

Ficha Técnica

Projecto Faraday

Projecto de intervenção no ensino da Física no secundário.

Financiamento

Fundação Calouste Gulbenkian.

Execução

Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Escolas Participantes

- ES Filipa de Vilhena
- ES Fontes Pereira de Melo
- ES Garcia de Orta
- ES da Maia
- ES de Santa Maria da Feira

Coordenação

- J. M. B. Lopes dos Santos
- Manuel Joaquim Marques

Portal

URL: <http://www.fc.up.pt/faraday>

Texto do 10º Ano

Redactor Principal

J. M. B. Lopes dos Santos

Colaboração e revisão

- Elisa Arieiro
- Carlos M. Carvalho
- Manuel Joaquim Marques

Actividades

Autores

- Carlos M. Carvalho
- Elisa Arieiro
- J. M. B. Lopes dos Santos
- Manuel Joaquim Marques
- Nuno Alexandre Vaz
- Nuno Nunes

Colaboração

- Joaquim Agostinho Moreira

Parte II

Energia, Calor e Temperatura

Conteúdo

Ficha Técnica	i
II Energia, Calor e Temperatura	75
4 Temperatura	85
4.1 Introdução	85
4.1.1 A temperatura é importante?	85
4.1.2 O que é temperatura?	89
4.2 Temperatura e dissipação	89
4.3 Temperatura e energia	91
4.3.1 Temperatura final de uma mistura	91
4.3.2 Capacidade térmica mássica.	93
4.3.3 Capacidade térmica mássica da água e o clima	96
4.4 Calor de Fusão	98
4.4.1 Temperatura e equilíbrio térmico	99
4.5 Actividades, questões e problemas	100
4.5.1 Actividades	100
4.5.2 Problemas	101
4.5.3 Desafios	103
5 Calor e Trabalho	105
5.1 Trabalho em várias formas	105
5.1.1 Expansão e compressão de gases	106
5.1.2 Trabalho eléctrico	107

5.2	Efeito de Joule	111
5.2.1	O joule e a caloria	113
5.2.1.1	Experiência de Joule	114
5.3	Calor	115
5.4	Primeira lei da termodinâmica	117
5.5	Como é que a energia se transfere como calor?	119
5.5.1	Condução	120
5.5.1.1	Condução numa janela	120
5.5.1.2	Isolamento térmico	121
5.5.2	Convecção	122
5.6	Actividades, Questões e Problemas	124
5.6.1	Actividades	124
5.6.2	Problemas	124
6	Radiação	127
6.1	Radiação Electromagnética	127
6.1.1	O espectro electromagnético	127
6.1.2	Intensidade de radiação	129
6.2	Interacção da radiação com a matéria	131
6.2.0.1	Difusão e absorção	131
6.2.0.2	Emissão	132
6.2.1	Radiação do corpo negro	133
6.2.1.1	Lei de Kirchhoff	133
6.2.1.2	Lei de Planck	134
6.2.2	Radiação cósmica de fundo	136
6.2.3	Radiação e a Primeira Lei da Termodinâmica	136
6.3	Actividades, Questões e Problemas	138
6.3.1	Actividades	138
6.3.2	Problemas	139

7	A hipótese atómica	141
7.1	O facto mais importante	141
7.2	Movimento Browniano	143
7.2.1	A energia cinética média de uma gota.	144
7.3	Energia Cinética e Temperatura	146
7.3.1	Interpretação microscópica de temperatura.	146
7.3.1.1	Dissipação e Temperatura	147
7.3.1.2	Equilíbrio térmico	148
7.3.1.3	Condução de calor	148
7.3.2	Capacidade térmica molar	148
7.3.3	Calor Latente	150
7.3.4	Temperatura Absoluta	151
7.4	Conservação de energia e dissipação	153
7.5	Problemas, exercícios e actividades	154
7.5.1	Actividades	154
7.5.2	Problemas	154

Lista de Figuras

4.1	Algumas temperaturas importantes. Na história do Universo poderão ter ocorrido temperaturas ainda mais altas que 10^{13} K.	87
4.2	Se tentarmos elevar o recipiente A acima do banho de hélio superfluido, o hélio sobe as paredes de A e escorre de volta para o banho. Esta é apenas uma das propriedades surpreendentes do hélio líquido, no estado superfluido, que ocorre abaixo de uma temperatura de 2,17 K.	88
4.3	A força \vec{F} realiza trabalho sobre o sistema corpo mais mesa. Mas o corpo não acelera por causa da força de atrito. Para onde vai a energia?	89
4.4	Se misturarmos duas porções de água a temperaturas diferente, qual é a temperatura final?	91
4.5	Aparelho de medição de energia.	95
4.6	Se $T_1 < T_2$, a energia final do sistema <i>A</i> é menor que a do sistema <i>B</i> . Que podemos concluir sobre as energias <i>iniciais</i> ?	98
4.7	Travão de disco.	101
5.1	Se o pistão se deslocar de Δx , o volume do gás varia de $\Delta V = A \times (x + \Delta x) - A \times x = A \times \Delta x$, em que <i>A</i> é a área da superfície do pistão.	106
5.2	Um circuito eléctrico com gerador, resistência e dois aparelhos de medida, amperímetro (A) e voltímetro (V); (a) representação semi-realista; (b) representação simbólica.	109
5.3	Resultados de uma experiência de aquecimento de uma mistura de água e gelo.	111

- 5.4 James Prescott Joule, (1818-1889). Físico inglês, nascido em Manchester, foi pupilo do químico John Dalton. A sua experiência de aquecimento de água com uma roda de pás accionada por pesos (aparelho à direita), foi um contributo fundamental para a clarificação do conceito de calor. Esta experiência permitiu-lhe determinar a relação entre caloria e a unidade de energia mecânica (que recebeu o seu nome), o **joule**. Joule descobriu também a expressão que exprime a energia dissipada numa resistência que escreveu na forma $P = RI^2$ (efeito de Joule). [6] 113
- 5.5 Um reprodução do caderno de notas de Joule com um esquema do seu aparelho (Manchester Museum of Science and Industry, UMIST collection). . . . 114
- 5.6 Se A e B trocam calor, Q , e trabalho, W , apenas entre si, a energia do sistema S não varia. 118
- 5.7 No interior do vidro de uma janela, a temperatura varia entre o valor da temperatura interior, T_i , e exterior, T_e 120
- 6.1 Espectro Electromagnético. 128
- 6.2 Emissão (a) e absorção de radiação (b). O comprimento de onda λ é inversamente proporcional à diferença de energia $E_2 - E_1$ 128
- 6.3 A energia incidente sobre a Terra é a que passa num disco de raio igual a R_T 131
- 6.4 A intensidade $I(\lambda, \Delta\lambda)$ é intensidade de radiação cujo comprimento de onda está no intervalo da figura. 131
- 6.5 Intensidade espectral, $I_{\text{cn}}(\lambda, \Delta\lambda)$ da radiação do corpo negro para várias temperaturas (lei de Planck). A banda colorida mostra, aproximadamente, a gama de radiação visível. As curvas de intensidade foram divididas pelo valor do máximo da curva de $T = 3000\text{ K}$ 135
- 6.6 Os dados da medição da radiação cósmica de fundo pelo satélite COBE não se conseguem distinguir da curva téorica da lei da Planck (vermelho).[4] 137

- 7.1 Richard Feynman foi, sem dúvida, o mais mediático físico do século XX. As suas lições [2] são um dos mais notáveis livros de texto de Física (©AIP). . . 141
- 7.2 Imagem de STM de uma estrutura artificial de 48 átomos de Ferro numa superfície de Cobre[3]. . . . 142
- 7.3 Imagem de microscópio de uma suspensão de leite em água. (ampliação $\approx 500\times$). As manchas claras e escuras são gotas de leite em diferentes planos. . 143
- 7.4 Exemplo de equilíbrio dinâmico. Inicialmente a energia é superior ao valor de equilíbrio e diminui. Mas depois de equilibrada continua a flutuar em torno do valor médio. 146

Capítulo 4

Temperatura

4.1 Introdução

Temos à frente dois copos com água. São idênticos, têm a mesma quantidade de água, igualmente transparente; a massa é a mesma; a água ocupa o mesmo volume e está perfeitamente imóvel. Nada distingue os dois sistemas, aparentemente. Mas tocando na água com um dedo, verifica-se que os seus estados são, efectivamente, muito diferentes: um dos copos tem água quente e o outro água fria.

Apesar das primeiras aparências, a água está em estados diferentes em cada um dos copos, e o nosso sentido do tacto permite distingui-los, pois permite-nos sentir uma diferença de **temperatura**. Os termómetros são instrumentos capazes de traduzir esta grandeza, que é perceptível pelo nosso sentido do tacto, em variações de outras grandezas mais directamente **quantificáveis**: o volume de uma coluna de mercúrio, por exemplo, ou uma diferença de potencial eléctrica.

Quantificar: atribuir um valor numérico.

4.1.1 A temperatura é importante?

De que maneira!

Um desvio de mais de $0,5^{\circ}\text{C}$ da temperatura normal do nosso corpo é suficiente para sabermos (e sentirmos) que não estamos bem. A necessidade de manter a temperatura em limites aceitáveis para o nosso corpo foi, e é, um dos grandes estímulos para o desenvolvimento da cultura e civilização humanas.

▷ Temperatura do corpo

■ Escalas de Temperatura ■

A Escala Internacional de Temperatura de 1990 estabelece como unidade de temperatura o **kelvin** (símbolo, K). Note-se que a unidade é o **kelvin**, não o *grau kelvin*. Veremos mais tarde que existe um limite inferior de temperatura, o Zero Absoluto, que a escala Kelvin toma como 0 K.

No dia-a-dia continuamos a usar a escala Celsius, definida a partir dos pontos de congelamento (0°C) e ebulição (100°C) de água pura à pressão atmosférica normal (nível do mar). A relação entre estas duas escalas é muito simples. Sendo T a temperatura em **kelvin** e t em graus Celsius,

$$T = t + 273,15.$$

Esta relação significa que a diferença de duas temperaturas em **kelvin** e em graus Celsius é expressa pelo mesmo número,

$$T_1 - T_2 = (t_1 + 273,15) - (t_2 + 273,15) = t_1 - t_2.$$

Por exemplo, a diferença entre as temperaturas de ebulição e congelamento da água é 100 K e 100°C .

Existe ainda uma escala de temperatura muito usada em países de tradição anglo-saxónica, a escala Fahrenheit (unidade, grau Fahrenheit, $^{\circ}\text{F}$). A tabela seguinte mostra as temperaturas de alguns pontos de referência nestas três escalas. Na escala Fahrenheit há 180°F entre os pontos de congelamento e ebulição da água. Uma diferença de 1 K ou 1°C corresponde então a $1,8^{\circ}\text{F}$.

Unidade	kelvin	grau Celsius	grau Fahrenheit
Símbolo	K	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$
Ebulição da água	373,15	100	212
Congelamento da água	273,15	0	32
Zero Absoluto	0	-273,15	-459,67

Caixa 4.1: Escalas de temperatura

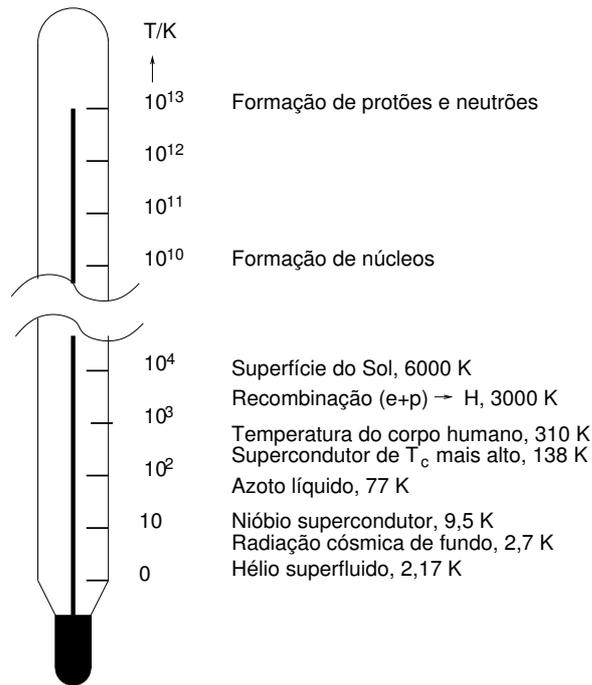


Figura 4.1: Algumas temperaturas importantes. Na história do Universo poderão ter ocorrido temperaturas ainda mais altas que 10^{13} K.

Um dos problemas ambientais mais controversos, o efeito de estufa, tem a ver, precisamente, com a questão da temperatura média à superfície da Terra. Uma subida de apenas alguns graus pode ter consequências extremamente graves, como a extinção de inúmeras espécies, a subida do nível das águas do mar, alterações nos níveis de precipitação, etc.

Mas não precisamos de nos centrar nas necessidades da nossa espécie para percebermos a importância do conceito de temperatura na compreensão do nosso universo. A água, elemento fundamental para todas as espécies vivas, só existe no estado líquido (à pressão normal) entre 0°C e 100°C . As reacções químicas, que determinam a formação dos compostos, dependem da temperatura. Por exemplo, muitas das reacções de combustão, que constituem uma das nossas principais fontes de energia, requerem uma temperatura bastante mais elevada que a temperatura ambiente para se poderem iniciar. Depois disso, a energia que libertam é suficiente para manter a temperatura elevada.

A própria constituição da matéria depende da temperatura. Acima de cerca de 3000 K, os electrões e os prótons dos átomos de hidrogé-

▷ O ambiente

▷ Reacções químicas

▷ Constituição da matéria

nio começam a separar-se. A temperaturas da ordem das dezenas de milhares de kelvin, todos os átomos e moléculas se separam nos respectivos electrões e núcleos constituintes. A temperaturas ainda mais altas, da ordem de dez mil milhões de kelvin, 10^{10} K, os próprios núcleos se separam nos seus constituintes, prótons e neutrões. E a temperaturas mil vezes superiores, 10^{13} K, até os prótons e neutrões deixam de existir como partículas estáveis, existindo apenas um gás de *quarks*, os seus constituintes.

O modelo padrão da origem do Universo, teoria do Big-Bang, afirma que o Universo passou, na sua história, por estes estados de temperaturas muito elevadas e que a sua constituição era muito diferente daquilo que é hoje.

▷ Baixas temperaturas

No sentido oposto, temperaturas baixas, também abundam as surpresas. Nos locais mais frios do planeta Terra a temperatura pode descer até -80 °C, ou 193 K. Nos laboratórios de baixas temperaturas é possível ir ainda mais próximo do zero absoluto. A 77 K, -196 °C, o azoto, principal constituinte da atmosfera, torna-se líquido. Muitos metais, se suficientemente arrefecidos, tornam-se supercondutores, conduzindo corrente eléctrica sem qualquer resistência. Abaixo de cerca de 2 K (-271 °C), o Hélio (que é um líquido abaixo de 4 K, -269 °C) entra num estado notável, conhecido como superfluido. Se tentarmos levantar um recipiente de hélio, acima do banho de hélio superfluido, este sobe as paredes do recipiente e escorre de volta para o banho! E esta é apenas uma de várias propriedades surpreendentes deste estado da matéria.

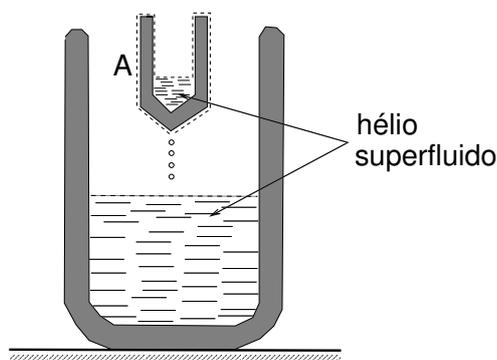


Figura 4.2: Se tentarmos elevar o recipiente **A** acima do banho de hélio superfluido, o hélio sobe as paredes de **A** e escorre de volta para o banho. Esta é apenas uma das propriedades surpreendentes do hélio líquido, no estado superfluido, que ocorre abaixo de uma temperatura de 2,17 K.

4.1.2 O que é temperatura?

Neste capítulo tentaremos esclarecer as relações entre os conceitos de temperatura, energia e calor, recorrendo a observações experimentais de vários tipos.

Não é possível compreender um conceito novo de física, sem ver como ele aparece e é usado em situações concretas e como se relaciona com outros conceitos. Não se pode, simplesmente, dar uma definição, como num dicionário. Mas temos de ter um ponto de partida para sabermos do que estamos a falar. O exemplo dado no princípio deste capítulo mostra que todos temos alguma experiência intuitiva do que é a temperatura. Sabemos que um corpo pode estar mais quente ou mais frio, e que isso corresponde a estar a temperaturas diferentes. Sabemos, ainda, que os físicos aprenderam a medir essa grandeza usando termómetros. Como ponto de partida, isto é suficiente.

4.2 Temperatura e dissipação

Para aumentar a temperatura de um corpo temos que lhe fornecer energia. Eis uma afirmação que não surpreende ninguém. Para aquecer água temos que usar energia eléctrica ou um combustível, como o gás. As siderurgias, indústrias que têm que aquecer os metais até os fundirem, são grandes consumidoras de energia.

Esta energia é a mesma de que falamos no capítulo 2, ou é outra forma de energia, térmica ou calorífica, diferente da que associamos ao estado de movimento dos corpos?

Vimos atrás, que em sistemas em que existem forças dissipativas, como o atrito e a resistência do ar, o trabalho de forças externas resulta numa variação de energia que não podemos exprimir em termos de energia cinética e potencial do sistema.

Exemplo 1: um corpo é arrastado sobre uma mesa horizontal por uma força aplicada, oposta à força de atrito entre a mesa e o corpo. A força externa realiza trabalho sobre este sistema (mesa mais corpo). Mas, a energia cinética do corpo não varia: o corpo não acelera porque a força total sobre ele é nula. Também não há variação de energia potencial: as duas posições na mesa são equivalentes no que diz respeito ao movimento do corpo. Para onde foi a energia transferida para o sistema como trabalho da força externa?

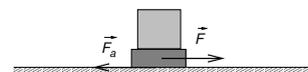


Figura 4.3: A força \vec{F} realiza trabalho sobre o sistema corpo mais mesa. Mas o corpo não acelera por causa da força de atrito. Para onde vai a energia?

Exemplo 2: Um carro desloca-se a 60 km h^{-1} . A sua energia cinética é cerca de ($m \approx 1000 \text{ kg}$)

$$\frac{1}{2}10^3 \left(\frac{60 \times 10^3}{3600} \right)^2 = 1,39 \times 10^5 \text{ J.}$$

O condutor trava e alguns metros à frente o automóvel está parado. Para onde foi esta energia? Não foi transferida para energia potencial. Para recomeçar a andar é preciso usar o combustível do automóvel. E o depósito de gasolina não encheu com a travagem!

Exemplo 3: As colisões inelásticas, que discutimos no capítulo anterior, são outros exemplos do aparente “desaparecimento” de energia associado ao movimento de corpos macroscópicos. Interpretámos este “desaparecimento” como transferência para movimentos dos átomos que constituem os corpos, que não são perceptíveis como movimentos globais dos mesmos.

Se, por um lado, o trabalho externo não aparece como variação de energia cinética ou potencial nestes exemplos, por outro lado, é claro que estas transformações são acompanhadas de variações de temperatura:

- os travões e pneus do automóvel aquecem nas travagens;
- o atrito da cabeça de um fósforo na lixa aumenta a sua temperatura até ao ponto em que se inicia uma reacção de combustão e o fósforo acende. Na ausência deste, é possível acender uma fogueira esfregando dois paus secos;
- quando esfregamos vigorosamente as palmas da mão, uma na outra, sentimos um aquecimento apreciável da pele (vale a pena experimentar!).
- Na Actividade 4.1 poderá ver-se que é possível aquecer água agitando-a.

▷ Actividade 4.1

Estas observações sugerem que variações de temperatura estão associadas a variações de energia, independentemente da sua origem. Não parece haver um “tipo” de energia térmica especial. O que precisamos de investigar é a natureza da relação entre as variações de temperatura e de energia de um corpo. Será possível, usando termómetros, que medem temperatura, determinar variações de energia?

4.3 Temperatura e energia

Uma das maneiras de investigarmos a relação entre temperatura e energia consiste em juntar dois corpos a temperaturas diferentes de modo a trocarem energia apenas um com o outro. As respectivas temperaturas variam, mas a energia total deve ser constante. A energia que um recebe deve ser a que o outro cede. Isto vai-nos permitir relacionar as variações de temperatura e de energia de cada um dos corpos. Começemos pelo caso mais simples de corpos da mesma substância.

4.3.1 Temperatura final de uma mistura

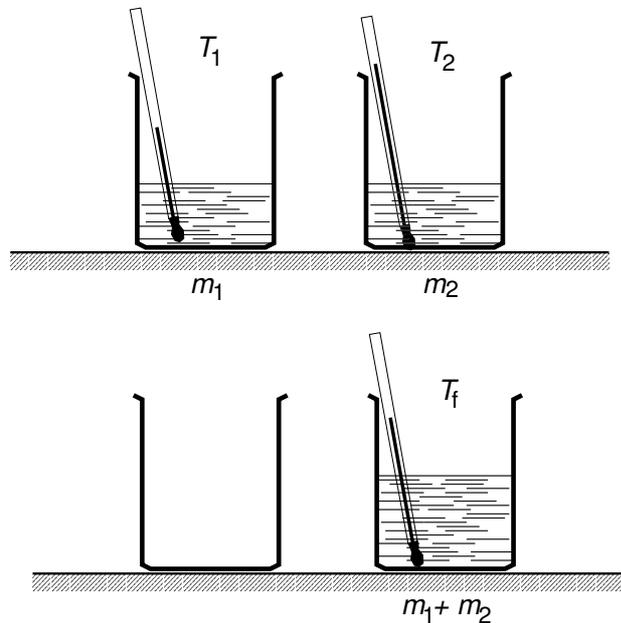


Figura 4.4: Se misturarmos duas porções de água a temperaturas diferentes, qual é a temperatura final?

▷ Actividade 4.2

Tomemos dois recipientes com água, uma quente e a outra fria. Se as misturarmos obtemos água morna. Tentemos descrever esta situação tão vulgar numa linguagem mais precisa.

Para começar, temos duas porções de água, com massas m_1 e m_2 , a temperaturas diferentes, T_1 e T_2 . A temperatura da água fria, T_1 , é menor do que a da água quente, T_2 . Depois de misturadas obtemos uma temperatura final única, T_f , intermédia entre as anteriores,

isto é: $T_1 < T_f < T_2$. Isto significa que a porção de água fria aumentou de temperatura, $T_1 \rightarrow T_f > T_1$, e a de água quente diminuiu, $T_2 \rightarrow T_f < T_2$.

Por outro lado, as duas porções interagiram uma com a outra e, em primeira aproximação, com mais nada. Logo, devemos concluir que a energia total das duas porções de água não variou: a energia que uma perdeu (a que arrefeceu) passou para a outra (a que aqueceu).

Designemos por ΔE_1 e ΔE_2 as variações de energia das porções de massa m_1 e m_2 , respectivamente. A variação total, deve ser nula:

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 = 0.$$

As variações de cada uma das porções de água são simétricas,

$$\Delta E_1 = -\Delta E_2. \quad (4.1)$$

Se a energia de m_1 aumentou ($\Delta E_1 > 0$) a de m_2 diminuiu ($\Delta E_2 < 0$) e vice-versa.

Podemos, então, usar a Eq. 4.1 para relacionar as variações de energia com as variações de temperatura medidas numa experiência de mistura de águas a diferentes temperaturas. Este estudo é feito na Actividade 4.2.

Cálculo da temperatura final

Em condições em que as massas de água quase não trocam energia com o exterior, mas apenas entre si, verifica-se que as variações de temperatura de cada porção de água, $\Delta T_1 \equiv T_f - T_1$ e $\Delta T_2 \equiv T_f - T_2$, satisfazem a equação

$$\boxed{\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = -\frac{m_2}{m_1}} \quad (4.2)$$

ou, em termos das temperaturas iniciais e final,

$$\frac{T_f - T_1}{T_f - T_2} = -\frac{m_2}{m_1}. \quad (4.3)$$

O seguinte exemplo torna mais claro o modo como podemos obter a temperatura final.

Exemplo: Se misturarmos 200 g, a 50 °C, com 100 g, a 20 °C, a temperatura final será:

$$\frac{T_f - 50}{T_f - 20} = -\frac{100}{200}$$

ou

$$T_f - 50 = -\frac{1}{2}(T_f - 20).$$

Resolvendo em ordem a T_f ,

$$\begin{aligned} T_f \left(1 + \frac{1}{2}\right) &= +10 + 50 \\ T_f &= 40^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Note-se que a temperatura final está mais próxima da temperatura inicial da massa maior. Por que será?

A equação 4.2 exprime dois factos muito simples:

- i) As variações de temperatura têm sinais opostos (daí o sinal menos). Isto significa que a temperatura final está sempre entre T_1 e T_2 . Uma das variações é positiva, a outra negativa.
- ii) As variações de temperatura de cada massa, em valor absoluto, são inversamente proporcionais aos valores das massas. Isto significa que a porção de *maior* massa tem uma variação de temperatura *menor*, em valor absoluto. No exemplo acima, a massa de 200 g tem uma variação de temperatura de

$$\Delta T_1 = 40 - 50 = -10^\circ\text{C};$$

para a massa de 100 g a variação é de

$$\Delta T_2 = 40 - 20 = 20^\circ\text{C},$$

o dobro da anterior, em valor absoluto.

Compreendendo estes dois factos, podemos evitar a memorização da Eq. 4.3.

4.3.2 Capacidade térmica mássica.

A Eq. 4.2 pode escrever-se na forma:

$$m_1 \Delta T_1 + m_2 \Delta T_2 = 0. \quad (4.4)$$

Comparemos com a expressão de conservação de energia,

$$\Delta E_1 + \Delta E_2 = 0. \quad (4.5)$$

Parece razoável admitir que a primeira equação não é uma lei nova, mas apenas uma consequência da lei de conservação de energia. Para que assim seja, basta admitirmos que a variação de energia de uma certa massa de água, m , quando a sua temperatura varia de ΔT , é proporcional a $m\Delta T$,

$$\Delta E = c_a m \Delta T. \quad (4.6)$$

A constante c_a não depende nem de m nem de ΔT . Substituindo esta equação na equação de conservação de energia, obtemos imediatamente a Eq. 4.4.

A constante c_a tem um significado físico muito preciso. Se $m = 1$ (kg, no SI) e a variação de temperatura $\Delta T = 1$ (K, no SI) a variação de energia (J, no SI) será, simplesmente:

$$\Delta E = c_a.$$

Por outras palavras, c_a é a variação de energia, por unidade de massa e de variação de temperatura da água. Esta grandeza é designada por **capacidade térmica mássica** da água.

Quando uma massa m de uma substância tem uma variação de temperatura ΔT , a sua energia varia de

$$\Delta E = cm\Delta T \quad (4.7)$$

em que c , é a **capacidade térmica mássica da substância**. No sistema SI, as suas unidades são $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Vale a pena chamar a atenção para uma das ideias expressas na Eq. 4.7. Se aumentarmos do mesmo valor a temperatura de duas porções de água, por exemplo $\Delta T = 10 \text{ K}$, a variação de energia não é, em geral, a mesma! Quanto maior for a massa, maior será a quantidade de energia necessária para efectuar esta transformação.

Caloria

A definição de capacidade térmica da Eq. 4.7 implica que a respectiva unidade é $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$. Para conhecermos c_a nesta unidade

teríamos que determinar quantos joule são necessários para elevar de 1 K a temperatura de 1 kg de água. Nenhuma das experiências anteriores nos dá esta informação.

Mas isso não nos impede de comparar quantidades de energia envolvidas em processos de variação de temperatura. Por exemplo, sabemos que, se em vez de $m = 1 \text{ kg}$ e $\Delta T = 1 \text{ K}$, a massa for de 200 g e a variação de temperatura 10 K, a energia necessária será duas vezes superior ($0,2 \times 10 = 2$). Isto permite-nos definir uma unidade de energia conveniente, a caloria:

uma **caloria** é a variação de energia de 1 g de água quando a respectiva variação de temperatura é de 1 K.

Conveniente porquê? Pois bem, por que a medição de uma quantidade de energia em calorias pode ser feita usando uma balança, um termómetro e água. Os seguintes exemplos tornam isso claro.

Exemplo 1: Que quantidade de energia retirámos de 200 g de água ao baixar a respectiva temperatura de 20 °C para 5 °C?

A variação de temperatura é $5 - 20 = -15 \text{ °C}$. Se fosse uma massa de 1 g a variação de energia seria, por definição de caloria, -15 cal . Para 200 g a variação será

$$\Delta E = 200 \times (5 - 20) = -3000 \text{ cal.}$$

Assim, teríamos que extrair da massa 3000 cal.

Exemplo 2: um cubo de ferro em brasa é colocado num recipiente com 0,5 kg de água a 20 °C. A temperatura final da água e do ferro é de 50 °C. A variação de energia da água foi

$$\Delta E = 500 \times (50 - 20) = 1,5 \times 10^4 \text{ cal}$$

O cubo de ferro teve uma variação de energia de $-1,5 \times 10^4 \text{ cal}$.

Se atentarmos à definição de caloria e de capacidade térmica da água, chegamos imediatamente à conclusão que

$$c_a = 1 \text{ cal g}^{-1} \text{ K}^{-1};$$

a capacidade térmica mássica da água é uma caloria por grama, grau kelvin.

▷ Definição de caloria

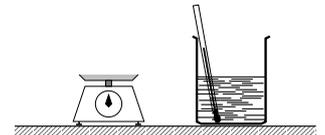


Figura 4.5: Aparelho de medição de energia.

▷ Actividade 4.3

Na Actividade 4.3 recorreremos a este método de medição de energias para medir capacidades térmicas de diferentes substâncias, relativamente à da água (ver Caixa 4.2).

4.3.3 Capacidade térmica mássica da água e o clima

É de conhecimento comum que a proximidade do oceano tem uma influência muito grande sobre o clima de uma região. Se outros factores não variarem, as amplitudes de variação de temperatura ambiente (quer diárias, quer anuais) são menores em regiões costeiras do que continentais. As experiências de misturas permitem-nos compreender a importância de grandes massas de água na estabilização de temperaturas.

Atentemos nos seguintes dados. A capacidade térmica da água é $c_a = 1 \text{ cal g}^{-1} \text{ K}^{-1}$. A do ar, à pressão atmosférica, é¹, aproximadamente, $c_{ar} = 0,24 \text{ cal g}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Podemos imaginar a troca de energia entre o oceano e a atmosfera em termos semelhantes aos que usámos na discussão das misturas. Se a água diminuir de temperatura a sua energia diminui e a energia e temperatura do ar aumentam. A capacidade térmica mássica do ar é apenas cerca de quatro vezes inferior à da água. Como se explica um tão grande efeito do oceano sobre a temperatura ambiente?

▷Problema 4.5

A massa volúmica do ar, em condições normais de pressão e temperatura, é de $1,3 \text{ kg m}^{-3}$; a da água de cerca de 10^3 kg m^{-3} . Se um quilograma de água (ou seja, cerca de um litro, 10^{-3} m^3) diminuir de temperatura de 1 K, a energia correspondente é suficiente para elevar de 1 K um volume de $3,2 \text{ m}^3$ de ar (e vice-versa). Em termos de volume temos uma razão

$$\frac{3,2}{10^{-3}} = 3200.$$

Isto significa que uma variação de 1 K num certo volume de água pode originar uma variação simétrica de temperatura num volume de ar 3200 vezes superior! Vemos, pois, que a água do oceano funciona como um reservatório térmico. Se a temperatura do ar diminuir, basta uma diminuição idêntica de temperatura num volume de água 3200 vezes inferior para libertar uma energia suficiente para restaurar a temperatura anterior.

¹Na referência [7] é indicado o valor de $993 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Antecipando o próximo capítulo, a *caloria* corresponde a 4,18 J. Daí resulta o valor citado no texto.

■ Capacidades térmicas relativas ■

Tomemos um cilindro de alumínio de massa 100 g a uma temperatura de 40 °C e mergulhemo-lo em 100 g água a 20 °C. Se a capacidade térmica mássica do metal fosse igual à da água ($c_a = 1 \text{ cal g}^{-1}\text{K}^{-1}$), as variações de temperatura do cilindro e da água, ΔT_{al} e ΔT_a seriam dadas por

$$m\Delta T_{al} + m\Delta T_a = 0,$$

ou seja, $\Delta T_{al} = -\Delta T_a$. A temperatura final teria de ser 30 °C. ($\Delta T_{al} = -10$ °C e $\Delta T_a = 10$ °C).

De facto, verifica-se que a temperatura final é mais baixa: a variação de temperatura da água é menor que 10 °C e a do cilindro maior que 10 °C, em valor absoluto.

Que conclusão podemos tirar deste facto?

A energia que a água recebeu foi a que o cilindro cedeu ao arrefecer, $\Delta E_{al} = -\Delta E_a$. Mas, por definição a capacidade térmica mássica,

$$\begin{aligned}\Delta E_{al} &= c_{al}m\Delta T_{al} \\ \Delta E_a &= c_a m\Delta T_a\end{aligned}$$

ou seja,

$$c_{al}m\Delta T_{al} = -c_a m\Delta T_a$$

Se $|\Delta T_{al}| > |\Delta T_a|$, c_{al} é menor que c_a , isto é menor que $1 \text{ cal g}^{-1}\text{K}^{-1}$. Explicitamente,

$$\frac{c_{al}}{c_a} = -\frac{m\Delta T_a}{m\Delta T_{al}} = -\frac{\Delta T_a}{\Delta T_{al}}.$$

Por exemplo, se a temperatura final fosse 25 °C, $\Delta T_{al} = -15$ °C, $\Delta T_a = 5$ °C e

$$\frac{c_{al}}{c_a} = -\frac{5}{-15} = \frac{1}{3}.$$

Caixa 4.2: Determinação de capacidades térmicas relativas pelo método de misturas.

4.4 Calor de Fusão

O que é “aquecer um corpo”?

É fornecer-lhe energia (sem o movimentar)?

Ou,

é aumentar a sua temperatura?

Pelo que vimos acima, poderíamos pensar que o aumento de temperatura acompanha, necessariamente, o aumento de energia e vice-versa. É claro que não são a mesma coisa. A mesma quantidade de energia pode dar variações de temperatura diferentes, se os corpos tiverem massas diferentes ou forem de substâncias diferentes. A Eq. 4.6,

$$\Delta E = cm\Delta T$$

mostra isso mesmo. Não podemos quantificar a variação de energia *apenas* pela variação de temperatura.

Mas a mesma equação parece implicar que uma coisa (variação de energia) implica a outra (variação de temperatura). De facto não é assim. É possível fornecer energia a um corpo (sem o movimentar) sem que a sua temperatura varie. Trata-se de uma situação comum em circunstâncias em que há uma mudança de estado físico da matéria (transição sólido-líquido, fusão, ou líquido-gasoso, ebulição, por exemplo).

Na Actividade 4.4, verifica-se que a água e o gelo podem coexistir à mesma temperatura de 0 °C.

No entanto, se juntarmos 30 g de gelo a um copo com água tépida, obtemos água muito mais fresca do que se juntarmos os mesmos 30 g de água a 0 °C. Como podemos explicar este facto?

A resposta é sugerida pela Fig. 4.6. Se no estado final a água em *A* está a uma temperatura inferior à de *B*, é preciso fornecer energia para passar do estado de *A* para o de *B*. Então, o estado **inicial** de *A* tem menor energia que o de *B*. Como podemos passar, assim, de uma afirmação sobre estados finais para outra sobre os estados iniciais? É que, se os sistemas se mantiveram isolados durante a experiência, *a energia de cada um não variou: a energia de cada estado inicial é a mesma que a do estado final correspondente!* A diferença entre os estados iniciais de *A* e *B* é o facto de em *A* termos uma certa massa de gelo a 0 °C e em *B* a mesma massa de água líquida à mesma temperatura.

Esta simples observação (numa festa é muito mais eficaz usar o gelo do balde do gelo, do que a água que o rodeia, para refrescar

▷Actividade 4.4

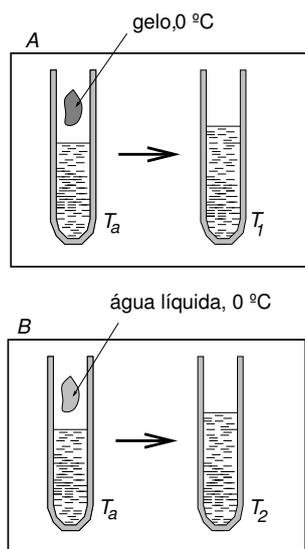


Figura 4.6: Se $T_1 < T_2$, a energia final do sistema *A* é menor que a do sistema *B*. Que podemos concluir sobre as energias *iniciais*?

uma bebida) mostra que o gelo e a água líquida a 0°C , apesar de serem constituídos pela mesma substância e estarem à mesma temperatura, têm energias diferentes por unidade de massa. Na Actividade 4.4 mede-se, de um modo muito simples, esta diferença de energia entre os estados sólido (gelo) e líquido da água.

Em resumo, “aquecer” no sentido de aumentar a temperatura e “aquecer” no sentido de fornecer energia, não são significados equivalentes. Ao fundir gelo estamos a “aquecer” no segundo sentido, mas não necessariamente no primeiro.

4.4.1 Temperatura e equilíbrio térmico

Este é um bom ponto para fazer um resumo do que aprendemos sobre temperatura.

- Podemos variar a energia de um corpo, sem necessariamente variar a sua energia cinética ou potencial. Em geral, essa variação é acompanhada de um variação de temperatura.
- Em casos de mudança de estado físico (fusão, ebulição, etc) é possível que a variação de energia não seja acompanhada por uma variação de temperatura. Para fundir gelo é necessário energia, mas a água líquida e o gelo podem estar à mesma temperatura.
- Na ausência de mudanças de estado físico podemos relacionar as variações de energia e de temperatura de um corpo de massa m pela equação

$$\Delta E = cm\Delta T.$$

- Quando permitimos que dois corpos troquem energia, pondo-os em contacto (misturando massas de líquido ou imergindo um corpo num líquido), as respectivas temperaturas variam, descendo a mais alta e subindo a mais baixa, até atingirem uma temperatura comum.

Esta última observação esteve de facto na base de todas as considerações deste capítulo. Assim:

- dois corpos podem trocar energia sem exercerem um sobre o outro forças detectáveis, apenas porque as respectivas temperaturas são diferentes;

- A energia passa do corpo de temperatura mais alta para o de mais baixa;
- as respectivas temperaturas aproximam-se até ficarem iguais, situação em que termina a troca de energia.

Podemos resumir, dizendo que corpos em contacto trocam energia até atingirem uma situação de **Equilíbrio Térmico**, que corresponde à igualdade de temperaturas.

Como vimos, a energia total não varia no processo. A tendência para o equilíbrio térmico não resulta de uma tendência para um estado de menor energia. A energia total do estado final de equilíbrio é a mesma do estado inicial. Um processo invertido, em que, por exemplo, numa porção de água, a temperatura da metade à esquerda começasse espontaneamente a aumentar de temperatura enquanto a metade à direita diminuía, seria certamente muito estranho. Mas não violaria a conservação de energia. No próximo capítulo vamos prestar mais atenção aos processos pelos quais a energia pode ser transferida.

4.5 Actividades, questões e problemas

4.5.1 Actividades

4.1. Aquecimento com varinha mágica

Ver ficha de actividade A9.

4.2. Misturas de massas de água a diferentes temperaturas

Ver ficha de actividade A10.

4.3. Capacidade térmica mássica de dois metais

Ver ficha de actividade A11.

4.4. Calor de fusão do gelo

Ver ficha de actividade A12.

4.5. Quantos Joule numa caloria?

A seguinte actividade exige uma chaleira de resistência imersa, um cronómetro, um termómetro e uma balança ou proveta graduada. Pode ser feita na cozinha e permite uma medição rápida (ainda que pouco precisa) da relação entre o Joule e a caloria.

Medir uma massa de água de cerca de 500 g para uma chaleira de resistência. Medir a respectiva temperatura. Ligar a chaleira e registar o tempo que demora a entrar em ebulição. Usando a potência em watt da chaleira, estimar a relação entre o Joule e a caloria.

4.5.2 Problemas

4.1. Misturaram-se duas porções de água, no estado líquido, inicialmente a temperaturas diferentes, numa garrafa térmica. Quais das seguintes afirmações são necessariamente falsas? Justificar.

- (a) As variações de temperatura das duas porções de água foram de 10 °C e de 5 °C;
- (b) A temperatura final foi a soma das temperaturas iniciais;
- (c) As variações de temperatura das duas porções de água foram iguais porque as massas eram iguais;
- (d) As variações de temperatura das duas porções de água foram de 10 °C e de -5 °C;
- (e) A temperatura final foi a média das iniciais, $T_f = (T_1 + T_2)/2$.

4.2. Um recipiente contém um litro de água ($m \approx 1 \text{ kg}$) a uma temperatura de 10 °C.

- (a) Que massa de água a 50 °C é necessário juntar para que a temperatura final seja de 37 °C?
- (b) Qual foi a energia (em calorias) trocada entre as duas porções de água?

4.3. Se uma chaleira de resistência imersa demora 2 minutos a por em ebulição 300 g de água, quanto demora com 400 g de água à mesma temperatura inicial?

4.4. Nos sistemas de travagem de um automóvel há um disco de metal que roda solidariamente com o eixo da roda. Na travagem, uma pinça aperta os calços contra o disco e este pára devido ao atrito. A maior parte da energia cinética do automóvel é dissipada nos quatro discos dos travões.

Usando o exemplo 2 da página 90, sabendo que os discos

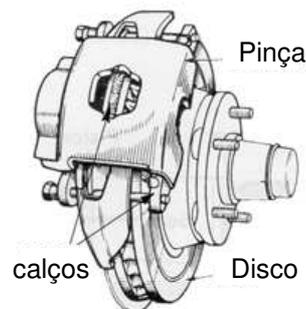


Figura 4.7: Travão de disco.

são de ferro, e que cada um dos quatro discos do automóvel tem uma massa de cerca de 3 kg, estimar a variação de temperatura dos discos no final da travagem. ($c_{\text{Fe}} = 5 \times 10^2 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Repetir o cálculo para um velocidade de 120 km h^{-1} .

- 4.5. Na página 96 afirma-se que uma variação de temperatura de 1 dm^3 (um litro) de água envolve a mesma quantidade de energia que a mesma variação de temperatura em 3200 dm^3 de ar.

- (a) Obter este valor a partir dos dados abaixo indicados.
 (b) Um recipiente com um litro de água a 90°C é colocado no centro de uma sala de área 12 m^2 e altura $2,5 \text{ m}$. A temperatura inicial da sala é de 20°C . Se as trocas de energia fossem apenas entre a água e o ar da sala, qual seria a temperatura final da sala?

[Dados: capacidade térmica do ar à pressão atmosférica, $c_{\text{ar}} \approx 0,24 \text{ cal g}^{-1} \text{ K}^{-1}$; massa volúmica do ar, $\rho \approx 1,3 \text{ kg m}^{-3}$].

- 4.6. Um estudante metucioso, depois de uma aula de física, pesou 3 cubos de gelo, antes de os introduzir num copo com 33 cl de água mineral, inicialmente a 22°C . A massa de gelo era de 45 g. Estimou a temperatura final da mistura; esperou pacientemente até não haver gelo no copo e mediu a temperatura final. Ficou surpreendido por encontrar um valor superior ao que estimou.

- (a) Que valor esperava obter?
 (b) Que explicação (ou explicações) é possível avançar para dar conta da diferença entre o que o estudante esperava obter e o que mediu?

- 4.7. Uma massa de água quente é introduzida numa garrafa térmica, com igual massa de gelo a 0°C . Qual é a temperatura mínima que a água tem que ter para que todo o gelo funda, supondo que o sistema não recebe energia do exterior? ($e_F = 80 \text{ cal g}^{-1}$).

- 4.8. Numa garrafa térmica, com uma massa de 100 g de água a 20°C , são introduzidos 100 g de gelo a 0°C . Qual é a temperatura final da mistura? (Calor de fusão do gelo, $e_F = 80 \text{ cal g}^{-1}$).

4.9. Dois cilindros de cobre e alumínio, de igual massa, estão à mesma temperatura inicial, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se mergulharmos o cilindro de cobre numa tina com água a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura final é de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. As capacidades térmicas mássicas do cobre e alumínio são, respectivamente, $c_{\text{Cu}} = 0,092\text{ cal g}^{-1}\text{ K}^{-1}$ e $c_{\text{Al}} = 0,218\text{ cal g}^{-1}\text{ K}^{-1}$.

- (a) Se mergulharmos o cilindro de alumínio em vez do de cobre, a temperatura final é superior ou inferior?
- (b) Se mergulharmos os dois cilindros ao mesmo tempo, qual das seguintes situações se verifica para a temperatura final:
 - i. É menor que a de qualquer dos cilindros imersos separadamente.
 - ii. Está entre as temperaturas dos dois cilindros imersos separadamente.
 - iii. É superior às temperaturas dos cilindros imersos separadamente.

4.10. Uma peça metálica, constituída por cobre e ouro, tem uma capacidade térmica mássica de $200\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$. Quais são as percentagens mássicas de cobre e ouro da peça? ($c_{\text{Cu}} = 385\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$; $c_{\text{Au}} = 132\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$).

4.5.3 Desafios

4.1. Dois cilindros de metais diferentes A e B , de igual massa, estão à mesma temperatura inicial, de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se mergulharmos A numa tina com água a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura final é de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se mergulharmos B a temperatura é de $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pretende-se saber qual é a temperatura final se introduzirmos os dois cilindros ao mesmo tempo.

- (a) Sem fazer contas, mostrar que a temperatura final está entre 26 e $29\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (b) Qual é a temperatura final?

Capítulo 5

Calor e Trabalho

Neste capítulo vamos olhar com mais pormenor para os diferentes modos como pode ocorrer a transferência de energia entre sistemas. Vamos ver que trabalho pode “disfarçar-se” de várias formas, menos evidentes do que as que considerámos até aqui. Mas discutiremos também algo que já mencionámos no início do Capítulo 2: há processos de transferência de energia que não são trabalho, em nenhum dos seus disfarces!

5.1 Trabalho em várias formas

Recordemos a noção de trabalho:

O trabalho de uma força de módulo constante, exercida sobre um corpo, num deslocamento de comprimento d , é o produto da componente da força segundo o deslocamento por d e é igual à variação de energia do sistema sobre o qual é exercida a força.

$$w = F_{\parallel} d = \Delta E$$

A variação de energia do sistema sobre o qual é realizado trabalho pode revestir diferentes aspectos:

- pode ser uma variação de energia cinética, como quando chutamos uma bola de futebol;
- pode ser uma variação de energia potencial, como quando uma grua eleva, sem a acelerar, uma carga;

- pode manifestar-se por uma variação de temperatura como na Actividade A9, em que aumentámos a temperatura da água agitando-a com uma varinha mágica.

Por vezes, há processos de transferência de energia que envolvem trabalho de uma forma menos evidente que os que estudámos no Capítulo 2. Vejamos alguns exemplos.

5.1.1 Expansão e compressão de gases

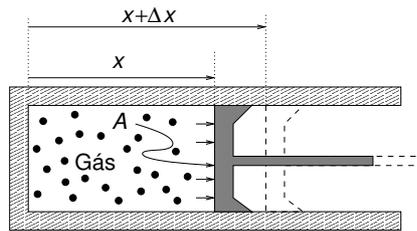


Figura 5.1: Se o pistão se deslocar de Δx , o volume do gás varia de $\Delta V = A \times (x + \Delta x) - A \times x = A \times \Delta x$, em que A é a área da superfície do pistão.

O primeiro exemplo é a expansão ou compressão de gases. Se designarmos por P a pressão de um gás no interior de um cilindro com um pistão móvel (como acontece num motor de combustão) a força sobre o pistão é, por definição de pressão,

$$F = P \times A$$

em que A é a área da superfície do pistão.

Se o pistão se deslocar no sentido das forças de pressão, o volume do gás aumenta. As forças de pressão do gás realizam trabalho positivo *sobre* o pistão. O trabalho de uma força é a variação de energia do sistema *sobre* o qual é exercida a força: a energia é transferida do gás para o pistão. Logo, a energia e a temperatura do gás diminuem.

Se o pistão se deslocar em oposição às forças de pressão, o volume de gás diminui e o trabalho realizado pelas forças de pressão é negativo. A energia é transferida do pistão para o gás. Neste caso a energia e a temperatura do gás aumentam.

Não é difícil relacionar o trabalho realizado pelo gás com a sua pressão e variação de volume. Se o pistão tiver um deslocamento

Δx (eixo dos xx com a direcção e sentido das forças de pressão), o trabalho realizado pela forças de pressão do gás sobre o pistão será

$$w = F \times \Delta x = P \times A \times \Delta x.$$

Note-se que $A\Delta x = \Delta V$, a variação de volume do gás. Assim o trabalho realizado *pelo gás sobre o pistão* é:

$$w = P\Delta V. \quad (5.1)$$

Uma expansão corresponde a $\Delta x > 0$ e $\Delta V > 0$. Logo, $w > 0$: a energia é transferida do gás para o pistão. Numa compressão $\Delta x < 0$, $\Delta V < 0$ e $w < 0$: a energia do gás aumenta¹.

Quando enchemos um pneu de bicicleta, ou uma bola, com uma bomba manual, verificamos que esta aquece consideravelmente. Ao puxar o êmbolo para trás, entra ar no interior da bomba à pressão atmosférica. Para o introduzir na bola ou no pneu temos que o comprimir. A temperatura do gás aumenta. Após vários ciclos de compressão a temperatura das paredes da bomba acaba também por aumentar. No funcionamento de um frigorífico ocorrem também processos de compressão e expansão de gases.

▷Caixa 5.1.

5.1.2 Trabalho eléctrico

A quase totalidade dos processos do nosso dia-a-dia em que há transferências de energia envolvem, de uma maneira ou de outra, correntes eléctricas. Ou seja, envolvem movimento de cargas eléctricas.

Recordemos como se calcula energia num circuito eléctrico. Tome-mos o exemplo mais simples de um gerador ligado a uma resistência, como acontece, por exemplo, na maior parte dos aquecedores (ver Fig. 5.2).

Sabemos que existe, entre os dois extremos da resistência, uma diferença de potencial, V , (unidade, **volt**); que passa na resistência uma corrente eléctrica, I (unidade, **ampere**). Aprendemos, no 9º ano, que a potência fornecida à resistência se podia calcular como:

$$P = VI. \quad (5.2)$$

¹Note-se que, à medida que o gás expande, a pressão diminui. Trata-se da situação em que a força varia no deslocamento, como discutimos na Actividade A6. Assim a expressão da Eq. 5.1 só é válida para variações de volume suficientemente pequenas para que se possa desprezar a variação de pressão.

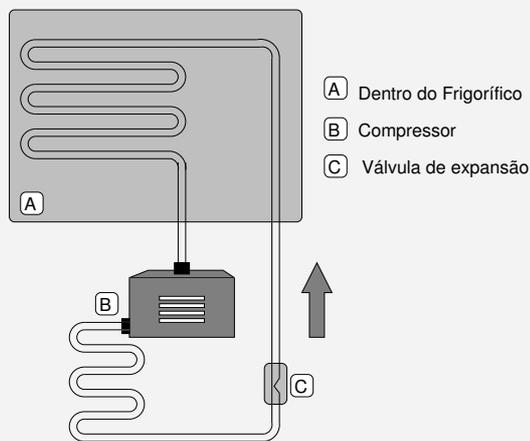
■ Como funciona um frigorífico. ■

O que se segue é uma explicação muito simplificada do funcionamento de um frigorífico.

Um frigorífico tem uma tubagem em circuito fechado no qual circula um gás. O “motor” do frigorífico é um compressor que aspira o gás que está na tubagem dentro da zona refrigerada e o comprime fortemente para uma serpentina que está no exterior, normalmente na parte de trás do aparelho. A compressão (trabalho realizado sobre o gás) aumenta muito a sua temperatura. Na serpentina arrefece em contacto com o ambiente (aquece a cozinha). Antes de entrar na válvula de compressão já está no estado líquido.

Na válvula, que funciona como um orifício muito estreito, o líquido passa de uma zona de alta pressão para uma de baixa pressão; o compressor está sempre a aspirar o gás que está na serpentina do interior do frigorífico. O líquido expande-se e passa ao estado gasoso, por causa da baixa pressão. O trabalho realizado na expansão e a energia necessária para a evaporação fazem baixar muito a temperatura do gás. Ao passar na serpentina no interior do frigorífico está a uma temperatura muito baixa, e consequentemente, mantém baixa a temperatura do interior do frigorífico.

Como vemos, o gás recebe energia do interior do frigorífico e passa-a para o ambiente na serpentina exterior. Este processo exige a realização de trabalho no compressor.



Esquema de funcionamento de um frigorífico

Caixa 5.1: O funcionamento de um frigorífico

Vamos discutir apenas o caso em que a corrente e a diferença de potencial (ddp) não variam no tempo; é o caso de uma pilha (pelo menos até esta descarregar), mas não o da corrente na tomadas de nossa casa. Na rede eléctrica a corrente varia no tempo, rapidamente, em ciclos que duram $0,02\text{ s}$ (50 ciclos por segundo).

Será que a expressão da Eq. 5.2 tem alguma coisa a ver com trabalho? Certamente, em Física tudo tem a ver com tudo.

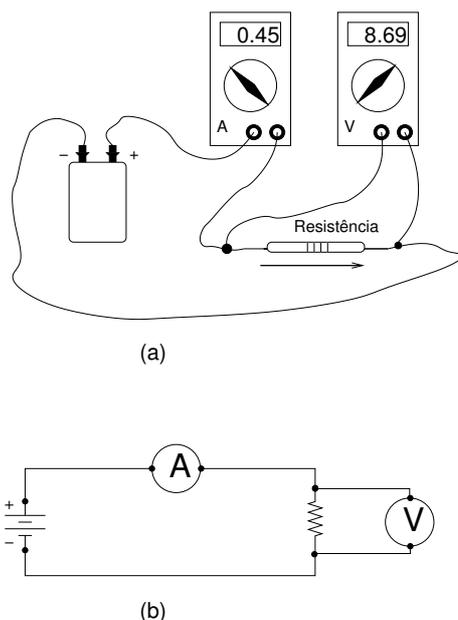


Figura 5.2: Um circuito eléctrico com gerador, resistência e dois aparelhos de medida, amperímetro (A) e voltímetro (V); (a) representação semi-realista; (b) representação simbólica.

O que é a corrente eléctrica?

▷Actividade 5.1

Quando dizemos que na resistência passa uma corrente eléctrica estamos apenas a afirmar que há cargas eléctricas a passar de um extremo ao outro da resistência. Quando a corrente não varia, a quantidade de carga que passa num intervalo de tempo Δt é proporcional a Δt : a corrente é a constante de proporcionalidade. Sendo Q a carga que passa no circuito no intervalo Δt ,

$$Q = I\Delta t.$$

Exemplo: Numa lâmpada pode passar um corrente de cerca de $0,5\text{ A}$. Durante um minuto a carga transportada

por esta corrente é

$$Q = I\Delta t = 0,5 \times 60 = 30 \text{ C.}$$

A unidade de carga é o coulomb, abreviatura **C**. Para percebermos o que significa notemos que a carga do electrão (a partícula que se desloca nos circuitos eléctricos) é apenas de

$$e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C.}$$

Assim uma corrente de 0,5 A, num minuto, corresponde à passagem de $30/1,6 \times 10^{-19} = 1,87 \times 10^{20}$ electrões.

Potência eléctrica

A presença do gerador no circuito da Fig. 5.2 origina forças eléctricas sobre as cargas. Tal como a força de atracção gravítica sobre um corpo é proporcional à sua massa, assim uma força eléctrica sobre uma carga q é proporcional ao valor da carga. Quando uma carga q se desloca de um extremo ao outro da resistência, as forças de natureza eléctrica realizam um trabalho também proporcional a q ,

$$w = qV.$$

A diferença de potencial é, precisamente, o trabalho por unidade de carga

$$V = w/q.$$

Se durante um intervalo Δt passar na resistência uma carga $Q = I\Delta t$, o trabalho total realizado pelas forças eléctricas do gerador é

$$W = QV = I\Delta t \times V = VI\Delta t.$$

A potência, definida por $W = P\Delta t$, é, então, dada pela Eq. 5.2. Agora compreendemos por que razão uma bateria não dura sempre. De cada vez que é ligada a um circuito, parte da sua energia é transferida para o mesmo.

Quase toda a nossa tecnologia é baseada em electricidade. Não é por isso surpreendente que seja particularmente fácil medir características de sinais eléctricos, como a corrente I ou a ddp, V . Medir a potência eléctrica fornecida a um circuito é, pois, uma operação muito simples. Mas, convém não esquecer, estamos na realidade a medir trabalho realizado por forças sobre cargas eléctricas.

5.2 Efeito de Joule

O que acontece à energia que um gerador eléctrico fornece às cargas de um circuito?

Quando a corrente eléctrica passa numa resistência, esta aquece. Uma analogia mecânica pode ajudar a compreender este fenómeno.

Imaginemos que queremos empurrar uma criança num carrossel giratório. Inicialmente o carrocél está parado. Empurrando-o, realizamos trabalho e a velocidade do carrossel aumenta: a sua energia cinética aumenta. Mas não por muito tempo. A partir de certo ponto temos que continuar a empurrar só para o manter em andamento com velocidade constante. Nessa fase de movimento estacionário, nenhuma da energia transferida pelo trabalho que realizámos resulta em energia cinética de movimento do carrossel: é toda dissipada e manifesta-se como aumento de temperatura dos rolamentos e do eixo do carrossel.

Num circuito eléctrico acontece algo semelhante. Na situação estacionária, corrente e ddp constantes, toda a energia resulta num aumento de temperatura das resistências do circuito.

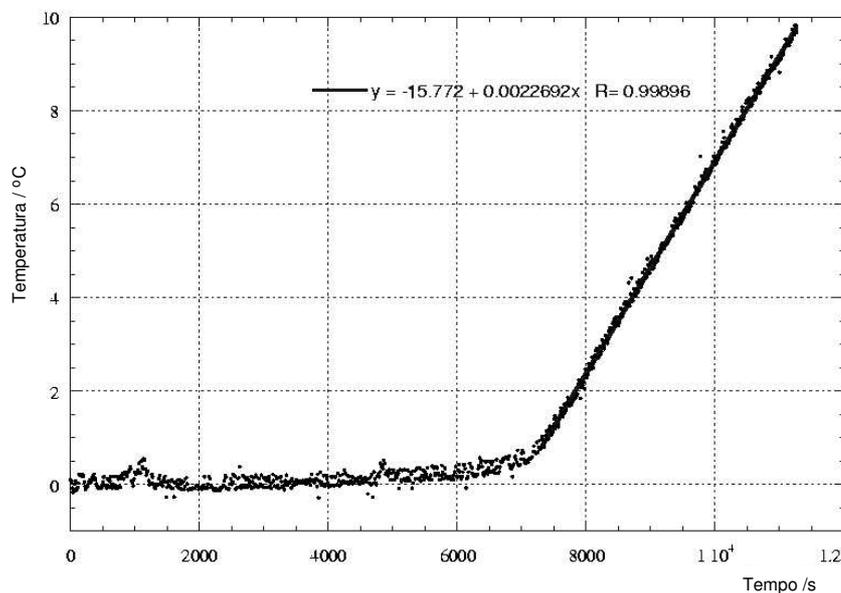


Figura 5.3: Resultados de uma experiência de aquecimento de uma mistura de água e gelo.

▷ Actividade 5.2

Este fenómeno está ilustrado na Fig. 5.3 que mostra os resultados de uma experiência em que se imergiu uma resistência numa garrafa térmica com água.

Durante esta experiência, a corrente foi $I = 0,49 \text{ A}$ e a ddp $V = 4,95 \text{ V}$. A potência dissipada na resistência foi, portanto, $P = 2,43 \text{ W}$. É visível o aumento de temperatura da água, na segunda parte da experiência. Mas a temperatura quase não variou durante cerca de duas horas (7000 s). O que se passou, alguém se esqueceu de ligar a corrente?

De facto a potência acima referida foi fornecida durante toda a duração do registo de temperaturas. Só que a garrafa térmica continha inicialmente uma mistura de água e gelo. Enquanto o gelo não fundiu, a temperatura manteve-se próxima de 0°C .

Assim, a energia total fornecida nesta experiência pode ser dividida em duas partes:

- nos primeiros 7000 s, originou a transformação de gelo em água líquida;
- depois disso originou o aumento de temperatura da água;

Da análise desta experiência (feita na Actividade 5.2) podemos então calcular em joule as seguintes grandezas:

- **O calor de fusão do gelo.**

A energia fornecida nos primeiros 7000 s foi de

$$P \times 7 \times 10^3 = 1,70 \times 10^4 \text{ J.}$$

Esta energia resultou na fusão de 54 g de gelo. O calor de fusão do gelo por unidade de massa é:

$$e_F = 3,15 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1}. \quad (5.3)$$

- **A capacidade térmica mássica da água líquida.**

Como sabemos a energia em joule fornecida no aquecimento e a respectiva variação de temperatura, podemos escrever:

$$c_a m \Delta T = P \Delta t \quad (5.4)$$

em que Δt é o intervalo de tempo durante o qual a temperatura varia de ΔT . Logo

$$c_a = \frac{P}{m} \times \frac{\Delta t}{\Delta T}. \quad (5.5)$$

Os valores de Δt e ΔT podem ser calculados usando dois pontos na recta de aquecimento obtidos do gráfico. Este procedimento é seguido na Actividade 5.2 e permite o cálculo de c_a em J kg K^{-1} .

A nossa definição de caloria significa que $c_a = 1 \text{ cal g K}^{-1}$. Comparando com o valor obtido na Actividade 5.2, podemos calcular o valor da caloria em joule. O valor actualmente aceite é

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

(ver Caixa 5.2).

Na Actividade A12 medimos também o calor de fusão do gelo em cal g^{-1} . O resultado da Eq. 5.3 permite-nos outra estimativa independente da relação entre o joule e a caloria.

▷ Problema 5.1

5.2.1 O joule e a caloria

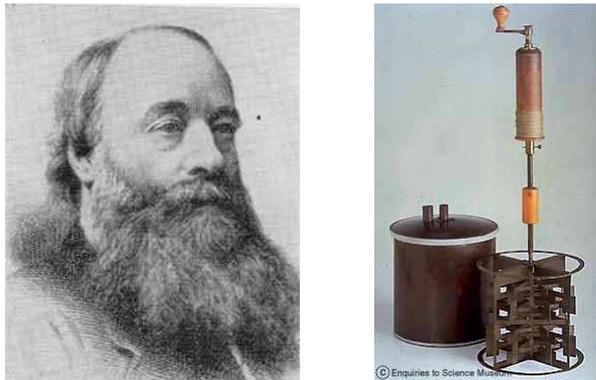


Figura 5.4: James Prescott Joule, (1818-1889). Físico inglês, nascido em Manchester, foi pupilo do químico John Dalton. A sua experiência de aquecimento de água com uma roda de pás accionada por pesos (aparelho à direita), foi um contributo fundamental para a clarificação do conceito de calor. Esta experiência permitiu-lhe determinar a relação entre caloria e a unidade de energia mecânica (que recebeu o seu nome), o **joule**. Joule descobriu também a expressão que exprime a energia dissipada numa resistência que escreveu na forma $P = RI^2$ (efeito de Joule). [6]

A discussão anterior mostra claramente que **joule** e **caloria** são unidades diferentes da mesma grandeza: energia. Tal como nós, os físicos aprenderam primeiro a defini-las de modos independentes e durante muito tempo não conheciam a relação entre elas. Na realidade, nem sabiam que estavam a lidar com a mesma grandeza. Por

um lado tinham os fenómenos mecânicos com movimentos, forças etc. Por outro, sem aparente relação, os fenómenos térmicos, com variações de temperatura e produção de *calor*. Calor foi durante muito tempo visto como uma substância especial, o *calórico*, envolvida em fenómenos de aquecimento. A caloria era considerada uma medição da quantidade de calor.

Em 1795 Benjamin Thompson, na qualidade ministro da Guerra e da Polícia na Baviera, tinha como tarefa supervisionar o fabrico de canhões. Impressionou-o a *quantidade de calor*, aparentemente inesgotável, produzida durante o processo de polimento do interior dos tubos dos canhões. Foi a primeira observação da relação entre a realização de trabalho por forças dissipativas e um aumento de temperatura.

5.2.1.1 Experiência de Joule

Nos meados do século XIX, o físico inglês James Prescott Joule realizou uma experiência semelhante à que fizemos com a varinha mágica na Actividade A9. Aqueceu (aumentou a temperatura) água com uma roda de pás movida por pesos que, ao caírem no campo gravítico, giravam a roda através de um sistema de roldanas. A Fig. 5.5 mostra uma reprodução do desenho do aparelho pela mão do próprio Joule.

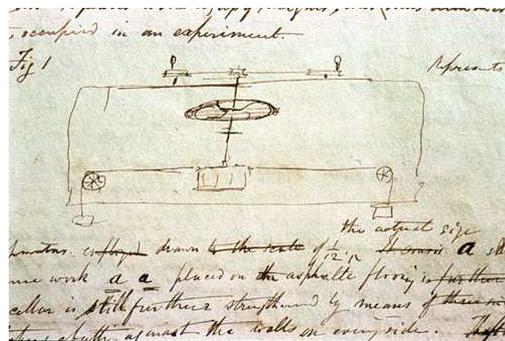


Figura 5.5: Um reprodução do caderno de notas de Joule com um esquema do seu aparelho (Manchester Museum of Science and Industry, UMIST collection).

Joule sabia calcular o trabalho realizado pelas forças do peso. Quando uma massa m cai de uma altura h , o trabalho realizado pelo peso é

$$w = mgh.$$

Este trabalho não aparecia como aumento de energia cinética da massa, porque a queda accionava as pás imersas em água; a massa caía muito lentamente. Joule raciocinou que esta energia era transferida para a água e resultava no respectivo aquecimento. Medindo a variação de temperatura da água, pode relacionar a caloria (na altura vista como unidade de quantidade de calor) com a unidade de trabalho. O valor que encontrou foi de

$$1 \text{ cal} = 4,15 \text{ J}.$$

Ainda hoje a experiência de Joule é referida como ilustrando a transformação de trabalho em calor. Esta afirmação pode induzir em erro. Na realidade trata-se de realizar trabalho e obter um aumento de temperatura. A energia num sistema não é trabalho, nem calor. Pode estar associada a movimento (energia cinética), posição (energia potencial) ou manifestar-se como um aumento de temperatura ou uma mudança de estado. Isto é, uma variação de energia de um sistema pode escrever-se como

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U \quad (5.6)$$

em que o último termo, designado por energia interna, inclui toda a energia associada a processos que não se manifestam em movimentos macroscópicos do corpo. Nos exemplos que vimos até aqui a variação de energia interna pode manifestar-se numa variação de temperatura ou numa mudança de estado físico.

Mas então o que é o calor? Se não é correcto identificar calor com energia interna, o que é então calor?

5.3 Calor

Enchemos um copo com água gelada do frigorífico e deixámo-lo no meio da sala. Passado meia-hora a água estava tépida.

É óbvio que passou energia do exterior do copo para a água: a temperatura da água subiu. Mas não houve deslocamentos, forças, não houve correntes eléctricas e diferenças de potencial, não houve *trabalho* realizado sobre o sistema. Poderíamos, como já vimos, conseguir a mesma variação de estado da água realizando trabalho. Por isso sabemos que a água tépida tem uma energia superior à da água gelada. Mas no caso presente não houve trabalho, nem eléctrico, nem mecânico nem de nenhum outro tipo. Os processos de transferência de energia na ausência de qualquer espécie de trabalho são designados, genericamente, como *calor*.

■ Quanto vale a caloria ■

A unidade de energia do Sistema Internacional é o joule, não a caloria. No entanto, esta unidade continua a ser muito usada, sobretudo por químicos, fisiologistas e nutricionistas. Mas não existe uma definição universalmente aceite. A definição que demos,

energia necessária para elevar a temperatura de 1 g de água de 1 °C,

tem uma ambiguidade: esta quantidade de energia depende da temperatura inicial da água. Não é exactamente igual entre 0 °C e 1 °C e 50 °C e 51 °C, por exemplo, embora os valores sejam muito próximos. Por outras palavras, a capacidade térmica mássica da água líquida tem uma pequena variação com a temperatura. Uma das definições, **caloria 15 °C**, abreviada como cal_{15} , é

energia necessária para elevar a temperatura de 1 g de água de 14,5 °C para 15,5 °C

e vale

$$1 \text{ cal}_{15} = 4,1855 \text{ J.}$$

Outra definição possível é a de **caloria média**:

1/100 da energia necessária para elevar a temperatura de 1 g de água de 0 °C a 100 °C.

O valor quase igual ao da cal_{15} (menos de 1% de diferença). Os químicos usam ainda uma **caloria termoquímica** definida, exactamente, como

$$1 \text{ cal}_{\text{th}} = 4,184 \text{ J.}$$

Durante muito tempo, os fisiologistas e nutricionistas chamaram Caloria (com “C” maiúsculo) o que é efectivamente uma quilo-caloria $1 \text{ Cal} = 1000 \text{ cal}$. Essa prática caiu em desuso, como se pode ver consultando a informação nutricional de um pacote de cereais.

Para os nossos efeitos, não há qualquer problema em ignorar toda esta complicação e tomar:

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J.}$$

Caixa 5.2: A unidade caloria [1]

O que houve então foi transferência de energia como calor (não como trabalho) entre o ambiente e a água do copo. De facto, muitas das experiências que temos feito envolvem calor.

- Quando mergulhamos um cilindro de cobre quente em água fria (Actividade A11), o *processo* de transferência de energia entre o cobre e a água é calor;
- Quando colocamos um gobelé com água num disco quente, a energia passa pelo vidro para a água como calor, não como trabalho;
- Quando seguramos na ponta de uma barra metálica e aproximamos a outra ponta de uma chama, a temperatura na nossa extremidade aumenta. A energia é transferida de uma ponta à outra como calor;

Estes exemplos mostram claramente que o conceito de calor está associado a um *processo*, exactamente como o conceito de trabalho. Podemos aumentar a temperatura da água usando um processo que envolve calor. Mas podemos conseguir exactamente a mesma transformação com trabalho. Num sistema em equilíbrio, que não está a sofrer transformações, não há calor nem há trabalho: há energia!

5.4 Primeira lei da termodinâmica

Este é um bom momento para enunciarmos a primeira lei da termodinâmica. Aqui vai:

■ Primeira lei da Termodinâmica ■

Numa transformação entre dois estados de equilíbrio a variação de energia interna de um sistema ΔU é a soma do trabalho W realizado *sobre* o sistema com calor transferido *para* o mesmo, Q

$$\Delta U = W + Q \quad (5.7)$$

Muitas das ideias resumidas por este enunciado já foram abordadas. Mesmo assim, são necessários alguns comentários.

- a) O primeiro membro da equação só inclui energia interna porque é habitual, em termodinâmica, considerar apenas estados de equilíbrio, em que os termos de energia cinética e de energia potencial de translação não variam (sistemas globalmente em repouso)².
- b) Trabalho e calor são, como vimos, *processos* de transferir energia entre o exterior e o sistema que estamos a considerar. A primeira lei afirma que a soma $W+Q$ é independente do processo de passagem entre dois estados de equilíbrio dados. É sempre a mesma, se os estados forem os mesmos, pois é igual à diferença de energia, ΔU , entre os dois estados. Neste sentido, a primeira lei é, no essencial, a afirmação da existência de uma propriedade do estado de um sistema, a energia, que só varia quando há processos de trabalho e/ou calor com o exterior do sistema.

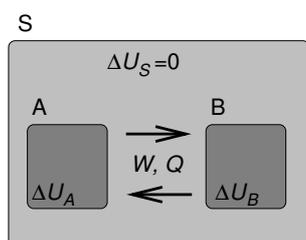


Figura 5.6: Se A e B trocam calor, Q , e trabalho, W , apenas entre si, a energia do sistema S não varia.

- c) A primeira lei é universal. Aplica-se a qualquer sistema físico. Suponhamos uma transformação em que dois sistemas A e B interagem apenas entre si. As respectivas energias variam, pois há processos de trabalho e calor entre estes sistemas. Mas a primeira lei aplica-se também ao sistema S composto por A e B . O trabalho e o calor trocados com o exterior do sistema S são nulos, pois só houve interacção entre A e B ; o sistema S (A e B) diz-se *isolado*. A aplicação da primeira lei a S dá:

$$\Delta U_S = 0.$$

Por outro lado $\Delta U_S = \Delta U_A + \Delta U_B$; recuperámos a lei de conservação de energia:

$$\Delta U_A + \Delta U_B = 0.$$

A primeira lei só faz sentido se soubermos calcular, para diferentes processos, W e Q . Se não os soubermos calcular, como podemos verificar que a respectiva soma é constante para transformações entre o mesmo par de estados? Já vimos vários exemplos de cálculo de W , o trabalho. Vamos agora olhar para Q , o calor, com mais pormenor.

²Muitos argumentam, com razão, que *termoestática* seria um nome mais apropriado. Mas as tradições também pesam em Ciência.

5.5 Como é que a energia se transfere como calor?

Na secção anterior, tivemos o cuidado de identificar calor como um processo de transferência de energia. Por isso o título desta secção não foi, como é habitual na maior parte dos textos, “como se transfere calor?” Mas é preciso ter a noção que é uso comum, mesmo em bons textos de física, falar em transferência de calor, ceder calor, receber calor, transformar trabalho em calor, etc.. Esta linguagem não é, certamente, a mais feliz e é susceptível de sugerir que o calor é uma determinada forma de energia, que pode *estar* num sistema e passar para outro. Mas está de tal maneira consagrada que não pode ser evitada. E também não causa grande dano, se mantivermos uma ideia clara de que, quando falamos de “transferência de calor”, estamos apenas a ser preguiçosos para não dizer “transferência de energia como calor”. No que se segue, usaremos muitas vezes a linguagem corrente. Fica o aviso para não haver confusões.

É habitual identificar três tipos de processos de transferência de calor³:

a) **Condução.**

A energia pode ser transferida devido a interacções entre as partículas constituintes da matéria (na forma gasosa, líquida ou sólida), sem que haja quaisquer movimentos perceptíveis macroscopicamente. Este tipo de processo chama-se condução.

b) **Convecção.**

Em líquidos e gases (fluidos) sujeitos à acção da gravidade, diferenças de temperatura entre diferentes zonas podem originar movimentos que misturam partes do fluido a diferentes temperaturas (correntes de convecção) e permitem a transferência de energia entre regiões do fluido: processo de convecção.

c) **Radiação.**

A transferência de energia é possível através da emissão e absorção de radiação electromagnética, que pode propagar-se em regiões com total ausência de matéria (no vazio).

³Transferências de energia na forma de calor, seria a forma correcta. Vamos habituando!

Vamos considerar em mais pormenor cada um destes processos. A condução e convecção serão discutidas neste capítulo; a radiação no próximo.

5.5.1 Condução

Diferenças de temperatura originam sempre transferências de calor. Falamos em condução de calor quando a energia é transferida através de um meio material em que existem regiões com diferentes temperaturas.

A propriedade que caracteriza a condução de calor em materiais é a condutividade térmica, designada, habitualmente, por κ . Podemos entender melhor o que é, considerando um exemplo concreto.

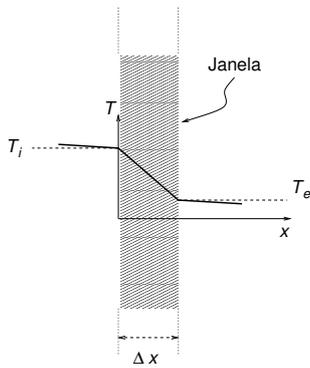


Figura 5.7: No interior do vidro de uma janela, a temperatura varia entre o valor da temperatura interior, T_i , e exterior, T_e .

5.5.1.1 Condução numa janela

É de noite. A temperatura exterior é de cerca de $T_e = 5^\circ\text{C}$. Dentro de casa, o aquecimento mantém uma agradável temperatura de $T_i = 21^\circ\text{C}$. Que quantidade de calor passa numa janela de vidro, de área $A = 0,80 \times 1,0\text{m}^2$?

A temperatura no interior do vidro (ver Fig. 5.7) varia entre as temperaturas das duas faces, interior e exterior, T_i e T_e . A quantidade de calor transferida por unidade de tempo, P_q , é tanto maior quanto mais rápida for a variação de temperatura T com a distância x na perpendicular ao plano da janela. Se estas temperaturas forem iguais, não haverá condução (equilíbrio térmico). P_q é proporcional ao declive, ou variação de temperatura por unidade de comprimento:

$$P_q \propto -\frac{T_e - T_i}{\Delta x} = -\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

P_q é a quantidade de calor que passa no sentido positivo de xx e só é positivo se a temperatura diminuir com o aumento de x ; isto é, se $\Delta T \equiv T_e - T_i < 0$. Se a janela tivesse o dobro da espessura, a variação de temperatura T com x seria mais lenta e haveria menor passagem de calor na janela.

Por outro lado, P_q deverá ser proporcional à área da janela. Em cada uma de duas janelas iguais passará a mesma quantidade de calor. No conjunto das duas (dobro da área) passa o dobro da energia de cada uma.

Em resumo:

$$P_q \propto -A \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

5.5. COMO É QUE A ENERGIA SE TRANSFERE COMO CALOR?121

A constante de proporcionalidade

$$P_q = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.8)$$

é, precisamente, a condutividade térmica do vidro, κ . A Eq. 5.8 traduz a lei de condução de calor num material de condutividade térmica κ . Consideremos um exemplo concreto.

Exemplo: suponhamos que a janela acima referenciada tem uma espessura de 0,3 cm. Teremos

$$P_q = -\kappa \times 0,80 \times \frac{5 - 21}{0,3 \times 10^{-2}} = \kappa \times 5,0 \times 10^3.$$

Para o vidro $\kappa = 0,80$ (SI) e

$$P_q = 4,0 \times 10^3 \text{ W}$$

P_q é uma energia por unidade de tempo, isto é, uma potência: a unidade SI é o **watt**. As unidades de κ , tiram-se da respectiva definição:

$$\kappa = 0,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

À taxa mais baixa da EDP, 5,2 cêntimos por kWh em vazia, a janela “custa” mais de 20 cêntimos por hora!

Na realidade, esta estimativa está um pouco exagerada. Numa situação deste tipo a temperatura no interior, junto à janela, será mais baixa que no centro da sala. Mas, mesmo que a diferença de temperaturas entre as faces interior e exterior da janela seja um oitavo do valor calculado (apenas 2°C), ainda ficamos com uma potência de 0,5 kW de perda pela janela. E junto à janela estará bem pouco agradável ($T_i = 7^\circ\text{C}$).

5.5.1.2 Isolamento térmico

O exemplo anterior mostra a importância económica e ambiental⁴ do bom isolamento térmico. Os valores de condutividade térmica podem variar de várias ordens de grandeza entre diferentes materiais. Em geral, os metais têm condutividades térmicas elevadas. A tabela 5.1 inclui valores de alguns materiais, incluindo materiais usados em construção.

O baixo valor da condutividade térmica do ar pode surpreender. Como é possível aquecer uma sala eficazmente, se a condutividade térmica do ar é tão baixa? A resposta é: a gravidade ajuda!

⁴Menor necessidade de energia significa menos poluição (Actividade A3).

Material	Condutividade térmica, $\kappa / \text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$
Prata	419
Cobre	385
Alumínio	201
Vidro	0,8
Betão	0,1
Madeira(castanho)	0,15
Lã de vidro	0,04
Cortiça em painel	0,05
Ar	0,024

Tabela 5.1: Condutividade térmica de alguns materiais. A do ar refere-se a condições normais de pressão e temperatura [7].

5.5.2 Convecção

A convecção é um fenómeno muito complexo, que envolve dois ingredientes:

- a) um fluido cuja massa volúmica depende da temperatura;
- b) um campo gravítico.

O ar, por exemplo, tem uma massa volúmica tanto menor quanto maior for a respectiva temperatura, para a mesma pressão. Por isso se diz correntemente: “o ar quente é mais leve”. Quando ligamos um aquecedor numa sala, aumentamos a temperatura do ar junto da resistência: a sua massa volúmica diminui. O resultado é que um volume de ar, em baixo, junto ao aquecedor, tem menor massa que o mesmo volume, em cima, junto ao tecto, onde o ar está mais frio.

É uma situação análoga a ter uma rolha de cortiça no fundo de um recipiente com água. O que acontece? A rolha sobe e, para o seu lugar, desce um volume igual de água, com massa volúmica maior. Neste processo o peso realiza um trabalho positivo, pois a massa que desce é superior à que sobe. Por isso é possível passar de uma situação de repouso para uma de movimento, com energia cinética não nula.

■ **Demonstração de convecção para fazer em casa** ■

A seguinte experiência pode ser feita em casa, sem qualquer dificuldade, e ilustra a importância da convecção no funcionamento de uma chama. Requer apenas uma vela e fósforos.

Começa-se por acender uma vela. Fixa-se a vela verticalmente. Aproxima-se da chama a cabeça de um fósforo de duas maneiras:

- a. Directamente por cima da vela. Começa-se a uma distância razoável e vai-se descendo gradualmente até o fósforo acender.
- b. Aproximando a chama lateralmente.

O objectivo é comparar as distâncias a que se tem de chegar com a cabeça do fósforo, para que acenda, nas duas situações.

Caixa 5.3: A convecção e a chama de uma vela.

No ar acontece algo semelhante. O ar “quente” (temperatura superior e massa volúmica menor) sobe, e o ar “frio” (temperatura menor e massa volúmica maior) desce. Só que, neste caso, o ar, ao subir, entra em contacto com massas de ar a menor temperatura e arrefece. O ar que desce aquece em contacto com o aquecedor. O resultado é o estabelecimento de correntes contínuas de circulação de ar, chamadas correntes de convecção, que transportam o calor muito mais eficazmente que a condução. O valor de condutividade térmica da Tabela 5.1 diz respeito a ar em repouso.

Correntes de convecção são essenciais no funcionamento de uma chama. Se aproximarmos a mão da chama de uma vela por cima dela sentimos uma temperatura muito mais elevada do que lateralmente. O ar quente sobe segundo o eixo da vela e é substituído por ar frio pelo lados da mesma. É por isso que a chama de uma vela (zona tão quente que emite luz visível) parece flutuar acima do pavio (ver Caixa 5.3).

Numa janela de vidro duplo, as correntes de convecção são dificultadas pela pequena espessura da camada de ar entre as duas placas de vidro. O resultado é que a camada de ar entre os dois painéis de vidro oferece um excelente isolamento térmico, dada a baixa condutividade térmica do ar (comparada, por exemplo, com a do vidro).

A convecção é um processo físico de enorme importância no transporte de energia em líquidos e gases. No sistema climático da Terra, desempenha um papel fundamental (movimentos da atmosfera e oceanos). Mas importa recordar que só existe por causa do efeito da gravidade terrestre. Na ausência de peso, não há convecção.

5.6 Actividades, Questões e Problemas

5.6.1 Actividades

5.1. Proporcionalidade directa

Actividades destinadas a esclarecer o conceito de proporcionalidade directa e a sua tradução matemática. Ver ficha de Actividade A13.

5.2. Trabalho eléctrico e fusão do gelo

Análise dos resultados de uma experiência de aquecimento eléctrico de uma mistura de água e gelo. Ver Ficha de Actividade A14.

5.6.2 Problemas

5.1. Na Actividade A12 determinou-se o valor do calor de fusão do gelo em cal g^{-1} . Comparando com o valor obtido na Actividade A15, determinar o valor de conversão de joule em caloria. Comparar com o valor obtido a partir da capacidade térmica da água líquida.

5.2. É feito um aquecimento de duas massas de gás iguais, inicialmente às mesmas pressão e temperatura, em duas situações distintas:

- i) O gás está num recipiente de volume constante;
- ii) O gás está num cilindro com êmbolo móvel e expande-se à medida que a sua temperatura aumenta. A pressão é mantida igual à pressão atmosférica.

A mesma quantidade de energia é fornecida, nas duas situações, sob a forma de calor. No final do processo, qual das seguintes situações se verifica:

- (a) o gás a volume constante tem maior energia que o gás a pressão constante;
 - (b) O gás a pressão constante tem maior energia que o gás a volume constante;
 - (c) As duas massas de gás tem a mesma energia.
- 5.3. Imaginemos um frigorífico, com o seu compressor, fechado numa sala isolada do resto do mundo, trocando energia com ele apenas através da ligação eléctrica ao compressor.
- (a) Durante o funcionamento do frigorífico, este sistema recebe ou cede energia ao resto do mundo? A respectiva temperatura aumenta ou diminui?
 - (b) Um homem viu-se de repente num casa muito fria, sem aquecimento e com um único aparelho a funcionar: o frigorífico. Foi à cozinha e abriu a porta do frigorífico, pondo o compressor a trabalhar permanentemente. É louco ou sabe física?
- 5.4. Numa casa há uma sala com: 4 janelas de dimensões $80 \times 107 \text{ cm}^2$; 4 janelas de dimensões $70 \times 185 \text{ cm}^2$. Estas janelas têm painéis de vidro simples de espessura 3 mm .
- (a) Para uma diferença de temperatura de 5°C entre as faces exterior e interior das janelas, qual é a potência transmitida por condução através destas janelas?
 - (b) Se as janelas fossem duplas teriam uma camada de ar de espessura 3 mm entre os dois painéis de vidro. Se a diferença de temperatura entre o interior e exterior da camada de ar fosse também de 5°C , qual seria a potência transmitida por condução através da janela? (usar os valores de κ da Tabela 5.1 da página 122).

Capítulo 6

Radiação

6.1 Radiação Electromagnética

▷ Actividade 6.1.

Na Actividade 6.1 faz-se uma medição da quantidade de energia que uma lâmpada pode emitir na forma de radiação electromagnética visível: luz. A matéria pode emitir e absorver radiação electromagnética e, claramente, temos que levar em conta estes processos na “contabilidade” de energia.

O caso da Terra é particularmente importante neste contexto. Através do vazio não há, nem condução de calor, nem convecção. A energia do Sol chega-nos como radiação electromagnética. Por sua vez, a Terra só pode transferir energia para o espaço emitindo, também, radiação electromagnética. O balanço energético da Terra é, pois, exclusivamente radiativo. Só este facto é suficiente para justificar a importância de compreender trocas de energia na forma de radiação.

6.1.1 O espectro electromagnético

A radiação electromagnética não é apenas luz. É também ondas de rádio, micro-ondas, radiação infra-vermelha, ultravioleta, raios-X e raios- γ . Tudo isto são manifestações do mesmo fenómeno, diferindo apenas no valor de certas grandezas, como o comprimento de onda e a frequência.

Uma compreensão completa dos fenómenos envolvendo radiação e matéria está muito para além das nossas possibilidades neste curso. O nosso interesse principal reside nos aspectos energéticos. Contudo, o conhecimento de alguns aspectos qualitativos sobre

radiação pode ajudar a relacionar muitos fenómenos da nossa observação corrente.

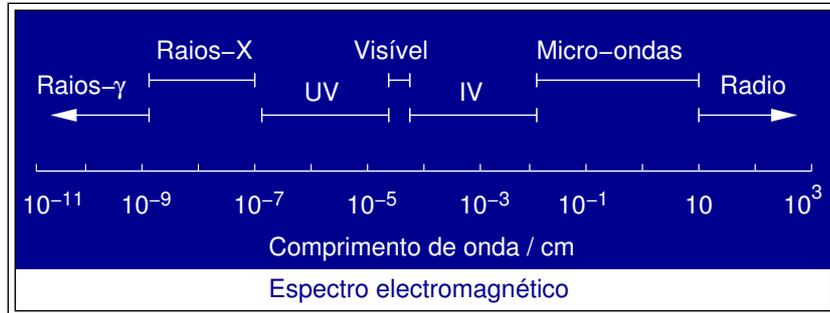


Figura 6.1: Espectro Electromagnético.

A. A radiação electromagnética é produzida por cargas eléctricas ao transitar de nível de energia.

Quando um electrão de um átomo ou molécula transita de um nível de energia, E_2 , para um nível de menor energia, E_1 , emite um fóton, um “pacote” elementar de radiação electromagnética. A conservação de energia exige que associemos ao fóton uma energia $E_2 - E_1$.

B. A radiação electromagnética pode ser absorvida por cargas eléctricas na matéria, originando transições para níveis de energia mais elevada.

Um electrão pode absorver um fóton, passando de um nível de energia E_1 para um nível de energia superior E_2 .

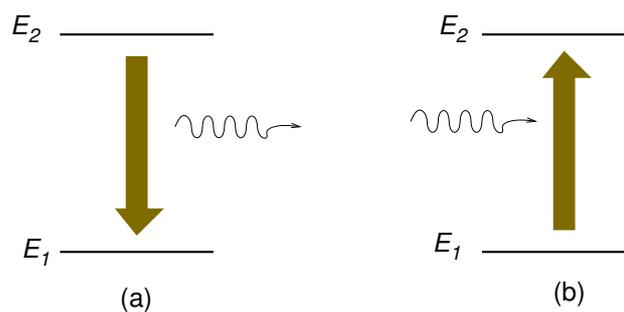


Figura 6.2: Emissão (a) e absorção de radiação (b). O comprimento de onda λ é inversamente proporcional à diferença de energia $E_2 - E_1$.

C. A radiação electromagnética propaga-se no vazio à velocidade da luz, $c = 300\,000\text{ km s}^{-1}$. Nos meios materiais essa velocidade pode ser ligeiramente menor.

Esta velocidade, no vazio, caracteriza toda a radiação electromagnética, não apenas a luz, radiação visível.

D. A radiação pode ser decomposta em componentes com um comprimento de onda, λ , e período, T , bem definidos.

Estas duas grandezas estão relacionadas pela velocidade da radiação electromagnética,

$$\lambda = cT.$$

Nesta altura, não é muito importante conhecer a natureza desta decomposição: apenas que a energia total da radiação pode ser considerada como uma soma de energias associadas a cada comprimento de onda. Os diferentes tipos de radiação (desde ondas de rádio a raios- γ , correspondem a gamas diferentes de comprimento de onda (ver Fig 6.1).

E. A radiação visível corresponde a uma gama muito estreita do espectro electromagnético.

O sentido de visão é sensível à radiação electromagnética numa gama muito estreita de comprimentos de onda, de $4000\text{ \AA} \sim 7000\text{ \AA}$, a chamada radiação visível. Os diferentes comprimentos de onda são percebidos como cores diferentes, do violeta ($\sim 4000\text{ \AA}$) ao vermelho ($\sim 7000\text{ \AA}$).

6.1.2 Intensidade de radiação

Como podemos caracterizar a quantidade de energia de radiação incidente na superfície de um dado corpo?

A energia incidente num intervalo de tempo Δt é o produto da potência da radiação incidente na superfície, por Δt :

$$\Delta E = P\Delta t.$$

Quanto maior for a área de exposição, maior será a energia incidente. Para áreas suficientemente pequenas para que a radiação não varie de intensidade de ponto para ponto, a potência total deve ser proporcional à área de exposição:

$$\Delta E = P\Delta t = IA\Delta t$$

■ Medindo a intensidade da chuva ■

Dois amigos envolveram-se numa discussão sobre em qual dos bairros em que moravam chovia mais. Para decidir a questão resolveram recorrer ao método experimental. Combinaram colocar baldes à chuva e medir a quantidade de água que recolhiam. Assim fizeram, e, num dia particularmente chuvoso, recolheram 4 kg e 6 kg de água, respectivamente.

Ao juntarem-se para comparar resultados, o primeiro perguntou logo:

Quanto tempo tiveste o balde à chuva?

Acontecera que o segundo amigo recolhera água durante 30 minutos e o primeiro só durante 16. Concordaram que teriam que comparar água recolhida no mesmo intervalo de tempo. Como a massa recolhida é proporcional ao tempo de exposição

$$\Delta M = Q\Delta t,$$

facilmente calcularam os caudais, Q , (massa por unidade de tempo) de cada um:

$$Q_1 = \frac{4}{16} = 0,25 \text{ kg min}^{-1}$$

$$Q_2 = \frac{6}{30} = 0,2 \text{ kg min}^{-1}.$$

O segundo amigo, não convencido, lembrou-se de perguntar:

Afinal que balde usaste?

Discutindo o assunto, chegaram à conclusão que o caudal também era proporcional à área da abertura do balde:

$$\Delta M = Q\Delta t = IA\Delta t.$$

Mediram os raios dos baldes e calcularam as áreas respectivas, tendo obtido $A_1 = 0,075 \text{ m}^2$ e $A_2 = 0,06 \text{ m}^2$. Determinaram a intensidade da chuva, I , (massa, por unidade de área e de tempo) em cada um dos casos:

$$I_1 = \frac{4}{16 \times 0,075} = 3,3 \text{ kg min}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$$I_2 = \frac{6}{20 \times 0,06} = 3,3 \text{ kg min}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

Naquele dia, pelo menos, choveu com igual intensidade nos dois bairros.

Caixa 6.1: Intensidade da Chuva.

I é a intensidade de radiação incidente na superfície, isto é, a potência incidente por unidade de área. A história da Caixa 6.1 pode ajudar a compreender esta definição.

Um exemplo importante é o da radiação solar incidente num planeta como a Terra ou a Lua. A energia radiada pelo Sol espalha-se igualmente em todas as direcções. A uma distância do Sol igual ao raio da órbita da Terra, essa radiação está igualmente distribuída por uma área igual à de uma esfera com esse raio. A Terra recebe (*intercepta*), num dado intervalo de tempo, a energia que atravessa um disco de área πR_T^2 . A potência incidente na Terra é:

$$P_T = I\pi R_T^2.$$

Para a Lua (que está quase à mesma distância do Sol que a Terra) seria

$$P_L = I\pi R_L^2.$$

I é a intensidade de radiação, potência incidente por unidade de área, a uma distância do Sol igual ao raio da órbita da Terra. Designa-se por constante solar e vale

$$I = 1,36 \times 10^3 \text{ W m}^{-2}.$$

No caso da radiação é útil considerar separadamente os vários comprimentos de onda. Podemos definir como $I(\lambda, \Delta\lambda)$ a intensidade de radiação correspondente ao intervalo de comprimentos de onda $[\lambda - \Delta\lambda/2, \lambda + \Delta\lambda/2]$. Em geral, mantemos $\Delta\lambda$ fixo e estudamos apenas a variação com λ .

6.2 Interacção da radiação com a matéria

Ao discutir a interacção da radiação com a matéria é importante distinguir os seguintes fenómenos.

6.2.0.1 Difusão e absorção

Quando a radiação incide num corpo opaco, parte da intensidade incidente é **difundida** (espalhada em todas as direcções) e parte absorvida. É a luz difundida que nos permite ver os objectos à nossa volta, na presença de luz do Sol ou de luz artificial. A radiação de um dado comprimento de onda é difundida com o mesmo comprimento de onda. Numa superfície muito polida (um

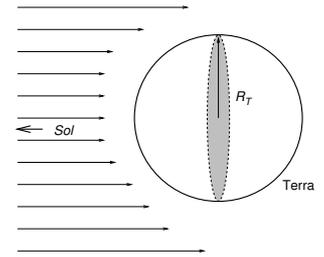


Figura 6.3: A energia incidente sobre a Terra é a que passa num disco de raio igual a R_T .

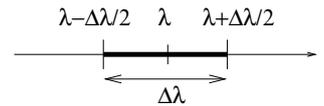


Figura 6.4: A intensidade $I(\lambda, \Delta\lambda)$ é intensidade de radiação cujo comprimento de onda está no intervalo da figura.

▷ **difundir:** enviar em muitas direcções; espalhar.

espelho) a difusão dá-se numa direcção determinada e chama-se reflexão.

Sendo $I_{\text{in}}(\lambda, \Delta\lambda)$, a intensidade incidente, a parte absorvida é uma fracção, $0 \leq e \leq 1$, da incidente,

$$I_{\text{abs}}(\lambda, \Delta\lambda) = eI_{\text{in}}(\lambda, \Delta\lambda), \quad (6.1)$$

e a difundida

$$I_{\text{dif}}(\lambda, \Delta\lambda) = (1 - e)I_{\text{in}}(\lambda, \Delta\lambda) \quad (6.2)$$

o que exprime simplesmente a conservação de energia, para cada gama de comprimentos de onda:

$$I_{\text{abs}}(\lambda, \Delta\lambda) + I_{\text{dif}}(\lambda, \Delta\lambda) = I_{\text{in}}(\lambda, \Delta\lambda).$$

Se o corpo for transparente há uma parte da radiação que o atravessa sem modificação. Incluiremos essa fracção na radiação difundida. Ao fim ao cabo, o mais importante é que só a radiação absorvida pode alterar a energia do corpo.

O coeficiente de absorção, e , depende, em geral, do comprimento de onda da radiação incidente, $e \rightarrow e(\lambda)$. Isso explica a cor dos objectos. Uma superfície branca difunde igualmente (mesmo e) a radiação dos diferentes comprimentos de onda que compõem a luz solar. Uma superfície de cor tem uma absorção mais forte em certos comprimentos de onda ($e(\lambda)$ maior) e a luz difundida tem então menor intensidade nesses comprimentos de onda ($1 - e(\lambda)$ menor). A distribuição de energia pelos diferentes comprimentos de onda da luz difundida fica diferente da luz solar e vemos uma cor. Por exemplo, uma superfície que absorva mais fortemente os comprimentos de onda mais pequenos, violeta e azul, difundirá luz que pode aparecer com tonalidades de amarelo e vermelho.

▷ Actividade 6.2

6.2.0.2 Emissão

Se elevarmos suficientemente a temperatura de uma resistência num circuito eléctrico, esta começa a brilhar: primeiro com uma cor avermelhada, e com uma intensidade luminosa baixa (temperatura da ordem dos 800 K). Aumentando a temperatura, a cor torna-se mais amarelada e a luz emitida aumenta. Numa lâmpada de incandescência, a temperatura está próxima dos 2800 K. As lâmpadas de halogéneo têm intensidades ainda mais altas e uma luz “mais branca”.

■ De noite todos os gatos são pardos. ■

Este provérbio tem também um conteúdo científico. De facto, quando a intensidade de luz difundida é baixa, não percebemos cor. A seguinte demonstração pode ser feita com grande facilidade com uma caixa de lenços de papel vazia, alguns pedaços de cartolina e um furador.

Fazer um furo no centro de um pedaço de cartolina de tamanho suficiente para tapar a abertura da caixa, (dobrando a cartolina e furando na dobra, consegue-se). Tapar a abertura da caixa e observar o fundo pelo furo. Verificar se se consegue distinguir uma folha branca de uma cartolina preta colocadas no fundo da caixa.

Caixa 6.2: A cor e a difusão de luz.

A luz do filamento da lâmpada não é luz difundida: é luz emitida pelo próprio filamento. Ao contrário da radiação difundida, a radiação emitida não cessa, se cessar a radiação incidente.

Para que um corpo possa emitir radiação, basta que tenha cargas eléctricas em níveis de energia excitados: ao transitarem para níveis mais baixos, é emitida radiação. Na Actividade 6.2, verifica-se que a composição espectral da luz emitida depende da temperatura.

Curiosamente, um corpo só pode emitir nos comprimentos de onda que pode absorver. Isso é fácil de compreender do diagrama da Fig. 6.2 na página 128. Se um corpo puder absorver radiação de um dado comprimento de onda, transitando de um nível de energia $E_1 \rightarrow E_2$, então, pode emitir no mesmo comprimento de onda transitando de $E_2 \rightarrow E_1$. Assim, se para um dado comprimento de onda, λ , o corpo não absorve ($e(\lambda) = 0$), também não emite nesse comprimento de onda. Por isso $e(\lambda)$ é designado, também, por **emissividade**. É oportuno recordar do estudo de química, que as riscas de emissão e de absorção de um dado material ocorrem aos mesmos comprimentos de onda.

6.2.1 Radiação do corpo negro

6.2.1.1 Lei de Kirchhoff

Se a intensidade de radiação absorvida por um corpo é superior à intensidade emitida a sua energia e, em geral, a sua temperatura

umentam. Se emitir mais do que absorve a sua energia e temperatura diminuem. Numa situação de equilíbrio as intensidades de radiação absorvida e emitida são iguais.

Embora nada soubesse sobre níveis de energia, o físico Kirchhoff, no final do século XIX, com um brilhante argumento baseado nas leis da termodinâmica, conseguiu mostrar um resultado notável sobre distribuição da energia pelos diferentes comprimentos de onda da radiação emitida por um corpo a temperatura T . Kirchhoff mostrou que intensidade de radiação emitida por um corpo, em equilíbrio térmico, a uma temperatura T , tem a forma:¹

$$I_{\text{em}}(\lambda, \Delta\lambda) = e(\lambda)I_{\text{cn}}(\lambda, \Delta\lambda) \quad (\text{Lei de Kirchhoff}) \quad (6.3)$$

em que $I_{\text{cn}}(\lambda, \Delta\lambda)$ é uma função *universal* da temperatura, T , isto é, igual para todos os corpos, em todas as situações de equilíbrio térmico. Se conhecermos esta função (que Kirchhoff não conhecia) basta-nos saber a emissividade da superfície e a temperatura de um corpo (**e mais nada**) para conhecermos a intensidade de radiação emitida em cada comprimento de onda.

A função $I_{\text{cn}}(\lambda, \Delta\lambda)$, a cada temperatura, chama-se intensidade de radiação de um **corpo negro**. Porquê corpo negro? Repare-se que, pela lei de Kirchhoff, $I_{\text{cn}}(\lambda, \Delta\lambda)$ é a radiação emitida por um corpo que tenha $e(\lambda) = 1$, para todos os comprimentos de onda, λ . Mas, pela definição de e da Eq. 6.1, trata-se, também, de um corpo que *absorve toda a radiação que nele incide, não difunde*.

6.2.1.2 Lei de Planck

A lei que determina o modo como a radiação do corpo negro, $I_{\text{cn}}(\lambda, \Delta\lambda)$ varia com o comprimento de onda e a temperatura foi descoberta no último ano do século XIX (1900) por Max Planck e coincide com o nascimento da ideia do “quantum” de energia. Há duas consequências dessa lei que nos permitem compreender melhor os resultados da Actividade 6.2.

Lei de Stefan-Boltzmann: A intensidade total radiada, isto é, somada sobre todas as gamas de comprimento de onda, é proporcional à quarta potência da temperatura em **kelvin**:

$$I_{\text{cn}} = \sigma T^4 \quad (\text{lei de Stefan – Boltzmann})$$

¹Na forma em que está escrito, este resultado exige que e não varie na gama de comprimentos de onda $[\lambda - \Delta\lambda/2, \lambda + \Delta\lambda/2]$. Escolhendo $\Delta\lambda$ pequeno consegue-se sempre satisfazer esta condição.

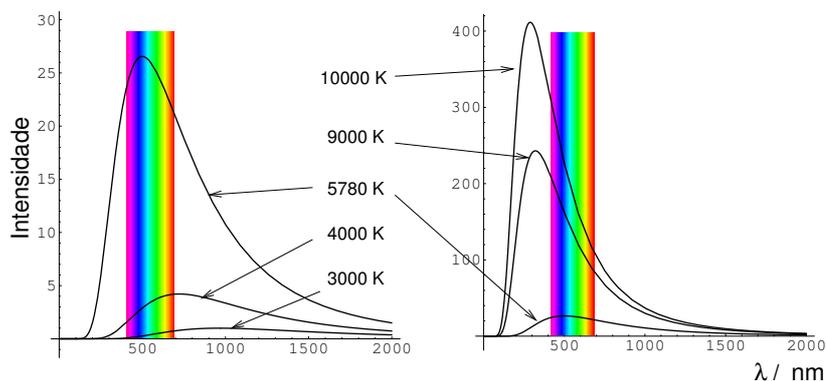


Figura 6.5: Intensidade espectral, $I_{\text{cn}}(\lambda, \Delta\lambda)$ da radiação do corpo negro para várias temperaturas (lei de Planck). A banda colorida mostra, aproximadamente, a gama de radiação visível. As curvas de intensidade foram divididas pelo valor do máximo da curva de $T = 3000 \text{ K}$.

A constante σ é designada por constante de Stefan-Boltzmann. Naturalmente é uma constante universal, tal como a lei de Planck.

Lei de Wien: A uma dada temperatura T , a intensidade $I_{\text{cn}}(\lambda, \Delta\lambda)$ tem um máximo a um comprimento de onda λ_T , dado por

$$\lambda_T = \frac{b}{T}$$

em que $b = 2,9 \times 10^{-3} \text{ mK}$.

Assim, quanto mais alta for a temperatura, de um corpo:

- i) mais energia radia. Repare-se que entre uma temperatura de 300 K (temperatura ambiente) e 3000 K (o filamento de uma lâmpada de halógeno) a temperatura aumenta 10 vezes, mas a potência radiada aumenta 10^4 vezes (10 000 vezes mais energia radiada no mesmo tempo). Na figura 6.5 é visível o aumento da intensidade a todos os comprimentos de onda, quando a temperatura aumenta.
- ii) Mais pequenos são os comprimentos de onda da radiação que é emitida. Como se vê na Fig. 6.5, a distribuição espectral desloca-se para comprimentos de onda mais pequenos com o aumento de temperatura.

Então, se todos os corpos radiam, por que temos que iluminar um livro para o ler?

Por um lado, a intensidade da radiação emitida aumenta com a temperatura do corpo—lei de Stefan-Boltzmann. Por isso o filamento de uma lâmpada ($T \approx 2500\text{ K}$) brilha e um livro ($T \approx 300\text{ K}$) não.

Por outro lado, quanto mais baixa for a temperatura, maiores são os comprimentos de onda da radiação emitida—Lei de Wien. Se o comprimento de onda for superior a cerca de 7000 \AA (ou inferior a 4000 \AA), a radiação não é visível. Os corpos que consideramos luminosos, como o Sol ou o filamento de uma lâmpada, estão a uma temperatura suficientemente alta para emitirem valores significativos de radiação com comprimentos de onda menores que 7000 \AA , na gama do visível. Para temperaturas mais baixas a emissão é sobretudo no infra-vermelho.

6.2.2 Radiação cósmica de fundo

A realização prática de um verdadeiro corpo negro, foi concretizada de um modo totalmente inesperado.

Quando o universo tinha menos de cerca de três minutos de existência, a seguir ao Big-Bang, a temperatura era tão alta ($T > 3000\text{ K}$), que praticamente não havia átomos. Os electrões e os núcleos estavam separados. Nessas circunstâncias o Universo inteiro era um corpo negro, e as cargas livres absorviam e re-emitiavam toda a radiação. Com a expansão do universo a temperatura diminuiu, formaram-se os átomos, que são neutros, e a matéria tornou-se praticamente transparente à radiação. A radiação que então existia, preenche hoje todo universo. Mas com a expansão do Universo, nos últimos 20 mil milhões de anos, o respectivo comprimento de onda aumentou e a temperatura diminuiu (lei de Wien).

Esta radiação foi descoberta em 1966 por Penzias e Wilson. Em 1992, o satélite COBE, **CO**smic **B**ackground **E**xplorer, completou uma série de medidas, muito precisas, da intensidade desta radiação cósmica de fundo em diferentes comprimentos de onda. Verificou que correspondia, com enorme precisão, à lei de Planck, para uma temperatura de $2,725\text{ K}$. A Fig. 6.6 ilustra esse acordo.

6.2.3 Radiação e a Primeira Lei da Termodinâmica

A radiação difundida não entra no balanço energético de um corpo. Mas, a sua energia interna varia, se a energia da radiação absor-

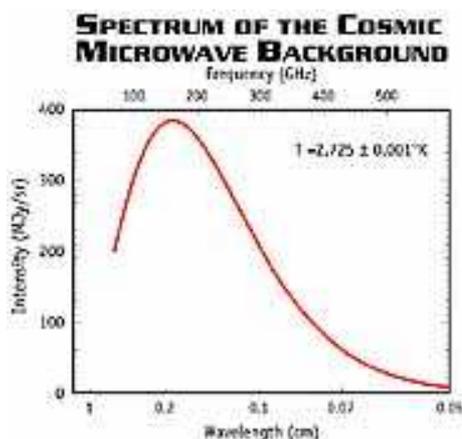


Figura 6.6: Os dados da medição da radiação cósmica de fundo pelo satélite COBE não se conseguem distinguir da curva teórica da lei da Planck (vermelho).[4]

vida e da radiação emitida não forem iguais. Isso acontece se o corpo não estiver à mesma temperatura que o ambiente. A energia emitida é superior à absorvida, se a sua temperatura for superior à do ambiente: o exemplo é um filamento incandescente. Se a sua temperatura for inferior à do ambiente, a energia da radiação absorvida é superior à da emitida: é o caso de um bloco de gelo colocado numa sala aquecida. O resultado é sempre a aproximação da situação de equilíbrio térmico, em que as temperaturas são iguais.

Estes processos de transferência de energia por emissão e absorção de radiação não estão associados a movimentos e forças macroscópicas e podem, por isso, ser considerados como calor. Alguns autores, no entanto, preferem distinguir processos de radiação de processos de condução e convecção de calor e escrever a primeira lei da termodinâmica como:

$$\Delta U = W + Q + R, \quad (6.4)$$

em vez do tratamento mais comum, que consiste em incluir as trocas de energia por radiação no termo de calor:

$$\Delta U = W + Q. \quad (6.5)$$

Será uma escolha melhor que a outra?

Do ponto de vista prático, quando estamos a medir com meios convencionais (termómetros, calorímetros), pode ser difícil distinguir

a quantidade de energia que passou por condução da que passou por radiação. Quando a água fria de um copo aquece, para citar o exemplo do capítulo 5, ocorrem os dois processos em simultâneo: radiação e condução de calor. Uma diferença de temperatura entre um corpo e o seu exterior origina, em geral, trocas de energia pelos dois mecanismos.

As leis da termodinâmica, como a primeira lei, exprimem princípios gerais, independentes dos mecanismos envolvidos nas transformações. Nesse contexto a formulação da Eq. 6.5 é a mais conveniente: separa no segundo membro, processos envolvendo variações de variáveis macroscópicas, como deslocamentos, variações de volume, correntes eléctricas, ou seja trabalho, de processos em que nenhuma destas grandezas varia, calor. O mecanismo pelo qual a transformação ocorre é irrelevante do ponto de vista de uma análise termodinâmica. Por este facto, e por ser a convenção mais usada em livros de texto de termodinâmica, será a que usamos nestas notas.

Quando se consideram os mecanismos microscópicos de transferência de energia, pode fazer sentido manter a distinção da Eq. 6.4: a transferência de energia por radiação é, efectivamente, um mecanismo diferente da condução ou convecção, como vimos neste capítulo e no anterior.

O mais importante, contudo, é ter sempre uma ideia clara de qual das formulações estamos a usar. O resultado final da análise de um fenómeno tem que ser o mesmo.

6.3 Actividades, Questões e Problemas

6.3.1 Actividades

6.1. Rendimento de uma lâmpada de incandescência.

Determina-se a fracção de energia fornecida a uma lâmpada de incandescência que é emitida como radiação luminosa. Ver ficha de actividade A16.

6.2. Espectro de uma lâmpada de incandescência

Estudo qualitativo da relação entre a temperatura de um filamento e o espectro de radiação emitida. Ver ficha da Actividade A15.

6.3.2 Problemas

6.1. A constante solar, definida na página 129, vale:

$$I = 1,36 \times 10^3 \text{ W m}^{-2}.$$

- (a) Em alguns livros aparece expressa na unidade $\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Isso é correcto?
- (b) Se a Terra “intercepta” a radiação incidente num disco de área πR_T^2 , que área é necessária para “interceptar” toda a radiação emitida pelo Sol?
- (c) Qual é a potência total radiada pelo Sol?
(Raio da Terra, $6,4 \times 10^6 \text{ m}$; Raio da órbita da Terra, $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$; Área de uma esfera, $4\pi R^2$).
- 6.2. Uma lâmpada de 100 W emite como radiação visível cerca de 10% da energia que consome. Qual é a intensidade de radiação visível a uma distância de 2 m da lâmpada?
(Área de uma esfera, $4\pi R^2$).
- 6.3. Calcular o comprimento de onda para o qual é máxima a potência radiada para as seguintes temperaturas e localizar a radiação correspondente no espectro electromagnético (ver Fig. 6.1):
- (a) temperatura da superfície do Sol, $T = 5780 \text{ K}$;
- (b) temperatura da superfície da Terra, $T \approx 280 \text{ K}$;
- (c) lâmpada de halogéneo, $T \approx 3000 \text{ K}$;
- (d) radiação cósmica de fundo, $T = 2,7 \text{ K}$;
- 6.4. Os seguintes dados dizem respeito ao Sol:
- Raio, $R_\odot = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$;
 - Potência radiada, $P = 3,90 \times 10^{26} \text{ W}$;
 - Temperatura de superfície, $T_\odot = 5780 \text{ K}$.

Qual o valor da constante de Stefan-Boltzmann, que se obtém destes dados?

Capítulo 7

A hipótese atómica

7.1 O facto mais importante

Uma pergunta que se ouve frequentemente em entrevistas é:

Se ficasse perdido numa ilha deserta, que livro (disco) preferia levar?

Feynman, na primeira aula do Volume I das suas famosas lições [2], propõe uma versão diferente desta pergunta:

Se, num qualquer cataclismo, todo o conhecimento científico fosse destruído e apenas uma frase passasse para a próxima geração de criaturas, que proposição teria a máxima informação no menor número de palavras?

O próprio Feynman dá imediatamente a resposta:

Creio que é a *hipótese atómica* (ou *facto atómico*, ou o que lhe queiram chamar) que *todas as coisas são feitas de átomos—pequenas partículas que se movem em movimento perpétuo, atraindo-se quando estão a uma pequena distância e repelindo-se se forem espremidas umas contra as outras.*

Será verdade? As coisas são feitas de partículas em movimento contínuo? Que provas há?



Figura 7.1: Richard Feynman foi, sem dúvida, o mais mediático físico do século XX. As suas lições [2] são um dos mais notáveis livros de texto de Física (©AIP).

Seria possível passar dias a enumerar evidências experimentais e teóricas da existência de átomos. Físicos, químicos e biólogos moleculares, organizam todo o seu trabalho e pensamento em termos de átomos ou moléculas. O conjunto das evidências é tão esmagador, que toda a ciência moderna, da Física à Química, à Biologia, desapareceria se esta *hipótese atômica* não fosse verdadeira. Nenhum cientista, sóbrio e em pleno uso das suas faculdades, a põe em dúvida.

Um tipo particular de microscópio, inventado em 1981, por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, o microscópio de varrimento de efeito de túnel (STM, *Scanning Tunneling Microscope*), permite gerar imagens espantosas onde é possível distinguir as posições individuais de átomos numa superfície. Na realidade estas “imagens”, são obtidas a partir de registos de corrente eléctrica, ou diferença de potencial, entre a ponta de uma agulha finíssima e uma superfície muito próxima (poucos Angstrom de distância). Mesmo assim, são mais do que suficientes para convencer aqueles que querem *ver para crer*¹!

Angstrom, Å=10⁻¹⁰ m

Neste capítulo voltamos a visitar alguns dos conceitos que temos estudado, em particular temperatura e calor, e tentaremos entendê-los no contexto da *hipótese atômica*. Vamos prestar particular atenção ao *movimento perpétuo dos átomos* mencionado por Feynman. Começaremos por considerar um dos efeitos mais directos desse movimento: o movimento browniano.

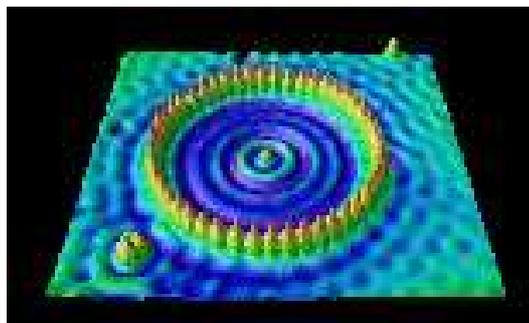


Figura 7.2: Imagem de STM de uma estrutura artificial de 48 átomos de Ferro numa superfície de Cobre[3].

¹No portal do Faraday <http://www.fc.up.pt/faraday> existe uma página com mais informação sobre STM.

7.2 Movimento Browniano

Em 1827 o botânico Robert Brown, observando ao microscópio grãos de pólen de uma espécie chamada *Clarkia Pulchella*, notou que pequenas partículas presas no interior dos grãos tinham um movimento irregular permanente.

Com um microscópio óptico como o de Brown (ampliações até $500\times$) não é possível ver átomos ou moléculas. Percebemos isso imediatamente, se nos lembrarmos que as dimensões atômicas são da ordem de 1 \AA ou seja 10^{-10} m . Ora $500 \times 1\text{ \AA} = 0,00005\text{ mm}$, um tamanho muito abaixo do que conseguimos ver. As partículas que Brown observou teriam diâmetros de cerca de 2 milésimos de milímetro (2 micrometro, $2\text{ }\mu\text{m}$), ou seja, $20\,000\text{ \AA}$.

Na Actividade 7.1 propõe-se a observação de uma suspensão de gotas de gordura (leite) em água. Essas gotas tem diâmetros da ordem de $1\text{ }\mu\text{m}$ e aparecem no microscópio como pequenos pontos. Numa única gota de água com um diâmetro de $1\text{ }\mu\text{m}$ há cerca de 10^{10} moléculas (10 mil milhões).

▷ Actividade 7.1

▷ Problema 7.1



Figura 7.3: Imagem de microscópio de uma suspensão de leite em água. (ampliação $\approx 500\times$). As manchas claras e escuras são gotas de leite em diferentes planos.

O movimento destas gotas de leite é semelhante ao que Brown observou, e é perfeitamente visível ao microscópio. À primeira vista parece uma vibração. Uma observação mais atenta mostra que as gotas se deslocam no campo de observação, embora com um movimento irregular, com constantes mudanças de direcção. Este movimento pode ser observado durante horas com a mesma preparação, até a água se evaporar.

Na realidade, qualquer suspensão de partículas suficientemente pequenas, seja qual for a sua natureza, revela, ao microscópio, o mesmo tipo de movimento, conhecido como movimento Browniano.

Origem do movimento browniano.

A origem do movimento browniano das gotas de leite é, precisamente, o movimento perpétuo das moléculas de água que refere Feynman.

É verdade que a massa de uma gota de leite é muito maior que a massa de uma molécula de água. A proporção é semelhante à razão entre a massa de um grande petroleiro e a de uma moeda de 10 cêntimos. O petroleiro não se vai deslocar, se colidir com ele **uma** moeda de 10 cêntimos.

Do mesmo modo o efeito de uma colisão com **uma** molécula de água não afecta o movimento da gota. Mas o número de moléculas de água é muito grande (cerca de 10^{10} para um volume igual ao da gota de leite); a gota está sujeita a um número enorme de choques com essas moléculas. Desses choques resulta o movimento irregular que observamos ao microscópio.

O famoso físico Albert Einstein, no início do século XX, fez um estudo teórico detalhado das características deste movimento de uma partícula, resultante de colisões com um grande número de partículas com muito menor massa. As suas previsões foram totalmente confirmadas, alguns anos depois, pelo físico Jean Perrin, num paciente trabalho de observação do movimento individual de algumas partículas no microscópio. O objectivo (conseguido) de Einstein era apresentar argumentos decisivos para a existência real de átomos, uma ideia muito pouco aceite na época.

7.2.1 A energia cinética média de uma gota.

Como resultado das suas colisões com as moléculas de água, a velocidade da gota varia permanentemente. A sua energia cinética também varia no tempo. Mas, em média, que valor tem?

Imaginemos que uma gota pára. As moléculas colidem com ela vindo de todas as direcções. Poderíamos pensar que os respectivos efeitos se cancelam e a gota permanece parada.

Esta conclusão não é correcta, pois não leva em conta a natureza desordenada do movimento das moléculas de água. Imaginemos

que lançamos uma moeda ao ar para saber se a próxima colisão de uma molécula vai “empurrar” a molécula para a esquerda ou direita. Em *média*, se lançarmos 100 moedas, obtemos 50 caras e 50 coroas; mas só *em média*. Num único ensaio de 100 lançamentos não teremos, em geral, *exactamente* 50 de cada uma das possibilidades. Estes desvios relativamente ao resultado médio chamam-se *flutuações estatísticas*. Do mesmo modo, os efeitos das colisões com as moléculas de água não se cancelarão exactamente e a gota rapidamente será posta em movimento.

Por outro lado, se uma gota tiver uma velocidade elevada, vai colidir mais vezes com moléculas do lado para onde se desloca. A sua velocidade tenderá a diminuir.

Estes argumentos tornam **plausível** que a energia cinética da gota oscile em volta de um valor de equilíbrio.

Na realidade, há uma lei muito simples, que traduz este equilíbrio:

No equilíbrio, a energia cinética média de translação da gotícula de leite é a mesma que a energia média de uma molécula de água!

Na Fig. 7.4 mostra-se um exemplo do que poderia ser a variação no tempo da energia cinética de uma gota, cujo valor inicial de energia cinética fosse muito superior ao valor de equilíbrio. A energia diminui, inicialmente, e fica a oscilar (flutuar) em torno do valor de equilíbrio, igual à energia cinética média de uma gota de água.

A igualdade das energias cinéticas médias de translação verifica-se para quaisquer sistemas de partículas que possam trocar energia, depois de atingido o estado de equilíbrio, em que, em média, as energias dos dois sistemas se mantêm constantes. É uma consequência do *Teorema da Equipartição da Energia*². Como vamos ver vai-nos conduzir a uma interpretação muito interessante do conceito de temperatura.

²Este resultado deixa de ser verdade quando a temperatura se aproxima demasiado do zero absoluto e os efeitos quânticos no movimento de translação das partículas se começam a notar.

▷ Actividade 7.3.

plausível: de acordo com as nossas expectativas; razoável.

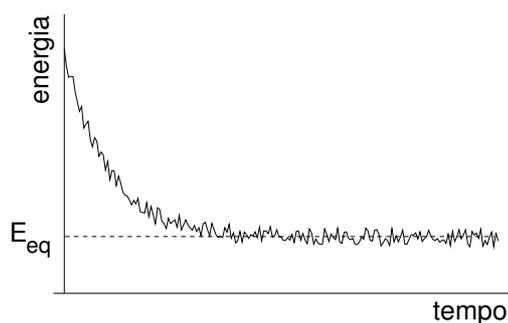


Figura 7.4: Exemplo de equilíbrio dinâmico. Inicialmente a energia é superior ao valor de equilíbrio e diminui. Mas depois de equilibrada continua a flutuar em torno do valor médio.

7.3 Energia Cinética e Temperatura

7.3.1 Interpretação microscópica de temperatura.

Atentemos os seguintes factos já referidos neste ou noutros capítulos:

1. A variação de energia de um corpo pode manifestar-se por uma variação de temperatura. A temperatura aumenta, em geral, se a energia aumentar.
2. Dois corpos a temperaturas diferentes trocam energia até as temperaturas ficarem iguais.
3. As partículas (átomos ou moléculas) de um corpo estão em permanente movimento.
4. Dois sistemas de partículas em contacto deixam de trocar energia, em média, quando as energias cinéticas médias de cada partícula forem iguais para os dois sistemas.

Estas observações sugerem uma relação muito directa:

$$\text{temperatura} \leftrightarrow \text{energia cinética por partícula.}$$

Estará a temperatura de um sistema relacionada com a energia cinética média das suas partículas? Não será a temperatura apenas

uma manifestação macroscópica da maior ou menor agitação das partículas de um corpo?

Perguntas deste tipo tem uma importância fundamental em Física. Relacionam as observações à nossa escala macroscópica, sistematizadas e organizadas por conceitos como calor, temperatura, trabalho, etc. com o comportamento dos átomos e moléculas que constituem a matéria.

Sejamos ousados e investiguemos a seguinte hipótese, que designaremos como **interpretação microscópica de temperatura**:

A temperatura de um corpo é proporcional à energia cinética média de translação das suas partículas.

Vamos ver a seguir que esta ideia nos ajuda a compreender muitos dos conceitos que discutimos nos capítulos anteriores.

7.3.1.1 Dissipação e Temperatura

Já no Capítulo 2 mencionámos que forças dissipativas, como o atrito, podem diminuir a energia associada a movimentos macroscópicos, como a energia cinética de translação ou potencial de um corpo; que estes processos são acompanhados de aumento de temperatura.

No capítulo 3 interpretámos colisões inelásticas como envolvendo transferência de energia cinética de translação para outros movimentos.

Agora compreendemos que a energia transferida para um sistema pode aumentar a energia do movimento desordenado das suas moléculas ou átomos. Esses movimentos não são visíveis. Estes processos são acompanhados de um aumento de temperatura, porque a temperatura é proporcional à energia cinética média por partícula.

Assim, forças dissipativas, como a força de atrito, não violam a lei de conservação de energia. Mas permitem transferência de energia de movimentos macroscópicos para movimentos desordenados de átomos e moléculas. Resultado: aumento de temperatura.

7.3.1.2 Equilíbrio térmico

Consideremos dois sistemas de partículas com energias cinéticas médias diferentes. O Teorema da Equipartição diz-nos que as partículas mais velozes devem diminuir de energia até que ambos os sistemas tenham a mesma energia média por partícula.

De acordo com a interpretação microscópica de temperatura isto significa que a energia é transferida do corpo a temperatura mais alta para o de temperatura mais baixa, até estarem à mesma temperatura.

A condição de igualdade de temperaturas no equilíbrio térmico traduz a condição de igualdade de energias cinéticas médias do Teorema da Equipartição.

7.3.1.3 Condução de calor

No processo de condução a energia é transportada num material sem que haja movimentos macroscópicos.

Se as duas pontas de uma barra de cobre estão a temperaturas diferentes, os átomos têm maior energia cinética média onde a temperatura é mais alta. A energia cinética média por partícula, proporcional à temperatura, varia ao longo da barra.

Mas o teorema da equipartição diz que esta situação não é de equilíbrio. Partículas mais velozes ao colidir com partículas mais lentas, tendem a transferir parte da sua energia para estas. A energia é transferida de zonas de temperatura mais alta para zonas de temperatura mais baixa, através do movimento desordenado dos átomos e moléculas.

Em resumo, o processo de condução de calor está associado à transferência de energia em colisões entre átomos ou moléculas em movimentos térmicos desordenados.

7.3.2 Capacidade térmica molar

De acordo com o teorema da equipartição, as partículas de duas substâncias diferentes, à mesma temperatura, terão a mesma energia cinética média. Então podemos concluir:

A variação de energia cinética média por partícula depende da variação de temperatura, mas não da substância em causa.

Vamos ver que esta ideia tem consequências para os capacidades térmicas das substâncias.

Por definição de capacidade térmica mássica, para variarmos a temperatura de uma massa m de uma substância de ΔT , precisamos de uma energia

$$\Delta E = mc\Delta T,$$

em que c é a capacidade térmica mássica. Se a massa molar dessa substância for M , o número n de moles na massa m é:

$$n = \frac{m}{M}.$$

Isto é,

$$\Delta E = nMc\Delta T \equiv nc_{\text{molar}}\Delta T. \quad (7.1)$$

A quantidade $c_{\text{molar}} \equiv Mc$ é a capacidade térmica molar. Como vemos pela definição da Eq. 7.1, é a quantidade de energia necessária para aumentar de 1K ($\Delta T = 1$) a temperatura de um mole da substância ($n = 1$).

Um mole de uma substância tem um número de Avogadro de partículas, $N_0 \approx 6 \times 10^{23}$. A variação de energia média por partícula é obtida da Eq. 7.1, dividindo ΔE pelo número de partículas nN_0 ,

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta E}{nN_0} = \frac{c_{\text{molar}}}{N_0} \Delta T.$$

No início desta secção tínhamos concluído que a variação de energia cinética por partícula depende apenas de ΔT e não da substância em causa. Suponhamos agora que a variação de energia do corpo, é exclusivamente na forma de energia cinética de translação das partículas; neste caso c_{molar}/N_0 é o mesmo para todas as substâncias. Podemos então concluir que:

Em condições em que a variação de energia de um corpo seja na forma de energia cinética das suas partículas, a capacidade térmica molar tem um valor universal, independente da substância.

Na tabela 7.1 representam-se as capacidades térmicas mássicas e molares de algumas substâncias, à temperatura ambiente. As duas primeiras são gases mono-atómicos. As partículas são átomos, não moléculas, e a energia do gás é, sobretudo, energia cinética de translação dos átomos. As capacidades térmicas molares são de facto quase iguais, enquanto que as mássicas diferem de um factor de 1000. Em gases moleculares (oxigénio, O_2 , azoto, N_2) a variação de temperatura pode fazer variar a energia de movimentos internos da moléculas e a capacidade térmica molar tem valores diferentes da dos gases mono-atómicos.

▷ Problema 7.3

As restantes substâncias da tabela são sólidas, metais. De novo, a variação das capacidades molares é muito mais pequena que a das capacidades mássicas. O valor é sensivelmente o dobro dos gases. De facto, a variação de energia, com o aumento de temperatura, não é apenas cinética. Num sólido as partículas oscilam em torno de uma posição de equilíbrio e a energia potencial também varia com a temperatura. Curiosamente, as variações de energia cinética e potencial são quase iguais à temperatura ambiente e a capacidade térmica molar resulta sensivelmente no dobro da dos gases mono-atómicos.

<i>Substância</i>	$c / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$c_{\text{molar}} / \text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
He	3157	12,4
Argon	314	12,2
Alumínio	913	24,6
Cobre	385	24,5
Ouro	132	26,0
Chumbo	126	26,1
Prata	235	25,3
Sódio	1240	28,5

Tabela 7.1: Capacidades térmicas mássicas e molares de várias substâncias.

7.3.3 Calor Latente

No capítulo 4 vimos que durante uma mudança de estado físico a energia de um corpo pode aumentar sem que varia a sua temperatura. À luz da interpretação microscópica de temperatura esta

observação é muito fácil de compreender.

As propriedades da água líquida e do gelo são muito diferentes (a primeira é um líquido e o gelo um sólido). É natural supor que a disposição das moléculas de água no líquido e no gelo seja diferente. Por isso, a energia associada às respectivas posições deve variar entre o estado líquido e sólido. A energia necessária para fundir o gelo deve ser sobretudo energia potencial resultante das forças entre as moléculas. Só depois de conseguida a fusão completa é que a energia suplementar fornecida leva ao aumento da energia cinética das moléculas e por conseguinte ao aumento de temperatura.

▷ Problema 7.4

7.3.4 Temperatura Absoluta

Se existe de facto esta relação entre energia cinética média de translação por partícula, ε_c , e a temperatura por que não medir a temperatura de um corpo por ε_c ? *Por favor não, uma nova escala de temperatura, agora que nos habituámos ao kelvin?*

A boa notícia é que a escala absoluta de temperatura é, precisamente, uma escala em que a temperatura T é proporcional à energia cinética média de translação das partículas. A relação, especificamente, é a seguinte:

$$\varepsilon_c = \frac{3}{2}k_B T \quad (7.2)$$

em que:

- T é a temperatura em **kelvin**;
- ε_c é a energia cinética de translação média por partícula, de um corpo à temperatura T ;
- a constante k_B é universal, isto é tem o mesmo valor para qualquer corpo e qualquer substância e designa-se por constante de Boltzmann.

Repare-se que se k_B não fosse uma constante universal não seria verdade que dois corpos à mesma temperatura tem a mesma energia cinética média por partícula. O valor de k_B , no sistema internacional, é:

$$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}.$$

Este valor significa que, à temperatura de um Kelvin, a energia cinética média de translação *por partícula* é

$$(3/2) \times 1,38 \times 10^{-23} = 0,92 \times 10^{-23} \text{ J};$$

um valor pequeno, nas unidades usuais, o que não surpreende, já que se trata da energia de *uma* partícula.

O zero absoluto

Por definição, a energia cinética de translação de uma partícula não pode ser negativa. Por isso a temperatura em **kelvin** não pode ser negativa. De acordo com a Eq. 7.2, para $T = 0$ (zero absoluto), a energia cinética média por partícula seria zero.

De facto, a temperaturas suficientemente baixas, os efeitos quânticos no movimento das partículas tornam-se mais evidentes e a Eq. 7.2 deixa de ser válida. Um exemplo é o caso do movimento do electrão no átomo de hidrogénio.

Um electrão numa orbital **1s** do átomo de hidrogénio está no estado de energia mais baixa possível. Isso é o resultado da aplicação das leis de movimento da mecânica quântica a este sistema, constituído por um protão e um electrão. Num sistema regido pelas leis da mecânica quântica, o estado de mais baixa energia pode ter movimento e energia cinética não nula. Com efeito a energia cinética do electrão na orbital **1s** do átomo de hidrogénio é diferente de zero.

O que é então o zero absoluto?

À temperatura do zero absoluto, $T = 0$ um sistema tem a menor energia possível, permitida pelas leis quânticas de movimento. Encontra-se no chamado *estado fundamental*. Para temperaturas superiores a zero pode encontrar-se em estados excitados.

Para um sistema como um gás, em que as partículas se movem livremente, e as forças de interacção entre elas são muito fracas, o teorema de equipartição é de facto verificado: a energia cinética média de translação é proporcional à temperatura. Em líquidos e sólidos, a importância das interacções entre as partículas aumenta à medida que a temperatura diminui, o sistema se aproxima do seu estado de mais baixa energia e os efeitos quânticos se tornam mais importantes. O teorema de equipartição é contudo uma aproximação muito boa se a temperatura não for muito baixa. Mas, como vemos, a história do conceito **temperatura** ainda não está completa...

7.4 Conservação de energia e dissipação

Voltamos, finalmente, à questão com que abrimos este curso.

Como conciliar a ideia científica de conservação de energia com a noção corrente que a energia se gasta?

Aprendemos ao longo do curso que o princípio de conservação de energia é universal. Se a energia num sistema ou num certo tipo de movimento, diminui é porque aumenta noutro lado. Vimos que a dissipação corresponde à passagem de energia de formas de movimento macroscópicas para movimentos desordenados, que se manifestam por aumentos de temperatura. Por outras palavras, o que chamamos “consumo” de energia é de facto o aumento de desordem na matéria.

Quando uma bola em movimento pára por efeito de forças de atrito, a energia do seu movimento de translação, em que todas as partículas da bola se deslocavam em conjunto de uma forma ordenada, está agora em movimentos desordenados das moléculas da bola e dos corpos com que contactou. A agitação térmica dessas moléculas aumentou ligeiramente. A energia que estava concentrada num só movimento está agora espalhada no movimento de inúmeras moléculas.

Quando lançamos uma bola ao ar num campo gravítico, a sua energia cinética converte-se em potencial, enquanto a bola sobe. Mas esta transformação é revertida quando a bola desce: a energia potencial transforma-se de novo em energia cinética. Quando há passagem de energia de movimentos macroscópicos para movimentos desordenados a nível microscópico não podemos repor a situação original. Atente-se, por exemplo, na experiência de Joule ou na actividade A9 de aumento de temperatura da água com a varinha mágica. Seria bom que, ao colocar a varinha em água quente, a varinha começasse a girar e a água a arrefecer. Joule poderia esperar a vida inteira até que a energia transferida para a água pela queda das massas voltasse a elevar as massas enquanto a temperatura da água descia. Estes processos são irreversíveis.

Este é portanto o verdadeiro significado do “consumo” de energia. A energia não se gasta. Mas passa, de um modo irreversível de formas mais organizadas da matéria, para formas mais desordenadas.

Mas isto é assunto para outro curso.

7.5 Problemas, exercícios e actividades

7.5.1 Actividades

7.1. Observação Movimento Browniano

Observar ao microscópio o movimento de pequenas gotas de leite suspensas em água. Ver a ficha sobre movimento browniano [5].

7.2. Conceitos novos.

Recordar os seguintes conceitos e escrever uma breve explicação do respectivo significado:

- (a) movimento browniano;
- (b) teorema da equipartição de energia;
- (c) flutuações estatísticas;
- (d) estado fundamental;
- (e) zero absoluto;
- (f) capacidade térmica molar.

7.3. Flutuações estatísticas.

Juntem-se dez moedas idênticas numa caixa. Agite-se a caixa e conte-se o número n de moedas com uma dada face visível. Repita-se a experiência várias vezes, e represente-se o número n como função do número de ordem da experiência (1, 2, ...). O número n evidenciará *flutuações estatísticas* em torno do valor médio $\langle n \rangle = 5$.

7.5.2 Problemas

7.1. O tamanho de uma gotícula.

A massa volúmica da água, $\rho = 10^3 \text{ Kg m}^{-3}$ permite-nos calcular a massa de uma gota de diâmetro $1 \mu\text{m}$. Se soubermos a massa de uma molécula podemos saber quantas moléculas há nessa massa. Como? A consulta a um quadro periódico dá-nos a massa de um mole de H_2O . Como podemos então calcular a massa de uma molécula?

7.2. Velocidades térmicas de partículas de diferente massa.

Usando o valor da constante de Boltzmann calcular a velocidade térmica das seguintes partículas à temperatura ambiente, $T = 300 \text{ K}$

- uma molécula de oxigénio;
- uma molécula de hidrogénio;
- uma gota de leite ($d = 1\ \mu\text{m}$) suspensa em água; uma bola de ping-pong.

Por que razão não observamos o movimento browniano de uma bola de ping-pong?

7.3. Capacidades térmicas molares

Usando a seguinte tabela de calores mássicos e um quadro periódico, calcular as capacidades térmicas molares das seguintes substâncias.

<i>Substância</i>	$c / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
He	3157
Argon	314
Alumínio	913
Cobre	385

7.4. Lei de Dulong e Petit

Numa situação em que toda a energia que fornecemos a um corpo aparece como energia cinética de translação das suas partículas, qual será o valor do seu calor específico molar (ver Eq.7.2)? Comparar com os valores na Tabela 7.1.

Bibliografia

- [1] Sizes. URL: <http://www.sizes.com/units/calorie.htm>, Dezembro 2003.
- [2] R.P. Feynman, R.B. Leighton, and M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics*, volume I. Addison-Wesley, 1963.
- [3] IBM. Moving atoms: Welcome to the STM gallery. URL: <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html>.
- [4] NASA. Wilkinson microwave anisotropy probe. URL: <http://map.gsfc.nasa.gov>, Abril 2004.
- [5] Nuno Nunes. Movimento Browniano – fichas de experiências. Projecto FARADAY, Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 2003.
- [6] National Museum of Science and Industry. Joule’s paddle-wheel apparatus. URL: <http://www.sciencemuseum.org.uk/collections/treasures/joules.asp>.
- [7] R. M. Tennent, editor. *Science Data Book*. Oliver & Boyd, 1971.