

Projecto Faraday

Textos de Apoio

A hipótese atómica

10º Ano de Escolaridade



casa das ciências

Porto, Outubro de 2009

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 10^o 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	1
7 A hipótese atómica	7
7.1 O facto mais importante	7
7.2 Movimento browniano	9
7.2.1 A energia cinética média de uma gota. . . .	10
7.3 Energia Cinética e Temperatura	12
7.3.1 Interpretação microscópica de temperatura.	12
7.3.1.1 Dissipação e Temperatura	13
7.3.1.2 Equilíbrio térmico	14
7.3.1.3 Condução de calor	14
7.3.2 Capacidade térmica molar	14
7.3.3 Calor Latente	16
7.3.4 Temperatura Absoluta	17
7.4 Conservação de energia e dissipação	18
7.5 Problemas, exercícios e actividades	20
7.5.1 Actividades	20
7.5.2 Problemas	20

Lista de Figuras

7.1	Richard Feynman foi, sem dúvida, o mais mediático físico do século XX. As suas lições [1] são um dos mais notáveis livros de texto de Física (©AIP). . .	7
7.2	Imagem de STM de uma estrutura artificial de 48 átomos de Ferro numa superfície de Cobre[2]. . . .	8
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. .	9
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.	12

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 [1], 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 [1] 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.

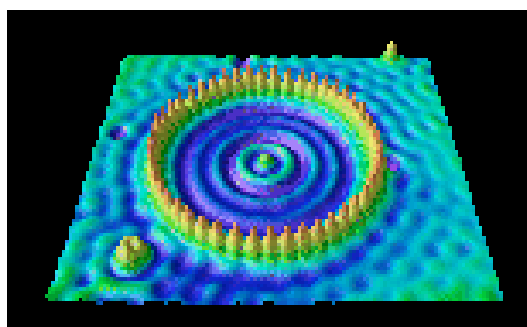


Figura 7.2: Imagem de STM de uma estrutura artificial de 48 átomos de Ferro numa superfície de Cobre[2].

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 ($2\text{ }\mu\text{m}$), 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

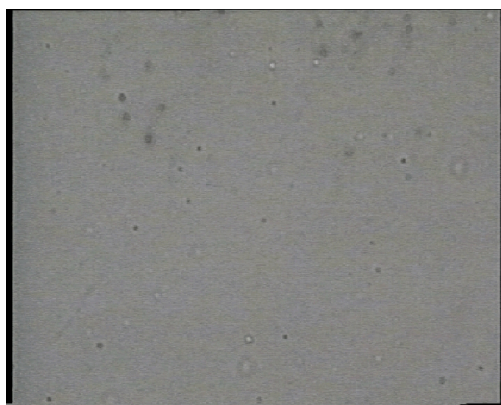


Figura 7.3: Imagem de microscópio de uma suspensão de leite em água. (ampliação $\approx 500\times$). As manchas claras e escuras são gotas de leite em diferentes planos.

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 pe-

quenas, 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 Feynman refere.

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 gota para a esquerda ou direita. Em *média*, se lançarmos 100 moedas, obtemos 50 caras e 50 co-ras; 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:

▷ Actividade 7.2.

plausível: de acordo com as nossas expectativas; razoável.

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 molécula 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, este resultado conduz-nos 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.

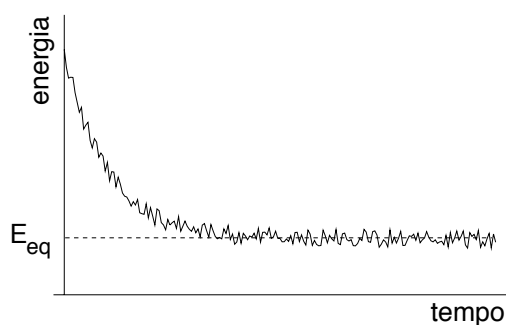


Figura 7.4: Exemplo de equilíbrio dinâmico. Inicialmente a energia é superior ao valor de equilíbrio e diminui. Mas, depois de equilibrada, continua a flutuar em torno do valor médio.

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 têm 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 os termos de energia associados 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, pois, 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 colidirem 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 as 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 1 K ($\Delta T = 1$) 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 monoatômicos. 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 as mássicas diferem de um factor de 10. Em gases moleculares (oxigénio, O_2 , azoto, N_2) a variação de temperatura pode fazer variar a energia de movimentos internos das moléculas; a capacidade térmica molar resulta diferente da dos gases monoatômicos.

▷ 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 da dos gases. De facto, a variação de energia, com a variação de temperatura, não é apenas de energia 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 monoatômicos.

<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 variar sem que varie 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 o 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 posteriormente 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, num 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 têm 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

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

o valor pequeno, nas unidades usuais, 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 colectivo está agora espalhada em movimentos independentes de muitas 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 comesse 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 de actividade A17.

7.2. 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 $(1, 2, \dots)$. O número n evidenciará *flutuações estatísticas* em torno do valor médio $\langle n \rangle = 5$.

7.3. 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.

7.5.2 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 de 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, a Eq. 7.2 permite calcular o valor da capacidade térmica molar. Qual é o valor que se obtém? Comparar com os valores na Tabela 7.1.

Bibliografia

- [1] R.P. Feynman, R.B. Leighton, and M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics*, volume I. Addison-Wesley, 1963.
- [2] IBM. Moving atoms: Welcome to the STM gallery. URL: <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html>.