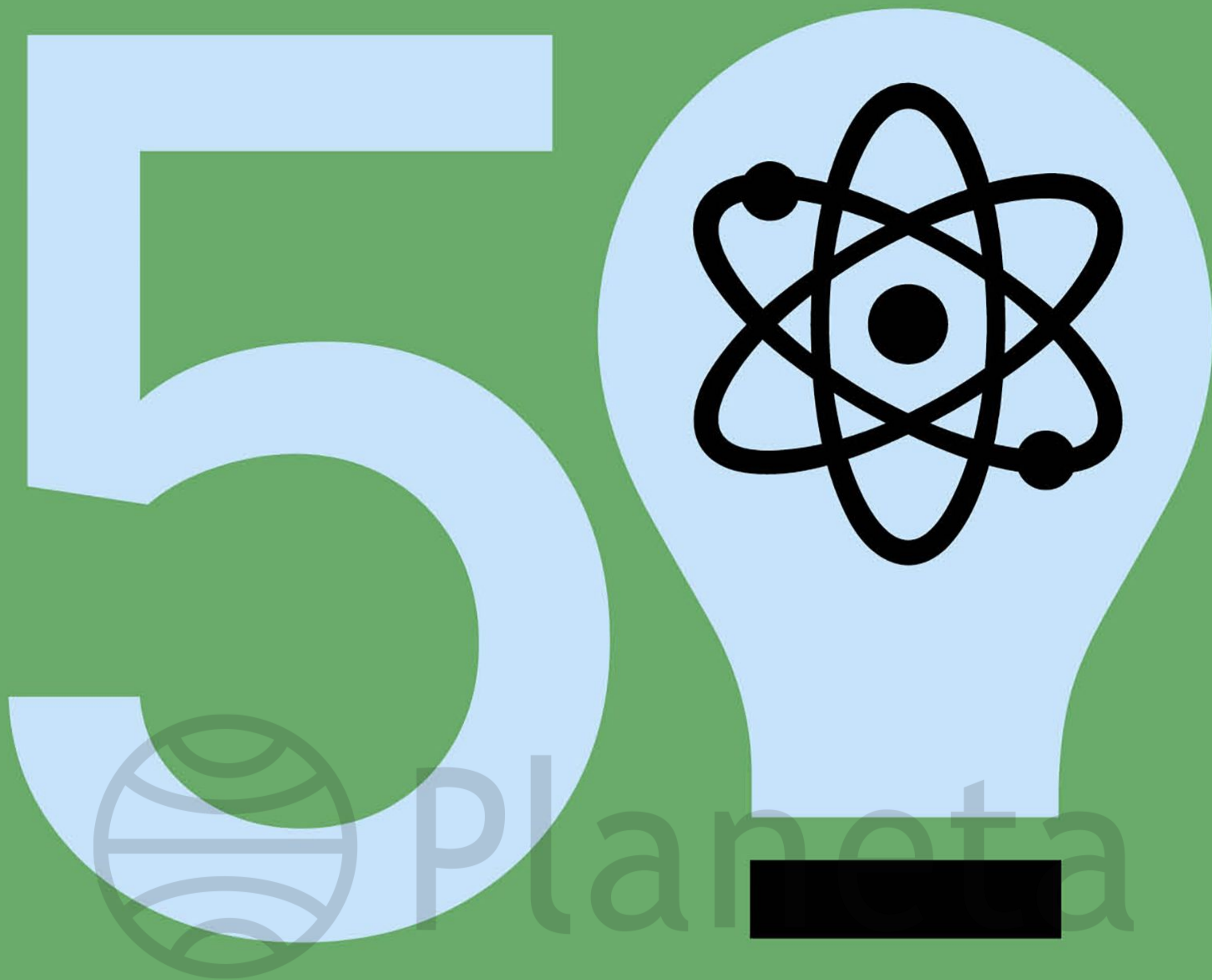

JOANNE BAKER



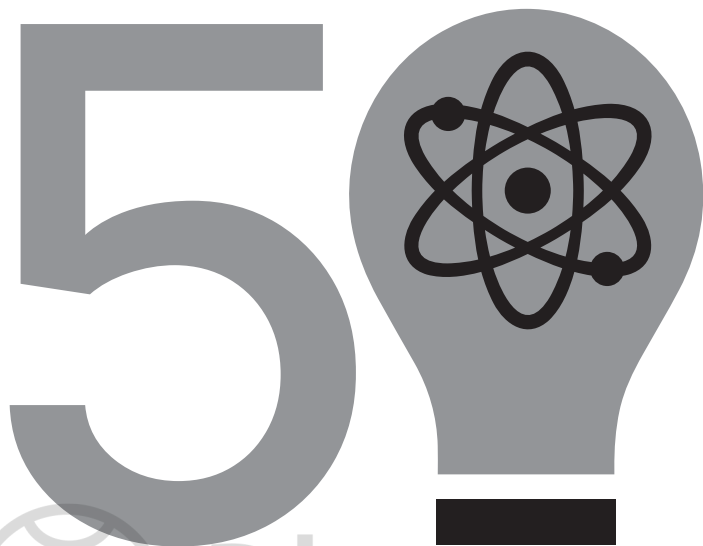
IDEIAS DE

FÍSICA QUÂNTICA

QUE VOCÊ PRECISA CONHECER

 **Planeta**

JOANNE BAKER



IDEIAS DE

FÍSICA QUÂNTICA

QUE VOCÊ PRECISA CONHECER

Tradução de
Rafael Garcia

 **Planeta**

TRECHO ANTECIPADO PARA DIVULGAÇÃO. VENDA PROIBIDA

Copyright © Joanne Baker, 2013
Copyright © Editora Planeta do Brasil, 2016, 2022
Copyright da tradução © Rafael Garcia
Título original: *50 quantum physics ideas you really need to know*
Todos os direitos reservados.

Preparação: Magno Paganelli
Revisão: Ana Paula Felipe e Pamela Oliveira
Diagramação: Balão Editorial
Capa: Filipa Damião Pinto (@filipa_) | Foresti Design

INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
ANGÉLICA ILACQUA CRB-8/7057

Baker, Joanne

50 ideias de física quântica que você precisa conhecer/ Joanne Baker;
tradução de Rafael Garcia. – 2. ed. – São Paulo : Planeta, 2021.

216 p.

ISBN 978-65-5535-615-1

Título original: *50 quantum physics ideas you really need to know*

1. Teoria quântica. 2. Física quântica. I. Título II. Garcia, Rafael

21-5405

CDD 530.12

Índice para catálogo sistemático:
1. Teoria quântica

Ao escolher este livro, você está apoiando o
manejo responsável das florestas do mundo

2022

Todos os direitos desta edição reservados à
EDITORA PLANETA DO BRASIL LTDA.
Rua Bela Cintra, 986, 4º andar – Consolação
São Paulo – SP – 01415-002
www.planetadelivros.com.br
faleconosco@editoraplaneta.com.br

TRECHO ANTECIPADO PARA DIVULGAÇÃO. VENDA PROIBIDA

Sumário

Introdução 7

LIÇÕES LUMINOSAS

- 01. Conservação de energia 8
- 02. A lei de Planck 12
- 03. Eletromagnetismo 16
- 04. Franjas de Young 20
- 05. Velocidade da luz 24
- 06. Efeito fotoelétrico 28

ENTENDENDO OS ELÉTRONS

- 07. Dualidade onda-partícula 32
- 08. O átomo de Rutherford 36
- 09. Saltos quânticos 40
- 10. Linhas de Fraunhofer 44
- 11. Efeito Zeeman 48
- 12. Pauli e o princípio da exclusão 52

MECÂNICA QUÂNTICA

- 13. Mecânica de matriz 56
- 14. Equações de onda de Schrödinger 60
- 15. Princípio da incerteza de Heisenberg 64
- 16. A interpretação de Copenhagen 68
- 17. O gato de Schrödinger 72
- 18. O paradoxo EPR 76
- 19. Tunelamento quântico 80
- 20. Fissão nuclear 84
- 21. Antimatéria 88

CAMPOS QUÂNTICOS

- 22. Teoria quântica de campos 92
- 23. Desvio de Lamb 96
- 24. Eletrodinâmica quântica 100
- 25. Decaimento beta 104

26. Interação fraca 108

27. *Quarks* 112

28. Dispersão inelástica profunda 116

29. Cromodinâmica quântica 120

30. O Modelo Padrão 124

COSMO QUÂNTICO

- 31. Quebra de simetria 128
- 32. O bóson de Higgs 132
- 33. Supersimetria 136
- 34. Gravidade quântica 140
- 35. Radiação Hawking 144
- 36. Cosmologia quântica 148
- 37. Teoria das cordas 152

IRREALIDADE QUÂNTICA

- 38. Muitos mundos 156
- 39. Variáveis ocultas 160
- 40. Desigualdades de Bell 164
- 41. Experimentos de Aspect 168
- 42. Borracha quântica 172

APLICAÇÕES QUÂNTICAS

- 43. Decoerência quântica 176
- 44. *Qubits* 180
- 45. Criptografia quântica 184
- 46. Pontos quânticos 188
- 47. Supercondutividade 192
- 48. Condensados de Bose-Einstein 196
- 49. Biologia quântica 200
- 50. Consciência quântica 204

Glossário 208

Índice 210

01 Conservação de energia

A energia alimenta o movimento e a mudança. Ela é um elemento transformador que adquire muitas formas, desde o calor que emana da madeira em chamas até a velocidade da água que escorre morro abaixo. Ela pode se transmutar de um tipo em outro. Mas a energia nunca é criada ou destruída. Ela sempre se conserva como um todo.

A ideia da energia como causa de transformações já era familiar entre os gregos antigos – energia significa atividade em grego. Sabemos que sua magnitude cresce de acordo com a força que aplicamos em um objeto e a distância de seu deslocamento ao ser submetido a ela. Mas a energia ainda é um conceito nebuloso para cientistas. Foi investigando a natureza da energia que as ideias da física quântica surgiram.

Quando empurramos um carrinho de supermercado, ele se move para frente porque damos energia a ele. O carrinho é movido por substâncias químicas em combustão dentro de nossos corpos, transmitidas pela força de nossos músculos. Quando arremessamos uma bola, também estamos convertendo energia química em movimento. O calor do Sol vem da fusão nuclear, na qual núcleos de átomos se esmagam uns contra os outros e emitem energia no processo.

A energia tem diferentes trajes, de balas de revólver a trovoadas. Mas suas origens podem ser sempre rastreadas até outro tipo. A pólvora é que alimenta o tiro de uma arma. Movimentos moleculares em uma nuvem atizam a eletricidade estática que é liberada como uma grande faísca. Quando a energia muda de uma forma para outra, ela faz com que a matéria se mova ou se altere.

Como a energia muda apenas de forma, ela nunca é criada nem destruída. Ela é conservada: o total de energia no Universo, ou em qualquer sistema isolado por completo, continua sempre o mesmo.

linha do tempo

c. 600 a.C.

Tales de Mileto reconhece que materiais mudam de forma

1638 d.C.

Galileu identifica trocas de energia em um pêndulo

1676

Leibniz dá à energia o nome de *vis viva*

1807

Young cria o termo “energia”

Conservação Na Grécia antiga, Aristóteles foi o primeiro a se dar conta de que a energia parecia se conservar, apesar de não ter meios de provar isso. Séculos se passaram até que os primeiros cientistas (conhecidos então como filósofos naturais) entendessem as diferentes formas de energia individualmente e depois as conectassem.

Galileu Galilei fez experimentos com um pêndulo oscilante no começo do século XVII. Ele percebeu que havia equilíbrio entre a velocidade com que o prumo do pêndulo se movia no centro da oscilação e a altura que ele atingia no fim. Quanto mais se erguia o prumo antes de soltá-lo, mais rápido ele passava pelo centro, chegando a uma altura similar no outro lado. Ao longo de um ciclo completo, a energia era convertida de “potencial gravitacional” (associado à altura acima do chão) para energia “cinética” (velocidade).

No século XVII, o matemático Gottfried Leibniz se referia à energia como uma *vis viva*, ou seja, uma força vital. O físico polímata Thomas Young, do século XIX, foi o primeiro a usar a palavra energia com o sentido que damos a ela hoje. Mas continuou a indefinição sobre o que a energia é.

Apesar de atuar sobre grandes corpos, de uma estrela a até mesmo o Universo inteiro, a energia é essencialmente um fenômeno de pequena escala. Energia química surge dos átomos e moléculas reordenando suas estruturas durante reações. A luz e outras formas de energia eletromagnética são transmitidas como ondas, que interagem com átomos. O calor é um reflexo de vibrações moleculares. Uma barra de aço comprimida aprisiona energia elástica em sua estrutura.

A energia está intimamente ligada à natureza da própria matéria. Em 1905, Albert Einstein revelou que massa e energia são equivalentes. Sua famosa equação $E = mc^2$ afirma que a energia (E) liberada pela destruição de uma massa (m) é igual a m vezes a velocidade da luz (c) ao quadrado. Como a luz viaja a 300 milhões de metros por segundo (no espaço vazio), mesmo a destruição de uns poucos átomos libera uma enorme quantidade de energia. Nosso Sol e as usinas nucleares produzem energia dessa maneira.

1850

Rudolf Clausius define entropia e a segunda lei

1860

Maxwell postula seu demônio

1901

Max Planck descreve os *quanta* de energia

1905

Einstein mostra que massa e energia são equivalentes

Outras regras Propriedades ligadas à energia também podem ser conservadas. O momento linear é uma delas. Momento, o produto da massa vezes a velocidade, é uma medida de quão difícil é desacelerar um corpo em movimento. Um carrinho de supermercado pesado tem mais momento do que um vazio, e é difícil pará-lo. Momento tem uma direção, além de um tamanho, e ambos os aspectos são conservados juntos. Isso é bem aplicado na sinuca – se você acerta uma bola parada com uma bola em movimento, a soma das trajetórias finais de ambas é igual à velocidade e à direção da primeira bola em movimento.

O momento também é conservado nos objetos em rotação. Para um objeto que gira em torno de um ponto, o momento angular é definido como o produto do momento linear do objeto vezes a sua distância desse ponto. Patinadores conservam seu movimento angular quando giram. Eles rodam devagar quando seus braços e pernas são estendidos; mas aceleram o giro ao recolher seus membros para perto do corpo.

Outra regra é que o calor sempre é transmitido de corpos quentes para corpos frios. Essa é a segunda lei da termodinâmica. O calor é a medida de vibrações atômicas, portanto átomos chacoalham mais e são mais desorganizados dentro de corpos quentes do que de corpos frios. O nome que físicos dão à quantidade de desordem ou aleatoriedade é “entropia”. A segunda lei determina que a entropia sempre aumenta dentro de qualquer sistema fechado sem influências externas.

Como funcionam as geladeiras, então? A resposta é que elas criam calor como um subproduto – como é possível sentir ao se por a mão atrás delas. Geladeiras não violam a segunda lei da termodinâmica;

“É simplesmente estranho o fato de podermos calcular um número e, após terminarmos de ver a natureza fazer seus truques, calcular o número de novo e ele ser o mesmo.”

**Richard Feynman,
em *The Feynman Lectures on Physics*, 1961**

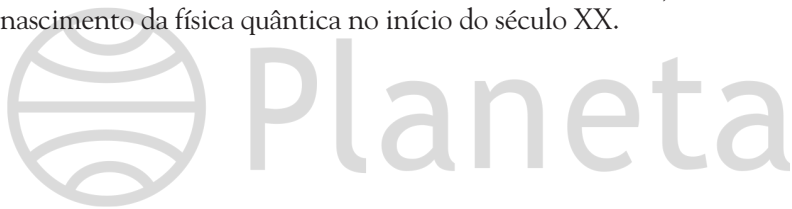
elas fazem uso dela ao criar mais entropia para aquecer o ar do que aquela que é extraída para refrigeração. Na média, levando-se em conta tanto a geladeira quanto as moléculas de ar fora dela, a entropia aumenta.

Muitos inventores e físicos tentaram elaborar maneiras de burlar a segunda lei da termodinâmica, mas ninguém teve sucesso. Sonharam com esquemas para construir máquinas de movimento perpétuo, desde uma xícara que se enche e se esvazia sucessivamente até uma roda que impulsiona sua própria rotação com pesos deslizando ao longo das hastes de seu raio. Mas quando se analisa com cuidado esses mecanismos, todos eles deixam energia escapar – por meio de calor ou ruído, por exemplo.

Em 1806, o físico escocês James Clerk Maxwell elaborou um experimento imaginário que poderia criar calor sem o aumento de entropia – apesar de este nunca ter sido posto em funcionamento sem uma fonte de energia externa. Maxwell imaginou juntar duas caixas de gás, ambas com a mesma temperatura, conectadas por um pequeno orifício. Se um dos lados se aquece, as partículas desse lado se movem mais rápido. Normalmente, algumas delas passariam para o outro lado através do orifício, fazendo a temperatura de ambos os lados se igualar gradualmente.

Mas Maxwell imaginou que o oposto também seria possível – com algum mecanismo, que ele imaginou com um pequeno demônio que separava moléculas (conhecido como “demônio de Maxwell”). Se tal mecanismo pudesse ser concebido, ele poderia fazer moléculas rápidas do lado mais frio irem para a caixa mais quente, violando a segunda lei da termodinâmica. Nenhuma maneira de fazer isso jamais foi descoberta, portanto a segunda lei prevalece.

Ideias e regras sobre como transportar e compartilhar energia, acopladas a um maior conhecimento sobre a estrutura atômica, levariam ao nascimento da física quântica no início do século XX.



A ideia condensada: Energia que muda formas

02 A lei de Planck

Ao solucionar o problema de por que o brilho do carvão em brasa é vermelho e não azul, o físico alemão Max Planck deu início a uma revolução que levou ao nascimento da física quântica. Buscando descrever tanto a luz quanto o calor em suas equações, ele segmentou a energia em pequenos pacotes, ou *quanta*, e durante esse processo explicou por que corpos aquecidos emitem tão pouca luz ultravioleta.

É inverno e você está com frio. Você imagina o aconchegante brilho de uma lareira acesa – as brasas vermelhas e as chamas amarelas. Mas por que o brilho das brasas é vermelho? Por que a ponta de um atizador de ferro também fica vermelha quando colocada na lareira?

O carvão em chamas atinge centenas de graus Celsius. Lava vulcânica é ainda mais quente, aproximando-se dos 1.000 °C. Lava derretida brilha mais intensamente e pode emergir laranja ou amarela, assim como aço fundido à mesma temperatura. Lâmpadas com filamentos de tungstênio são ainda mais quentes. Com temperatura de dezenas de milhares de graus Celsius, similar à da superfície de uma estrela, seu brilho é branco.

Radiação de corpo negro – Objetos emitem luz de frequências progressivamente mais altas à medida que se aquecem. Especialmente para materiais escuros, como carvão e ferro – que são eficientes em absorver e transmitir calor – a faixa de frequências irradiadas a uma temperatura em particular tem uma forma similar, conhecida como “radiação de corpo negro”.

A energia na forma de luz, em geral, é irradiada com uma “frequência de pico”, que cresce com a temperatura, indo do vermelho em direção ao azul. A energia também se espalha para ambos os lados, aumentando de força na direção do pico e declinando ao se afastar dele. O resultado é um espectro na forma de montanha, conhecido como “curva da radiação de corpo negro”.

linha do tempo

1860

A expressão “corpo negro” é criada por Kirchoff

1896

Wien apresenta sua lei de radiação de alta frequência

1900

Rayleigh apresenta sua lei da catástrofe ultravioleta

1901

Planck publica a lei da radiação de corpo negro

Carvão em brasa pode emanar a maior parte de sua luz na faixa do laranja, mas também emite um pouco de vermelho, frequência mais baixa, e algum amarelo, de frequência mais alta. Mas não emite quase nada de azul. Aço fundido, mais quente, desloca esse padrão para frequências mais altas, para emitir sobretudo luz amarela, com algum vermelho-alaranjado e um toque de verde.

A catástrofe ultravioleta No final do século XIX, físicos conheciam a radiação de corpo negro e já tinham medido seu padrão de frequências. Mas eles não conseguiam explicá-lo. Diferentes teorias eram capazes de descrever parte desse comportamento, mas não ele todo. Wilhelm Wien cunhou uma equação que previa a rápida atenuação de frequências azuis. Enquanto isso, Lorde Rayleigh e James Jeans explicavam o aumento do espectro vermelho. Mas nenhuma fórmula era capaz de descrever ambas as extremidades.

A solução de Rayleigh e Jeans sobre o espectro crescente era particularmente problemática. Sem um modo de estancar o aumento, a teoria previa uma liberação infinita de energia em comprimentos de onda na faixa do ultravioleta ou menores. Esse problema era conhecido como a “catástrofe ultravioleta”.

A solução veio do físico alemão Max Planck, que na época estava tentando unificar as físicas do calor e da luz. Planck gostava de pensar matematicamente e de atacar problemas físicos a partir do zero, começando do básico. Fascinado pelas leis fundamentais da física, notavelmente a segunda lei da termodinâmica e as equações do eletromagnetismo de Maxwell, ele decidiu provar como ambas estavam conectadas.

Temperatura da cor

A cor de uma estrela denuncia sua temperatura. O Sol, a 6.000 kelvins, aparece amarelo, enquanto a superfície mais fria da gigante vermelha Betelgeuse (na constelação de Órion) tem metade dessa temperatura. A superfície excruciante de Sirius, a estrela mais brilhante do céu, com brilho branco azulado, chega aos 30.000 kelvins.

“A descoberta científica e o conhecimento científico só foram alcançados por aqueles que os perseguiram sem terem em vista um propósito prático ou coisa do tipo.”

Max Planck, 1959

1905

Einstein identifica o fóton e elimina a catástrofe ultravioleta

1918

Max Planck recebe o Prêmio Nobel

1994

A equipe do COBE publica o espectro de corpo negro do fundo cósmico de micro-ondas (CMB)

2009

A sonda espacial Planck é lançada

MAX PLANCK (1858-1947)

A música foi o primeiro amor de Max Planck na escola, em Munique. Quando ele perguntou a um músico onde ele deveria ir para estudar música, este respondeu que se ele precisava fazer essa pergunta, era melhor procurar outra coisa para fazer. Ele se dedicou à física, mas seu professor reclamava que a física era uma ciência completa: não havia nada mais para descobrir. Felizmente, Planck o ignorou e prosseguiu até desenvolver o conceito de *quanta*. Planck amargou as mortes de sua esposa e de seus dois filhos nas guerras mundiais. Permanecendo na Alemanha, ele conseguiu reerguer a pesquisa física depois da Segunda Guerra. Hoje os prestigiosos institutos Max Planck carregam seu nome.

Quanta Planck manipulava suas equações de modo confiante, sem se preocupar com o que isso poderia significar na vida real. Para tornar a matemática mais fácil de ser manipulada, ele bolou um truque esperto. Parte do problema era o eletromagnetismo ser descrito em termos de ondas. A temperatura, por outro lado, é um fenômeno estatístico, com a energia do calor compartilhada entre muitos átomos ou moléculas. Planck então decidiu tratar o eletromagnetismo da mesma forma que a termodinâmica. No lugar de átomos, ele imaginou campos eletromagnéticos gerados por pequenos osciladores. Cada um poderia assumir certa quantia da energia eletromagnética, que era compartilhada entre muitas dessas outras entidades elementares.

Planck atribuiu uma frequência a cada uma dessas energias, de modo que $E = h\nu$, em que E é energia, ν é a frequência da luz e h é um fator constante, hoje conhecido como constante de Planck. Essas unidades de energia foram batizadas com o termo *quanta*, do latim.

Nas equações de Planck, os *quanta* de radiação de alta frequência têm energias correspondentemente altas. Como existe um limite máximo para o total de energia disponível, não podem existir muitos *quanta* de alta energia num sistema. É mais ou menos como em economia. Se você possui R\$ 99,00 na sua carteira, é provável que haja mais notas de valor menor do que notas de valor maior. É possível que você tenha nove notas de R\$ 1,00, quatro notas de R\$ 10,00 ou mais, mas apenas uma nota de R\$ 50,00, com sorte. Do mesmo modo, os *quanta* de alta energia são raros.

Planck calculou a faixa de energia mais provável para um conjunto de *quanta* eletromagnéticos. Em média, a maior parte da energia estava na parte central – explicando a forma de montanha do espectro de corpos negros. Em 1901, Planck publicou sua lei, que foi bastante aclamada por ter resolvido o problema perturbador da “catástrofe ultravioleta”.