

# A Seta do Tempo e o Ensino da 2ª Lei da Termodinâmica

Carlos Eduardo Aguiar

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Instituto de Física - UFRJ

# Ensino das Leis da Termodinâmica

- Equilíbrio – Lei Zero – Termômetros
- Trabalho adiabático – Energia:  $\Delta E = -W(\text{adiab.})$
- Calor – 1ª Lei da Termodinâmica:  $Q = \Delta E + W$
- Máquinas térmicas – Eficiência
- 2ª Lei da Termodinâmica: formulações de Kelvin e Clausius
- Irreversibilidade
- Teorema de Carnot – Equivalência de diferentes máquinas de Carnot
- Temperatura absoluta
- Teorema de Clausius
- Entropia
- Desigualdade de Clausius
- 2ª Lei:  $\Delta S \geq 0$  em um sistema isolado

ver, por exemplo, Zemansky & Dittman, *Heat and Thermodynamics*

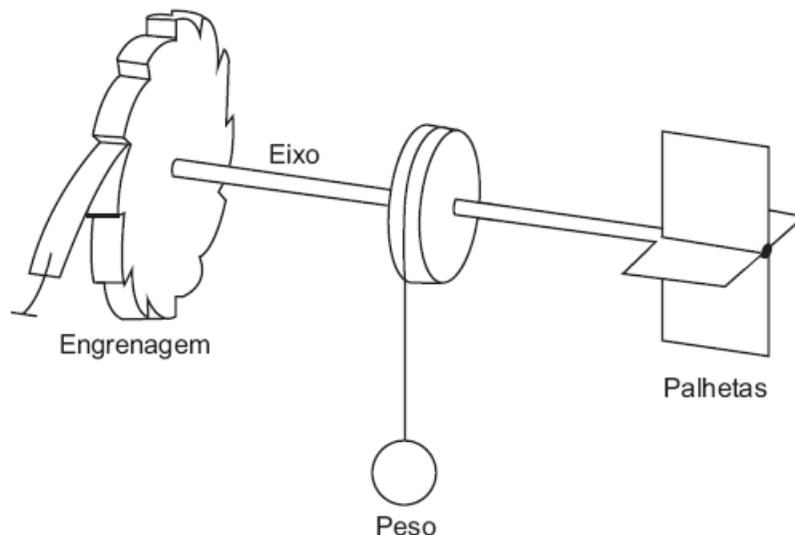
# As Leis da Termodinâmica no Ensino Médio

- Equilíbrio – Lei Zero – Termômetros
- Calor: transferência de energia por diferença de temperatura
- Trabalho – 1ª Lei
- Máquinas térmicas – Eficiência
- 2ª Lei: formulações de Kelvin e Clausius
- Noções confusas ou erradas sobre reversibilidade e entropia

# A 2ª Lei da Termodinâmica no ENEM 2011

## QUESTÃO 46

Partículas suspensas em um fluido apresentam contínua movimentação aleatória, chamado movimento browniano, causado pelos choques das partículas que compõem o fluido. A ideia de um inventor era construir uma série de palhetas, montadas sobre um eixo, que seriam postas em movimento pela agitação das partículas ao seu redor. Como o movimento ocorreria igualmente em ambos os sentidos de rotação, o cientista concebeu um segundo elemento, um dente de engrenagem assimétrico. Assim, em escala muito pequena, este tipo de motor poderia executar trabalho, por exemplo, puxando um pequeno peso para cima. O esquema, que já foi testado, é mostrado a seguir.



Inovação Tecnológica. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br>. Acesso em: 22 jul. 2010 (adaptado).

A explicação para a necessidade do uso da engrenagem com trava é:

- A O travamento do motor, para que ele não se solte aleatoriamente.
- B A seleção da velocidade, controlada pela pressão nos dentes da engrenagem.
- C O controle do sentido da velocidade tangencial, permitindo, inclusive, uma fácil leitura do seu valor.
- D A determinação do movimento, devido ao caráter aleatório, cuja tendência é o equilíbrio.
- E A escolha do ângulo a ser girado, sendo possível, inclusive, medi-lo pelo número de dentes da engrenagem.

Encontrar uma resposta correta à essa questão é tão difícil quanto transformar calor em trabalho.

ver *P. Eshuis et al., Phys. Rev. Lett.*  
104, 248001 (2010)

É possível apresentar o conceito de entropia a alunos do ensino médio, de forma inteligível?

Um caminho: abordagem estatística

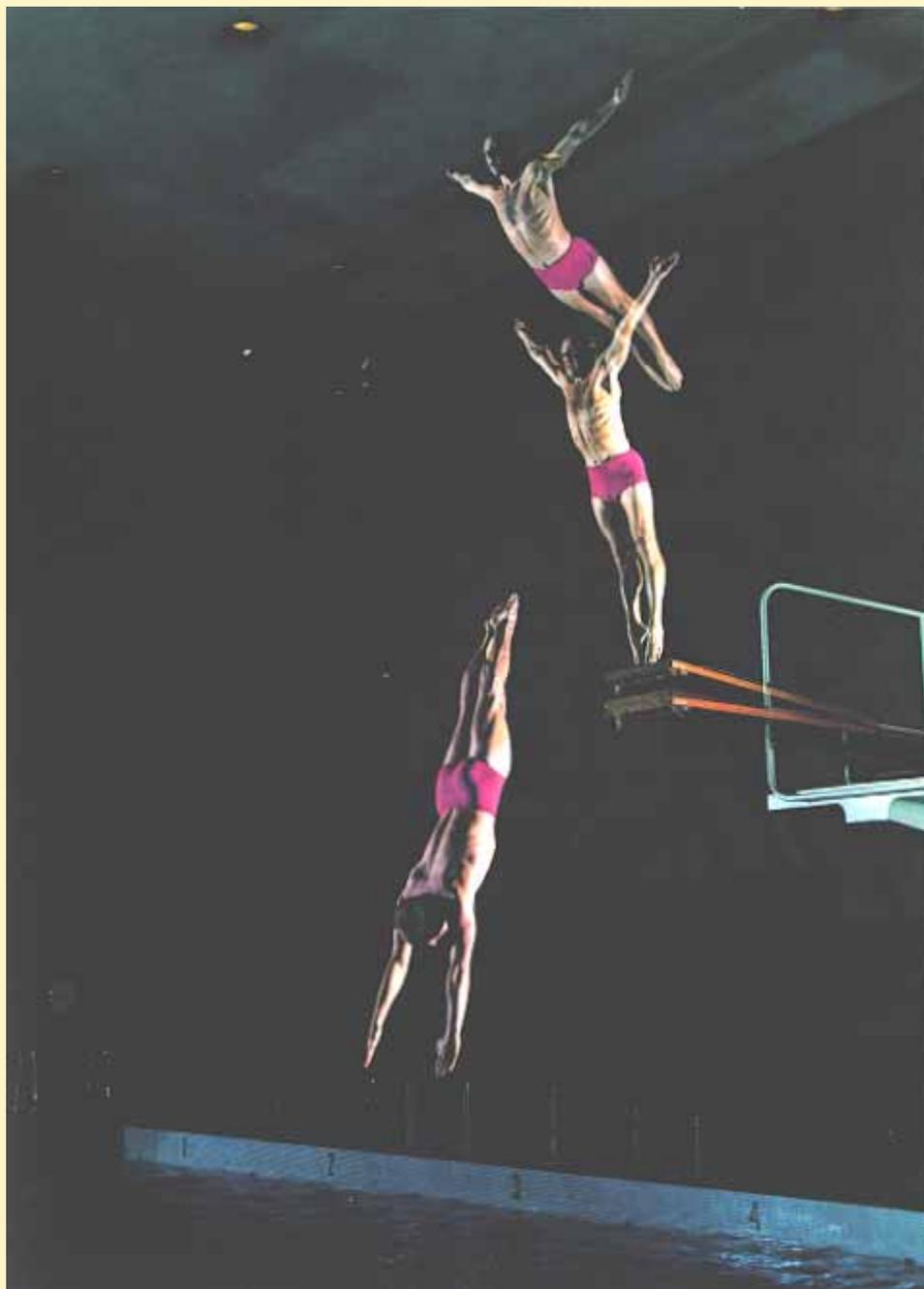
- A seta do tempo
- Macroestados e microestados – Multiplicidade
- Entropia
- 2ª Lei:  $\Delta S \geq 0$
- Temperatura absoluta
- Aplicações
  - Máquinas térmicas, eficiência
  - Distribuição de Boltzmann

# A Seta do Tempo



**O tempo acaba o ano, o mês e a hora,  
a força, a arte, a manha, a fortaleza;  
o tempo acaba a fama e a riqueza,  
o tempo o mesmo tempo de si chora.**

*Luís de Camões*



**Questão:**

**Quais são as leis fundamentais (microscópicas) da física que determinam um sentido para a passagem do tempo?**

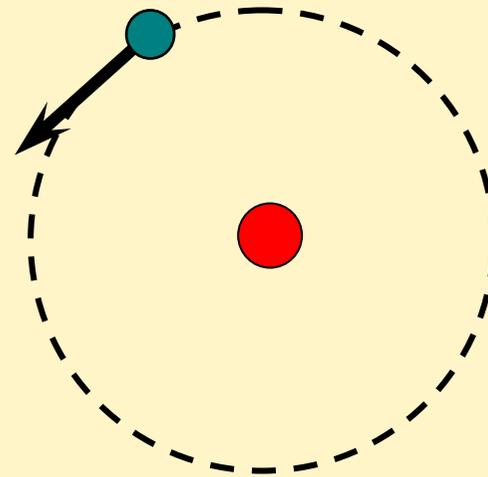
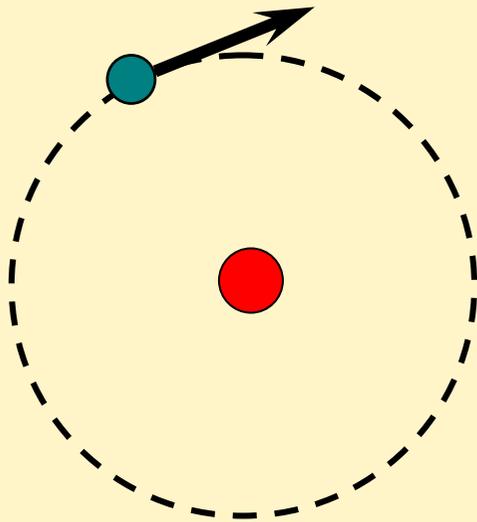
**Resposta:**

**Nenhuma. As leis conhecidas tratam igualmente passado e futuro.**

*Na verdade há uma exceção: a interação fraca viola a simetria de inversão temporal.*

# As leis físicas são reversíveis...

por exemplo: 
$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{G M m}}{r^2} = m \mathbf{a}$$



**As leis fundamentais da física  
não distinguem passado de futuro!**

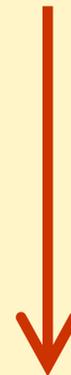
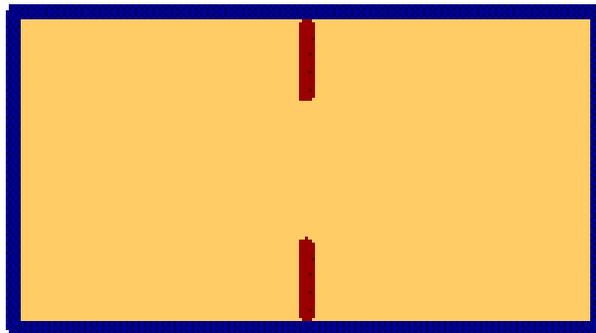
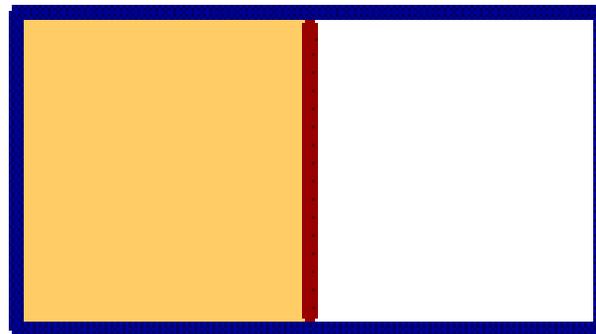
***mas...***

**Os fenômenos à nossa volta  
são irreversíveis.**

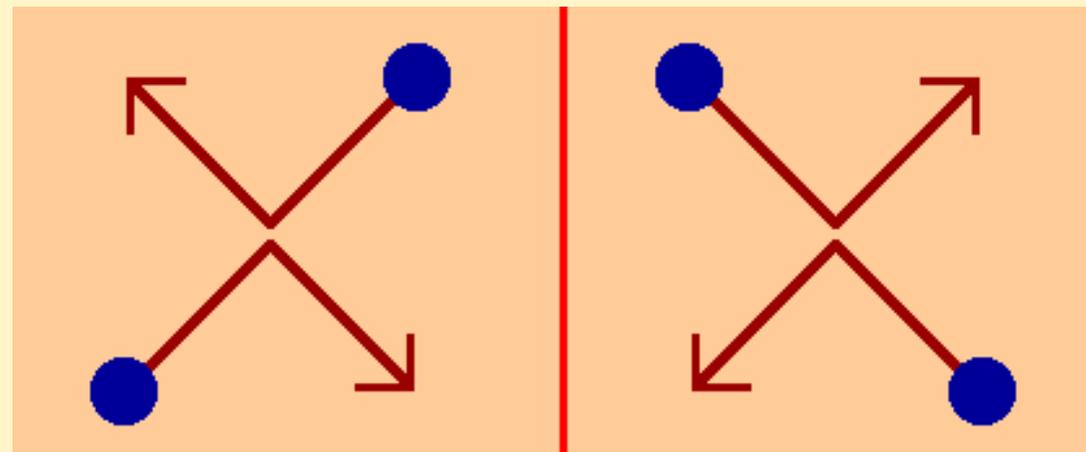
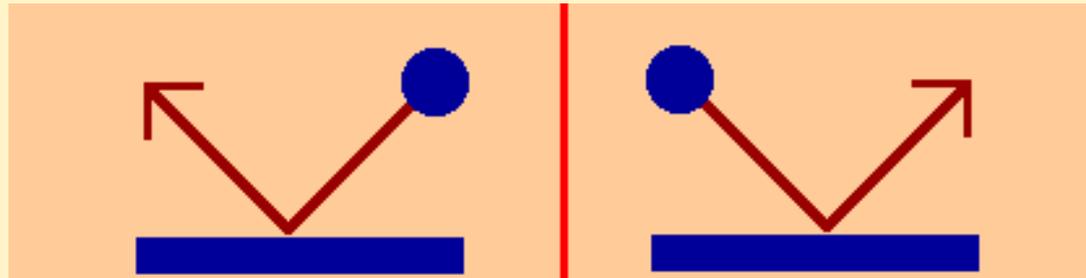


**Ludwig Boltzmann**

# Irreversible



# Reversível



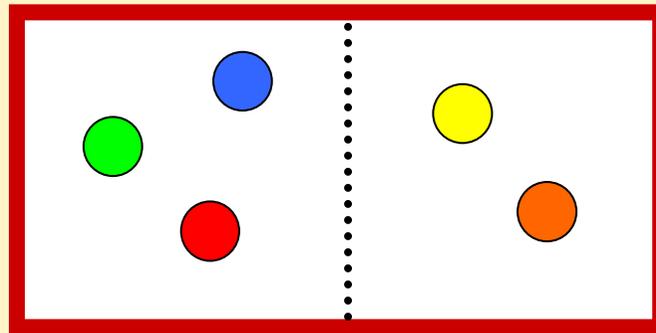
# Simulação de uma expansão livre

**Executar o programa**

**A seta do tempo aparece  
quando o número de  
partículas é grande!**

**Por que?**

# Estados Microscópicos e Macroscópicos



## Microestado

**Esquerda:** verde, azul,  
vermelha

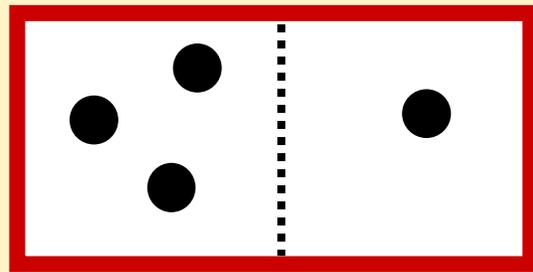
**Direita:** amarela, laranja

## Macroestado

**Esquerda:** 3 bolas

**Direita:** 2 bolas

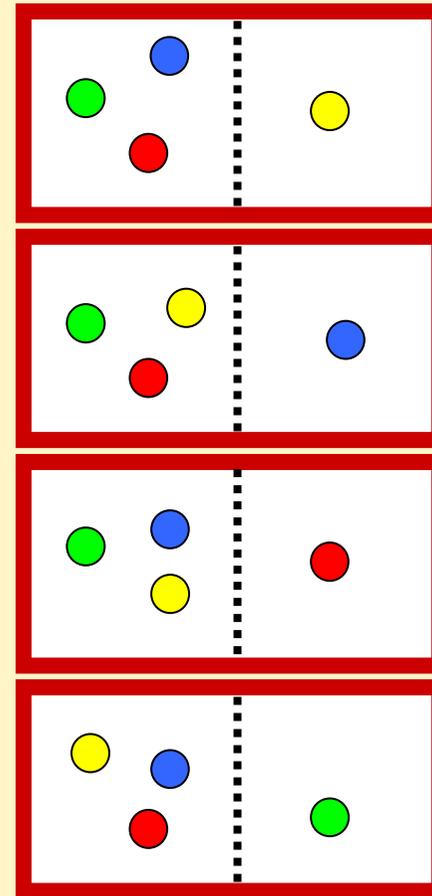
# vários microestados diferentes podem corresponder ao mesmo macroestado



**1 macroestado**

esquerda = 3

direita = 1



**4 microestados**

# Multiplicidade

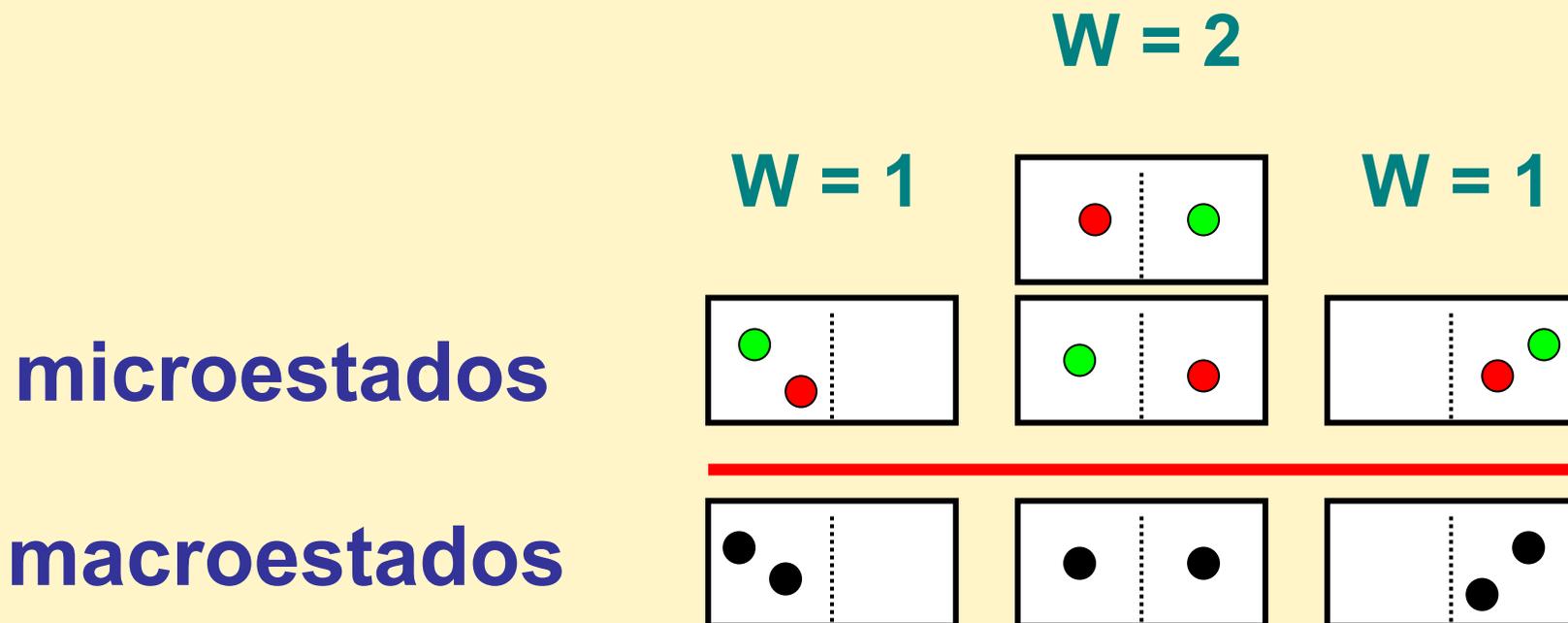
**multiplicidade de um macroestado**



**número de microestados que  
correspondem a este macroestado**

# diferentes macroestados podem ter diferentes multiplicidades

$W =$  multiplicidade



# 4 partículas

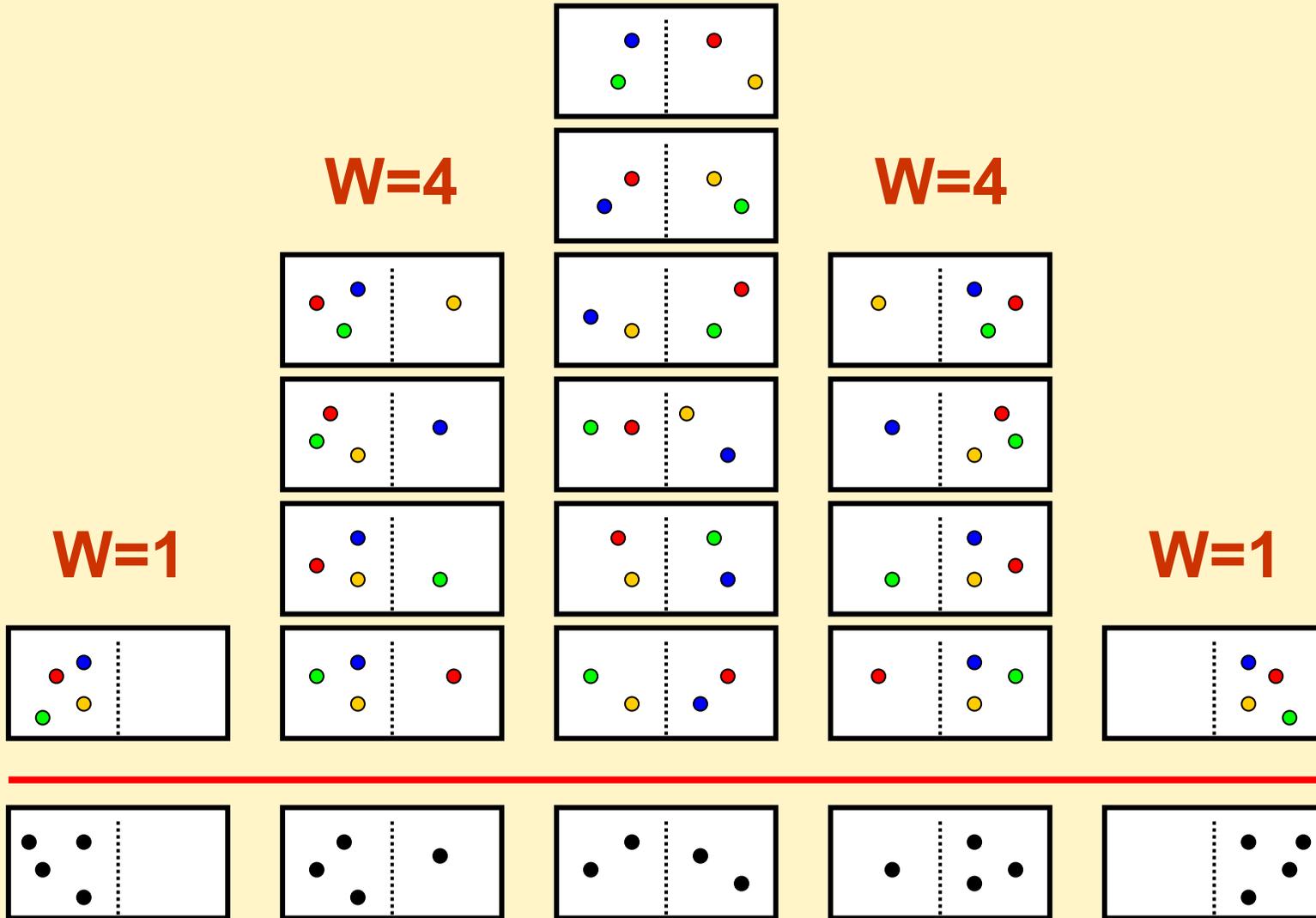
$W=6$

$W=4$

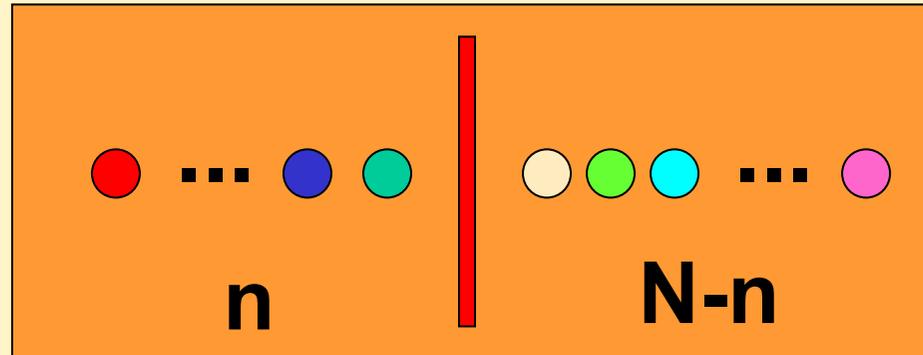
$W=4$

$W=1$

$W=1$



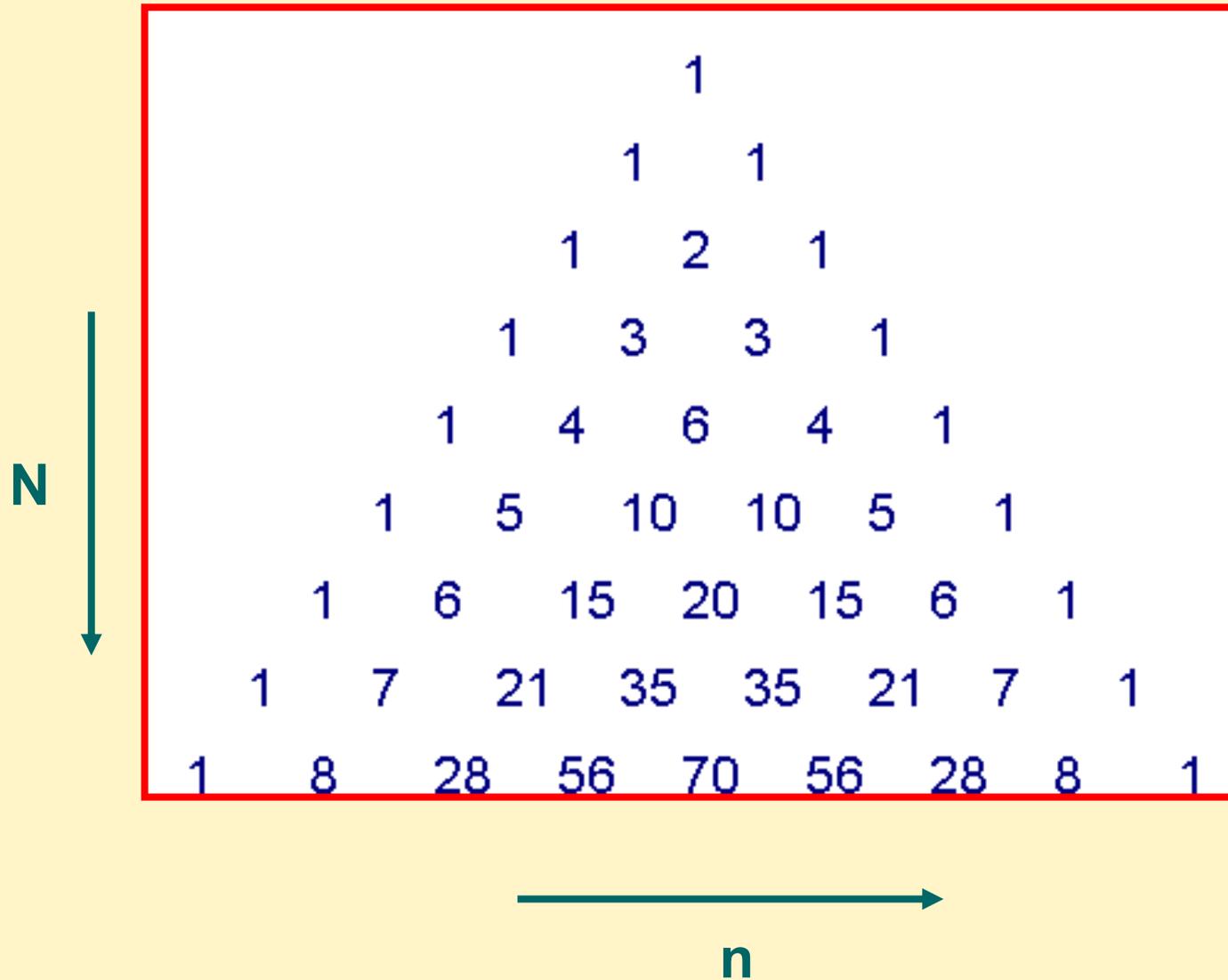
# Cálculo da Multiplicidade



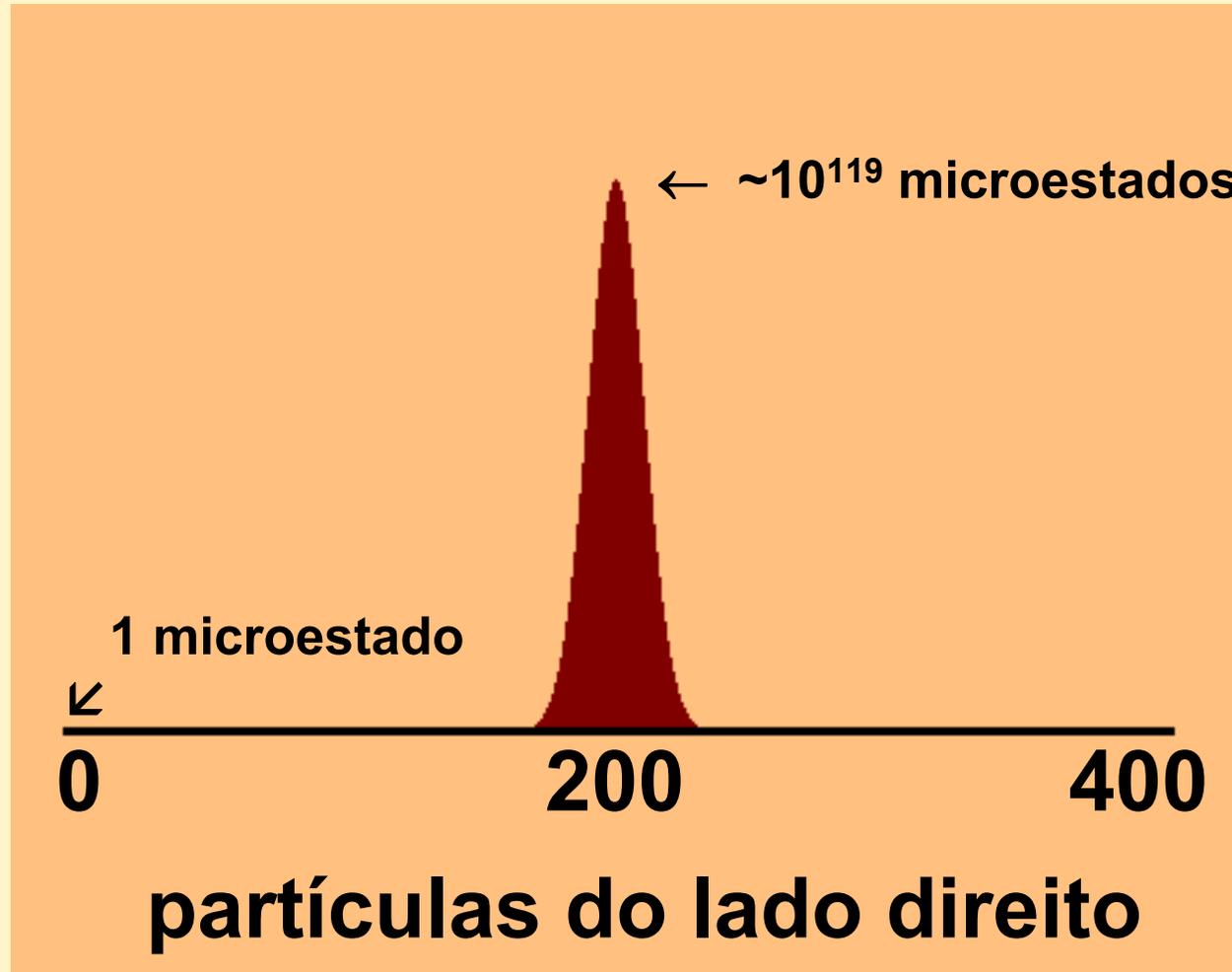
$W(N,n)$  = multiplicidade do macroestado com n partículas num lado e N-n no outro.

$$W(N,n) = \frac{N!}{n! (N-n)!}$$

# $W(N,n) \Leftrightarrow$ Triângulo de Pascal



# 400 partículas





**Para N grande a diferença de multiplicidade entre macroestados distintos pode ser enorme!**

**Sistemas macroscópicos têm  $N \sim 10^{23}$**

# A Origem da Irreversibilidade

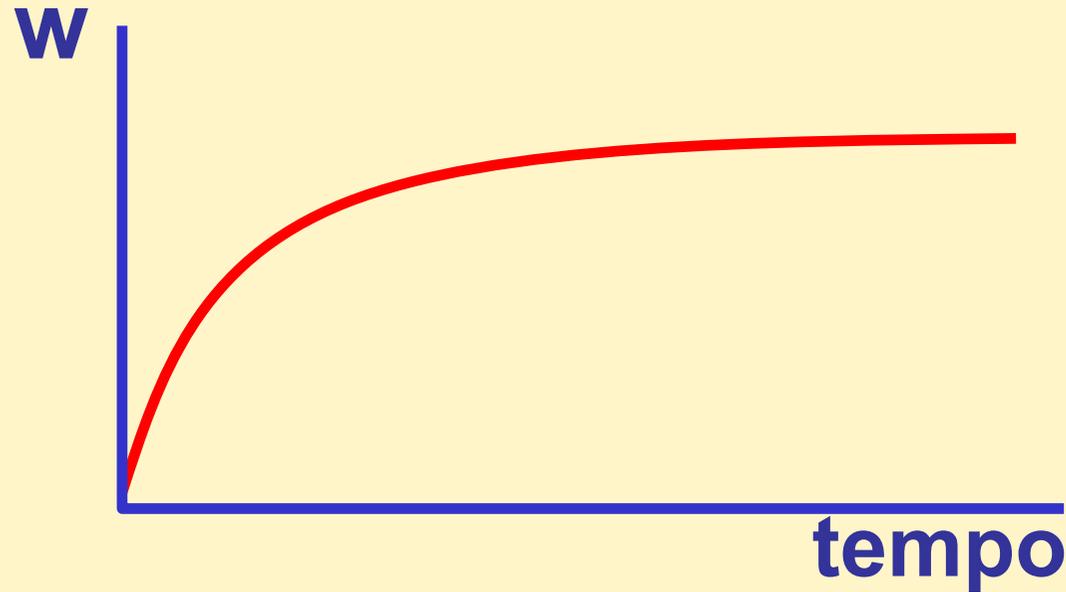
**Muitíssimo provável:**

**baixa multiplicidade → alta multiplicidade**

**Pouquíssimo provável:**

**alta multiplicidade → baixa multiplicidade**

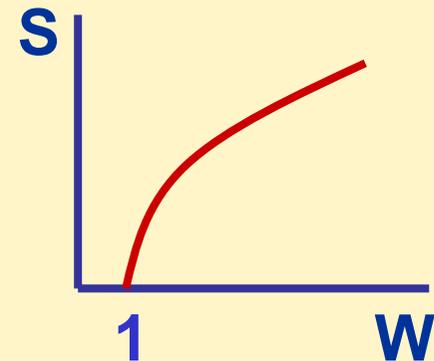
# Multiplicidade $\times$ Tempo



**Um sistema de muitas partículas (quase) nunca passa espontaneamente de um estado de alta multiplicidade para um de baixa multiplicidade.**

# Entropia

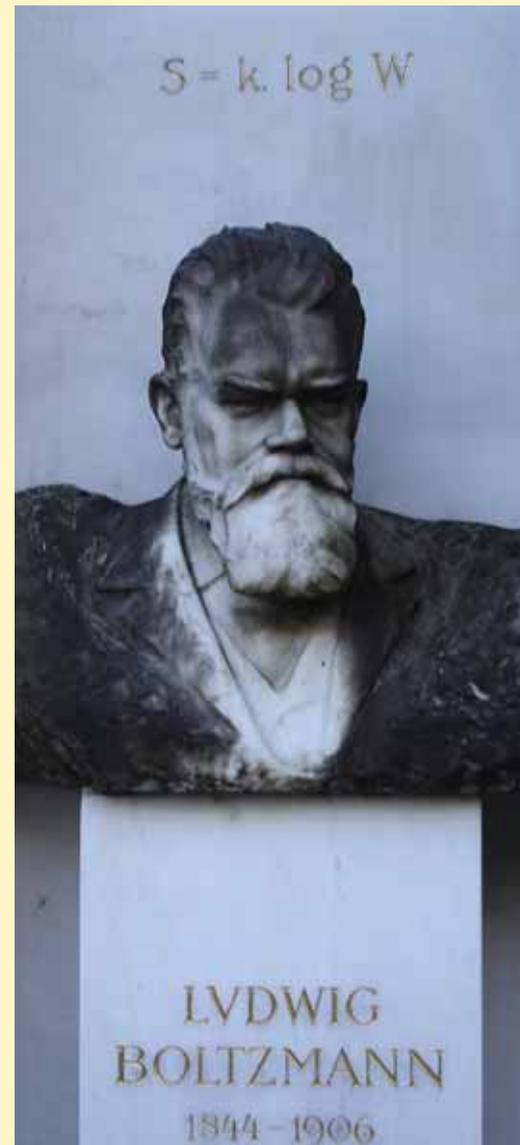
$$S = k \log W$$



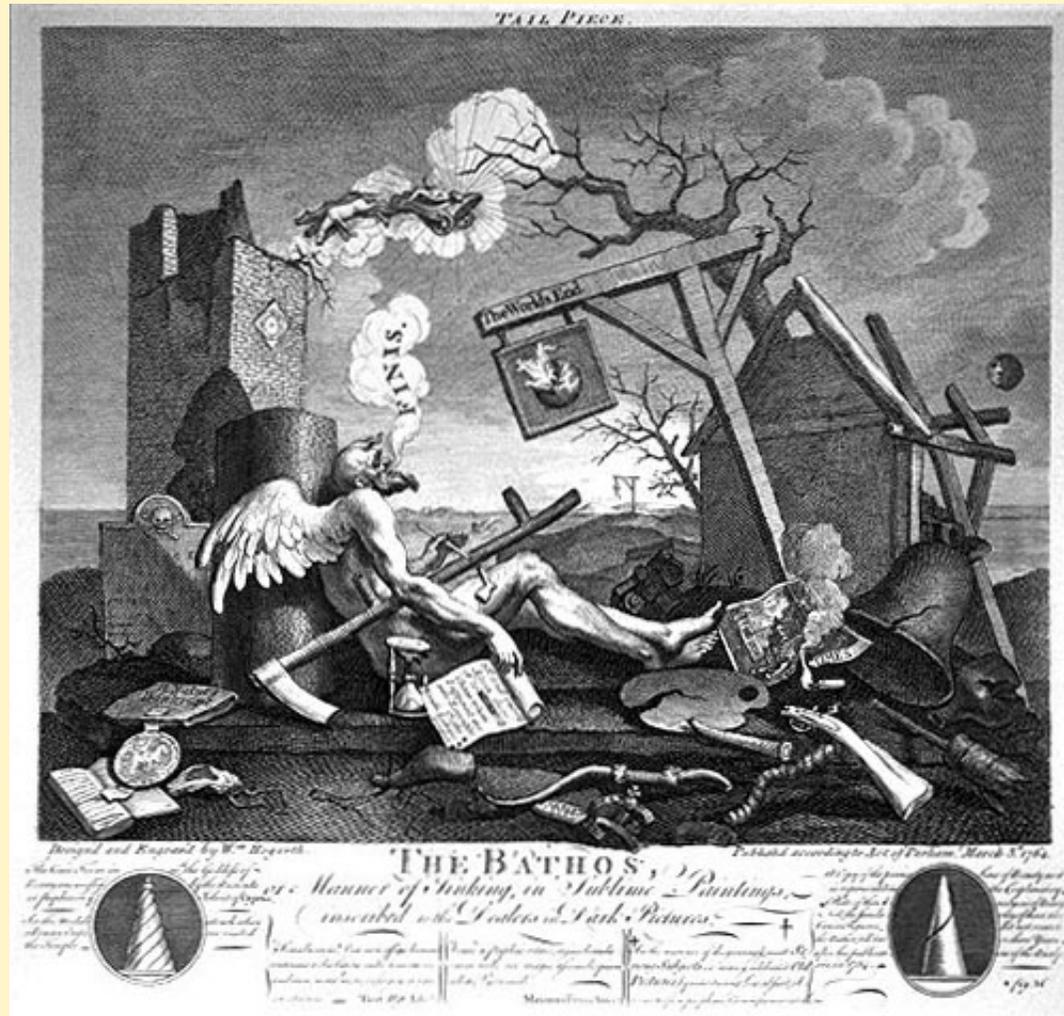
Segunda Lei da Termodinâmica:

**A entropia de um sistema isolado nunca diminui.**

# O Epitáfio de Boltzmann

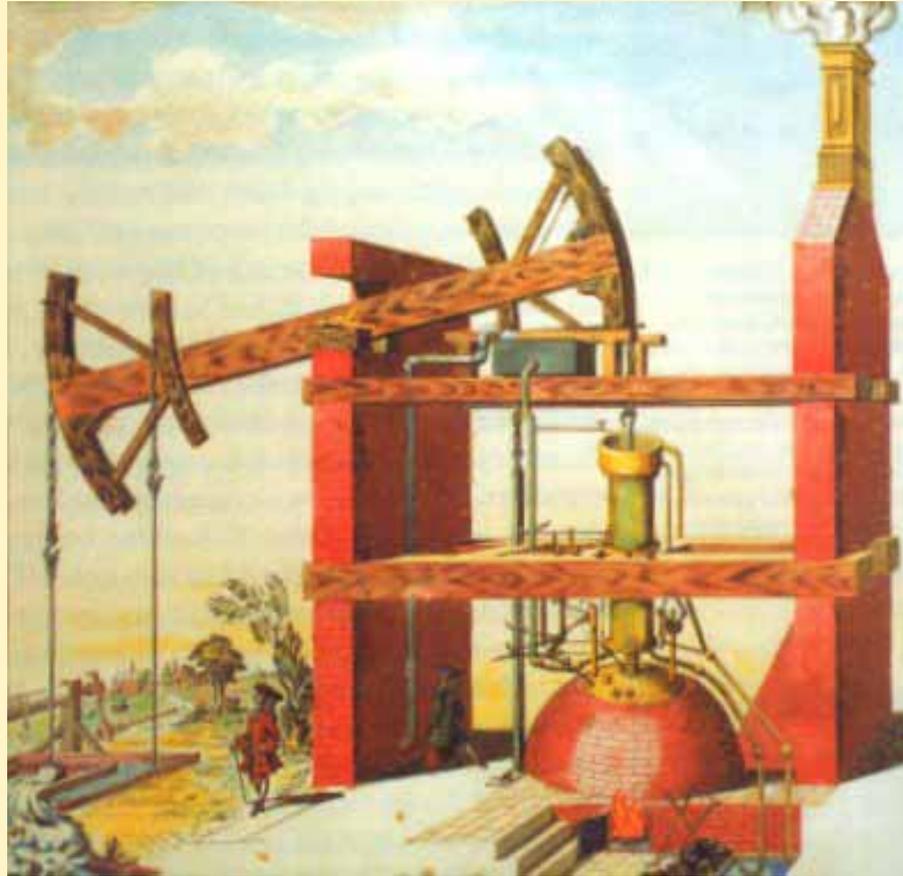


# A Morte Térmica do Universo

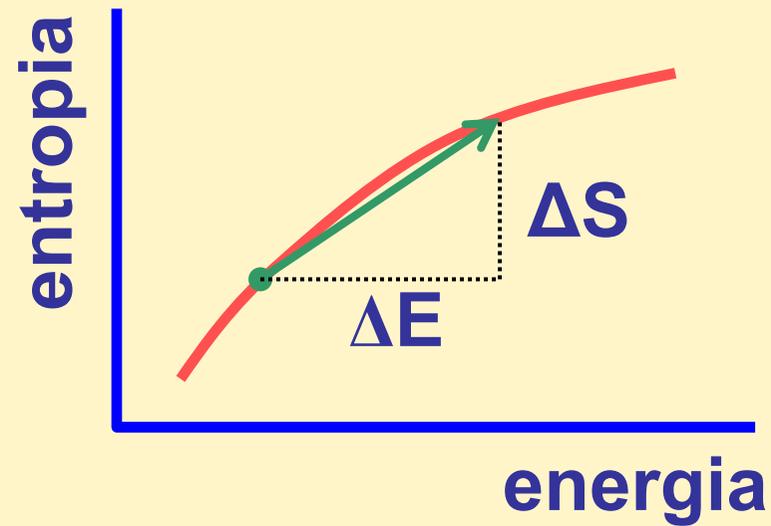


**William Hogarth  
(1697-1764)**

# Entropia e Energia



# Temperatura



$$\begin{aligned} E &\rightarrow E + \Delta E \\ S &\rightarrow S + \Delta S \end{aligned}$$



Temperatura:

$$T = \frac{\Delta E}{\Delta S}$$

**Mais exactement:**

$$S = S(E, V, N, \dots)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial S}{\partial E}$$

# O que é temperatura?

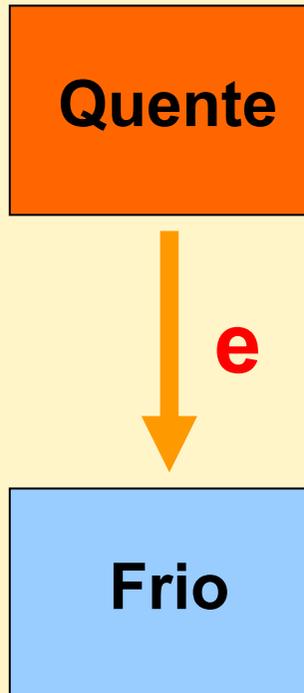
$$\boxed{T = \frac{\Delta E}{\Delta S}} \Rightarrow \boxed{\Delta S = \frac{\Delta E}{T}} \quad V, N, \dots \text{fixos}$$

Para a mesma mudança na energia:

**Temperatura alta  $\Rightarrow$  pequena variação da entropia**

**Temperatura baixa  $\Rightarrow$  grande variação da entropia**

# Troca de Calor

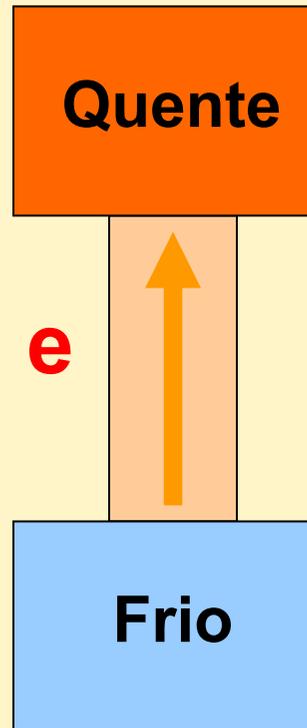


A entropia do corpo quente  
diminui pouco.

A entropia do corpo frio  
aumenta muito.

**A entropia total aumenta quando calor  
flui de um corpo quente para um frio.**

# A Geladeira Milagrosa



**A entropia total vai diminuir!  
A geladeira milagrosa  
não pode ser construída.**

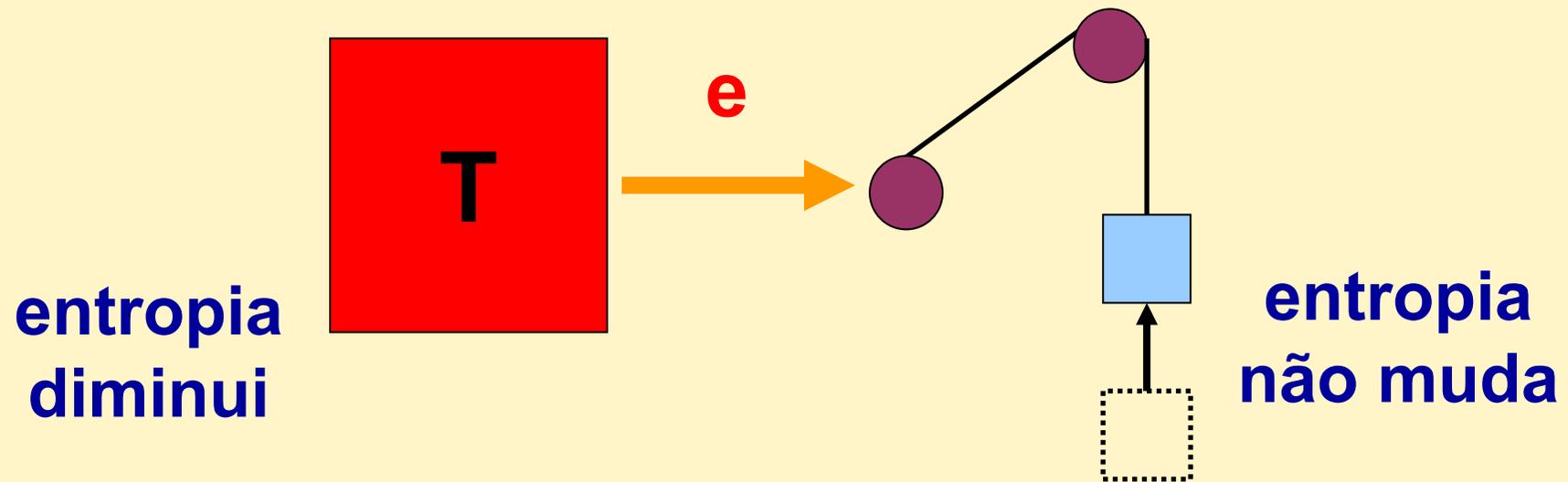
# A 2ª Lei da Termodinâmica (Clausius)

É impossível realizar um processo cujo único efeito seja transferir calor de um corpo frio para um corpo mais quente.



**R. Clausius  
(1822-1888)**

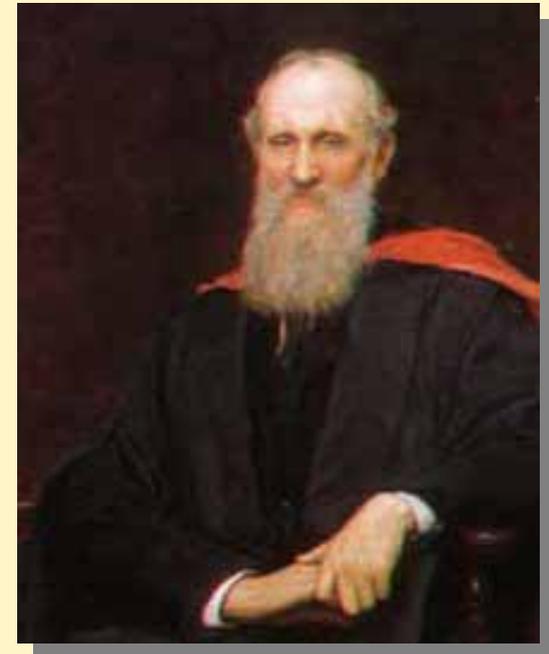
# O Motor Milagroso



**A entropia total vai diminuir!  
O motor milagroso não pode ser construído.**

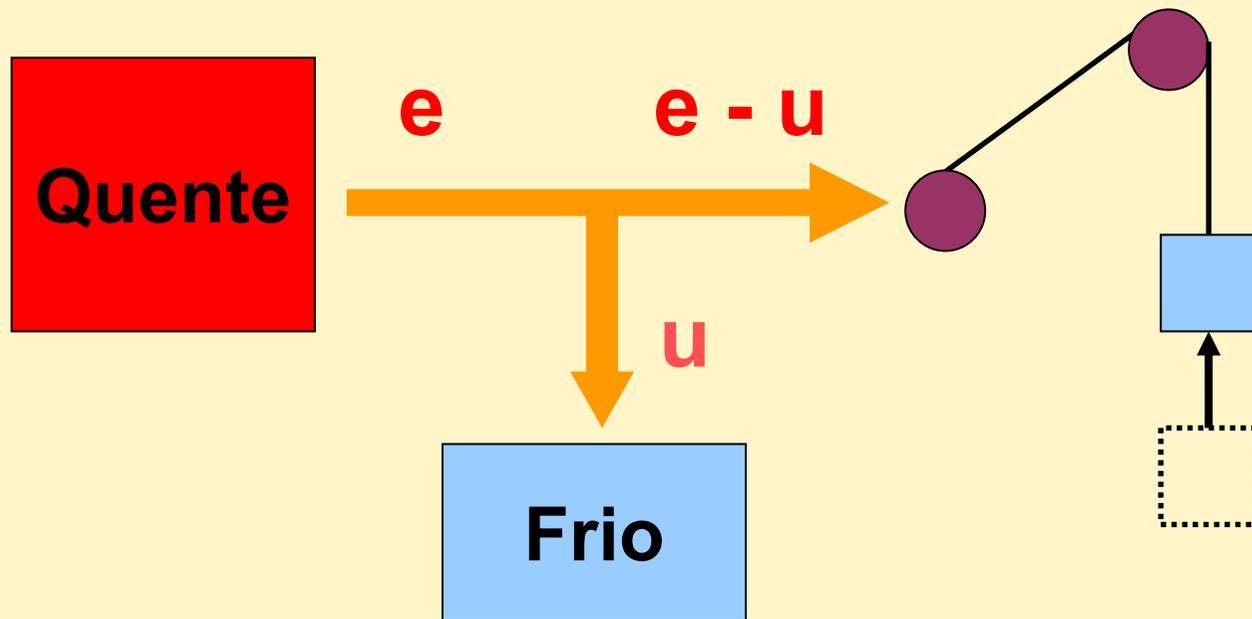
# **A 2<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica (Kelvin)**

**É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um corpo e produzir uma quantidade equivalente de energia mecânica.**



**W. Thomson  
Lord Kelvin  
(1824-1907)**

# O Motor Possível



$$\frac{u}{T_{\text{Frio}}} \geq \frac{e}{T_{\text{Quente}}}$$



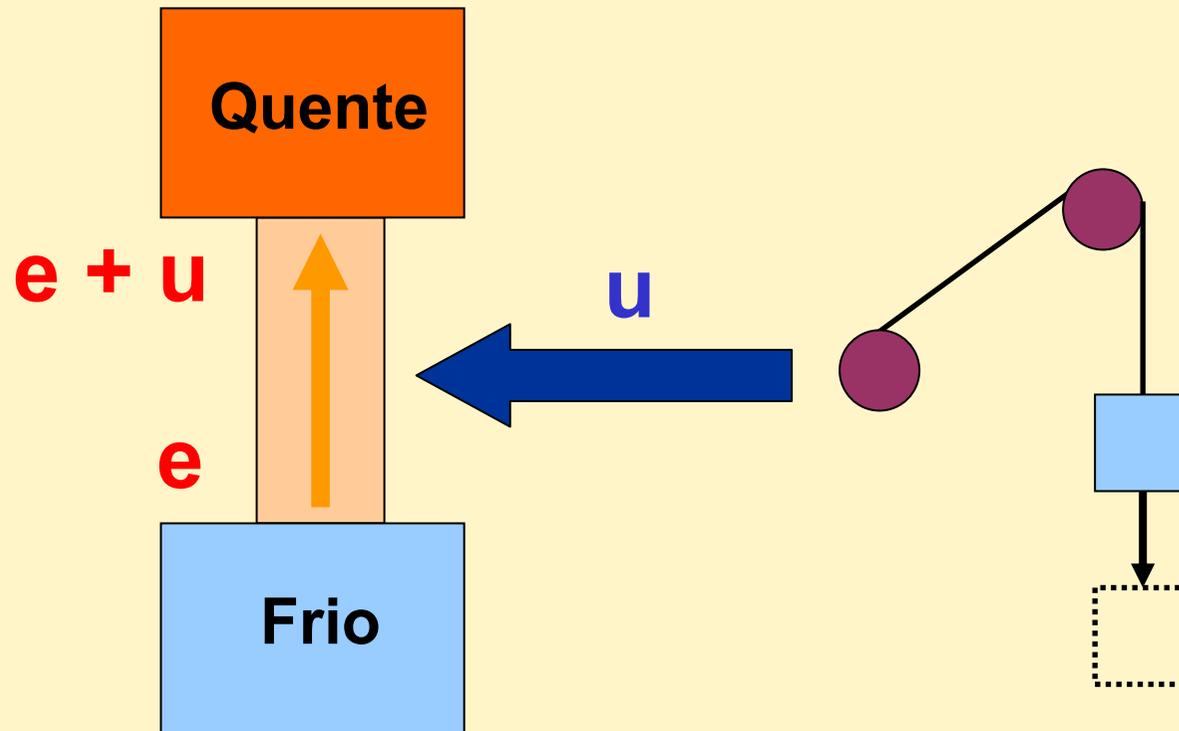
$$\frac{u}{e} \geq \frac{T_{\text{Frio}}}{T_{\text{Quente}}}$$

# Eficiência do Motor

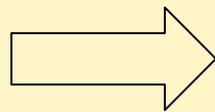
$$\eta = \frac{\text{energia usada}}{\text{energia "paga"}} = \frac{e - u}{e} = 1 - \frac{u}{e}$$

$$\eta \leq 1 - \frac{T_{\text{Frio}}}{T_{\text{Quente}}}$$

# A Geladeira Possível



$$\frac{e + u}{T_{\text{Quente}}} \geq \frac{e}{T_{\text{Frio}}}$$



$$\frac{u}{e} \geq \frac{T_{\text{Quente}} - T_{\text{Frio}}}{T_{\text{Frio}}}$$

# A Máquina de Carnot



**Sadi Carnot**  
(1796-1832)

"Desperdício"  
mínimo  
no motor:

$$\frac{u}{e} = \frac{T_{\text{Frio}}}{T_{\text{Quente}}}$$

"Desperdício"  
mínimo  
na geladeira:

$$\frac{u}{e} = \frac{T_{\text{Quente}} - T_{\text{Frio}}}{T_{\text{Frio}}}$$



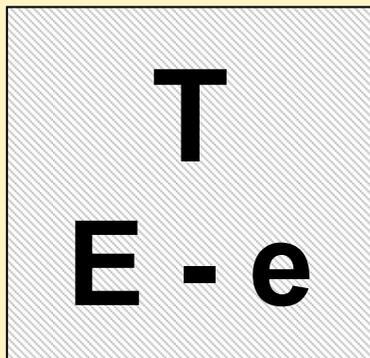
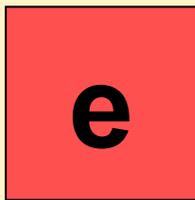
**entropia não muda**



**máquina reversível**

# A Distribuição de Boltzmann

"sistema"



"reservatório  
térmico"

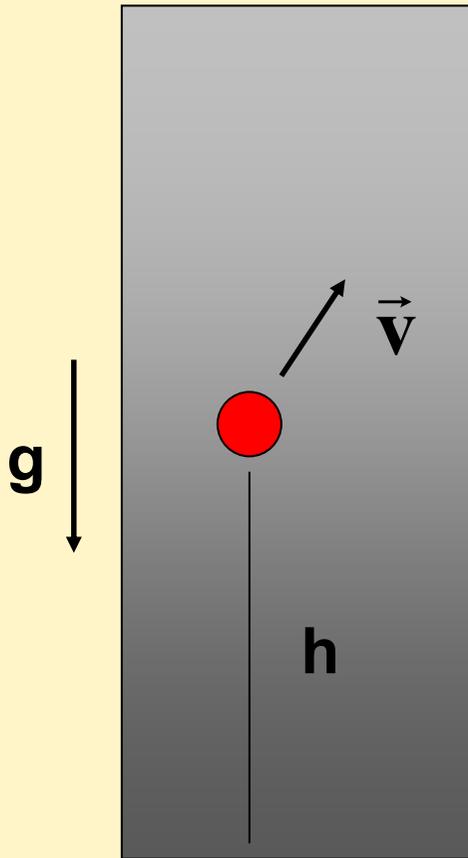
$$P(e) \propto W(E - e)$$

$$\propto \exp[S(E - e)/k]$$

$$\propto \exp[(S(E) - e/T)/k]$$

$$P(e) \propto \exp(-e/kT)$$

# Distribuição da Energia das Moléculas em um Gás

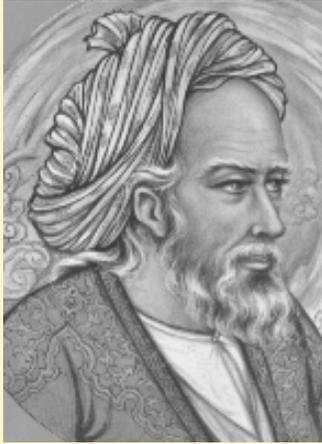


$$e = mv^2 / 2 + mgh$$

$$P(\vec{v}, h) = P(\vec{v}) \times P(h)$$

$$P(\vec{v}) \propto \exp\left(-\frac{m}{2kT} v^2\right)$$

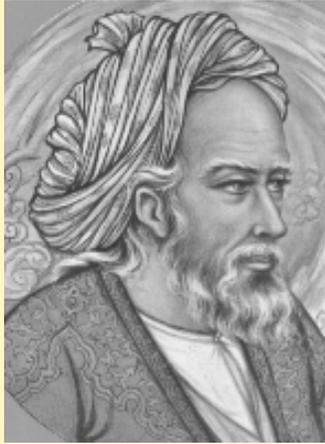
$$P(h) \propto \exp\left(-\frac{mg}{kT} h\right)$$



**Omar Khayyam**  
**(1044-1123)**

**The Moving Finger writes; and, having writ,  
Moves on: nor all thy Piety nor Wit  
Shall lure it back to cancel half a Line,  
Nor all thy Tears wash out a Word of it.**

**(trad. E. FitzGerald)**



## Omar Khayyam (1044-1123)

دیدم بسر عمارتی مردی فرد  
کو گل به لگد میزد و خوارش میکرد  
وان گل به زبان حال با او میگفت  
ساکن که چومن بسی لگد خواهی خورد