

# Física do Calor

## Termodinâmica

- **Termodinâmica** é a ciência que estuda processos envolvendo **CALOR**, tais como:
  - Converter diferentes formas de **energia** em **calor**;
  - Produzir **trabalho** ou outra forma de **energia** a partir de **calor**;
  - Transferência de **calor** entre diferentes corpos.
- **Calor** é uma forma de energia. O desenvolvimento da Termodinâmica está intimamente ligado ao desenvolvimento do conceito de energia e sua conservação.

# Física do Calor

## Termodinâmica

- **Termodinâmica** é uma ciência experimental que se aplica a sistemas **macroscópicos**.
  - Suas leis determinam que processos podem ou não ocorrer nestes sistemas.
  - Propriedades termodinâmicas da matéria ou da radiação (capacidade térmica, calor latente, coeficientes de dilatação, etc..) são determinadas experimentalmente em função de variáveis como pressão, temperatura, etc.
  - As leis da Termodinâmica estabelecem relações entre estas propriedades e permite, a partir delas, computar funções de estado como energia, entropia, etc.

# Física do Calor

## Termodinâmica

- A **Mecânica Estatística**, que se desenvolveu paralelamente à Termodinâmica, é uma ciência teórica que, a partir das leis da Física aplicada aos constituintes elementares dos sistemas macroscópicos (matéria ou radiação), é capaz de calcular suas propriedades termodinâmicas.
- Ao longo do seu desenvolvimento, seus resultados foram muito importantes na compreensão da constituição atômico-molecular da matéria.

# Energia

## Formas de Energia

- Há duas formas fundamentais de energia:
  - Energia de movimento: **energia cinética** e
  - Energia de interação: **energia potencial**
    - gravitacional
    - eletromagnética
    - nuclear
- Energia eletromagnética pode se propagar na forma de ondas eletromagnéticas (por exemplo, radiação solar)
- Energia interna (ou térmica) de um sistema termodinâmico é a energia (cinética e de interação) de seus constituintes microscópicos (átomos, moléculas, ...).

# Energia

## Fontes de Energia

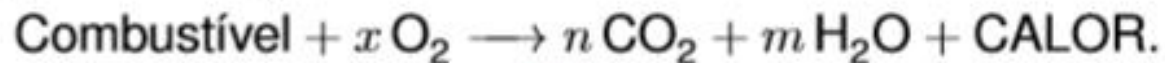
- A energia é conservada: não é criada nem destruída.
- Fontes de energia (térmica) envolvem **transformação** dos constituintes microscópicos da matéria:
  - **Energia química**: transformação ao nível atômico-molecular (reações químicas: combustão, fotossíntese)
  - **Energia nuclear**: transformação ao nível nuclear (reações nucleares: fissão, fusão)

As reações conduzem a alterações na energia interna dos constituintes microscópicos que se refletem na energia térmica do sistema.

# Energia

## Fontes de Energia

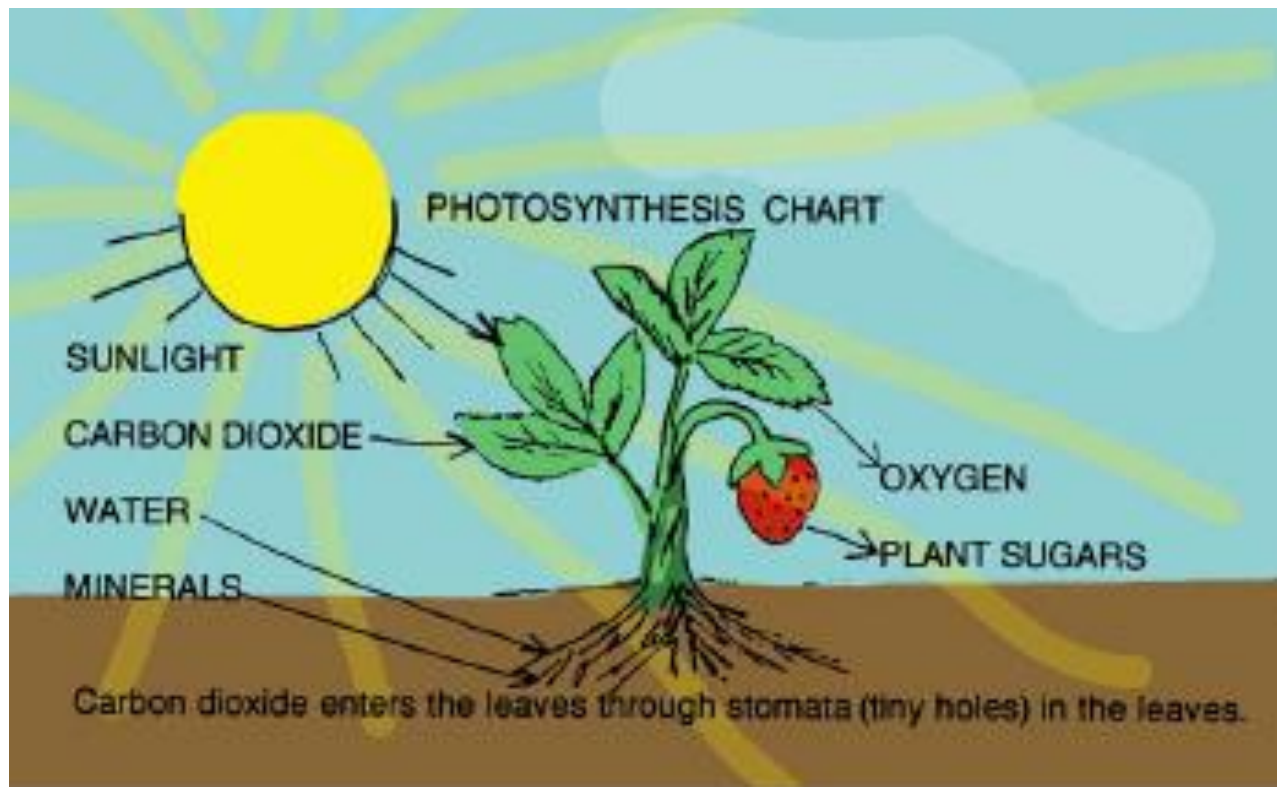
- **Combustão:** Reação de um combustível com oxigênio em que parte da energia química armazenada do combustível é liberada na forma de calor (energia térmica).



- **Fotossíntese:** é um importante exemplo de reação química com armazenamento de energia química.



Neste exemplo, energia da luz é armazenada, como energia química, no carboidrato  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  (glicose).



# Energia

## Fontes de Energia

- Todos os biocombustíveis e todos os combustíveis fósseis armazenam energia química a partir da luz solar, por meio da fotossíntese.
  - Biocombustíveis: madeiras, álcoois, carvão e óleos vegetais, ...
  - Combustíveis fósseis: petróleo, gás natural, carvão fóssil, ...
- Os vegetais (plantas, algas, fitoplâncton, ...) armazenam energia química que é utilizada pelos organismos vivos vegetarianos. Essa energia vem da radiação solar, por meio da fotossíntese.
- Os próprios organismos vivos não-vegetarianos, aproveitam a energia química armazenada nos organismos vivos vegetarianos.



# Energia

## Fontes de Energia

- **Em resumo**, toda energia dos combustíveis e alimentos comuns vem da radiação solar, por meio da fotossíntese.
- Assim, toda vida na terra depende desses importantes processos termodinâmicos:
  - transporte de energia do sol para a terra,
  - armazenamento de energia nos alimentos e combustíveis por meio da fotossíntese e
  - aproveitamento dessa energia pelos organismos vivos.

# Energia

## Fontes de Energia

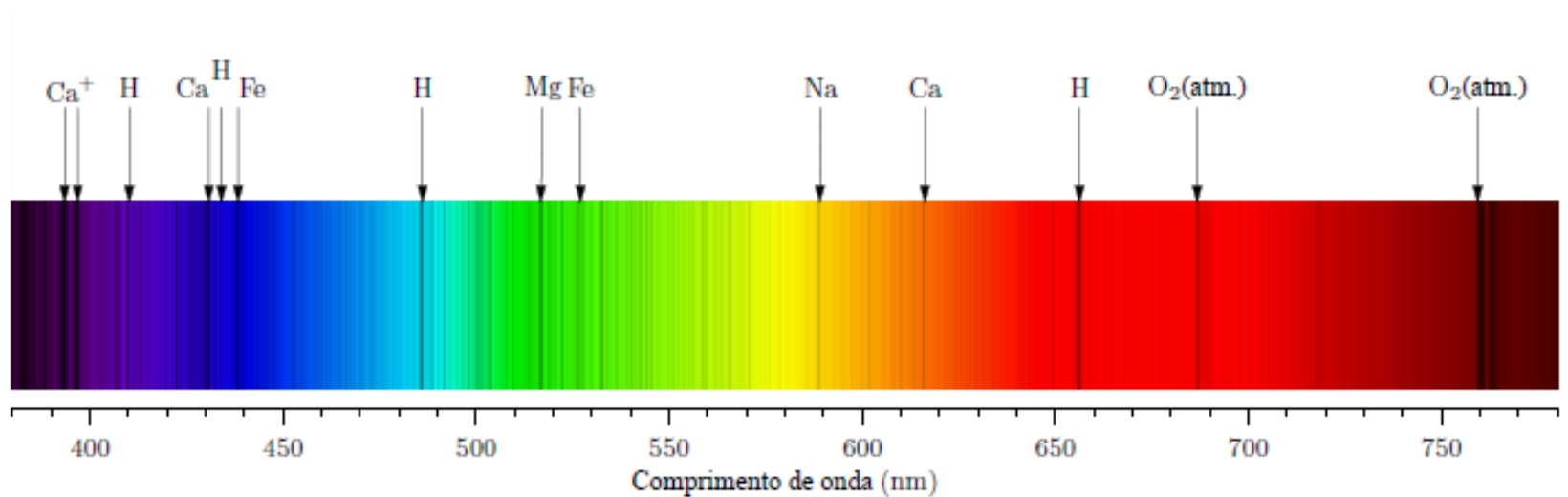
- **Energia:** quase toda energia disponível na terra para utilização humana vem da radiação solar:  
energia de combustíveis fósseis, energia de biocombustíveis, energia hidroelétrica, energia solar térmica, energia solar fotovoltaica, energia hidráulica, energia eólica (dos ventos), ...
- As exceções são a energia termonuclear que vem de núcleos atômicos de elementos radiativos extraídos da própria terra, energia geotérmica que vem do calor do interior da terra e energia das marés que vem da energia gravitacional do sistema Sol-Terra-Lua.

# Energia Solar



# Energia Solar

## Espectro Visível



**Linhas de Fraunhofer.** Espectro visível da radiação solar na superfície da Terra, mostrando as linhas de Fraunhofer. Algumas linhas estão identificadas pelo elemento ou molécula absorvedor.[1]

# Energia Solar

Alguns dados

Constante solar:  $I_S = 1,361 \text{ kW/m}^2$

Raio da órbita da Terra:  $\bar{r} = 150 \times 10^6 \text{ km}$

Potência irradiada pelo Sol:  $P = 4\pi\bar{r}^2 I_S = 3,85 \times 10^{26} \text{ W}$

Raio do Sol:  $r_S = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$

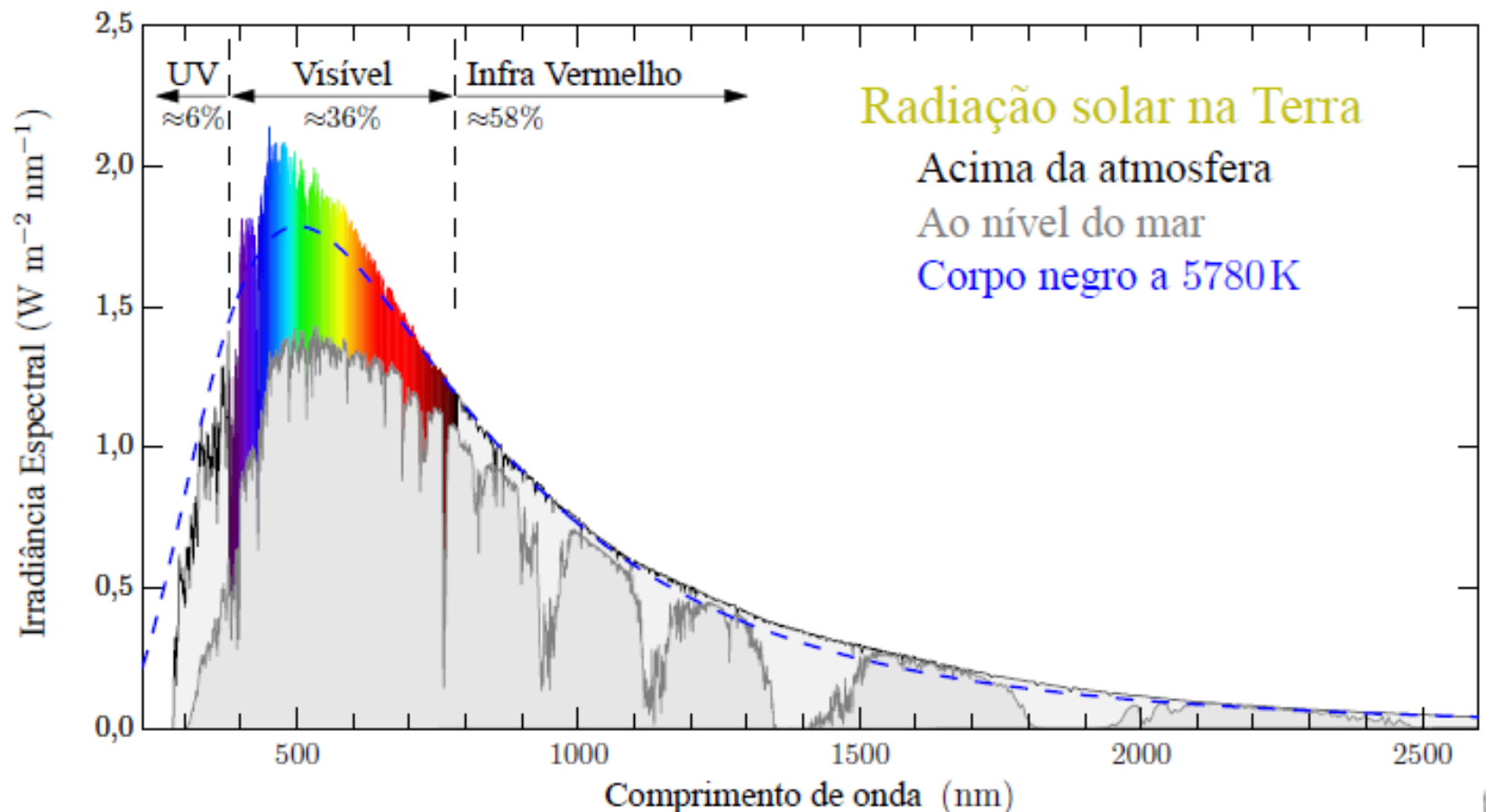
Radiância solar:  $R_T = \frac{P}{4\pi r_S^2} = 63,2 \text{ MW/m}^2$

Lei de Stefan-Boltzmann:  $R_T = \sigma T^4 \Rightarrow T = 5,78 \times 10^3 \text{ K}$

Lei de Wien:  $\lambda_{\text{máx}} T = b \Rightarrow \lambda_{\text{máx}} = 501 \text{ nm}$

# Energia Solar

## Espectro Solar na Terra



**Espectro Solar.** Espectro da radiação solar,[2] observada acima da atmosfera e ao nível do mar e a curva esperada tratando o Sol como um corpo negro à temperatura obtida pela lei de Stefan-Boltzmann.



# Energia Solar

## Radiação da Terra

Raio da Terra:  $r_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

Potência incidente:  $P_S = I_S \pi r_T^2 = 1,73 \times 10^{17} \text{ W}$

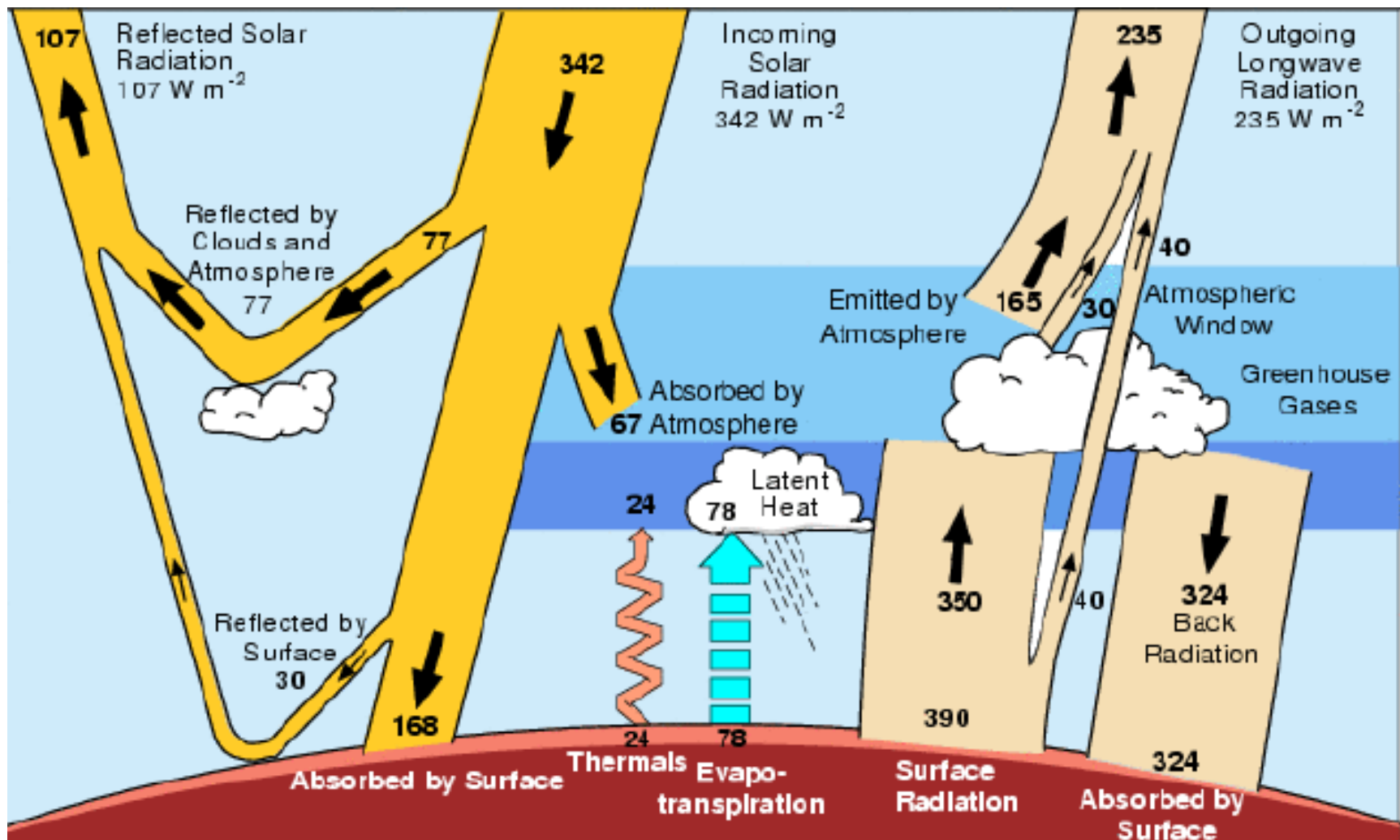
Temperatura média na superfície:  $T = 288 \text{ K} (15 \text{ }^\circ\text{C})$

Radiância da Terra:  $R_T = \sigma T^4 = 390 \text{ W/m}^2$   
 $\lambda_{\text{máx}} = 10,1 \text{ } \mu\text{m}$

Potência irradiada:  $P = 4\pi r_T^2 R_T = 1,99 \times 10^{17} \text{ W}$

# Energia Solar

## Balço Energético da Terra





# Energia Solar

## Ciclo da Água



**Ciclo da Água.** Diagrama esquemático dos diversos fluxos da água entre os oceanos, a atmosfera e os continentes.[4, 5]



- Radiação solar absorvida pela terra: os 3 mecanismos de absorção da radiação solar são absolutamente essenciais para a vida na terra.
  - **Calor:** a radiação absorvida convertida em calor é absolutamente essencial para manter a temperatura da terra ( $\sim 15^{\circ}\text{C}$  como média geral). Sem a radiação solar a temperatura da terra diminuiria rapidamente chegando abaixo das temperaturas polares em poucos meses.
  - **Evaporação:** a evaporação das águas dos mares é essencial para manter o chamado ciclo das águas (nuvens  $\rightarrow$  chuvas  $\rightarrow$  rios e lagos). Sem o ciclo das águas as terras se tornariam desertos em poucos anos.
  - **Fotossíntese:** é absolutamente essencial para alimentar todos organismos vivos e para a produção de biocombustíveis e combustíveis fósseis (os combustíveis fósseis foram formados há milhões de anos a partir de biocombustíveis).



# Equilíbrio Térmico, Calor e Temperatura

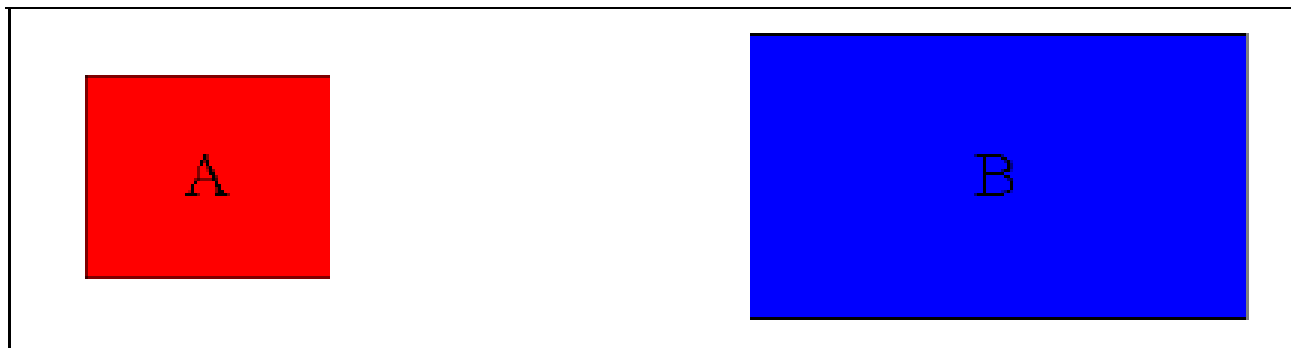
## Calor e Temperatura

- **Temperatura** é a grandeza termodinâmica que quantifica as noções de frio ou quente.
- Mais especificamente, temperatura é a propriedade que governa a transferência de **calor** entre dois sistemas.
- Quando dois sistemas, inicialmente a temperaturas diferentes, são postos em contato térmico entre si, há um fluxo de calor do sistema mais quente para o sistema mais frio até que se estabeleça o **equilíbrio térmico**. Nesta situação as temperaturas de ambos os sistemas têm o mesmo valor.



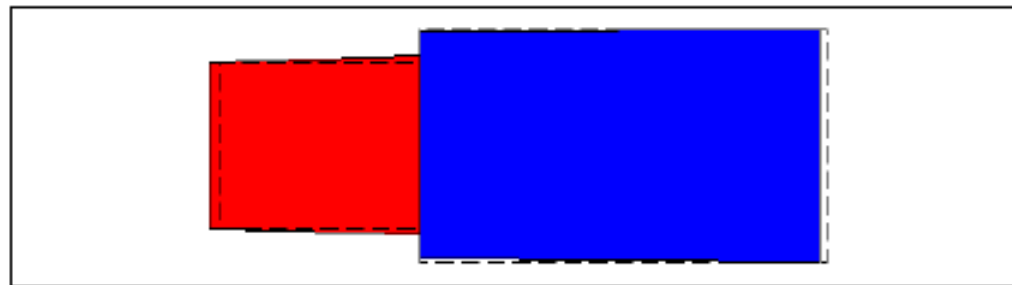
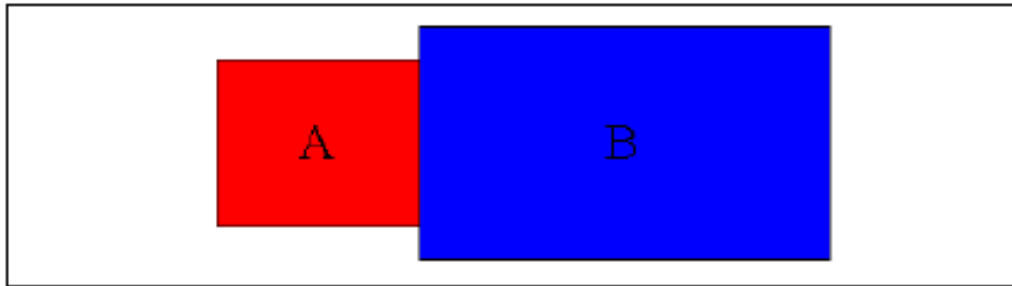
# Equilíbrio Térmico, Calor e Temperatura

## Equilíbrio Térmico

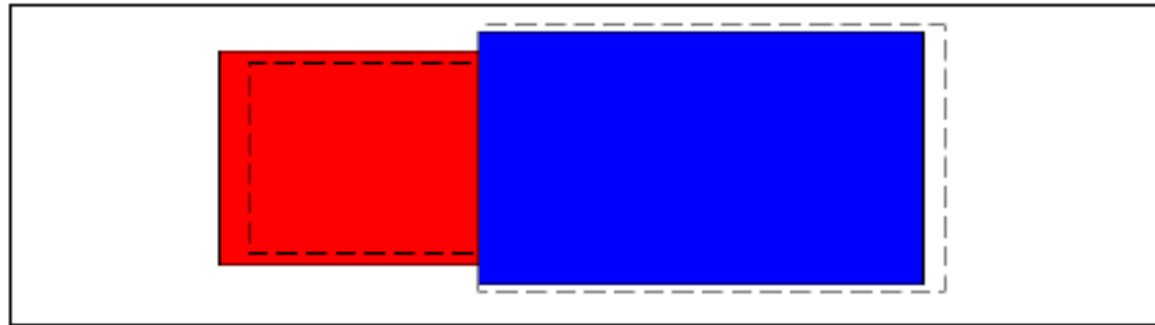


Um bloco frio (A) e um bloco quente (B) estão afastados um do outro (isolados termicamente). Nenhuma transformação é observada ao nível macroscópico.

Cada um dos blocos se encontra num estado de equilíbrio. Suas temperaturas são tais que  $t_B > t_A$ .



Os blocos são postos em contato térmico. Seus estados começam a se transformar, o que se pode observar, por exemplo, pelas suas deformações. As transformações decorrem da **transferência de calor** do bloco quente para o bloco frio.



As transformações vão se tornando cada vez mais lentas até que, depois de um tempo suficientemente longo, cessam completamente. O **equilíbrio térmico** entre os dois blocos é estabelecido: **suas temperaturas são iguais**,  $t_B = t_A$ , e não há nenhum **fluxo de calor** entre eles.

# Equilíbrio Térmico, Calor e Temperatura

## Equilíbrio Térmico

**Temperatura:** grandeza termodinâmica que tem o **mesmo valor** para sistemas em **equilíbrio térmico**.

**Calor:** “algo” que flui de um sistema quente para um sistema frio até que se estabeleça o equilíbrio térmico.  
O fluxo de calor é decorrente unicamente de diferenças de temperatura.

# Natureza do Calor

## Teoria do calórico

- 1770: Teoria do *calórico* (Lavoisier).
- Calorimetria, caloria (unidade de calor).



**Calorímetro de gelo.** Invenção de Lavoisier.



# Natureza do Calor

## Máquinas Térmicas

- 1824: Carnot e a eficiência das máquinas térmicas - Termodinâmica como ciência.



Locomotiva a Vapor.

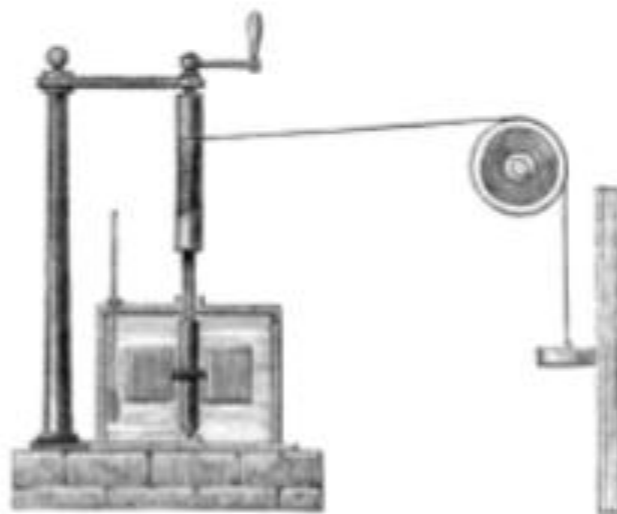
- Seu trabalho, revisto posteriormente por Thomson e Clausius, deu origem à Segunda Lei da Termodinâmica.



# Natureza do Calor

Equivalência entre calor e trabalho

- 1840: Rumford: calor e movimento.
- Joule: calor e trabalho mecânico.



**Equivalente mecânico do calor.** O trabalho realizado sobre o sistema, pela queda do peso, resulta no aquecimento da água de maneira equivalente ao fornecimento de calor.

- Efeito Joule: trabalho elétrico e calor.

# Natureza do Calor

## Calor como transferência de energia

- 1850: Lei da conservação da energia (Thomson, Helmholtz)  
A energia é uma grandeza física que assume várias formas e está sujeita a uma lei de conservação:  
*a energia de um sistema fechado é constante.*
- As várias formas de energia podem se transformar uma na outra, se transferir de uma parte a outra do sistema, mas a sua soma é invariável.

# Lei Zero da Termodinâmica

## Temperatura

**Lei Zero:** Se dois corpos (A e C) estão em equilíbrio térmico com um terceiro (B) eles estão em equilíbrio térmico entre si.



A e C em contato térmico até atingir o equilíbrio térmico → anota  $T_A$



B e C em contato térmico até atingir o equilíbrio térmico → anota  $T_B$

$$t_A = t_B \wedge t_C = t_B \Rightarrow t_A = t_C$$

# Termômetros

Termômetros comuns consistem de uma massa de líquido (mercúrio ou álcool) que se expande em um tubo capilar quando aquecido. A propriedade física, aqui, é a variação do volume do líquido. A escala deve ser calibrada, colocando-o em equilíbrio térmico com um sistema que permanece com a temperatura constante



Escala Celcius ou centígrada de temperatura:

0°C: água em equilíbrio com gelo

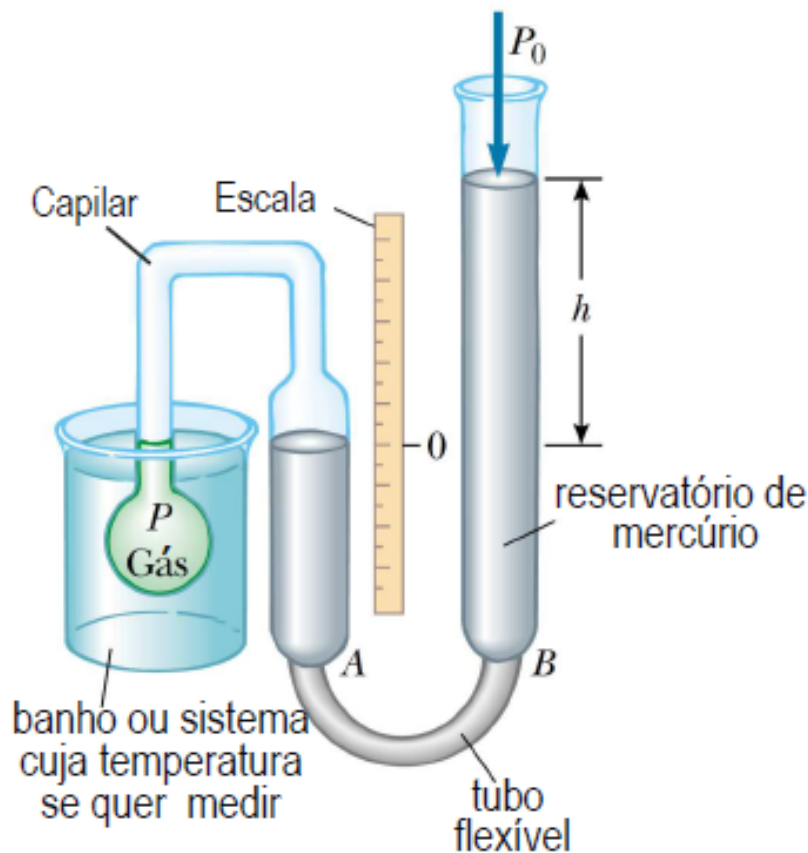
100°C: água em equilíbrio com vapor

Divisão: 100 segmentos iguais e cada um denota um grau

Não são muito precisos: dependem da substância e não servem para medir temperaturas muito longe dos pontos de calibração

# Termômetros de Gás à Volume Constante

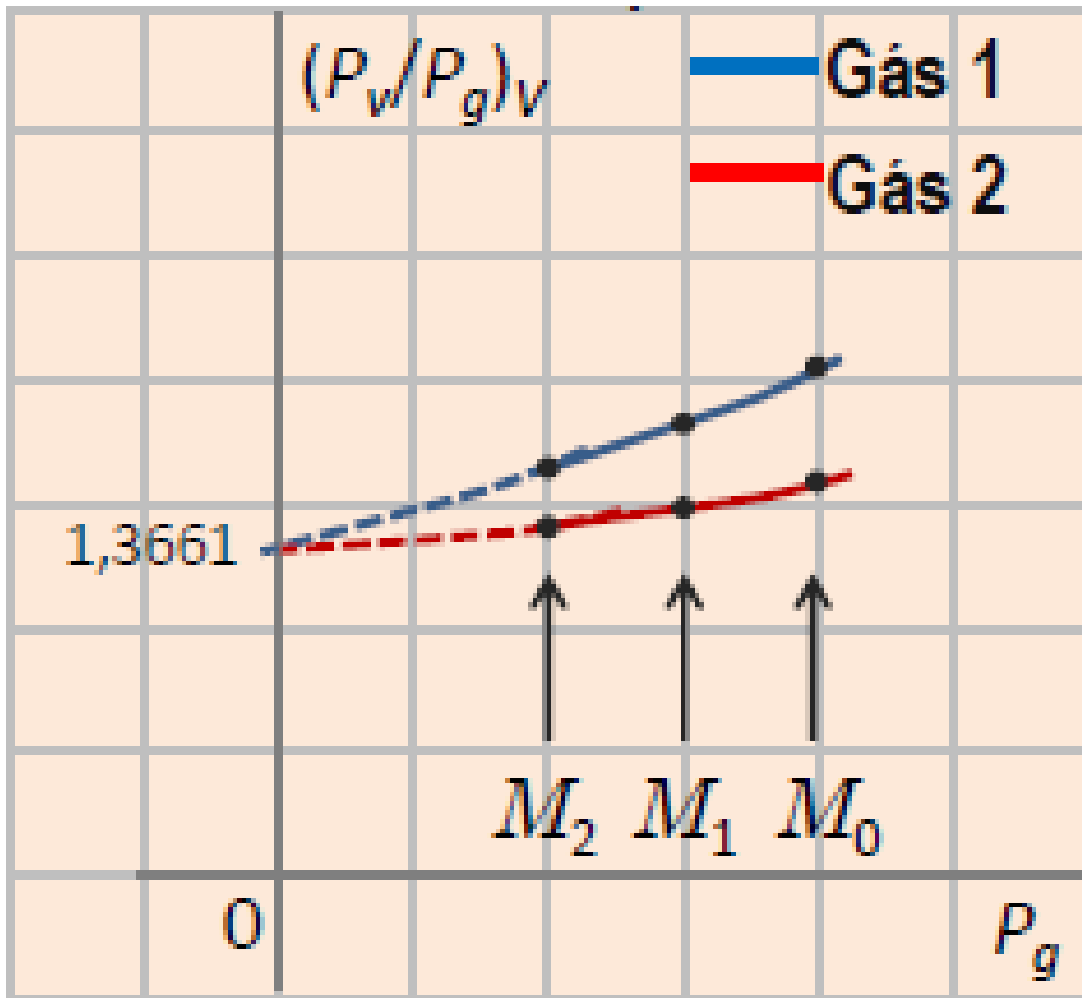
A propriedade física, aqui, é a variação da pressão de um volume fixo de gás, com a temperatura.



Este aparato mede a pressão do gás contido no recipiente imerso em um banho. O volume do gás (p.e. hidrogênio) no recipiente e no capilar é mantido constante através do aumento ou diminuição do nível de mercúrio no reservatório *B*, para manter constante o nível de mercúrio na coluna *A*. A pressão *P* do gás no recipiente, é dada pela expressão:

$$P = P_0 + \rho g h$$

$\rho$  = densidade  
do mercúrio



$$T_g = 273,15 \text{ K} \text{ e } T_v = 373,15 \text{ K}$$

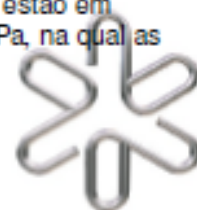
# Termômetros

Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90)

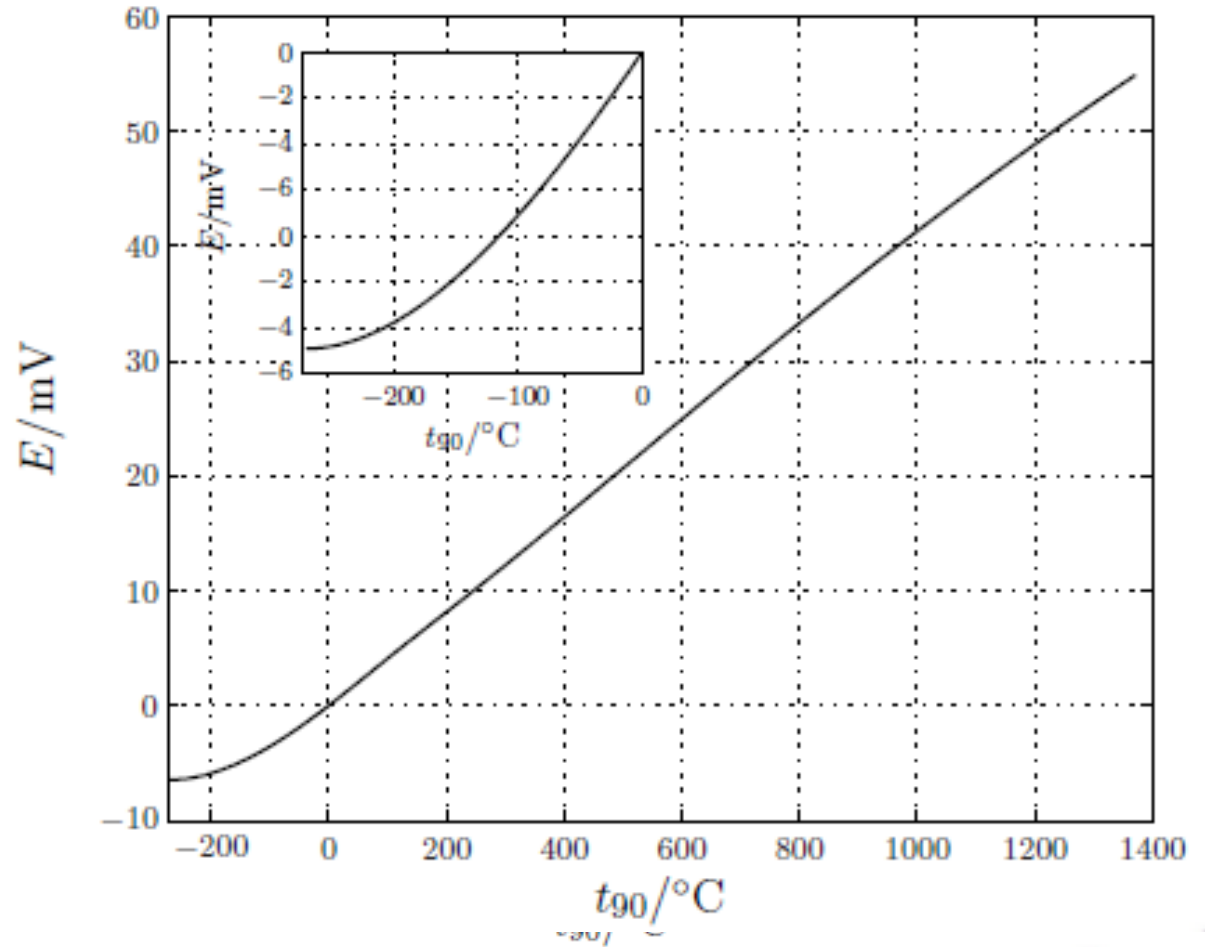
## EIT-90. Pontos fixos de definição.

Número	Temperatura		Substância ( <sup>a</sup> )	Estado ( <sup>b</sup> )
	$T_{90}/K$	$t_{90}/^{\circ}C$		
1	3 a 5	-270,15 a -268,15	He	V
2	13,803 3	-259,346 7	e-H <sub>2</sub>	T
3	≈ 17	≈ -256,15	e-H <sub>2</sub> (ou He)	V (ou G)
4	≈ 20,3	≈ -252,85	e-H <sub>2</sub> (ou He)	V (ou G)
5	24,556 1	-248,593 9	Ne	T
6	54,358 4	-218,791 6	O <sub>2</sub>	T
7	83,805 8	-189,344 2	Ar	T
8	234,315 6	-38,834 4	Hg	T
9	273,16	0,01	H <sub>2</sub> O	T
10	302,914 6	29,764 6	Ga	M
11	429,748 5	156,598 5	In	F
12	505,078	231,928	Sn	F
13	692,677	419,527	Zn	F
14	933,473	660,323	Al	F
15	1 234,93	961,78	Ag	F
16	1 337,33	1 064,18	Au	F
17	1 357,77	1 084,62	Cu	F

- <sup>a</sup> Todas as substâncias exceto <sup>3</sup>He são de composição isotópica natural, e-H<sub>2</sub> é hidrogênio na concentração de equilíbrio das formas orto e para.
- <sup>b</sup> Para definições completas e conselhos para a realização destes vários estados, veja "Supplementary Information for the ITS-90"[15]. Os símbolos têm os seguintes significados: V: ponto de pressão de vapor; T: ponto triplo (temperatura na qual as fases sólida, líquida e de vapor estão em equilíbrio); G: ponto de termômetro de gás; M, F: ponto de fusão, ponto de congelamento (temperatura, a uma pressão de 101 325 Pa, na qual as fases sólida e líquida estão em equilíbrio).



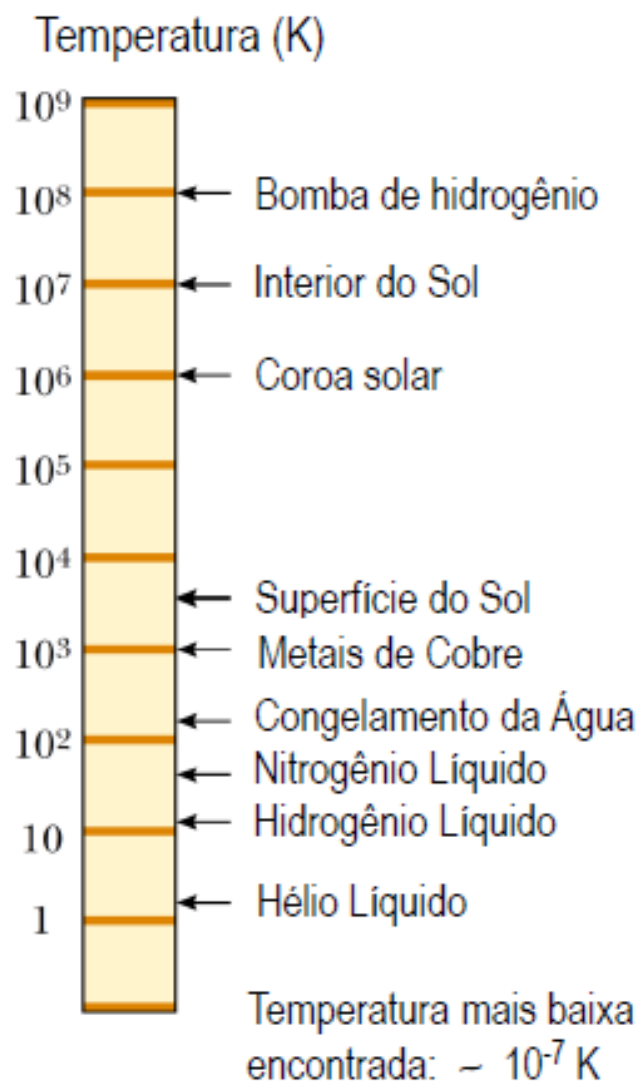




**Termopar tipo K.** Termopar conectado a um multímetro digital que mostra a temperatura. A direita, função de referência,  $E(t_{90})$  para a f.e.m. termoelétrica de termopares do tipo K (Cromel/Alumel). A temperatura de referência (junta fria), é 0 °C.[16]



# Escala Absoluta de Temperatura



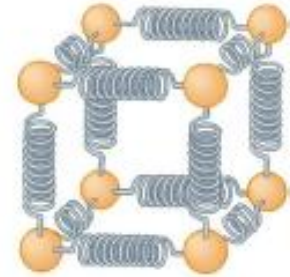
Temperatura absoluta nas quais vários processos físicos ocorrem. A figura está em escala logarítmica

USA: Escala Fahrenheit

$$T_F = \frac{9}{5} T_C - 32,0^\circ\text{F}$$

# Dilatação ou Expansão Térmica

Princípio utilizado na construção do termômetro à gás:  
volume aumenta com a temperatura → Dilatação



Expansão Térmica: consequência do aumento do espaçamento atômico médio

$l_0$  → distância entre dois pontos em um sólido em  $T_0$

$\Delta l$  → variação da distância para  $\Delta T$  pequeno

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$$



onde  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação linear

# Dilatação ou Expansão Térmica

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \left( \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \right) \longrightarrow \frac{\Delta \ell}{\ell_0} = \alpha \Delta T$$

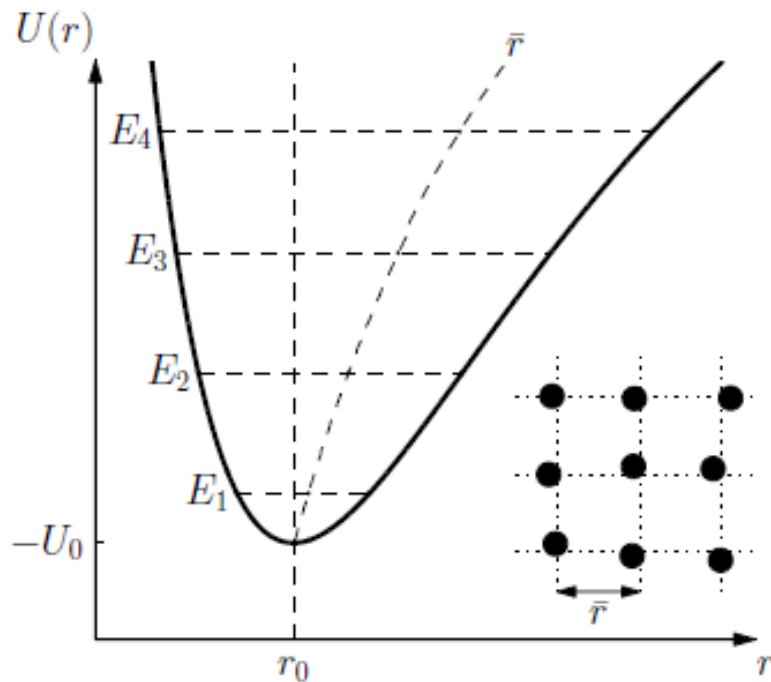
O coeficiente de dilatação linear  $\alpha$  representa a *variação percentual* de comprimento por unidade de variação de temperatura, mas podemos desprezar sua dependência com  $T$  (longe do ponto de fusão do sólido) e escrever  $\ell_T$ , o comprimento à temperatura  $T$ , como

$$\ell_T = \ell_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

Para sólidos anisotrópicos, o coeficiente de dilatação linear assume valores diferentes em direções diferentes. Para um cristal isotrópico,  $\alpha$  é independente da direção.

# Expansão Térmica

## Origem microscópica



**Potencial atômico.** Representação esquemática do potencial entre dois átomos num sólido. Os átomos vibram em torno de suas posições de equilíbrio separadas pela distância  $r_0$ . Por causa da assimetria do potencial, a distância média entre átomos vizinhos,  $\bar{r}$ , cresce quando a energia média dos átomos aumenta, resultando na dilatação térmica.

# Dilatação ou Expansão Térmica

Podemos imaginar que a expansão térmica é uma magnificação do objeto. Se uma arruela metálica é esquentada, todas dimensões, incluindo o raio do buraco, crescem. No entanto, existem exceções.

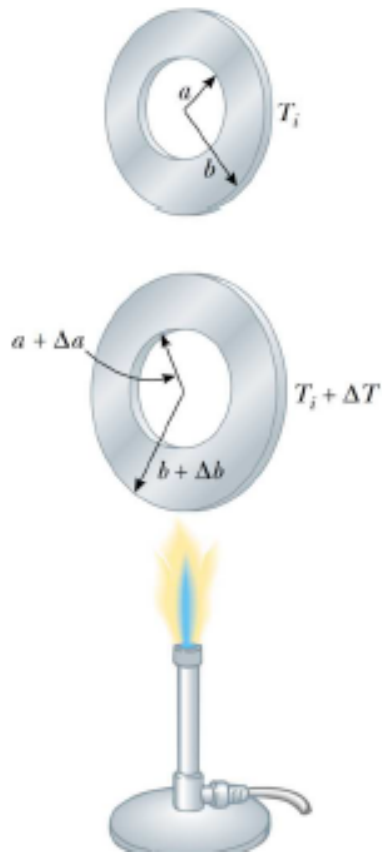
A calcita, por exemplo, expande-se em uma dimensão e contrai nas outras duas quando a temperatura aumenta. Se as dimensões lineares dos objetos variam com a temperatura, áreas e volumes são modificados, também. A variação percentual da área  $A_0$  de uma lâmina delgada ou do volume  $V_0$  de um sólido isotrópico é

$$\frac{\Delta A}{A_0} = 2\alpha \Delta T$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 3\alpha \Delta T$$

Coeficiente de dilatação superficial:  $2\alpha$

Coeficiente de dilatação volumétrica:  $3\alpha$



# Dilatação ou Expansão Térmica

Para um líquido, que toma a forma do recipiente que o contém, só interessa o coeficiente de dilatação volumétrica, dado por

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T \quad \text{em geral: } \beta > 0$$

No termômetro de mercúrio, em que se enche completamente o bulbo de vidro à temperatura de  $0^\circ\text{C}$ , os volumes do bulbo e do mercúrio, à temperatura  $T$ , serão

$$V_{\text{vidro}} = V_0 (1 + 3\alpha T)$$

$$V_{\text{mercúrio}} = V_0 (1 + \beta T)$$

O volume de mercúrio expelido do bulbo que irá para o capilar é

$$V_{\text{expelido}} = V_0 (\beta - 3\alpha) T$$

$\beta - 3\alpha \longrightarrow$  coeficiente de dilatação aparente do líquido (mercúrio)

# Dilatação ou Expansão Térmica

Material	Média do Coeficiente de Expansão Linear $(\alpha) (\text{°C})^{-1}$	Material	Média do Coeficiente de Expansão Volumétrica $(\beta) (\text{°C})^{-1}$
Alumínio	$24 \times 10^{-6}$	Álcool	$1,12 \times 10^{-4}$
Bronze	$19 \times 10^{-6}$	Benzeno	$1,24 \times 10^{-4}$
Cobre	$17 \times 10^{-6}$	Acetona	$1,50 \times 10^{-4}$
Vidro	$9 \times 10^{-6}$	Glicerina	$4,85 \times 10^{-4}$
Pirex	$3,2 \times 10^{-6}$	Mercúrio	$1,82 \times 10^{-4}$
Aço	$11 \times 10^{-6}$	Gasolina	$1,50 \times 10^{-4}$
Concreto	$12 \times 10^{-6}$	Ar (0°C)	$3,67 \times 10^{-3}$



# Dilatação ou Expansão Térmica

A água tem um comportamento anômalo para temperaturas entre 0°C e 4°C, onde  $\beta < 0$ . A densidade máxima da água é atingida a 4°C, e quando a temperatura diminui, na região abaixo de 4°C ela se expande ao invés de se contrair, até se congelar.

