

# **Física 3**

(1/2015)

*Fluidos, Termodinâmica, Ondas e Ótica*

Aulas 9, 10 e 11

Carlos Eduardo Souza (Cadu)  
carlooseduardosouza@id.uff.br

Site: [cursos.if.uff.br/fisica3-0215/](http://cursos.if.uff.br/fisica3-0215/)

## TC - 1

Um pedaço de gelo ( $T = -20^{\circ}\text{C}$ ) é adicionado a um recipiente termicamente isolado com água fria ( $T = 0^{\circ}\text{C}$ ). O que acontece no recipiente?

- A) O gelo derrete até que o equilíbrio térmico seja estabelecido.
- B) A água resfria até que o equilíbrio térmico seja estabelecido.
- C) Parte da água congela e o pedaço de gelo se torna maior.
- D) Nenhuma das coisas acima acontece.

## TC - 2

Suponha que você seja um astronauta no espaço, trabalhando duro no seu traje espacial lacrado. A única maneira é você transferir calor para a vizinhança é por

- (A) Condução
- (B) Convecção
- (C) Irradiação
- (D) Evaporação

# Mecanismos de transferência de Calor

**Como o calor é transferido de um corpo mais quente para outro, mais frio?**

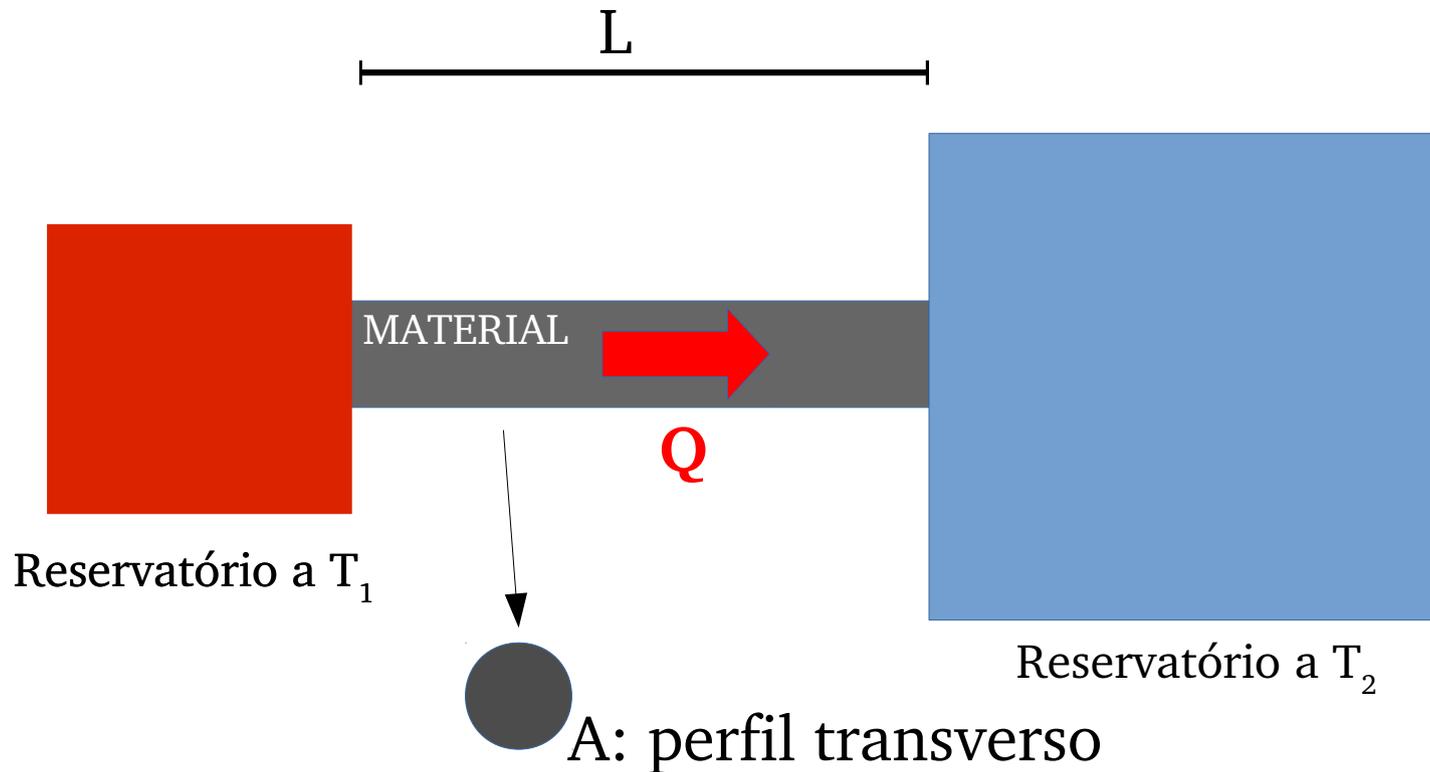
**4 Mecanismos:**

- **Evaporação**
- **Condução**
- **Convecção**
- **Irradiação**

# Mecanismos de transferência de Calor

- **Condução**

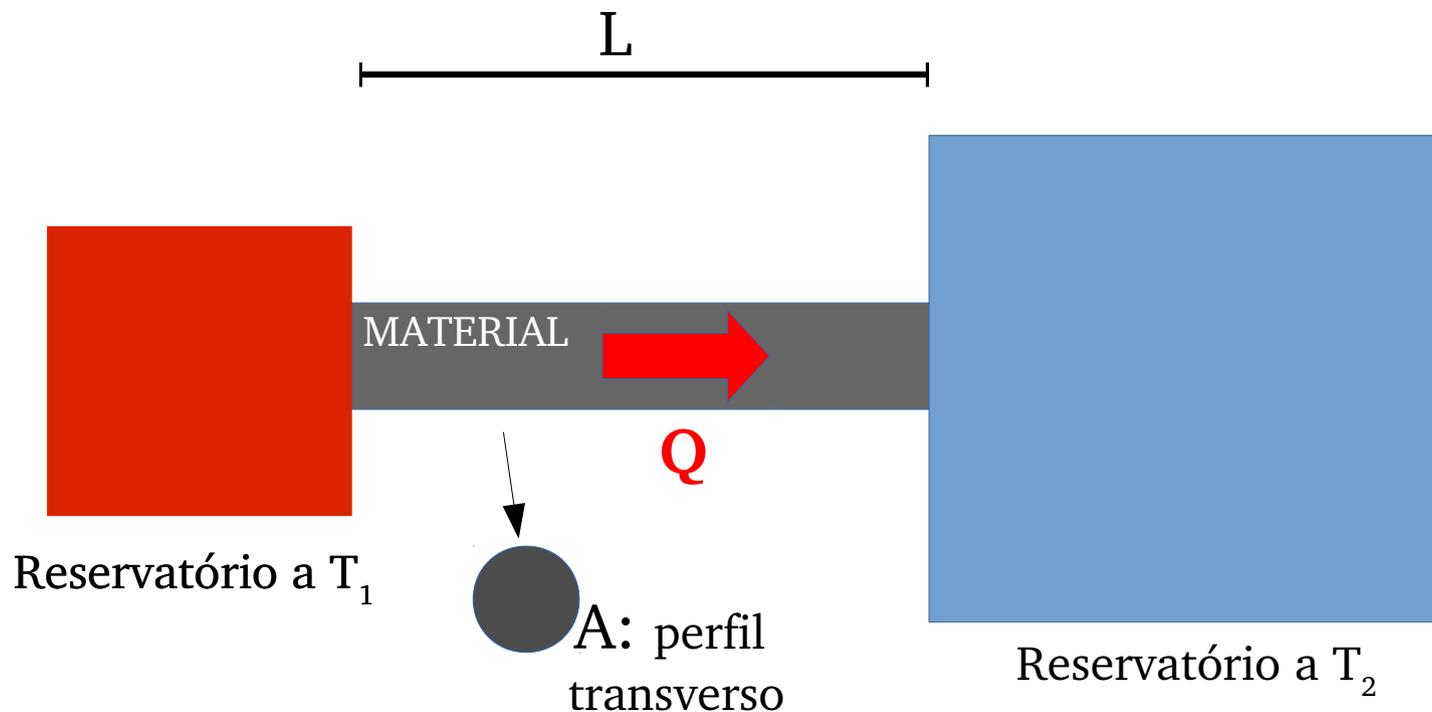
Na Condução a transferência de calor através de um meio material (sem transporte de massa) devido a uma  $\Delta T$ .



# Mecanismos de transferência de Calor

- **Condução**

Na Condução a transferência de calor através de um meio material (sem transporte de massa) devido a uma  $\Delta T$ .



$$fluxo = \frac{Q}{\Delta t} = k \frac{A}{L} \Delta T \quad \text{Fórmula Empírica}$$

Fluxo de transferência de energia térmica

# Mecanismos de transferência de Calor

- **Convecção**

Na convecção a transferência de energia térmica através de um meio material (com transporte de massa) devido a uma  $\Delta T$ . Ocorre somente nos fluidos!



O ar/fluido é um péssimo condutor de calor, porém ele transmite facilmente a energia térmica por convecção.

# Mecanismos de transferência de Calor

- **Convecção**

Na convecção a transferência de calor através de um meio material (com transporte de massa) devido a uma  $\Delta T$ . Ocorre somente nos fluidos!



Os fluidos não são bons condutores de calor, porém são bem eficiente na transmissão de energia...

# Mecanismos de transferência de Calor

- **Irradiação**

Na irradiação a transferência de calor através das ondas eletromagnéticas (luz). Não há necessidade de meios materiais!

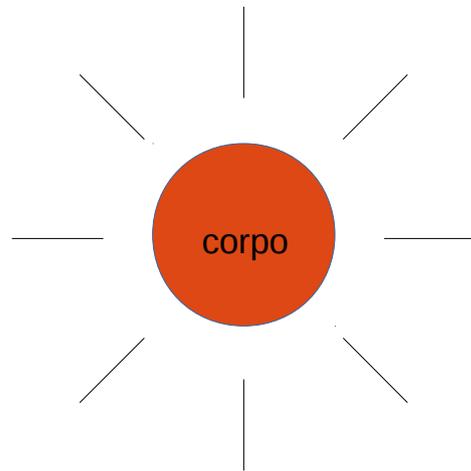


O que é o efeito estufa?

# Mecanismos de transferência de Calor

- **Irradiação**

Na irradiação a transferência de calor através das ondas eletromagnéticas (luz).  
Não há necessidade de meios materiais!



$$\frac{Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4$$

$e$  – emissividade (Depende do material)

$\sigma$  – cte de Boltzmann =  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

## TC - 3

A garrafa térmica funciona bem porque

- (A) suas paredes de vidro são finas.
- (B) a superfície espelhada, dentro da garrafa, reduz a convecção.
- (C) vácuo reduz a radiação de calor.
- (D) nenhuma das respostas acima.

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

A agitação microscópica dá origem a valores previsíveis e constantes de variáveis de estado macroscópicas como a **pressão**, **temperatura** e o **calor específico**.

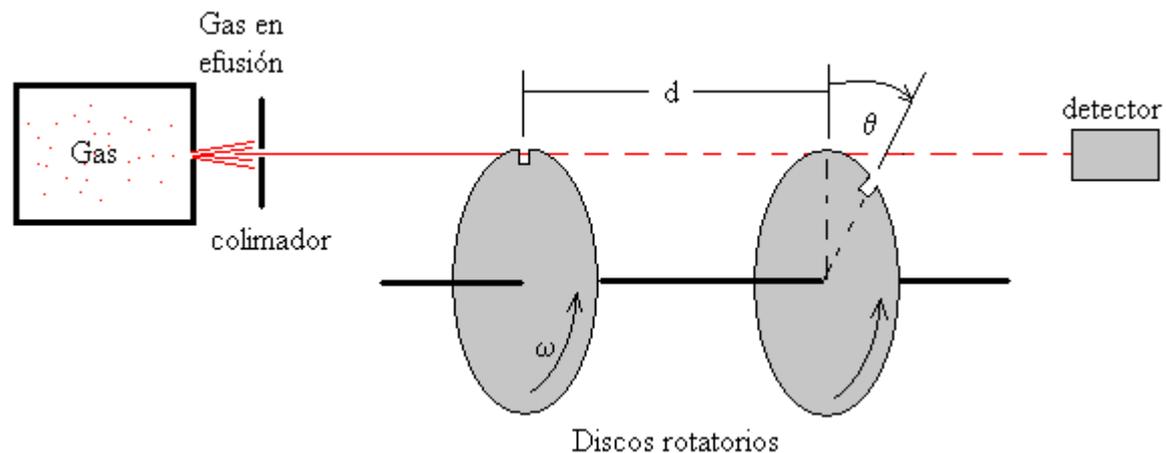
A **Segunda Lei da Termodinâmica** estabelece uma regra pra a descrição de processos físicos espontâneos. Processos que conservam a energia, satisfazendo, portanto, a 1ª Lei da Termodinâmica, mas que nunca são observados são proibidos pela 2ª Lei da Termodinâmica.



# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Distribuição de Velocidades dos átomos/moléculas de um gás

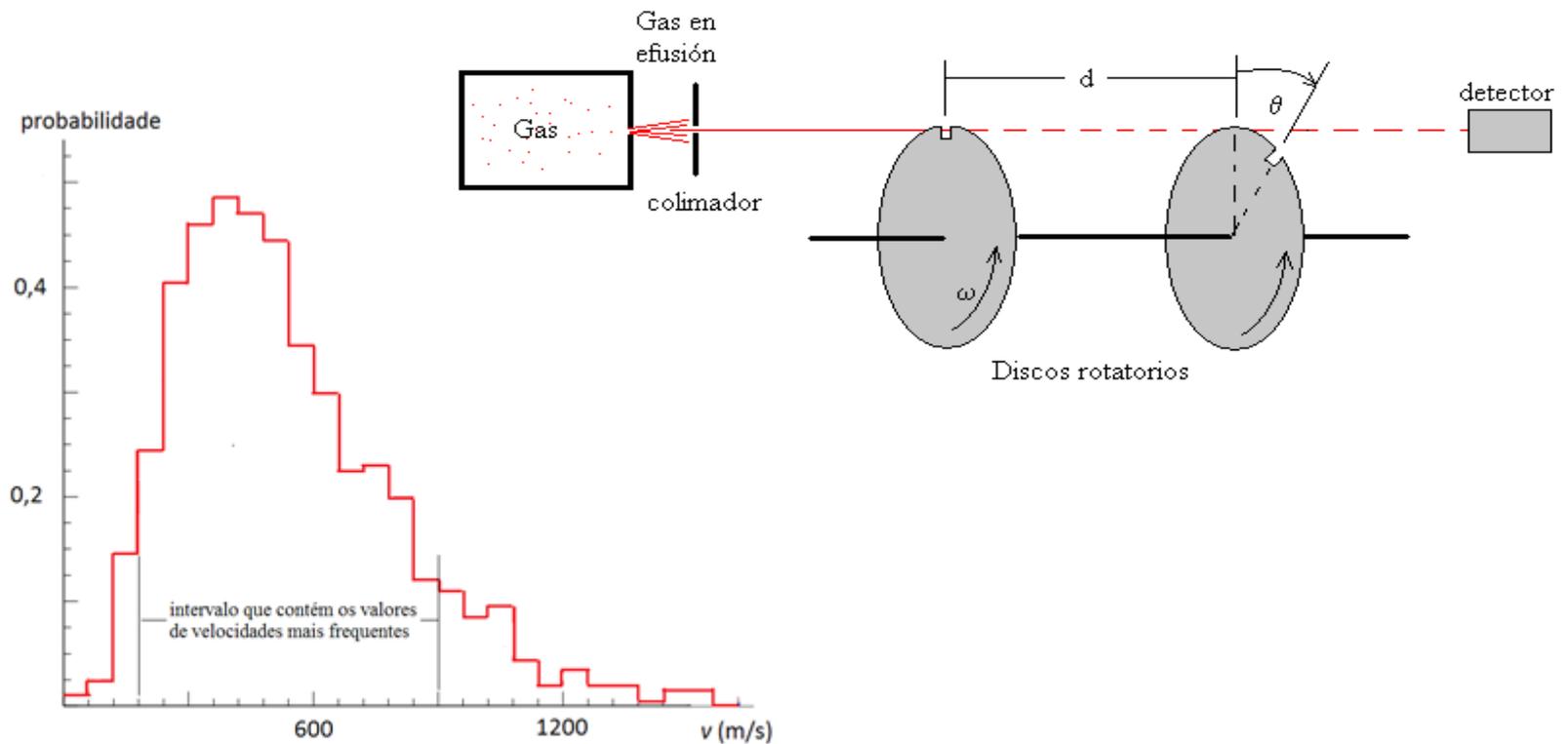


O ajuste da frequência de rotação permite a seleção de partículas com velocidades específicas!

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

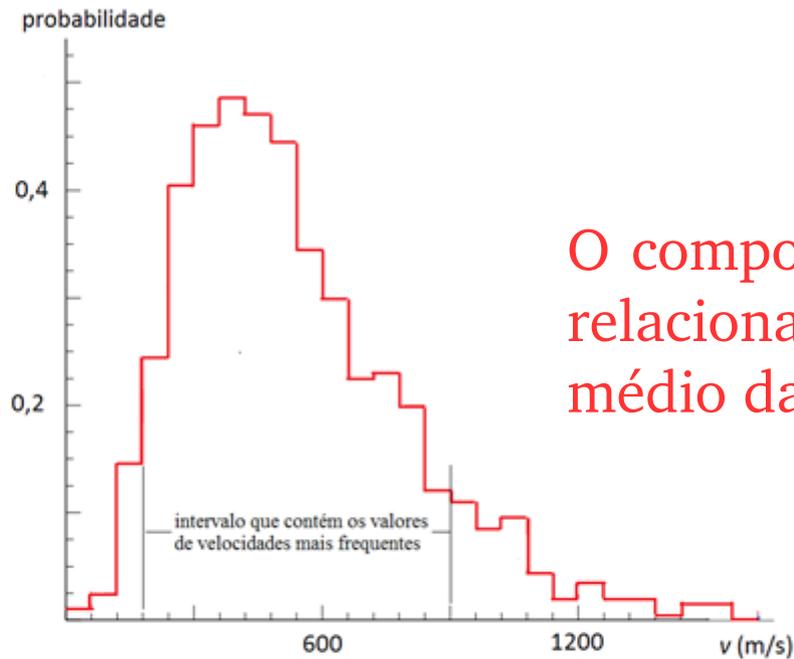
### Distribuição de Velocidades dos átomos/moléculas de um gás



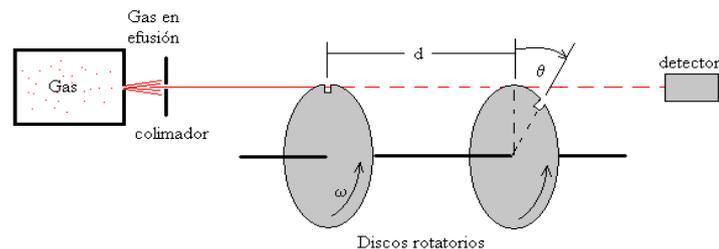
# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Distribuição de Velocidades dos átomos/moléculas de um gás



O comportamento macroscópico está relacionado com o comportamento médio das partículas do gás.

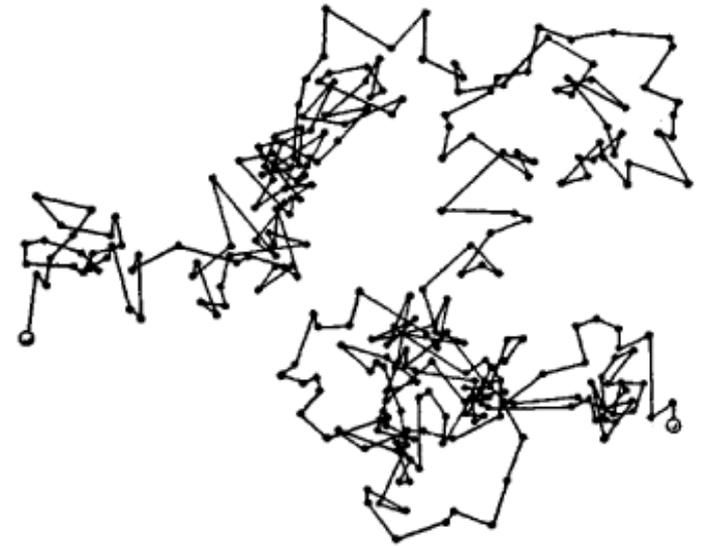


# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Livre caminho médio

- Distância média entre duas colisões
- Intervalo de tempo médio entre duas colisões



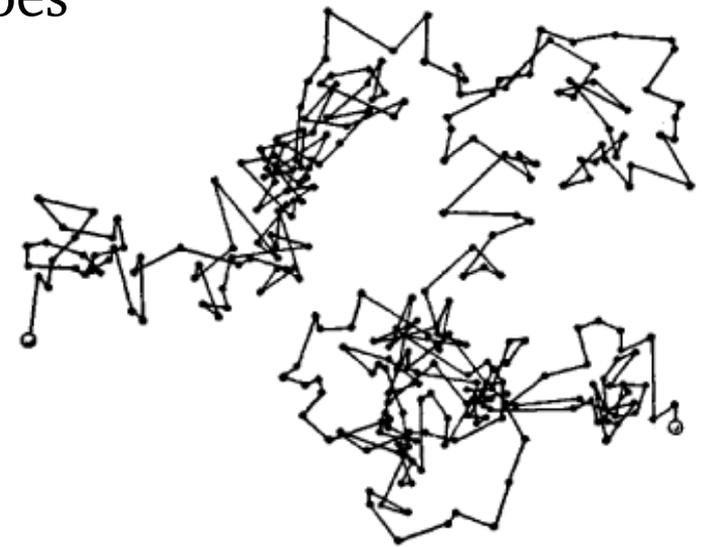
# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Livre caminho médio

- Distância média entre duas colisões
- Intervalo de tempo médio entre duas colisões

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2} \pi \frac{N}{V} r^2}$$



$r \sim 0,5 \cdot 10^{10} \text{ m} \rightarrow$  monoatômicos  
 $r \sim 1,0 \cdot 10^{10} \text{ m} \rightarrow$  diatômicos

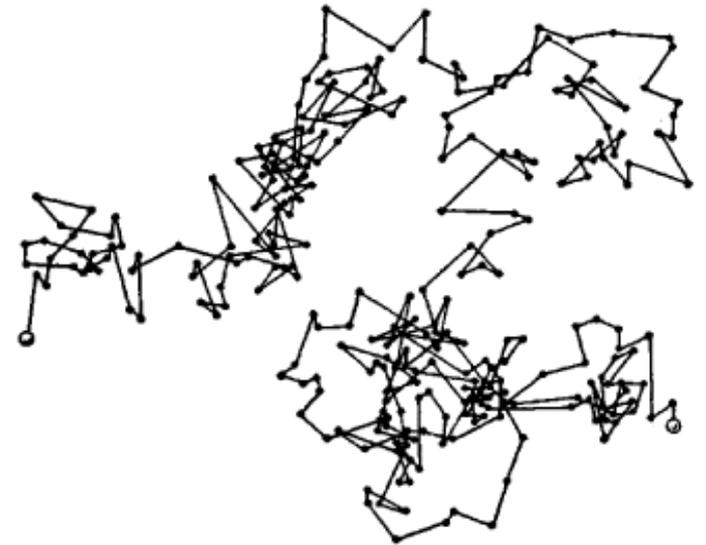
# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

Livre caminho médio

Exemplo 18.1:  $N_2$  a  $20^\circ\text{C}$  e a  $1,0\text{ atm}$

$$\lambda = 230\text{nm}$$

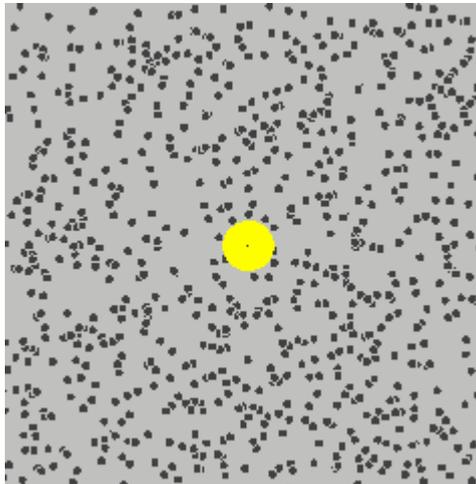


# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Pressão de um gás

→ resultado das colisões entre as moléculas e as paredes do recipiente.



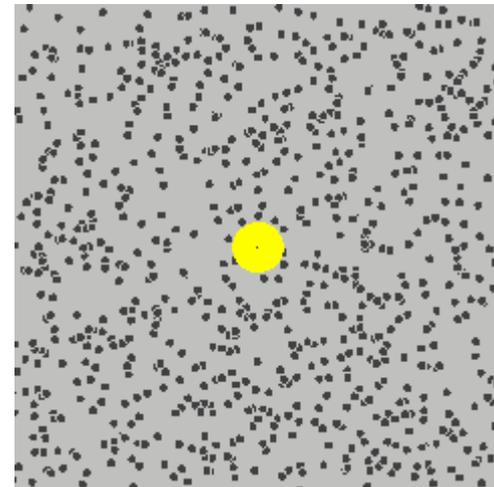
# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Pressão de um gás

→ resultado das colisões entre as moléculas e as paredes do recipiente.

$$P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m v_{rms}^2$$



## Algumas respostas dos testes online...

O quê é o livre caminho médio?

Estudante-

“Como uma molécula de um gás realiza uma trajetória ziguezagueante em meio diferente do vácuo e a distribuição aleatória das moléculas do gás faz com que os segmentos de linha reta entre as colisões sejam de comprimentos desiguais. Se uma molécula sofre  $N$  colisões enquanto percorre uma distância  $L$ , a distância média percorrida entre as colisões, chamada de livre caminho médio será dada por  
$$\text{Lambda (livre caminho médio)} = L/N.$$
 “

Estudante-

“Qualquer molécula que percorre uma determinada distância  $L$  em um gás sofre  $N$  colisões com as moléculas de tal gás. A distância média percorrida entre essas colisões é o que chamamos de “livre caminho médio”, definido por:  $\text{Lambda} = L/N$ ”

## Algumas respostas dos testes online...

3º questão - O que ocorre com o Livre Caminho Médio se a T absoluta aumentar, sem que qualquer outro parâmetro de estado mude?

Estudante-

“Não ocorrerá nada com o livre caminho médio.”

Estudante-

“O livre caminho médio também pode ser escrito como:

$\lambda = 1/(4 \cdot \pi \cdot (N/V) \cdot r^2)$  , onde  $(N/V) = p/(k_b) \cdot T$  , onde  $k_b$  é a constante de Boltzmann.

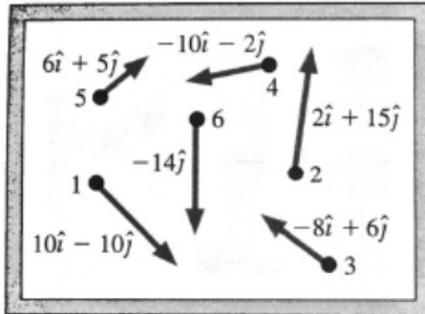
Substituindo em  $\lambda$ , temos:

$$\lambda = (k_b) \cdot T / (4 \cdot \pi \cdot p \cdot r^2)$$

Então,  $\lambda$  é diretamente proporcional à temperatura, logo um aumento nessa, com os outros parâmetros sendo mantidos constantes, causa um aumento no livre caminho médio.

”

# Velocidade RMS



**FIGURA 18.8** As velocidades moleculares do Exemplo 18.2. As unidades são m/s.

## EXEMPLO 18.2 Cálculo do valor quadrático médio da velocidade

A **FIGURA 18.8** mostra as velocidades de todas as moléculas de um gás bidimensional com seis moléculas. Calcule e compare os valores da velocidade média  $\vec{v}_{\text{med}}$ , da rapidez média  $v_{\text{med}}$  e da velocidade rms  $v_{\text{rms}}$ .

**RESOLUÇÃO** A Tabela 18.1 mostra os componentes de velocidade  $v_x$  e  $v_y$  para cada molécula, os quadrados  $v_x^2$  e  $v_y^2$ , sua soma  $v_x^2 + v_y^2$  e a rapidez  $v = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$ . As médias de todos os valores de cada coluna estão mostradas no final da tabela. Pode-se verificar que a velocidade média é  $\vec{v}_{\text{med}} = \vec{0}$  m/s e que a rapidez média é  $v_{\text{med}} = 11,9$  m/s. A velocidade rms é, por sua vez, é

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{(v^2)_{\text{med}}} = \sqrt{148,3 \text{ m}^2/\text{s}^2} = 12,2 \text{ m/s}$$

**AVALIAÇÃO** A velocidade rms é apenas 2,5% maior do que a velocidade média.

**TABELA 18.1** Cálculo da velocidade rms e da velocidade média para as moléculas do Exemplo 18.2

Molécula	$v_x$	$v_y$	$v_x^2$	$v_y^2$	$v^2$	$v$
1	10	-10	100	100	200	14,1
2	2	15	4	225	229	15,1
3	-8	6	64	36	100	10,0
4	-10	-2	100	4	104	10,2
5	6	5	36	25	61	7,8
6	0	-14	0	196	196	14,0
Média	0	0			148,3	11,9

## Teste Conceitual 2

O que acontece com o *livre caminho médio* das moléculas de um gás ideal confinado se ele sofrer um processo isobárico até que  $T=2T_0$ ?

- (A) reduz à metade.
- (B) nada ocorre
- (C) dobra
- (D) impossível determinar

# Física 3

## Teste Conceitual 1

Suponha que você pudesse, subitamente, aumentar a velocidade de todas as moléculas de um gás por um fator 2. Neste caso, a  $v_{\text{rms}}$  do gás aumentaria por

- (A)  $2^2$
- (B) 2
- (C)  $2^{1/2}$
- (D) 1

# Física 3

## Teste Conceitual 2

Suponha que você pudesse, subitamente, aumentar a velocidade de todas as moléculas de um gás por um fator 2. Neste caso, a **pressão** do gás aumentaria por

- (A)  $2^2$
- (B) 2
- (C)  $2^{1/2}$
- (D) 1

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Teorema da Equipartição da Energia

→ No equilíbrio Térmico a energia é partilhada igualmente entre suas várias formas.

$$E^{t\acute{e}rm} = E_C + U$$

Gás Monoatômico →  $U=0$  (não há energia de ligação entre as moléculas)

$$\begin{aligned} E^{t\acute{e}rm} &= \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_N \\ &= \frac{3}{2} N \kappa_B T = \frac{3}{2} n R T \end{aligned}$$

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Teorema da Equipartição da Energia

→ Dois gases monoatômicos quaisquer terão a mesma energia térmica se estiverem a mesma temperatura, independente da massa de cada um deles.

$$E^{t\acute{e}rm} = \frac{3}{2}N\kappa_B T = \frac{3}{2}nRT$$

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Teorema da Equipartição da Energia

→ Para qualquer variação de temperatura

$$\Delta E^{term} = \frac{3}{2}nR\Delta T \quad (\text{micro})$$

Mas, no cap. 17 vimos que  $\Delta E^{term} = nc_V\Delta T$  (macro)

Igualando as duas expressões:

$$c_V = \frac{3}{2}R = 12,5 \frac{J}{mol \cdot K}$$

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Teorema da Equipartição da Energia

→ Concordância perfeita entre o modelo corpuscular da matéria e os experimentos

$$c_V = \frac{3}{2}R = 12,5 \frac{J}{mol \cdot K}$$

A única forma de energia num gás monoatômico é a energia de translação.

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Teorema da Equipartição da Energia

A única forma de energia num gás monoatômico é a energia de translação.

$$\epsilon = \frac{1}{2} m v^2 = \underbrace{\frac{1}{2} m v_x^2}_{\epsilon_x} + \underbrace{\frac{1}{2} m v_y^2}_{\epsilon_y} + \underbrace{\frac{1}{2} m v_z^2}_{\epsilon_z}$$

$\epsilon_i$  → modos independentes de armazenamento de energia.

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Teorema da Equipartição da Energia

No estudo dos materiais observamos que a energia de um sistema está distribuída igualmente em todos os graus de liberdade do sistema e vale

$$N \kappa_B T / 2 \quad \text{ou} \quad n R T / 2$$

para cada grau de liberdade.

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Teorema da Equipartição da Energia

Sólidos. Quantos graus de liberdade??

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Teorema da Equipartição da Energia

Gases Diatômicos. Quantos graus de liberdade??

**Depois da P1...**

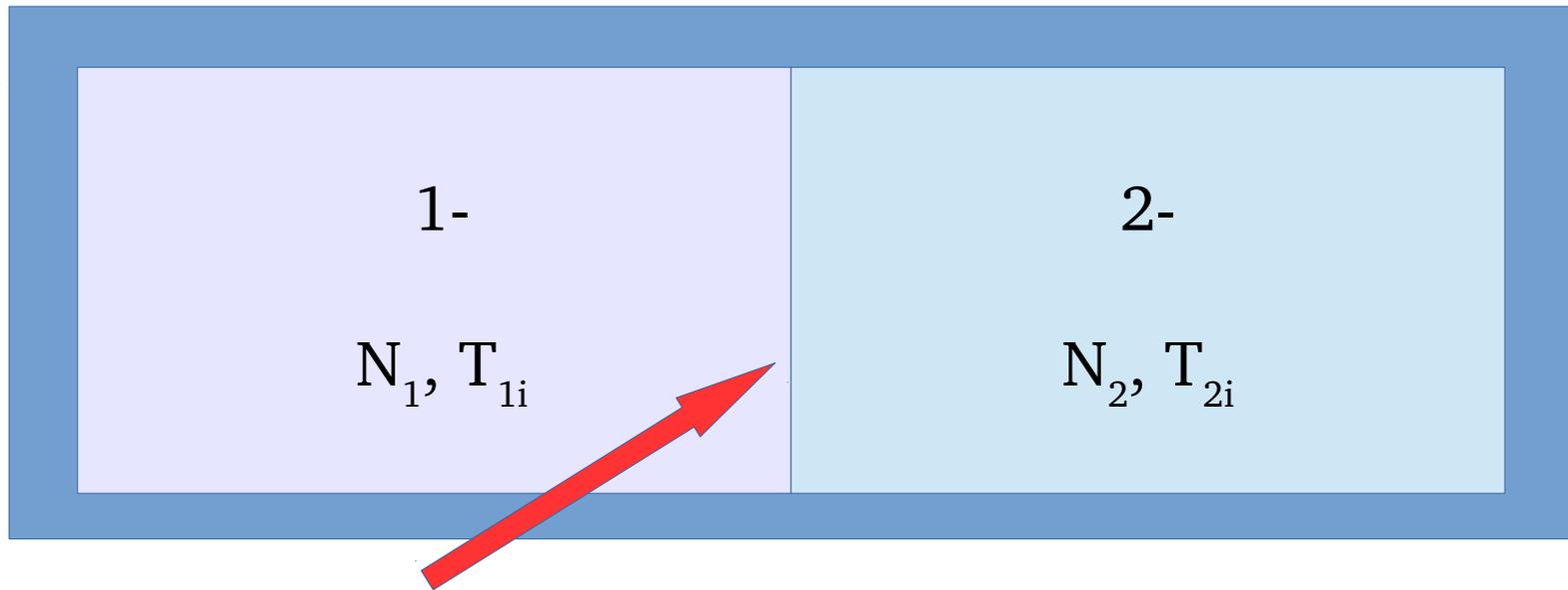
# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Interações Térmicas e Calor

Consideremos o caso de dois **gases monoatômicos**

$$T_{1i} > T_{2i}$$



Barreira flexível que impede o movimento das partículas de um lado para outro.

**Teoria Cinética dos Gases**  
**Conexão Micro-Macro**

**Interações Térmicas e Calor**

Como as interações térmicas levam os sistemas até o equilíbrio?

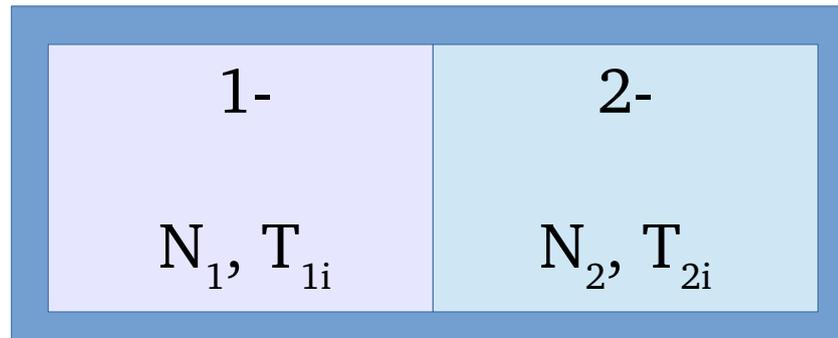
# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Interações Térmicas e Calor

Consideremos o caso de dois **gases monoatômicos**

$$T_{1i} > T_{2i}$$



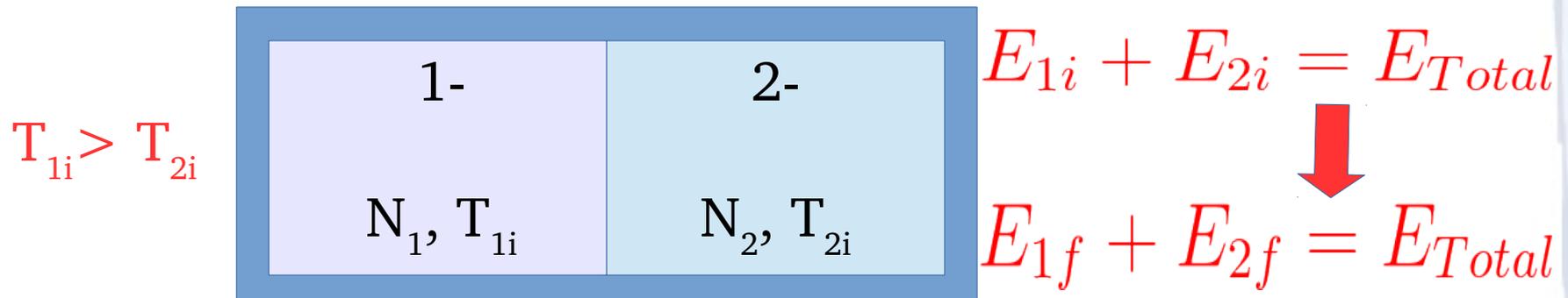
$$E_{1i} = \frac{3}{2}n_1RT_{1i} = \frac{3}{2}N\kappa_B T_{1i} \quad \therefore \quad \epsilon_{1i} = \frac{3}{2}\kappa_B T_{1i}$$
$$E_{2i} = \frac{3}{2}n_2RT_{2i} = \frac{3}{2}N\kappa_B T_{2i} \quad \therefore \quad \epsilon_{2i} = \frac{3}{2}\kappa_B T_{2i}$$

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Interações Térmicas e Calor

Consideremos o caso de dois **gases monoatômicos**



$$E_{1i} = \frac{3}{2}n_1RT_{1i} = \frac{3}{2}N\kappa_B T_{1i} \quad \therefore \quad \epsilon_{1i} = \frac{3}{2}\kappa_B T_{1i}$$

$$E_{2i} = \frac{3}{2}n_2RT_{2i} = \frac{3}{2}N\kappa_B T_{2i} \quad \therefore \quad \epsilon_{2i} = \frac{3}{2}\kappa_B T_{2i}$$

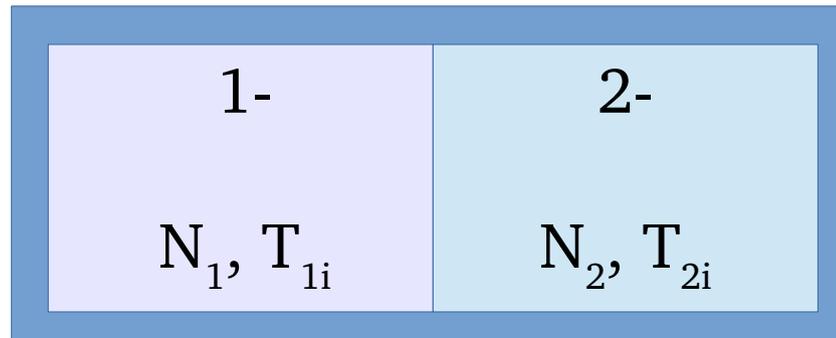
# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Interações Térmicas e Calor

Consideremos o caso de dois **gases monoatômicos**

$$T_{1i} > T_{2i}$$



$$E_{1i} + E_{2i} = E_{Total}$$



$$E_{1f} + E_{2f} = E_{Total}$$

O calor é uma energia transferida por meio de colisões entre átomos mais energéticos (“+ quentes”), de um lado, e os átomos menos energéticos (“+ frios”), de outro.

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Interações Térmicas e Calor

No Equilíbrio, a  $Q_{12} = Q_{21}$ , ou seja, em média, não há transmissão da energia.

$$\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}_2 \Rightarrow T_{1f} = T_{2f}$$

Dois sistemas em interação térmica atingem uma  $T_f$  comum porque eles trocam energia através de colisões até que os átomos de cada lado tenham, em média,  $\epsilon_c$  iguais.

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Interações Térmicas e Calor

No equilíbrio,  $\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}_2$

$$\frac{E_{1f}}{N_1} = \frac{E_{2f}}{N_2} = \frac{E^{TOTAL}}{N_1 + N_2}$$



$$E_{1f} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} E^{TOTAL}$$



$$E_{2f} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} E^{TOTAL}$$

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Interações Térmicas e Calor

No equilíbrio,  $\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}_2$

$$\frac{E_{1f}}{N_1} = \frac{E_{2f}}{N_2} = \frac{E^{TOTAL}}{N_1 + N_2} \begin{matrix} \rightarrow \\ \rightarrow \end{matrix} \begin{matrix} E_{1f} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} E^{TOTAL} \\ E_{2f} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} E^{TOTAL} \end{matrix}$$

$$Q = \Delta E^{term} \left\{ \begin{matrix} Q_1 = E_{1f} - E_{1i} \\ Q_2 = E_{2f} - E_{2i} \end{matrix} \right.$$

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### Interações Térmicas e Calor

No equilíbrio,  $\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}_2$

$$\frac{E_{1f}}{N_1} = \frac{E_{2f}}{N_2} = \frac{E^{TOTAL}}{N_1 + N_2} \quad \begin{matrix} \rightarrow \\ \rightarrow \end{matrix} \quad \begin{matrix} E_{1f} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} E^{TOTAL} \\ E_{2f} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} E^{TOTAL} \end{matrix}$$

→ Em geral, as energias térmicas dos subsistemas no equilíbrio são  $\neq$ 's. Só serão iguais se  $N_1 = N_2$ !

No equilíbrio  $\epsilon_1 = \epsilon_2$ , e não quando  $E_{1f} = E_{2f}$ .

Problema:

2 g de He (Hélio) a 300K é colocado em contato térmico com 10 g de Ar (Argônio) a 600K.

- (A) Quanto vale a Energia Térmica de cada gás imediatamente antes do contato térmico?
- (B) O sistema {He+Ar} está em equilíbrio térmico?
- (C) Quanto vale a Temperatura no equilíbrio Térmico?

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

### **Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica**

→ Por que o calor sempre flui espontaneamente do corpo mais quente para o corpo mais frio?

→ É possível entender (descrever) processos macroscópicos (como a transmissão do calor) a partir dos movimentos moleculares microscópicos?

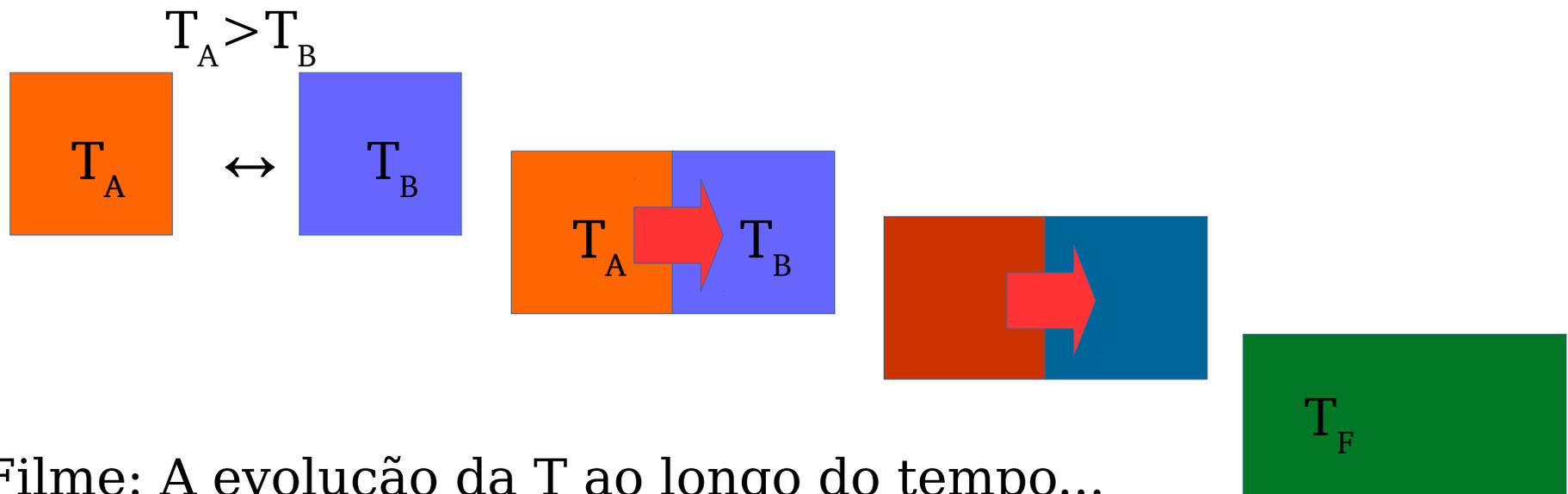
# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

# Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

(Dois exemplos)

## 1- Processo Irreversível – Transmissão de Calor

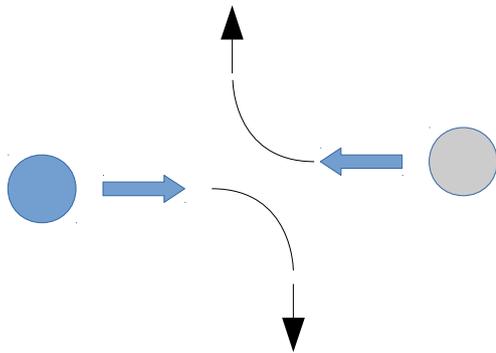


Filme: A evolução da T ao longo do tempo...

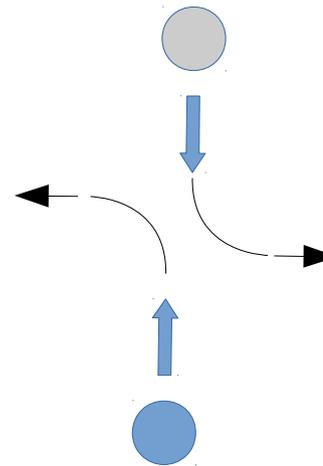
# Teoria Cinética dos Gases Conexão Micro-Macro

## Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

2- Processo reversível - colisão entre duas partículas



Filme rodado em um sentido



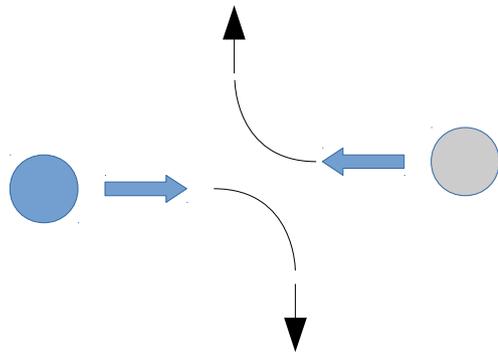
Filme rodado em sentido oposto

**Não há como saber qual filme representa a verdadeira colisão:  
Ambas são possíveis!**

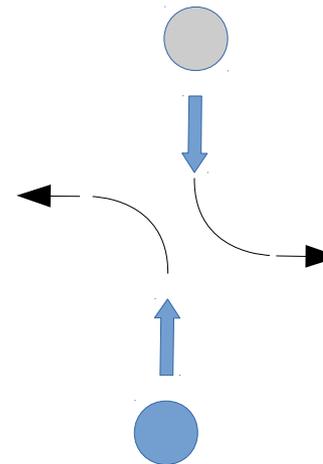
# Teoria Cinética dos Gases Conexão Micro-Macro

## Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

2- Processo reversível - colisão entre duas partículas



Filme rodado em um sentido



Filme rodado em sentido oposto

Não há como saber qual filme representa a verdadeira colisão:  
Ambas são possíveis!

→ **Os processos microscópicos são reversíveis!**

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

# Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

Nenhuma lei física é violada quando um processo irreversível ocorre ao contrário!?!?!?

**Qual é o caminho para o equilíbrio?**

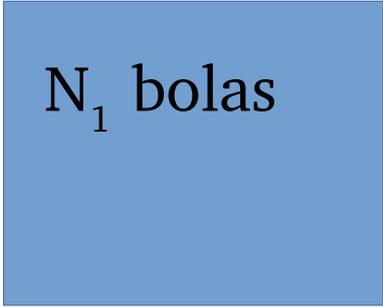
Vamos em busca de uma lei física que determina o sentido de um processo físico...

# Teoria Cinética dos Gases

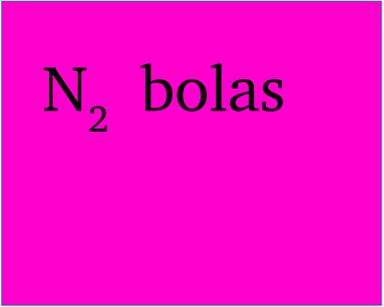
## Conexão Micro-Macro

### Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

Entendendo o Calor – Mecanismo Microscópico



$N_1$  bolas



$N_2$  bolas

A cada segundo, uma bola das  $N=N_1+N_2$  é escolhida aleatoriamente e trocada de caixa.

O que ocorre depois de muitas escolhas?

# Teoria Cinética dos Gases

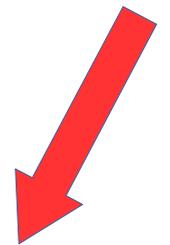
## Conexão Micro-Macro

# Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

Entendendo o Calor – Mecanismo Microscópico

$N_1$  bolas

$N_2$  bolas



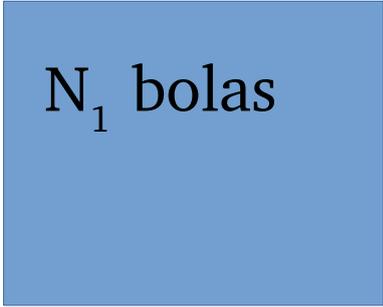
Resposta: Estatisticamente, depois de muitas trocas,  $N_1 \approx N_2$  !

# Teoria Cinética dos Gases

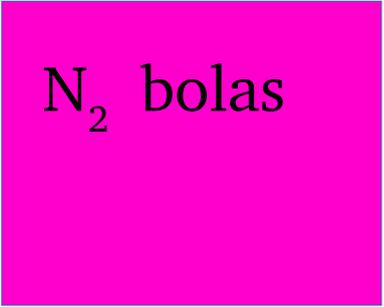
## Conexão Micro-Macro

# Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

Entendendo o Calor – Mecanismo Microscópico



$N_1$  bolas



$N_2$  bolas

$N_1$  aumentar e  $N_2$  diminuir não viola nenhuma lei física, apenas se trata de um processo improvável.

**O equilíbrio é o estado mais provável!**

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

# Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

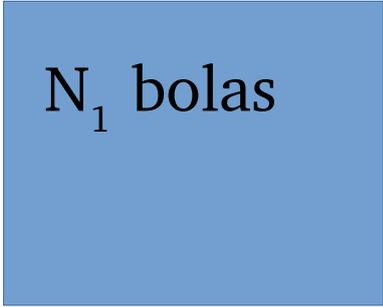
Eventos microscópicos reversíveis resultam em comportamento macroscópico irreversível porque alguns estados macroscópicos são enormemente mais prováveis.

# Teoria Cinética dos Gases

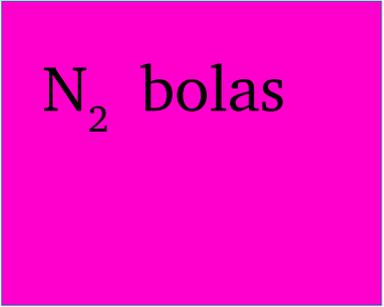
## Conexão Micro-Macro

# Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

Entendendo o Calor – Mecanismo Microscópico



$N_1$  bolas



$N_2$  bolas

Neste exemplo, a bola representa a energia térmica e o Calor é a movimento de troca de caixas.

# Teoria Cinética dos Gases Conexão Micro-Macro

## **Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica**

A 2ª Lei da Termodinâmica é relacionada com a probabilidade de ocorrência de eventos...

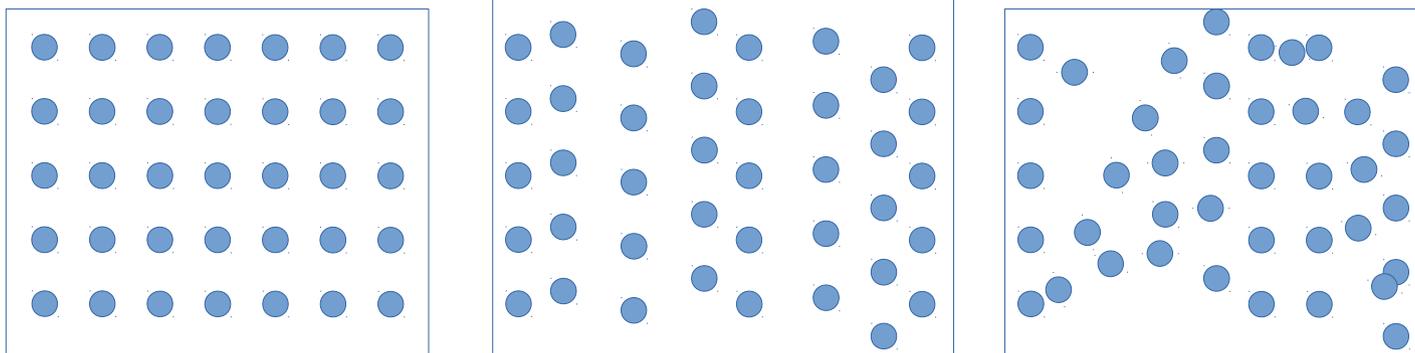
Entropia – variável de estado relacionada ao ordenamento de um sistema físico e a probabilidade da ocorrência de um dado estado macroscópico.

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

# Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

Entropia – variável de estado relacionada ao ordenamento de um sistema físico e a probabilidade da ocorrência de um dado estado macroscópico.



Entropia  $\mu$  Desordem

# Teoria Cinética dos Gases

## Conexão Micro-Macro

# Processos Reversíveis e 2ª Lei da Termodinâmica

**2ª Lei da Termodinâmica:** A entropia de um *sistema isolado* nunca diminui. Ou ela aumenta, até que o sistema atinja o equilíbrio, ou ela se mantém inalterada, se o sistema inicia em equilíbrio.

## Teste Conceitual

Como resultado de qualquer processo natural, a entropia total de todo o sistema mais a do seu ambiente

- A) nunca diminui.
- B) , por vezes, diminui.
- C) nunca aumenta .
- D) sempre permanece a mesma.

## Teste Conceitual

A segunda lei da termodinâmica nos leva a concluir que

- A) a energia total do universo é constante.
- B) desordem no universo está aumentando com o passar do tempo.
- C) é teoricamente impossível converter o trabalho em calor com uma eficiência de 100 %.
- D) a energia total no universo está aumentando com o tempo.

## Teste Conceitual

Em um processo reversível o sistema

- A) sempre está próximo do estado de equilíbrio.
- B) está próximo de estados de equilíbrio apenas no início e no fim do processo.
- C) não pode estar perto de qualquer estado de equilíbrio.
- D) está próximo ao equilíbrio durante todo processo, exceto no início e no fim.