

**Universidade de São Paulo  
Instituto de Física**

**FÍSICA CIÊNCIAS BIOLÓGICAS  
AULA 07**

**Prof. Paulo R. Costa**  
**pcosta@if.usp.br**

**2o. Semestre de 2022**

**Monitoras: Giovanna Fleming/Beatriz Costa Bonzoi**

Agradecimentos: Profa. Marcia Rizutto

# O que veremos hoje

- Teoria cinética da matéria
- Processos de transferência de calor
- Leis da termodinâmica
- Termodinâmica de sistemas vivos

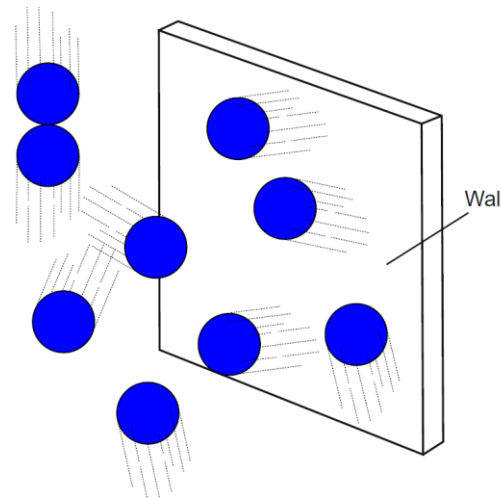
# Teoria cinética da matéria

- **Mátéria**
  - Átomos
  - Moléculas

} Movimento caótico/desordenado
- **Gases**
  - Moléculas não ligadas
  - Choques entre moléculas e com as paredes do recipiente
  - Movimento linear, vibracional e rotacional
- **Sólidos**
  - Movimento desordenado mais restrito
  - Rotações em torno de posições médias fixas
- **Líquidos**
  - Algo entre os gases e os sólidos

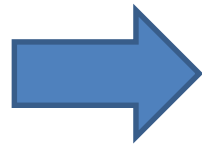
# Teoria cinética da matéria

- Movimento das partículas → energia cinética
  - Energia interna → movimento térmico
  - Calor de um corpo → medida de sua energia interna → temperatura
  - Gases
    - Choques com a parede de um recipiente → transf. de energia → aquecimento



# Teoria cinética da matéria

Energia interna  
de um gás ideal



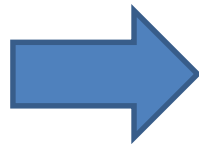
$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{av} = \frac{3}{2}kT$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/moleculeK}$$

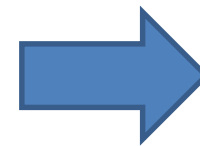


Colisões elásticas  
Partículas pontuais  
Partículas não interagem

Colisões com  
as paredes



Transferência  
de momento



Pressão

Lei de Boyle

$$PV = NkT$$



Número de moléculas

# Termoscópio e Termômetro de Galileu

<https://youtu.be/QadByTV1pQE>

# Algumas definições

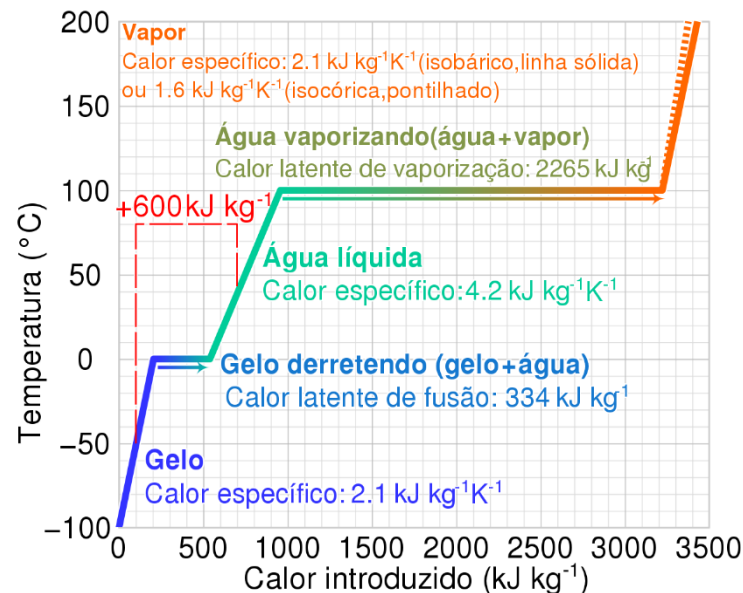
- Unidades de calor
  - Calorias (cal) → quantidade de calor para aumentar a temperatura de 1g de água de 14,5°C a 15,5°C 1
  - 1 cal = 4,184J → 1 Cal = 1kcal = 4184 J
- Calor específico (c)
  - Quantidade de calor necessário para aumentar a temperatura de 1g de uma substância em 1°C
- Capacidade Térmica
  - Razão entre a quantidade de calor recebida por um corpo e sua variação de temperatura

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = m \cdot c$$

# Algumas definições

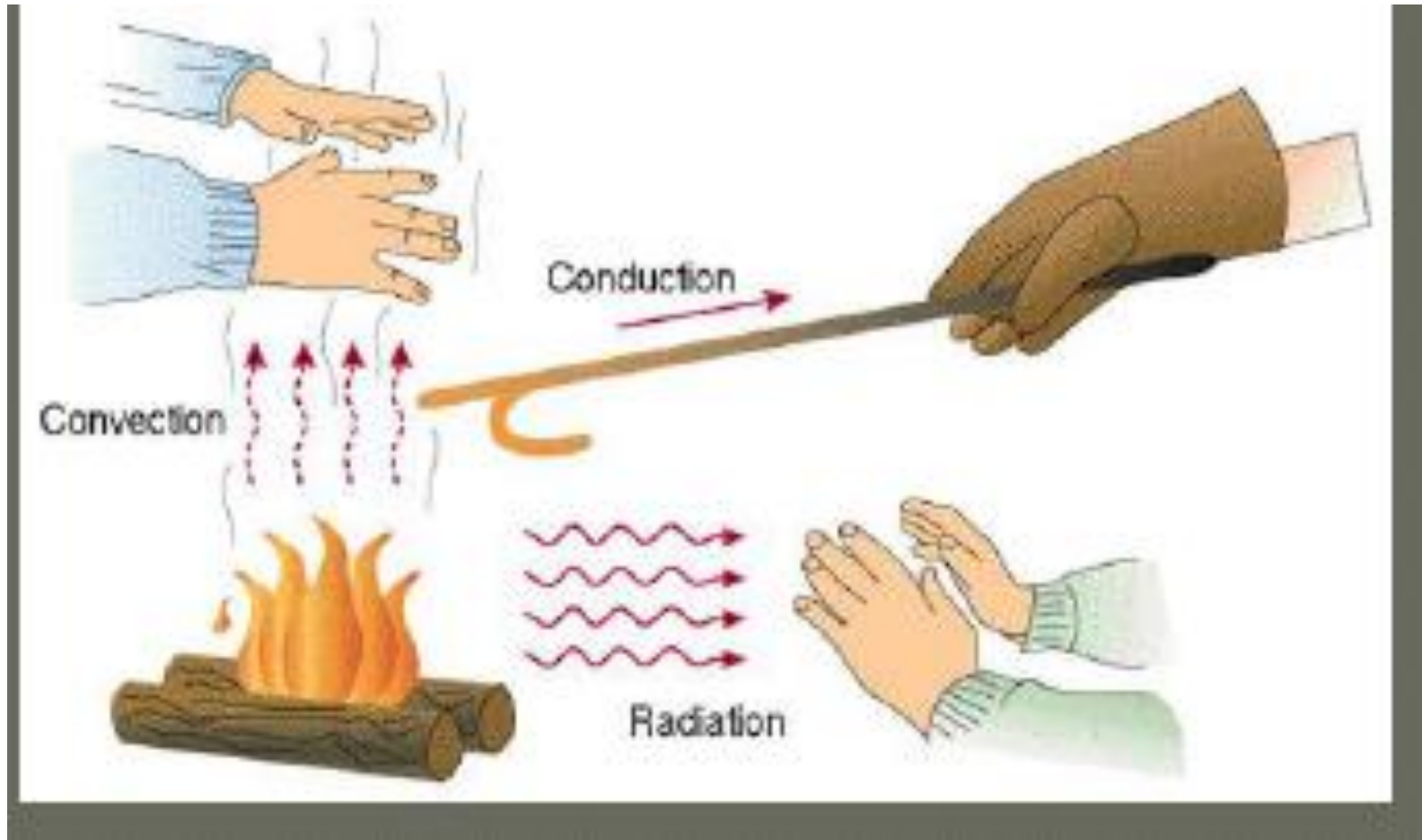
- Calor latente

- Energia necessária para converter um sólido em um líquido ou um líquido em um gás
  - Calor latente de fusão → calor necessário para transformar 1g de matéria sólida em líquida
  - Calor latente de vaporização → calor necessário para transforma 1 g de um líquido em um gás

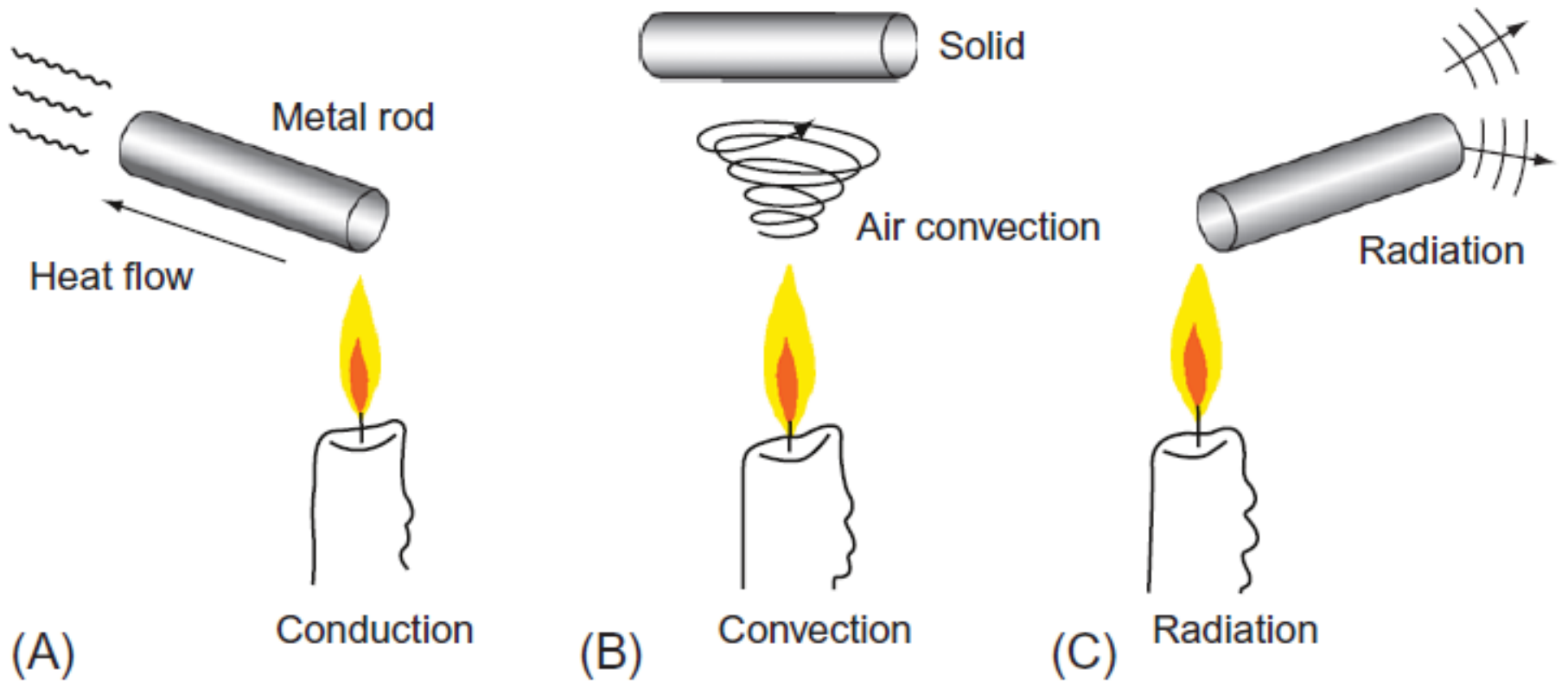




# Processos de transferência de calor



# Transferência de calor

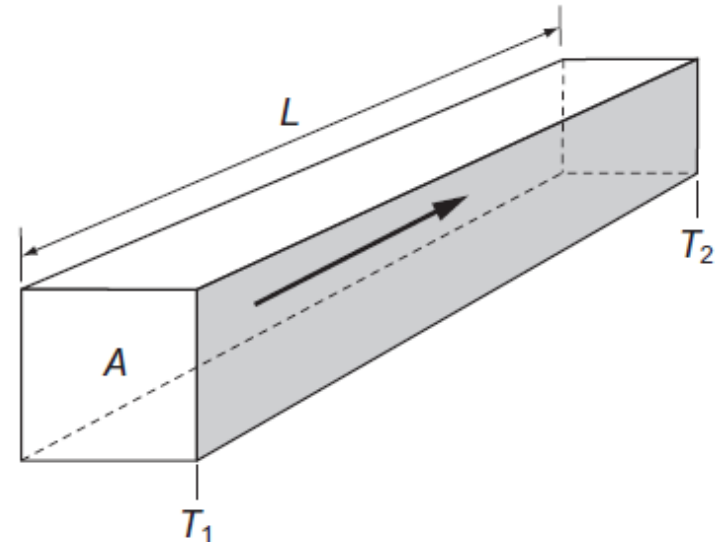


# Transferência de calor - CONDUÇÃO

$$H_c = \frac{K_c A}{L} (T_1 - T_2)$$

Coeficiente de condutividade térmica

Quantidade de calor conduzida por segundo



**TABLE 9.2** Thermal Conductivity of Some Materials

Material	Thermal conductivity, $K_c$ (Cal cm/m <sup>2</sup> -hr-C°)
Silver	$3.6 \times 10^4$
Cork	3.6
Tissue (unperfused)	18
Felt and down	0.36
Aluminum	$1.76 \times 10^4$

# Condução

Os metais são bons condutores de calor e corrente elétrica



Madeira, plástico e vidro são maus condutores de calor (isolantes térmicos) também são maus condutores elétricos (isolante elétricos)

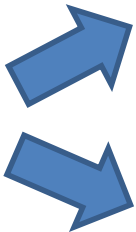




# Condução

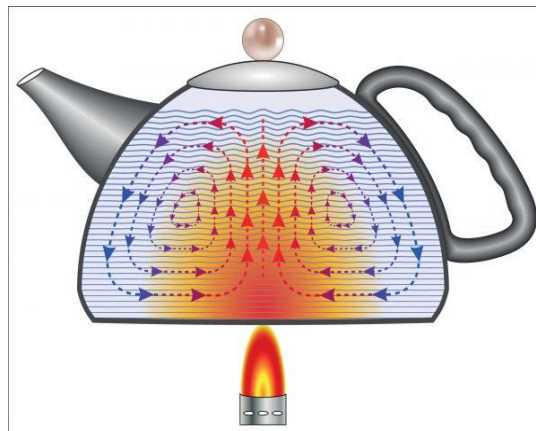
O gelo é um isolante térmico semelhante ao vidro. No interior de um igloo a temperatura pode ser mantida a  $0^{\circ}\text{C}$ , enquanto no exterior ela pode chegar a  $-30^{\circ}\text{C}$



# Transferência de calor - CONVECÇÃO

Processo de transferência de calor principal em  gases } fluidos  
líquidos }

Movimento das partículas na superfície do fluido aquecido  Perda de moléculas  < densidade na superfície aquecida



Correntes de convecção

# Convecção

- A transferência de calor por convecção só ocorre em fluidos (líquidos e gases)
- Um fluido em contato com uma fonte térmica aquecida expande-se, torna-se menos denso e sobe
- O fluido vizinho, mais denso, desce para ocupar o lugar do fluido aquecido. Este por sua vez é aquecido e sobe
- No processo de convecção, o calor é transferido por meio de transporte da matéria



# Transferência de calor - CONVECÇÃO

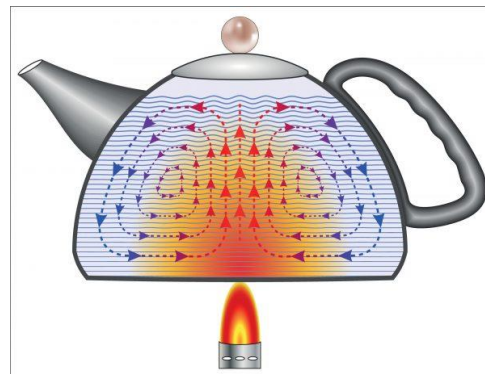
**Calor transferido por convecção  
por unidade de tempo**

**Coeficiente  
de convecção**  
(depende da velocidade  
do fluido)

$$H'_c = K'_c A (T_1 - T_2)$$

Diferença de  
temperatura  
entre a superfície  
do recipiente e  
o fluido

Área exposta à corrente  
de convecção perpendicular  
ao fluxo de calor



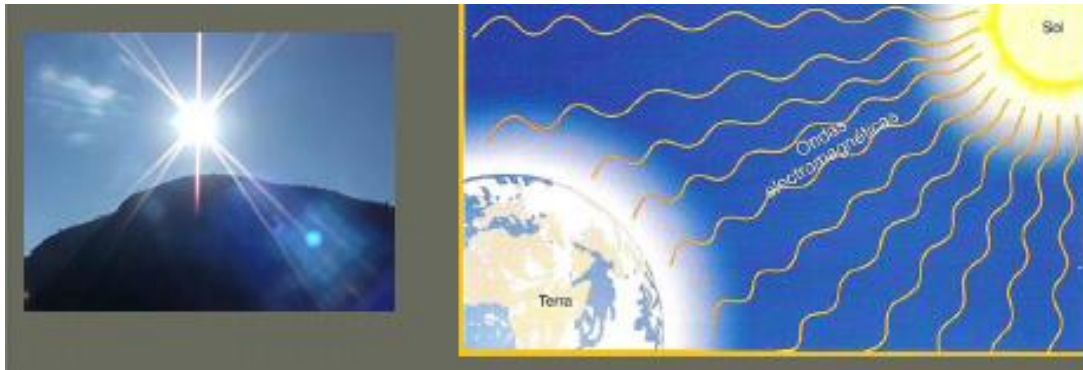


# Radiação

- O calor também pode ser transferido por ondas eletromagnéticas (OEM)
- Este processo é chamado de radiação
- As ondas eletromagnética (OEM) são produzidas a partir de cargas elétrica aceleradas
- As OEM não dependem de meio físico para se locomoverem e no vácuo viajam com velocidade de 300 mil km/s
- Os diferentes tipos de OEM são caracterizados pelas frequência ou pelo comprimento de onda
- Altas frequências correspondem pequenos comprimentos de onda, significam ondas de alta energia e vice versa

# Radiação

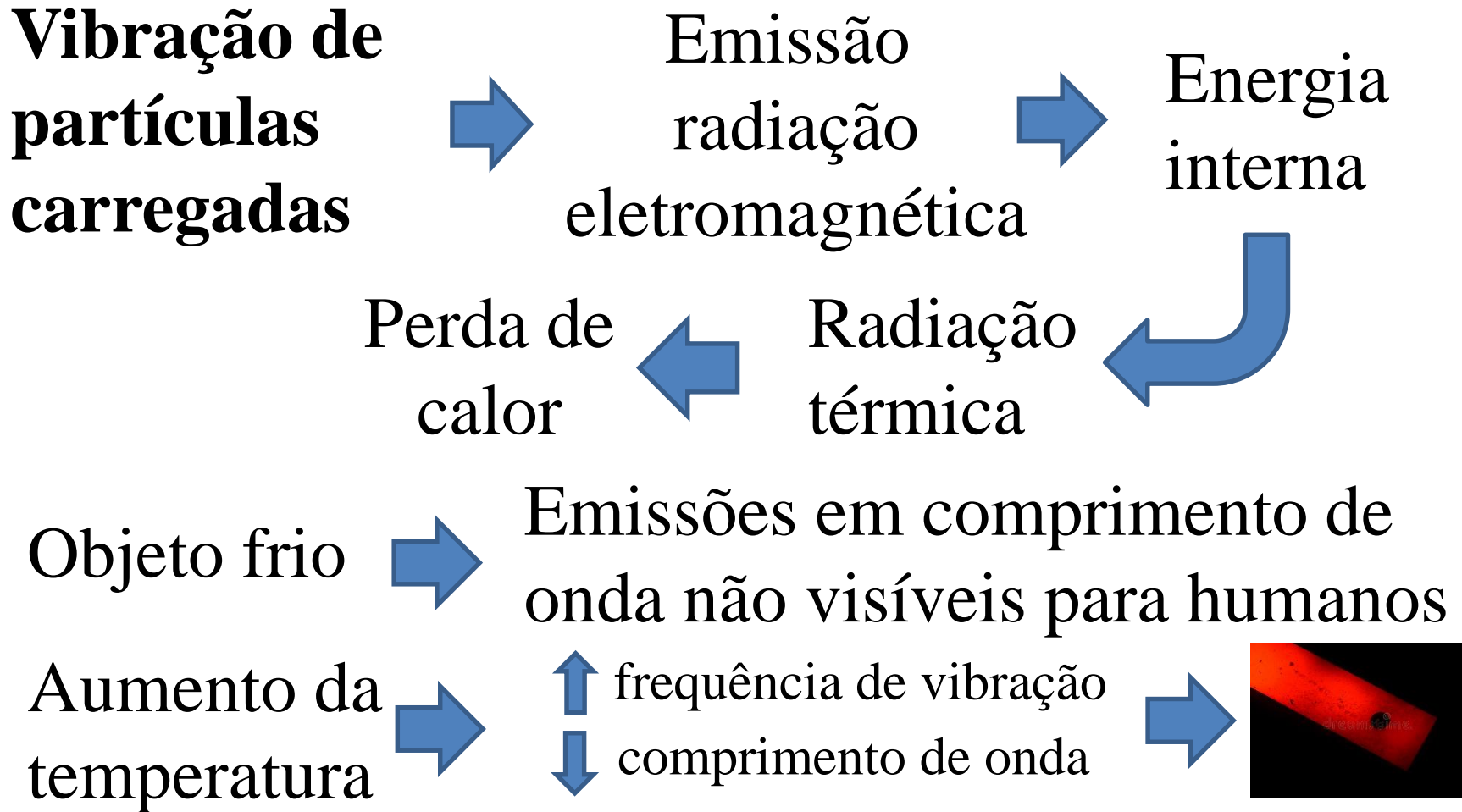
- As ondas eletromagnética de variadas frequências são geradas no sol e viaja através do espaço e aquecem nosso planeta



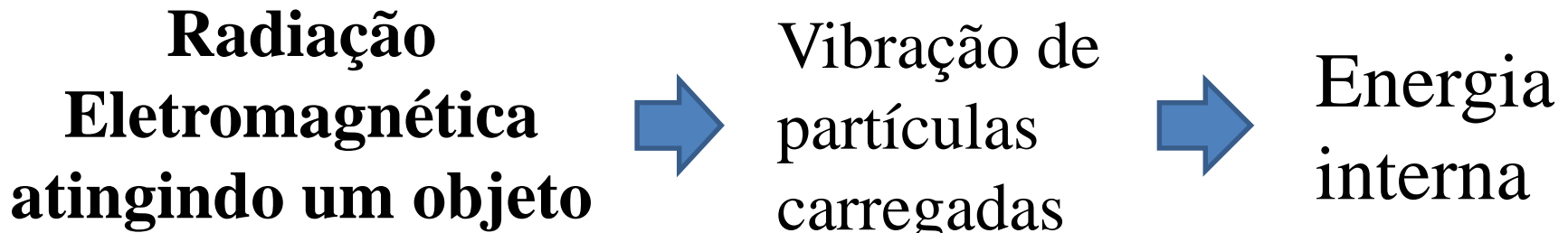
- As vibrações dos átomos aquecidos do metal do ferro de passar roupa geram OEM na frequência do infravermelho. Nossa pele é capaz de detectar esta radiação



# Transferência de calor - RADIAÇÃO



# Transferência de calor - RADIAÇÃO



**DEPENDE DO MATERIAL**

ganho de calor

Taxa de emissão de energia radiante por unidade de área

$$H_r = e\sigma T^4$$

Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ )  
Emissividade da superfície ( $0 < e < 1$ )

Objeto com temperatura  $T_1$  colocando em um ambiente com  $T_2$

$$H_r = e\sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

# DIFUSÃO

Resultado do movimento térmico aleatório das moléculas

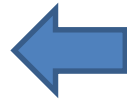


<https://youtu.be/GwMufrX8zQU>

# DIFUSÃO

## Resultado do movimento térmico aleatório das moléculas

Caminho  
Livre  
Médio



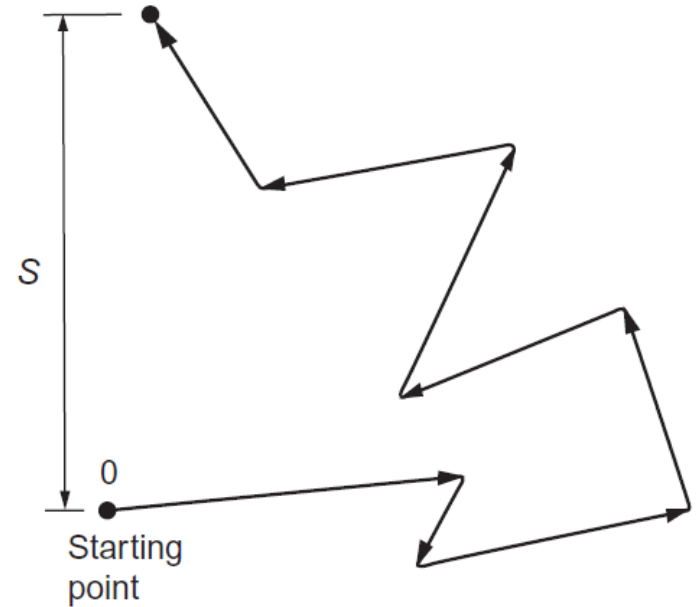
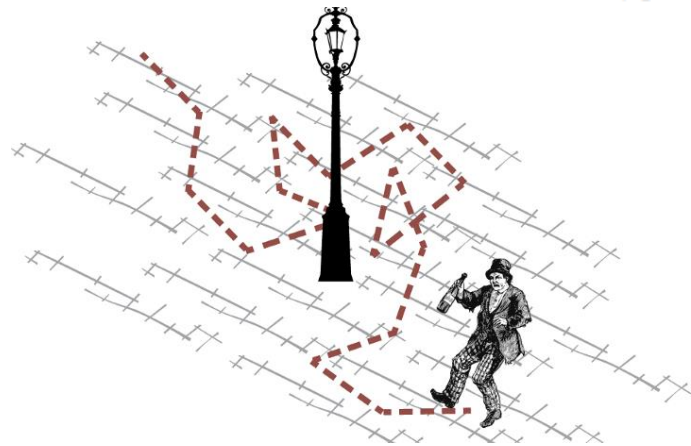
Distância média  
entre colisões



$$S = L\sqrt{N}$$



Número  
de colisões



Random walk.

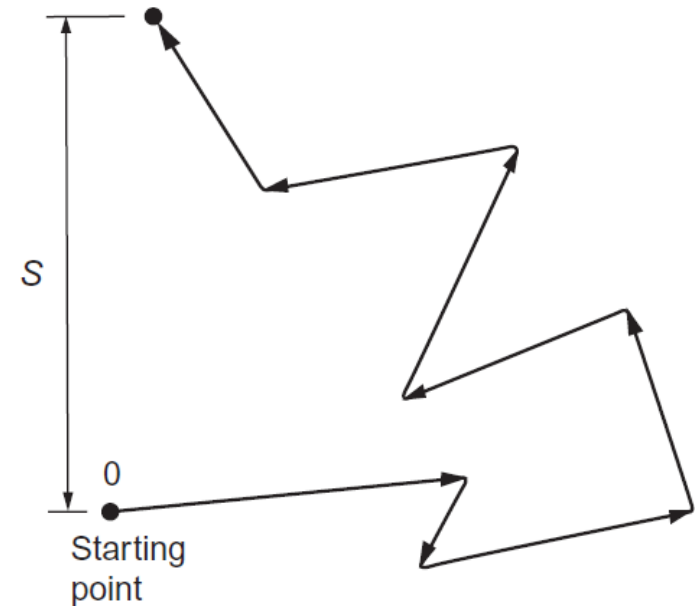
# DIFUSÃO

## Resultado do movimento térmico aleatório das moléculas

$$S = L\sqrt{N}$$

$$\text{Total distance} = NL = \frac{S^2}{L}$$

$$t = \frac{\text{Total distance}}{v} = \frac{S^2}{Lv}$$



Random walk.

### EXEMPLO

Temperatura ambiente

molécula leve

$v \approx 10^4 \text{ cm/s}$

$t$  para difundir 1 cm?

$$t = \frac{S^2}{Lv} = \frac{(1)^2}{10^{-8} \times 10^4} = 10^4 \text{ sec} = 2.8 \text{ hr}$$

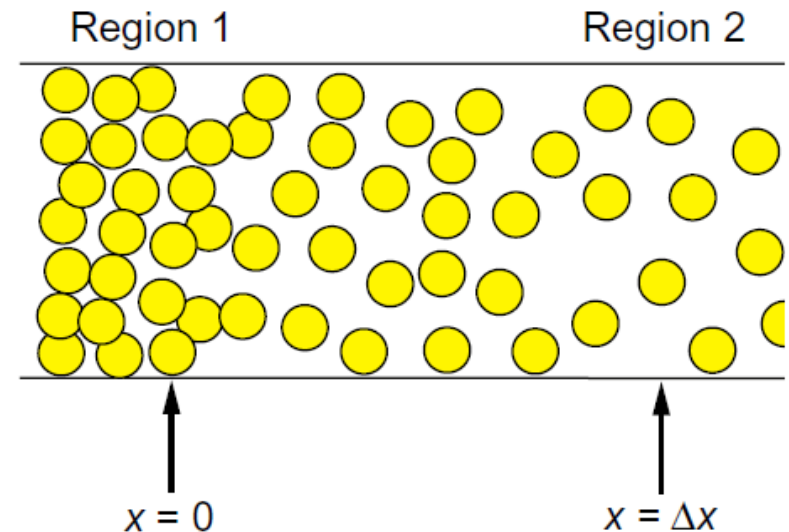
# DIFUSÃO

## Transporte de moléculas por difusão

Número de molécula  
indo de 1 para 2 por segundo  
e por unidade de área

$$J = \frac{Lv(C_1 - C_2)}{2\Delta x}$$

Densidade de Moléculas  
na região 1



$$J = \frac{D}{\Delta x} (C_1 - C_2)$$

$$D = \frac{Lv}{2}$$

Coeficiente  
de difusão



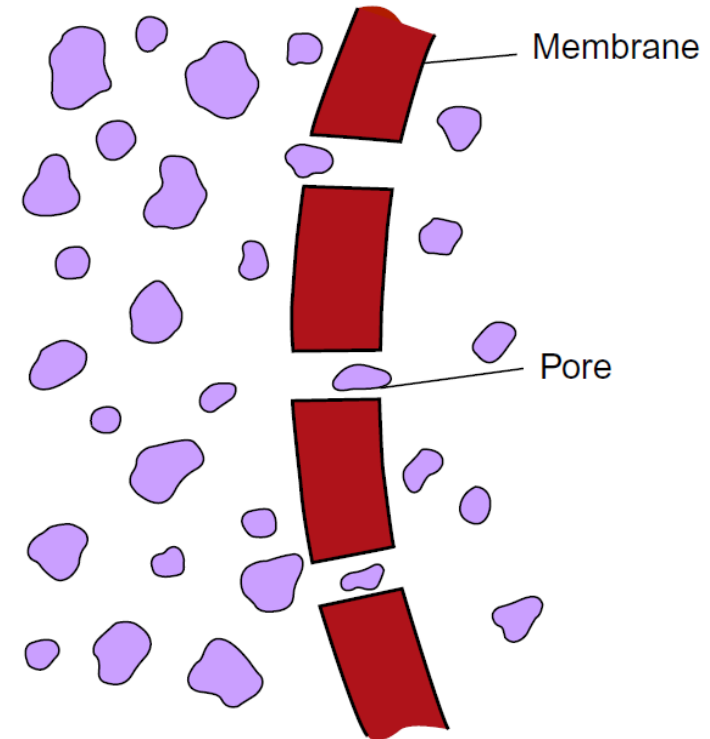
# Difusão através de membranas

Depende da membrana  
e das moléculas difundindo

permeabilidade

$$J = P(C_1 - C_2)$$

$$J = \frac{D}{\Delta x}(C_1 - C_2)$$



Permeabilidade  
seletiva

Água passa mas  
algumas moléculas  
não difundem

OSMOSE

# O sistema respiratório

1 cal = 4,18J

1 Cal = 1 kcal = 1000 cal

1 Cal/h = 1,16W

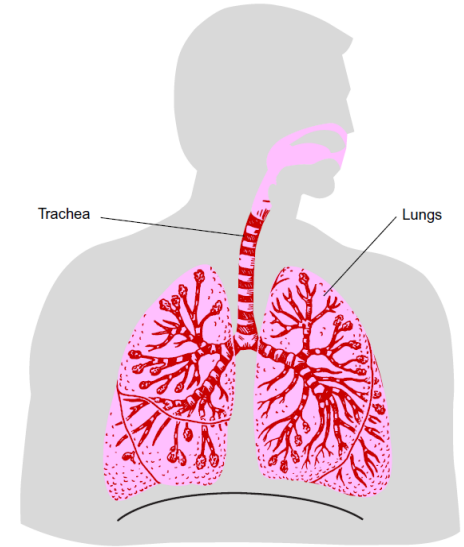
Adulto, 70 kg → 70 Cal/h

14,5 litros de O<sub>2</sub>/h

10<sup>20</sup> moléculas/s

Só para  
pequenos  
animais

Forma mais simples → Difusão através da pele



Adulto em repouso → 2%

Restante → pulmão

300 milhões de alvéolos

Área de ~100 m<sup>2</sup> (50x área da pele)

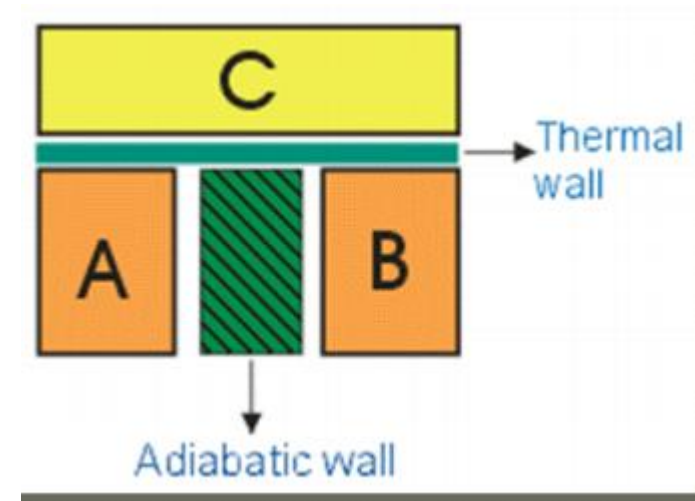
**TABLE 9.3** The Percentage of N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub> in Inspired and Expired Air for a Resting person

	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Inspired air	79.02	20.94	0.04
Expired air	79.2	16.3	4.5

# Leis da Termodinâmica

## Lei Zero da Termodinâmica:

“Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então estarão em equilíbrio térmico um com o outro”



Medida da temperatura de um sistema a baseada na Lei Zero

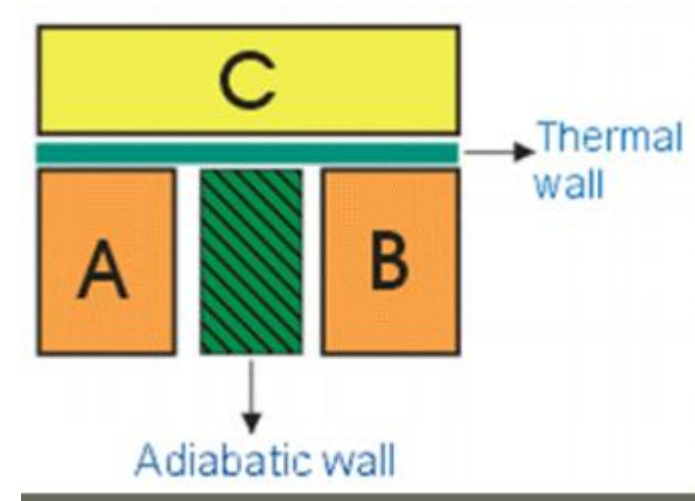


Tipo de termômetro	Propriedade física varia
Termômetro de líquido (Hg, álcool dentro de um capilar)	volume
termopar	Diferença de potencial elétrico entre dois materiais
Cristal liquido	cor

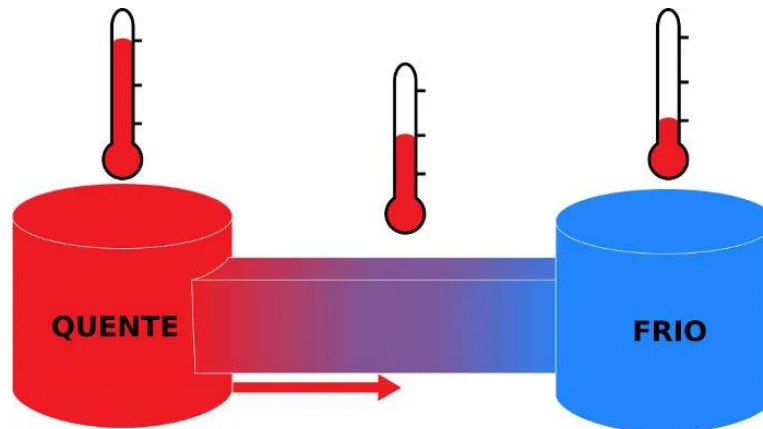
# Leis da Termodinâmica

## Lei Zero da Termodinâmica:

“Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então estarão em equilíbrio térmico um com o outro”



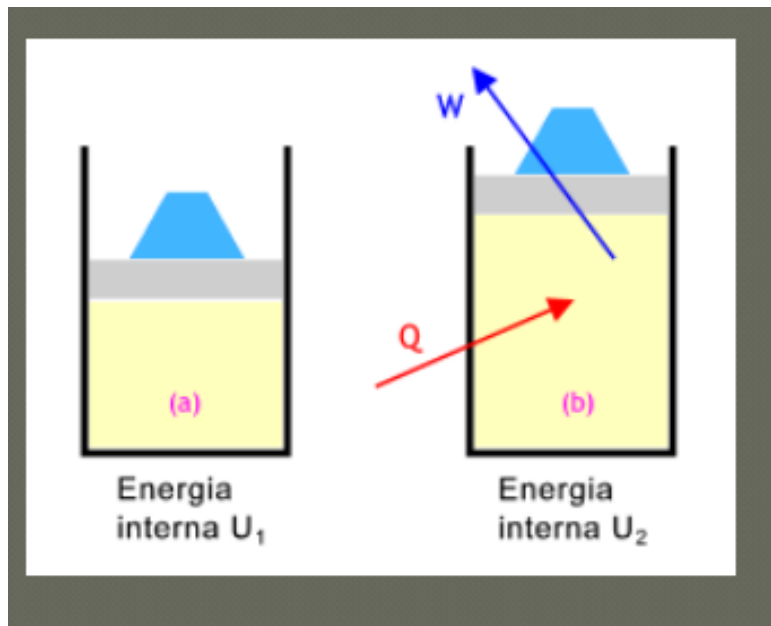
Equilíbrio térmico  $\rightarrow Q_{\text{cedido}} + Q_{\text{recebido}} = 0$



# Leis da Termodinâmica

## Primeira Lei da Termodinâmica:

“Sempre que calor for transferido para um sistema, ele se transformará em uma quantidade igual de um ou mais outros tipos de energia”

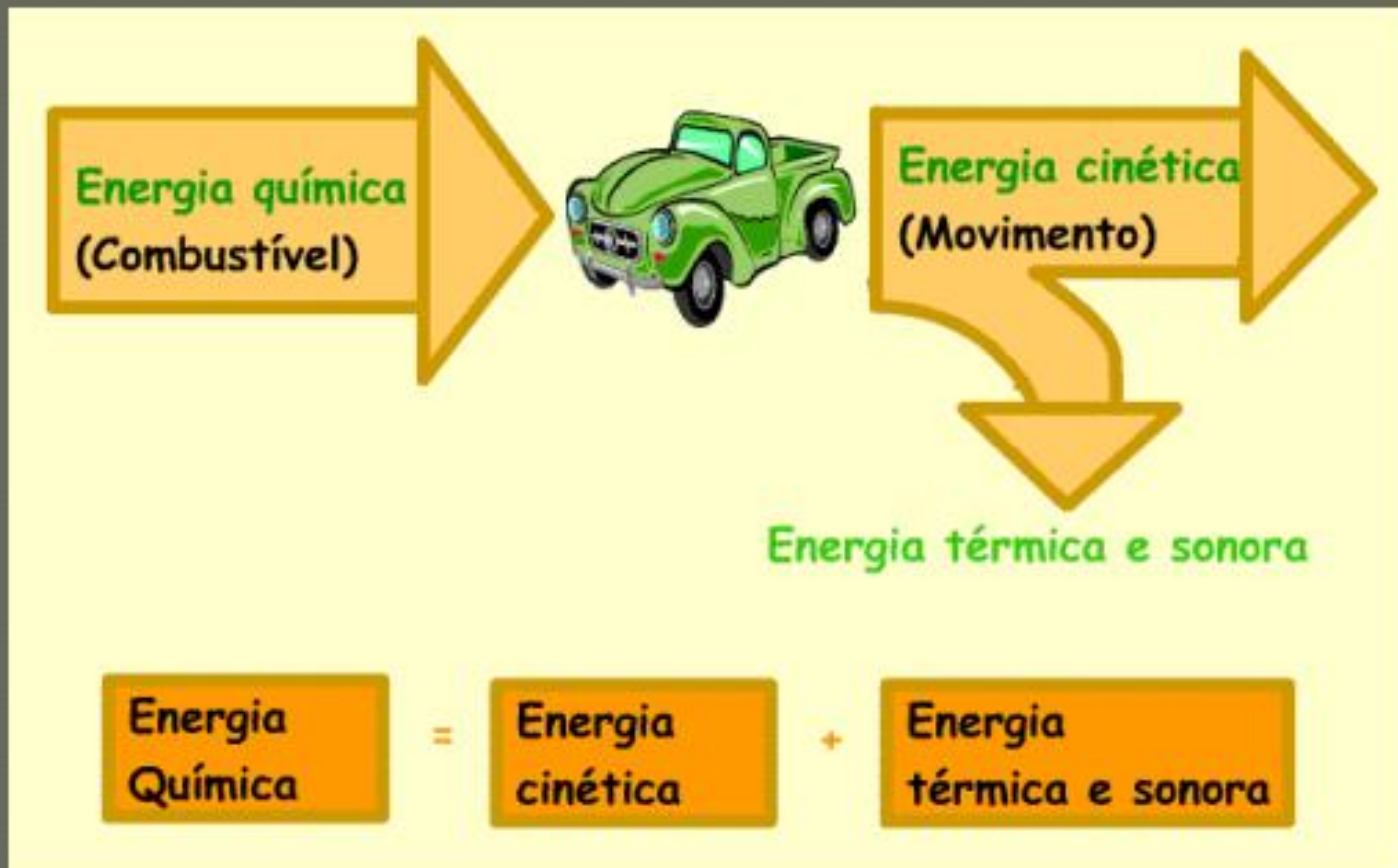


Esquerda: o gás no interior do cilindro está em equilíbrio e possui energia interna  $U_1$

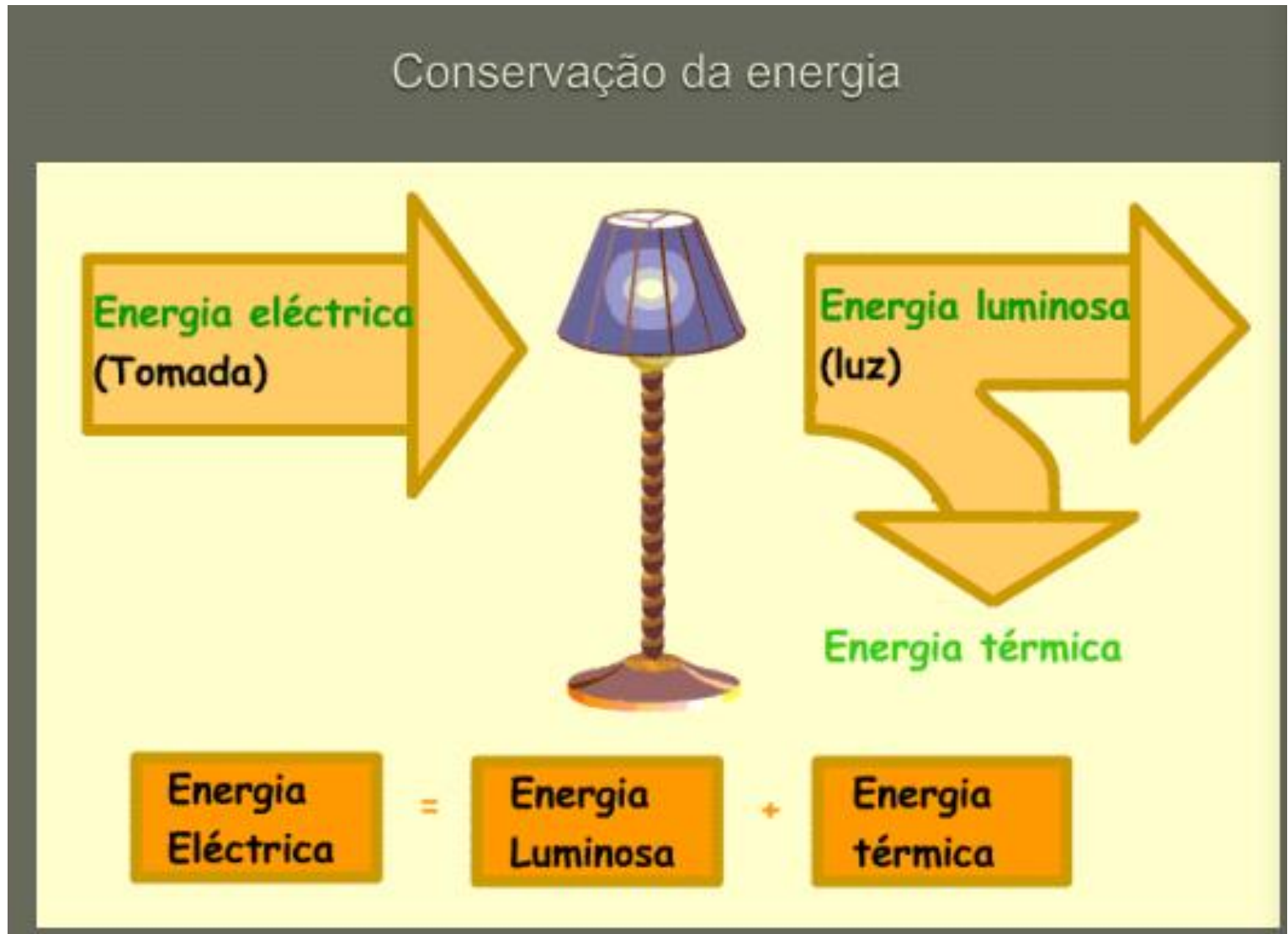
Direita: Uma quantidade de calor  $Q$  é adicionado ao gás. Uma parte dessa energia é usada para realizar trabalho de expansão ( $W$ ) e outra parte é acrescentada à energia interna do sistema que passa a ser  $U_2$

# Primeira Lei da Termodinâmica

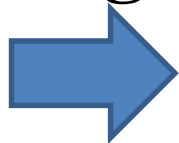
A primeira lei nos diz que as energia que transitam entre um sistema e seus arredores não pode ser produzida ou perdida, apenas transformada.



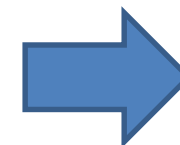
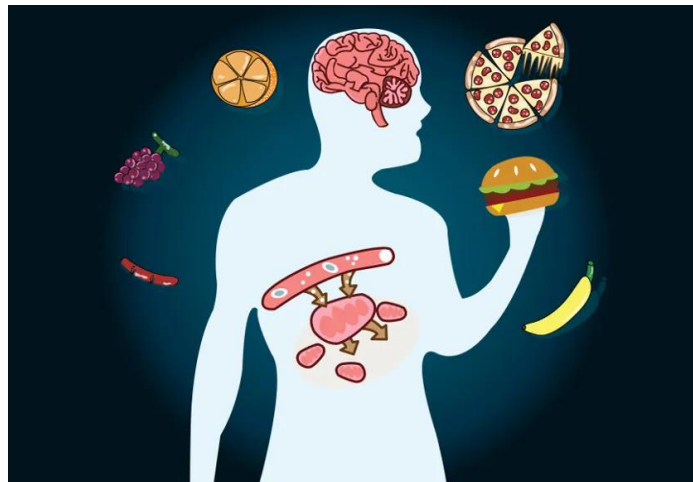
# Primeira Lei da Termodinâmica



**Entrada de  
Energia**



(alimentação)



**calor**



**trabalho**

**excedente**



**convecção**

**irradiação, etc**



# Segunda Lei da Termodinâmica

**Fluxo de calor:**

“O calor jamais flui espontaneamente de um corpo frio para outro quente”

Isto me diz que:

“Para inverter o fluxo natural do calor é preciso fornecer energia ao sistema a partir de uma fonte externa”

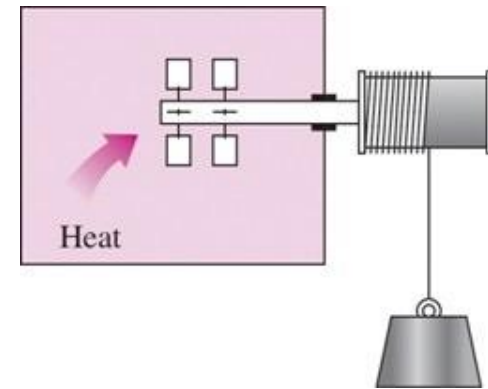


**Enunciado de Clausius** - O calor não pode fluir, de forma espontânea, de um corpo de temperatura menor, para um outro corpo de temperatura mais alta.

Esse processo não acontece, embora obedeça a 1ª lei da termodinâmica

# Segunda Lei da Termodinâmica

Um copo de café nunca esquenta em um ambiente frio

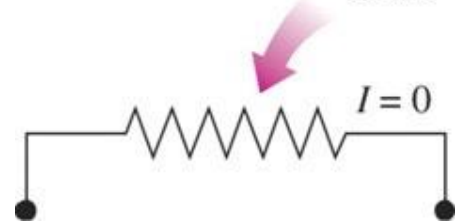


Transferir calor para uma roda com remos não vai fazer ela rodar

Transferir calor para uma resistência não vai gerar eletricidade

Heat

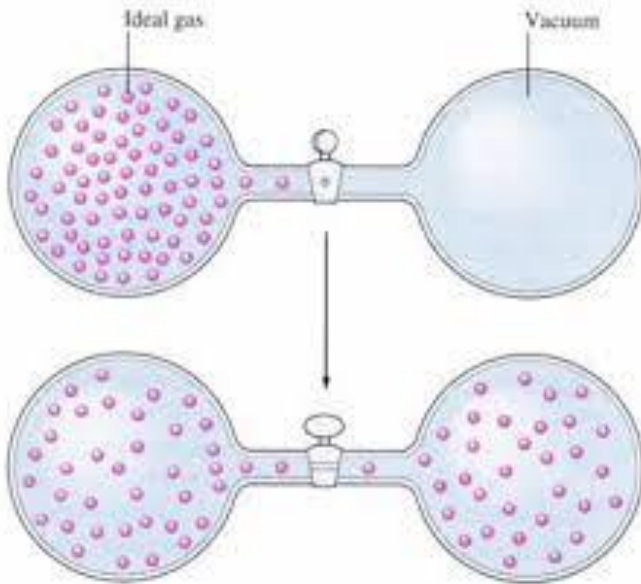
$I = 0$



**Esses processos não podem ocorrer, mesmo que eles não violem a primeira lei da termodinâmica**

**Irreversibilidade!!!**

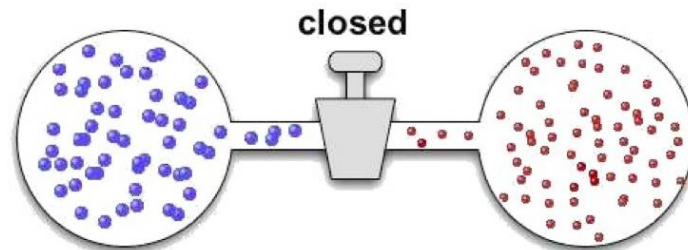
# Expansão livre



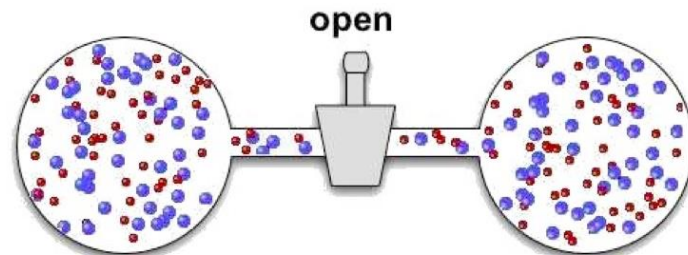
Mais ordenado

Menos ordenado

Mais ordenado



Menos ordenado



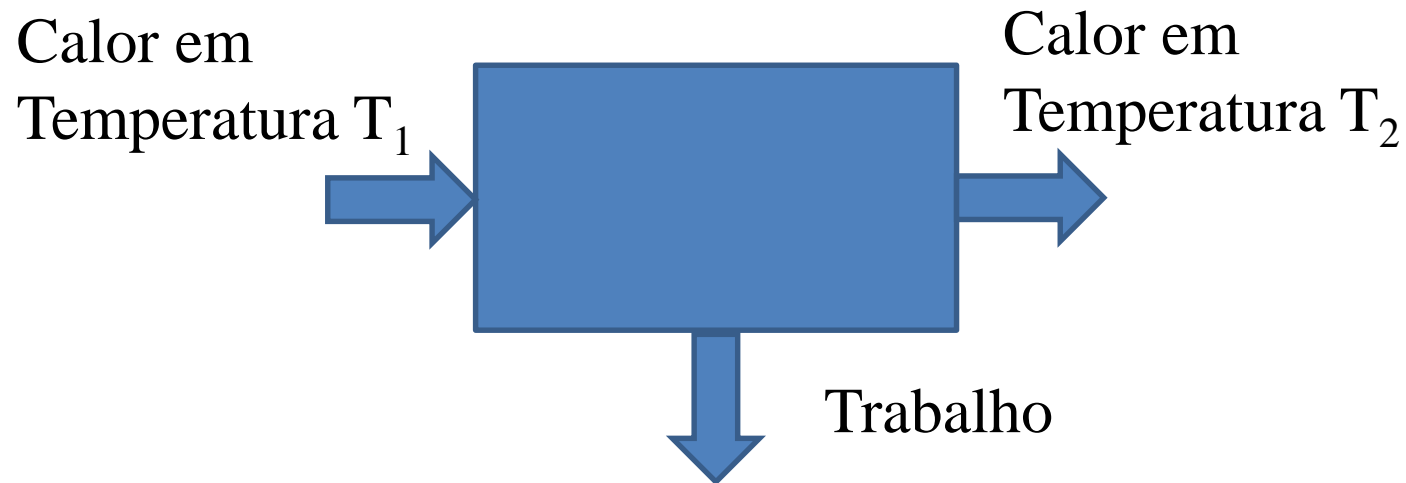
## **EXPANSÃO ADIABÁTICA**

<https://youtu.be/128PPcb47sA>

## **COMPRESSÃO ADIABÁTICA**

<https://youtu.be/iMsvEmXKqmM>

# Conversão calor-trabalho



$$\frac{\textit{trabalho}}{\textit{entrada de calor}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad T_1 \text{ e } T_2 \text{ em escala absoluta}$$

Calor só pode ser completamente convertido em trabalho se a “sobra” de calor for no zero absoluto, o que não é possível

# Termodinâmica de sistemas vivos

## 1ª. Lei: conservação de energia

- O corpo converte a energia das moléculas dos alimentos em calor
- Se o corpo estiver em repouso absoluto e termicamente isolado, não precisa de alimento?



## 2ª. Lei: Ordem → desordem

- Moléculas do corpo: milhões de átomos ordenados
- Mantê-los ordenados → consumo de energia
- Produção de novos tecidos → consumo de energia
- Muitos outros exemplos

# Termodinâmica de sistemas vivos

Mas os sistemas vivos não criam ordem a partir da desordem quando sintetizam grandes moléculas complexas a partir de sub-partes menores aleatórias ???

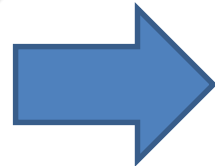
Isso não viola a 2<sup>a</sup>. Lei da termodinâmica ???



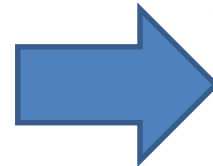
# Termodinâmica de sistemas vivos

Ser vivo

Energia



Rejeitos



Moléculas menos ordenadas

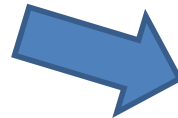


Alimentos → ordem



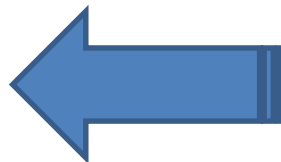
Quebra molecular

desordem



Energia química ordenada transformada em energia térmica desordenada

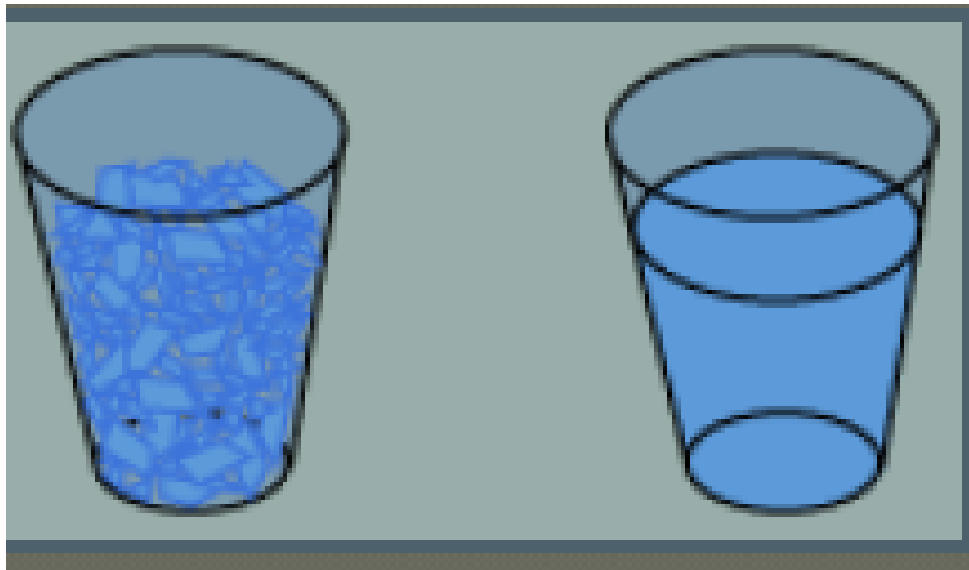
**ENTROPIA**





# Entropia

Os sistemas tendem a evoluir espontaneamente de um estado mais organizado para um outro menos organizado



# Temas associados à entropia de interesse para vocês

- Teoria da informação e a 2ª. Lei da termodinâmica (teorema de Shannon)
- Fractais e teoria do caos

# Calor e Vida

- Temperatura/Calor
  - Importantes para funcionamento dos organismos vivos
  - Taxas metabólicas, divisão celular, reações enzimáticas, etc dependem da temperatura
  - Funcionalidade de muitos sistemas vivos limitada por variações sazonais de temperatura
  - Mamíferos e pássaros: mecanismos sofisticados de regulação da temperatura corporal com maior consumo energético

# Consumo de energia em humanos

- Energia necessária para
    - Circulação do sangue
    - Obter oxigênio
    - Reparo celular etc
  - Humano, 70kg em repouso
    - 70 Cal/h (taxa metabólica basal - TMB)
    - Consumo de energia → taxa metabólica
- 1 cal = 4,18J  
1 Cal = 1 kcal = 1000 cal  
1 Cal/h = 1,16W

# Taxas metabólicas para humanos

Activity	Metabolic rate (Cal/m <sup>2</sup> -hr)
Sleeping	35
Lying awake	40
Sitting upright	50
Standing	60
Walking (3 mph)	140
Moderate physical work	150
Bicycling	250
Running	600
Shivering	250

Consumo energético/hora = taxa metabólica X Área

$$\text{Area (m}^2\text{)} = 0.202 \times M^{0.425} \times H^{0.725}$$

Massa em kg 

 Altura em metros

# Taxas metabólicas em animais

Max Rubner (1883)

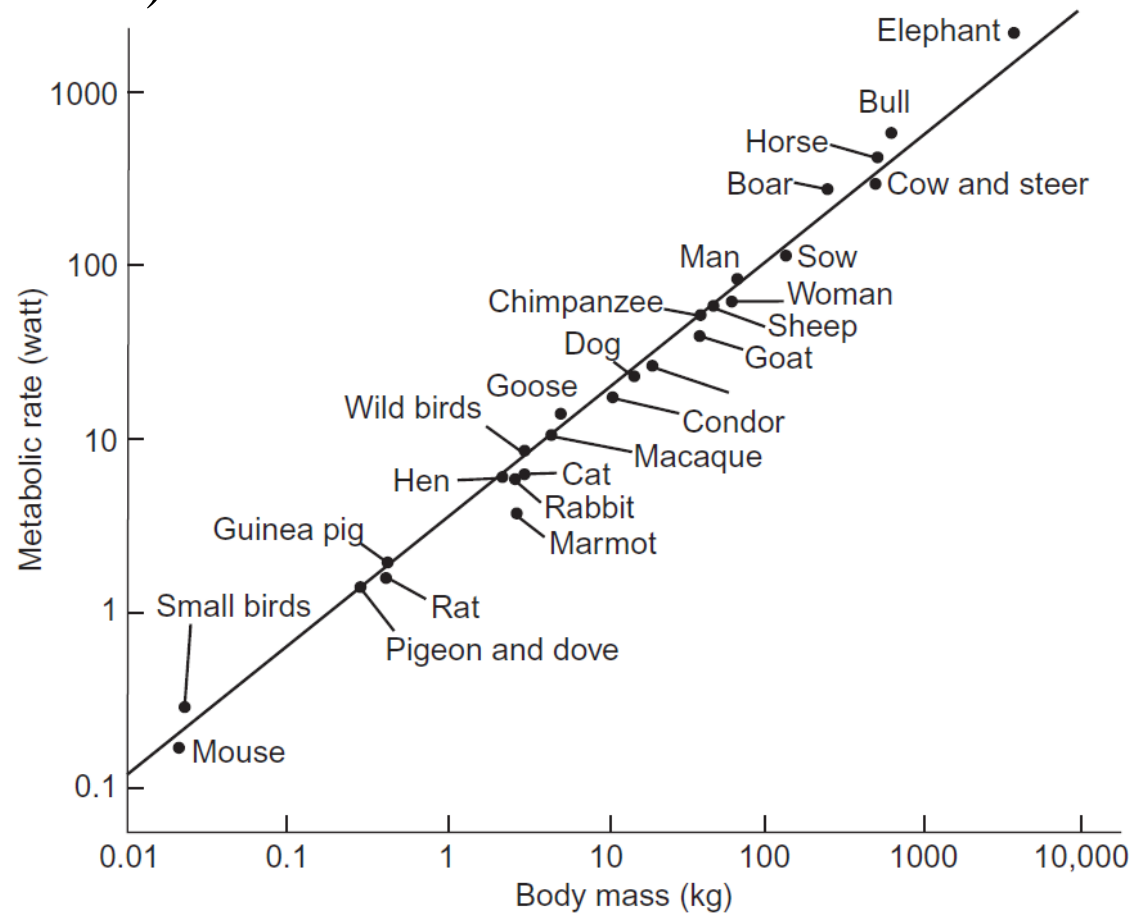
modelo simplificado (esfera)

$$TMB \propto M^{2/3}$$

Max Kleiber (1932)

empírico

$$TMB \propto M^{3/4}$$



# Regulação da temperatura corpórea

- Temperatura interna em humanos
  - 37 °C – normal
  - > 44-45 °C – danos irreversíveis em proteínas
  - < 28 °C – parada cardíaca
- Em atividade física
  - Eficiência muscular: ~20% (80% calor)
  - Calor precisa ser eliminado
  - Pessoa de 70 kg em atividade moderada
    - 260 Cal/h → 208 Cal/h = calor
    - Se não eliminado: aumento de 3 °C/h

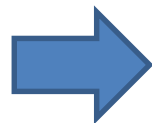
# Regulação da temperatura corpórea

- Mecanismo primário: condução pela pele
  - Mais fria que o interior do corpo
    - 35 °C em dias mornos e 27 °C em dias frios
- Condução de calor pelos tecidos (sem considerar a irrigação do sangue)
  - Condutividade térmica baixa (18 Cal-cm/m<sup>2</sup>.h. °C)
  - Supondo 3 cm de tecido e área de 1,5 m<sup>2</sup>
  - Para uma diferença de T de 2 °C entre a parte interna do corpo e a pele, o fluxo de calor/hora:

$$H = \frac{K_c A \Delta T}{L} = \frac{18 \times 1.5 \times 2}{3} = 18 \text{ Cal/hr}$$

Muito  
baixo

MÉTODO MAIS  
EFICIENTE



CONDUÇÃO PELOS VASOS CAPILARES  
DO SISTEMA CIRCULATORIO



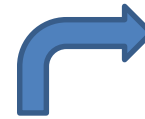
# Regulação da temperatura corpórea

- Mecanismo mais eficiente: condução pela pele
  - Convecção
  - Radiação
  - Evaporação
  - Condução – se estiver em contato com bom condutor térmico

# Regulação da temperatura corpórea

- Convecção

Taxa de  
transferência  
por convecção



Coeficiente de convecção

$$H'_c = K'_c A_c (T_s - T_a)$$

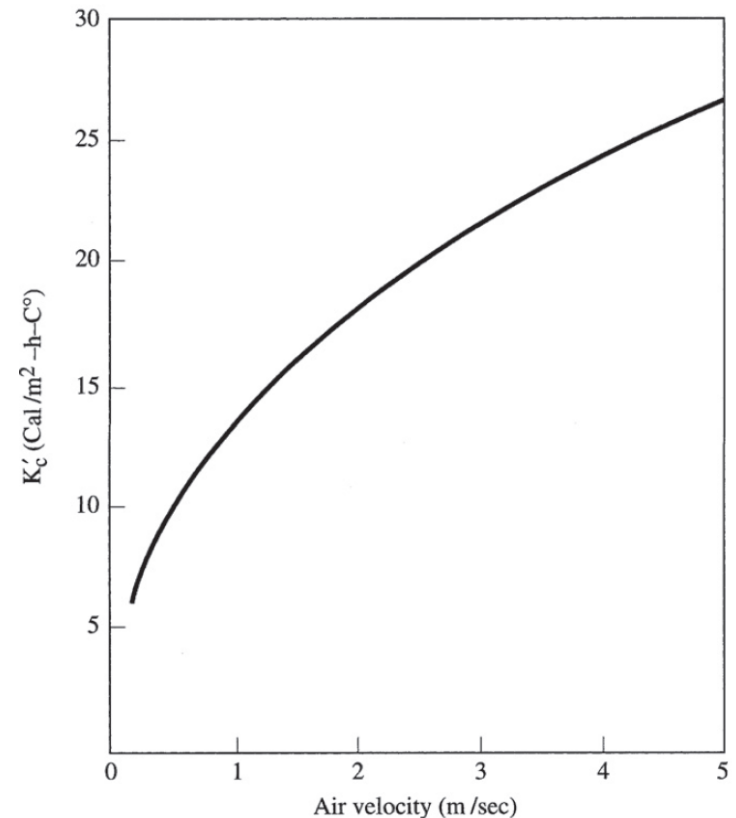
## Exemplo

Pessoa nua, área exposta 1,36 m<sup>2</sup>

$T_a = 25$  °C e  $T_s = 33$  °C

Sem vento:  $K_c = 6$  Cal/m<sup>2</sup>.h. °C

$$H'_c = 65,4 \text{ Cal/h}$$



# Regulação da temperatura corpórea

- Radiação (irradiação)

Variações de T  
menores que 15%

$$H_r = e\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad \longrightarrow \quad H_r = K_r A_r e(T_s - T_r)$$

Emissividade  $\approx 1$

Coeficiente de radiação  
 $\approx 6.0 \text{ Cal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

## Exemplo

Pessoa nua, área irradiando  $1,5 \text{ m}^2$

$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_s = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

$K_c = 6 \text{ Cal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

$$H_r = 63 \text{ Cal/h}$$

BAIXO

# Regulação da temperatura corpórea

- Evaporação
  - Em dias mornos, convecção e irradiação não são suficientes para dissipar o calor do corpo
  - Parte do resfriamento realizada pela evaporação da transpiração pela pele → 580 Cal de calor/litro de suor
  - Dois tipos de glândulas sudoríparas
    - Écrinas:
      - Distribuídas sobre a superfície do corpo
      - Respondem aos mecanismos nervosos de termoregulação
      - Exceção: mãos e pés – estimuladas pela adrenalina
    - Apócrinas
      - Axilas e região púbica
      - Respondem à presença de adrenalina
      - Responsáveis pelo odor do corpo (aparecem na puberdade)

# Regulação da temperatura corpórea

- Evaporação
  - Taxas de produção de suor
    - Até 4 litros/h por curtos períodos de tempo
    - Cerca de 1 litro/h por períodos de até 6 horas
  - Reidratação
    - Funcionalidade severamente afetada com perda de 10% da massa corpórea
  - Resfriamento do corpo
    - Depende da
      - Temperatura ambiente
      - Humidade do ar
      - Velocidade do vento
    - Respiração também promove evaporação
      - Pouco efetiva em humanos

# Regulação da temperatura corpórea

- Evaporação

- Exemplo

- Imagine uma pessoa correndo nua (!) no sol a uma velocidade de 5 km/h.
  - Temperatura ambiente 47 °C
  - Área de pele 1,7 m<sup>2</sup> → área exposta 1,5 m<sup>2</sup>
  - Energia consumida 240 Cal/h (quase toda convertida em calor e liberada pela pele)
  - Pele aquecida pela radiação do ambiente (99 Cal/h) e pela radiação direta do sol (294Cal/h)



# Regulação da temperatura corpórea

- Evaporação

- Exemplo

- Nestas condições, o único mecanismo de resfriamento do corpo é a transpiração (580 Cal/litro de suor)
- Calor transferido para a pele por convecção

$$H'_c = K'_c A_c (T_s - T_a)$$

- 5 km/h  $\approx$  1,3 m/s  $\rightarrow K'_c = 13 \text{ Cal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$
- Temperatura da pele 36  $^\circ\text{C}$

$$H'_c = 13 \times 1.50 \times (47 - 36) = 215 \text{ Cal/hr}$$

- Calor total que precisa ser liberado pela transpiração

$$(240 + 215 + 294 + 99) \text{ Cal/hr} = 848 \text{ Cal/hr}$$

## Outros temas legais pra vocês olharem

- Resistência ao frio por humanos e outros animais
- Aquecimento global e o efeito estufa
- Demanda de energia por grandes carnívoros



# Agora é a hora da diversão!!!

## LISTAS DE EXERCÍCIOS



Não esqueçam de  
colocar os nomes de  
todos os integrantes do  
grupo presentes na aula

**Lista de casa 4 e síntese 1 (esta aula) para 17/10**