

ALAN LIGHTMAN

As descobertas

Os grandes avanços da ciência no século XX

Tradução

George Schlesinger

Copyright © 2005 by Alan Lightman
Proibida a venda em Portugal.

*Grafia atualizada segundo o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990,
que entrou em vigor no Brasil em 2009.*

Título original

The Discoveries: Great Breakthroughs in 20th-Century Science

Capa

Rodrigo Maroja

Revisão técnica

Maria Guimarães

Preparação

Alexandre Boide

Índice remissivo

Luciano Marchiori

Revisão

Huendel Viana

Ana Maria Barbosa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Lightman, Alan.

As descobertas : Os grandes avanços da ciência no século XX /
Alan Lightman ; tradução George Schlesinger. — 1ª ed. — São Paulo :
Companhia das Letras, 2015.

Título original : The Discoveries : Great
Breakthroughs in 20th-Century Science.

ISBN 978-85-359-2535-7

1. Ciência - História - Século 20 - Fontes 2. Ciência - Historiografia
3. Descobertas em ciência - História - Século 20 - Fontes 4.
Descobertas em ciência - Historiografia I. Título.

14-12638

CDD-509

Índice para catálogo sistemático:

1. Ciência : História 509

[2015]

Todos os direitos desta edição reservados à

EDITORA SCHWARCZ S.A.

Rua Bandeira Paulista, 702, cj. 32

04532-002 — São Paulo — SP

Telefone: (11) 3707-3500

Fax: (11) 3707-3501

www.companhiadasletras.com.br

www.blogdacompanhia.com.br

Sumário

Introdução	7
Uma nota sobre números	17
1. O quantum	19
2. Hormônios	34
3. A natureza da luz como partícula	45
4. Relatividade especial	57
5. O núcleo do átomo	71
6. O tamanho do cosmo	83
7. O arranjo dos átomos na matéria sólida	101
8. O átomo quântico	116
9. O meio de comunicação entre os nervos	128
10. O princípio da incerteza	141
11. A ligação química	155
12. A expansão do universo	172
13. Antibióticos	190
14. O meio de produção de energia em organismos vivos	205
15. Fissão nuclear	219
16. A mobilidade dos genes	238

17. A estrutura do DNA	255
18. A estrutura das proteínas	273
19. Ondas de rádio do big bang	289
20. Uma teoria unificada de forças	306
21. Quarks: a mínima essência de matéria	324
22. A criação de formas alteradas de vida	343
 Epílogo	 359
 <i>Notas</i>	 361
<i>Agradecimentos</i>	375
<i>Créditos das imagens</i>	377
<i>Índice remissivo</i>	379

1. O quantum

Em sua famosa autobiografia *The Education of Henry Adams*, publicada apenas alguns anos após o início do século xx, o historiador Henry Adams manifestou-se alarmado pelo fato de o átomo ter sido dividido. Desde os antigos gregos, o átomo sempre fora a menor partícula da matéria, o elemento irreduzível e indestrutível, a metáfora para unidade e permanência em todas as coisas. Então, em 1897, o físico britânico J. J. Thomson encontrou elétrons, partículas muito mais leves e presumivelmente menores que os átomos. No ano seguinte, Marie Skłodowska (madame Curie) e seu marido Pierre Curie descobriram que os átomos de um novo elemento, chamado rádio, lançavam continuamente minúsculos fragmentos de si mesmos, perdendo peso no processo. Depois disso, nada era permanente — nem a natureza e muito menos as civilizações humanas. O sólido tornara-se frágil. A unidade dera lugar à complexidade. O indivisível fora dividido.

Como Adams estava fazendo uma síntese do século xix, evidentemente não tinha conhecimento de outra bomba científica que acabara de explodir, em última análise tão profunda e estremeceadora quanto a fragmentação do átomo. Em 14 de dezembro de 1900, numa palestra diante da pedante Sociedade Alemã de Física em Berlim, Max Planck propôs a estarrecedora ideia do quantum: a energia não existe como um fluxo contínuo, passível de ser dividido indefinida-

mente em quantidades cada vez menores. Em lugar disso, sugeria ele, existe uma quantidade de energia mínima que não pode ser mais dividida, uma gota elementar de energia chamada quantum. A luz é um exemplo de energia. O fluxo luminoso aparentemente regular que penetra por uma janela é, na realidade, um conjunto de pequenos pingos individuais, os quanta, sendo cada um minúsculo e fraco demais para ser distinguido pelo olho. Assim teve início a física quântica.

Na época da palestra, Planck era calvo na parte dianteira da cabeça, com um acentuado nariz aquilino, bigode, um par de óculos presos à face e a aparência geral de um obtuso funcionário de escritório. Estava com 42 anos, idade avançada para um físico teórico. Newton era um jovem de vinte e poucos anos quando elaborou sua lei da gravitação. Maxwell dera os retoques finais na teoria eletromagnética e se aposentara, retirando-se para o campo, aos 35. Einstein e Heisenberg estariam na metade da casa dos vinte ao erigirem seus grandes monumentos.

Em 1900, Planck já havia se estabelecido como um dos mais importantes físicos teóricos da Europa, inclusive ajudando a legitimar a disciplina. Quinze anos antes, quando consolidou a rara posição de catedrático de física teórica na Universidade de Kiel, a ciência teórica era uma profissão de pouca influência, desprestigiada em relação aos experimentos de laboratório. Poucos estudantes se dignavam a comparecer às aulas de matemática de Planck. Então, em 1888, após seus estudos sobre o calor — nos quais esclarecia a Segunda Lei da Termodinâmica e o conceito de irreversibilidade —, Planck foi indicado como professor na Universidade de Berlim. Ao mesmo tempo, foi nomeado diretor do novo Instituto de Física Teórica, fundado essencialmente para ele.

No final do século XIX, a física aquecia-se ao sol de extraordinárias conquistas. As leis precisas da mecânica elaboradas por Newton, que descreviam como as partículas reagiam ao ser submetidas a determinadas forças, juntamente com sua lei da gravitação, haviam sido aplicadas com êxito a uma ampla gama de fenômenos terrestres e cósmicos, desde bolas quicando até as órbitas dos planetas. A teoria do calor, chamada termodinâmica, havia chegado ao clímax com a melancólica mas profunda Segunda Lei da Termodinâmica: um sistema isolado se move de forma inexorável e irreversível rumo a um estado de

maior desordem. Ou, de maneira equivalente, toda máquina se desgasta de forma inevitável. Todos os fenômenos elétricos e magnéticos tinham sido unificados por um conjunto único de equações, chamadas equações de Maxwell, em honra ao físico escocês James Clerk Maxwell, que as completara. Essas leis demonstravam, entre outras coisas, que a luz, o mais primário dos fenômenos naturais, é uma onda oscilante de energia eletromagnética, viajando pelo espaço a uma velocidade de 299 792 quilômetros por segundo. As novas áreas da física, conhecidas como física estatística e teoria cinética, haviam demonstrado que o comportamento dos gases e fluidos podia ser compreendido com base na colisão entre grandes números de objetos minúsculos, presumivelmente hipotéticos, mas invisíveis: átomos e moléculas. Em suma, enquanto Planck rabiscava suas equações no nascer do novo século, a física podia contemplar seu vasto império com orgulho.

Algumas rachaduras, porém, começavam a se revelar na fachada de mármore. À parte o desânimo filosófico expresso pelo sr. Adams, o elétron de Thomson era claramente um novo tipo de matéria, que exigia explicação e levantava outras questões acerca das entranhas dos átomos. As desintegrações “radiativas” observadas pelos Curie envolviam a liberação de quantidades enormes de energia. Qual era a natureza dessa energia e de onde vinha ela? Outras emissões de radiação eletromagnética dos átomos, os assim chamados espectros atômicos, exibiam padrões e regularidades surpreendentes, mas sem nenhuma compreensão teórica. Igualmente espantosos eram os padrões repetitivos nas propriedades dos elementos químicos, um fenômeno que os cientistas suspeitavam ser causado pela estrutura dos átomos.

Por fim, os físicos haviam observado que um tipo especial de luz, chamada luz de corpo negro, ou radiação de corpo negro, surgia de todas as caixas quentes e escuras mantidas a temperatura constante. (Regule um forno de cozinha a uma temperatura determinada, deixe sua porta fechada por um tempo longo e dentro surgirá radiação de corpo negro — a qualquer temperatura, essa luz estará abaixo das frequências visíveis ao olho humano.) Já era fato bem conhecido dos cientistas que todos os objetos quentes emitem luz — isto é, radiação eletromagnética. Em geral, a natureza dessa luz varia conforme as propriedades do objeto aquecido. Mas se o objeto radiante, além disso, for colocado dentro de uma caixa e mantido a temperatura constante, sua luz assume uma forma especial e invariável, a assim chamada radiação de corpo negro.

Um aspecto particularmente misterioso da luz de corpo negro era que sua intensidade e suas cores eram completamente independentes do tamanho, formato ou composição do recipiente — algo tão surpreendente como se os seres humanos ao redor do mundo todo, ao serem confrontados com uma pergunta, dessem a mesma frase como resposta. Uma caixa negra aquecida feita de carvão em forma de charuto produz exatamente a mesma luz que uma caixa negra feita de estanho enegrecido em forma de bola de praia, contanto que as duas caixas estejam à mesma temperatura. As leis conhecidas da física não conseguiam explicar a luz de corpo negro. Para piorar, as teorias-padrão de luz e calor que habitualmente funcionavam prediziam que uma caixa negra, mantida a temperatura constante, deveria criar uma quantidade *infinita* de energia luminosa! Foi a charada da radiação de corpo negro que Max Karl Ernst Ludwig Planck solucionou para sua conferência de 14 de dezembro de 1900.

Muita coisa já se sabia sobre o assunto. Com o uso de filtros coloridos e outros dispositivos, os cientistas tinham medido quanta energia havia em cada faixa de frequência da luz de corpo negro. Um filtro colorido permite que somente a luz de uma faixa estreita de frequências o atravesse. (A frequência da luz é o número de oscilações por segundo. Cada frequência luminosa corresponde a uma cor particular, assim como cada frequência sonora corresponde a um tom específico.) A quantidade de energia numa dada faixa de frequência luminosa é medida por um dispositivo chamado fotômetro. Os fotômetros medem a intensidade da luz que incide sobre uma superfície — uma placa de vidro, por exemplo — comparando a luz incidente com outro feixe luminoso de intensidade conhecida. A comparação pode ser conseguida, por exemplo, pelo poder de penetração relativo da luz através de um líquido. Feixes luminosos mais intensos possuem maior poder de penetração. (Várias décadas depois, já no meio do século xx, as intensidades luminosas podiam ser medidas com precisão mediante seus efeitos elétricos, com detectores fotoelétricos.)

A divisão de uma fonte luminosa na quantidade de energia em cada faixa de frequência é chamada de espectro luminoso. Quando se trata de uma luz de corpo negro, seu espectro é chamado de espectro de corpo negro. A figura 1.1 ilustra dois espectros de corpo negro, um para a temperatura de 50 K e outro para a temperatura de 65 K. O K significa Kelvin, a unidade de temperatura na escala absoluta, que corresponde à escala Celsius com seu ponto zero deslocado. A temperatura mais fria possível está a 0 K, ou -273°C .

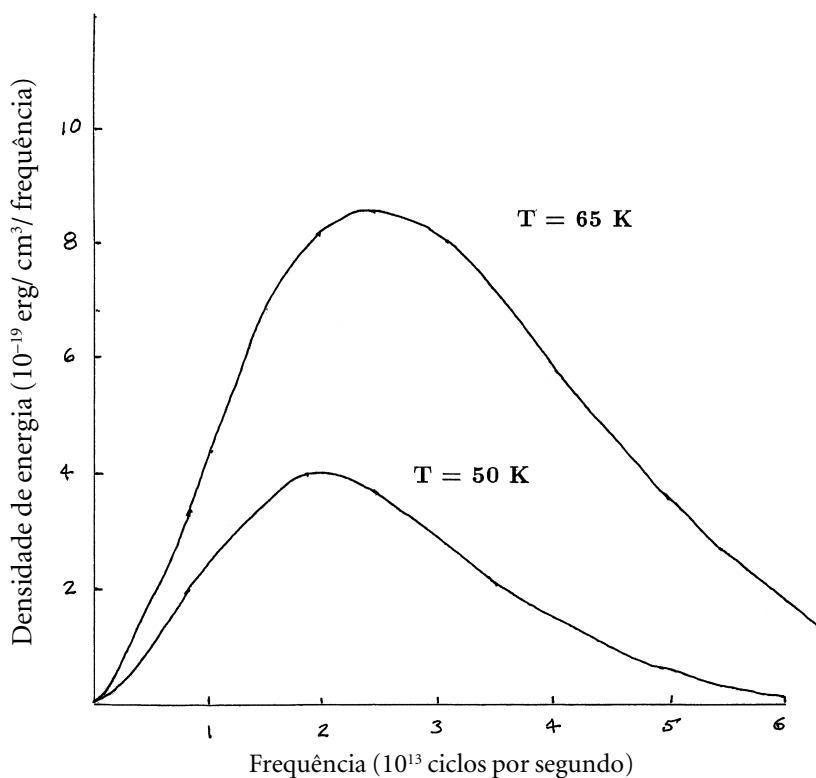


Figura 1.1

Um exemplo mais familiar de espectro é o gráfico que mostra quantos adultos há em cada faixa de altura. Tal espectro é geralmente uma curva em forma de sino, com pouca gente em alturas muito reduzidas e pouca gente em alturas muito elevadas. Como seria de esperar, esse espectro se altera de um país para outro, uma vez que as alturas humanas são determinadas por um grande número de variáveis, tais como a genética e a alimentação. Portanto, foi algo notável quando Gustav Kirchhoff, o predecessor de Planck na cátedra de Berlim, e companhia descobriram que o espectro de corpo negro não varia de acordo com os detalhes do recipiente. *O espectro de corpo negro depende apenas de um único parâmetro, a temperatura.*

Planck ficou muito impressionado com a singularidade e universalidade do espectro de corpo negro, concluindo que tal universalidade devia ser resultado de alguma nova e fundamental lei da natureza. Algumas semanas antes de sua conferência proferida em dezembro, o físico alemão havia de fato *adivinhado* uma fórmula para o espectro da luz de corpo negro.¹ A fórmula de Planck era uma expressão matemática para a quantidade de energia em cada faixa de frequência da luz de corpo negro, e coincidia com todas as medições experimentais. Adotando o critério estético comum à maioria dos físicos, Planck se regozizou com a simplicidade de sua fórmula, usando a palavra “simples” (*einfach* em alemão) duas vezes no primeiro parágrafo de seu artigo.

Mas uma fórmula matemática, por si só, não passa de um bem apresentado sumário de resultados quantitativos, assim como um calendário solar, que nos dá o número de horas de luz do sol em cada dia do ano. Tal calendário é útil para fazer planos, mas não explica *por que* os números aparecem daquela exata maneira. Para sabermos por quê, precisamos saber o que causa o dia e a noite, precisamos saber que a Terra gira em torno de seu eixo com determinada velocidade, que a Terra também gira em torno do Sol a certa velocidade, que o eixo da Terra é inclinado num ângulo específico. Quando sabemos todas essas coisas, entendemos por quê. Com tal entendimento, podemos então *prever* o calendário solar para qualquer planeta em qualquer parte do universo, dados os correspondentes fatos astronômicos.

Planck não ficou satisfeito em meramente adivinhar a fórmula correta para a luz de corpo negro. O que o compelia e o obcecava era responder a uma questão mais profunda: por quê? Que princípios fundamentais, invioláveis, conduziam a essa fórmula, tornavam-na uma necessidade lógica, exigiam que fosse ela, e apenas ela, entre todas as fórmulas *einfachen* (simples) possíveis e imagináveis? Por que era justamente essa a fórmula a ser comprovada repetidas vezes como verdadeira, de um experimento a outro, mesmo para experimentos que jamais haviam sido feitos?

Para entender o *porquê* de sua fórmula, Planck descobriu que precisava rejeitar séculos do pensamento físico que afirmava ser possível partir a energia em fragmentos cada vez menores, indefinidamente. Por mais surpreendente que fosse, o mundo não funcionava dessa maneira. Planck poderia explicar sua fórmula para a luz de corpo negro apenas por meio de uma proposta radical: existia um fragmento de energia mínimo, chamado quantum, que não podia

ser partido. Evidentemente, a energia, tal como a matéria, vinha em forma granular. O quantum era o grão de areia na praia, o centavo da moeda corrente no mundo subatômico. O quantum era indivisível.

Planck era um teórico, um físico que trabalha com lápis e papel, e imagina experimentos em sua mente. Para chegar às suas conclusões, o físico alemão imaginou montes de átomos encerrados numa caixa negra, todos emitindo e absorvendo luz. Em tal situação, os átomos são afetados pela luz ao redor, e a luz ao redor é afetada pelos átomos. Planck descobriu então que, se os átomos podiam absorver ou emitir energia somente em pacotes indivisíveis, os quanta, então a luz resultante necessariamente se tornaria luz de corpo negro.

Desse momento em diante, por grande parte de sua vida, Planck ficou espantado pelo sucesso da sua proposta do quantum. Tal como outros físicos teóricos, ele tinha uma fé quase religiosa na validade absoluta das leis da natureza, capazes de, como escrevera em 1899, “reter sua significação por todos os tempos e para todas as culturas, inclusive culturas extraterrestres e não humanas”.² Para Planck, “a busca do absoluto” era “a meta mais sublime de toda atividade científica”.³

No entanto, a despeito de sua visão sublime, Planck não aspirava fazer grandes descobertas. Conforme disse a Philipp von Jolly, seu professor na Universidade de Munique, ele desejava apenas compreender e talvez aprofundar os fundamentos da física já existentes.⁴ (Em 1878, Jolly chegou a aconselhar o jovem Planck, então com vinte anos, a não prosseguir na física, com base na alegação de que todas as leis fundamentais já haviam sido descobertas.) A estratégia cautelosa de Planck para “compreender” era estudar um tema lenta e cuidadosamente até dominá-lo. Tal abordagem modesta e conservadora parecia emergir naturalmente de sua formação como descendente de uma longa linhagem de pastores, eruditos e juristas — o pai de Planck, Wilhelm, foi professor de jurisprudência em Kiel e depois em Munique — e contribuía para a ressonância de seu leal apoio à Alemanha imperial. A conduta reservada de Planck se estendia a suas relações pessoais. Marga von Hoesslin Planck, sua segunda esposa, escreveu a um outro físico que seu marido era bastante polido e distante com qualquer pessoa que não fosse da família, e conseguia se sentir à vontade apenas

com gente de sua própria posição, com quem pudesse talvez tomar uma taça de vinho e fumar um charuto, ou até mesmo fazer uma discreta brincadeira.⁵

Houve duas situações em que Planck abandonou sua reserva: quando jovem, escreveu a um amigo: “Como é maravilhoso deixar todo o resto de lado e viver inteiramente dentro da família”.⁶ Muitos anos depois, Marga confirmou esse sentimento numa carta para Einstein, por ocasião da morte do marido: “Ele só se mostrava totalmente, com todas suas qualidades humanas, no ambiente familiar”.⁷ A outra forma de liberação de Planck era a música. Quando estudante na Universidade de Munique, compôs canções e uma opereta inteira, servia como segundo mestre de coro num coral escolar, tocava órgão na igreja estudantil e regia. Pelo resto da vida, tocou piano soberbamente em encontros musicais realizados na sua casa. A música, segundo Hans Hartmann, marido de sua sobrinha, era o “único campo da vida no qual [Planck] dava plena liberdade ao seu espírito”.⁸

Acompanhar a linha de raciocínio de Planck nos ajudará a entender como pensam os cientistas teóricos, como utilizam modelos, imaginação e consistência lógica por meio da matemática. Como se pode ver, o artigo de Planck sobre o quantum é, neste livro, um dos mais difíceis e abstratos do ponto de vista conceitual, o que exigirá do leitor uma boa dose de paciência e bom humor. Planck começa seu histórico artigo considerando os átomos materiais que constituem as paredes internas da caixa enegrecida. Afinal, esses átomos são responsáveis por criar a luz de corpo negro observada, emitindo e absorvendo radiação eletromagnética. Ele idealiza cada um desses átomos como um “ressonador vibrante monocromático”, ou seja, um sistema que emite e absorve luz numa única frequência, digamos, vermelho puro ou verde puro. Um exemplo concreto de um ressonador vibrante monocromático de Planck seria um elétron saltando para cima e para baixo, ou “vibrando”, numa mola. Quando o elétron salta, emite luz numa frequência específica, o número preciso de saltos para cima e para baixo a cada segundo. Diferentes frequências correspondem a diferentes ritmos de saltos, o que por sua vez é determinado pela rigidez de cada mola. A luz de corpo negro é então hipoteticamente produzida por um grande número desses elétrons saltitantes em diferentes frequências. Todas essas ideias estão de acordo com as equações do eletromagnetismo de Maxwell.

Ao representar as paredes internas da caixa como uma coleção de minúsculos objetos, cada um vibrando numa frequência única, Planck está empregando uma estratégia comum na física teórica: representar o sistema em estudo por um modelo simples que pode ser facilmente analisado. Cinco anos depois, Einstein usaria a mesma estratégia no estudo do tempo com um relógio imaginário composto de dois espelhos e um feixe de luz saltando entre eles, uma batida de relógio para cada salto. Na verdade, em seu artigo Planck em nenhum momento menciona os átomos nas paredes do recipiente. Refere-se apenas a seus “ressonadores” abstratos, que podem ser qualquer sistema que emita e absorva luz numa frequência única.

A figura imaginada por Planck é a seguinte: comecemos com uma caixa negra vazia e aqueçamo-la até certa temperatura. De início, não há luz na caixa. Ai os ressonadores vibrantes, aquecidos, começam a emitir luz em várias frequências, e a caixa acabará por se encher de luz. Vez ou outra, alguma luz atinge a parede da caixa e é absorvida pelos ressonadores que ali se encontram. *Portanto os ressonadores tanto emitem como absorvem luz.* Por algum tempo, tudo evolui. A quantidade de energia em cada ressonador se modifica, assim como a quantidade de energia em cada faixa de frequência luminosa contida dentro da caixa.

Por fim, porém, se a caixa for mantida a uma temperatura constante, estabelece-se um estado de equilíbrio. A absorção e a emissão dos ressonadores entram em equilíbrio. Cada ressonador corresponde, em média, a uma partícula e a uma quantidade constante de energia. E o espectro de luz na caixa se acomoda no espectro universal de corpo negro, que Planck chama de “espectro normal”. Desse ponto em diante, não há mais nenhuma mudança. O sistema chegou ao que se denomina equilíbrio termodinâmico. E, de fato, um pequeno furo na caixa para colher amostras da radiação interna revelaria a luz de corpo negro universal de Kirchhoff.

É importante que Planck tenha visualizado esse quadro como dinâmico, uma contínua troca de energia. Mesmo depois de se estabelecer o equilíbrio, os ressonadores nas paredes da caixa estão constantemente emitindo e absorvendo luz, trocando energia com a luz dentro da caixa. Por sua vez, a luz em volta está sendo constantemente reabastecida e esvaziada pelos ressonadores.

Um dos heróis de Planck, o físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), havia desenvolvido uma maneira particularmente frutífera de descrever tais sistemas dinâmicos em termos de probabilidades. Em cada frequência, certa quantidade de energia deve ser compartilhada entre os ressonadores daquela frequência e a luz daquela mesma frequência. E existe uma probabilidade que pode ser calculada para cada distribuição particular dessa energia. Algumas distribuições (digamos, um terço da energia nos ressonadores e dois terços na luz) são mais prováveis que outras. Enquanto o sistema não atingir o equilíbrio, ainda está evoluindo no tempo, “experimenta” muitas divisões diferentes de energia e evolui naturalmente em direção àquelas que são mais e mais prováveis, até alcançar a distribuição particular que tem a probabilidade máxima. Essa condição também é chamada de entropia máxima, ou desordem máxima. (A medida quantitativa de desordem num sistema físico é chamada de entropia.) Uma das maneiras de enunciar a famosa Segunda Lei da Termodinâmica, que Planck menciona na segunda página de seu artigo, é que os sistemas evoluem de maneira natural para uma condição de probabilidade máxima, ou entropia máxima, e que essa evolução é irreversível. Depois que um sistema alcança a distribuição de energia de maior probabilidade, o abandono dessa condição é relativamente improvável.

Toda a conceituação acima estava bem estabelecida, em termos mais gerais, antes de 1900. Agora chegamos às entranhas do cálculo de Planck. O espectro de corpo negro, sendo uma condição de equilíbrio termodinâmico, representará a distribuição particular de energia entre os ressonadores nas paredes da caixa e a luz no interior da caixa que tenha a máxima probabilidade. O professor berlinense tinha, portanto, diante de si a tarefa de calcular a probabilidade de cada distribuição possível de energia e achar a probabilidade máxima.

Vamos nos ater por um momento somente aos ressonadores. Aqui, mais uma vez, Planck tomou algumas ideias emprestadas de Boltzmann: a probabilidade de achar uma quantidade de energia específica nos ressonadores é proporcional ao *número de maneiras diferentes*, chamadas compleições, segundo as quais a energia pode se distribuir entre os ressonadores. Quanto mais compleições, maior é a probabilidade daquela quantidade de energia. Essa ideia pode ser compreendida com auxílio de uma analogia. Consideremos um par de dados. A probabilidade de sair um 4 com dois dados é maior do que a de sair 3, porque há três maneiras de se obter 4 (3 e 1, 2 e 2, 1 e 3) e só duas de obter 3 (1 e 2, 2 e 1).

A probabilidade de dar 5 é ainda mais alta, com quatro formas diferentes (1 e 4, 2 e 3, 3 e 2, 4 e 1). Esse método de calcular compleições é usado pelos operadores de cassinos para calcular as chances de lucro e prejuízo em Las Vegas.

Assim, Planck reduziu seu problema à contagem do número de diferentes maneiras em que determinada quantidade de energia pode ser distribuída entre um dado número de ressonadores — exatamente como se estivesse calculando de quantas formas dois quilos de areia podem ser derramados em quatro baldes na praia. Como ressalta Planck, se a energia pudesse ser subdividida em fragmentos cada vez menores, *ad infinitum*, haveria um número infinito de fragmentos de energia a serem distribuídos entre seus ressonadores, gerando um número infinito de maneiras de realizar tal exercício. O cálculo inteiro submergiria então num irremediável pântano de infinidades.

A ideia revolucionária de Planck, que ele chama de “ponto mais essencial do cálculo”, é considerar a energia em cada frequência não como infinitamente divisível, e sim composta de um número de partes iguais, indivisíveis (mais tarde batizadas como quanta). Essas partes são análogas aos grãos individuais em dois quilos de areia. E, embora haja um número bastante grande de grãos em dois quilos de areia, o número não é infinito. O número de maneiras de dividi-los em quatro baldes tem um limite definido. Planck, um teórico consumado, é capaz de embaralhar e contar qualquer número de grãos com um pouquinho de matemática e alguns rabiscos de caneta.

Guiado pela forma matemática da fórmula do corpo negro, Planck propõe que cada um de seus “grãos” de energia tenha um tamanho $h \times \nu$, em que ν é a frequência considerada e h é um número constante. (Doravante, vamos usar a notação abreviada, em que $h\nu$ representa $h \times \nu$. Mais genericamente, sempre que escrevermos duas grandezas lado a lado, isso significa que elas devem ser multiplicadas.) Para ilustrar o conceito, suponhamos que a frequência considerada fosse 2 e que h tivesse o valor de 3. Então cada grão individual, ou quantum, de energia teria a magnitude de $3 \times 2 = 6$. Se a energia total disponível nessa frequência fosse 24, então haveria $24 : 6 = 4$ quanta, cada um com energia 6, a serem distribuídos entre os ressonadores.

Antes de Planck, supunha-se que a energia podia ser dividida *ad infinitum*. Para entender a estranheza da proposta de Planck para a energia, consideremos um balanço num parquinho infantil. Quando o erguemos até determinada altura, estamos lhe dando energia gravitacional — quanto maior a altura, mais

energia. Ao soltar o balanço, ele oscila para a frente e para trás numa frequência, ν , determinada apenas pelo comprimento da corda para pequenos ângulos de soltura. Toda a nossa intuição sugere que podemos erguer o balanço a qualquer altura que desejarmos — ou seja, podemos lhe fornecer qualquer quantidade de energia. Mas a proposta de Planck decreta que a energia só pode ser fornecida ao balanço em “grãos” distintos, ou quanta, cada um de tamanho $h\nu$. Portanto, o balanço só pode adquirir certas energias definidas: $h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$, $4h\nu$ e assim por diante, separadas por intervalos iguais. O balanço não pode ter energias fracionárias, digamos, $2,8 \times h\nu$ ou $16,2 \times h\nu$. Evidentemente, não podemos erguer o balanço em qualquer altura que desejarmos. Na vida diária, a natureza quântica da energia não é observável porque as energias cotidianas são tão grandes comparadas com $h\nu$ que não temos consciência dos intervalos. (Para um balanço infantil típico, o intervalo entre as energias permitidas corresponde a mudanças de altura da ordem de um bilionésimo de trilionésimo de centímetro.)

Qual é esse número desconhecido h ? Comparando sua fórmula final com as medições da luz de corpo negro (consultar as referências de F. Kurlbaum, O. Lummer e E. Pringsheim), Planck foi mais tarde capaz de determinar o valor de h , sendo $h = 6,55 \times 10^{-27}$ erg segundos, agora chamado constante de Planck. O erg é uma unidade de energia. Por exemplo, uma moeda de um centavo caindo da altura de um metro e meio atinge o chão com uma energia de 400 mil (4×10^5) ergs. O significado da constante de Planck é tal que um ressonador vibrante elementar, com a frequência de um salto por segundo, pode alterar sua energia em incrementos de $6,55 \times 10^{-27}$ ergs. A extrema pequenez de tal número é a razão de os efeitos quânticos serem completamente invisíveis no mundo cotidiano, como discutimos no exemplo do balanço no parquinho infantil. A constante de Planck era uma nova constante fundamental da natureza, como a velocidade da luz — uma verdade eterna, presumivelmente válida em todos os tempos e lugares, aqui e do outro lado da galáxia.

Usando seu quantum de energia e a bem conhecida matemática de análise combinatória, Planck pôde então calcular o número de compleições para N ressonadores e P quanta, as duas equações envolvendo N e P . Essas fórmulas nos dão o número de maneiras que P quanta podem ser distribuídos entre N ressonadores. Outros resultados anteriormente estabelecidos da termodinâmica e da estatística mostram como maximizar o número de compleições sendo dadas as equações anteriores.

A fórmula final, quase a última equação do texto, fornece a densidade de energia da luz de corpo negro em cada faixa de frequência, ou seja, o espectro de corpo negro. Essa fórmula é idêntica à primeira adivinhação de Planck, mas agora Planck sabe o porquê daquela fórmula: a energia vem em unidades de $h\nu$. Partindo dessa premissa, segue-se a fórmula por necessidade lógica. Como foi afirmado, a fórmula de Planck depende de uma única variável, a temperatura, denotada pela letra grega θ . Depende também de duas constantes h e k . A constante k , chamada constante de Boltzmann, é uma unidade de entropia, a medida quantitativa de ordem e desordem. A constante de Boltzmann já era bem conhecida dos físicos e fora medida de forma aproximada, embora a fórmula do corpo negro de Planck tenha permitido que k fosse determinado com uma precisão muito maior que antes. A constante h era completamente nova. A constante h media o tamanho do quantum.

Em certo sentido, Planck obteve dois êxitos com seu trabalho, um conceitual e outro quantitativo. Conceitualmente, ele propôs que a energia não é uma grandeza contínua, divisível ad infinitum, como quer parecer com base na nossa vida diária, mas ela vem em unidades indivisíveis. A energia tem granularidade. Essa ideia não era menos portentosa do que o conceito do átomo de Demócrito, 2300 anos antes. Planck reconheceu claramente que seu novo trabalho era de extrema importância, escrevendo perto do começo do artigo que “eu obtive [...] relações que me parecem de considerável importância para outros ramos da física e também para a química”. Mas ele não podia ter previsto que o seu quantum de energia levaria a toda uma remodelação da física, chamada mecânica quântica, junto com uma concepção nova e radical de realidade. Por exemplo, um dos achados da mecânica quântica é que todos os objetos materiais se comportam como se existissem em muitos lugares ao mesmo tempo. Um resultado intimamente relacionado com isso é que o mundo físico não obedece a leis capazes de previsões precisas, mas se comporta dentro de limites de incerteza. Essas ideias serão discutidas mais a fundo nos capítulos relativos aos trabalhos de Einstein e Heisenberg.

Em segundo lugar, Planck tinha descoberto uma medida $h = 6,55 \times 10^{-27}$ erg segundos, para o tamanho do quantum elementar. É importante ressaltar que h não é simplesmente um número puro, mas tem unidades de energia e

tempo. Ele portanto estabelece uma “escala”. De forma similar, a altura média de um ser humano, em torno de 1,70 metro, tem unidades de comprimento e estabelece a escala de tamanhos para roupas, prédios e todas as coisas feitas para os seres humanos. A constante de Planck estabelece a escala para o quantum. Cientistas posteriores, como Niels Bohr e Werner Heisenberg, demonstraram que a constante quântica de Planck determina todos os tamanhos do domínio atômico e subatômico, até as mais ínfimas estruturas de tempo e espaço. O diâmetro de um átomo depende de h . O Princípio da Incerteza de Heisenberg depende de h . O menor tamanho possível para transistores e computadores depende de h . A densidade teórica da matéria no nascimento do universo depende de h . O menor incremento de tempo onde o tempo tem algum significado depende de h . Como disse Einstein em sua elegia a Planck em 1948, “ele mostrou de forma convincente que além da estrutura atomística da matéria existe um tipo de estrutura atomística da energia [...]. Essa descoberta tornou-se a base para toda a pesquisa em física do século xx”.⁹

No tom dos escritos de Planck, percebemos um homem que é claro e direto, consciente de ter feito uma grande descoberta e ainda tendo o cuidado de manter as rédeas de seu entusiasmo. Foi uma grande ironia na carreira de Planck ele ter proposto, a despeito de sua natureza contida e aspirações modestas, uma hipótese que viria a mudar toda a física. Mesmo depois de outros cientistas terem reconhecido a natureza revolucionária de seu trabalho, o próprio Planck escreveu em 1910 que “a introdução do quantum [no resto da física] deveria ser feita da forma mais conservadora possível, isto é, só deveriam ser feitas alterações que demonstrassem ser absolutamente necessárias”.¹⁰

Planck respeitava profundamente a lógica, a existência de leis e a absoluta confiabilidade do mundo físico. Ao mesmo tempo, entendia os limites da ciência nas questões humanas. Mais tarde, escreveu ensaios filosóficos sobre a natureza imprevisível da imaginação e do comportamento humanos. Sua própria vida foi repleta de acidentes trágicos. A primeira esposa de Planck, Marie Merck, morreu em 1909. Um filho, Karl, morreu durante a Primeira Guerra Mundial, e suas duas filhas, Margarete e Emma, faleceram ao darem a luz, em 1917 e 1919, constituindo um par de parênteses sombrios para o ano em que recebeu o prêmio Nobel. Durante a Segunda Guerra, Planck, um homem respeitado tanto por sua integridade pessoal como pela sua atuação no ramo da física, uma figura paterna para Einstein, ficou dilacerado entre princípios con-

flitantes. Embora se opusesse fortemente às políticas nazistas, decidiu permanecer na Alemanha por um senso de dever. Em 1944, outro de seus filhos foi executado por suspeita de cumplicidade num complô para assassinar Hitler. Nesse mesmo ano, uma bomba dos Aliados lançada sobre Berlim destruiu a maior parte dos livros e manuscritos de Planck.