, respondendo a perguntas com perguntas numa lenta e perscrutadora, mas paciente, busca da verdade.

Já se comparou uma palestra de Bohr sobre física a uma partida de tênis jogada por um homem só. Bohr, ao que se diz, lançava a bola de um lado da quadra e corria para o outro rápido o bastante para devolvê-la. Quanto maior o número de vezes em que o tema em questão pulava de um lado para outro como uma bola de tênis, mais o jogo ficava divertido. Vez por outra, para tornar a atmosfera mais leve, Bohr contava uma piada. Tinha um repertório fixo de piadas, a maioria delas muito conhecidas e apreciadas por seus alunos. Uma das suas favoritas era a definição de uma “grande verdade”: aquela cujo contrário é também uma grande verdade.

Como orador público, porém, Bohr era um fracasso. Sua voz baixa tinha pouco alcance e

seu sotaque era um problema adicional. Frequentemente passava de uma língua para outra sem nenhum aviso. Além do dinamarquês, falava inglês e alemão e, nas palavras de um colega seu, por alguma razão achava que falava também francês. Certa feita, saudou um perplexo embaixador francês com um cordial “*Aujourd’hui*” (Hoje). O mais desconcertante, porém, eram suas frases intrinsecamente desdobradas, retorcidas, que frequentemente omitiam expressões porque Bohr, imerso em pensamento, se esquecia de articulá-las. Segundo a voz geral, ouvir Bohr não era diferente de ler *Ulysses* de James Joyce. Se sua atenção vacilasse por um instante, você estava perdido.

Cada novo grupo de estudantes de pesquisa que chegava ao instituto, com seus cônjuges, era saudado por Bohr com um discurso de boas-vindas. A mulher de um desses entusiásticos recém-chegados contou que ouviu toda a fala de boas-vindas de Bohr, notou o aplauso entusiástico do público e, virando-se para seu vizinho de assento, lhe disse o quanto estava ansiosa por ouvir a tradução inglesa. Depois de olhá-la por um momento, ele lhe deu a má notícia: “Essa foi a tradução inglesa.”

Os colegas de Bohr relevavam sua dificuldade para se comunicar porque reconheciam a profundidade e a originalidade de seus pensamentos. Provavelmente perdoariam suas deficiências de qualquer modo por causa de sua agradabilíssima personalidade. Em contraste com a maioria dos demais grandes cientistas de seu tempo, ele não possuía um ego inflado, nunca era sarcástico ou indelicado no debate científico e em geral dava uma impressão de serena e meditativa sabedoria.

BOHR E EINSTEIN

Albert Einstein desempenhou um papel singularmente importante na vida de Bohr. Eles se encontraram pela primeira vez em 1920, por ocasião da primeira visita de Bohr a Berlim. Einstein, nessa época o mais famoso cientista do mundo, ficou muito impressionado com o colega mais jovem. Eles conheciam bem, é claro, o trabalho um do outro e seu primeiro encontro foi um sucesso. Tiveram longas conversas enquanto caminhavam pelos subúrbios de Berlim próximos à casa de Einstein e deram início a uma troca de cartas que se prolongou pelo resto de suas vidas. Mais tarde, ainda em 1920, Einstein visitou a família Bohr quando retornava de uma viagem à Noruega. Escrevendo a um amigo, Einstein disse que as horas que passara com Bohr em Copenhague haviam sido o ponto alto de sua viagem à Escandinávia.

Ambos os cientistas eram famosos, ou mesmo notórios, pela capacidade de se concentrar em um problema particular, furtando-se a toda e qualquer distração exterior, e a história que se segue demonstra até que ponto essa concentração podia ser intensa. Ao que se conta, em 1923, ao voltar para casa após uma viagem à Suécia, Einstein fez uma parada em Copenhague. Não podendo dispor de seu automóvel naquela tarde, Bohr pegou o bonde para ir à estação ferroviária receber Einstein. Os dois cientistas entraram num bonde para voltar à casa de Bohr e ficaram tão absortos em sua conversa que deixaram passar seu ponto de parada. Saltaram, pegaram um bonde em sentido contrário e de novo mergulharam tão imediatamente no debate em andamento que pela segunda vez deixaram de saltar no ponto certo. Segundo Bohr, isso voltou a acontecer tantas vezes que as pessoas começaram a olhar para os dois físicos de

maneira estranha. Bohr e Einstein tinham ideias opostas sobre a filosofia da física quântica e o famoso debate que mantiveram sobre o assunto se prolongou por mais de 35 anos.

PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIDADE

Um ponto particular da controvérsia entre Bohr e Einstein era o princípio de complementaridade de Bohr, que se tornou parte essencial do modo como os físicos pensam a natureza atualmente. Pode-se definir *complementaridade* como a coexistência, para um mesmo fenômeno físico, de duas descrições diferentes, aparentemente incompatíveis, mas ambas necessárias para uma representação completa do sistema. Um bom exemplo ilustrativo é a dualidade onda-partícula — o fenômeno pelo qual, no domínio atômico, os objetos exibem propriedades tanto de partículas quanto de ondas. Na física clássica, macroscópica, partículas e ondas são consideradas categorias mutuamente exclusivas. Na visão de Bohr, os conceitos de partícula e de onda eram duas descrições complementares da mesma realidade, cada uma sendo apenas parcialmente correta e tendo um âmbito limitado de aplicações. Os dois conceitos eram necessários para permitir uma descrição completa da realidade atômica.

Bohr ressaltou que em muitos experimentos é mais conveniente conceber a radiação como ondas. Frequências e intensidades de ondas, por exemplo, fornecem informação sobre o átomo. Bohr pensava que nesse caso a representação em termos de onda se aproximava muito mais da verdade que a descrição fundada em partículas. Assim, defendeu o uso de ambas as descrições, que dizia serem “complementares” uma à outra.

As duas descrições são mutuamente exclusivas, é claro, porque uma determinada coisa não pode ser ao mesmo tempo uma partícula e uma onda, mas os dois conceitos podem se complementar um ao outro^a. Jogando com as duas descrições, passando de uma para outra e retornando, mostrou Bohr, pode-se finalmente alcançar a impressão correta do estranho tipo de realidade subjacente aos experimentos atômicos. Ele usou esse conceito de complementaridade em sua interpretação da teoria quântica.

Bohr afirmava: “Os dados obtidos sob diferentes condições experimentais não podem ser incluídos em um único quadro, devendo ser vistos como complementares no sentido de que somente a totalidade dos fenômenos esgota a informação possível sobre os objetos.” Estas são, cabe ressaltar, palavras de Bohr — a explicação da complementaridade que ele próprio deu. O que ele queria dizer exatamente com isso foi sempre um objeto de animada discussão entre seus colegas e alunos. De fato, interpretar Bohr tornou-se uma atividade florescente. Um dos que tiveram problema com o conceito de Bohr foi seu célebre discípulo e protegido, Werner Heisenberg.

Em 1927, Heisenberg estava morando num sótão do instituto de Bohr e este sempre ia até o quarto do rapaz à noite para discutir novas ideias no campo da teoria atômica. Os dois cientistas pensavam de maneira muito diferente e suas discussões ficavam inevitavelmente acaloradas. Segundo o relato que Heisenberg fez desses eventos, foi durante uma caminhada à noite atrás do instituto que lhe ocorreu que a dificuldade central nas medições quânticas residia na impossibilidade de se estabelecer, em qualquer dado instante, tanto o momento^b quanto a localização de uma partícula. Bohr viajara para esqui na Noruega e, durante a sua

ausência, Heisenberg rascunhou um artigo para demonstrar o que veio a ser conhecido como seu *princípio da incerteza*. (As implicações desse brilhante achado serão discutidas no próximo capítulo.)

Quando Bohr chegou das férias, considerou que seu princípio da complementaridade explicava melhor a realidade que o princípio da incerteza, e os dois homens começaram a se desentender a propósito de suas diferentes abordagens. Depois de várias altercações iradas, resolveram se afastar por alguns dias. Por fim, ambos cederam e conseguiram encontrar uma saída para o impasse. Resolveram concordar que a complementaridade e as relações de incerteza de Heisenberg equivaliam à mesma coisa, e seus conceitos combinados ficaram conhecidos como a *interpretação de Copenhague*.

A interpretação de Copenhague implica a divisão do mundo físico em um sistema observado (a que Bohr e Heisenberg se referiam ambos como o “objeto”) e um sistema observador. O objeto pode ser um átomo, uma partícula subatômica ou um processo atômico. O sistema observador consiste do aparelho experimental (um microscópio ou um telescópio, por exemplo) e de um ou vários observadores humanos. Bohr e Heisenberg afirmaram que os dois sistemas funcionam segundo diferentes conjuntos de leis físicas. O sistema observador segue as leis da física clássica, mas os sistemas observados (os “objetos”) seguem as da teoria quântica. Isso significa que nunca se poderá antecipar com certeza onde uma partícula atômica vai estar em um determinado instante ou como um processo atômico vai se produzir, porque no nível quântico a posição e o momento de uma partícula não podem ser determinados com certeza. Podem apenas ser calculados em termos de probabilidades. Tudo que se pode fazer é prever as probabilidades.

As partículas subatômicas conhecidas hoje são em sua maior parte instáveis; isto é, decaem ou se desintegram em outras partículas após certo tempo. A interpretação de Copenhague diz que não é possível prever esse tempo com precisão. Ao contrário, tudo que se pode prever é a probabilidade de decaimento após um certo tempo. Da mesma maneira, o processo específico de decaimento não pode ser previsto com precisão absoluta. Uma partícula instável pode se desintegrar em várias combinações de outras partículas, mas tudo que se pode prever são médias estatísticas. Por exemplo, dentre um grande número de partículas, x por cento vão decair de uma maneira, y por cento vão decair de outra e z por cento de uma terceira maneira. Essas previsões estatísticas exigem que muitas medidas sejam verificadas. De fato, atualmente, na física de alta energia, registram-se e analisam-se dezenas de milhares de colisões de partículas para determinar a probabilidade de qualquer processo particular.

A teoria quântica requer o reconhecimento da probabilidade como um traço fundamental da realidade atômica que governa todos os processos da matéria e até sua existência. Nela, as partículas atômicas não existem com certeza em lugares definidos e mostram apenas “probabilidades de existir”. E eventos atômicos não ocorrem com certeza, em tempos definidos e de maneiras definidas, mostram apenas “probabilidades de ocorrer”.

A interpretação Bohr/Heisenberg do significado do *quantum*, que implicou uma visão modificada do significado de *explicação física*, foi gradualmente aceita pela maior parte dos físicos. O mais famoso e franco dissidente, contudo, foi Albert Einstein. (Mencionei o tema desse prolongado debate no Capítulo Dois.) O cerne da discordância de Einstein era a ideia, sustentada por Bohr, de um universo “probabilístico”, em que o acaso desempenha importante papel na ocorrência dos eventos. Isso ofendia profundamente o senso de ordem de Einstein e

contrariava sua crença num universo “determinístico”, tal como o revela seu comentário, tantas vezes citado, de que “Deus não joga dados com o universo”. Embora, como disse, a maioria dos físicos hoje concorde com Bohr, Einstein morreu sem se convencer.

Durante a década de 1930, Bohr continuou a trabalhar com problemas suscitados pela teoria quântica, além de contribuir para o novo campo da física nuclear. Sua concepção do núcleo atômico, que ele comparava a uma gotinha, foi um passo importante para a compreensão de muitos processos nucleares. Em particular, desempenhou um papel-chave em 1939 na compreensão da fissão nuclear.

A DIVISÃO DO ÁTOMO

Em 1939, Otto Hahn e Lise Meitner haviam estudado a desintegração de núcleos de urânio por nêutrons. Trabalhando juntos, haviam descoberto que bombardeando-se certos átomos com partículas de materiais radioativos podia-se partir o núcleo daqueles átomos, liberando energia. De início não compreenderam plenamente o que haviam feito.

Em Estocolmo, Meitner e seu sobrinho, o físico Otto Frisch, analisaram os dados e concluíram que o que ocorrera fora a fissão (cisão) do urânio. Juntos, Meitner e Frisch redigiram um artigo sobre esse feito e o submeteram à revista inglesa *Nature*. Frisch, que estava trabalhando com Bohr em seu laboratório em Copenhague, falou-lhe sobre o artigo antes que ele fosse publicado. Bohr percebeu de imediato as implicações da fissão nuclear e, numa viagem aos Estados Unidos, divulgou a notícia entre os participantes de uma conferência de física em Washington.

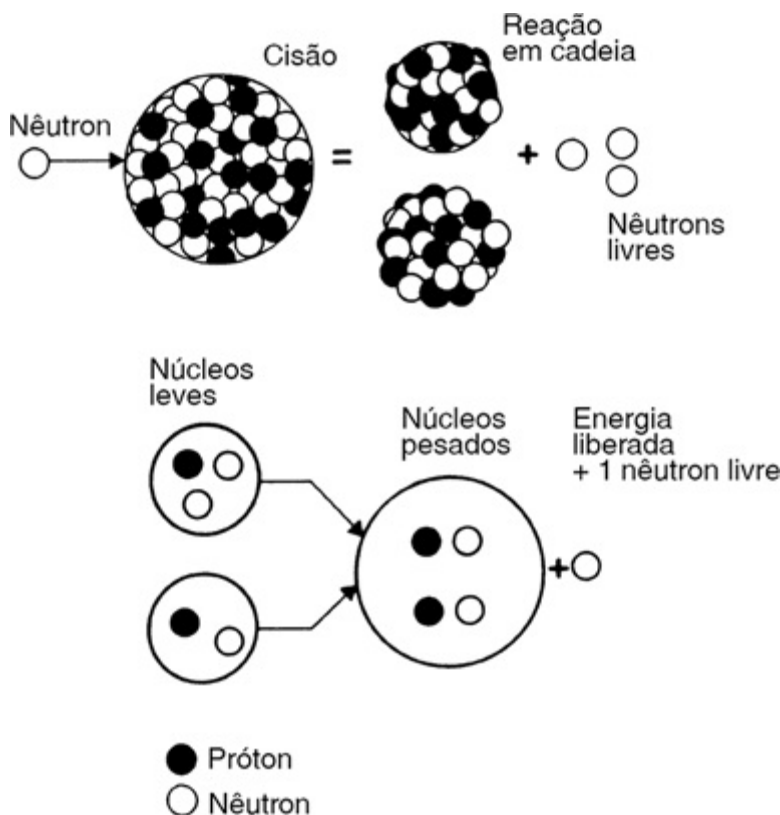
As implicações da descoberta Meitner/Hahn/Frisch eram estarrecedoras. Em 1905 Einstein havia demonstrado que massa e energia eram conversíveis, mas aquilo era teoria e essa notícia era fato. Se um nêutron que cinde um núcleo de urânio pudesse iniciar uma reação em cadeia pela qual nêutrons liberados pudessem por sua vez desintegrar outros núcleos, liberando assim cada vez mais energia de modo quase instantâneo, esse processo poderia resultar numa explosão de força assombrosa. Mas o laboratório de Hahn em Berlim não explodira, nem as instalações de Meitner na Suécia.

Bohr e um jovem colega de Princeton chamado John Wheeler começaram imediatamente a trabalhar, na tentativa de resolver o paradoxo. O artigo Bohr/Wheeler publicado em 1939 explicou o processo de fissão nuclear e por que o laboratório de Hahn continuava de pé. Bohr e Wheeler mostraram que a maior parte dos núcleos de urânio não era dividida, apenas uma pequena parcela. Esta, explicaram, devia ser composta por núcleos pertencentes a um isótopo de urânio particularmente suscetível. A fissão nuclear acontecia não no núcleo de urânio comum, estável (urânio 238), mas no núcleo do urânio 235, um isótopo muito mais raro. (Lembre-se que o termo *isótopos* designa os membros de uma família de elementos que partilham a mesma posição na escala periódica, mas diferem entre si no número de nêutrons que contêm.) No caso em questão aqui, tanto U-235 quanto U-238 têm 92 prótons, mas seus nêutrons somam 143 e 146, respectivamente. Em seu hoje célebre artigo, Bohr e Wheeler explicaram como e por que o núcleo de U-235 é menos estável, ou fissil.

FISSÃO E FUSÃO

Se, como na analogia de Bohr, concebemos os núcleos atômicos como gotinhas de fluido nuclear, devemos supor que essas gotinhas são eletricamente carregadas porque cerca da metade das partículas que formam o núcleo são prótons. As forças de repulsão elétrica entre constituintes nucleares que tentam partir o núcleo em duas ou mais partes são neutralizadas pelas forças de tensão de superfície que tendem a manter o núcleo íntegro. Essa é a base da estabilidade nuclear. Se as forças elétricas de repulsão se tornarem mais fortes, o núcleo tenderá a rebentar em alta velocidade; esse processo de fragmentação é designado pelo termo *fissão*.

Bohr e Wheeler calcularam o equilíbrio matemático entre a chamada tensão de superfície e as forças repulsivas elétricas nos núcleos de diferentes elementos e mostraram que, enquanto as forças de tensão de superfície eram dominantes nos núcleos de todos os elementos da primeira metade do sistema periódico (aproximadamente até a prata), as forças repulsivas elétricas preponderavam em todos os núcleos mais pesados. Em outras palavras, os núcleos de todos os elementos mais pesados que a prata tendem a ser instáveis e, sob um bombardeio de partículas suficientemente forte, se romperiam em duas ou mais partes, com a consequente liberação de considerável quantidade de energia nuclear interna. Por outro lado, um processo espontâneo de fusão deveria ser esperado sempre que dois núcleos leves, com peso atômico combinado menor que o da prata, fossem reunidos. O artigo Bohr/Wheeler representou um avanço seminal na compreensão do núcleo atômico e do potencial da liberação de energia a partir de átomos, de maneira lenta e controlada no caso de uma usina termonuclear, e rápida e descontrolada no caso de uma arma atômica.



FISSÃO E FUSÃO NUCLEAR A fissão é o processo em que os núcleos são bombardeados por nêutrons e se dividem em duas partes, liberando energia e vários nêutrons adicionais. A fusão ocorre quando núcleos leves se combinam (sob condições de alta

temperatura) para formar um núcleo mais pesado, liberando energia e nêutrons adicionais.

Quando um nêutron atinge um núcleo de urânio, o núcleo é fissionado (ou cindido) em dois núcleos menores de aproximadamente metade do seu tamanho. Vários nêutrons são também emitidos, juntamente com radiação de alta energia. Esses nêutrons livres podem ir adiante, causando outras fissões numa reação em cadeia. Mas nêutrons podem ser desacelerados por grafite ou água pesada misturados com urânio, e assim a reação em cadeia pode ser controlada.

A BOMBA ATÔMICA

Mais ou menos na mesma época, o excêntrico físico húngaro Leo Szilard — que, como Meitner, fugira da Alemanha nazista por ser judeu — estava também pensando na possibilidade de uma bomba atômica. H.G. Wells havia sido o primeiro a usar o termo *bomba atômica* numa obra de ficção científica que Szilard lera e não esquecera. Szilard sabia que a fissão nuclear por si só não produziria uma arma; caso se conseguisse, porém, inventar algum disparador capaz de produzir uma reação em cadeia, a bomba poderia ser possível. Szilard sabia também que físicos alemães, em particular Werner Heisenberg, deviam estar tão cientes desse potencial quanto ele próprio. Profundamente preocupado, Szilard tornou pública sua ansiedade. Primeiro, trabalhou arduamente para convencer os físicos americanos a estabelecer uma autocensura sobre suas investigações sobre a fissão nuclear. Segundo, com a ajuda de Eugene Wigner, convenceu Albert Einstein a assinar uma carta ao presidente Roosevelt, que viria a resultar no Projeto Manhattan. O que houve de irônico nos esforços de Szilard foi que mais tarde as forças armadas dos EUA passaram a confiar tão pouco nele que o mantinham sob a vigilância quase contínua do FBI.

Como explicado anteriormente, foram Bohr e Wheeler que mostraram que, em bases teóricas, o urânio 235 é que deveria ocasionar uma reação em cadeia. O urânio 235 é menos estável que o urânio 238, e até um nêutron lento pode provocar sua fissão. Uma das principais tarefas tecnológicas no desenvolvimento da bomba de fissão foi separar o urânio 235 do urânio 238, porque o urânio comum encontrado na natureza não contém urânio 235 suficiente para suportar uma reação em cadeia nuclear. Era preciso extrair quantidades concentradas.

Anos antes, Rutherford brincara sobre o que naquela altura não passava de remota teoria: “Algum idiota num laboratório poderia explodir o universo sem querer.” Agora a ideia deixara de ser uma piada.

ANOS DA GUERRA

Em 1940 a Alemanha ocupou a Dinamarca e iniciou-se para os dinamarqueses um período de extrema provação. Apesar de muitas oportunidades de escapar, Niels Bohr optou por permanecer na Dinamarca. A essa altura ele tinha uma posição elevada no *establishment* dinamarquês. O rei decidira ficar com seu povo e Bohr achou que devia fazer o mesmo.

Durante os dois primeiros anos, a ocupação nazista foi relativamente inofensiva. Os alemães permitiam aos dinamarqueses uma aparência de autogoverno através do parlamento do país e do rei. O interventor alemão, Werner Best, chegava a ser mencionado como um embaixador. Bohr esperava poder levar adiante seu trabalho em física teórica no instituto com pouca interferência nazista. Pensava também que, continuando à frente do instituto, teria melhores condições de proteger seus colegas. Isso não se confirmou.

A situação incômoda de Bohr e a frágil ficção de uma Dinamarca independente tiveram fim em agosto de 1943, quando o governo de Hitler decidiu recolher e “deportar para o leste”, isto é, enviar para os campos da morte, 8.000 judeus da Dinamarca. O governo dinamarquês preferiu renunciar a levar a cabo as diretrizes nazistas e os alemães declararam lei marcial. A vida de Bohr, como a de todos os demais judeus dinamarqueses, estava agora em perigo imediato. A família Bohr não era religiosa, mas, tendo uma mãe judia, Bohr era judeu por decreto nazista.

Foi então que ocorreu um dos eventos mais heroicos e extraordinários da Segunda Guerra Mundial. Ao longo de umas poucas semanas, a quase totalidade da população judaica da Dinamarca desapareceu. Valendo-se de barcos de todo tamanho e qualidade, de esquifes a traineiras, começaram a cruzar o estreito de Kattegat para buscar refúgio na Suécia. Esse asilo fora assegurado em parte por Niels Bohr, que articulara pessoalmente um encontro com o rei Gustavo da Suécia e garantira um porto seguro para todo o povo judeu da Dinamarca que conseguisse chegar à Suécia. Na noite em que esperavam arrebanhar a população judaica dinamarquesa, os nazistas não conseguiram deter nem 300. Estes eram em grande parte os velhos ou enfermos, ou alguns que viviam em aldeias muito remotas para receber um aviso ou que tinham levado tempo demais para agir quando o receberam. No total, cerca de 450 judeus dinamarqueses foram enviados para os campos da morte nazistas. O mérito pelo ato de bravura dinamarquês cabe à resistência dinamarquesa, que, com o corajoso apoio de seu rei e de funcionários-chave do governo, conseguiu salvar as vidas de mais de 7.000 homens, mulheres e crianças.

O governo britânico e, em particular, a comunidade científica britânica haviam estado em contato secreto com Bohr durante algum tempo e insistido para que fugisse para a Inglaterra. Depois de declarada a lei marcial na Dinamarca, o conselheiro para assuntos científicos de Winston Churchill, Lord Cherwell, enviou mais um convite a Bohr, e ele aceitou. Cherwell queria Bohr para o projeto da bomba atômica da Grã-Bretanha, nessa época chamado Tube Alloys. Com igual interesse, desejava manter Bohr à distância do projeto alemão da bomba atômica que sabia estar em andamento sob a direção de Werner Heisenberg.

Enquanto os refugiados dinamarqueses, entre os quais a família Bohr, encontravam segurança na Suécia, Bohr aceitou a proposta da Inglaterra no tocante a ele e a seu filho Aage, então com 21 anos e recém-graduado em física. A sra. Bohr e o resto da família foram deixados na Suécia.

Os ingleses concluíram que, mesmo com Bohr na neutra Suécia, tinham de trabalhar depressa para mantê-lo fora das mãos dos nazistas. Apenas um ou dois dias após chegar ao país, Bohr recebeu instruções para se apresentar no aeroporto de Estocolmo, de onde voaria para fora do país no compartimento de bombas vazio de um bombardeiro Mosquito britânico. Foi um voo perigoso sobre o Mar do Norte que passou também sobre vários campos de pouso inimigos na Noruega. Bohr foi enfiado em um pesado traje de aviador, teve um paraquedas

preso às costas e recebeu um capacete equipado com fones de ouvido para se comunicar com o piloto. Este disse a Bohr que, para evitar os interceptores da Luftwaffe, teria que voar a altitudes muito altas durante parte da viagem e que avisaria a Bohr quando ligar seu oxigênio. No entanto, o capacete de avião dado a Bohr ficava tão no alto de sua grande cabeça que os fones de ouvido não chegavam a lhe cobrir as orelhas. O resultado foi que Bohr não ouviu as instruções do piloto e nunca ligou seu oxigênio. Por causa da falta de oxigênio, ele desmaiou e fez grande parte da viagem até a Escócia desacordado. Alarmado com a ausência de resposta do seu passageiro, o piloto reduziu a altitude do avião assim que pôde e, ao aterrissar, foi correndo lá atrás ver o que tinha acontecido. Bohr recobrou a consciência e, nada afetado pela experiência, seguiu em novo voo até Londres, onde um grupo de eminentes cientistas ingleses o acolheu calorosamente.

Embora suspeitasse de que o trabalho com armas atômicas estava em andamento, Bohr ficara praticamente sem contato com o mundo exterior por mais de dois anos em razão da guerra. Surpreso com o grande progresso feito em direção ao desenvolvimento de uma arma nuclear, integrou-se imediatamente à equipe britânica que participava do enorme Projeto Manhattan nos Estados Unidos. Com o filho Aage, Niels viajou para Los Alamos, onde encontrou muitos de seus ex-alunos trabalhando sob a direção de Robert Oppenheimer, a quem Bohr tinha em alta conta como físico e como líder.

Em Los Alamos, Bohr atuou como uma espécie de conselheiro sênior e ajudou a elucidar várias questões não respondidas. Em particular, contribuiu para o projeto da montagem da bomba e do dispositivo iniciador. Mais tarde ele recordou o quanto o vasto Projeto Manhattan o fascinara. Pudera perceber que, sob a direção de Oppenheimer, o trabalho estava caminhando bem e que uma bomba nuclear seria certamente desenvolvida no futuro próximo. Ao se dar conta disso, Bohr passou a ter maior interesse pelas implicações políticas da bomba em âmbito mundial que pelos detalhes técnicos de sua construção e dedicava grande parte de seu tempo a refletir sobre as implicações pós-guerra da arma e a escrever memorandos políticos.

Bohr temia o início de uma corrida armamentista entre as potências ocidentais e a União Soviética e propôs que os soviéticos fossem informados sobre a bomba antes de seu uso. Ao contrário dos políticos e dos militares, sabia que de todo modo seria impossível manter a física da bomba em segredo e que os soviéticos tinham capacidade técnica e industrial para construir sua própria arma nuclear em poucos anos. O que ele não sabia era que a rede de espionagem de Klaus Fuchs/David Greenglass estava, de fato, partilhando segredos com os soviéticos. Tampouco sabia nessa altura que Stalin decidira adotar após a guerra uma dura política de confrontação contra o Ocidente. Por isso, o “mundo nuclear aberto” proposto por Bohr não teria de todo modo impedido uma guerra fria.

Em maio de 1944, Bohr conseguiu marcar um encontro com Winston Churchill para discutir sua proposta. O encontro foi um desastre. Para começar, o primeiro-ministro não estava desejoso de ver Bohr, e as divagações filosóficas que este lhe sussurrou caíram em ouvidos moucos. Mais tarde Churchill disse a Lord Cherwell, seu conselheiro para assuntos científicos: “Não gostei do homem assim que você o trouxe, com aquele cabelo pela cabeça toda.”

Sem se deixar desencorajar por esse revés, Bohr continuou a defender o controle internacional da bomba atômica. Voltou para os Estados Unidos, onde o juiz Frankfurter (da

suprema corte) e os conselheiros para assuntos científicos da presidência, Vannevar Bush e J.B. Connant, todos a favor de sua posição, conseguiram articular um encontro seu com o presidente Franklin Roosevelt. Na Casa Branca, Bohr teve uma acolhida inteiramente diferente da que recebera de Churchill. Roosevelt ficou impressionado com ele e ouviu tudo o que tinha a dizer com simpatia e compreensão. Por outro lado, quando Roosevelt e Churchill se encontraram em sua segunda conferência de Quebec, Churchill mostrou-se inflexível em sua oposição ao controle internacional das armas atômicas. Nada relacionado ao Projeto Manhattan deveria ser partilhado com os russos e nem mesmo com os franceses. Churchill ficou tão furioso ao ver que Bohr conseguira influenciar Roosevelt que, em dado momento, chegou a pedir a prisão de Bohr. Irritado, teve de se contentar com a manutenção de Bohr, e de todas as pessoas sob sua influência, sob vigilância.

A campanha de Niels Bohr por uma sociedade cientificamente aberta, contudo, não terminou com a Segunda Guerra Mundial. Em junho de 1950, ele divulgou uma declaração pública intitulada “Carta aberta às Nações Unidas”. Nesse documento, fez uma longa defesa de uma “sociedade aberta”. Àquela altura, porém, com a Guerra Fria já em curso, havia pouca simpatia por tais ideias liberais na comunidade internacional.

ÚLTIMOS ANOS

Em seus últimos anos, Bohr foi mais um espectador que um participante no mundo da física, mas ainda mantinha uma vigorosa postura ética. Tentou apontar caminhos pelos quais a ideia de complementaridade poderia lançar luz sobre muitos aspectos da vida e do pensamento humanos. Ao longo de toda a sua carreira, exerceu importante influência sobre duas gerações de físicos, não só moldando sua abordagem à ciência como fornecendo-lhes um modelo de como um cientista deveria conduzir sua vida. Bohr morreu em Copenhague no dia 18 de novembro de 1962. Tinha 77 anos de idade. Havia sido um homem de ciência muito querido e sua morte foi pranteada em todo o mundo civilizado.

Na época em que a carreira de Bohr começou, a estrutura do átomo ainda era desconhecida. Quando ela terminou, a física atômica alcançara a maturidade. A energia contida no núcleo atômico estava tendo aplicação industrial na produção de força, aplicação médica no tratamento do câncer e também, lamentavelmente, aplicação militar e política na mais destrutiva arma jamais concebida.

Em toda a sua extraordinária carreira pública, Bohr sempre manteve um espírito profundamente internacional e humanitário. Deve ter sido uma pílula amarga para ele aceitar que seu brilhante aluno e muito amado aprendiz tivesse finalmente escolhido servir a uma causa desonrosa. A carreira sombria de Werner Heisenberg faz um marcante contraste com a de Bohr e, considerando-se o tipo de homem que Bohr foi, representa uma traição quase incomensurável.

^a Experiência recente mostrou que as características de onda e de partícula podem, na verdade, estar presentes simultaneamente. (N.R.T.)

^b O momento, ou momentum linear, é o produto da massa pela velocidade. (N.R.T.)

WERNER KARL HEISENBERG

Todas as minhas tentativas de adaptar o fundamento teórico da física a esse conhecimento fracassaram por completo. Era como se tivessem arrancado o chão sob os pés de uma pessoa, sem nenhuma base firme sobre a qual se pudesse ter construído.

*Albert Einstein, com relação às implicações
do princípio da incerteza*

A ironia da alegação de Einstein é que, na época em que a fez, só poucos anos haviam se passado desde que ele próprio desafiara tão profundamente os pressupostos científicos estabelecidos. Graças a Einstein, o espaço tridimensional e o tempo unidimensional haviam se tornado aspectos relativos de um contínuo espaço-tempo quadridimensional. O tempo fluía em ritmos diferentes para observadores que se movessem em velocidades diferentes. O tempo passava mais lentamente nas proximidades de objetos pesados e, sob certas circunstâncias, poderia parar completamente. Os planetas se moviam em suas órbitas não porque eram puxados em direção ao Sol por uma força de atração que atuava a distância, como Newton ensinara, mas porque o próprio espaço em que se moviam era curvo. Ninguém havia sacudido o mundo da ciência mais do que o fez Einstein, e agora cá estava esse jovem convencido da Alemanha com mais um ataque à física clássica.

Quem foi esse homem que solapou tão radicalmente as certezas científicas estabelecidas há tanto tempo — e, por implicação, todas as tentativas humanas para compreender o mundo natural com alguma segurança? Foi um homem multidimensional e um fenômeno em matéria de contradições. E suscitou muitas perguntas desconcertantes. Teria sido um “herói reticente que talvez tenha salvo a humanidade de uma catástrofe inimaginável”, como afirma Thomas Powers em *Heisenberg’s War*? Ou foi um mentiroso e um hipócrita que estragou por inépcia a tentativa da Alemanha de construir uma bomba atômica e depois inventou o que C.P. Snow chamou de “linda história romântica” segundo a qual havia obstruído deliberadamente o desenvolvimento de uma arma nuclear nazista por razões morais? Ao que parece, há somente dois adjetivos que os admiradores e os detratores de Heisenberg podem estar de acordo em lhe atribuir: *brilhante e controverso*.

Werner Heisenberg foi um dos pioneiros na abertura do caminho para o estranho mundo do *quantum*. Será *estranho* uma palavra adequada para descrever o *quantum*? Considere dois dos principais problemas conceituais da física quântica: (1) o efeito de não localidade, que significa que diferentes partes do sistema quântico parecem se influenciar umas às outras mesmo quando separadas por uma grande distância e ainda que não haja conexão evidente entre elas; (2) e o chamado problema da medição, que surge da ideia que os sistemas quânticos têm de possuir propriedades mensuráveis ainda que pareça não haver nada fora da

física quântica capaz de fazer essas medições. A física quântica põe em questão as noções convencionais sobre o mundo físico e suas implicações são profundas. Heisenberg é um dos mais importantes guias na tentativa de compreender essas implicações.

PRIMEIROS ANOS

Heisenberg nasceu no dia 5 de dezembro de 1901 em Würzburg, Alemanha, filho caçula de August e Anna Heisenberg. Seu pai era um professor especializado em história bizantina e o menino Werner foi criado na atmosfera de uma refinada comunidade acadêmica de classe média alta. Heisenberg frequentou a escola primária primeiro em Würzburg e mais tarde em Munique, quando a família se mudou para lá. Ainda no primário, começou a ter aulas de piano e aos 13 anos já tocava composições dos grandes mestres. Foi a vida toda um excelente pianista.

Em 1911 Heisenberg ingressou no Maximilians-Gymnasium, cujo diretor era seu avô materno. Ali seus extraordinários talentos no campo da matemática foram reconhecidos pela primeira vez. À época dos exames finais, ele havia aprendido cálculo sozinho, trabalhado nas propriedades das funções elípticas, e, aos 18 anos, havia tentado publicar um artigo sobre a teoria dos números.

Mas a vida de Heisenberg não era toda acadêmica. A época que se seguiu à Primeira Guerra Mundial foi um período de sublevação na Alemanha e as ruas de Munique eram o palco de muita agitação política. A derrota da Alemanha na guerra e a abdicação do Kaiser provocaram inquietação em todo o país. Na Bavária, uma república socialista se implantou em 1918, seguida em 1919 por uma república de orientação bolchevique que foi derrubada por tropas de Berlim. O jovem Heisenberg, que apoiava o movimento nacionalista representado pelo exército, participou de várias lutas de rua contra grupos comunistas.

Muitos rapazes alemães pertenciam a organizações de jovens como os Desbravadores Alemães, que fora fundada para inspirar o nacionalismo e a prontidão para a guerra, ou a Liga Bávara Jovem, patrocinada pelo Estado, contra a qual alguns dos adolescentes do Maximilians-Gymnasium se rebelaram, criando uma nova organização. Na busca de um líder, encontraram Werner Heisenberg, então com 17 anos. Ele era ideal para o papel: um aluno mais velho, desiludido com a ordem estabelecida, querido na escola e dotado de autoconfiança intelectual e de boa aparência. O Gruppe Heisenberg, como a nova organização ficou conhecida, desvinculou-se da Liga Bávara Jovem, embora tenha continuado a pertencer aos Desbravadores, e durante algum tempo se reuniu na casa de Heisenberg. Ele, no entanto, estava mais voltado para atividades atléticas que para questões políticas. Seus principais interesses eram escalar montanhas, esquiar e acampar. Durante suas excursões à região das montanhas, Heisenberg e seus seguidores engajavam-se frequentemente em debates filosóficos ou jogavam xadrez. Heisenberg era um exímio jogador de xadrez. Foi famoso por isso desde muito menino e era conhecido por realizar partidas de xadrez durante aulas na escola, debaixo da carteira. Muitas vezes jogava sem sua rainha para dar ao adversário uma chance de ganhar. Diz-se que ele e o irmão mais velho, Kurt, de vez em quando chegavam a jogar xadrez mentalmente enquanto caminhavam.

Longe de abraçar a política extremista incentivada pelo movimento juvenil, Heisenberg tornou-se cada vez mais apolítico e academicamente elitista. Acreditava que ciência e política não se devem misturar, e a ciência estava se tornando sua obsessão.

Heisenberg entrou na Universidade de Munique em 1920. Pretendia estudar matemática pura, mas, por alguma razão, o eminente professor de matemática Ferdinand von Lindemann recusou-se a admiti-lo em seu seminário para estudantes avançados. Segundo o relato que o próprio Heisenberg fez de sua entrevista com von Lindemann, o professor tinha no colo um cachorro que latiu o tempo todo e mal ouviu uma palavra do candidato. O pai de Heisenberg conseguiu então uma entrevista para ele com o professor de física Arnold Sommerfeld, que não só aceitou o jovem estudante como se tornou seu mentor e guia nos mistérios da física teórica. Foi uma sequência fortuita de acontecimentos: o instituto de Sommerfeld era então o único na Alemanha a enfatizar a teoria quântica da física atômica.

Além da física, Heisenberg estudou os clássicos, em particular as obras científicas dos filósofos da Grécia antiga, de Platão e Aristóteles a Demócrito e Tales. Seu interesse pela relação entre filosofia e ciência perdurou por toda a sua vida. Durante seus anos de graduação com Sommerfeld, ele travou conhecimento com um notável colega estudante de física chamado Wolfgang Pauli, que se tornou seu melhor amigo, por vezes colaborador, e frequentemente seu crítico mais severo.

Enquanto ainda estudante, Heisenberg deu provas de sua extrema autoconfiança, até audácia. Um problema estava importunando os pesquisadores em física atômica. Era conhecido como o *efeito Zeeman* e dizia respeito às reações inexplicáveis de um átomo quando em um campo magnético. Especificamente, quando o átomo estava em um campo magnético, suas linhas espectrais dividiam-se em mais do que os três componentes esperados. Em seu primeiro artigo publicado, Heisenberg propôs um modelo para o efeito Zeeman que explicava o fenômeno. Esse modelo tinha suas falhas e mais tarde foi suplantado por outras teorias. Ainda assim, o artigo de Heisenberg serviu de base para a maior parte dos trabalhos posteriores sobre o efeito Zeeman e, é claro, atraiu para o estudante a atenção de teóricos reconhecidos.

Em 1922 o professor Sommerfeld levou seu protegido a Göttingen para uma série de palestras que Niels Bohr faria sobre física atômica quântica. Na primeira sessão, o jovem Heisenberg teve o topete de criticar uma das afirmações de Bohr. O debate subsequente entre o atrevido estudante e o maior expoente mundial incontestado da física atômica resultou em mútua admiração e marcou o início de sua duradoura colaboração, que seria para Heisenberg tão importante quanto a parceria que teve a vida toda com Wolfgang Pauli. Heisenberg tinha apenas 20 anos quando desse primeiro encontro com Bohr, sempre atento a estudantes argutos que não tinham medo de discutir com ele. Ao término da palestra, Bohr foi à procura de Heisenberg e o convidou para uma caminhada após o almoço. Muitos anos depois, em sua biografia, Heisenberg disse: “Minha verdadeira carreira científica começou somente naquela tarde.” Bohr sugeriu que, depois de se graduar, Heisenberg se transferisse para Copenhague para poderem trabalhar juntos.

Nem tudo foi tranquilo para Heisenberg na Universidade de Munique. Em primeiro lugar, Sommerfeld mandou que abandonasse o xadrez, alegando que o jogo estava lhe tomando tempo demais. Pauli, um ano à frente de Heisenberg no curso, estava sempre lá para lhe deflacionar o ego com a crítica penetrante de seus artigos. Por fim, houve um problema com

sua tese de doutorado. Durante sua arguição oral, Heisenberg caiu no desagrado de um dos examinadores, o eminente professor de física experimental Wilhelm Wein, por sua incapacidade de explicar como funciona uma bateria ou como um telescópio amplia imagens. A física experimental prática nunca fora o forte de Heisenberg e, como um de seus críticos afirmaria mais tarde, ele não sabia nem soldar dois fios. Wein ficou horrorizado com a falta de conhecimento do rapaz sobre tópicos tão simples e só um arrazoado especial de Sommerfeld pôde convencê-lo a aprová-lo. Heisenberg acabou passando com a menor nota que lhe permitia sair dali com o grau de doutor. Em seguida, foi ao encontro de Pauli na Universidade de Göttingen, Alemanha, onde estudou sob a orientação do matemático Max Born.

Como resultado de seu encontro em 1922, Heisenberg e Niels Bohr iniciaram uma colaboração por meio de correspondência. Heisenberg começou por colocar em questão a representação do interior do átomo proposta por Bohr. Ela lhe parecia fantasiosa e imprecisa e ele concluiu que, apesar de seu apelo pictórico, não havia prova real de que retratasse a realidade. Afinal, ninguém jamais observara um elétron circulando numa órbita atômica. Bohr acabara de fazer a asserção teórica de que os elétrons orbitam. Heisenberg decidiu seguir seu próprio caminho na descoberta das regras desconhecidas que governavam a física do átomo.

Em 1925, acometido de febre do feno, Heisenberg tirou uma licença de duas semanas e viajou para a ilha de Helgoland, ao largo da costa da Alemanha. Ali, lembrou mais tarde, a natação no mar frio e longas caminhadas na praia limpavam-lhe a mente para um ataque revigorado à matemática do átomo. Apenas alguns dias depois de iniciado o passeio, fez uma importante descoberta. Com uma estranha matemática que inventou para esse fim, Heisenberg começou a perceber um meio de construir uma estrutura para a descrição do comportamento dos átomos. Essa abordagem matemática exigia uma estranha álgebra em que números multiplicados numa direção forneciam com frequência produtos diferentes dos obtidos multiplicando-se os mesmos números na direção oposta. Heisenberg voltou para Göttingen eufórico com suas descobertas nascentes e ansioso para falar sobre elas com Max Born. Este identificou a estranha matemática de Heisenberg como álgebra matricial, um sistema que havia sido inventado na década de 1850 mas nunca fora ensinado a Heisenberg.

Uma *matriz* é uma tabela bidimensional de números. Na álgebra matricial, foram concebidas normas pelas quais duas matrizes podem ser multiplicadas uma pela outra para dar uma outra matriz e, ao fazê-lo, as matrizes obedecem a leis de multiplicação não convencionais. Na álgebra matricial, o produto de B e A não é igual ao produto de A e B , quando na multiplicação comum de números, o produto de, por exemplo, 5 e 4 é o mesmo que o produto de 4 e 5 — ambos são iguais a 20. Na concepção de Heisenberg, cada átomo seria representado por uma matriz e o movimento dos elétrons no interior do átomo poderia ser representado por outra matriz. Em três meses de trabalho intensivo, Born, Heisenberg e seu colega Pascual Jordan usaram a ideia de Heisenberg para arquitetar uma estrutura matemática coerente que parecesse abarcar todos os múltiplos aspectos da física atômica. A prestidigitação matemática de Born/Heisenberg/Jordan permitiu a previsão extremamente precisa de resultados experimentais relativos à radiação atômica.

Em 1926, Heisenberg aceitou um convite de Niels Bohr para se transferir para o Instituto de Física Teórica, em Copenhague, e trabalhar como seu assistente. Foi uma decisão crucial, que marcou o início do período mais criativo da vida de Heisenberg no campo da ciência, bem como o início de uma longa e estreita colaboração com Bohr. Heisenberg, então com 24 anos, era 16 anos mais moço que seu mundialmente renomado mentor. A relação profissional dos dois logo se transformou também numa profunda relação pessoal. Heisenberg não só se tornou o favorito de Bohr no instituto como foi convidado a frequentar o círculo íntimo da casa de Bohr. Ele brincava com os filhos de Bohr, unia-se à família à noite para saraus musicais em que tocava piano e frequentemente era hóspede da casa de verão de Bohr na costa dinamarquesa. Só a mulher de Bohr, Margrethe, não se deixava levar pelo charme de Heisenberg. Considerava-o difícil, defensivo e fechado.

De sua parte, Heisenberg ficou impressionado com a atmosfera intelectualmente desafiadora do instituto e com a simpatia da família de Bohr. De início, sentiu-se intimidado diante dos outros rapazes reunidos no instituto. Pareciam-lhe mais cosmopolitas e com muito mais conhecimento de física que ele. Morando sozinho numa pensão, passava seu tempo livre aprendendo dinamarquês e inglês. Tinha facilidade para línguas e logo foi capaz de ler e escrever em ambas.

Quanto à física, a colaboração entre Heisenberg e Bohr tinha por objetivo determinar uma representação mais completa do átomo: uma teoria que fosse matematicamente demonstrável e que pudesse responder a todas as questões levantadas sobre as qualidades observáveis do átomo. O artigo Born/Heisenberg/Jordan representara um importante avanço em direção a essa meta e, por um curto período, a mecânica matricial dominou a cena da física atômica. Físicos do mundo inteiro lutavam com aquela matemática arcana ao mesmo tempo em que aclamavam seus criadores. Não demorou muito, porém, para que o príncipe Louis de Broglie e Erwin Schrödinger ameaçassem seriamente o predomínio de Heisenberg, propondo uma teoria completamente nova.

DUALIDADE ONDA/PARTÍCULA

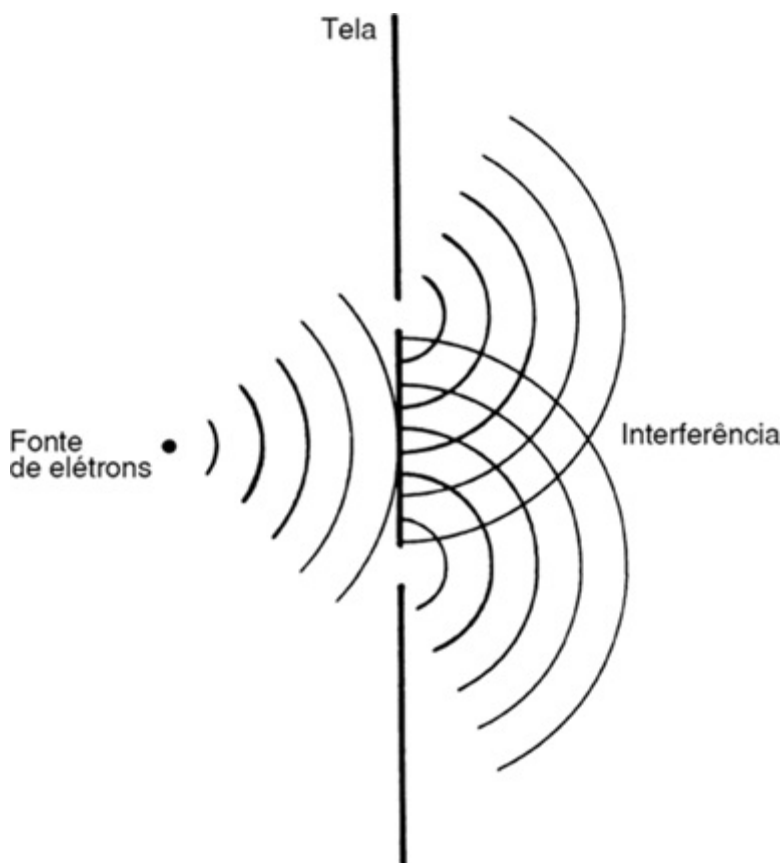
O príncipe Louis de Broglie descendia de uma família nobre francesa. Seu tetravô fora executado na guilhotina durante a Revolução Francesa. O príncipe começara se graduando em história, mas se voltou para a ciência enquanto servia o exército francês durante a Primeira Guerra Mundial. Em 1924, ainda como estudante de pós-graduação, envolveu-se no estudo da natureza da luz. Nessa época, o conceito tradicional de luz como movimento ondulatório já havia sido contestado por Max Planck e Albert Einstein. Eles haviam proposto que a luz podia ser mais facilmente compreendida se pensada como um fluxo de partículas individuais chamadas *fótons*. Nem todos os físicos concordavam com essa concepção e por vezes as duas teorias, a das partículas e a das ondas, eram ensinadas ao mesmo tempo. Numa original intuição, de Broglie sugeriu que toda matéria, inclusive objetos geralmente concebidos como partículas (como os elétrons), deviam exibir comportamento ondulatório. De Broglie fez dessa ideia revolucionária parte de sua tese de doutorado e de início sua banca examinadora em Paris não soube ao certo como avaliar essa enigmática concepção. Não podiam julgá-la

porque na verdade não a entendiam. Pareciam estar prestes a rejeitar a tese quando, por uma carta, souberam o que Einstein tinha a dizer sobre o assunto. Um dos membros da banca examinadora havia enviado a Einstein uma cópia do trabalho, pedindo sua opinião. A resposta foi entusiástica; a tese era mais do que aceitável, era brilhante. Com tão calorosa aprovação do grande homem, de Broglie recebeu rapidamente seu título de doutor.

Nesse trabalho, de Broglie havia usado uma combinação da fórmula de Einstein, que relacionava massa e energia, e da fórmula de Planck, que relacionava frequência e energia, e mostrou que para toda partícula devia haver uma onda associada. Além disso, mostrou que o comprimento de tais ondas está inversamente relacionado ao momento da partícula e que o momento, por sua vez, depende da massa e da velocidade da partícula. Quanto maiores forem a massa e a velocidade da partícula, maior o momento e mais curto o comprimento de onda.

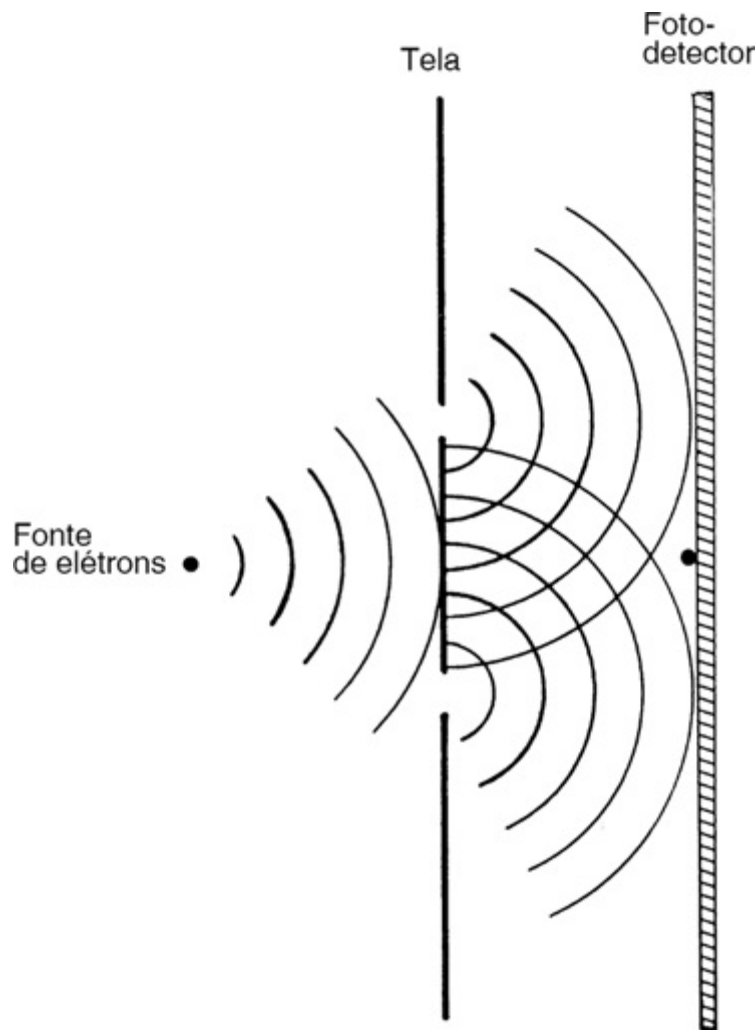
A afirmação original de Einstein de que a matéria não passava de uma forma de energia e que uma e outra eram interconvertíveis ($E = mc^2$) ficava mais plausível quando se percebia que as partículas tinham sempre o caráter de ondas e as ondas tinham sempre o caráter de partículas. O texto produzido por de Broglie em 1924 foi um feito de tal importância que o Prêmio Nobel de Física de 1929 lhe foi concedido por esse trabalho e por sua concepção central do dualismo onda/partícula.

O físico austríaco Erwin Schrödinger, nessa época professor na Universidade de Stuttgart, leu sobre as ondas/partículas de de Broglie pela primeira vez numa nota de rodapé de um artigo de Einstein e lhe ocorreu que a representação do átomo tal como construída por Bohr precisava ser modificada para levar as ondas em conta. Consequentemente, dedicou-se a refinar e aperfeiçoar o átomo de Bohr e surgiu com sua própria concepção.



EXPERIMENTO DE DUPLA RANHURA A radiação eletromagnética se comporta tanto como partículas quanto como ondas. Só é possível explicar padrões de interferência, como os mostrados aqui, admitindo que a luz se propaga na forma de ondas.

Schrödinger concluiu que o elétron não circula em torno do núcleo como um planeta circula em torno do Sol, constituindo antes uma onda que se curva à volta de todo o núcleo, de tal modo que está em todas as partes de sua órbita ao mesmo tempo. Com base no comprimento de onda previsto por de Broglie para um elétron, um número inteiro de ondas de elétron se encaixaria exatamente nas órbitas esboçadas por Bohr. Como na representação de Bohr, enquanto permanecesse em sua órbita o elétron não irradiaria luz. Além disso, qualquer órbita entre duas órbitas permissíveis para a qual fosse requerido um número fracionário de comprimentos de onda não seria permissível. A concepção de Schrödinger explica a existência de órbitas discretas, entre as quais nada é possível, como uma consequência necessária das propriedades do elétron, especificamente as propriedades ondulatórias propostas por de Broglie. Antes dessa sugestão, a existência de órbitas discretas fora provada por Bohr, com base nas linhas espectrais — mas não realmente explicada. Trabalhando com os colegas P.A.M. Dirac e Max Born, Schrödinger elaborou a matemática envolvida nessa concepção. As relações que inferiram, hoje conhecidas como *mecânica quântica*, assentaram a teoria quântica de Planck numa sólida base matemática 25 anos depois de sua promulgação original.



EXPERIMENTO DE DUPLA RANHURA COM DETECTOR DE PARTÍCULAS Um fotodetector posto em frente às duas fendas vai atestar que fótons individuais batem contra a tela, mostrando que a irradiação eletromagnética se comporta tanto como partículas quanto como ondas.

Publicado em 1926, o trabalho de Schrödinger foi imediatamente criticado por Bohr e

Heisenberg, que viram naquela explicação uma ameaça à mecânica matricial de Heisenberg. Bohr convidou Schrödinger para ir a Copenhague discutir a questão e, já na estação ferroviária, iniciou-se entre os dois um debate inflamado que se prolongou por vários dias, de manhã à noite. Logo, porém, Schrödinger caiu de cama com um resfriado e, para seu azar, estava hospedado na casa de Bohr. A Sra. Bohr tratou dele com chá e simpatia, mas, ao que se conta, Niels Bohr instalou-se na beira da cama e continuou a arengá-lo sobre suas teorias. Desesperado, Schrödinger exclamou que se arrependia da hora em que se envolvera com física atômica. “Mas nós outros ficamos muito felizes por você o ter feito”, respondeu Bohr, “porque graças a isso a física atômica deu um decisivo passo à frente”.

Por fim, foi demonstrado que a mecânica matricial e a mecânica ondulatória de Schrödinger eram equivalentes, já que tudo que uma explicava a outra também o fazia. Sob certos aspectos, a mecânica ondulatória era mais atraente para os físicos porque oferecia à mente uma representação do átomo mais fácil de se visualizar que a versão de Heisenberg.

O PRINCÍPIO DA INCERTEZA

Na primavera de 1927, Werner Heisenberg, então com apenas 26 anos, propôs a *Zeitschrift für Physik* um curto artigo intitulado “Sobre o conteúdo perceptivo da cinemática e da mecânica quântica teórica”. Esse texto de 27 páginas, enviado da Dinamarca para a revista, continha a formulação do famoso “princípio da incerteza” na mecânica quântica (também conhecido como princípio da indeterminação) e assegurou a Heisenberg um lugar na história da ciência. Isso porque o princípio da incerteza tem amplas implicações não só para a física subatômica como para todo o conhecimento humano.

A compreensão que está no cerne do princípio da incerteza surgiu de tentativas teóricas para determinar a órbita exata dos elétrons num átomo. Para detectar a posição de um elétron em circulação num átomo, é necessário iluminá-lo de alguma maneira; isto é, um feixe de alguma radiação eletromagnética de comprimento de onda curto deve ser concentrado no elétron. Essa radiação iluminante, contudo, comporta-se como um grupo de partículas, e estas — ou até uma só delas —, ao colidir com o elétron, alteram-lhe a posição. Mais ou menos como uma bola de bilhar que atinge e move uma outra. Portanto, o próprio ato de iluminar o elétron para observá-lo e medir sua posição altera-lhe o movimento e, conseqüentemente, deixa de ser possível medir sua posição com certeza.

Pode-se fazer uma analogia simples, que ajuda a explicar o princípio, com uma sala de aula cheia de estudantes. O diretor da escola não tem como descobrir por observação direta como os alunos se comportam normalmente porque o mero fato de sua entrada na sala de aula os faz se comportarem de uma maneira atípica. Para dar um outro exemplo, quando se tenta medir a temperatura da água quente de uma chaleira sobre o fogão, o própria inserção de um termômetro na água muda sua temperatura — não muito, é claro, mas o suficiente para tornar a exatidão impossível. O mesmo se aplica a todas as quantidades físicas. O ato da observação sempre altera o observado de maneira tal a impedir uma medida indiscutível.

O princípio da incerteza pode ser compreendido mais facilmente no nível microscópico, porque não é difícil imaginar o quanto partículas extremamente pequenas, como os elétrons,

podem ser afetadas por algo tão débil quanto um feixe de luz. É da máxima importância, porém, compreender que Heisenberg e seus colegas revelaram que a incerteza não está confinada ao microcosmo. Heisenberg mostrou que, na verdade, a incerteza impregna toda a natureza; não é um mero efeito colateral anômalo do trabalho com variáveis experimentais muito diminutas. A incerteza está sempre presente, inescapável. A matemática desenvolvida por Heisenberg mostra que o produto — isto é, o efeito final — das incertezas de, por exemplo, posição e velocidade, ou posição e momento, ou tempo e frequência, muitas vezes está longe de ser insignificante e sempre é maior que uma quantidade física muito pequena.

A posição e o momento de uma partícula elementar não podem ser ambos conhecidos simultaneamente. A razão disso é que se fosse possível manter um elétron imóvel tempo suficiente para que sua posição fosse determinada, já não seria possível determinar seu momento. Uma ideia especial é que o produto das duas incertezas (ou dispersões de valores possíveis) é sempre pelo menos igual a um certo número mínimo. O pesquisador frustrado à procura de certeza é sempre obrigado a transigir; o conhecimento ganho no tocante ao tempo, por exemplo, é pago em incerteza no tocante à frequência, e vice-versa.

Que diferença faz essa inexatidão para nós que vivemos no mundo mais amplo, o macrocosmo? A resposta é que, embora todas as medidas envolvam algum grau de incerteza, na escala macroscópica ele não é significativo. Podemos continuar voando de São Francisco para Nova York com a certeza de alcançar nosso destino final. Não atingiremos exatamente o alvo, mas estaremos suficientemente próximos. Podemos até lançar satélites nas profundezas do espaço com a segurança de que, ainda que nossos cálculos tenham sido um pouquinho inexatos, o erro será tão pequeno que nenhum instrumento de medida poderá detectá-lo.

Ainda assim, pode ser filosoficamente perturbador compreender que há uma inexatidão inerente em tudo o que fazemos, em cada medição que fazemos. Alguns matemáticos, por exemplo, gostariam de acreditar que quando fazem todos os seus cálculos da maneira mais acurada possível, o resultado é inteiramente previsível. Mas não é o que acontece, segundo o princípio de Heisenberg. A própria tentativa de conhecer com absoluta precisão qualquer fato físico é fundamentalmente invasiva. Devemos por isso desistir da investigação científica? Obviamente não. A pesquisa científica prossegue, mas temos nova compreensão de suas limitações.

Com o tempo, as plenas implicações do princípio da incerteza de Heisenberg começaram a emergir. Primeiro os físicos quânticos aceitaram as ideias de Heisenberg, depois outros cientistas, e finalmente uns poucos do público esclarecido em geral. Com essa aceitação veio a compreensão perturbadora de que a incerteza não está confinada ao laboratório.

Logo se descobriram analogias com a mecânica quântica em muitos outros campos, e começou-se a fazer perguntas inquietantes sobre o próprio conhecimento. Haveria alguma área da investigação humana em que o conhecimento poderia ser pensado como absolutamente certo e correto? Mesmo no campo da matemática, por muito tempo considerado a cidadela da certeza, surgiram dúvidas. O matemático austríaco Kurt Gödel mostrou no início da década de 1930 que no interior de qualquer sistema lógico, por mais rigidamente estruturado que seja, sempre há questões que não são possíveis resolver com certeza, sempre se pode descobrir contradições e imprecisões que nele se esgueiraram.

Outra implicação importante e digna de comentário da incerteza é seu efeito sobre a causalidade — a relação entre causa e efeito. Uma causa produz um efeito. Na física clássica,

se compreendemos plenamente a natureza de uma causa particular, podemos prever o efeito. Causa e efeito e previsibilidade, pedras angulares da física clássica, agora estavam em questão. Se é impossível medir com precisão, ao mesmo tempo, a posição e a velocidade de um elétron (ou de qualquer outra partícula), então é também impossível prever exatamente onde esse elétron estará em qualquer instante dado posterior. Um experimentador poderia enviar dois elétrons na mesma direção, e eles não iriam terminar necessariamente no mesmo lugar. Na linguagem da física, a mesma causa poderia produzir diferentes efeitos.

Vimos no Capítulo Um como Newton inventou uma nova matemática, o cálculo, para substituir a geometria plana de Euclides, que lhe parecia inadequada para descrever o sistema do universo. Mesmo com a técnica aperfeiçoada de Newton, porém, nossa capacidade de descrever esse sistema era limitada. Nenhuma equação diferencial do cálculo pode jamais ser resolvida com perfeita exatidão. Muito antes de Heisenberg, os cientistas haviam tido de se resignar em fazer as melhores aproximações possíveis, em vez de esperar uma precisão perfeita. Mas a teoria de Heisenberg afirmou o que havia muito se suspeitava ser inegavelmente óbvio: o conhecimento que a humanidade possui do mundo natural não é, e nunca foi, perfeitamente preciso.

A influência de Heisenberg foi tão difusa que pode ser detectada até no mundo da ficção. Num artigo publicado no *New York Times Book Review*, um crítico disse a propósito de uma romancista: “Ela conhece o bastante sobre Heisenberg para compreender que o ato de observar altera o objeto que está sendo observado; ou, em termos literários, que o ato de contar a história altera a história que está sendo contada.”

“HERR PROFESSOR” E O PRÊMIO NOBEL

Em 1927, enquanto Heisenberg, Bohr e outros estavam apresentando e discutindo a interpretação de Copenhague, Heisenberg aceitou uma designação para professor de física teórica na Universidade de Leipzig. Aos 25 anos, foi o mais jovem professor titular da Alemanha. Em Leipzig, Heisenberg ajudou a transformar o Instituto de Física num centro de pesquisa em física atômica e quântica de primeira linha. Entre seus primeiros alunos estiveram Rudolf Peierls, Edward Teller e Carl Friedrich von Weizsäcker, que se tornariam todos famosos no mundo da física.

Em 1933, Heisenberg foi contemplado com o Prêmio Nobel em reconhecimento por suas muitas contribuições à mecânica quântica (na verdade o prêmio correspondia a 1932, mas por vezes os comitês do Nobel se atrasavam na designação dos premiados, como acontecera com Einstein). Na companhia da mãe, Heisenberg seguiu de trem para Estocolmo para receber o prêmio do rei da Suécia. A caminho, pararam em Copenhague onde Heisenberg queria agradecer pessoalmente a Niels Bohr sua colaboração, que desempenhara papel tão importante em suas descobertas. Na estação ferroviária de Estocolmo, Heisenberg e a mãe foram recebidos por dois outros físicos, P.A.M. Dirac e Erwin Schrödinger, que lá estavam para partilhar o Prêmio Nobel de Física de 1933. Pela primeira vez, três físicos haviam sido escolhidos fundamentalmente por suas contribuições à física teórica.

Aconteceu mais uma coisa em 1933 que teria, sobre a vida de Heisenberg, um impacto

maior até que o Prêmio Nobel: Adolf Hitler foi designado chanceler do Reich e os nazistas conquistaram o poder. Heisenberg e outros membros da comunidade acadêmica deviam estar prevendo isso, porque o domínio das organizações estudantis alemãs, como a de Leipzig, por estudantes nazistas precedeu o controle nazista sobre a sociedade alemã. Durante o período nazista, a ciência na Alemanha se tornaria subserviente ao Estado.

Embora horrorizado com a violência nas ruas, a brutalidade e o antissemitismo dos nazistas, os excessos de seu novo regime, Heisenberg simpatizava com a meta de restauração do partido. “Muita coisa boa está também sendo tentada agora”, ele escreveu, “e é preciso reconhecer boas intenções.” Nunca ingressou no partido nazista, mas, em 1935, assinou o juramento solene de fidelidade pessoal a Hitler que foi exigido de todos os funcionários públicos e dos militares.

Também em 1935, houve várias contestações à interpretação de Copenhague da física quântica. Essas contestações deram lugar a intenso debate nos círculos da física — debate que, para os não cientistas, devia soar como as discussões dos teólogos medievais sobre o número de anjos que podiam dançar na cabeça de um alfinete. Ainda assim, os ataques à interpretação de Copenhague foram levados a sério. Uma breve discussão dos problemas mais famosos, o do aparente paradoxo EPR e o do gato vivo/morto de Schrödinger, vai, acredito eu, ajudar nosso entendimento da realidade quântica.

PARADOXO EPR

Apesar da aceitação geral da teoria quântica, diversos aspectos da mecânica quântica tal como descrita por Bohr e Heisenberg deixavam, como vimos, muitos físicos incomodados, e nenhum mais que Albert Einstein. Uma discordância especial de Einstein incidia sobre uma das mais estranhas asserções da teoria quântica: a de que o caminho que uma partícula seguirá ao se mover de um ponto para outro — de A para B — não pode ser conhecido. O caminho não pode ser determinado com precisão. E não apenas isto, mas todos os caminhos são possíveis, e a cada um deles está associada uma probabilidade. O máximo que podemos fazer, segundo a teoria, é calcular essas probabilidades e com base nisso prever a rota. Einstein, ao contrário, afirmava que se um elétron parte do ponto A e o vemos chegar ao ponto B , o bom senso manda admitir que ele tomou um caminho específico de A para B .

Além disso, Einstein não aceitava as afirmações da teoria quântica no tocante ao problema da medição. Para mostrar o que a seu ver eram as incoerências da mecânica quântica, trabalhou com seus dois jovens assistentes em Princeton, Boris Podolsky e Nathan Rosen, e propôs um experimento mental hoje conhecido como o experimento EPR, das iniciais dos sobrenomes de seus inventores. Antes de passar à explicação desse experimento hipotético, porém, consideremos dois exemplos precursores propostos pelo físico irlandês John Bell.

O dr. Bell introduziu um de seus exemplos num ensaio intitulado “As meias de Bertlmann e a natureza da realidade” incluído em seu livro *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Bell fala de um certo dr. Bertlmann, que gostava de usar pares de meias de cores diferentes, ou melhor, pares de meias de cores desencontradas. De que cores seriam as meias que o dr. Bertlmann usaria num determinado dia era coisa imprevisível. No entanto, quando

alguém o via andando a passos largos pela rua e notava que sua meia esquerda era cor-de-rosa, sabia no ato que a outra não era cor-de-rosa. A observação do primeiro pé e o conhecimento do hábito invariável de Bertlmann forneciam informação imediata sobre o segundo pé. Isto parece bastante simples.

O segundo exemplo de Bell era igualmente simples. Suponha que uma moeda foi fatiada ao meio, de tal modo que cara e coroa ficaram completamente separadas. Sem que ninguém olhe para eles, os dois pedaços são enviados para diferentes partes do mundo no bolso de duas diferentes pessoas. A primeira pessoa que olhar a moeda que leva no bolso vai encontrar ou uma cara ou uma coroa e vai saber de imediato o que a outra pessoa vai encontrar quando olhar a sua.

Einstein, Podolsky e Rosen usaram a mesma lógica em seu ataque aos preceitos fundamentais da mecânica quântica. A ideia básica subjacente a seu experimento hipotético foi usar informação experimental sobre uma partícula para deduzir as propriedades, como a posição e o momento, de uma segunda partícula. Einstein, Podolsky e Rosen imaginaram duas partículas que interagem uma com a outra e depois se afastam velozmente, não interagindo com mais coisa alguma até que o experimentador investigue uma delas. Cada partícula tem seu próprio momento e cada uma está localizada em alguma posição no espaço. Segundo as regras estabelecidas pelo trio EPR, o experimentador hipotético tem condições de medir precisamente o momento total (isto é, os momentos somados) das duas partículas, bem como a distância entre elas quando estão muito próximas. Quando, num instante posterior, o experimentador medir o momento de uma das partículas, ele deverá saber, automaticamente, qual é o momento da outra porque o total não foi alterado. O experimentador poderia ter medido igualmente a posição precisa da primeira partícula e, da mesma maneira, deduzido a posição da segunda. Por outro lado, o princípio da incerteza afirma que a medição física do momento da partícula *A* impede o conhecimento preciso de sua posição. O que incomodava Einstein e seus colegas era a ideia, inerente à interpretação Bohr/Heisenberg da física quântica, de que o estado da partícula *B* dependia de qual das duas medições o experimentador havia escolhido fazer na partícula *A*. Como pode a partícula *B* “saber” se deve ter um momento precisamente definido ou uma posição precisamente definida? Parecia aos autores do artigo EPR que, no mundo quântico, medições feitas numa partícula em um ponto do espaço afetam de algum modo a parceira dessa partícula em algum ponto distante do espaço.

A aceitação da interpretação de Copenhague, ressaltou o artigo EPR, faz com que a realidade da posição e do momento no segundo sistema dependa do processo de medida efetuado no primeiro sistema, o qual não perturbou o segundo sistema em absoluto. A equipe EPR concluiu que “não se poderia esperar que nenhuma definição sensata da realidade admitisse isso”. O artigo EPR sustentava que a interpretação de Copenhague era falha.

Essencialmente, a divergência entre a equipe EPR e a equipe Bohr/Heisenberg diz respeito ao que constitui uma definição “sensata” de *realidade*. Segundo a interpretação de realidade de Copenhague, a posição e o momento da segunda partícula não têm nenhum significado objetivo até serem medidos, seja o que for que se tenha feito com a primeira partícula. Cabe lembrar que, segundo regras estritas da mecânica quântica, não há nenhuma realidade claramente definida até que ela seja observada.

No devido tempo, Bohr e companhia assinalaram uma discrepância lógica no artigo EPR: mesmo que o aparelho de medida fizesse exatamente o que seus três inventores disseram que

faria — primeiro medir a posição exata de uma partícula distante e depois, após alguma modificação, medir o momento exato dessa partícula distante —, a necessidade de duas medições isoladas e distintas continuaria sendo uma verdade. Numa medição única nunca se poderia medir tanto a posição quanto o momento com precisão. Portanto, os preceitos centrais da mecânica quântica permaneciam inviolados. Nem assim, porém, Einstein se deixou convencer.

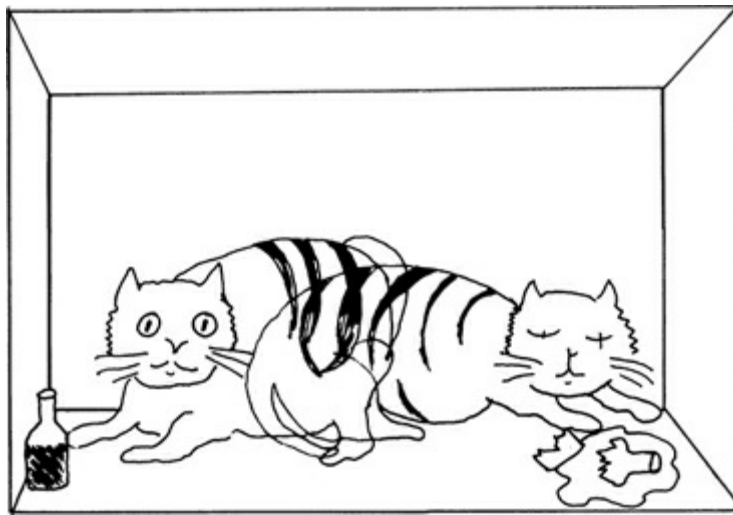
Essas controvérsias foram apresentadas aqui, é claro, numa linguagem muito simplificada. Na realidade elas se deram na linguagem mais poderosa da matemática avançada. Uma contribuição importante sob esse aspecto foi dada em 1964 por John Bell (o das meias de Bartlmann e das moedas partidas). Num artigo intitulado “Sobre o paradoxo EPR”, Bell explicou o experimento em termos matemáticos. Em seguida se descobriu que, usando o na época chamado teorema de Bell, podia-se realmente efetuar o experimento EPR, o que desde então os físicos fizeram muitas vezes. Em todos os casos testados, provou-se que Einstein, Podolsky e Rosen estavam errados.

Bem antes que esses resultados experimentais esmagadoramente positivos confirmassem a teoria, a física quântica vinha obtendo crescente sucesso na prática. Na década de 1930, Linus Pauling e outros explicaram a ligação química usando a mecânica quântica. Também nessa época, Heisenberg, Enrico Fermi e outros demonstraram experimentalmente que a teoria era válida no nível subatômico. Como o expressou P.A.M. Dirac, a teoria quântica explicou “a maior parte da física e a totalidade da química”.

O GATO DE SCHRÖDINGER

Com a aceitação geral da física quântica, porém, surgiu uma nova e importante questão: onde termina o mundo quântico e começa o mundo clássico? A experiência humana diária tem lugar no macrocosmo, e nenhum dos efeitos bizarros descritos pela “estranha” teoria quântica é de fato experimentado. Que tamanho um objeto deve atingir para que a teoria quântica pareça já não se aplicar? Em 1935, Erwin Schrödinger propôs um experimento mental que se tornaria famoso e que mostra que a teoria quântica talvez não se aplique fora do microcosmo.

Todos que tenham lido um dos muitos livros de divulgação científica sobre mecânica quântica já terão certamente encontrado o pobre, maltratado, felino de Schrödinger. Ainda assim, esse pobre bichano gerou tanta especulação e controvérsia que as paradoxais implicações de seu destino merecem um breve exame.



O GATO QUÂNTICO VIVO/MORTO DE SCHRÖDINGER Segundo os teóricos que aceitam a versão cabal da mecânica quântica, o gato existe em algum estado intermitente, nem vivo nem morto, até que um observador olhe dentro da caixa.

Schrödinger propõe que se feche um gato hermeticamente numa caixa de aço, junto com uma fonte radioativa fraca e um detector de partículas radioativas. A caixa deve conter ainda um frasquinho de gás venenoso e um martelo suspenso sobre um mecanismo disparador. Se o martelo for solto, quebrará o frasco, liberando o gás. O detector que está na caixa é ligado uma única vez e apenas durante um minuto. O material radioativo, por sua vez, tem 50% de chance de emitir uma partícula durante esse minuto, portanto 50% de chance de não o fazer. Se uma partícula for detectada, o esquema letal será desencadeado, o gás será liberado e o gato, morto. É importante observar que ninguém pode ver o interior da caixa.

Segundo a interpretação de Copenhague estrita da física quântica, passado o minuto e antes de a caixa ser aberta, não podemos falar do gato como *ou* vivo *ou* morto, pois não podemos observar então se ele está vivo ou morto. Para os que acreditam que a mecânica quântica se aplica também ao macrocosmo, o gato está num estado indeterminado, uma espécie de vida suspensa, *nem vivo nem* morto. Só depois que a caixa for aberta pode-se conferir ao animal a condição de vivente.

Acredito que a intenção de Schrödinger com esse experimento hipotético foi mostrar as limitações da interpretação de Copenhague da mecânica quântica — que a teoria quântica simplesmente não pode ser aplicada a toda a realidade. No entanto, ela foi muitas vezes interpretada de outra maneira. Para muitos observadores, é óbvio que o gato não pode estar vivo e morto ao mesmo tempo. Para os que aderem à interpretação de Copenhague estrita, porém, o gato vivo/morto não difere do elétron, que pode ser uma onda e uma partícula ao mesmo tempo.

O debate, que prossegue até hoje, gira em grande parte em torno da semântica, especificamente em torno da definição de “observar” e do limite entre o observador e o fenômeno em observação. A análise do paradoxo de Schrödinger centra-se nesse limite e seu cerne, no meu entender, é que, desde que esteja no macrocosmo, a informação obtida (por observação) sobre o mundo quântico se torna objetiva e irreversível — em outras palavras, não pode recuar para o estranho mundo da física quântica.

O gato de Schrödinger vem à baila com tanta frequência nos livros de popularização da ciência que leva alguns físicos ao desespero. “Quando ouço falar do gato de Schrödinger”, Stephen Hawking declarou certa vez, “eu saco o revólver.”

O ATAQUE À “FÍSICA JUDAICA”

Enquanto Bohr e outros estavam envolvidos nos debates sobre vários aspectos da teoria quântica em curso na comunidade científica, Heisenberg estava mais empenhado em defender a teoria de um ataque de tipo diferente. Com a ascensão de Hitler, a física e os físicos teóricos estavam caindo em crescente desfavor na Alemanha e a missão de Heisenberg na qualidade de principal porta-voz da física teórica alemã tornou-se sua preocupação máxima. No início de 1936, Johannes Stark, Prêmio Nobel de Física de 1919, e seguidores desencadearam na Alemanha uma campanha pelos jornais contra a “física judaica”, com o que Stark queria designar toda a física teórica, que contrapunha à física “alemã”, ou experimental. Heisenberg encabeçou a oposição a essa investida, embora sua oposição tenha tido pouco efeito no curso das políticas do regime nazista. O próprio Heisenberg foi acusado de ser um “judeu branco” e seu patriotismo foi posto em dúvida. Somente porque a mãe dele era amiga pessoal da mãe de Heinrich Himmler, chefe da SS, foi possível convencer essa unidade nazista a reexaminar a questão da lealdade de Heisenberg. Não fosse isso, sua traição teria podido ser simplesmente presumida. Após uma arrastada investigação, os nazistas finalmente deram a Heisenberg autorização para trabalhar em projetos militares alemães.

A vida de Heisenberg em Leipzig durante esses anos que precederam a guerra foi difícil também sob outros aspectos. Ele era bem-sucedido profissionalmente, mas tinha poucos amigos. Teve, é verdade, um breve romance com a irmã de seu conhecido mais próximo, Carl Friedrich von Weizsäcker; mas a encantadora Adelaide não passava de uma adolescente e a reprovação do pai dela logo provocou um fim abrupto do relacionamento. Foi então que, no início de 1937, Heisenberg participou de uma noite de música de câmara na casa de um amigo. Ali conheceu uma moça que atraiu seu olhar. Era uma livreira alta e esguia, com um sorriso cordial. Percebendo uma atração entre os dois, a anfitriã do sarau pediu ao jovem professor que por gentileza acompanhasse a srta. Elisabeth Schumacher até sua casa. O professor acedeu com muito gosto. Uma semana depois, convidou a jovem para sua cabana de esqui na Bavária (com uma acompanhante) e apenas duas semanas mais tarde os dois estavam noivos. Menos de três meses depois eles se casaram em Berlim. Heisenberg tinha 35 anos, sua noiva 22.

No início de 1938, a nova sra. Heisenberg deu à luz gêmeos fraternos, Wolfgang e Maria, o primeiro assim chamado em homenagem ao colega de estudo e trabalho Wolfgang Pauli. Heisenberg, segundo a maioria dos relatos, teve um casamento feliz. A sra. Heisenberg teve mais cinco filhos ao longo dos dez anos seguintes e proporcionou uma vida de família estável para seu compulsivo e ambicioso marido. Heisenberg, no entanto, sempre pôs a carreira em primeiro lugar e a vida familiar em segundo.

A FISSÃO NUCLEAR APLICADA

A deflagração da Segunda Guerra Mundial e o interesse da Divisão de Material Bélico do exército alemão nas potencialidades militares da fissão nuclear ofereceram a Heisenberg e outros físicos atômicos alemães a oportunidade, como eles a viam, de servir ao seu país e

promover a ciência ao mesmo tempo. De início Heisenberg dividiu seu tempo entre Leipzig, onde exercia sua função acadêmica, e Berlim, onde as pesquisas sobre a fissão nuclear estavam se realizando. Logo se tornou o principal consultor técnico na pesquisa da fissão. Fora dispensado do serviço militar por razões médicas (sofia de anemia).

O envolvimento de Heisenberg no esforço alemão para construir uma arma atômica é o aspecto mais controverso de sua vida. Depois da guerra ele afirmou que tentara frustrar as tentativas alemãs, mas outros contaram uma história diferente. Um desses relatos veio de ninguém menos que Niels Bohr, o mais próximo parceiro profissional de Heisenberg.

Em 1941, Heisenberg visitou o Instituto de Física Teórica de Copenhague numa Dinamarca então sob ocupação alemã. Em várias conversas durante o almoço no instituto, Heisenberg sublinhou a importância da vitória alemã na guerra e a ajuda que a ciência dinamarquesa poderia dar. A acolhida que recebeu dos cientistas dinamarqueses oscilou em geral de fria a gélida. A despeito das objeções de Margrethe, sua mulher, Bohr convidou Heisenberg para jantar em sua casa, onde no passado ele fora tantas vezes um convidado bem-vindo. Depois do jantar, os dois físicos saíram para dar uma caminhada e conversar. Todos os fatos sobre esse encontro, inclusive os locais por onde realmente andaram, são controversos. As versões que Heisenberg e Bohr apresentaram da conversa só coincidem no tocante ao assunto: as aplicações militares da energia atômica.

Depois da guerra, Heisenberg afirmou que havia proposto a Bohr um acordo secreto entre os físicos alemães e os americanos pelo qual ambos os lados usariam sua influência para dissuadir seus respectivos governos de levar adiante o projeto da bomba. Argumentava que, se pudessem chegar a um mútuo entendimento, cerca de doze desses cientistas seriam capazes de impedir a construção de uma bomba atômica. Como parte de sua argumentação, Heisenberg deixou claro que sabia de um meio de construir uma bomba e como prova deu a Bohr uma espécie de esquema. Assegurou que propor aquele acordo fora a principal razão de sua visita a Bohr.

A versão da conversa apresentada por Bohr foi completamente diferente. Segundo ele, Heisenberg tentara arrancar dele o que sabia sobre fissão e estava tentando usá-lo numa tentativa de impedir o prosseguimento do projeto da bomba dos aliados. A irritação e a desconfiança contra Heisenberg que esse encontro provocou em Bohr foram evidentes em tudo que ele disse e fez em relação a Heisenberg dessa noite em diante. Após a caminhada, Bohr voltou para casa e disse à família que ou Heisenberg não estava sendo sincero, ou estava sendo usado pelo governo nazista. No dia seguinte, no instituto, disse a mesma coisa a seus colegas cientistas. Em primeiro lugar, estava convencido de que a Alemanha estava trabalhando naquele momento no desenvolvimento de uma arma atômica e que Heisenberg era um membro-chave do projeto. Bohr não perdeu tempo em comunicar suas preocupações aos britânicos, por meio da resistência dinamarquesa.

Bohr e Heisenberg haviam sido amigos íntimos e colegas por quase 20 anos, mas sua caminhada no bosque marcou o fim de sua parceria intelectual. Só voltariam a se ver de novo depois de terminada a guerra e Bohr se esquivou de Heisenberg pelo resto de sua vida.

As preocupações de Bohr com o que Heisenberg estava fazendo na Alemanha e com o papel que os nazistas teriam no desenvolvimento de uma bomba atômica eram partilhadas por muitos cientistas nos Estados Unidos, entre os quais J. Robert Oppenheimer. Quando advertido do perigo representado por Heisenberg, o general Leslie Groves, diretor do Projeto Manhattan, mostrou-se disposto a considerar algumas sugestões um tanto absurdas sobre o que fazer com relação ao cientista alemão. Em Los Alamos, os físicos Hans Bethe e Victor Weisskopf propuseram o sequestro ou o assassinio de Heisenberg, chegando até a se oferecer para levar a missão a cabo. É preciso lembrar que esses cientistas eram ambos refugiados da Alemanha de Hitler. Como precisava dos dois teóricos nucleares onde eles estavam, o general Groves teve de declinar o oferecimento.

Como alternativa, Groves recorreu à Agência de Serviços Estratégicos (OSS) dos Estados Unidos, precursora da CIA. O agente escolhido para tratar da ameaça Heisenberg foi Morris (Moe) Berg, um ex-apanhador de terceira linha do Boston Red Sox. Essa missão, um dos episódios mais curiosos da história da espionagem, está bem relatada em *O catcher era um espião: a misteriosa vida de Moe Berg*, de Nicholas Dawidoff. Berg era uma personalidade de múltiplas facetas. Com seus 1,83 metro de altura e 85,5 quilos, Berg, além de jogar numa das duas principais ligas de beisebol profissional, formara-se em Princeton e era um polímata, linguista, conquistador de mulheres, advogado, concorrente uma vez no programa de rádio “Informação, por favor” e espião. Berg foi escolhido pelo general Bill Donovan, chefe da OSS para se introduzir clandestinamente na Europa, avaliar a probabilidade de uma bomba A nazista e assassinar Heisenberg se julgasse necessário. De que modo deveria determinar essa necessidade fica um tanto vago. Afinal de contas, ele não era um físico. Do ponto de vista de Donovan e Groves, o uso de Berg como agente apresentava uma grande vantagem, apesar de sua falta de conhecimento sobre física: se capturado e torturado, não poderia revelar nada aos alemães sobre os detalhes técnicos do Projeto Manhattan americano.

Em 5 de junho de 1944, o V Exército americano penetrou em Roma, a primeira grande capital europeia libertada da ocupação nazista. Pouco tempo depois, Moe Berg chegou à cidade para interrogar os cientistas nucleares italianos e verificar o que lhe podiam revelar sobre o projeto alemão da bomba atômica. Os italianos puderam lhe dizer muito pouco, mas Berg ficou sabendo que Werner Heisenberg iria à Suíça para dar uma conferência numa escola técnica de Zurique. Falaria no dia 18 de dezembro de 1944, durante um colóquio de uma semana, a convite do físico suíço Paul Scheerer. Heisenberg conhecia Scheerer muito bem porque os dois haviam trabalhado juntos antes da guerra. O que ele não sabia era que Scheerer era um antinazista convicto e amigo da causa aliada. Ele era na verdade a principal fonte de informação de Allen Dulles no tocante à ciência alemã bem como ao paradeiro e às atividades de cientistas alemães. Nessa época Dulles estava à frente das atividades da OSS numa Suíça neutra. Juntos, Dulles e Scheerer providenciaram para que Moe Berg comparecesse ao simpósio científico de alto nível armado com uma pistola calibre 45.

No dia da palestra, Berg e outro funcionário da OSS conseguiram assentos na segunda fila do auditório. Mais tarde Berg calculou que só havia cerca de 20 pessoas na sala. Não houve qualquer revista nos participantes e, de fato, qualquer espécie de segurança. Berg esmerou-se em tomar notas durante toda a palestra, que afinal não versou em absoluto sobre fissão nuclear, tratando antes de algo chamado teoria da matriz S, um assunto difícil e abstruso que nada tinha a ver com a bomba.

Encerrada a parte formal da fala de Heisenberg, Berg se misturou aos cientistas e, sabe-se lá como, conseguiu ser convidado para o jantar privado oferecido a Heisenberg cerca de uma semana mais tarde. Nesse jantar, ele não só se sentou ao lado de Heisenberg como o acompanhou depois em sua caminhada até o hotel. Heisenberg não tinha a menor ideia de quem era Berg e, mais tarde, disse ao filho que pensou se tratar de um suíço. Fossem quais fossem seus outros predicados, Berg era um bom ouvinte. Ouvira atentamente vários cientistas italianos, suíços e alemães refugiados afirmarem que Heisenberg não representava nenhuma ameaça real. A conferência sobre física em Zurique e o contato pessoal posterior sem nenhum guarda-costas em evidência reforçaram a impressão de Berg de que os nazistas não encaravam Heisenberg como um trunfo nacional importante. Berg manteve o dedo longe do gatilho.

O PROJETO ALSOS E GOUDSMIT

O general Groves, contudo, ainda não estava convencido de que nenhum projeto alemão de vulto para a construção da bomba atômica estava em curso e, para estar pronto para essa possibilidade, ainda que remota, autorizou a formação de uma organização paramilitar que penetrou nas áreas da Europa que as forças aliadas estavam libertando em seu rápido avanço. A unidade recebeu o codinome ALSOS (da palavra grega para “arvoredo”). Para chefiar a ALSOS Grove escolheu o tenente-coronel Boris T. Pash. Como conselheiro científico designou o físico teórico de origem holandesa Samuel A. Goudsmit, em parte porque, não tendo trabalhado no Projeto Manhattan, se fosse feito prisioneiro não poderia revelar coisa alguma sobre o esforço aliado para a construção da bomba. Ironicamente, Goudsmit conhecia bem Heisenberg de antes da guerra. De fato, considerava-o um amigo. Fora em sua casa que Heisenberg se hospedara numa visita aos Estados Unidos feita pouco antes da guerra. Nos primeiros dias da Segunda Guerra Mundial a mãe e o pai de Goudsmit viram-se de repente em uma Holanda ocupada. Temendo pela segurança deles, Goudsmit escreveu para Heisenberg pedindo ajuda. Por alguma razão, Heisenberg optou por não intervir. Em seguida o casal foi enviado para um campo de morte alemão e assassinado. É bem possível que Heisenberg não tivesse poder para ajudar o casal Goudsmit, mas, de todo modo, ele não tentou.

A ALSOS foi incumbida de uma tríplice missão: (1) descobrir a situação do projeto nazista da bomba atômica; (2) apreender, abrigar e expedir para os Estados Unidos todo o urânio que se soubesse estar na posse dos alemães; e (3) assegurar que nenhum físico nuclear atômico alemão escapasse à captura ou caísse nas mãos da União Soviética. Avançando pouco atrás das unidades aliadas de ocupação, a unidade ALSOS desempenhou todas as três partes de sua tarefa com presteza. A partir de documentos capturados no laboratório físico alemão em Estrasburgo, concluíram que, embora a Alemanha tivesse um projeto de bomba atômica, ele era de escala relativamente pequena e fizera poucos progressos significativos. Na visão do coronel Pash esse foi o mais importante feito isolado da ALSOS. Os membros da unidade capturaram também a maior parte das 1.200 toneladas de minério de urânio que a Alemanha conseguira do Congo Belga. Providenciaram o embarque desse material para os Estados Unidos, onde seria usado no Projeto Manhattan. Finalmente, conseguiram localizar os físicos nucleares alemães de importância decisiva.

Documentos trazidos à luz pela ALSOS revelaram que Werner Heisenberg, Otto Hahn, Carl von Weizsäcker, Max von Laue e outros membros de seu grupo dedicado à fissão nuclear estavam na estação de veraneio de Haigerloch, na região da Floresta Negra, no sudoeste da Alemanha. Pash e suas forças correram para essa área, querendo chegar antes do exército francês que se aproximava (os russos estavam chegando da outra direção). A caminho, trocaram tiros com o exército alemão em retirada. Em Haigerloch, descobriram que a “máquina de urânio” secreta dos alemães era na verdade uma pilha atômica algo parecida com a que Enrico Fermi havia desenvolvido dois anos antes em Chicago. Fermi dirigira os trabalhos para a obtenção da primeira reação de fissão autossustentável num laboratório secreto debaixo do Stagg Field na Universidade de Chicago. Em 1942 a pilha atômica de Fermi tornou-se crítica e sustentou uma reação em cadeia. A pilha atômica que a unidade ALSOS encontrou em Haigerloch estava à beira da criticalidade; isto é, ainda não se iniciara uma reação em cadeia, mas para produzi-la não faltava mais que um carregamento adicional de urânio.

Heisenberg não estava lá quando as forças da ALSOS chegaram, mas Pash e Goudsmit o encontraram alguns dias depois com a família na Baviera, num chalé à beira de um lago. O que Goudsmit disse a Heisenberg enquanto o interrogava não se sabe. Mas o que pensou sobre a afirmação que Heisenberg faria mais tarde de que estava deliberadamente empenhado em desencorajar o esforço alemão para a construção da bomba é sabido. No livro sobre o projeto ALSOS que publicou depois da guerra, Goudsmit qualifica Heisenberg de “mentiroso” e “hipócrita”. Heisenberg e Goudsmit iriam continuar essa batalha na imprensa, em particular nas páginas do *New York Times*, em que os defensores de Heisenberg foram asperamente censurados por Goudsmit, que evidentemente não embarcou no que ele e outros críticos de Heisenberg chamavam de “o conto de fadas”.

Heisenberg e os demais físicos nucleares alemães foram postos sob custódia e enviados para uma detenção temporária na Inglaterra. O sistema de segurança inglês havia maquinado um estratagema brilhante. Em vez de interrogar os cientistas alemães sobre suas pesquisas em fissão atômica durante a guerra, propuseram alojá-los todos numa propriedade rural chamada Farm Hall. Ali poderiam ter aulas de inglês, distrair-se nas horas vagas na sala de música ou perambular pelos jardins da propriedade. Evidentemente, nada os impediria de falar de física. Aliás, os ingleses não esperavam outra coisa, tendo instalado aparelhos de escuta em todos os cômodos da casa.

O VEREDITO DE FARM HALL

Confinados na propriedade de Farm Hall, perto de Cambridge, estavam os dez físicos alemães que haviam dirigido a tentativa alemã de desenvolver e construir uma arma atômica. Ali ficaram por quase seis meses — de julho a dezembro de 1945. Não era um confinamento particularmente penoso. Suas refeições vinham do rancho dos oficiais ingleses, jogavam tênis nas quadras da propriedade e conversavam sobre política e física, tudo que diziam sendo secretamente gravado durante todo o período. As transcrições das gravações, classificadas como ultrassecretas durante muitos anos, foram finalmente liberadas pelo serviço secreto

inglês em 1992.

Além de Heisenberg, os cativos de Farm Hall incluíam Walter Gerlach, Otto Hahn, Max von Laue, Carl Friederich von Weizsäcker, Paul Harteck, Karl Wirtz, Ernst Bagge, Horst Karsching e Kurt Diebner. As transcrições de seus debates proporcionam o mais preciso quadro disponível do ponto exato em que estava a Alemanha em seu caminho rumo a uma arma nuclear; e, na prática, ditaram o veredito final sobre a questão: estavam Heisenberg e companhia “deliberadamente” empenhados em se afastar do projeto de pesquisa de armas nucleares pelo que mais tarde chamaram de razões humanitárias?

Após um mês de gentil cativo em Farm Hall veio a notícia de Hiroshima e, alguns dias depois, de Nagasaki. Essas informações foram um choque para os alemães, que a princípio não lhes deram crédito. Pensaram tratar-se de um ardil para fazê-los revelar informações secretas. Quando a verdade se tornou evidente, brigaram entre si, tentando definir os culpados pelo fracasso da Alemanha em desenvolver a bomba primeiro. A que distância estavam os cientistas alemães de conseguir uma bomba nuclear para seus amos nazistas? Em termos gerais eles estavam, ao término da guerra europeia, mais ou menos no ponto em que Enrico Fermi estivera dois anos antes, em Chicago (Fermi e sua equipe haviam desenvolvido o primeiro reator nuclear do mundo em dezembro de 1942). Como hoje se sabe, a pesquisa alemã culminou num reator que teria se tornado crítico com apenas um pequeno carregamento de urânio a mais. Não tivesse sido o intenso bombardeio de Berlim, que forçou o deslocamento do projeto e a remoção do reator para Haigerloch, e a interrupção do abastecimento de seu moderador de água pesada pela Noruega, os alemães teriam certamente podido ter um reator em funcionamento em 1943 ou 1944.

Desenvolver um reator e desenvolver uma arma nuclear, porém, não são a mesma coisa. Enquanto Fermi trabalhava em Chicago, o esforço de pesquisa e planejamento em Los Alamos já estava em pleno curso, com base na certeza de que Fermi iria conseguir uma reação nuclear. Outros elementos do gigantesco Projeto Manhattan estavam também em operação, especificamente as usinas para separação de urânio e plutônio. Os alemães não haviam empreendido esses outros esforços decisivos. As fitas gravadas em Farm Hall revelaram ainda que, com uma ou duas exceções, entre as quais Heisenberg não se incluía, os cientistas aprisionados ficaram obviamente desolados com a perda da guerra pela Alemanha.

A situação do esforço alemão está hoje bastante clara: no período de 1941 e 1942, quando os Estados Unidos e a Grã-Bretanha iniciaram seus esforços para desenvolver a bomba de fissão, os alemães concluíram que a separação de isótopos na escala exigida era simplesmente inviável, impondo-se um amplo desenvolvimento de reatores antes que o esperado isótopo fissil de elemento 94 pudesse ser produzido em quantidades adequadas. O que os levou a essa conclusão errônea foi uma estimativa grosseira e pessimista do tamanho que uma massa crítica deveria ter.

Os cientistas alemães, e em particular Werner Heisenberg, avaliaram que a massa crítica necessária para uma bomba teria várias toneladas. A equipe americana e inglesa, usando uma abordagem diferente ao problema, chegou a uma estimativa significativamente menor para a massa crítica. De fato, a verdadeira quantidade não passa de alguns quilos e a arma atômica que caiu sobre Hiroshima consistia de 15 quilos de urânio. A partir das conversas dos cientistas alemães, inclusive Heisenberg, gravadas em Farm Hall, fica evidente que, se tivessem uma estimativa mais realista da massa crítica e tivessem sabido com que fervor os

cientistas americanos estavam trabalhando no projeto, a maioria deles teria sentido pouco ou nenhum remorso em construir a bomba para Hitler. A “linda história” de Heisenberg era exatamente o que Goudsmit disse: um conto de fadas.

O PÓS-GUERRA E A “FÓRMULA DO MUNDO”

Sejam quais tenham sido seus atos durante a Segunda Guerra Mundial, a influência de Heisenberg na Alemanha do pós-guerra foi expressiva. Ele se tornou o principal porta-voz da ciência alemã na arena internacional. Participou da decisão de estabelecer o Centro Europeu de Pesquisa em Física de Altas Energias (CERN) em Genebra e mais tarde presidiu seu comitê de planejamento científico. Na área da política nuclear da Alemanha Ocidental, Heisenberg usou sua influência na defesa da energia nuclear e na oposição ao desenvolvimento de armas nucleares. Em 1955 os aliados ocidentais concederam à República Federal da Alemanha plena soberania e a participação na OTAN. Todas as restrições que haviam pesado sobre a pesquisa na Alemanha Ocidental foram suspensas. Heisenberg e um grupo de colegas lançaram imediatamente uma campanha pública em favor de um intenso programa de desenvolvimento da energia nuclear. Ao mesmo tempo, opuseram-se energicamente ao plano do chanceler Adenauer de equipar o exército alemão com as chamadas armas nucleares táticas. A campanha política de Heisenberg contra as armas nucleares culminou em 1957 numa declaração pública formulada por ele e Wilschack e assinada por muitos cientistas nucleares contra a posse de armas nucleares pela Alemanha Ocidental. A campanha teve êxito e o exército do país continuou sem possuir armas nucleares.

Além de seu envolvimento político, Heisenberg continuou a levar adiante sua busca de uma teoria de campo quântica. Em 1958, publicou com Wolfgang Pauli um *preprint*^a de sua teoria unificada de campo das partículas elementares, mais tarde repudiada por Pauli. Três dias antes da divulgação do *preprint*, Heisenberg anunciou sua nova teoria numa palestra na Universidade de Göttingen. Um jornalista que estava na plateia, à cata de uma manchete, noticiou uma nova “fórmula do mundo”, o que foi reproduzido por jornais do mundo inteiro. Uma manchete proclamou: “O professor Heisenberg e seu assistente, W. Pauli, descobriram a equação básica do cosmo.”

O exagero tornou-se ainda mais sensacional quando Heisenberg, numa fala pelo rádio sobre sua nova “teoria do tudo”, afirmou que, “afora alguns detalhes a serem desenvolvidos mais tarde”, aquela era de fato a chave mestra para o universo.

Wolfgang Pauli ficou furioso. Enviou a Heisenberg um tosco desenho de dois quadrados em branco, com os dizeres: “Afora alguns detalhes a serem desenvolvidos mais tarde, estas são obras-primas de arte equivalentes às de Michelangelo.” Além disso, divulgou uma carta aos principais físicos do mundo renegando tal teoria. Isso não impediu Heisenberg de continuar proclamando sua fórmula para grandes audiências por toda a Alemanha Ocidental e Oriental. O conflito culminou numa conferência sobre partículas elementares no CERN, em Genebra, em que Pauli investiu contra Heisenberg, qualificando seu trabalho de matematicamente objetável e suas ideias de “mero substituto de ideias fundamentais”. Mais uma vez, Heisenberg havia transformado impiedosamente em inimigo um de seus mais próximos

parceiros, um homem com quem trabalhara em estreita ligação ao longo de toda a sua carreira e que influenciara enormemente suas contribuições para a física. Os físicos em geral, já extremamente desconfiados do trabalho de Heisenberg, não dedicaram maior reflexão à “teoria para acabar com todas as teorias”. Esse caso vergonhoso foi, para todos os efeitos, o último show de Heisenberg.

Em 1958, aos 56 anos, Heisenberg regressou a Munique e assumiu a direção do Instituto Max Planck. Continuou a fazer palestras pelo mundo afora, mas o conteúdo de suas preleções tornou-se mais filosófico que científico. Em meados de 1973, um câncer deixou-o gravemente enfermo. A doença entrou em remissão e, por algum tempo, ele pareceu plenamente restabelecido. Em julho de 1975, porém, sofreu uma grave recidiva e morreu seis meses depois.

A MECÂNICA QUÂNTICA EM POUCAS PALAVRAS

As ideias de de Broglie, Schrödinger e Heisenberg, outrora consideradas “absurdas” têm conduzido a tecnologias inteiramente novas, cuja existência se deve às descobertas desses pioneiros. A indústria eletrônica da atualidade, com sua tecnologia do *chip* de silício, funda-se em parte na teoria quântica dos materiais chamados semicondutores. As múltiplas aplicações do *laser* hoje existentes só são possíveis graças à compreensão, no nível quântico fundamental, de um mecanismo para a radiação da luz a partir de átomos. Além disso, a compreensão do modo como grande número de objetos quânticos se comportam quando fortemente comprimidos leva a uma compreensão de muitos diferentes tipos de matéria, de supercondutores a estrelas de nêutrons. Embora em grande parte seja sem dúvida de difícil entendimento, a mecânica quântica parece funcionar muitíssimo bem. Com base nos dados experimentais e nas aplicações práticas, a natureza indeterminada das propriedades físicas não medidas deve ser aceita pelo que aparenta.

Em seu livro *O fim da física*, David Lindley sugeriu: “O meio de compreender a mecânica quântica, se é que isso é possível, é preocupar-se unicamente com o que é medido num experimento específico e ignorar resolutamente tudo mais.” A mecânica quântica fornece muitas boas respostas para medições específicas e talvez seja melhor não se preocupar com o como. Lembre-se da famosa observação de Niels Bohr: quem quer que afirme que a teoria quântica é clara na verdade não a compreendeu.

E quanto ao veredicto sobre o próprio Heisenberg? Sua contribuição para a física, em particular a mecânica quântica, foi excepcional. Mas paira considerável dúvida sobre seu caráter. Há aqueles que estudaram os fatos em detalhe, como Thomas Powers em seu livro *A guerra de Heisenberg*, e que o consideram um homem mal compreendido e inocente. Outros, entre os quais C.P. Snow e Samuel A. Goudsmit, para citar apenas dois, são extremamente críticos em relação a ele.

É supremamente irônico que a história da física vá agora nos transportar cronologicamente de Heisenberg, o Inescrutável, ao homem que foi seu oposto em quase todos os aspectos discerníveis, o multifacetado e absolutamente charmoso físico americano e herói popular Richard Feynman.

^a Uma apresentação impressa de um trabalho que é feita antes de publicação em revistas científicas. (N.R.T.)

RICHARD PHILLIPS FEYNMAN

Você tem de estar preparado para a coisa — não porque ela seja difícil de entender, mas porque é absolutamente boba: tudo que fazemos é traçar umas setinhas num pedaço de papel — mais nada.

*Richard Feynman, sobre
a eletrodinâmica quântica*

No dia 21 de outubro de 1965, quando foi informado de seu Prêmio Nobel de Física (dividido com Schwinger, de Nova York, seu rival de longa data, e Shin'ichiro Tomonago, do Japão), Richard Feynman viu-se assediado por repórteres em sua casa, em Pasadena, Califórnia, todos fazendo variações da mesma pergunta: que fez de fato para ganhar esse prestigioso prêmio? Segundo o telegrama que comunicava os contemplados, o prêmio fora concedido “por trabalho básico em eletrodinâmica quântica com profundas consequências para a física das partículas elementares”. Mas o que significava isso?

Conta-se que um jornalista teria pedido a Feynman que por favor lhe dissesse, em não mais de duas frases, a razão por que fora escolhido. “Se eu pudesse lhe dizer em duas frases”, Feynman respondeu, “não teria ganho o Prêmio Nobel”. Ao que tudo indica, essa história é apócrifa — um repórter da revista *Time* é que teria sugerido a Feynman essa resposta. Autêntica ou não, foi uma observação típica de Feynman: rápida, espirituosa e direta. Pela primeira vez em seus 48 anos de vida, o resolutamente despretensioso cientista de Far Rockaway, no Queens, subúrbio de Nova York, teria de envergar gravata branca e fraque e aprender como se curvar perante o rei da Suécia. Teria de andar às avessas depois de receber o prêmio, preocupava-se, e como é que se aprendia a fazer isso? Ao ser inteirado dessas preocupações sociais, um amigo lhe enviou, de brincadeira, um espelho retrovisor de automóvel. Sem saber ao certo se era ou não uma brincadeira, Feynman treinou, subindo e descendo escadas movimentando-se para trás (para o caso de haver escadas envolvidas na cerimônia de premiação).

Evidentemente, Feynman temia cometer uma gafe que poderia se tornar tão famigerada quanto aquela que perpetrara em Princeton, no remoto outono de 1939. O estudante de pós-graduação de 22 anos, longe de estar à vontade no ambiente formal do chá dominical na casa do decano, ouviu da sua intimidante mulher: “Gostaria de creme ou limão no seu chá?” Sem pensar, Feynman respondeu: “Os dois, por favor.” Ela pôs o bronco no seu lugar com um olhar frio e disse: “Certamente está brincando, sr. Feynman.” Ele nunca esqueceu essa observação e, quarenta anos mais tarde, usou-a como título de seu primeiro livro de divulgação.

Note-se que foi o próprio Feynman quem contou essa história. Na verdade, grande parte da lenda Feynman teve origem em histórias fornecidas por ele mesmo. Ele colaborou evidentemente para criar a imagem de que tantos de seus leitores e alunos se lembrariam tão

afetuosamente: “meio gênio, meio bufão”, para usar a descrição de seu amigo Freeman Dyson. Jovem e brilhante matemático e físico inglês, Dyson conheceu Feynman na Universidade de Cornell em 1946 e qualificou assim seu novo amigo numa carta para os pais. Na carta seguinte, retificou a primeira impressão descrevendo o colega como “totalmente gênio e totalmente bufão”. Mais tarde ainda, arrependeu-se de ambas as descrições, pois passara a conhecer o homem verdadeiro sob a fachada.

A imagem popular de Feynman como um “tipo” procede sobretudo de dois best-sellers, maliciosamente intitulados *O senhor deve estar brincando, Mr. Feynman* e *Por que preocupar-se com o que os outros pensam?* Alinhavados a partir de gravações de entrevistas feitas por seu amigo Ralph Leighton, esses livros apresentam muitas das mais engraçadas histórias que Feynman contava sobre si mesmo, mas são completamente desprovidos de conteúdo científico. São uma leitura divertida, mas retratam Feynman a celebridade, não Feynman o cientista, e aqui estamos interessados em ambos.

Feynman, o cientista, era considerado pelos colegas um teórico de grande originalidade e competência. Ele inventou os diagramas de Feynman, um método gráfico para a descrição de interações entre partículas que é empregado hoje em toda a física de altas energias. Desenvolveu a abordagem da integral de trajetória para a mecânica quântica, um método de tratar probabilidades quânticas que lançou luz sobre questões que iam do microcosmo até a origem do universo. Contribuiu para a elegante e precisa teoria da eletrodinâmica quântica (chamada QED), uma mistura de relatividade especial e mecânica quântica aplicável à física nuclear, à física dos estados sólidos e dos plasmas, à tecnologia do *laser* e a muitos outros campos. Foi por esse trabalho que participou do Prêmio Nobel de Física em 1965.

À medida que formos explorando a vida e os feitos desse personagem encantador, tentaremos vislumbrar o genuíno Richard Feynman por trás da imagem, sem deixar de nos deter sobre suas realizações significativas no mundo da física.

SE FOR MENINO, VAI SER CIENTISTA

Melville Arthur Feynman afirmou isso para Lucille, sua jovem esposa grávida, em 1918. Estava certo, é claro, mas é interessante notar que o segundo bebê Feynman, Joan, a irmã de Richard, também obteve um Ph.D. em física.

Imigrante da Bielorrússia, Melville Feynman tinha uma mente inquisitiva e um fascínio pela ciência que o acompanharam pela vida toda. Caixeiro-viajante, fabricante de camisas e gerente de tinturaria, havia acumulado uma profusão de conhecimentos adquiridos por conta própria e bombardeava regularmente o filho com perguntas sobre o mundo natural à volta deles. Esse mundo tinha por centro Far Rockaway, uma agradável comunidade litorânea no Queens. Mais tarde na vida, Richard Feynman (que os pais chamavam de Richy ou Ritty, nunca de Dick) ressaltou em muitas entrevistas o quanto todas essas perguntas tinham influído em seu desenvolvimento em um cientista. Nas frequentes caminhadas que fazia com o filho, Melville costumava lhe falar sobre a natureza: como os oceanos se comportam, por que e como os pássaros voam, o que são as estrelas. Mais importante, Melville ensinava o filho a pensar sobre o “porquê” dos eventos naturais. Por exemplo, o garoto percebeu que quando

puxava sua carroça de brinquedo para a frente, a bola que estava dentro rolava para o fundo; e quando estava puxando a carroça e parava de repente, a bola rolava para a frente. Perguntado sobre isso, Feynman pai explicou ao filho os princípios gerais da inércia: as coisas que estão em movimento tentam se manter em movimento e as que estão paradas tendem a ficar paradas, a menos que você as empurre com força. Feynman já estava aprendendo física com o pai muito antes de jamais ter ouvido essa palavra.

Estava aprendendo também a ter respeito pelo conhecimento em geral. A família Feynman tinha uma coleção da *Enciclopédia Britânica* e Melville tinha o hábito de sentar o filho no colo e ler trechos da enciclopédia para ele. E não se contentava em apenas ler sobre um dado assunto; explicava a informação em termos que o garotinho pudesse entender. Mais tarde, Melville passou a levar o filho ao Museu de História Natural, em Manhattan. Esse se tornou o passeio favorito de Ritty e, com o pai atuando como um guia informativo e inquisitivo, explorava avidamente o mundo da natureza e da ciência.

Feynman sempre teria orgulho em declarar que havia sido instruído pelo pai. “Hoje, quando olho para trás”, disse uma vez a seu biógrafo Jagdish Mehra, “percebo que ele era um homem extraordinário, porque depois conheci muitos cientistas e pessoas instruídas, e só poucos, mas muito poucos, compreendem profundamente o que vem a ser ciência, por assim dizer.” Muito cedo, Richard se deu conta de que seu pai talvez não conhecesse os fatos assim tão bem — afinal, ele não tinha nenhuma instrução formal em ciência —, mas sem dúvida sabia como procurar os fundamentos subjacentes, e isso seu filho nunca esqueceu.

A religião desempenhou apenas um minguado papel na infância e adolescência de Feynman. A família era judia, mas Melville era ateu. Em consideração à mulher, continuava enviando Richard à sinagoga aos sábados e à aula de religião para aprender um pouco de hebraico e quem sabe alguma coisa do Antigo Testamento; mas os ensinamentos não vingaram. Nas palavras do próprio Feynman, “Abandonei a religião aos 13 anos. Tornei-me ateu porque não acreditava naquilo.”

Feynman, que gostava de mexer com rádios, relógios e estojos de química, montou seu próprio aparelho de rádio, um galena em que podia ouvir *The Shadow* e outras novelas de aventura. Chegou a ficar perito o bastante no concerto de rádios para ganhar um dinheiro extra com isso, e ganhar dinheiro não era coisa fácil naqueles dias da Grande Depressão. Regulou o relógio de seu quarto para andar ao contrário, aprendeu a ler as horas corretamente nele e adorava mostrar isso aos amigos. Durante um período leu ficção científica, mas na época em que foi para a escola secundária já havia abandonado o gênero, para nunca mais retornar a ele. A verdadeira ciência, pensava, era suficientemente empolgante.

A ESCOLA SECUNDÁRIA DE FAR ROCKAWAY

Feynman ingressou na escola secundária em 1931, aos 13 anos. Já conhecia alguns dos professores porque andara frequentando o laboratório de ciência do estabelecimento. Teve bom desempenho em todas as matérias, embora só levasse muito a sério matemática e ciência.

Nessas duas disciplinas, estava muito à frente dos outros alunos, já que, ainda na escola elementar, chegara a aprender até álgebra avançada por conta própria. Logo se tornou o ás do

Clube de Matemática (bem como um membro entusiástico do Clube de Química, do Clube de Física e do Clube de Xadrez).

Os esportes, em contrapartida, não o interessavam em absoluto. Seu jogo era a matemática — um jogo em que era excelente e que lhe permitia se exibir um pouco. O gosto por se exibir era uma característica que Feynman conservaria a vida toda. Várias outras características que o marcariam a vida toda já se haviam revelado quando ele entrou da escola secundária. Entre elas estavam uma postura racionalista rigidamente disciplinada, a falta de reverência pela autoridade, o desdém pela formalidade e a cerimônia, o respeito pela realização intelectual e uma disposição em geral alegre.

Lendo a enciclopédia, ficara sabendo que o cálculo era importante e quis aprendê-lo o quanto antes. Diante disso, seu pai comprou-lhe um livro chamado *Calculus Made Easy* (O Cálculo de Maneira Fácil), em que mergulhou de imediato. Foi encorajado na empreitada por uma citação (de um antigo provérbio) na guarda do livro: “O que um tolo pode fazer, outro também pode.” De várias maneiras, Richard Feynman fez disso uma espécie de moto para a vida toda.

Sob muitos aspectos, Feynman era o que os estudantes de hoje chamariam de “CDF”, mas, como todo adolescente, era extraordinariamente preocupado com a própria imagem e não poupava esforços na tentativa de ser como os outros meninos — não um maricas, como ele dizia. Pôs essa determinação em prática no colégio e na sua carreira profissional. Sempre quis ser um garoto como os outros.

No último ano do colegial, Feynman teve a boa sorte de merecer uma atenção especial de Abram Bader, seu professor de física. Bader estava longe de ser um professor de ciência de curso secundário comum. Por razões econômicas, fora obrigado a abandonar sua própria carreira em física e passara a lecionar, mas estudara sob a orientação de I.I. Rabi em Columbia e tinha excelente formação em física. Ele ouvira falar que um garoto de inteligência invulgar viria para a sua classe, que era um curso para estudantes de desempenho excepcional. Esperava-se que todos os alunos dessa classe fossem brilhantes, mas Feynman se destacou imediatamente. Era, recordou Bader, o melhor aluno numa classe de alunos excelentes. Era também um problema.

Um dia, Bader disse a Feynman que ficasse na sala após o término da aula. “Feynman”, disse-lhe, “você fala demais e faz barulho demais. Eu sei por quê. Está entediado. Por isso estou lhe dando um livro.” Era um livro sobre cálculo avançado. “Estude este livro”, continuou Bader, “e quando souber tudo que está nele, pode voltar a conversar.” Todos os dias, Feynman se sentava no fundo da sala e estudava cálculo em nível universitário enquanto o resto da turma se punha em dia com o que ele já sabia.

Certa vez, aluno e professor estavam no laboratório quando Bader levou Feynman até o quadro-negro e explicou-lhe um princípio de física que teve profundo impacto sobre ele; tratava-se do *princípio da mínima ação*. Bader explicou que há um número — a energia cinética menos a energia potencial — cuja ação, quando se calcula a sua média ao longo do trajeto, é a menor para o verdadeiro trajeto. Frequentemente se ilustra essa lei da natureza com um problema hipotético. Um salva-vidas, postado na praia a certa distância do mar, vê um banhista se afogando à sua frente, na diagonal, a alguma distância da praia e um pouco para um lado. Como pode o salva-vidas encontrar o caminho mais rápido em direção ao banhista? Ele se move mais rapidamente em terra firme que na água. Se tomasse uma reta rumo ao banhista,

gastaria tempo demais na água. Se corresse pela praia até ficar diretamente em frente ao banhista, gastaria o menor tempo possível na água, mas teria perdido tempo correndo pela praia. Ao fim e ao cabo, verifica-se que a melhor solução é fazer o trajeto do tempo mínimo, atravessando a praia em diagonal e em seguida virando-se de novo para fazer um ângulo fechado através da água. O que o salva-vidas deve fazer instintivamente, um estudante de cálculo pode fazer matematicamente. Bader mostrou que o mesmo princípio se aplica quando a luz é desviada em seu percurso através da água ou de um prisma de vidro — ela sempre segue o trajeto do tempo mínimo. Feynman ficou encantado com esse princípio que, de certo modo, influenciou toda a sua filosofia da ciência. Muitos anos depois, quando professor na Caltech, ficaria conhecido por sua insistência na simplicidade em seu trabalho. Certa vez observou: “Tenho um princípio com relação às teorias da interação forte: se a teoria for complicada, está errada.” Nas famosas Preleções Feynman sobre Física, que fez para calouros e segundanistas do Caltech no início da década de 1960, dedicou uma preleção especial ao princípio da mínima ação e recordou o que aprendera com Bader nos velhos tempos da escola secundária de Far Rockaway.

Naqueles anos de formação, Feynman encetou uma outra importante relação que teria efeitos prolongados em sua vida: apaixonou-se pela bonita e popular Arline Greenbaum. Esse romance de escola secundária que durou por mais de 14 anos é uma história trágica de sofrimento e devoção que revela uma outra imagem de Richard Feynman, em contraste com a do rapazinho petulante, despreocupado. Antes de entrarmos nessa história, porém, há os anos muito felizes que Feynman passou na faculdade.

NA UNIVERSIDADE

Em 1935, quando se formou no curso secundário, Feynman pretendia especializar-se em matemática na faculdade, pois nessa matéria é que fora mais forte. Em seu último ano em Far Rockaway, solicitara ingresso na Universidade de Columbia, no MIT (Massachusetts Institute of Technology) e no CCNY (City College of New York). Embora aprovado nos exames de admissão de Columbia com as notas máximas, foi recusado porque na época havia uma quota de judeus para a turma de calouros. Feynman pagara 15 dólares para fazer os exames e, como contou mais tarde a entrevistadores, ressentiu-se enormemente tanto com a rejeição quanto com a perda dos 15 dólares. O MIT, porém, aceitou Feynman e concedeu-lhe uma pequena bolsa de estudos, cerca de 100 dólares por ano. O MIT era o lugar perfeito para ele, pois proporcionava ao mesmo tempo uma excelente formação e uma intensa vida social. Para Feynman, esta girava em torno de sua fraternidade, a *Phi Beta Delta*. Segundo ele, a fraternidade exigia que os melhores alunos dessem aulas particulares a qualquer irmão que estivesse com problemas acadêmicos e os membros mais competentes no plano social ajudavam os menos seguros de si, ensinando-os a dançar e até conseguindo encontros para eles, se necessário. É fácil adivinhar em que metade da fraternidade Feynman se situava.

Toda semana havia um baile em algum lugar do campus e correr atrás de garotas tornou-se a atividade extracurricular número um de Feynman. A única mulher realmente importante em sua vida, contudo, continuava sendo Arline Greenbaum. Nos fins de semana em que havia

bailes mais importantes, ele a levava para o MIT e os dois mantinham uma copiosa correspondência. Rapidamente, Feynman ganhava na fraternidade a fama de um tipo pitoresco e completamente imprevisível. Certa vez um confrade lhe disse que tomando aspirina e Coca-Cola ao mesmo tempo, a pessoa caía desmaiada como um morto. Feynman respondeu que aquilo era uma bobagem e, para demonstrar seu ponto de vista, emborcou seis aspirinas e três Cocas de uma vez, enquanto um confrade permanecia atrás dele, pronto para segurar seu corpo inerte. Afora uma noite não muito bem dormida, não se lembrava de ter tido nenhum outro problema. Em outra ocasião, ele e seus confrades começaram a discutir se a urina fluía do corpo apenas pela ação da gravidade. Feynman, a essa altura mais um experimentador que o teórico que viria a ser, demonstrou que esse não era o caso plantando uma bananeira e urinando. Com relação aos estudos, continuou adotando o mesmo procedimento que lhe dera bons resultados na escola secundária: trabalhar com afinco nos cursos de ciência e matemática e fingir que fazia o mesmo nas humanidades — ou, como ele os chamava, os “cursos de tolice”. A aversão de Feynman às artes não se originou no MIT, mas foi sem dúvida cultivada ali.

Nas matérias que levava a sério, ele se saía extraordinariamente bem. Ainda no segundo ano, fez um curso de física teórica destinado a alunos dos últimos anos ou pós-graduados. Nessa época, o ano acadêmico de 1936-1937, nenhum curso sobre mecânica quântica era oferecido no MIT, mas Feynman e dois outros estudantes convenceram seu professor, Philip Morse, a lhes dar aulas sobre o assunto. Os quatro se encontravam uma vez por semana na sala de Morse durante cerca de uma hora, e Morse ensinava e passava trabalhos sobre mecânica quântica. Mesmo em meio a um grupo tão pequeno, Morse deu a Feynman uma atenção especial. Os talentos excepcionais do rapaz foram demonstrados também pelo fato de que, ainda na graduação, ele publicou dois artigos na *Physical Review*.

Após se graduar no MIT, Feynman mudou-se para Princeton, onde faria sua pós-graduação. Escolhera Princeton porque se impressionara com o número de artigos que seus alunos e professores publicavam na *Physical Review* e porque seu orientador acadêmico recomendara a universidade. Foi no seu primeiro dia em Princeton que Feynman compareceu ao chá da faculdade em que cometeu sua notória gafe do limão/creme.

Feynman fora informado de que trabalharia como assistente de pesquisa do famoso físico Eugene Wigner. Ao chegar em Princeton, no entanto, ficou sabendo que, em vez disso, fora designado para trabalhar junto a John Archibald Wheeler, que tinha 27 anos e acabara de ingressar no departamento de física. No fim das contas, Wheeler e Feynman eram perfeitamente talhados para trabalhar juntos. Em seu primeiro encontro, Feynman ficou surpreso com a pouca idade de Wheeler, mas sabia que ele passara um ano com Niels Bohr em Copenhague e já começava a adquirir renome no campo da física quântica. Feynman ficou também um tanto espantado com a formalidade de Wheeler nesse encontro. Ele lhe deu um horário fixo para os dias em que trabalhariam juntos, com tempos estritos para suas sessões e, tendo puxado um grande relógio de bolso, depositou-o sobre a mesa que os separava para observar um tempo rigoroso mesmo naquele primeiro encontro.

Feynman gostou de Wheeler de imediato, mas não se sentia bem com tanta formalidade. No segundo encontro que tiveram, quando Wheeler chegou e pôs seu relógio sobre a mesa, Feynman sacou do bolso um cebolão barato que comprara e, fisionomia impassível, o depositou também sobre a mesa. Foi um gesto arriscado — Wheeler poderia ter ficado

ofendido —, mas funcionou. Wheeler caiu na gargalhada e os dois acabaram por se tornar colegas muito próximos e amigos para a vida inteira.

Wheeler desenvolveu uma carreira notável como uma das principais autoridades em física nuclear, dando contribuições teóricas ao estudo do núcleo atômico e dos buracos negros. Era sob muitos aspectos o mentor perfeito para Feynman, que estava interessado em eletrodinâmica e no problema fundamental da interação entre partículas carregadas e se esta é melhor tratada como “ação a distância” ou como a ação de um campo.

Logo no início de seu trabalho em colaboração, Wheeler decidiu que era hora de Feynman aprender a fazer uma preleção e escolheu seu tema de um artigo em que os dois tinham estado trabalhando. Feynman ficou apavorado ante a perspectiva de dar essa palestra, mas Wheeler lhe garantiu que o programa regular de seminários forneceria uma boa audiência e que estaria ao lado dele para responder a quaisquer perguntas.

Alguns dias antes da palestra, Feynman topou com o professor Eugene Wigner no corredor. “Feynman”, disse Wigner, “seu trabalho com Wheeler me parece tão interessante que convidei Russell para o seminário.” Henry Russell era um astrônomo famoso da época. Wigner continuou, com mais notícias desconcertantes, “Pensando que o professor von Neumann estaria interessado, eu o convidei.” John von Neumann era o mais famoso matemático da época. “Além disso, o professor Pauli veio da Suíça para nos visitar e assim eu o convidei também.” Feynman recordou que já estava prestes a desmaiar a essa altura, quando Wigner acrescentou: “O professor Einstein raramente comparece ao nosso seminário semanal, mas eu o convidei especialmente, de modo que também ele virá.” E foi assim que o pós-graduando Richard Feynman fez a primeira preleção de sua vida perante um grupo que incluía o que ele chamava de “cérebros colossais”. A palestra transcorreu bem, embora Feynman se lembre que suas mãos tremiam quando tirava suas fichas do envelope e que ficou tão aliviado por poder se sentar no final que depois não teve nenhuma lembrança das perguntas feitas após a sua fala.

Quando Feynman estava trabalhando no projeto final de sua tese de doutorado, eventos mundiais lhe atropelaram a carreira. Em novembro de 1941, apenas um mês antes do ataque a Pearl Harbor, ele ficou sabendo das preocupações com a construção de uma arma atômica pela Alemanha. Logo estaria a caminho de Los Alamos, um lugar nas montanhas Sangre de Cristo, no Novo México, de que nunca ouvira falar.

Depois de um brilhante curso universitário, fora recrutado para o mais notável grupo de cientistas jamais reunido. Seu futuro profissional parecia brilhante, mas nem tudo correria bem na sua vida. Havia quase 11 anos que ele e Arline Greenbaum formavam um casal. Antes de sua partida para Princeton, os dois haviam ficado noivos. Exatamente quando por fim ele estava terminando a faculdade e era o momento certo para se casarem, Arline ficou gravemente doente. De início sua doença foi incorretamente diagnosticada como febre tifoide e depois como doença de Hodgkin, mas finalmente foi identificada como tuberculose do sistema linfático, mal quase sempre fatal. A família e os amigos de Feynman tentaram demovê-lo da intenção de se casar, já que Arline certamente morreria dentro de pouco tempo. Mas ele não a abandonaria. “Já estávamos casados em nossas mentes”, disse ele aos amigos. “Deixá-la agora seria como divorciar-me dela.” Imediatamente depois de receber seu Ph.D., no dia 29 de junho de 1942, Richard apanhou Arline, que deixara o hospital havia pouco, e os dois seguiram até Staten Island, onde um juiz de paz os casou. Arline estava tão doente nessa ocasião que de novo foi obrigada a se hospitalizar. Antes de se transferir para Los Alamos,

Feynman fez um acordo com Robert Oppenheimer pelo qual Arline teria uma vaga num hospital de Albuquerque. Não tendo carro, ele costumava pegar carona até Albuquerque para passar os fins de semana com ela.

LOS ALAMOS E A BOMBA

No laboratório no alto do cerro, Feynman conheceu muitos homens cujos nomes já lhe eram conhecidos por seus artigos na *Physical Review*. Esse grupo incluía, é claro, a elite dos físicos de todo o mundo e Feynman encontrou vários mentores notáveis no tempo que passou no laboratório.

Na fase inicial do projeto, certo dia em que a maior parte dos físicos de primeiro escalão estava fora, Hans Bethe quis discutir uma ideia que tivera. Encontrando Feynman sozinho em sua sala, resolveu usar o rapaz como caixa de ressonância. O resultado foi um debate franco e acalorado em meio ao qual Feynman, que nunca fora de se impressionar com a autoridade, tachou as ideias de Bethe de malucas. Bethe respondeu no mesmo diapasão, mas acabou por achar que a discussão fora estimulante e pouco depois solicitou a designação de Feynman para a sua divisão. De sua parte, Feynman estava impressionado com a capacidade analítica de Bethe, sua erudição, sua integridade e, quase o mais importante, seu senso de humor. Após o primeiro encontro, Bethe e Feynman se entenderam extremamente bem. Ambos gostavam de jogos matemáticos e sempre que tinham de calcular alguma coisa juntos travavam uma competição — e nessas disputas, Feynman nos conta, Bethe era geralmente o vencedor.

Durante a maior parte de sua permanência em Los Alamos, Feynman trabalhou sob a direção de Bethe, mas Oppenheimer também precisava de um assistente arguto, a quem pudesse confiar missões especiais. Logo Feynman se tornou o mediador oficioso do diretor para a solução de contendas, sendo frequentemente incumbido de missões de apuração de informações ou de investigação, quando algum aspecto do projeto não estava avançando segundo o cronograma. Feynman deu também muitas contribuições importantes para o projeto. Ministrou uma série de palestras sobre as questões centrais do plano e da montagem da bomba; supervisionou os cálculos da massa crítica e ajudou a calcular os efeitos de vários materiais na reflexão de nêutrons de volta às reações. Contribuiu ainda para o projeto dos dois métodos de ignição, por detonação e por implosão. Além disso foi enviado por Oppenheimer a Oak Ridge, Tennessee, para implantar procedimentos de segurança quando se revelou que a manipulação desavisada do urânio ali podia resultar numa explosão não planejada. Feynman era, em suma, o trunfo tecnológico de Los Alamos.

Mas, ao mesmo tempo em que fazia todo esse importante trabalho, Feynman estava também firmando sua fama de “trapalhão” da divisão teórica de Los Alamos — a qual seria descrita mais tarde como o sortimento mais excêntrico, temperamental e volátil de pensadores e ases da matemática jamais reunido em um lugar. Feynman, que desenvolvera uma perícia espantosa na abertura de fechaduras, deixava a segurança aturdida abrindo arquivos secretos e deixando bilhetes misteriosos dentro. Gostava de festas e bailes, ocasiões em que por vezes tocava bateria, flertava com todas as mulheres atraentes e dançava como o pé de valsa que era. Sempre exibido, adorava fazer prestidigitações matemáticas para qualquer público cativo que

conseguisse encontrar. Uma vez apostou com os companheiros de almoço que era capaz de calcular em 60 segundos, e com precisão de pelo menos 90%, qualquer problema que eles pudessem formular em dez segundos. Costumava ganhar essas disputas, até que um dia os colegas apareceram com um problema que exigia que ele soubesse o valor de pi até a centésima casa decimal.

No todo, Feynman causou considerável impressão. Ninguém menos que Robert Oppenheimer o descreveu como sendo “em tudo e por tudo, o mais brilhante jovem físico daqui” e “um homem de caráter e personalidade absolutamente encantadores”. Quando Niels Bohr visitou Los Alamos, foi à procura de Feynman para testar ideias novas com ele, pois era a única pessoa ali que não ficava embasbacada com sua reputação e lhe diria a verdade se suas ideias fossem “porcarias”.

Enquanto desenvolvia toda essa atividade frenética no alto do cerro, Feynman levava uma espécie de vida paralela. No trabalho raramente falava de Arline e de suas inquietações com relação a ela. Sempre que podia se afastar por um ou dois dias, porém, ia a Albuquerque para vê-la e animá-la. A saúde da moça declinava rapidamente e Richard sabia que ela iria certamente morrer logo. Sabia também que qualquer dia poderia ser chamado para ir imediatamente a Albuquerque, e seu habitual expediente da carona não o levaria até lá com suficiente rapidez. Diante disso, obteve a autorização prévia de seu colega de dormitório para tomar o carro dele emprestado quando a hora chegasse. Esse amigo era Klaus Fuchs, que mais tarde, para escândalo geral, se descobriria ser um espião soviético.

Quando esse chamado realmente veio, Feynman chegou ao hospital de Albuquerque poucas horas apenas antes de Arline morrer. Ela travara uma longa e corajosa batalha e ele a amparava todo o tempo com seu otimismo sincero. “Continue resistindo”, escrevera-lhe, “nada é certo. Levamos uma vida encantada.”

Feynman fez o que podia para esconder sua dor com a morte da mulher. De volta a Los Alamos, não falava sobre isso, e quando pessoas que não tinham recebido a notícia lhe perguntavam sobre Arline, respondia lacônico: “Ela morreu. E como anda o programa?” Pelo que lembrava depois, só chorou muitos meses mais tarde, quando, em Oak Ridge, passou por uma loja de departamentos com vestidos na vitrine e pensou com seus botões que Arline teria gostado de ter um deles. Hans Bethe, contudo, percebeu que Feynman estava sofrendo e o mandou para Far Rockaway de licença. Só quando foi marcado o teste Trinity, em Alamogordo, é que o chamaram de volta.

A primeira explosão nuclear provocada pelo homem ocorreu nas primeiras horas da manhã de 16 de julho de 1945, num local do deserto agourentamente chamado *Jornada del Muerto*. Robert Oppenheimer e sua tremenda equipe de físicos haviam feito seu trabalho e logo trocariam a isolada comunidade no cerro de Los Alamos pela vida do pós-guerra, que, no caso de Feynman e de muitos outros, iria exigir consideráveis ajustamentos.

A MUDANÇA PARA CORNELL

Quando a equipe de Los Alamos se dispersou, Feynman optou por acompanhar seu mentor, Hans Bethe, e aceitou um cargo na Universidade de Cornell em Ithaca, Nova York. O Projeto

Manhattan lhe proporcionara a oportunidade de se pôr à prova junto aos melhores cérebros do mundo da física, mas envolvera muito mais engenharia e tecnologia que ciência teórica. Agora era hora de retornar à ciência.

No início da década de 1940, ainda um estudante de pós-graduação em Princeton, Feynman começara a desenvolver uma abordagem inteiramente nova para a mecânica quântica. A expressão *mecânica quântica* designa a descrição do comportamento da matéria em todos os seus detalhes e, em particular, dos acontecimentos numa escala atômica. Não é fácil descrever, como não é fácil imaginar, esse comportamento da matéria nos níveis atômico e subatômico. O método de Feynman, em sua expressão mais simples, foi uma versão mecânico-quântica da ideia clássica de que uma partícula toma o “trajeto de menor resistência” ao ir de um ponto a outro.

Em Cornell, Feynman retomou o desenvolvimento de suas ideias e método anteriores. Explicou esse método em dois artigos publicados em 1949, “A teoria dos pósitrons” e “Abordagem espaço-temporal à eletrodinâmica quântica”. Nesses artigos, introduziu diagramas simples que serviam simultaneamente como representações gráficas de colisões de partículas subatômicas e como abreviatura dos terríveis cálculos exigidos na previsão do resultado dessas colisões. É preciso entender que esses diagramas, hoje famosos, não foram criados em lugar da árdua matemática envolvida, tendo sido antes o produto dos cálculos detalhados. Eles representaram uma importante contribuição ao campo da eletrodinâmica quântica.

ELETRODINÂMICA QUÂNTICA

O mundo da física pode ser dividido em três domínios principais: o muito pequeno, o muito grande, e o intermediário — tudo que recai entre os dois primeiros.

O *domínio do muito pequeno* é o mundo das partículas efêmeras, vistas nas colisões de alta energia produzidas por aceleradores e no interior dos núcleos dos átomos. Nesse domínio, as chamadas forças nucleares fortes são dominantes. Ainda não há nenhuma teoria completa que explique todos os fenômenos nesse domínio. Aqui e ali, surgem e desaparecem fragmentos de teoria que descrevem de maneira mais ou menos satisfatória algumas das coisas que os experimentadores observam, mas muitos aspectos não são compreendidos. A exploração desse domínio está em curso atualmente tanto no CERN, na Suíça, quanto no Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), na Califórnia.

O *domínio do muito grande* é o mundo físico: planetas, estrelas, galáxias, o universo considerado como um todo. Nesse domínio, a força dominante é a gravidade, e a relatividade geral de Einstein é a teoria triunfante. Hoje, graças ao telescópio espacial Hubble e a outros sofisticados sensores baseados em satélites, a exploração desse domínio cosmológico está entrando em nova fase.^a

Entre o muito pequeno e o muito grande, há o *domínio do intermediário*, o plano médio da física. Trata-se de um campo enorme, que inclui tudo o que existe entre um núcleo atômico e um planeta. A teoria denominada *eletrodinâmica quântica*, conhecida como QED, abrange esse terreno intermediário. Sua meta é fornecer uma explicação completa e precisa de todos

os processos físicos que têm lugar nesse terceiro domínio, que exclui apenas o muito grande e o muito pequeno.

Feynman não inventou ou descobriu a eletrodinâmica quântica. Essa honra cabe principalmente a Paul Adrien Maurice (geralmente chamado P.A.M.) Dirac em 1928. O que Feynman (juntamente com Julian Schwinger e Shin'ichiro Tomonago) fez foi reformular a compreensão da eletrodinâmica quântica e elucidar as anomalias que estavam inibindo o uso prático da QED como teoria na explicação dos fenômenos do terceiro domínio. Por uma notável coincidência, Feynman e Schwinger (e, como descobriram mais tarde, Tomonago), trabalhando a partir de diferentes pontos de vista, chegaram às mesmas soluções para os problemas da QED mais ou menos ao mesmo tempo.

A teoria da eletrodinâmica quântica é uma teoria mecânico-quântica do elétron e do eletromagnetismo — em outras palavras, uma síntese da teoria da relatividade de Einstein e da mecânica quântica. Validada por experimentos e observações, ela é hoje plenamente aceita pela comunidade física.

Em seu livro, *QED: A estranha teoria da luz e da matéria*, Feynman descreve o conceito da seguinte forma: “A teoria da eletrodinâmica quântica descreve a natureza como absurda do ponto de vista do senso comum. E nisso está de pleno acordo com o experimento. Por isso espero que possam aceitar a Natureza como Ela é — absurda.” Na seção seguinte veremos como Feynman forjou alguns métodos engenhosos para a compreensão da maneira absurda como o mundo natural funciona.

DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Os “diagramas de Feynman”, como suas representações gráficas tornaram-se conhecidas, revelaram-se uma contribuição fundamental tanto para teóricos nucleares quanto para experimentadores. Essencialmente, são um conjunto de ferramentas para o manejo das complexidades matemáticas da física das partículas e mostraram-se tão úteis para o físico teórico quanto os diagramas de circuito para um projetista eletrônico. Usando esses diagramas, os físicos podem calcular rapidamente qualquer tipo de colisão complexa de partículas e, ao mesmo tempo, produzir uma representação dessas colisões que funciona como um conveniente sumário de páginas de cálculos. “Os diagramas”, declarou um cético Murray Gell-Mann, “dão a ilusão de que se está entendendo o que se passa”. Mas Julian Schwinger, Nobel de Física de 1965, observou em 1980, com maior entusiasmo: “Foi pelo uso dos chamados diagramas de Feynman que Feynman levou os cálculos às massas.” Embora não tendo propriamente “apelo de massa”, aquelas “figurinhas engraçadas” tornaram-se sem dúvida a taquigrafia da física quântica.

Os diagramas de Feynman são um refinamento de um tipo mais geral de gráfico, os chamados *diagramas de espaço-tempo*. Nestes, a direção vertical geralmente representa o tempo e a direção horizontal representa espaço unidimensional. Assim, por exemplo, se uma partícula estiver em repouso no espaço, será representada por uma linha vertical, porque, ainda que não se mova no espaço, ela o faz ao longo do tempo. Se a partícula se mover também no espaço, sua linha será inclinada — quanto maior a inclinação da linha, mais rápido

é o movimento da partícula. Observe-se que, no tempo, as partículas só se podem mover para a frente, mas no espaço podem fazê-lo para trás ou para a frente.

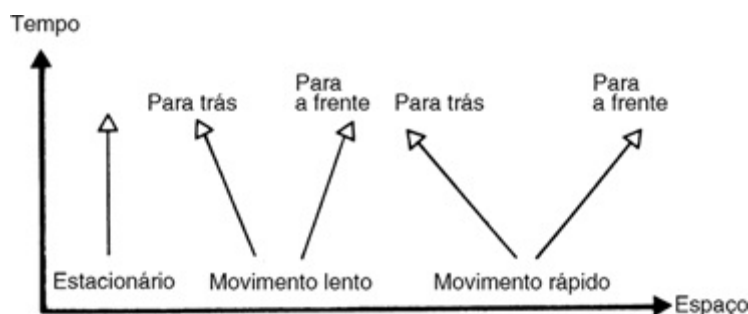
DIAGRAMAS DE ESPAÇO-TEMPO

Basicamente, Feynman usou diagramas de espaço-tempo para ajudar a visualizar a interação que tem lugar quando dois elétrons se movem um em direção ao outro. Os diagramas de Feynman reinterpretam o processo básico da repulsão eletromagnética. Tendo cargas negativas, elétrons se repelem. Os diagramas de Feynman representam o *modo como* eles se repelem, especificamente pela troca de um fóton.

Os diagramas espaço-tempo são usados na física para retratar interações entre várias partículas. Para cada interação pode-se traçar um diagrama a que uma expressão matemática pode então ser associada. A expressão matemática fornece a probabilidade da ocorrência dessa interação.

PARTÍCULAS VIRTUAIS

O diagrama mostrado na seção seguinte mostra a interação, ou repulsão, de dois elétrons pela transferência de um único fóton virtual. Mas o que é uma *partícula virtual*? Como foi mencionado no Capítulo Seis, Heisenberg mostrou que não há como criar um método para determinar a posição de uma partícula subatômica, a menos que se esteja disposto a ficar em total incerteza quanto a seu momento exato. Calcular exatamente a posição e o momento, no mesmo instante, é impossível. Em 1930 Einstein levou mais longe esse princípio da incerteza ao propor que, também na medição da energia, é impossível reduzir o erro sem aumentar a incerteza do tempo durante o qual a mensuração pode ter lugar.



DIAGRAMAS DE ESPAÇO-TEMPO Usados na física relativística para retratar interações entre várias partículas. Observe-se que, no tempo, as partículas só podem se mover para a frente (para cima), mas no espaço podem fazê-lo para trás ou para a frente. O grau em que a linha se inclina em direção à horizontal indica a velocidade do movimento da partícula.

Embora não fosse essa a intenção de Einstein, sua versão da incerteza mostrou-se útil para a física quântica porque significava que, em processos subatômicos, a lei da conservação da energia pode ser violada durante intervalos de tempo extremamente breves, desde que tudo seja devolvido ao estado de conservação no final desses períodos. Quanto maior o desvio em

relação à conservação, mais breve é o intervalo de tempo permitido. Esse conceito torna possível explicar certos fenômenos subatômicos, presumindo-se que as partículas se produzem a partir do nada (em oposição às leis da conservação da energia) mas cessam de existir antes do tempo destinado para sua detecção: não passam de “partículas virtuais”. A teoria das partículas virtuais foi elaborada independentemente por Jules Schwinger, Richard Feynman e o físico japonês Shin’ichiro Tomonago. Foi em parte por essa contribuição que o Prêmio Nobel de Física foi concedido conjuntamente aos três.

OS DIAGRAMAS DE FEYNMAN E A INTERAÇÃO QUÂNTICA

Cada linha num diagrama de Feynman corresponde tanto a uma partícula quanto a um termo específico da complexa expressão matemática que dá a probabilidade dessa colisão. O avanço do tempo é mostrado em sentido ascendente. Pode-se cobrir o diagrama com uma folha de papel e arrastar o papel para cima para ilustrar a passagem do tempo. Um par de elétrons, cujos caminhos são indicados pelas linhas cheias, move-se um em direção ao outro. Os elétrons são indicados por e^- por causa de sua carga negativa. No ponto A , um fóton virtual, cujo percurso é representado pela linha ondulada, é emitido pelo elétron da esquerda, o qual é então defletido. No ponto B , o fóton é absorvido pelo elétron da direita, que é então defletido.

A física clássica diria que os elétrons exerceram uma força repulsiva um sobre o outro. A física quântica encara a interação de outra maneira. O conceito de força não é usado na física subatômica. No lugar da ideia newtoniana de uma força que se faz sentir a distância, há apenas interações entre partículas, mediadas por campos, isto é, por outras partículas. Uma característica-chave dessa teoria é a criação e destruição de partículas. No diagrama, por exemplo, o fóton é criado no processo de emissão no ponto A e destruído ao ser absorvido no ponto B .

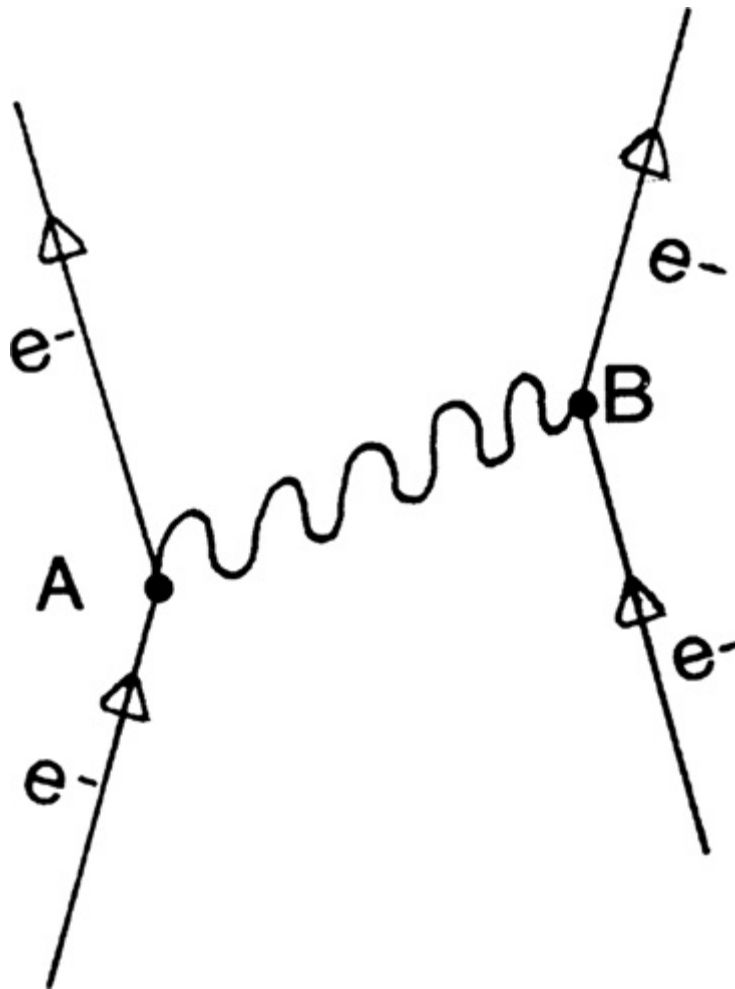


DIAGRAMA DE FEYNMAN O diagrama mostra dois elétrons aproximando-se, um deles emitindo um fóton no ponto *A*, o outro absorvendo-o no ponto *B*. Ambos os elétrons mudam de velocidade e direção como resultado dessa troca.

Essa concepção, central para o entendimento da QED, ajuda a perceber a contribuição de Feynman em seu contexto histórico. Einstein, como nos lembramos, usou as leis do eletromagnetismo de Maxwell para investigar as propriedades de um corpo em movimento. Descobriu assim (como é mostrado no Capítulo Dois) os hoje bem aceitos mas estranhos efeitos da relatividade: um corpo em movimento encurta; sua massa aumenta; seu relógio funciona mais devagar. Mas quais eram as forças envolvidas? Feynman estudou os detalhes da própria força eletromagnética. Postulou na QED que a repulsão elétrica não é causada por alguma “ação misteriosa” a distância como se supunha. Concluiu então que as forças elétrica e magnética são o resultado da troca de entidades chamadas fótons entre partículas carregadas. Os fótons são vistos, portanto, como as unidades da radiação, os *quanta* que Planck e Einstein haviam descoberto na virada do século. Nesse processo, contudo, os fótons atuam não como partículas de radiação, mas como unidades de energia que produzem um efeito. São trocados tão rapidamente que, como o assegura o princípio de incerteza de Heisenberg, os cientistas não conseguem detectá-los na passagem de um corpo para outro.

Feynman desenvolveu essa concepção até que a teoria fosse capaz de explicar todos os fenômenos da eletricidade e do magnetismo. A QED prevê com precisão, por exemplo, a intensidade do campo magnético do elétron, fator no qual as teorias anteriores invariavelmente erravam.

Na física quântica, toda interação de partículas pode ser descrita em diagramas de espaço-tempo e cada diagrama está associado a uma expressão matemática que permite calcular a

probabilidade de ocorrência do processo correspondente. Foi Feynman quem estabeleceu a correspondência exata entre os diagramas e as expressões matemáticas. É possível traçar diagramas similares para outros casos em que os elétrons permutam dois ou mais fótons virtuais; as expressões matemáticas para a probabilidade desses eventos decorrem do diagrama.

A ponta de flecha nas linhas não é usada, como se poderia supor, para indicar a direção do movimento da partícula (que é sempre para a frente no tempo). Ela serve na verdade para distinguir entre partículas e antipartículas: se aponta na direção do tempo (para cima, na ilustração), ela indica uma partícula (por exemplo, um elétron); se aponta na direção oposta à do tempo (para baixo, na ilustração), indica uma antipartícula.

MATÉRIA E ANTIMATÉRIA

No início da década de 1930, o teórico britânico P.A.M. Dirac propôs a interessante teoria segundo a qual para cada partícula deve existir uma *antipartícula*, de carga elétrica oposta mas de massa igual. Passados poucos anos, sua previsão foi confirmada pela descoberta, por Carl David Anderson, da antipartícula do elétron, chamada *pósitron*, idêntica ao elétron sob todos os aspectos salvo por conduzir uma carga elétrica positiva. Desde então a conjectura de Dirac foi confirmada com relação a muitos outros tipos de partícula. O mundo da matéria, portanto, é espelhado por um mundo de antimatéria.

Os diagramas de Feynman ilustram dois conceitos básicos da física quântica: (1) que todas as interações envolvem a criação e a destruição de partículas, tal como a emissão e absorção do fóton virtual que vimos há pouco; (2) que há uma simetria básica entre partículas e antipartículas — para cada partícula existe uma antipartícula com massa igual e carga oposta. Nos diagramas de Feynman, o elétron, por exemplo, é em geral denotado por e^- , e sua antipartícula, o pósitron, por e^+ . O fóton é sua própria antipartícula.

Foi demonstrado que uma *partícula fundamental*, como o elétron, só pode ser criada se, ao mesmo tempo, for criada sua própria antipartícula. Assim também, só pode ser destruída ao se encontrar com uma de suas próprias antipartículas.

Essas regras da física quântica criam um certo problema para os cosmólogos. Por exemplo, caso elas se apliquem ao instante do Big-Bang, quando o universo foi criado, que foi feito de toda a antimatéria? Sabe-se que a Via Láctea consiste inteiramente de matéria, exceto por alguma antipartícula ocasional. Em nenhum lugar do universo se vê o tipo de explosão gigantesca que ocorreria se grandes quantidades de matéria e antimatéria se chocassem. Até agora, os cosmólogos não conseguiram explicar o desaparecimento da antimatéria que deve ter sido criada durante o Big-Bang.

Apesar de incompleta, a interpretação da eletrodinâmica quântica proposta por Feynman foi uma contribuição relevante para o entendimento das interações eletromagnéticas em termos quânticos. A reputação profissional em alta, Feynman estava pronto para conquistar novos mundos.

Depois de cinco anos em Cornell, Feynman concluiu que devia partir. Em Cornell, Bethe seria sempre o número um e ele precisava de novos campos e de uma nova plateia.

Encontrou uma e outra coisa na afluyente cidade de Pasadena, no sul da Califórnia — a 16 quilômetros de Cadillac conversível da metropolitana Los Angeles — onde uma universidade relativamente nova, o Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), estava conseguindo se projetar rapidamente no campo das ciências.

A primeira coisa que Feynman fez depois de aceitar o novo cargo de professor do Caltech foi tirar um ano sabático. Esse fora um item do contrato que evidentemente fortalecera sua decisão de deixar Cornell e ele o aproveitou ao máximo. Foi para o Brasil, participou do carnaval no Rio de Janeiro, bebeu demais, paquerou mulheres na praia de Copacabana e aprendeu a batucar bem o suficiente para integrar um grupo local.^b Durante essa viagem, deu-se conta de que estava gostando demais de beber e jurou deixar o álcool para sempre.

Apesar de toda essa atividade social, não ficou sem contato com a ciência durante esse ano sabático, como o mostrou sua vasta correspondência sobre a *teoria do méson* com Enrico Fermi, então na Universidade de Chicago. (Os *mésons* são uma das duas classes de *hádrons* — a outra sendo os *bárions* — que constituem as partículas fundamentais da matéria; são parte da teoria do quark, descrita no Capítulo Oito.) Durante o ano sabático de Feynman, um Fermi obviamente cheio de inveja escreveu-lhe: “Quem me dera também poder arejar minhas ideias nadando em Copacabana.”

CASAMENTO COM MARY LOU

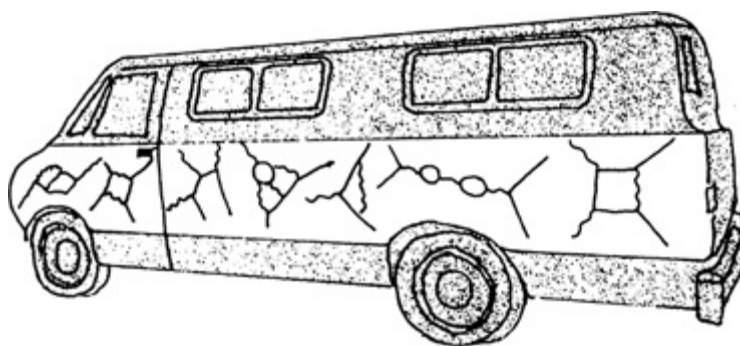
Depois de uma temporada de dez meses no Brasil, Feynman retornou ao Caltech, onde decidira ficar para sempre. Estava cansado da vida de solteiro e alguns de seus amigos mais chegados dizem que, de todo modo, ele nunca fora o mulherengo que procurava aparentar. Pouco depois de voltar para Pasadena, em 1952, pediu em casamento Mary Lou Bell, sua namorada *platinum blonde* de Neodesha, Kansas, que conhecera em Cornell e namorava havia algum tempo. Esse não seria um casamento feliz para nenhum dos dois. Uma das fontes de tensão era que Mary Lou sempre desejou que Richard se comportasse e se vestisse de uma maneira formal, condizente com a imagem que tinha de um professor universitário. Ao que parece, ele tentou. Seus amigos disseram que sempre podiam saber se Mary Lou estava por perto porque só nessa circunstância ele estaria de gravata. Um problema mais gravemente perturbador é que, de maneira óbvia, Mary Lou não gostava de cientistas, em especial de físicos. Murray Gell-Mann, colega de Feynman no Caltech, lembrou que uma vez em que ele e Margaret, sua mulher na época, convidaram os Feynman para jantar, eles não compareceram e mais tarde Mary Lou alegou que havia perdido o convite. Em outra ocasião, quando o casal se sentou para jantar, Mary Lou disse: “Esqueci de lhe dizer, mas telefonaram para você esta tarde. Algum chato está na cidade e queria que você fosse jantar com ele.” Segundo as lembranças de Feynman, ela não entendera bem a coisa. O “chato” a que se referia era Niels Bohr, em visita a Pasadena, e Feynman perdeu uma oportunidade de conversar com ele, o que

não o deixou nada feliz. Depois de exatos quatro anos, estava patente que o casamento não dava certo e eles se divorciaram em 1956.

F EYNMAN, O PROFESSOR

Como professor no Caltech, Feynman mereceu avaliações diferentes. Por um lado, havia aqueles alunos de graduação que faziam sua disciplina chamada Física X, que não valia créditos, e que mais tarde se lembraram desses seminários não estruturados como a mais inesquecível experiência intelectual de sua formação. Por outro lado, Feynman claramente se furtava às tarefas comuns do ensino, evitava alunos de pós-graduação que procuravam sua ajuda no preparo de teses e tinha pouca paciência para orientar estudantes em seus problemas de pesquisa. Nem mesmo suas hoje famosas *Conferências de Feynman sobre física* foram um sucesso absoluto. A partir de 1961, e por dois anos seguintes, Feynman ministrou esse famoso curso introdutório de física no Caltech. Calouros, segundanistas, alunos da pós-graduação e até colegas professores esforçavam-se para acompanhar seu pensamento. Alguns consideraram o curso estimulante mas muitos calouros e segundanistas o abandonaram. Muitos colegas professores que adotaram os livros feitos a partir dessas palestras (eram transcrições editadas delas) constataram que eram difíceis demais para os leitores a que se destinavam. (Recentemente, foi publicada uma seleção dessas palestras sob o título *Física em seis lições*. São uma leitura estimulante e inspiradora, mas nada têm de fácil.)

A maioria dos alunos considerava Feynman um professor/expositor fascinante, ainda que fosse difícil entendê-lo. Ninguém menos que C.P. Snow, o eminente historiador da física, deu uma nota alta a Feynman como professor, mas não deixou de acrescentar que, com seu sotaque de chofer de táxi de Nova York, sua linguagem coloquial, sua gesticulação e seu costume de andar de um lado para outro diante do quadro-negro, vê-lo não era muito diferente de ver Groucho Marx imitando um grande cientista.



O FURGÃO DE FEYNMAN Repleto de diagramas do dono, o furgão anunciava a sua presença e era conhecido por todos no campus do Caltech.

Apesar de seu trabalho por vezes negligente com os estudantes da pós-graduação e de suas momices em sala de aula, em certo sentido Feynman levava bastante a sério suas responsabilidades como professor de ciência. “Ensinar ciência”, disse uma vez, “é uma maneira de ensinar como algo veio a ser conhecido, o que não é conhecido, em que medida as coisas são conhecidas (pois nada é conhecido de maneira absoluta), como lidar com a dúvida

e a incerteza, que são as regras da comprovação, como pensar sobre as coisas de modo a poder fazer julgamentos, como distinguir verdade de impostura, e de simulação.” Essa definição revelou o quanto Feynman se preocupava em transmitir o que a ciência é e deveria ser, e não se poderia desejar síntese melhor sobre o que é o ensino da ciência.

GWENETH HOWARTH

No verão de 1958, Feynman esteve em Genebra, na Suíça, para apresentar um artigo que escrevera em coautoria com Murray Gell-Mann. Tratava-se de um levantamento da situação da física das partículas elementares naquele momento, que, de certo modo, foi a base do trabalho definitivo que Gell-Mann publicou mais tarde nessa área. Após apresentar o artigo, Feynman foi relaxar na praia do lago Genebra. Descobrimo ali uma atraente garota de biquíni de bolinha, entabulou conversa com ela. A jovem chamava-se Gweneth Howarth, era de uma aldeia da Inglaterra e, em troca de casa e comida, tomava conta dos filhos de uma família inglesa que morava em Genebra. De espírito aventureiro, empreendera o grande projeto de correr o mundo trabalhando. A próxima parada deveria ser a Austrália, antes de voltar à Inglaterra e lá se fixar.

Feynman falou-lhe sobre a Califórnia, o lugar magnífico que era, e acabou convencendo-a a aceitar sua oferta de emprego — cuidar da casa dele, em Altadena. Deu um pouco de trabalho, mas por fim ele conseguiu um visto para a jovem amante de aventuras e ela se instalou em seu próprio quarto, nos fundos da casa de Feynman. Os dois estavam romanticamente envolvidos, mas não vivendo juntos no sentido usual da expressão — ambos saíam com outras pessoas. “Eu não tinha nenhuma intenção de me casar com ele”, disse Gweneth mais tarde.

As intenções de Richard, porém, eram outras. Já contara a pelo menos um amigo que conhecera uma linda garota inglesa em Genebra e que pretendia se casar com ela. E casar foi o que acabaram fazendo, numa cerimônia episcopal realizada no Huntington Hotel, em Pasadena, no dia 24 de setembro de 1960 — cerca de dois anos após o primeiro encontro.

Esse veio a ser um casamento muito mais feliz. Gweneth sentia-se contentíssima por ser a mulher do “grande cientista” e era tolerante com seus mais extravagantes comportamentos em público. Segundo Richard Davies, grande amigo de Feynman, o papel de Gweneth não é levado muito em conta na maioria dos relatos da vida de Feynman — que ela era de fato a verdadeira aventureira no casal, tendo convencido o marido a fazer várias viagens a lugares exóticos. Davies afirmou ainda que em diferentes ocasiões Feynman disse à sua irmã Joan e a ele próprio: “Gweneth é mais sagaz que eu.”

O PRÊMIO NOBEL

Assim que soube que ganhara o Prêmio Nobel, Feynman pensou em rejeitá-lo — não gostava de prêmios e de formalidades —, acabou se convencendo, porém, de que com isso iria atrair mais atenção do que simplesmente aceitando a honraria. Essa atitude relutante em relação ao

prêmio não se devia a uma falta de orgulho pelo trabalho que fizera. Certa vez, falando sobre o *insight* que dera origem ao trabalho que lhe valera o prêmio, ele observou: “Foi tão maravilhoso, foi fulgurante.”

Um sinal encantador do quanto Feynman era querido por seus alunos pôde ser visto quando, depois de a notícia do prêmio se espalhar pelo campus, um grupo de estudantes cobriu o alto do prédio da administração da faculdade com uma imensa bandeira que proclamava:

“GRANDE TENTO, RPF”

Apesar das reservas iniciais, Feynman parece ter gostado muito de toda a cerimônia de entrega do Nobel na Suécia, e Gweneth também. O melhor, para Feynman, foi a festa que os estudantes promoveram após o jantar do rei. Foi menos formal, é claro, e houve dança, o que, como sempre, ele adorou.

Findas as festividades de premiação em Estocolmo, Feynman seguiu para Genebra, onde deveria fazer uma palestra a convite de seu ex-colega de Los Alamos, Victor Weisskopf, então diretor do CERN. Na hora, apareceu de terno novo, sob medida, e gravata, dizendo para a plateia que aprendera etiqueta na Suécia. Risada geral, entre gritos de reprovação. Encabeçando uma revolta, Weisskopf, levantando-se, arrancando o paletó e gritando: “Não, não.” Segundo Feynman, essa reação o despertou e ele rapidamente tirou o próprio paletó, a gravata, e fez a preleção em mangas de camisa, como sempre fizera: Richard Feynman de novo.

O DESASTRE DA “CHALLENGER”

Nos anos que se seguiram à premiação, Feynman voltou sua atenção, em seu trabalho no Caltech, para a aplicação da eletrodinâmica quântica teórica às forças nucleares e para a física das partículas de alta energia. Trabalhando com Gell-Mann, reformulou a compreensão da interação entre partículas elementares expressando-a nos termos de um tipo geral de interação universalmente aplicável. No final de sua carreira, Feynman realizou também um trabalho amplo e pioneiro no campo da física de baixas temperaturas, com ênfase particular nas propriedades do hélio líquido e da supercondutividade.

Por importante que tenha sido seu trabalho no final de sua carreira, uma outra contribuição de Feynman se tornou muito mais conhecida e ela é reveladora da força de seu caráter e da sua integridade. Feynman foi designado para a Comissão Presidencial formada para investigar a trágica explosão do ônibus espacial *Challenger*. Ocorrida no dia 28 de janeiro de 1986, segundos apenas após o lançamento da nave, ela matou todos os seus sete tripulantes. Uma nação chocada, de que boa parte tinha visto a tragédia pela televisão, queria uma explicação para o que acontecera. Essa era a tarefa da comissão, presidida por William Rogers, um ex-secretário de Estado. Em sua maioria, seus membros tinham ligações com a NASA e não estavam propensos a ser críticos com relação à agência espacial. Feynman, por outro lado, não tinha vínculo algum com a NASA e levou muito a sério seu papel de investigador. Estava determinado a descobrir o que acontecera e não se preocupou com nenhuma “linha partidária”

oficial que o restante da comissão pudesse traçar.

Com a relutante aprovação do presidente da comissão, Feynman conduziu sua própria investigação. Ao longo de uma semana, conseguiu uma série de informações confidenciais na sede da NASA em Washington. Concentrou sua atenção em problemas do motor e, em particular, na longa história de dificuldades com os anéis de borracha usados na vedação de juntas sob condições de baixa temperatura. O general Donald J. Kutyna, colega de Feynman na comissão, queria levar a público o problema da perda potencial de elasticidade desses anéis, mas desejava fazê-lo sem pôr em risco suas fontes de informação dentro da NASA. A saída que encontrou foi contribuir para concentrar a atenção de Feynman na questão. Orientado por Kutyna, Feynman requisitou à NASA dados sobre os testes a que os anéis haviam sido submetidos, mas o que recebeu foram documentos irrelevantes. Sem se dar por vencido, Feynman realizou seus próprios experimentos em seu quarto de hotel, à noite, na véspera do dia marcado para a audiência da comissão, que seria transmitida pela televisão.

No dia seguinte, durante a audiência, Feynman, usando água gelada e uma amostra de anel de vedação de borracha, demonstrou com assombrosa simplicidade, para um público nacional de televisão de milhões, a física do desastre do ônibus espacial. Provou que baixas temperaturas podiam — e, tragicamente, tudo indicava que o haviam feito naquele caso — prejudicar a elasticidade dos anéis de vedação da nave, causando um vazamento do combustível impulsionador que inflamou e produziu a explosão. Com essa apresentação dramática, Feynman solucionou convincentemente o mistério da explosão da *Challenger*, abalou a burocracia de Washington até as bases e rompeu o silêncio oficial sobre um dos escândalos mais perturbadores da década de 1980.

O general Kutyna, hoje reformado, contou como foi o início da sua colaboração com o colega de comissão Feynman. Havia ocorrido um primeiro encontro no escritório de William Rogers, no Departamento de Estado, onde o presidente da comissão havia enfatizado a importância de não deixar que nenhuma informação vazasse, chegando à imprensa. “Naquela noite, quando descemos as escadas do Departamento de Estado, o (ex-) secretário Rogers tinha, é claro, uma enorme limusine à sua espera; Neil Armstrong tinha uma enorme limusine à sua espera; até Sally Ride tinha uma limusine à sua espera. Feynman olhou para mim, com minhas duas estrelas no ombro, e perguntou: ‘Onde está sua limusine?’ Respondi: ‘Duas estrelas não garantem uma limusine em Washington. Eu ando de metrô.’ Ele passou o braço pelo meu ombro e disse: ‘Kutyna, um general que anda de metrô não pode ser de todo mau!’ E assim teve início uma afetuosa relação entre nós.”

Kutyna resolveu instruir Feynman nas particularidades dos procedimentos burocráticos de Washington. As audiências públicas seguiam quase à risca um roteiro traçado de antemão; eram insípidas, sem nada de sensacional e não devia haver surpresas. As sessões executivas eram muito mais proveitosas, mas estavam sob o firme controle do presidente da comissão. Feynman insistiu em falar diretamente com o pessoal técnico e um relutante Rogers permitiu-lhe fazê-lo. Foi durante esses contatos que Feynman soube da história das dificuldades que haviam cercado o lançamento do ônibus espacial.

Por sugestão de Kutyna, Feynman investigou o efeito do frio sobre os anéis de vedação de borracha. Eles apuraram que a temperatura no momento do lançamento da *Challenger* fora de $-1,6^{\circ}\text{C}$ e que o mais frio lançamento anterior se dera numa temperatura de $11,6^{\circ}\text{C}$. Feynman sabia, é claro, que borracha enrijece e perde a elasticidade sob condições frias. No dia do

experimento da água gelada, 11 de fevereiro, ouviu-se o presidente da comissão dizer a Neil Armstrong no banheiro: “Esse Feynman está se tornando um verdadeiro pentelho.”

Por fim, Feynman se recusou a aprovar o edulcorado relatório final a menos que ele incluísse um apêndice que documentasse os resultados de sua pesquisa sobre os anéis de vedação. Rogers tinha pouca escolha senão permitir que Feynman juntasse seu apêndice ao relatório — embora tenha feito o possível para impedir que ele fosse amplamente divulgado. O relatório completo da comissão foi publicado em cinco volumes que não tiveram ampla circulação. A versão resumida e muito mais acessível que foi enviada para a imprensa não continha o Apêndice F apostro por Feynman. Apesar dessa tentativa de censurar suas descobertas, a sensacional demonstração de Feynman exibida pela televisão tivera imenso impacto e o fato de que os anéis de vedação eram a causa provável do desastre tornou-se de conhecimento geral.

OS ÚLTIMOS DIAS

Feynman desenvolveu um câncer abdominal na década de 1970 e, após anos de luta contra a doença, morreu em 1988 aos 69 anos. Conta-se que, quando estava morrendo, perguntou ao seu médico quais eram as suas chances. A resposta foi: “É impossível falar sobre a probabilidade de um evento único.” Ao que Feynman respondeu: “Cá para nós, de professor para professor: é possível, se for um evento futuro.”

O grau de respeito e afeição em que Feynman era tido tanto por alunos quanto por professores no Caltech fora atestado de maneira impressionante vários anos antes. No outono de 1981, durante uma cirurgia, a aorta de Feynman se rompeu e ele precisou de maciças transfusões de sangue. Foram necessários cerca de 35 litros e grande parte foi doada por professores e alunos do Caltech. Essa afeição foi novamente expressa com vigor quando se soube de sua morte, ocasião em que os estudantes penduraram uma imensa faixa vertical num dos lados do prédio da Biblioteca Millikan. Em letras enormes, ele dizia:

Nós
Amamos
Você
DICK

A ciência ficou consideravelmente mais rica com as contribuições de Richard Feynman. Ele era irreverente, mundano, insaciavelmente curioso e apaixonado pela vida. Certa vez, resumiu seus esforços para compreender a natureza dizendo: “A natureza é um enorme jogo de xadrez disputado por Deuses e que temos o privilégio de observar. As regras do jogo são o que chamamos de física fundamental e compreender essas regras é a nossa meta.”

Mas o que poderia ser um epitáfio mais adequado para ele é uma frase encontrada escrita no quadro-negro de sua sala após a sua morte: “O que não posso criar, não compreendo.”

Feynman o teria negado, mas a sua mente foi uma das mais extraordinárias de nosso tempo.

^a Novas tecnologias estão sendo utilizadas em telescópios terrestres com resultados comparáveis ou superiores ao Hubble. O

Brasil participa de dois desses projetos de telescópios: SOAR e Gemini. (N.R.T.)

^b Em 1947 o físico brasileiro César Lattes — em colaboração com Powell e Occhialini, em Bristol, Inglaterra — descobriu, em análises de chapas expostas em Chacaltaya, Bolívia, evidências dos mésons propostos teoricamente por Yukawa. Em 1948 Lattes, em Berkeley, descobriu os mésons artificiais. A física brasileira estava bastante avançada com importantes contribuições. Feynman não veio para a praia ou para aprender o complexo ritmo da frigideira das baterias de escola de samba. Veio participar das discussões com Lattes, José Leite Lopes, Jaime Tiomno, Marcelo Damy, Mário Schemberg, entre outros, que trabalhavam no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), na Faculdade de Filosofia da UFRJ e na USP. (N.R.T.)

MURRAY GELL-MANN

Ouçam, ó monges, esta é a verdade nobre que conduz à cessação do sofrimento; este é o Nobre Caminho Óctuplo: a saber, ideias retas, intenções retas, fala reta, ação reta, vida reta, esforço reto, atenção reta, concentração reta.

*Aforismo atribuído a Buda
acerca do caminho apropriado para o Nirvana*

Que tem a busca da iluminação e bem-aventurança dos budistas a ver com a árida ciência da física? O físico tem a formidável meta não só de compreender o cosmo — o comportamento dos maiores objetos do universo, como os planetas, as estrelas e as galáxias — como de buscar os menores objetos, a unidade elementar de que toda a matéria é feita. Essa investigação conduziu os cientistas à noção de átomo, proposta pela primeira vez em 450 a.C. pelos cientistas gregos Leucipo e Demócrito.

Durante muito tempo, o átomo foi considerado a entidade indivisível da matéria, até que, por volta da virada do século XX, se descobriu que ele próprio tinha uma estrutura interna, compondo-se de elétrons e um núcleo. Examinando os elétrons e o núcleo, cientistas verificaram que os primeiros são de fato elementares — não podem ser fragmentados em partes constituintes ainda menores. Suspeitavam, porém, que o núcleo era outra coisa, até que, finalmente, descobriram que ele é composto de dois elementos: nêutrons e prótons.

Então era isso? Elétrons, nêutrons e prótons eram as unidades fundamentais da matéria? A busca dos tijolos básicos na construção da natureza é o enredo deste capítulo, cujo protagonista será o brilhante físico teórico Murray Gell-Mann, hoje trabalhando no Instituto Santa Fé, no Novo México. Além de físicos teóricos como Gell-Mann, Richard Feynman e George Zweig, a história inclui um amplo elenco de físicos experimentais coadjuvantes^a. Esta é a história do campo da física das partículas, o estudo das menores estruturas conhecidas da matéria e da energia.

Assim como a exploração do cosmo requer instrumentos e equipamentos, especificamente telescópios e sensores transportados por satélites, assim a exploração da física das partículas requer o uso de equipamento especializado, em especial os aparelhos conhecidos como aceleradores. Por vezes qualificados de os maiores e mais caros equipamentos de laboratório do mundo, os aceleradores (ou despedaçadores de átomos, como costumavam ser popularmente chamados) transformaram-se em máquinas gigantescas e potentes que disparam prótons, elétrons e outras partículas subatômicas numa velocidade próxima à da luz através de túneis de vácuo com muitos quilômetros de comprimento. Ali, as partículas subatômicas acabam por colidir umas com as outras, despedaçando-se em partículas constituintes. As novas e efêmeras partículas que disso resultam são, é claro, pequenas demais para serem

vistas, mas, usando instrumentação sensível, os físicos podem registrar suas trajetórias. Os padrões, comprimentos e formas dessas trajetórias fornecem pistas quanto à natureza e às propriedades das partículas recém-descobertas, algumas das quais vivem apenas por alguns bilionésimos de segundo. Essencialmente, os aceleradores reconstituem as colisões de alta energia que ocorreram nos primeiros instantes após o Big-Bang, quando da criação original dos tijolos constitutivos da matéria.

Em nossa viagem pelo estranho mundo da física das partículas vamos encontrar diversas “estranhezas”, como a classificação octal^b, os quarks e, por fim, o modelo padrão, a melhor explicação do mundo que os físicos têm hoje. Nosso guia é Murray Gell-Mann.

PRODÍGIO

Criança prodígio é aquela que manifesta talentos ou capacidade extraordinários. Na infância, Murray Gell-Mann não só se encaixou como foi além da definição de *criança prodígio*. Nascido em Nova York em 1929, tinha apenas três anos quando o irmão de 12, Ben, ensinou-lhe a ler (usando uma caixa de bolachas Sunshine) e nunca afrouxou o passo depois dessa veloz arrancada. Gell-Mann atribui ao irmão mais velho grande parte de sua educação precoce. A família morava na cidade de Nova York, quase sempre em Manhattan, e os dois jovens exploradores perambulavam pelos parques e museus da cidade. Ben introduziu Murray na observação de aves, na história natural, na colheita de plantas e insetos para estudo — que se tornaram todos tópicos de seu interesse pela vida inteira. Quando não estavam em suas caminhadas naturalistas, Ben e Murray visitavam museus de arte, especialmente os que continham material arqueológico, e os dois meninos chegaram a aprender a ler algumas inscrições em hieróglifos egípcios. Estudaram também latim, francês e espanhol, movidos a princípio pelo gosto do desafio. Em parte, o fascínio que Gell-Mann sentiu a vida toda por idiomas remonta a essas excursões da infância.

Ben e Murray eram ambos leitores prodigiosos e Murray se lembra de ter ficado particularmente impressionado com as histórias de ficção científica de H.G. Wells. A música também tinha o seu lugar e os dois irmãos chegaram a tentar aprender piano sozinhos. Frequentavam concertos quando podiam, mas, como a família não era rica, o rádio era a sua principal fonte de aprendizado sobre música clássica.

A precocidade do menino Murray foi logo reconhecida e, aos oito anos, ele foi transferido de uma escola pública local para a Columbia Grammar School, uma instituição para crianças superdotadas que incluía séries do curso secundário. Formou-se em 1944, aos 15 anos. Na escola secundária, gostava sobretudo de jogar futebol mas, surpreendentemente, a física desse nível lhe pareceu “terrivelmente maçante”. De todo modo, era para as ciências físicas e a matemática que o pai de Gell-Mann tentava impeli-lo. Emigrado da Áustria, Arthur Gell-Mann era um linguista sério que aprendera sozinho a falar inglês sem vestígio de sotaque. Mais tarde ele criou um curso de línguas para ensinar outros imigrantes a falar inglês sem sotaque estrangeiro. A extraordinária precisão e correção com que Murray Gell-Mann fala inglês (ou qualquer outra das cinco línguas que domina) foi destacada por muitos jornalistas que o entrevistaram ao longo dos anos.

Além das línguas, o pai de Gell-Mann se interessava pelas ciências e aprendeu sozinho matemática, física e astronomia. Arthur Gell-Mann estimulava o interesse do filho por matemática e o instigava a seguir a carreira de engenheiro. Murray resistia. Como ele conta em seu livro parcialmente autobiográfico, *O quark e o jaguar*, preferia morrer de fome a se tornar um engenheiro. Em seu último ano na escola secundária, Gell-Mann preencheu o formulário de pedido de admissão em Yale. Nele, tinha de citar o campo em que se especializaria. Por si, teria escolhido arqueologia ou linguística, mas o pai, vendo pouca compensação financeira em ambos, foi contra. Mediante concessões de parte a parte, decidiram pela física, em parte porque Murray imaginava que teria sempre a possibilidade de mudar de campo de especialização mais tarde. Ironicamente, física era a única matéria em que Murray se saíra mal no curso secundário, mas isso foi porque ela o aborrecera.

Como estudante de graduação em Yale, Gell-Mann achou a física avançada muito mais interessante e, antes que tivesse tido tempo de mudar sua área de especialização, estava fígado pelos aspectos teóricos da relatividade e da mecânica quântica. Nas palavras do próprio Gell-Mann, ele “virou físico por mero acaso”.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE MASSACHUSETTS

Depois de receber o grau de bacharel, em 1948, Gell-Mann matriculou-se na pós-graduação do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). Assim como a física, o MIT não fora sua primeira escolha. Ele tentara ingressar em várias escolas de pós-graduação da Ivy League, mas Yale só se dispôs a aceitá-lo em matemática, Harvard o admitiria se pagasse todas as taxas e Princeton simplesmente o recusou. Tal como Gell-Mann contou a história, pediu então ingresso no MIT, com muito pouco entusiasmo. Quase imediatamente recebeu uma carta do eminente físico Victor Weisskopf, de quem, muito estranhamente, nunca ouvira falar. Gell-Mann aceitou a proposta de Weisskopf de trabalhar como seu assistente, embora ainda não propriamente cheio de entusiasmo. Afinal, o MIT era conhecido como uma escola para técnicos obcecados e não era essa a imagem que ele tinha de si mesmo. A piada que contou mais tarde foi que as alternativas não admitiam troca; isto é, iria tentar o MIT primeiro e depois se suicidar, ao passo que na ordem inversa a coisa não funcionaria. Em 1948, nas vésperas de completar 19 anos, juntou-se a Weisskopf no MIT.

Naquele momento, o campo da eletrodinâmica quântica estava conquistando um lugar de relevo na física e o professor Weisskopf disse a Gell-Mann que estudasse os artigos publicados de Richard Feynman, Jules Schwinger e Freeman Dyson. Gell-Mann não se impressionou com nenhum deles, mas naquela época, como agora, não era de se impressionar com facilidade. Não deixou de reconhecer a originalidade e a importância dos artigos, mas nem a matemática nem, no caso de Feynman, o método de expressão das ideias, correspondiam a seus exigentes padrões. É preciso lembrar que nessa altura Gell-Mann não passava de um candidato ao título de doutor e ainda não estava oficialmente no jogo.

Em 1952, após concluir o doutorado, Gell-Mann deixou o MIT e passou um ano fazendo um pós-doutorado no Instituto de Estudos Avançados de Princeton. Em seguida foi trabalhar com Enrico Fermi na Universidade de Chicago. O fato de Gell-Mann ter sido aceito pelo grupo de pesquisa de Fermi é uma indicação da promessa que representou como estudante. Seu prestígio cresceu muito em 1953, quando propôs que certas partículas subatômicas possuíam uma qualidade que chamou de *estranheza*, um conceito que atraiu a atenção do mundo todo. A *estranheza* foi um passo crucial na introdução de alguma ordem no cenário que era a física das partículas naquela época.

A *estranheza* é definida como a propriedade das partículas elementares que governa a velocidade em que elas decaem. Como o uso de uma designação tão extravagante para um conceito de física se encaixa na nomenclatura da física das partículas? Tanto *estranho* quanto *graus de estranheza* parecem expressões excessivamente coloquiais e obscuras para serem termos usados na física, supostamente uma ciência rigorosa, não compatível com uma terminologia vaga ou não específica. Mas os primeiros físicos de partículas estavam explorando mundos completamente novos e foram obrigados a inventar uma nova linguagem — ou se apropriar de termos da linguagem cotidiana e usá-los de uma maneira original — de modo a poderem falar uns com os outros sobre seu trabalho. Seria igualmente fácil chamar novas partículas que se comportavam de uma maneira imprevisível de partículas *indisciplinadas*, mas foi *estranheza* que se tornou o termo aceito.

A ideia de *estranheza* ocorreu a Gell-Mann porque os físicos de partículas haviam descoberto que algumas das partículas geradas em seus aceleradores não estavam se comportando segundo o previsto. Elas haviam sido criadas por forças chamadas *interações fortes* e pensava-se que deveriam ser desintegradas pelas mesmas forças e durante igual tempo. Em vez disso, elas permaneciam por ali por um tempo muito maior. Essas durações de tempo são frações de bilionésimos de segundo, mas no mundo subatômico isso é uma diferença significativa. Como os físicos consideravam o comportamento dessas partículas *estranho*, Gell-Mann resolveu oficializar a palavra e chamá-las por esse nome.

Gell-Mann explicou as taxas inesperadas de decaimento dessas novas partículas mostrando que seus estados de energia diferiam segundo o modo como cada uma delas girava, como um minúsculo planeta, em torno de seu eixo. As energias que descreveu e mediu pela primeira vez permitiram uma explicação da maior expectativa de vida que as partículas estranhas apresentavam.

Usando suas formulações da *estranheza* (também propostas, de maneira independente, pelo físico japonês Kazuhiko Nishijima), Gell-Mann foi capaz de prever detalhadamente numerosos eventos de decaimento de partículas estranhas, bem como de profetizar a existência de partículas ainda não descobertas.

A CLASSIFICAÇÃO OCTAL

Em 1955 Gell-Mann já chegara à posição de professor associado na Universidade de Chicago. Tinha apenas 26 anos, mas sentiu que era hora de se mudar. Visitou o Caltech para conversar com o seu físico mais eminente, Richard Feynman. Os dois nova-iorquinos nativos

deram-se bem e Gell-Mann logo aceitou a proposta de ingressar no instituto. Em 1956, com 27 anos, tornou-se professor pleno. Isso marcou o início de uma longa e produtiva associação com o Caltech, e foi nesse tempo que ele propôs a bizarramente designada classificação octal e mais tarde a esdrúxula, mas vitalmente importante, *hipótese do quark*.

Aplicada à física das partículas, a classificação octal foi a resposta de Gell-Mann à explosão populacional das partículas na década de 1950. Na busca de impor alguma ordem à proliferação de novas partículas descobertas, a primeira tentativa foi a de classificá-las segundo seu peso. As mais pesadas, como o próton e o nêutron, foram chamadas de *hádrons*, e as leves, como o elétron, de *léptons*. Os hádrons foram divididos em *bárions* e *mésons*, os mésons tendo peso médio. De início esse sistema de classificação foi útil, mas surgiram problemas. Quando a população de bárions continuou a se expandir, foi preciso desenvolver algum novo método de organização.

Gell-Mann verificou que podia agrupar as partículas conhecidas em famílias de oito partículas com características similares. Todas as partículas dentro de uma família tinham spin e número bariônico iguais, e todas tinham aproximadamente a mesma massa. Esse método de classificação das partículas foi chamado de *classificação octal* antes de mais nada porque Gell-Mann houve por bem chamá-lo assim, mas também porque prevê que muitos hádrons podem ser agrupados em conjuntos de oito. O nome é também uma homenagem, ditada pelo capricho, ao caminho budista para o Nirvana e é o primeiro, mas não o último, exemplo da nomenclatura fantasiosa de que Gell-Mann gosta.

Infelizmente, a expressão reforçou a ideia, muito difundida na década de 1960, de que havia uma relação entre a física das partículas e o misticismo oriental — de que se sentar no chão de pernas cruzadas e entoar um mantra era uma maneira de penetrar nas complexidades da natureza. Segundo Gell-Mann, que qualificou essa ideia de “tolice”, sua alusão ao budismo foi uma simples brincadeira que algumas pessoas levaram demasiado a sério.

De qualquer maneira, a classificação octal foi a primeira tentativa bem-sucedida de evidenciar a conexão básica existente entre partículas de diferentes famílias e foi desenvolvida independentemente por Murray Gell-Mann e Yuval Ne’eman, um físico do Imperial College de Londres. A classificação octal tem com as partículas elementares a mesma relação lógica que a tão conhecida tabela periódica tem com os elementos químicos.

A analogia entre a classificação octal e a tabela periódica ajudou a tornar a contribuição de Ne’eman e Gell-Mann mais compreensível, sendo por isso merecedora de um breve exame. No final da década de 1890, graças a novas descobertas, o número de elementos químicos conhecidos estava proliferando muito, assim como o número de partículas conhecidas iria proliferar na década de 1950. Tinha-se a impressão de que novos elementos eram descobertos a poucos meses de intervalo e o total estava próximo da marca dos cem quando o químico russo Dmitri Mendeleev (1834-1907) concebeu uma tabela que dispunha os elementos em fileiras horizontais (chamadas *períodos*) segundo o número atômico dos elementos (número de prótons no núcleo) e em colunas verticais segundo grupos relacionados. Assim, a tabela periódica dos elementos exibe todos os elementos de modo tal a mostrar as similaridades existentes em certas famílias ou grupos de elementos. Além de ser uma maneira conveniente de exibir os elementos, a tabela periódica revelou a existência de lacunas na lista dos elementos, permitindo a previsão correta de elementos que vieram a ser descobertos mais tarde.

No final da década de 1950 descobriu-se que, quando prótons e outras partículas subatômicas eram arremessados uns contra os outros em aceleradores, pareciam ser criadas novas partículas; não fragmentos de prótons, mas irmãos e irmãs de prótons, cada um tão complexo quanto o próprio próton. Esses primeiros experimentos estavam produzindo tal profusão de novas partículas que os físicos tinham de carregar um caderno consigo para todo lado para não se perderem. A busca de partículas elementares estava em estado de confusão. Escrevendo no *American Scholar*, Jeremy Bernstein, autor especializado em ciência, deu uma ideia da frustração reinante na comunidade científica ao relatar que J. Robert Oppenheimer fora ouvido sugerindo a concessão de um Prêmio Nobel ao primeiro físico que *não* descobrisse uma nova partícula num determinado ano.

Gell-Mann, o cientista para todas as horas, tentou elucidar a relação entre todas as partículas conhecidas. Ele e o dr. Yuval Ne'eman, trabalhando de maneira independente, conseguiram agrupar as partículas em famílias chamadas *multipletos*. Cada multipletto consistia de partículas com características comportamentais comuns. Na tentativa de explicar essa abordagem sem recorrer à matemática, divulgadores da ciência da época usaram por vezes a analogia dos muitos animais de um jardim zoológico. O que Gell-Mann fez foi algo como transformar uma selva de partículas num zoológico de partículas; isto é, examinou todos os animais (partículas) e determinou quais se relacionavam entre si. No fim, descobriu que havia cinco categorias mais amplas de “animais” e inseriu-as em cinco imensas jaulas — supermultipletos. Feito isso, Gell-Mann percebeu que em algumas jaulas, comparadas às outras, faltavam um ou dois animais. Isso, por sua vez, tornou possível prever a existência de certas partículas que ainda não haviam sido descobertas.

Essa esquematização foi bastante semelhante, ainda que matematicamente muito mais complexa, à que Mendeleev operou com a tabela periódica dos elementos. Tal como se deu com novos elementos no caso de Mendeleev, novas partículas passaram a ser descobertas porque os físicos supunham, com base na hipótese de Gell-Mann, que elas tinham de existir. Domesticar o zoológico das partículas foi um feito extraordinário na física e, ao lado de suas contribuições anteriores para a elucidação da estranheza, elevou Gell-Mann à fileira dos maiores físicos do mundo.

O CONTRASTE FEYNMAN-GELL-MANN

O Caltech contava agora com dois luminares: Murray Gell-Mann e Richard Feynman. Uma comparação entre os dois astros da física do Caltech revela bastante sobre suas personalidades. Enquanto Richard Feynman era resolutamente informal, em geral dando aulas em mangas de camisa, usando inglês coloquial e evitando qualquer tipo de referência literária, Gell-Mann era visto quase sempre de paletó e gravata, expressava-se com frases e pronúncias precisas e frequentemente usava referências culturais esotéricas, chegando a correr o risco de perder suas audiências menos cultas.

No Caltech, Gell-Mann almoçava no Atheneum, o clube dos professores, onde uma mesa posta, especial, estava reservada para ele. Feynman costumava preferir o chamado “Gordurento”, o bandeirão da faculdade, onde podia trocar histórias com os alunos de pós-

graduação e pós-doutorado enquanto almoçava.

Podemos ter uma boa ideia do quanto seus estilos contrastavam a partir dos seguintes comentários sobre o campo da psicanálise, pela qual nenhum dos dois mostrava grande respeito. Feynman expressou sua opinião de maneira sucinta e engraçada: “Qualquer pessoa que procure um psicanalista deveria fazer um exame da cabeça.” Gell-Mann, como sempre, expressou suas ideias com mais elegância e mais exatidão, com igual ceticismo: “Acredito que há provavelmente uma considerável soma de verdade no corpo de saber desenvolvido pela psicanálise, mas ela não constitui uma ciência no presente momento precisamente por não ser refutável.”

Os dois eram colegas, amigos e por vezes adversários cordiais. Na década de 1960, Feynman e Gell-Mann trabalharam juntos na elaboração de uma importante teoria sobre a chamada *interação fraca*, que explica por que partículas nucleares por vezes decaem emitindo elétrons (ou pósitrons) e neutrinos. Um episódio transmite com precisão o tom do pugilato amistoso dos dois: durante uma discussão sobre um aspecto da teoria da interação fraca, Feynman ameaçou começar a escrever o nome de Gell-Mann sem o hífen, ao que Gell-Mann contrapôs de imediato a ameaça de inserir um *no* de Feynman (Feyn-man).^c

QUARKS

Por fértil que fosse sua colaboração com Feynman, o trabalho de Gell-Mann o estava levando para novas áreas, num caminho que lhe era muito próprio. Na tentativa de refinar o sistema de classificação octal, ele e seus colaboradores chegaram à conclusão de que algumas das partículas fundamentais do átomo podiam ser mais bem compreendidas admitindo-se que eram formadas por componentes ainda menores, uma ideia que conduziu ao conceito de *quarks*.

Hoje os *quarks* são aceitos como o tijolo básico e fundamental da construção de toda matéria — mais fundamental que o próton e o nêutron, antes considerados *as* partículas elementares. (Os elétrons continuam sendo considerados fundamentais.) A hipótese original de quark foi proposta independentemente em 1963 por Murray Gell-Mann e George Zweig. Eles postularam que todas as propriedades das várias partículas poderiam ser mais bem compreendidas se essas partículas fossem compostas de outras partículas, ainda mais elementares. Gell-Mann batizou essas novas entidades hipotéticas de *quarks*, ao passo que Zweig as chamou de *ases*. Como os argumentos de Gell-Mann em favor da existência de tais partículas eram em geral mais convincentes, sua nomenclatura se popularizou.

A história de como Gell-Mann foi atinar com o inusitado nome *quark* é uma interessante digressão. Ele recorda ter concluído que um som como “kwork” (pronunciado de modo a rimar com *cork* [kôrk])^d seria um bom rótulo para a nova partícula. Depois, relendo *Finnegan’s Wake*, o romance de James Joyce, deu com as palavras “*three quarks for musty mark*”^e e decidiu adotar a grafia de Joyce para a palavra que os dois, separadamente, haviam cunhado. Tal como usado por Joyce, o termo não rima com *cork*, mas, por outro lado, o número três ajusta-se perfeitamente ao modo como os quarks ocorrem na natureza. Gell-Mann resolveu usar a palavra a despeito das controvérsias quanto à pronúncia.

No momento em que deu nome à sua partícula elementar hipotética, no artigo de duas

páginas que introduziu sua teoria, Gell-Mann estava pouco confiante em sua proposta. Assim, por exemplo, não tentou publicar esse texto em *Physics Review*, o veículo usual para a troca de ideias no campo, porque pensou que não seria aceito. Preferiu publicar suas ideias na *Physics Letters*, revista publicada pelo CERN. Ele sabia que os editores da *Physics Letters* estavam precisando de artigos e talvez não fossem demasiado críticos. É possível que, em parte, tivesse dado a seus tripletos hipotéticos esse nome um tanto extravagante por pensar que só um reduzido número de cientistas estaria prestando atenção.

Numa digressão ainda mais longa, gostaria de propor uma derivação possível do termo para explicar o que o próprio Joyce poderia estar querendo dizer com a palavra. O verso em *Finnegan's Wake* é pronunciado por gaivotas “*shrillgleescreaming*” — na linguagem de Joyce — sobre Howth Castle, e é bem possível que Joyce quisesse dizer que os quarks ofertados ao Muster Mark abaixo eram excremento de aves. Como muita coisa de Joyce, e praticamente tudo de *Finnegan's Wake*, esta derivação está aberta a interpretação, mas a meu ver não é impossível que Murray Gell-Mann também tenha feito esta interpretação e estivesse zombando um bocadinho ao usar a palavra. Na versão do próprio Gell-Mann, ele vinha folheando o livro havia anos por prazer, tentando entender um trechinho ou outro e, em particular, as palavras inventadas por Joyce. “Joyce levou 17 anos para escrevê-lo”, observou, “então por que não deveríamos nós levar pelo menos 17 anos para lê-lo?”

Gell-Mann comentou também que teria podido facilmente seguir a tradição e forjar “para as coisas nomes apropriados, pomposos, tomados do grego”. “Sei fazer isso. Mas em geral eles eram baseados em ideias que se revelaram erradas: *próton*, por exemplo, significando primeiro; *átomo*, significando indivisível. Todas essas coisas se revelaram erradas! Pensei então que melhor seria aparecer com alguma coisa divertida.”

Divertida ou não, a terminologia de Gell-Mann é aceita hoje em todos os livros de física.

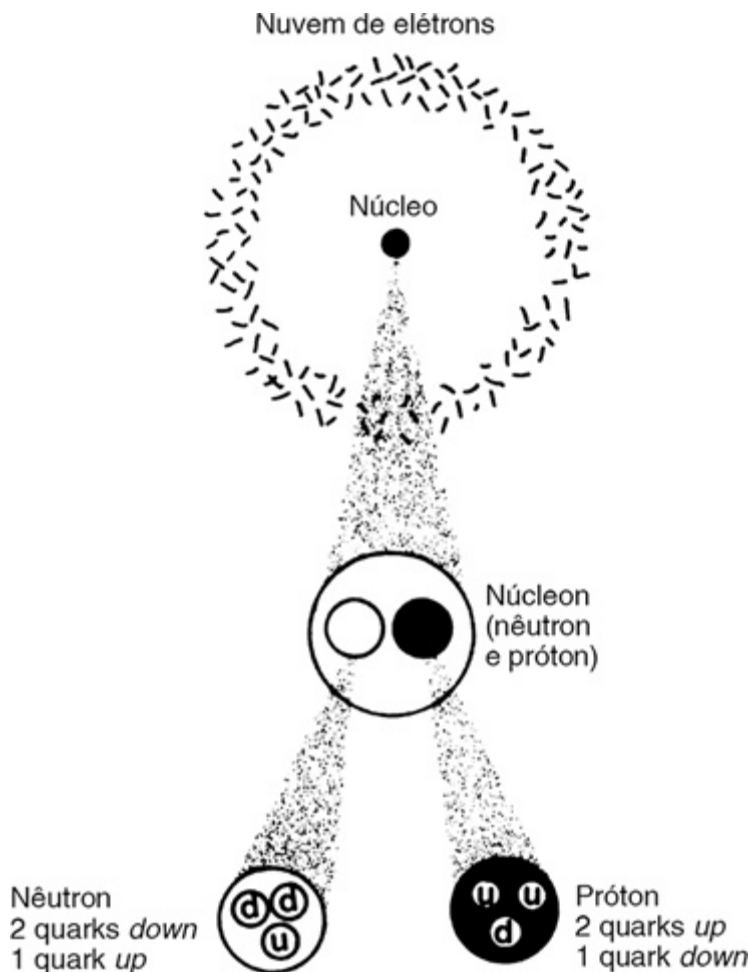
A hipótese original do quark requeria três tipos, ou sabores, de quarks: o *up*, o *down* e o *estranho* (*u*, *d* e *s*). Toda a matéria comum pode ser construída a partir unicamente dos quarks *u* e *d*. O quark *s* foi acrescentado para explicar certas partículas criadas por eventos de alta energia que têm a estranha propriedade de existir por períodos de tempo mais longos que o previsto. Uma das características dignas de nota dos quarks é que a carga elétrica que transportam é uma fração da carga transportada pelo elétron (em geral designada por *e*), anteriormente considerado a unidade básica de carga. O quark *u* transporta uma carga de $+2/3$ e o quark *d* uma carga de $-1/3$.

A teoria do quark propôs que os prótons e nêutrons do núcleo dos átomos são feitos de quarks. O próton é feito de dois quarks *u* e um quark *d*; sua carga total é portanto $2/3 + 2/3 - 1/3$, ou 1. De maneira similar, o nêutron, que é desprovido de carga, compõe-se de um quark *u* e dois quarks *d*.

A ESTRUTURA INTERNA DO ÁTOMO

Com a introdução dos quarks, a estrutura básica do átomo foi reconcebida e logo outros refinamentos se fizeram necessários, à medida que os experimentalistas foram descobrindo outras novas partículas. Em 1974, Burton Richter e Samuel Ting descobriram simultaneamente

a partícula *J/psi*. As propriedades exibidas por ela exigiram a postulação de um quarto quark, que recebeu o fantasioso nome de quark *charmoso*, ou *c*. Mais tarde foi acrescentado o quark *belo* ou *b*. Finalmente foi postulado o quark *top*, ou *t*, para criar uma representação hipotética completa. A expressão *quark charmoso* deu lugar a muitos comentários na época.



ESTRUTURA SUBATÔMICA Os átomos consistem em um ou mais elétrons orbitando um núcleo. O núcleo é composto de prótons e nêutrons, os quais são, por sua vez, compostos de quarks.

Um leitor brincalhão do *New York Times* enviou certa feita uma carta perguntando ao falecido Walter Sullivan, o editor e repórter de ciência do jornal, o que eram quarks charmosos e se eles davam bons bichinhos de estimação. Segue-se a resposta do sr. Sullivan:

“Sobre sua recente indagação quanto ao que torna os quarks charmosos, é a imaginação dos físicos teóricos que os torna charmosos.

“O senhor perguntou quanto ao custo. O melhor negócio é o cruzamento de um quark charmoso com um antiquark charmoso. O custo está na faixa de três a cinco bilhões de elétrons-volt.

“Onde o senhor pode comprar um desses objetos? O pessoal de Stanford ou de Brookhaven poderia lhe vender um; mas como eles vivem menos de um milionésimo de segundo, medidas especiais seriam necessárias para levar um para casa antes que desapareça.”

Propriedades dos Quarks

Quarks

Massa (GeV)

Carga

Up	0,378	+2/3
Down	0,336	-1/3
Estranho	0,540	-1/3
Charme	1,500	+2/3
Belo	4,720	-1/3
Top	174,000	+2/3

a GeV = Gigaelétons-volt — ou bilhão (10^9) de elétrons-volt.

Talvez pareça estranho que a massa seja medida em volts, a menos que você se lembre que Einstein mostrou que massa e energia são equivalentes e podem ser igualadas uma à outra ou convertidas uma na outra pela fórmula $E = mc^2$.

Ao desenvolver a teoria que conduziu a uma explicação sistemática das relações entre as partículas, Gell-Mann estabeleceu algumas regras de comportamento para os quarks. Sendo pesados, os quarks podem se aglutinar de uma destas maneiras: em tríades de quarks ou em pares quark/antiquark. As tríades produzem partículas mais pesadas, chamadas *bárions*, que incluem o nêutron e o próton, as partículas mais pesadas do núcleo atômico. Os pares quark/antiquark compõem as partículas hoje chamadas mésons.

CROMODINÂMICA QUÂNTICA (QCD)

Com o tempo, a teoria do quark tornou-se mais complexa e essa complexidade exigiu ainda mais no plano da terminologia. Os teóricos, principalmente Gell-Mann, mostraram-se à altura do desafio. Primeiro, postularam que cada sabor, ou tipo, de quark era na verdade três quarks. Chamaram essa propriedade de *cor*. Cada um dos seis quarks postulados pode ter qualquer uma de três cores, geralmente chamadas de vermelho, azul e verde. A palavra *cor*, tal como os físicos a utilizam, nada guarda de seu significado usual. Os quarks não se mostrariam vermelhos ou azuis se fossem visíveis. Cor é uma propriedade deles, tal como a carga elétrica, que lhes permite se unir para formar partículas como o próton. A teoria subjacente à força de cor é chamada *cromodinâmica quântica* (QCD). Para dar nome a essa teoria, Gell-Mann se valeu da raiz grega *chrôma*, que significa cor.

PRÊMIO NOBEL DE FÍSICA

O reconhecimento pelas suas realizações na pesquisa das partículas elementares e a fama mundial chegaram a Murray Gell-Mann em 1969, quando o rei Gustavo VI da Suécia lhe entregou o Prêmio Nobel de Física na tradicional e elegante cerimônia em Estocolmo. Gell-Mann tinha 40 anos de idade.

Em 1967 ele havia sido designado professor catedrático no Caltech e agora chegava ao pico de sua carreira.

Estava casado nessa época com J. Margaret, Dow em solteira, e tinham dois filhos, Lisa e

Nicholas. Contou aos repórteres por ocasião da premiação que gostava de esquiar, escalar montanhas e estudar animais e plantas em seu hábitat natural. Perguntado sobre o que pretendia fazer com o dinheiro do Nobel, pergunta que os repórteres sempre fazem (talvez para evitar o terreno da ciência), disse que gostaria de comprar um pequeno pedaço de terra agreste em algum lugar, para poder escapar da vida da cidade grande.

Sob os holofotes da atenção da imprensa após o Prêmio Nobel, Gell-Mann revelou um aspecto arrogante e mordaz de sua personalidade que contaminou sua imagem pública desde então. Solicitado a comentar o recebimento de um Nobel, disse (fazendo eco às palavras de Newton de que, se vira mais longe que outros fora por estar de pé sobre os ombros de gigantes) que se ele, Gell-Mann, podia ver mais longe que outros era porque estava cercado de anões. Essa assombrosa observação só não foi surpresa para seus colegas. Muito antes desse incidente, Gell-Mann fora diagnosticado por muitos cientistas como afetado de severa deficiência de charme.

Autores especializados em ciência, jornalistas e repórteres não têm sido em geral lisonjeiros com Gell-Mann. Em parte, ele próprio provoca isso. Usualmente, não trata os que escrevem sobre ciência com particular respeito e eles, por sua vez, muitas vezes foram levados a se desforrar. Numa entrevista com John Horgan, publicada em *Scientific American* (março de 1992), consta que Gell-Mann teria dito que escritores e jornalistas especializados em ciência são em geral uns “ignorantes” e uma “raça terrível”.

Homem baixo, de constituição compacta, com um cabelo branco à escovinha e óculos pretos, Gell-Mann revela seu espírito imediatamente — alguns diriam talvez bruscamente. Sua maneira de falar, erudita e cultivada como é, ainda guarda um áspero resquício de Nova York e seu modo natural de comunicação é mais didático que coloquial.

Gell-Mann é um homem de amplos interesses intelectuais e com frequência revela um conhecimento de especialista em qualquer coisa que vá da botânica à ornitologia, da arqueologia à história natural, dos quarks aos jaguares. Já se disse que ele se situa entre os maiores físicos do mundo não por ter uma aptidão particular para a física, mas porque se dignou a incluí-la entre suas muitas especialidades. Quase acima de tudo está seu amor pela língua. É famoso por corrigir estrangeiros no modo de pronunciar seus próprios nomes ou os nomes de cidades de seu países.

Um perfil de Gell-Mann publicado pelo *New York Times*, da autoria de David Berreby, teve por título “O homem que sabe tudo”. Talvez um título melhor fosse “O homem que quer saber tudo”. Ele é um polímata com aspirações a “totímata”. Dá a impressão de que nunca esqueceu nada do que leu na vida e de que terá prazer em lhe contar tudo a respeito. Em sua defesa, cabe observar que sua obsessão pelos mínimos detalhes combinada com sua paixão por saber tudo são dois dos traços de caráter que fazem dele um grande cientista.

Acima de tudo, Gell-Mann é um intelectual, no sentido pleno desse termo por vezes mal empregado. Na explicação dele próprio, sua extraordinária amplitude de interesses se deve ao fato de ser ele um homem “odisséico”. Enquanto as pessoas em geral, acrescenta, são “apolíneas” (distantes e analíticas) ou “dionisiacas” (envolvidas e intuitivas), ele combina ambos os traços. Essa rara combinação é chamada “odisséico” em alusão a Odisseu, o protagonista da *Odisseia* de Homero, que navegou por toda parte e acumulou grande sabedoria a partir de suas amplas experiências.

Gell-Mann sem dúvida deu provas de possuir grande sabedoria, e é notável constatar o

quanto sua teoria foi exaustivamente corroborada por experimentos ao longo do tempo. Por um período, porém, discutiu-se muito se sua teoria seria ou não confirmada por experimentos. Nem o próprio Gell-Mann pensava que algum dia seria possível observar quarks.

OBJETOS MISTERIOSOS

Na época em que Gell-Mann ganhou o Prêmio Nobel, os quarks ainda eram apenas hipotéticos, não detectáveis por meios experimentais: sua existência fora demonstrada, mas unicamente no mundo formal da matemática. Por convincente que fosse essa matemática, a insinuação de Gell-Mann e Zweig de que os quarks não podiam ser vistos, ainda que se dispusesse de melhores equipamentos experimentais, constituiu um considerável obstáculo à aceitação da teoria. Não era uma sugestão que cheirava mais a teologia que a física? De fato, a teologia geralmente parte da afirmação de que a matéria sob consideração não é visível, ao passo que a física sempre foi basicamente uma ciência experimental. Hoje Gell-Mann afirma que a indicação que deu num artigo inicial de que os quarks eram entidades antes “matemáticas” que “reais” foi mal compreendida e que não fora sua intenção dizer que os quarks não eram reais. Na época, pensava que os quarks estariam sempre aprisionados dentro de hádrons e que por isso seria sempre impossível isolá-los e detectá-los individualmente. Mas, sendo a física a ciência que é, para ganhar aceitação geral a convincente teoria do quark teria de acabar passando pelo teste da observação e do experimento.

A BUSCA DO ELUSIVO QUARK

Os físicos experimentais, em particular aqueles ligados a aceleradores, como os do Fermi National Accelerator Laboratory, perto de Chicago, do Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) na Califórnia e do grande acelerador do CERN, perto de Genebra, Suíça, aceitaram com entusiasmo o desafio de procurar as partículas que Gell-Mann teorizara. Puseram-se a buscar provas experimentais concretas do que Gell-Mann e outros físicos teóricos lhes haviam dito que encontrariam.

Num experimento realizado em 1969 no SLAC, cientistas dispararam elétrons de 20 bilhões de volts contra prótons encerrados num tubo de hidrogênio líquido e mediram a energia perdida pelos elétrons enquanto defletiam dos prótons. Supunham que, se os elétrons perdessem energia, isso significava que haviam colidido com partes em movimento do próton, possivelmente os quarks previstos por Gell-Mann, que estariam ali. Os resultados desses experimentos indicaram que os elétrons de fato perdiam quantidades consideráveis de energia e a conclusão foi que havia sem dúvida alguma coisa no interior do próton. Outros experimentos mostraram que as partes contidas num próton têm uma propriedade chamada *spin* exatamente na quantidade que os teóricos haviam previsto.

O número real de componentes no interior do próton, contudo, ainda estava por determinar. No CERN, os cientistas desenvolveram um esquema para usar mais uma partícula, o neutrino,

na procura dos quarks. O neutrino é outra partícula esquisita — supõe-se que não tem nenhuma massa, ou pouca, e nenhuma carga elétrica. Eles foram postulados pela primeira vez em 1930 por Wolfgang Pauli, que disse na época: “Cometi o mais grave dos pecados. Previ a existência de uma partícula que talvez nunca seja observada.” Enrico Fermi batizou a partícula misteriosa de *neutrino*, “neutronzinho” em italiano.

Os cientistas experimentais acabaram por aceitar o desafio de encontrar neutrinos e, em 1959, finalmente concluíram a difícil tarefa. Um experimento envolveu a instalação de detectores ópticos nas paredes de grandes tanques de água puríssima enterrados a grande profundidade para depois registrar os lampejos produzidos na rara ocasião em que um neutrino encontra um átomo de água^f. Em geral os neutrinos atravessam milhões de quilômetros de matéria sem interagir com átomo algum, mas eles são tão numerosos que o encontro ocasional acontece. Num importante experimento levado a cabo no

CERN e que exigiu grande paciência por um longo tempo, os cientistas fizeram milhões de fotografias de neutrinos colidindo com prótons e fragmentando-os em outras partículas. Medindo os percursos das partículas, os experimentais puderam calcular também o número líquido de partes no interior do próton. Numa margem razoável de erro experimental, esse número era três, exatamente o previsto pela hipótese do quark. Medições adicionais pareceram confirmar que cada parte se apresentava com uma carga fracionária, de novo exatamente como Gell-Mann previra.

A década de 1970, chamada “a idade de ouro da física das partículas”, viu o quark firmemente estabelecido com uma unidade básica de matéria hadrônica. É assim que a ciência gosta que as coisas aconteçam. Um por um, os físicos experimentais pareciam confirmar as expectativas dos físicos teóricos. Agora era possível dizer com crescente segurança que os quarks realmente existiam e pareciam ser uma unidade básica da matéria.

O físico Leon Lederman, em seu delicioso livro *A partícula Deus*, diverte-se enormemente discutindo a relação entre os teóricos e os experimentais no campo da física das partículas. Ressalta que a física em geral avança em decorrência da interação entre seus dois ramos. Isto dito, Lederman, que é um experimental, passa a zombar dos teóricos. São eles que escrevem todos os livros de divulgação científica, escreve ele, porque são eles que possuem todo o tempo livre. Compara os papéis do teórico e do experimental na descoberta aos papéis de um lavrador e de um porco na caça de trufas. O porco procura persistentemente as trufas. Por fim, localiza uma e no instante exato em que vai comê-la o lavrador a surrupia.

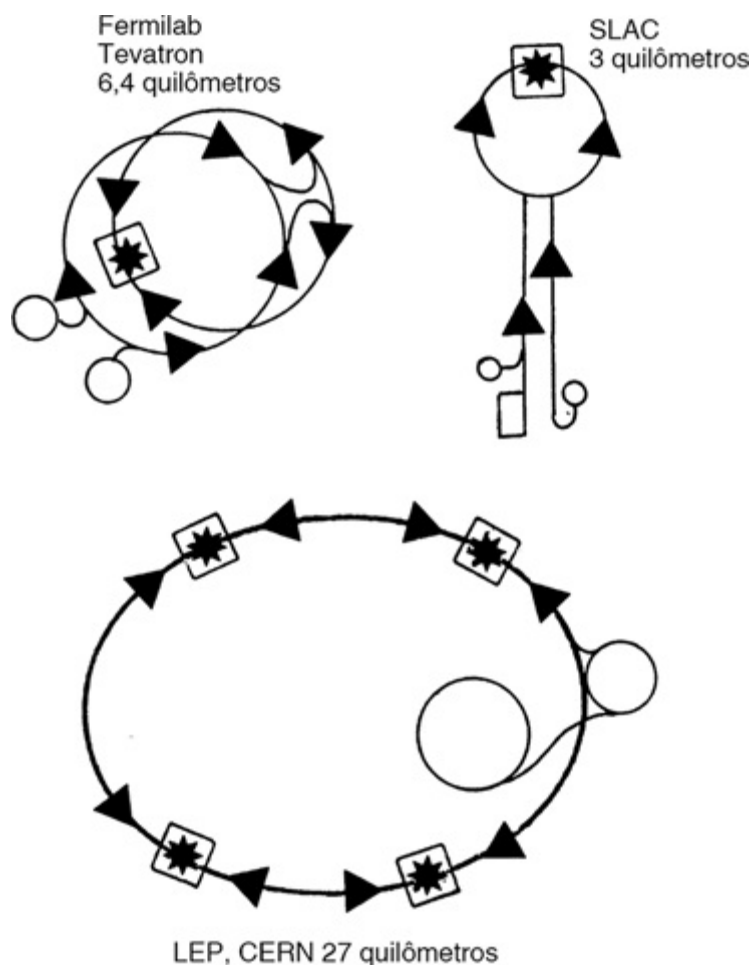
Discutindo a relação essencial entre o teórico e o experimental na física, Gell-Mann falou uma vez sobre o que é necessário ter para ser um físico teórico: “As ferramentas são simples. Tudo que você precisa é de um lápis, papel, borracha e uma boa ideia.” O problema, continuou ele, é que em geral as ideias não são boas e as equações e os rabiscos que resultam de seu exame demasiado frequente acabam apropriadamente nas cestas de lixo.

ACELERADORES/COLISORES

As ferramentas que os experimentais usam não são tão simples. A mais elaborada e impressionante das ferramentas experimentais usadas na física das partículas é, como vimos, o

acelerador. Nos aceleradores mais recentes, as partículas são primeiro aceleradas, chegando a velocidades próximas à da luz (299.792 quilômetros por segundo) e depois levadas a colidir de frente com outras partículas que viajam na direção oposta. A explosão resultante produz partículas exóticas que podem então ser analisadas. Os aceleradores são máquinas que permitem aos físicos “ver” o átomo por dentro. Já se disse que usar o acelerador como método para efetuar essa tarefa é como esraçalhar um relógio suíço contra outro para descobrir o que têm dentro. À medida que procuram partículas cada vez menores, os cientistas precisam de aceleradores cada vez maiores. Sua meta, trabalhando com os teóricos, é responder às grandes questões da física subatômica: De que é feito o universo? Quais são as forças que aglutinam as partes do universo?

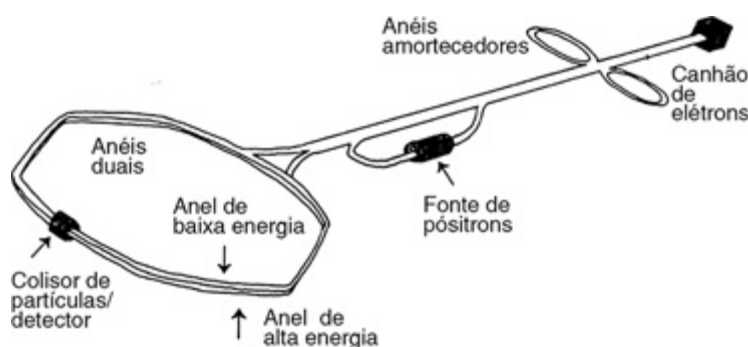
Os três maiores aceleradores do mundo são o Tevatron, do Fermilab, um aparato na forma de um túnel circular com 6,4 km de circunferência; o acelerador linear de Stanford, uma máquina que dispara elétrons e pósitrons por uma reta de três quilômetros e em seguida os faz dar voltas no curso de colisão através de duas seções semicirculares; e o grande acelerador de elétrons e pósitrons do CERN, chamado LEP, um aparato circular com 27 km de circunferência. Todos estavam destinados a ser transformados em anões pelo Supercolisor Supercondutor que iria ser construído no Texas, até que o Congresso americano decidiu não gastar oito bilhões de dólares em algo que a maior parte do povo americano, e dos congressistas, não entendiam.



COLISORES Colisores são máquinas que permitem aos físicos ver o interior do átomo. Acima estão o Grande colisor elétron-pósitron do CERN, o Tevatron do Fermilab e o acelerador linear de Stanford. Partículas subatômicas são aceleradas até alcançar velocidades próximas à da luz e levadas a colidir com outras partículas que se deslocam na direção oposta.

O uso dessas gigantescas ferramentas produziu precisamente os resultados esperados. Os experimentais confirmaram exatamente o que os físicos teóricos haviam postulado. Na década de 1970, experimentais do SLAC foram os primeiros a mostrar que o próton e o nêutron presentes no núcleo atômico são eles próprios compostos de objetos menores, mais fundamentais — os quarks. Mais tarde esse trabalho mereceu um Prêmio Nobel de Física compartilhado entre Jerome Friedman e Henry Kendall do MIT e Richard Taylor do SLAC.

Pesquisadores no SLAC concluíram que a tarefa de examinar o interior do átomo poderia ser mais proveitosa se, em vez de fazer um feixe acelerado atingir uma partícula estacionária, fosse possível fazê-lo girar num anel de acumulação de alta energia e em seguida fazê-lo colidir com um feixe que se deslocasse na direção oposta. Para tanto, construíram um anel de acumulação (SPEAR). O uso do SPEAR resultou na descoberta de uma partícula elementar subnuclear chamada *psi* que é uma combinação de quark e antiquark de tipo inteiramente novo. Até então, só se conheciam três tipos de quark, mas a descoberta desse quarto tipo (chamado *charme*) serviu como uma convincente prova adicional da ideia básica de que a matéria se estrutura em quarks.



O ACELERADOR LINEAR DE STANFORD O Acelerador Linear (LINAC) usa o canhão de elétrons para liberar elétrons de uma fonte de metal aquecido na pista de 3,2 quilômetros em que as partículas são aceleradas e injetadas nos anéis duais.

Esse trabalho pioneiro realizado no SLAC valeu a Burton Richter, chefe da equipe de pesquisa, o Prêmio Nobel de Física de 1976, que partilhou com Samuel C.C. Ting, do MIT, que descobriu simultaneamente essa nova partícula no Brookhaven National Laboratory.

Outra descoberta revolucionária feita com o uso do SPEAR foi uma partícula chamada *tau*, que se descobriria ser a terceira na sequência de partículas eletricamente carregadas chamadas *léptons*. Martin Perl, do SLAC, foi reconhecido como o descobridor do lépton *tau*.

O Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) em Batavia, Illinois, envolveu-se também intensamente no esforço cooperativo de pesquisa. Em 1977, pesquisadores seus anunciaram a descoberta do quark belo, o quinto e de longe o mais pesado dos quarks descobertos até aquele momento. Passo a passo, a partir dos chuveiros e jatos de partículas criadas em colisões de alta velocidade nos seus aceleradores, os físicos, tanto teóricos quanto experimentais, estavam moldando o que hoje é conhecido e aceito como modelo padrão da física das partículas.

De que é feito o universo e quais são as forças que aglutinam suas partes? A resposta, conhecida como o *modelo padrão*, tenta descrever a natureza da matéria e da energia de modo tão simples quanto possível. Esse modelo postula que quase toda a matéria conhecida, do livro que você está lendo às galáxias distantes, é composta de apenas quatro partículas: dois tipos de quark, que integram os prótons e os nêutrons no interior dos núcleos dos átomos; elétrons, que envolvem os núcleos; e neutrinos, que são objetos velozes, eletricamente neutros, praticamente sem massa e capazes de atravessar milhões de quilômetros de chumbo sólido com apenas uma chance diminuta de ser envolvidos numa colisão. Quatro forças atuam sobre essas partículas da matéria: (1) a força nuclear forte, que aglutina quarks em núcleos atômicos; (2) a força nuclear fraca, que desencadeia algumas formas de decaimento radioativo; (3) o eletromagnetismo, que incorpora átomos em moléculas e moléculas em matéria macroscópica; e (4) a gravidade. Partículas de uma classe completamente distinta, os chamados *bósons*, são os agentes que transmitem essas forças de um lado para outro entre partículas.



MODELO PADRÃO DE PARTÍCULAS FUNDAMENTAIS E INTERAÇÕES Acredita-se atualmente que toda matéria é composta de doze partículas fundamentais (férmions) mais as partículas (bósons) que transmitem as quatro forças da natureza. Cada partícula possui uma antimatéria equivalente.

Mas será assim tão simples (se é que alguma coisa nisso pode ser chamada de simples)? As famílias básicas de partícula que acabamos de descrever são suplementadas por duas famílias exóticas, que têm uma estrutura paralela: dois quarks, um tipo de elétron e um tipo de neutrino. Essas duas famílias exóticas não existem no universo dos nossos tempos. Pensa-se que teriam existido nos primeiros microssegundos do Big-Bang — a bola de fogo inimaginavelmente quente e densa que, 15 bilhões de anos atrás, deu origem ao universo e tudo que ele contém. Só com o uso de aceleradores é possível recriar condições semelhantes às do Big-Bang e detectar as partículas exóticas.

Mais alguns termos são necessários para completar nosso quadro do modelo padrão. Os físicos agruparam as partículas em classes segundo suas funções. *Férmions* é o termo usado para a classe das partículas que constituem toda a *matéria*. Os férmions, por sua vez, consistem de suas subclasses: *léptons* e *quarks*. Os léptons são a subclasse das partículas elementares que não têm tamanho mensurável e não são influenciadas pela força nuclear forte; isto é, não estão encerradas dentro de partículas maiores e podem viajar por conta própria. Os elétrons, múons e neutrinos são léptons. Os quarks são um tipo de férmion e, como estão presos no interior de partículas maiores, nunca são vistos sozinhos.

Bósons, como eu disse, é o termo usado para a classe de partículas que transmitem as forças da natureza. Há quatro delas: fótons, glúons, bósons vetoriais intermediários e grávitons. Os fótons são as partículas que constituem a luz e transportam a força eletromagnética. Os glúons carregam a força forte entre quarks. Os bósons vetoriais intermediários carregam a força fraca, que é responsável por algumas formas de decaimento radioativo. Os grávitons, ainda por descobrir, são os transportadores da força da gravidade.

Agora estamos quase lá, mas preciso pôr sua paciência à prova só mais um pouquinho, introduzindo o conceito de *antimatéria*. A antimatéria ainda é um tanto enigmática para os físicos, mas não pode ser ignorada. Antimatéria é matéria feita de partículas com massa e spins idênticos aos da matéria comum, mas com carga oposta. Cada partícula tem uma contrapartida de antimatéria, que pode ser pensada como uma espécie de imagem especular. Já se produziu antimatéria experimentalmente, mas ela é raramente encontrada na natureza. Porque razão é raramente encontrada na natureza é uma das perguntas não respondidas da física.

Na descrição precedente, bem como no quadro descritivo do modelo padrão que a acompanha, dividi todas as partículas em suas categorias principais: partículas de matéria (férmions) e partículas de força (bósons). Mas essa não é a única maneira de classificar os muitos constituintes do modelo padrão das partículas e interações fundamentais. Uma abordagem diferente seria dispor as partículas segundo suas interações com a força eletromagnética; por exemplo, partículas que estão envolvidas apenas na interação fraca — isto é, no decaimento radioativo lento — são chamadas de *léptons* (da palavra grega para “pequeno”). Todas as demais partículas, com exceção dos fótons, estão envolvidas de uma maneira ou de outra com as interações fortes e são chamadas de *hádrons* (da palavra grega para “forte”). Nessa abordagem, em que as partículas são classificadas por interação, o fóton é em geral posto sozinho numa classe por ser a partícula que medeia a interação eletromagnética.

Duas outras abordagens à classificação envolvem o processo de decaimento, ou a mudança do instável para o estável. O fator dominante na primeira delas é o produto final, a composição da partícula estável resultante. Poderia haver apenas léptons e fótons na série final, ou poderia haver um próton também. A presença ou ausência de um próton torna-se assim o critério para esse método de classificação. As partículas em que um próton aparece no produto final do processo de decaimento são chamadas de *bárions* (pesadas). Aquelas em que não aparece um próton — o depósito final de partículas de decaimento é inteiramente composta de léptons e fótons — são chamadas de *mésons*. O fator dominante na outra abordagem ao decaimento é a velocidade em que ele se produz: isso conduz às partículas *estranhas* e *não estranhas*.

As partículas elementares podem também ser agrupadas com base em sua dinâmica interna, isto é, seu spin. O modelo padrão não consiste em um método oficial de classificação único. Os vários métodos nada mais são que diferentes maneiras de impor ordem a um grande grupo de objetos aparentemente não relacionados entre si. Usam-se os vários sistemas de classificação mais ou menos como o serviço de recenseamento usa os resultados de um censo. Todos os habitantes computados podem ser agrupados por sexo, por idade, por altura, por renda, por educação, ou por qualquer outro critério que ajude a compreender a população global. O sistema de classificação é, em última análise, um auxiliar para a comunicação e é assim que deve ser encarado.

QUARK “TOP”

O anúncio triunfante, em março de 1995, de que físicos do Fermilab haviam finalmente encontrado o quark *top* encerrou um esforço de 18 anos para verificar a existência real de uma das últimas peças do modelo padrão ainda por confirmar. A existência do quark *top* fora postulada havia muito pelos físicos, mas sem prova experimental. Agora, usando o mais poderoso acelerador do mundo, o Tevatron, os cientistas haviam conseguido isolar aqueles evasivos, fugazes, pedacinhos de matéria, confirmando a teoria abrangente que afirma que o universo em sua totalidade foi construído a partir de um único punhado de partículas e forças fundamentais. Como assinalei antes neste capítulo, os quarks desapareceram como entidades independentes no início do tempo, quando o Big-Bang original que criou o universo começou a esfriar. Desde então, existiram apenas presos dentro dos núcleos dos átomos.

A grande chance de encontrar o quark *top* surgiu para os cientistas quando o Tevatron ficou pronto no Fermilab. Ele colide prótons e antiprótons a 1,8 trilhão de elétrons-volt. Os físicos experimentais supunham que, nesse nível de energia, seriam necessários alguns bilhões de colisões para produzir um quark *top*. Esse projeto monumental exigiu os esforços combinados de 440 investigadores de 36 instituições, suscitando piadas sobre o número de físicos necessário para instalar uma lâmpada.⁸

O quark *top* materializou-se por apenas um trilionésimo de um trilionésimo de segundo na explosão do choque de matéria e antimatéria. Ao longo dos anos, os físicos haviam esquadrinhado diligentemente trilhões de colisões de feixes para detectar na irrupção de partículas misteriosas as “assinaturas” que computadores analisavam em seguida para verificar a existência dos até então hipotéticos quarks *top*. Essas partículas infinitamente diminutas revelaram possuir uma massa incrivelmente grande — pesam tanto quanto um átomo de chumbo inteiro e 180 vezes mais que os prótons.

A bem-sucedida busca do quark *top* permitiu aos físicos teóricos do mundo inteiro dar um suspiro de alívio. “Havia uma enorme expectativa teórica de que o quark *top* estivesse lá”, disse Steven Weinberg, da Universidade do Texas. “Muitos de nós teríamos ficado embaraçados se não estivesse.”

Algum tempo antes, Murray Gell-Mann havia expressado isso de maneira um pouco diferente: “Se os experimentais não encontrarem o quark *top* no intervalo de energia em que ele está sendo procurado agora, nós, os teóricos, vamos ter de ‘atacar nossas canetas’, como

costumava dizer meu ex-colega Marvin Goldberg.”

Agora que todos os seis quarks postulados por Murray Gell-Mann e seus colegas foram encontrados, a descrição detalhada de suas propriedades ajudará a compreender por que toda matéria tem massa; por que o universo contém muito mais matéria que antimatéria; e como a energia do Big-Bang transformou todas as partículas e forças em estrelas, planetas, galáxias e finalmente na própria vida.

Burton Richter, o diretor do Acelerador Linear de Stanford, agraciado com um Nobel, comentou: “Os físicos do Fermilab estão plenamente justificados ao dizer que encontraram o elo perdido de nosso modelo teórico, que busca compreender como o universo se desenvolveu desde seu nascimento.” A conclusão a ser extraída da importante descoberta do Fermilab é que o modelo padrão está correto quando descreve as partículas e forças fundamentais do universo e que Gell-Mann e seus colegas teóricos estavam na pista certa.

Isso não significa, porém, que a pesquisa das partículas elementares tenha chegado ao fim. Este último feito não pode ser encarado como a consumação do modelo padrão. Falta algo que é chamado o “bóson de Higgs”, o mecanismo hipotético que iria explicar por que as partículas têm a massa que têm. Supõe-se que ele reside muito além do alcance do Tevatron. Uma das principais metas do cancelado Supercolisor Supercondutor era encontrar o bóson de Higgs.

O QUARK E O JAGUAR: AVENTURAS NO SIMPLES E NO COMPLEXO

O título do livro de Murray Gell-Mann, *O quark e o jaguar*, foi tomado de um poema de Arthur Sze, um amigo de Gell-Mann. Sze enuncia holisticamente: “O mundo do quark tem tudo a ver com um jaguar a se mover em círculos na noite.” Gell-Mann ficou impressionado com esse verso quando sua segunda mulher, a poeta Marcia Soutwick, o leu para ele. Concluiu que era o título perfeito para o livro em que vinha trabalhando havia algum tempo.

O quark e o jaguar conta a história vivida por Gell-Mann de encontrar as conexões entre o estudo da física das partículas e seu fascínio pela seleção natural, a diversidade das espécies e outros campos. Claramente ele acredita que, na natureza, o simples (o quark no interior do núcleo de um átomo) e o complexo (um jaguar rondando seu território na selva à busca da presa) estão estreitamente vinculados.

O argumento central de Gell-Mann é que as leis simples da natureza podem conduzir, mediante aplicação e interação repetidas, ao surgimento de fenômenos complexos cujas propriedades não teriam podido ser previstas a partir daquelas leis subjacentes. Usa o exemplo da complexidade e da adaptação, que se estendem da biologia e da ecologia, passando pela linguística e a sociologia até chegar às teorias científicas que ele vê como possuidoras de uma vida e de uma evolução próprias.

O livro se divide em quatro partes, cada uma das quais reflete uma das áreas de interesse de Gell-Mann. A primeira parte descreve as bases de seu fascínio pela complexidade. A segunda seção trata de mecânica quântica e é na verdade o cerne intelectual do livro. É evidente que Gell-Mann sabe do que está falando — em contraste com o que se passa quando desenvolve o tema menos convincente (pelo menos para mim) da complexidade como uma nova ciência. Por alguma razão, Gell-Mann diz aos leitores que podem saltar as partes do

livro que tratam de mecânica quântica. Isso, a meu ver, seria um erro para qualquer pessoa interessada no assunto matéria. Embora nem sempre de fácil compreensão, essa seção oferece tanto um manual de física quântica (embora Gell-Mann o negue) quanto uma visão dos métodos de pensamento do autor.

A terceira seção, que contempla sistemas adaptativos complexos, não é de todo bem-sucedida na minha opinião. Murray Gell-Mann, no entanto, merece a atenção do leitor, seja qual for o tópico sobre o qual deseje discorrer, quer seja relevante para a matéria em discussão ou não. Pessoalmente, as reflexões por vezes desconexas de Gell-Mann sobre temas tão díspares quanto a derivação de palavras do grego e a deriva dos continentes me parecem as melhores partes desse livro fascinante.

A seção final do livro é um apelo sincero por maior racionalidade nas questões humanas, em particular a necessidade da biodiversidade e da conservação do ambiente. Num momento em que a nação parece empenhada em reduzir os problemas nacionais ao nível das simplicidades bombásticas e aos adesivos de para-choque, a postura de Gell-Mann em face do problema global é estimulantemente inteligente.

Sabe-se que escrever esse livro não foi uma tarefa fácil. “Foi a coisa mais difícil que já fiz”, disse Gell-Mann. Ele passou por duas editoras e vários pretensos colaboradores. No final, escreveu ele próprio o livro todo, apenas com a ajuda de um revisor. Quase esgotou a paciência de sua editora final, W.H. Freeman & Company, com suas mudanças e correções de última hora.

Terá o ex-papão abrandado um pouco na maturidade? A julgar por seus desempenhos na turnê de promoção do seu livro, é quase certo que sim. Em várias entrevistas na TV e no rádio que acompanhei, Gell-Mann mostrou-se amável, paciente, engraçado, fazendo pouco de suas capacidades — em suma, um porta-voz absolutamente charmoso da ciência. Mostrou considerável tato ao lidar com perguntas de ouvintes, mesmo aquelas que provavelmente teriam suscitado uma resposta brusca e mordaz do “velho” Murray Gell-Mann.

Numa ocasião, em São Francisco, ele estava respondendo a muitas perguntas por telefone quando, sem nenhum aviso, um ouvinte ofegante anunciou que havia “formulado a Teoria de Campo da Grande Unificação” e, ato contínuo, perguntou a Gell-Mann se ele tinha caneta e papel à mão para poder partilhá-la com ele. Após a menor das pausas, Gell-Mann disse, secamente: “Eu vou me lembrar dela.”

O HOMEM DE CIÊNCIA DO RENASCIMENTO

Hoje, Murray Gell-Mann é o cofundador e diretor do Instituto Santa Fé. É também um dos diretores da Fundação John D. e Catherine T. MacArthur, cujo Comitê para assuntos de Ambiente e Recursos Mundiais preside. Por sua contribuição em prol do ambiente mundial, teve seu nome incluído entre “Os 500 globais” pelo Programa Ambiental das Nações Unidas. Recebeu também prêmios do Instituto Franklin, da Comissão de Energia Atômica e da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos.

Quanto à física, o ex-menino prodígio é hoje uma espécie de decano. Ao contrário de Einstein, que lutou energicamente contra as novas ideias e conceitos da física quântica, Gell-

Mann é um defensor entusiasta de novas ideias, em particular a teoria física das supercordas. Nessa teoria, supõe-se que as partículas elementares consistem de minúsculas cordas vibrantes. (Quatro físicos de Princeton que estão atualmente envolvidos nesse campo são hoje coletivamente conhecidos como o “quarteto de cordas de Princeton”.) Trata-se, contudo, de uma hipótese ainda por ser demonstrada em laboratório. Ainda assim, Gell-Mann acredita que a teoria das supercordas poderá vir um dia a unificar a física quântica com a relatividade de Einstein e, além disso, lançar luz sobre a origem do universo.

Perguntado em várias ocasiões se os próprios quarks acabariam por ser desintegrados em algo ainda menor, foi cauteloso na resposta: “Os quarks são tão fundamentais quanto os elétrons.” Isso não significa que algum dia no futuro elétrons e quarks não possam vir ambos a ser subdivididos. Como cientista, ele não pode descartar a possibilidade.

Gell-Mann passa seus dias atualmente no Novo México, trabalhando em tópicos que vão da mecânica quântica ao sistema imunogênico humano, à evolução das línguas humanas e à economia global como um sistema complexo em evolução. O ex-menino prodígio de Manhattan tornou-se verdadeiramente o Homem de Ciência do Renascimento.

^a Na pesquisa científica teóricos e experimentais trabalham com o mesmo objetivo, utilizando-se de métodos diferentes. Seus trabalhos se complementam e um não faria sentido sem o outro. Não há coadjuvantes no sentido pejorativo ou diminuidor da palavra. (N.R.T.)

^b Designação inspirada no “caminho óctuplo”, do budismo. (N.R.T.)

^c Possível trocadilho com *gel-man* (“homem geleia”) e *fey-man* (“homem estranho”). (N.R.T.)

^d Em inglês, cortiça, rolha. (N.R.T.)

^e Intraduzível. O romance de Joyce é de difícil leitura e está cheio de palavras criadas por Joyce. A frase em questão seria algo como “três quarks para muster mark”, seja lá o que isto quer dizer. (N.R.T.)

^f O autor refere-se a um dos átomos constituintes da molécula água. (N.R.T.)

^g O grupo brasileiro do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF/CNPq) teve participação ativa nas experiências realizadas no Fermilab. (N.R.T.)

EPÍLOGO

O PORQUÊ DA FÍSICA

Nossa jornada nos levou do infinito (o cosmo de Newton) ao infinitesimal (os quarks de Gell-Mann), e a procura continua. Hoje a física ingressa num mundo inteiramente governado pela teorização matemática e extremamente especulativa, da qual pouco pôde ser verificado até agora. A teoria das cordas, um universo de dez dimensões, buracos negros, buracos brancos, buracos de minhoca, universos paralelos, viagem no tempo, a origem e o destino do universo — estes são os temas que interessam aos jovens físicos.

Até agora, foram discutidos o *quem*, *quando* e o *quê* da física. Parece apropriado encerrar com algumas palavras sobre o *porquê* da física: a filosofia da física. Quando falam em público, cientistas e autores dedicados à ciência ouvem frequentes perguntas que beiram mais o metafísico que o científico. Há várias razões para isso. Primeiro, a física quântica tem aspectos misteriosos e pouco compreendidos. Segundo, há um considerável desejo natural de dar um sentido a toda essa ciência — relacionar as equações e a matemática à visão geral do mundo. O termo alemão para isso é *Weltanschauung* (visão do mundo), ou concepção abrangente do universo e da relação da humanidade com ele.

Como vimos, a ciência da física percorreu um longo caminho desde os dias de Tales e dos demais filósofos gregos que começaram a fazer perguntas sobre o universo e o mundo natural. Hoje a ciência, e em particular a física, podem explicar muito sobre o mundo natural à nossa volta. Houve tempo em que a natureza parecia um mistério inexplicável. Hoje, embora ainda haja alguns aspectos do mundo natural que a ciência não compreende totalmente, os princípios que governam o modo como operam são conhecidos.

Um problema é que, à medida que a ciência vai descobrindo cada vez mais princípios fundamentais da física, eles parecem ter cada vez menos a ver conosco. Quase todas as partículas que figuram no modelo padrão das partículas e interações decaem tão rapidamente que estão ausentes da matéria comum e não desempenham nenhum papel em toda a vida humana. O múon e o tau, por exemplo, dificilmente têm alguma importância em nossa existência cotidiana. Por causa dessa aparente irrelevância, a física pura está perdendo seu público.

Aqueles que se voltam para a ciência em busca de ajuda na descoberta de respostas para as grandes questões filosóficas, tais como a finalidade do universo ou o sentido da vida, continuam procurando em vão. Os físicos podem explicar quase tudo no mundo objetivo, e no entanto compreendemos cada vez menos nossas próprias vidas. Em resposta a esse dilema, fizeram-se muitas tentativas de combinar física e metafísica. Dois exemplos recentes são o princípio cosmológico antrópico e a hipótese Gaia, que implicam ambos que a vida sobre a Terra é parte de um desígnio mais amplo.

O princípio cosmológico antrópico, postulado pelo físico inglês Brandon Carter em 1974, é tão bombástico quanto soa. Em poucas palavras, ele afirma que se os parâmetros físicos do universo fossem minimamente diferentes do que são, a vida não seria possível; portanto, o universo deve ter sido organizado por algum ser supremo para preservar a vida. Trata-se de

uma variação da reação inicial ao universo regulado como um relógio de Newton. Se o universo fosse verdadeiramente tão mecanicamente previsível quanto um imenso relógio, teria de ter havido um relojoeiro.

Um exemplo do princípio antrópico é que a energia que a Terra recebe do Sol está precisamente ajustada para fomentar a vida. Em ciência, essa energia é chamada de *constante solar*, a qual é definida como 1,99 caloria de energia por minuto por centímetro quadrado. Se a Terra recebesse muito mais ou menos do que duas calorias por minuto por centímetro quadrado, a água dos oceanos seria vapor ou gelo, deixando o planeta sem nenhuma água líquida disponível ou um substituto aceitável em que a vida pudesse prosperar. É unicamente porque a Terra está a 150 milhões de quilômetros de distância do Sol, que produz 5.600 milhões de milhões de milhões de milhões de calorias por minuto, que a vida é possível.

Para mais um exemplo, foi calculado que se a Terra estivesse apenas oito milhões de quilômetros mais próxima do Sol, a intensidade dos raios solares teria desagregado as moléculas de água na atmosfera, até transformar o planeta num deserto seco e poeirento. Se a Terra estivesse apenas 1,6 milhão de quilômetros mais longe do Sol, o frio teria congelado os oceanos.

Os cientistas explicam que Vênus, a Terra e Marte tiveram de início climas bastante semelhantes. Vênus, porém, é demasiado próximo do Sol. O calor fez a água evaporar. Depois a radiação solar rompeu as moléculas de água da atmosfera superior do planeta e o hidrogênio escapou no espaço. Sem chuva para precipitá-lo, o dióxido de carbono se acumulou na atmosfera de Vênus, causando um efeito estufa descontrolado. O resultado são temperaturas de superfície de 482 graus centígrados, o suficiente para derreter chumbo.

Marte é um mistério maior. Os cientistas nos dizem que 3,5 milhões de anos atrás Marte era tépido e úmido, com água líquida fluindo por sua superfície. É possível até que houvesse vida.^a Agora não há indícios de vida e a pergunta é: o que aconteceu? Marte é muito menor do que a Terra e, não tendo muita gravidade, foi-lhe muito difícil evitar que sua atmosfera evaporasse no espaço. Faltam também a Marte forças tectônicas. Na Terra, a colisão de placas tectônicas é crucial para a vida. O carbono no dióxido de carbono atmosférico dissolve-se em água e forma carbonato de cálcio, que se acumula no fundo dos oceanos e dos lagos. Parte da crosta da Terra, porém, é abruptamente enterrada sob placas tectônicas adjacentes, é aquecida e é cuspidas dos vulcões, com o regresso do carbono vaporizado à atmosfera. Não possuindo esse tipo de interação tectônica, Marte não pôde reciclar seu carbono e, gradualmente, o dióxido de carbono na atmosfera se reduziu. O efeito estufa desapareceu, e Marte foi esfriando. Por fim, a água da superfície evaporou-se ou congelou. A maioria dos cientistas define um *planeta habitável* como aquele capaz de ter água líquida. É possível imaginar formas estranhas de vida que não exijam água, mas os pesquisadores em geral concluíram que a água e a química complexa que ela mantém tornam a possibilidade de vida muito maior. Quente demais ou frio demais para a vida são os padrões vigentes neste universo, exceto, até onde se sabe, neste singular planeta Terra.

Atualmente a maioria dos cosmólogos concorda que o universo se iniciou com um Big-Bang e vem se expandindo desde então. Os cientistas acreditam que, se a velocidade de expansão do universo fosse ligeiramente menor, o Big-Bang poderia não ter ocorrido. Se a velocidade de expansão fosse ligeiramente maior, não teria havido tempo para nenhum tipo de

matéria se aglutinar e não haveria nenhum astro. Se algo chamado a *constante de estrutura fina* (o quadrado da carga do elétron dividido pela velocidade da luz multiplicada pela constante de Planck) fosse ligeiramente diferente, não existiriam átomos. Nossa própria existência, a sua e a minha, parece ser o resultado ou de um extraordinário e bem arquitetado milagre ou de um acidente.

Mas o que precedeu o Big-Bang e por que o universo se expandiu precisamente como o fez parecem ser perguntas tanto para físicos quanto para filósofos ou teólogos. O próprio fato de nossa existência significa que algum relojoeiro celestial projetou o maquinismo do universo e fixou os parâmetros exatos para a emergência da vida? Ou foi tudo puro acaso? Em *O princípio antrópico cosmológico* (1968), os autores John D. Barrow e Frank J. Tipler sustentam que a vida não é uma mera ocorrência casual mas uma ocorrência necessária, que um universo precisa de observadores para poder existir. Muitos cientistas, contudo, consideram esse princípio cosmológico antrópico mais próximo da metafísica que da física. O cosmólogo Joseph Silk comparou o princípio antrópico com a satisfação sentida por uma colônia de pulgas no pelo de um cachorro. Elas se fiavam na certeza de que tudo em seu mundo fora perfeitamente estabelecido para sua existência — até que o dono do cachorro comprou uma coleira mata-pulgas. Podemos também imaginar uma colônia de formigas navegando corrente abaixo sobre um velho tronco. Tudo estava perfeito para seu bem-estar, e poderia parecer que o tronco fora projetado para elas — foi então que o tronco chegou à queda-d'água.

A hipótese de Gaia, proposta em 1972 por James E. Lovelock, afirma que a Terra e suas criaturas vivas evoluíram juntas num sistema autorregulatório que conserva condições ótimas para a vida. O dr. Lovelock afirma que essa autorregulação nada mais é que uma propriedade natural do sistema e nega estar implicando um propósito ou projeto. Mas a hipótese de Gaia (o nome significa “deusa mãe da Terra”) tornou-se rapidamente mística porque sugere fortemente que a razão de a Terra ter uma benevolente atmosfera de estufa é haver um ser onisciente e onipotente no comando do termostato — não há nenhuma necessidade de temer quaisquer problemas ambientais porque eles irão todos se autocorrigir sob o olhar vigilante da complacente mãe da Terra. Mais uma vez, é confortador mas sem grande sustentação do ponto de vista da ciência.

O princípio antrópico e a teoria de Gaia são ideias interessantes, muitas vezes expressas em linguagem científica por cientistas que anseiam pelo vislumbre de alguma finalidade transcendente no universo. Nenhuma das concepções, porém, é testável ou comprovável. A ciência é um sistema de investigação fundado no empírico. As teorias devem emergir de fatos verificáveis e explicar as coisas como são, não como gostaríamos que fossem. Em *Os primeiros três minutos*, um livro de divulgação sobre a teoria do Big-Bang sobre a origem do universo, o físico Steven Weinberg descreveu a Terra como “uma minúscula parte de um universo esmagadoramente hostil”, condenado ele próprio a findar em frio e trevas totais ou numa bola de fogo derradeira. “Quanto mais compreensível parece o universo”, ele concluiu, “mais sem sentido parece também.” É uma ideia que parecerá cruel e difícil de aceitar a muitos, entre os quais alguns físicos. Eles tentam empurrar algum sentido na concepção física do universo. Nos últimos anos, surgiram vários livros — *A dança dos mestres Wu Li* de Gary Zukav e *O tao da física* de Fritjof Capra, para citar dois exemplos — que procuram explicar a física moderna em termos da religião e do misticismo orientais. A mim, eles me lembram o rei

Ptolomeu do Egito, que, talvez assustado com o volume de dever de casa exigido dele, perguntou a Euclides se não havia um caminho mais fácil para compreender a geometria. Você deve estar lembrado de que Euclides dissuadiu o monarca dessa ideia dizendo-lhe que “não há via régia para a geometria” — receio que, da mesma maneira, não exista via régia para a física. Os dois livros recentes mencionados contêm muita física boa, mas ambos dão imensos saltos de conceitos provados na ciência para ideias metafísicas baseadas em fé, não em fato.

A desilusão com a ciência como a resposta final para questões filosóficas levou grande número de intelectuais do meio acadêmico a uma atitude de oposição à ciência. Desqualificam-na como uma visão de mundo branca, europeia, burguesa, e masculina. Assim, muitos membros das faculdades de humanidades e ciências sociais de nossas principais universidades (e intelectuais dos círculos literários em geral) consideram hoje o conhecimento produzido pela ciência não mais confiável que aquele produzido pelo que chamam de “outras formas de conhecimento”. Em seu recente livro *A grande superstição: a esquerda acadêmica e suas querelas com a ciência* (Johns Hopkins University Press, 1994), Paul R. Gross e Norman Levitt contestam essa posição basicamente antagônica à ciência. Nas palavras de Gross, um biólogo, e Levitt, um matemático: “Uma vez que se tenha afirmado que uma comunidade discursiva é tão boa quanto outra, que a narrativa da ciência não detém nenhum privilégio em relação às narrativas da superstição, o crítico cultural recém-cunhado pode de fato se deleitar em sua ignorância de ideias científicas densas.”

O profundo abismo que separa os intelectuais literários e a cultura científica, descrito por C.P. Snow em seu hoje famoso ensaio de 1965, *Duas culturas*, alargou-se claramente ao longo dos anos seguintes. Os intelectuais literários que ensinam hoje, nos cursos de graduação de artes liberais, que existem “outras formas de conhecimento” prestam aos seus nascentes advogados, jornalistas, sociólogos, homens de negócios e todos os demais um grave desserviço. A ciência devota-se ao esforço de ver as coisas como elas são. A investigação dos mistérios da natureza exige um pensamento disciplinado, sistemático, rigoroso — cujos resultados devem ser explicáveis em teoria, submetidos ao exame crítico dos pares e validado por experimento passível de reprodução. Quando se faz isso, está-se fazendo ciência.

Deveriam então os cientistas abandonar suas tentativas de encontrar um significado mais profundo em sua compreensão da natureza? Penso que não e não é minha intenção sugerir isso. Esforços para vincular teologia e ciência continuarão a ser feitos porque é da natureza humana buscar o *porquê* da vida. Recentemente, o dr. Paul Davies, um físico matemático que escreveu e fez palestras sobre as conexões entre ciência e teologia, recebeu o prêmio Templeton, de um milhão de dólares, por suas contribuições ao pensamento e à investigação religiosos. Davies, um professor de filosofia natural na Universidade de Adelaide, na Austrália, é o autor de mais de 20 livros, entre os quais *A mente de Deus*, que discute ideias acerca da origem do universo, a ordem na natureza e a natureza da consciência humana.

O prêmio Templeton foi criado em 1973 pelo empresário Sir John Templeton, um súdito britânico nascido nos Estados Unidos e fundador de vários fundos mútuos. Ele exigiu que o prêmio fosse concedido anualmente a uma pessoa que tivesse revelado singular criatividade na promoção do entendimento geral de Deus ou da espiritualidade. Mais tarde, estipulou que o valor do prêmio em dinheiro deveria exceder ao dos prêmios Nobel, que a seu ver negligenciava a religião. O dr. Davies é o terceiro físico a receber o prêmio. Numa entrevista dada por telefone ao *New York Times* por ocasião de sua premiação, ele declarou: “As

peessoas em geral pensam que, à medida que a ciência avança, a religião retrocede. Mas quanto mais descobrimos acerca do mundo, mais percebemos que há um propósito ou um desígnio por trás disso tudo.”

Podemos prever que a física prosseguirá, pois, por natureza, ela é ilimitada e exploratória, e, em seu cerne, a ciência nada mais é que pessoas fazendo perguntas — e ainda há perguntas a fazer. Da mesma maneira, podemos prever que as questões filosóficas tangenciadas neste breve epílogo permanecerão conosco enquanto a espécie humana continuar capaz de especular.

^a Recentemente, análises realizadas no meteorito marciano ALH 84001 mostram a possibilidade de ter havido, há mais de 3 bilhões de anos, vida bacteriana semelhante a alguns organismos encontrados em solo terrestre. (N.R.T.)

CRONOLOGIA DA FÍSICA

?	Árabes, egípcios e outros desenvolvem o atual sistema de numeração, a geometria primitiva e a matemática básica.
525 a.C.	Pitágoras obtém uma síntese do misticismo e da matemática, desviando-se dos mitos para os números na busca da fonte da verdade.
340	Aristóteles afirma que a Terra é redonda e não uma placa plana.
295	Euclides publica os <i>Elementos</i> , codificando a geometria clássica.
260	Aristarco de Samos postula que a Terra gira em torno do Sol num universo gigantesco.
240	Arquimedes desenvolve a mecânica clássica e a física elementar.
200	Eratóstenes determina a técnica para a mensuração da circunferência da Terra.
100	Cláudio Ptolomeu elabora complexo modelo do universo centrado na Terra que é base da astronomia por mais de 1.400 anos.
1515 d.C.	Leonardo Da Vinci faz observações cruciais nos campos da mecânica, da hidráulica e da aerodinâmica.
1543	Nicolau Copérnico publica <i>De revolutionibus</i> , postulando um universo centrado no Sol.
1572	Tycho Brahe observa uma nova (ou estrela nova), prova de que o universo está em mutação.
1610	Galileu Galilei observa pela primeira vez o céu noturno através de um telescópio e anuncia descobertas que confirmam a concepção copernicana do universo.
1619	Johannes Kepler demonstra que as órbitas dos planetas são elípticas e desenvolve leis do movimento planetário.
1687	Isaac Newton publica os <i>Principia</i> e demonstra que a força gravitacional, que obedece a uma lei do inverso do quadrado da distância, explica tanto a queda dos corpos na Terra quanto o movimento da Lua em sua órbita.
1799	Pierre-Simon Laplace lança as bases matemáticas da hipótese da gravitação de Newton; desenvolve a teoria da probabilidade e ajuda a fundar o sistema métrico.
1824	Karl Friedrich Gauss postula a geometria não euclidiana. 1824 Christian Doppler descobre que, para um observador estacionário, emissões (luz ou som) de uma fonte em movimento parecerão ter frequência mais alta se o objeto estiver se aproximando, mas mais baixas se ele estiver se afastando — o “Desvio Doppler”.
1831	Michael Faraday descobre a indução eletromagnética.

- 1848 William Kelvin determina o zero absoluto.
- 1849 Jean-Leon Foucault desenvolve métodos para medir a velocidade da luz no ar e descobre que, na água e em outros meios, essa velocidade diminui proporcionalmente ao índice de refração.
- 1860 Robert Bunsen e Gustav Kirchhoff desenvolvem a base da análise espectral, permitindo que materiais de laboratório sejam comparados com os do Sol e dos astros, além de permitir aos cientistas identificar a composição material de corpos astronômicos.
- 1864 James Clerk Maxwell publica o *Tratado sobre eletricidade e magnetismo*, que torna possível uma compreensão muito maior dos fenômenos nesse campo.
- 1879 Albert Michelson usa os princípios de Foucault para determinar a velocidade da luz.
- 1887 Albert Michelson e Edward Morley realizam experimentos precisos que demonstram que o espaço não pode estar cheio do éter, até então visto como o meio para a transmissão da luz.
- 1894 Heinrich Hertz demonstra que as ondas eletromagnéticas se deslocam com a velocidade da luz e podem ser refletidas, refratadas e polarizadas como a luz.
- 1895 William K. Roentgen descobre os raios X, o que lhe valeu o primeiro Prêmio Nobel de Física.
- 1898 Marie e Pierre Curie identificam os elementos radioativos rádio e polônio.
- 1900 Max Planck postula a teoria quântica da radiação; desenvolve a base da física quântica.
- 1904 Ernest Rutherford propõe que a quantidade de hélio produzida pelo decaimento radioativo de minerais em rochas poderia ser usada na determinação da idade da Terra.
- 1905 Albert Einstein publica artigos sobre a relatividade especial, o efeito fotoelétrico e o movimento browniano; a teoria especial da relatividade postula que as medidas de espaço e tempo são distorcidas em alta velocidade e que massa e energia são equivalentes.
- 1906 J.J. Thomson demonstra a existência de elétrons.
- 1911 Ernest Rutherford demonstra que a maior parte da massa dos átomos está contida em seus minúsculos núcleos.
- 1913 Niels Bohr formula a teoria da estrutura atômica.
- 1916 Albert Einstein divulga a teoria geral da relatividade em que a gravitação é descrita como um efeito do espaço curvo; a relatividade geral é uma teoria fundamental da natureza do espaço, do tempo e da gravitação.
- 1924 O príncipe Louis de Broglie sugere que toda a matéria, mesmo objetos comumente concebidos como partículas (como os elétrons), deveria se comportar também como ondas.
- 1925 Wolfgang Pauli postula o princípio da exclusão, essencial para o entendimento das linhas espectrais de astros e nebulosas.

- 1926 Erwin Schrödinger desenvolve uma equação que descreve como as ondas postuladas por de Broglie se movem de um lugar para outro; considerada a equação central da física quântica.
- 1927 Georges Lemaitre propõe a teoria Big-Bang da origem do universo como solução para as equações de campo de Einstein.
- 1927 Werner Heisenberg formula o princípio da incerteza, uma limitação fundamental para a precisão das mensurações experimentais.
- 1927 Jan Oort determina que a Via Láctea está girando; depois usa radiotelescópio para mapear os braços espiralados da Via Láctea.
- 1928 P.A.M. Dirac postula a existência de antimatéria — partículas que têm carga elétrica igual mas oposta às de suas correlatas na matéria comum (e.g., pósitron ou antielétron).
- 1929 Edwin Hubble conclui, por meio de análise espectral, que o universo está em expansão, como Einstein previra.
- 1931 Wolfgang Pauli prevê a existência de neutrinos.
- 1932 James Chadwick descobre o nêutron; recebe o Prêmio Nobel de Física de 1935.
- 1938 Lise Meitner e Otto Hahn descobrem a fissão nuclear; Hahn recebe o Prêmio Nobel pela descoberta (Meitner teve de fugir da Alemanha nazista antes que o trabalho dos dois estivesse concluído, mas em geral seu mérito pelo trabalho comum é reconhecido).
- 1939 Leo Szilard formula o conceito de reações em cadeia na física atômica; é coautor de carta ao presidente F.D. Roosevelt (assinada por Einstein) explicando as potencialidades da fissão do urânio e da bomba atômica.
- 1942 Enrico Fermi supervisiona o desenvolvimento do primeiro reator nuclear do mundo no âmbito do Projeto Manhattan.
- 1945 J. Robert Oppenheimer dirige a produção das primeiras bombas atômicas como parte do Projeto Manhattan.
- 1946 George Gamow conjectura que o Big-Bang deve ter produzido radiação cósmica de fundo.
- 1960 Alan Sandage e Thomas Mathews descobrem os quasars, as galáxias mais distantes da Terra.
- 1961 Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman, independentemente, deduzem um plano para classificar partículas subatômicas que Gell-Mann chama de “classificação octal”.
- 1963 E.N. Lorenz publica o primeiro artigo sobre a teoria do caos.
- 1964 Murray Gell-Mann e George Zweig propõem, independentemente, que prótons, nêutrons e outros hádrons são compostos de partículas ainda menores, que Gell-Mann rotulou de “quarks”.
- 1965 Richard Feynman partilha o Prêmio Nobel de Física com Tomonago e Schwinger pela teoria da eletrodinâmica quântica, considerada um passo importante na busca de uma compreensão da natureza.

- 1965 Robert Wilson e Arno Penzias detectam radiação nas profundezas do espaço, em acordo com a teoria do Big-Bang.
- 1968 Experimentos realizados no Acelerador Linear de Stanford corroboram a teoria do quark.
- 1981 Alan Guth postula que o universo passou em seus começos por um período “inflacionário” de expansão exponencial.
- 1995 Cientistas no Fermi National Accelerator Laboratory encontram indícios do “quark *top*”, o último membro não detectado de uma família de partículas que se supõe constituir os tijolos básicos da construção de toda a matéria.

GLOSSÁRIO

ACELERADOR DE PARTÍCULAS Aparelho, como um ciclotron ou acelerador linear, que acelera partículas carregadas ou núcleos, imprimindo-lhes altas velocidades e altas energias, útil na pesquisa das partículas subatômicas.

ANTIMATÉRIA Matéria composta de partículas com massa e spin idênticos aos das partículas da matéria comum, mas com carga oposta.

BÓSONS Partículas elementares, entre as quais os fótons, glúons, bósons vetoriais intermediários e grávitons, que transportam as quatro forças na natureza.

CHARME O quarto sabor do quark. (Previsto pela teoria, os quarks charmosos foram descobertos em 1974. Os quarks existem em pares, sendo que o quark *s*, ou estranho, faz par com o quark *c*, ou charme.)

CLASSIFICAÇÃO OCTAL Em física, um método de classificação das partículas em famílias de oito, com base na teoria de grupo; desenvolvido independentemente por Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman em 1961.

CONFINAMENTO O aprisionamento dos quarks no interior dos hádrons.

CONSTANTE DE HUBBLE O número encontrado dividindo-se a velocidade de recessão de uma galáxia pela distância que a separa da Terra. (Esse número é chamado constante de Hubble em memória de Edwin P. Hubble, o descobridor do universo em expansão.)

CONSTANTE DE PLANCK Constante que relaciona o conteúdo de energia de um *quantum* (ou unidade de energia) com a frequência da onda eletromagnética correspondente. (Max Planck expressou essa relação numa equação que utiliza um número muito pequeno ($6,626 \times 10^{-27}$ ergs/s), que dá a relação proporcional exata.)

CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO Segundo a teoria geral da relatividade de Einstein, o efeito causado no espaço pela presença de matéria. (A gravidade é vista como a consequência da curvatura do espaço induzida pela presença de objetos com grandes massas.)

DECAIMENTO ALFA Processo de emissão nuclear em que um núcleo pesado instável emite uma partícula alfa e se converte ele próprio num núcleo diferente e mais leve; um dos três processos que compõem a radioatividade nuclear (os outros são o decaimento beta e o decaimento gama).

DECAIMENTO RADIOATIVO A progressiva redução do número de átomos radioativos de uma substância por desintegração nuclear espontânea. (Um átomo decai quando passa da instabilidade para a estabilidade; o decaimento radioativo é um processo natural que se desenrola o tempo todo.)

DESVIO PARA O VERMELHO Deslocamento rumo aos comprimentos de onda mais longos das linhas espectrais de luz vindas das estrelas de galáxias distantes; ocorre porque essas estrelas estão se afastando da Terra. *Ver também* efeito Doppler.

DUALIDADE Fenômeno pelo qual, no domínio atômico, objetos exibem as propriedades tanto de partículas quanto de ondas.

DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA Teoria segundo a qual tanto matéria quanto radiação, nas dimensões reduzidas do mundo quântico, se comportam por vezes como uma onda e por vezes, de maneira igualmente convincente, como uma partícula; um dos mais desconcertantes mistérios da física quântica.

EFEITO DE DILATAÇÃO DO TEMPO Atraso de um relógio em movimento tal como visto por um observador estacionário; postulado por Einstein em sua teoria especial da relatividade. (Nas velocidades relativamente lentas das viagens normais de hoje, esse efeito é desprezível; em velocidades próximas à da luz, porém, o tempo se torna apreciavelmente “mais lento”. Na velocidade da luz, o tempo ficaria paralisado.)

EFEITO DOPPLER Mudança no comprimento de onda — seja som ou luz — emitida por um corpo em movimento, perceptível quando a fonte de som ou luz está se aproximando ou se afastando de um observador. (Se a fonte das ondas está se aproximando do observador, a frequência da onda aumenta e o comprimento de onda é mais curto, produzindo sons agudos e luz azulada — o chamado desvio para o azul. Se a fonte da onda está se afastando do observador, a frequência da onda diminui e o comprimento de onda é maior, produzindo sons graves e luz avermelhada — o chamado desvio para o vermelho.)

ELÉTRON Partícula fundamental de carga negativa que é um dos constituintes de todos os átomos.

ENERGIA Em física, o potencial de realizar trabalho. (Energia e massa são intercambiáveis segundo a fórmula de Einstein: $E = mc^2$.)

ENERGIA CINÉTICA A energia inerente aos corpos em movimento; igual à metade do produto de sua massa pelo quadrado de sua velocidade. (Chamada cinética a partir da palavra grega para “mover-se”.)

ENTROPIA Uma medida do grau de desordem, ou tendência ao colapso, em qualquer sistema.

ESPAÇO ABSOLUTO Concepção newtoniana do espaço tridimensional em que os comprimentos dos objetos são independentes do movimento do sistema de referência em que são medidos; refutado por Einstein.

ESPAÇO-TEMPO Segundo a teoria geral da relatividade de Einstein, o “tecido” quadridimensional que resulta quando espaço e tempo são unificados; a fusão das três dimensões espaciais comuns de comprimento, largura e altura com o tempo como quarta dimensão.

ESPECTRO O conjunto de comprimentos de onda ou frequências em que a radiação eletromagnética pode ser propagada.

“ESTRANHO” Um dos seis tipos (ou sabores) de quarks. Os outros são *up*, *down*, *charme*, *top* e *belo*.

FÉRMIONS Constituintes da matéria. (Léptons e quarks são férmions, como também o são prótons, nêutrons e elétrons. Por outro lado, as partículas que transportam as forças da natureza são chamadas bósons.)

FÍSICA Estudo científico da interação de matéria e energia. (A física clássica, ou newtoniana,

compreende os estudos científicos feitos antes da introdução do princípio quântico. A física moderna concebe tanto a matéria quanto a energia como compostas de unidades discretas, ou *quanta*.)

FÍSICA DAS PARTÍCULAS Ramo da ciência que trata das menores estruturas conhecidas da matéria.

FÍSICA QUÂNTICA Teoria da física baseada no princípio quântico — a energia é emitida não como um contínuo mas em unidades discretas.

FISSÃO NUCLEAR Processo em que o núcleo de um átomo se parte, seja espontaneamente ou sob estímulo externo, em dois fragmentos e mais um ou dois nêutrons excedentes.

FORÇA O agente responsável pela mudança em um sistema. (Segundo o modelo padrão, quatro forças no universo controlam os modos como os objetos interagem: a eletromagnética, a gravitacional, a nuclear forte e a nuclear fraca.)

FORÇA FORTE Uma das quatro forças fundamentais conhecidas da natureza; aglutina os prótons e os nêutrons no interior de um átomo.

FÓTONS Unidades discretas de energia eletromagnética; a menor unidade indivisível da radiação eletromagnética.

FREQUÊNCIA Número de ciclos por unidade de tempo de um fenômeno periódico.

FUSÃO NUCLEAR Interação atômica em que núcleos se fundem uns aos outros criando novos núcleos atômicos e liberando energia.

GLÚONS Partícula elementar que transporta a força nuclear forte, uma das quatro forças da natureza (ver bósons.)

GRÁVITONS A unidade fundamental (ou *quanta*) da natureza que se supõe transportar força gravitacional.

HIPÓTESE DE GAIA A teoria que sugere que a Terra é um superorganismo, a soma de todos os organismos, capaz de modificar e manter seu próprio ambiente em níveis ótimos. (Esse superorganismo é Gaia, a deusa mãe da Terra.)

INTERAÇÃO FRACA Interação nuclear responsável pelo processo de decaimento beta. (Assim chamada em contraste com a interação forte, que é bilhões de vezes mais forte.)

LEP Grande Colisor Elétron Pósitron (iniciais de “Large Electron Positron Collider”; acelerador localizado em Genebra, Suíça, e operado pela Organização Europeia de Pesquisa Nuclear (CERN); considerado o maior instrumento científico jamais construído.

LÉPTON “TAU” O mais pesado lépton conhecido.

LÉPTONS A subclasse das partículas elementares que não têm tamanho mensurável e não são afetadas pela força nuclear forte; compreende os elétrons, os múons, os taus, e seus respectivos neutrinos.

LUZ ULTRAVIOLETA Radiação eletromagnética de um comprimento de onda ligeiramente mais curto que o da luz visível.

MASSA Geralmente definida como uma quantidade de matéria tal como determinada pelo seu peso ou pela segunda lei do movimento de Newton, através de força necessária para produzir uma dada aceleração. (Einstein demonstrou que a massa é de fato uma forma muito compacta

de energia.)

MASSA CRÍTICA Em física, a quantidade de um dado material fissil necessária para sustentar uma reação em cadeia.

MATÉRIA A substância ou material de que qualquer objeto físico é composto.

MECÂNICA CLÁSSICA (mecânica newtoniana) Concepção da dinâmica teórica baseada na ideia de que as partículas se deslocam em trajetórias precisamente definíveis segundo as leis do movimento de Newton.

MECÂNICA QUÂNTICA A mecânica dos átomos, moléculas e outros sistemas físicos que estão sujeitos ao princípio de incerteza de Heisenberg e ao princípio quântico de Planck. (Expressão equivalente a *física quântica*).

MÉSON K Partícula subatômica cuja massa é aproximadamente intermediária entre a de um elétron e a de um próton. (Os mésons são partículas elementares que têm spin zero.)

MODELO PADRÃO Em física, as teorias ou conjuntos de equações que afirmam que toda matéria no universo é feita de férmions (constituintes da matéria), bósons (transportadores de força) e anti-matéria.

MOLÉCULA A menor unidade física de um elemento ou componente particular; composta de átomos.

MÚON Partícula subatômica elementar efêmera com carga elétrica negativa. (Os múons são léptons.)

NEUTRINO Partícula supostamente sem massa, eletricamente neutra; experimenta somente interações fracas.

NÚCLEO ATÔMICO A massa positivamente carregada no interior de um átomo, composta de nêutrons e prótons; responde pela maior parte da massa de um átomo mas ocupa apenas uma pequena fração de seu volume.

NÚCLEONS Os constituintes de um núcleo atômico; entre eles estão prótons e nêutrons.

PARTÍCULA ALFA (raios alfa) Um dos três tipos de radiação (os outros sendo os raios beta e os raios gama) descobertos nos primeiros estudos da radioatividade por volta de 1900.

PARTÍCULA ELEMENTAR Uma partícula subatômica vista como um constituinte irreduzível da matéria (por vezes chamada *partícula fundamental*).

PARTÍCULA VIRTUAL Partícula que vive apenas por curto tempo (restrito pelo princípio de incerteza). (As quatro forças na natureza são transmitidas via partículas virtuais.)

PARTÍCULAS W^+ , W^- E Z^0 Partículas subatômicas recentemente descobertas que transportam a força nuclear fraca, que é responsável pela radioatividade e é uma das quatro forças básicas da natureza; bósons efêmeros com grande massa (sua massa é cem vezes maior que a dos prótons e quase tão grande quanto a de um átomo de prata) que se supõe terem sido abundantes nos primórdios do universo.

PÓSITRON Em física, partícula elementar que possui massa igual à de um elétron e carga positiva igual em magnitude à carga negativa do elétron; a antipartícula do elétron.

PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA Princípio, desenvolvido por Einstein em 1911, segundo o qual os efeitos de se estar sob a ação da gravitação e de se estar em um referencial acelerado são

indistinguíveis; base da teoria geral da relatividade de Einstein.

PRINCÍPIO DE INCERTEZA Princípio que declara ser impossível medir a posição e o momento de uma partícula ao mesmo tempo.

PRINCÍPIO DE INÉRCIA A primeira lei do movimento de Newton — todo corpo (ou massa) persiste em um estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme a menos que compelido por força externa a mudar esse estado.

PROBABILÍSTICO Referente à probabilidade de ocorrência de um evento.

PRÓTON Partícula com grande massa e carga elétrica positiva, encontrada no núcleo dos átomos; compõe-se de dois quarks *up* e um quark *down*.

“QUANTA” Unidades fundamentais de energia (singular, *quantum*).

QUARK Partícula elementar; apresenta-se em seis tipos (sabores): *up*, *down*, *charme*, *estranho*, *top* e *belo*.

RADIAÇÃO Todos os modos como a energia pode ser emitida por um átomo; inclui raios X, raios alfa, raios gama e partículas beta.

RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO O espectro contínuo de radiação emitido por um corpo que, quando frio, é um absorvedor perfeito de todos os comprimentos de onda. (A conciliação do espectro observado com uma fórmula teórica, operada por Max Planck em 1900, marcou o início da teoria quântica.)

RAIOS CÓSMICOS Partículas carregadas, em sua maioria prótons, vindas do espaço exterior.

RAIOS X Uma forma de radiação penetrante; ondas eletromagnéticas, semelhantes à luz mas com comprimentos de onda milhares de vezes mais curtos.

REAÇÃO EM CADEIA Fenômeno autossustentável em que a fissão de núcleos de uma geração de núcleos produz partículas que causam a fissão de um número pelo menos igual de núcleos da geração seguinte.

RELATIVIDADE GERAL Leis da física formuladas por Einstein em que a gravidade é descrita pela curvatura do espaço-tempo.

SABOR Em física, termo usado para designar tipos de quark: *up*, *down*, *charme*, *estranho*, *top* e *belo*.

SIMULTANEIDADE ABSOLUTA Concepção newtoniana de que dois eventos podem ocorrer ao mesmo tempo, independentemente da posição ou movimento relativo dos observadores; substituído pela concepção einsteiniana da simultaneidade relativa.

SIMULTANEIDADE RELATIVA Concepção de Einstein de que o tempo de ocorrência de um evento é relativo à posição e ao movimento dos observadores.

SINCROTRON Acelerador em que os campos magnéticos e as acelerações são sincronizadas para manter a partícula num raio particular.

SINGULARIDADE Um ponto no espaço-tempo em que sua curvatura se torna infinita; termo usado por físicos e matemáticos para designar o ponto no universo em que as equações da teoria geral da relatividade de Einstein deixam de vigorar; o instante do Big-Bang, quando toda a matéria do universo estava contida num único ponto.

SPIN Propriedade de uma partícula elementar; semelhante ao giro de um pião em rotação.

TEMPO ABSOLUTO Concepção newtoniana do tempo como universal com a noção consensual da simultaneidade dos eventos, bem como do intervalo de tempo universalmente aceito entre dois eventos; refutada por Einstein.

TEORIA DAS CORDAS Teoria segundo a qual as partículas elementares consistem de minúsculas cordas.

TEORIAS DA GRANDE UNIFICAÇÃO (GUTS) Teorias que tentam provar que as interações fortes, as interações fracas e as interações eletromagnéticas são diferentes aspectos de uma única força fundamental. (A meta final é incorporar a interação gravitacional nessas mesmas teorias todo-abrangentes.)

UNIVERSO ABERTO Teoria ou modelo cosmológico em que o universo continua a se expandir para sempre.

UNIVERSO EM EXPANSÃO A ideia, proposta pela primeira vez pelo astrônomo americano Edwin Hubble em 1929, de que as galáxias distantes estão se afastando da Terra, e umas das outras, numa taxa constante.

UNIVERSO FECHADO Teoria cosmológica que concebe o universo em expansão como “fechado” ou destinado a parar de se expandir em algum momento futuro, o que seria seguido pelo colapso de todas as galáxias numa espécie de Big-Bang às avessas para depois se restaurar numa nova fase de expansão.

BIBLIOGRAFIA

- Asimov, Isaac. *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. Nova York: Doubleday, 1987.
- _____. *Atom: A Journey across the Subatomic Cosmos*. Nova York: Dutton, 1991.
- _____. *New Guide to Science*. Nova York: Basic Books, 1972.
- Barrow, John D., e Frank Tipler. *The Anthropic Cosmological Principle*. Londres, Oxford University Press, 1986.
- Boorstin, Daniel. *Os descobridores*. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1989. Brennan, Richard P. *Dictionary of Scientific Literacy*. Nova York: John Wiley, 1992.
- Bronowski, Jacob. *A escalada do homem*. São Paulo: Martins Fontes; Brasília: Ed. UnB, 1983.
- Calder, Nigel. *O universo de Einstein*. Brasília: Ed. UnB, 1988.
- Capra, Fritjof. *O tao da física: um paralelo entre a física moderna e o misticismo oriental*. São Paulo: Cultrix, 1988.
- Cassidy, David Charles. *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*. Nova York: Freeman, 1992.
- Christianson, Gale E. *In the Presence of the Creator: Isaac Newton and His Times*. Nova York: Free Press, 1984.
- Clark, Ronald W. *Einstein: The Life and Times*. Nova York: World, 1971.
- Coleman, James A. *Relativity for the Layman*. Nova York, New American Library of World Literature, 1958.
- Davies, Paul. *God and the New Physics*. Nova York: Simon & Schuster, 1984.
- _____. *Os três últimos minutos: conjecturas sobre o destino final do universo*. Rio de Janeiro: Rocco, 1994.
- Dawidoff, Nicholas. *The Catcher Was a Spy: The Mysterious Life of Moe Berg*. Nova York: Pantheon Books, 1994.
- Dyson, Freeman. *Perturbando o universo*. Brasília: Ed. UnB, 1985.
- _____. *O infinito em todas as direções: do gene à conquista do universo*. São Paulo: Best Seller, 1989.
- Einstein, Albert. *Relativity, The Special and the General Theory*. Nova York: Crown, 1952.
- _____. *The Meaning of Relativity*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1923.
- Eve, A.S. *Rutherford*. Londres: Cambridge University Press, 1939.
- Feinberg, Gerald. *What Is the World Made Of?* Nova York: Anchor, 1978.
- Ferris, Timothy. *O despertar da Via Láctea: uma história da astronomia*. Rio de Janeiro, 1990.

Feynman, Richard P. *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1985.

_____. *The Feynman Lectures of Physics*. Editadas por Robert B. Leighton e Matthew Sands. Reading, MA: Addison-Wesley, 1963.

_____. *Six Easy Pieces*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. (Textos Originalmente preparados para publicação por Robert B. Leighton e Matthew Sands.)

_____. *Surely You're Joking, Mr. Feynman*. Nova York: Norton, 1985. French, A.P. e P.J. Kennedy. Niels Bohr: A Centenary Volume. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1985.

Gamow, George. *Biography of Physics*. Nova York: Harper, 1961.

_____. *One Two Three – Infinity*. Nova York: Viking Press, 1947.

Gardner, Martin. *Relativity for the Millions*. Nova York, Macmillan, 1965.

Gell-Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*. Nova York: Freeman, 1994.

Gleick, James. *Genius: The Life and Science of Richard Feynman*. Nova York: Pantheon Books, 1992.

Goudsmit, Samuel A. *Alsos*. Nova York: Henry Schuman, 1947.

Gribbin, John. *In Search of Schrödinger's Cat, Quantum Physics and Reality*. Nova York: Bantam Books, 1984.

Hawking, Stephen. *Uma breve história do tempo: do Big Bang aos buracos negros*. São Paulo: Círculo do Livro, 1989.

Heilbron, J.L. *The Dilemmas of an Upright Man: Max Planck as Stokesman for German Science*. Berkeley, CA: University of California Press, 1986.

Hofstadter, Douglas R. *Gödel, Escher, Bach*. Nova York: Basic Books, 1979.

Holloway, David. *Stalin and the Bomb: The Soviet Union and Atomic Energy*. New Haven, CT: Yale University Press, 1994.

Kaku, Michio. *Hyperspace*. Nova York: Oxford University Press, 1994.

Krauss, Lawrence. *Sem medo da física: um guia para você não ficar perdido no espaço*. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

Lanouette William (com Bela Silard). *Genius in the Shadow: a Biography of Leo Szilard: The Man Behind the Bomb*. Nova York: Scribner's, 1993.

Lederman, Leon (com Dick Teresi). *The God Particle*. Nova York: Dell, 1993. March, Robert H., *Physics for Poets*. Chicago: Contemporary Books, 1978. Mehra, Jagdish. *The Beat of a Different Drummer: The Life and Science of Richard Feynman*. Nova York: Oxford University Press, 1985.

Moore, Ruth. *Niels Bohr*. Cambridge, MA: MIT Press, 1985.

Motz, Lloyd, e Jefferson Hane Weaver. *The Story of Physics*. Nova York: Plenum Press, 1989.

Pagels, H. *The Cosmic Code*. Nova York: Simon & Schuster, 1982.

Pais, Abraham. *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford: Oxford University Press, 1991.

- _____. *Subtle is the Lord: The Life and Science of Albert Einstein*. Londres: Oxford University Press, 1982.
- Parker, Barry. *Search for Super-theory: From Atoms to Superstrings*. Nova York: Plenum Press, 1987.
- Penrose, Roger. *A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford: Oxford University Press, 1994.
- Powers, Thomas. *Heisenberg's War: The Secret History of the German Bomb*. Boston: Back Bay Books, 1994.
- Riordan, Michael. *The Hunting of the Quark*. Nova York: Simon & Schuster, 1987.
- Shirer, William L. *The Rise and Fall of the Third Reich*. Nova York: Simon & Schuster, 1960.
- Snow, C.P. *The Physicists*. Boston: Little, Brown, 1981.
- _____. *As duas culturas e uma segunda leitura*. São Paulo: EDUSP, 1995. Sykes, Christopher. *No Ordinary Genius*. Nova York: Norton, 1994.
- Tarnas, Richard. *The Passion of the Western Mind: Understanding the Ideas That Have Shaped Our World View*. Nova York: Ballantine Books, 1991.
- Thorne, Kip S. *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. Nova York: Norton, 1994.
- Trefil, James S. *From Atoms to Quarks*. Nova York: Scribner's, 1980.
- Van Doren, Charles. *A History of Knowledge: The Pivotal Events, People, and Achievements of World History*. Nova York: Ballantine Books, 1991.
- Wald, Robert M. *Space, Time, and Gravity*. Chicago: University of Chicago Press, 1977.
- Weinberg, Steven. *Sonhos de uma teoria final: a busca das leis fundamentais da natureza*. Rio de Janeiro: Rocco, 1994.
- _____. *The First Three Minutes*. Nova York: Basic Books, 1977.
- Westfall, Richard F. *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*. Nova York: Cambridge University Press, 1980.
- White, Michael, and John Gribbin. *Einstein: A Life in Science*. Nova York: Penguin Books, 1994.
- Will, Clifford M. *Einstein estava certo?* Brasília: Ed. UnB, 1996.
- Wilson, David. *Rutherford: A Simple Genius*. Cambridge, MA: MIT Press, 1983.
- Zukav, Gary. *A dança dos mestres Wu Li: uma visão geral da nova física*. São Paulo: ECE, 1989.

ÍNDICE REMISSIVO

- absoluto, espaço, 1
- absoluto, tempo, 1
- ação mínima, princípio da, 1-2
- acelerador, 1-2
- alfa, partículas (raios alfa), 1
- ALSOS, projeto, 1-2
- antimatéria, 1-2
- antrópico, princípio, 1, 2-3, 4, 5-6
- Aristarco, 1
- Aristóteles, 1
- Arquimedes, 1, 2
- átomo, 1
 - estrutura do, 1-2
 - divisão do, 1-2, 3-4
 - núcleo do, 1-2
- Bacon, Francis, 1, 2-3
- bárion, 1-2
- Barrow, Isaac, 1, 2-3
- Berg, Morris, 1-2
- beta, partículas (raios), 1
- Bethe, Hans, 1, 2, 3
- Big-Bang, teoria do, 1-2, 3-4, 5, 6, 7-8, 9-10
- Bohr, Niels, 1, 2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11, 12
 - e a bomba atômica, 1-2, 3
 - concepção de átomo, 1, 2-3
 - e Einstein, 1, 2-3, 4
 - interpretação de Copenhague, 1, 2-3, 4
 - princípio de complementaridade de, 1-2
- bomba atômica, 1, 2, 3, 4, 5
- bóson, 1, 2 (*ver também* modelo padrão)
- Brahe, Tycho, 1
- Broglie, Louis de, 1, 2-3
- buracos negros, 1
- cálculo, 1, 2, 3-4, 5
- Cambridge, Universidade de, 1, 2-3, 4, 5-6, 7
- catástrofe ultravioleta, 1-2
- causalidade, filosofia da, 1
- CERN (Laboratório Europeu para a Física de Partículas), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-8
- Challenger* (ônibus espacial), 1-2
- charme* 1-2, 3
- Chicago, Universidade de, 1, 2, 3-4
- classificação octal, 1-2
- colisão, 1-2
- Copérnico, Nicolau, 1-2, 3
- cordas, teoria das, 1
- Cornell, Universidade de, 1
- corpo negro, radiação do, 1-2

- cromodinâmica, 1-2
- Curie, Marie, 1
- Curie, Pierre, 1
- curvo, espaço, 1-2
- Darwin, Charles, 1
- datação por carbono, 1-2
- Descartes, René, 1, 2-3, 4
- determinismo, 1, 2
- Dirac, Paul Adrien Maurice, 1, 2, 3, 4
- dualidade, 1
- dualidade onda-partícula, 1
- Dyson, Freeman, 1, 2

- Eddington, Arthur, 1, 2
- efeito Zeeman, 1
- Einstein, Albert, 1-2, 3, 4, 5-6, 7, 8, 9-10, 11, 12
 - carta a Roosevelt, 1
 - espaço-tempo, 1
 - simultaneidade, 1-2, 3
 - teoria especial da relatividade, 1-2
 - teoria geral da relatividade, 1-2
- elétron, 1, 2-3, 4-5, 6, 7-8
- energia:
 - conservação da, 1
 - massa e, 1-2
- entropia, 1
- equivalência, princípio de, 1
- Eratóstenes, 1
- espaço curvo, 1-2
- espaço-tempo, 1, 2-3
- espectroscopia, 1-2
- estranheza, 1-2
- éter, 1 (*ver também* Michelson-Morley, experiência do pensamento)
- Euclides, 1
- experiência de pensamento, 1, 2

- Faraday, Michael, 1-2
- Farm Hall, transcrições de, 1-2
- Fermi Nacional Accelerator Laboratory (Fermilab), 1, 2, 3, 4
- Fermi, Enrico, 1-2, 3, 4
- férmion, 1, 2, 3 (*ver também* modelo padrão)
- Ferris, Timothy, 1
- Feynman, Richard Phillips, 1-2, 3, 4
 - Challenger, desastre da, 1-2
 - diagramas, 1-2, 3-4, 5-6
 - eletrodinâmica quântica (QED), 1, 2, 3
 - Los Alamos e a bomba, 1-2
 - O senhor deve estar brincando, Mr.Feynman*, 1
 - Porque preocupar-se com o que os outros pensam?*, 1
- física clássica, 1, 2
- física nuclear:
 - fissão, 1-2, 3-4
 - fusão, 1-2
- Flamsteed, John, 1-2
- fóton, 1, 2-3, 4-5, 6-7
- Friedmann, Alexander, 1
- Fuchs, Klaus, 1, 2

Galileu Galilei, 1, 2-3, 4, 5
gama, partículas, 1
Gamow, George, 1, 2
Gell-Mann, Murray, 1, 2-3, 4, 5, 6-7
 classificação octal, 1
 estranheza, 1-2
 modelo padrão, 1
 quark, 1-2
 O quark e o jaguar, 1, 2-3
glúons, 1-2 (*ver também* modelo padrão)
Gödel, Kurt, 1
Goudsmit, Samuel, 1-2, 3
gráviton, 1-2 (*ver também* modelo padrão)
Groves, Leslie R., 1-2

hádrons, 1-2, 3 (*ver também* modelo padrão)
Hahn, Otto, 1, 2
Halley, Edmund, 1-2
Hawking, Stephen, 1, 2
Heisenberg, Werner, 1-2
 e Bohr, 1-2, 3, 4, 5
 bomba atômica, 1-2
 incerteza, 1, 2-3
 e Morris Berg, 1-2
Hertz, Heinrich, 1, 2, 3
hipótese de Gaia, 1, 2-3
Hooke, Robert, 1, 2, 3, 4
Hubble, Edwin, 1
Huygens, Christian, 1, 2

incerteza, princípio de, 1-2, 3, 4-5
indeterminação, princípio de, 1
Instituto de Estudos Avançados, 1, 2
Instituto de Tecnologia da Califórnia
(Caltech), 1-2, 3, 4, 5, 6
isótopo, 1

Kelvin, lord, 1, 2-3
Kepler, Johannes, 1, 2-3, 4, 5-6, 7, 8
Keynes, John Maynard, 1
Kutyna, Donald J., 1-2

Lederman, Leon, 1
lei do quadrado inverso (lei do inverso do quadrado), 1
Leibniz, Gottfried, 1, 2
Lemaître, padre Georges, 1
lépton, 1-2, 3, 4, 5, 6
lépton tau, 1-2
Locke, John, 1-2
Lorentz, Hendrik, 1-2, 3
Los Alamos, 1, 2, 3, 4-5
luz, 1-2
 espectro da, 1-2, 3, 4, 5-6
 velocidade da, 1-2

Manhattan, Projeto, 1, 2, 3
massa, 1-2
 aumento com a velocidade, 1-2

$E = mc^2$, 1
e energia, 1-2
Massachusetts, Instituto de Tecnologia de (MIT), 1-2, 3-4
Maxwell, James Clerk, 1-2, 3, 4
meia-vida, 1, 2
Meitner, Lise, 1, 2
méson, 1
Michelson-Morley, experimento, 1-2
modelo padrão, 1-2
múon, 1, 2-3

NASA, 1
Ne’eman, Yuval, 1-2
Neumann, John von, 1
neutrino, 1, 2, 3
nêutron, 1, 2, 3, 4
Newton, Isaac, 1, 2-3, 4, 5, 6
e cálculo, 1, 2, 3-4
e força e massa, 1
e gravidade, 1-2
e luz, 1, 2-3

Oersted, Hans Christian, 1
ônibus espacial (*Challenger*), 1-2
Oppenheimer, J. Robert, 1, 2, 3-4
Oxford, Universidade de, 1

paradoxo EPR (Einstein, Poldosky, Rosen), 1-2
partículas:
dispersão de, 1-2
fundamentais, 1-2 (*ver também* elétrons, quarks)
ondas e, 1-2
Pauli, Wolfgang, 1, 2, 3, 4
Pepys, Samuel, 1, 2
Pitágoras, 1, 2
Planck, Max, 1-2, 3, 4-5
catástrofe ultravioleta, 1-2
constante, 1-2, 3
e Einstein, 1, 2, 3, 4-5
mecânica quântica, 1
quantum, 1-2, 3-4, 5
pósitron, 1, 2
Prêmio Nobel:
de Bohr, 1, 2, 3
de Einstein, 1-2, 3
de Feynman, 1-2, 3, 4-5
de Gell-Mann, 1-2
de Heisenberg, 1-2
de Planck, 1, 2
de Rutherford, 1
Princeton, 1, 2 (*ver também* Instituto de Estudos Avançados)
Principia, 1, 2-3, 4
probabilidade, 1
próton, 1, 2-3, 4, 5
psi, 1
Ptolomeu, Cláudio, 1, 2

QED (eletrodinâmica quântica), 1-2, 3

quantum:

 cromodinâmica, 1-2

 eletrodinâmica, 1-2, 3

 física do, 1-2, 3, 4

 mecânica do, 1-2, 3, 4-5, 6

 teoria do, 1-2, 3-4

quarks, 1, 2-3, 4-5, 6, 7, 8, 9-10

radiação, 1-2, 3, 4-5

radioatividade, 1, 2, 3

radioativo, decaimento, 1, 2, 3

raios X, 1-2

relatividade, 1-2

 teoria especial da, 1-2

 teoria geral da, 1-2

Richter, Burton, 1, 2, 3

Roentgen, Wilhelm, 1-2

Royal Society of London for Improving Natural Knowledge, 1-2, 3, 4, 5, 6

Rutherford, Ernest, 1-2, 3

 datação por carbono, 1

 decaimento radioativo, 1-2, 3

 núcleo atômico, 1-2

 sonar, 1

Schrödinger, Erwin, 1, 2, 3

gato de, 1

Schwarzschild, Karl, 1

Schwinger, Julian, 1, 2

simultaneidade, 1-2

Snow, C.P., 1, 2, 3, 4

Snyder, Hartland, 1

Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), 1, 2, 3, 4-5

Stukeley, William, 1, 2

Sullivan, Walter, 1

Szilard, Leo, 1, 2

Tales, 1

telescópio:

 de Galileu, 1-2

 de Newton, 1

tempo ver relatividade tempo, dilatação, 1

teoria geral da relatividade, 1-2

termodinâmica, 1, 2

Terra, idade da, 1

Thomson, Joseph John, 1, 2-3, 4, 5, 6, 7

Ting, Samuel, 1

Tomonago, Shin'ichiro, 1, 2, 3

universo em expansão, 1-2

universo heliocêntrico, 1-2

urânio, 1, 2

 átomo, 1-2

 cálculos da massa crítica, 1, 2

Weinberg, Stephen, 1, 2, 3

Weisskopf, Victor, 1, 2, 3

Weizmann, Chaim, 1, 2

Wheeler, John Archibald, 1, 2-3, 4

Wigner, Eugene, 1, 2, 3-4

Zweig, George, 1, 2, 3

CIÊNCIA E CULTURA

Consultor:

Henrique Lins de Barros
*Pesquisador titular do Museu de Astronomia
e Ciências Afins, MAST/MCT*
Doutor em física

UMA BIOGRAFIA DO UNIVERSO Fred Adams e Greg Laughlin	O QUE SABEMOS SOBRE O UNIVERSO Richard Morris
MATEMÁTICA LÚDICA Leon Battista Alberti	UMA BREVE HISTÓRIA DO INFINITO Richard Morris
A CAIXA PRETA DE DARWIN Michael Behe	OS GRANDES EXPERIMENTOS CIENTÍFICOS Michel Rival
CONVITE À FÍSICA Yoav Ben-Dov	O ESPECTRO DE DARWIN Michael R. Rose
GIGANTES DA FÍSICA Richard Brennan	A UNIFICAÇÃO DAS FORÇAS FUNDAMENTAIS Abdus Salam et al.
20.000 LÉGUAS MATEMÁTICAS A.K. Dewdney	SERÁ QUE DEUS JOGA DADOS? Ian Stewart
FORMIGAS EM AÇÃO Deborah Gordon	DE ARQUIMEDES A EINSTEIN Pierre Thuillier
INTELIGÊNCIAS EXTRATERRESTRES Jean Heidmann	O TEMPO NA HISTÓRIA G.J. Whitrow
A REVOLUÇÃO CIENTÍFICA John Henry	UMA HISTÓRIA SENTIMENTAL DAS CIÊNCIAS Nicolas Witkowski
O ESPETÁCULO DA EVOLUÇÃO Bertrand Jordan	À BEIRA D'ÁGUA Carl Zimmer
AS ORIGENS DE NOSSO UNIVERSO Malcolm S. Longair	

Título original:
Heisenberg probably Slept Here

Tradução autorizada da primeira edição norte-americana
publicada em 1997 por John Wiley & Sons,
de Nova York, Estados Unidos

Copyright © 1997, Richard P. Brennan

Jorge Zahar Editor Ltda.
Marquês de São Vicente 99 – 1º | 22451-041 Rio de Janeiro, RJ
tel (21) 2529-4750 | fax (21) 2529-4787
editora@zahar.com.br | www.zahar.com.br

Todos os direitos reservados.
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo
ou em parte, constitui violação de direitos autorais. (Lei 9.610/98)

Edição revista, 2000

Grafia atualizada respeitando o novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Capa: Carol Sá
Ilustração: Marcelo Torrico

Edição digital: novembro 2012

ISBN: 978-85-378-0599-2

Arquivo ePub produzido pela **Simplíssimo Livros**
