

A natureza do calor, na atualidade

Hoje, descrevemos o calor como a propagação da energia de partículas da matéria em movimento aleatório; ou como energia do campo eletromagnético em frequências do infravermelho, se espalhando com a velocidade da luz; ou, ainda, como energia na forma de partículas que só existem na velocidade da luz, e que chamamos de fótons – os de frequência do infravermelho.

O movimento aleatório átomos e moléculas produzem movimento aleatório de átomos e moléculas contíguas, mas o movimento de suas partes, elétrons ou núcleos, carregados, produzem ondas eletromagnéticas, na descrição de Maxwell, ou fótons, na descrição da física quântica. A interação da luz com a matéria possui uma descrição tão complexa, na teoria quântica, que ainda hoje não é apresentada nos cursos básicos de física.

Muito diferente dos movimentos visíveis aos nossos olhos, da teoria mecânica, os movimentos e percursos do calor em suas múltiplas formas, condução, convecção, radiação eletromagnética, são observáveis apenas a partir de seus efeitos, como o aquecimento, a dilatação, nas transições de fase e no ciclo da água na Terra, nos ventos de vários tipos. Não é possível “ver” o calor em movimento.

Na nomenclatura atual, dizemos que o calor é energia em trânsito. A energia de movimento das partículas de matéria de um corpo, ou as ondas eletromagnéticas ou fótons contidos no mesmo, recebem um outro nome: compõem a “energia interna”. No interior da panela com água, no fogo, há tanto movimento aleatório das moléculas de água quanto energia eletromagnética (ou fótons), muitas vezes chamada de radiação.

Identificado o calor como uma forma de energia, ele pôde ser incluído como um dos termos na equação

$$\{energia\ de\ movimento\ +\ energia\ eletromagnética\ +\ energia\ nuclear\ +\ energia\ gravitacional\}_{universo} = constante$$

pois a energia cinética dos movimentos aleatórios das moléculas de um corpo, maior para um corpo “quente”, menor para o mesmo corpo frio, a energia potencial eletromagnética molecular de um corpo que dilatou sob aumento da temperatura, e a energia dos fótons são todas componentes da “energia interna” desse corpo.

O Calor no livro didático atual

O livro didático de física atual define o calor como energia em trânsito, apresenta brevemente suas três formas de propagação – condução, convecção e radiação - e apresenta seus efeitos, como a dilatação e a transição de fase. Sua interpretação em modelos microscópicos costuma restringir-se ao caso do movimento aleatório de moléculas, cuja energia cinética mostra-se proporcional à temperatura.

A descrição matemática da transformação de calor em energia mecânica é, geralmente, apresentada em termos da equação

$$dU = dQ - dW$$

que, representada em palavras, pode ser expressa pela relação

variação da energia interna de um corpo

$$= \text{calor recebido pelo corpo} - \text{trabalho realizado pelo corpo}$$

Energia mecânica e a termodinâmica No estudo do movimento, costuma-se apresentar a conservação da energia mecânica, para sistemas isolados, na forma

$$[Energia_{cinética} + Energia_{potencial}]_{sist\ isolado} = constante$$

desde que as forças em ação sejam forças “conservativas”. Assim, por exemplo, no caso de atrito com o ar ou com a superfície, essa energia mecânica não se mantém constante. Nos livros texto, são considerados, em geral, problemas idealizados, em que estas forças “dissipativas” estão ausentes nos sistemas “isolados” pedra em queda livre ou bloco em movimento uniforme sobre a mesa.

Essa restrição fica amenizada, quando incluímos o calor entre as formas de energia, pois o calor gerado pelo movimento passa a entrar como uma parcela das energias:

$$[Energia_{cinética} + Energia_{potencial} + calor]_{sist\ isolado} = constante$$

Nos exemplos mencionados acima, o sistema “isolado” deve incluir o ar que envolve o corpo em queda livre, ou a mesa sobre a qual se move o carrinho.

Nos manuais de física, a introdução da ideia de que calor é uma forma de energia como qualquer outra é frequentemente introduzida em termos da 1ª lei da termodinâmica, que costuma ser apresentada na forma matemática

variação da energia interna de um corpo

$$= \text{calor recebido pelo corpo} - \text{trabalho realizado pelo corpo}$$

$$= \text{calor recebido pelo corpo} + \text{trabalho realizado sobre o corpo (C)}$$

Um corpo pode aumentar (ou diminuir) sua energia se recebe (ou perde) energia térmica ou se “recebe” (ou realiza) trabalho do meio externo.

Que relação tem a última equação, para a variação da energia interna, com a equação de conservação de energia da mecânica (energia cinética + energia potencial)? A primeira é uma equação para variações, a segunda, uma equação para uma constante. Ocorre que *calor recebido* e *trabalho realizado* constituem **trocas de energia** com algo fora do corpo. Portanto essa equação trata de sistemas abertos para troca de energia. Como relacionar com a equação de conservação de energia mecânica? É preciso retornar à equação (B) e analisá-la para o caso de um sistema aberto, em que agem forças internas e externas.

Se o sistema não está isolado, e a força resultante F_{result} é constituída de uma composição de forças internas ao sistema e forças externas ao sistema,

$$F_{result} = F_{int} + F_{ext}$$

a equação (B) deve ser reinterpretada:

$$\text{variação de energia cinética}|_{\text{sistema}} = \int_1^2 F_{\text{result}} dx = \int_1^2 F_{\text{int}} dx + \int_1^2 F_{\text{ext}} dx =$$

–variação da energia potencial|_{sistema} + trabalho da força externa (D)

Podemos agora comparar a equação (D), proveniente da relação entre força e velocidade da mecânica, e a equação (C), da teoria do calor. Vamos reescrever as duas equações abaixo.

Equação D da mecânica:

$$(\text{variação de energia cinética} + \text{variação da energia potencial})|_{\text{sistema}} =$$

$$+ \text{trabalho da força externa}$$

Equação C da termodinâmica:

$$\text{variação da energia interna de um corpo} =$$

$$\text{trabalho realizado sobre o corpo} + \text{calor recebido pelo corpo}$$

A equação (D) diz que a variação da **energia mecânica de um sistema**, sob a ação de **forças conservativas**, é igual ao trabalho realizado por forças externas.

A equação (C) diz que a variação da **energia interna de um corpo** é igual ao trabalho realizado por força externa **somado ao calor** recebido pelo corpo.

A comparação das duas equações *sugere* identificar energia interna ao corpo com a energia mecânica do sistema. No entanto, na equação (C) há o acréscimo de um termo, o do **calor recebido pelo corpo**, que representa uma forma de energia associada às forças dissipativas!

A relação fica muito mais clara quando introduzimos o modelo atômico-molecular para a matéria: a energia interna de um corpo é constituída pela soma das energias cinéticas e potenciais de seus átomos e moléculas. Isto significa que na “dissipação” de energia mecânica por atrito, não há, na verdade, dissipação da energia, mas sim transformação da energia mecânica macroscópica ordenada e síncrona, do conjunto de moléculas, em energia “interna” desordenada, cinética e potencial das moléculas, que detectamos como um aumento de temperatura. E os fótons? Ou a energia eletromagnética?

Para incluir a energia eletromagnética, ao invés da equação X, poderíamos escrever:

$$\text{variação da energia interna de um corpo} =$$

$$\text{trabalho (mecânico ou eletromagnético) realizado sobre o corpo}$$

$$+ \text{calor recebido pelo corpo}$$

Aí estaria representada, por exemplo, a reação química, em que participam forças eletromagnéticas.

Por que não temos essa equação no livro didático? Há uma ideia de que a separação estrita em tópicos, mecânica, termodinâmica, óptica, eletromagnetismo e ondas, facilita a aprendizagem. Há uma dificuldade nesta abordagem, se utilizada de forma absoluta, pois não há essa separação nos fenômenos em si. Na própria apresentação da propagação do calor, é incluída a propagação

na forma de radiação, que seria do “tema” do eletromagnetismo. No entanto, na apresentação da relação entre energia interna e temperatura, essa forma de manifestação do calor fica ausente.

No entanto, o estudo dos textos originais, isto é, daqueles que contribuíram para construir a teoria que utilizamos hoje, nos mostrará que há muita semelhança entre algumas partes do livro didático e do texto “original”. Minha hipótese é que no primeiro livro didático foi usado material original, e essa forma permaneceu em todos os livros que foram escritos depois disso. Será que esta é uma das explicações para apresentações “fraturadas” ou incompletas das teorias?

O Gás ideal e os estados termodinâmicos

A descrição das transformações de energia que envolvem calor e movimento teve como modelo central o gás ideal. Este foi o modelo fundamental no desenvolvimento da termodinâmica, comparável, mas talvez mais importante, ao sistema massa-mola na mecânica.

O gás que hoje chamamos ideal foi muito investigado experimentalmente, sua descrição ganhou universalidade com a descrição em termos moleculares, e a indagação sobre o comportamento de suas moléculas levou à identificação de sua energia interna, constituída da energia cinética das moléculas, com a temperatura do gás.

Assim, por um lado, foi construída a representação matemática do comportamento dos gases na forma

$$pV = nRT, \text{ onde } n = \text{número de mols}$$

a partir

- (i) dos experimentos que verificaram a relação linear entre V e T , e entre p e T , e a relação de proporção inversa de V e p ;
- (ii) da ideia de Avogadro, de que o mesmo volume de diferentes gases contém o mesmo número de moléculas;
- (iii) da ideia de uma escala absoluta de temperatura, cujo zero corresponderia a um gás de volume nulo.

Por outro, o modelo de moléculas em movimento aleatório, que impactam as paredes do recipiente que as contém causando a pressão, levou a identificar a temperatura absoluta com a energia cinética, através da relação matemática

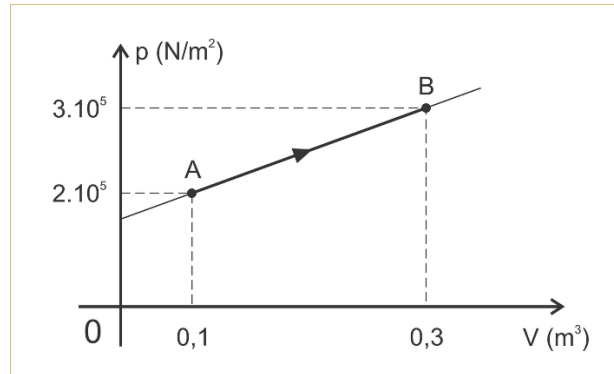
$$e_{\text{cinética da molécula}} = \frac{1}{2}m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2}kT, \text{ onde } k = \frac{R}{N_{\text{Avogadro}}},$$

o que permite escrever para a energia interna

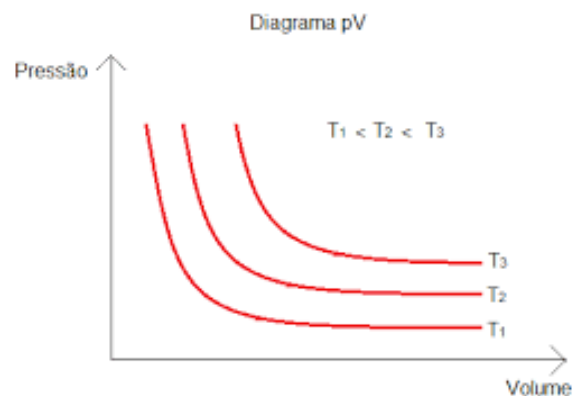
$$U = N \times \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}nRT$$

Estados termodinâmicos e diagramas pressão-volume

As variáveis que descrevem o estado termodinâmico de uma certa quantidade de gás são p , V e T . Como não são independentes, precisamos de apenas duas das variáveis para representar este estado. Uma descrição visual muito útil para a evolução do estado de um gás é o diagrama *pressão p , Volume V* . Cada ponto do diagrama representa um estado, então uma trajetória neste diagrama significa que o gás está mudando de estado, de pressão, de volume e de temperatura.



A cada ponto também podemos atribuir uma temperatura. Portanto a cada ponto podemos atribuir uma energia interna. E como a energia interna depende apenas da temperatura, podemos acompanhar trajetórias de mesma energia interna através das isotermas, que desenham hipérbolas.



Processos de transformação de energia interna

A equação associada à lei de conservação de energia que inclui o calor pode ser escrita de forma específica para o gás:

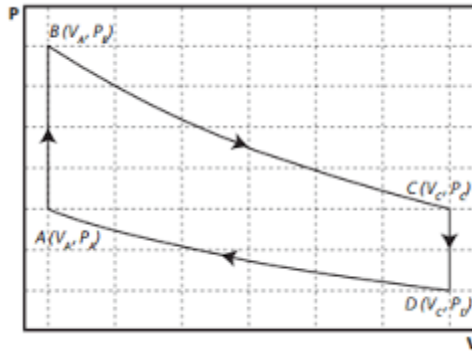
$$dU = dQ - dW$$

com $dU = d\left(\frac{3}{2}nRT\right)$ e $dW = p dV = \frac{nRT}{V} dV$, e fica

$$d\left(\frac{3}{2}nRT\right) = dQ - \frac{nRT}{V} dV$$

Máquinas e ciclos

A descoberta de que o calor pode gerar movimento (muito antiga!) e a ideia de fazer isso ciclicamente levou à invenção das máquinas térmicas. Um cilindro começa e termina no mesmo ponto, mesma pressão do gás e mesmo volume.



Se o ciclo se inicia em A e termina em A, sua temperatura de início é a mesma do final, portanto sua energia interna é a mesma do início. Isso significa que no ciclo $\Delta U_{ciclo} = 0$, e a equação para transformação de energia fica

$$\Delta U_{ciclo} = Q_{ciclo} - W_{ciclo} = 0.$$

