

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*

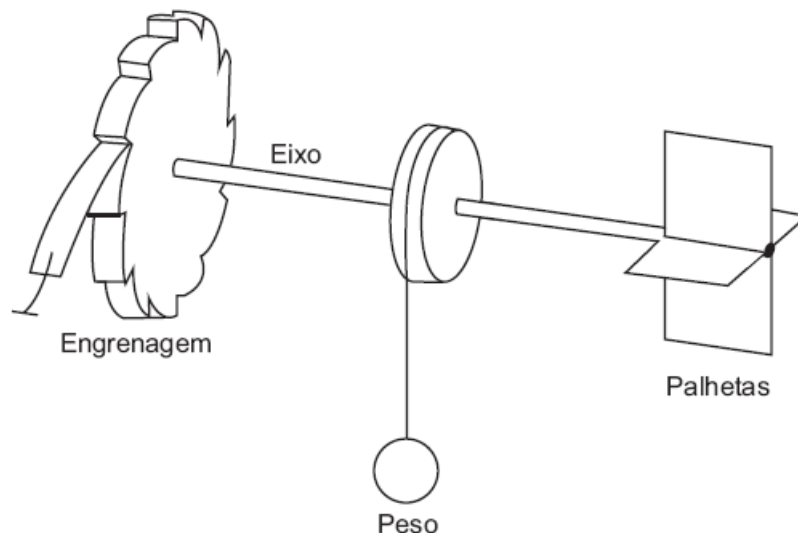
As Leis da Termodinâmica no Ensino Médio

- 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

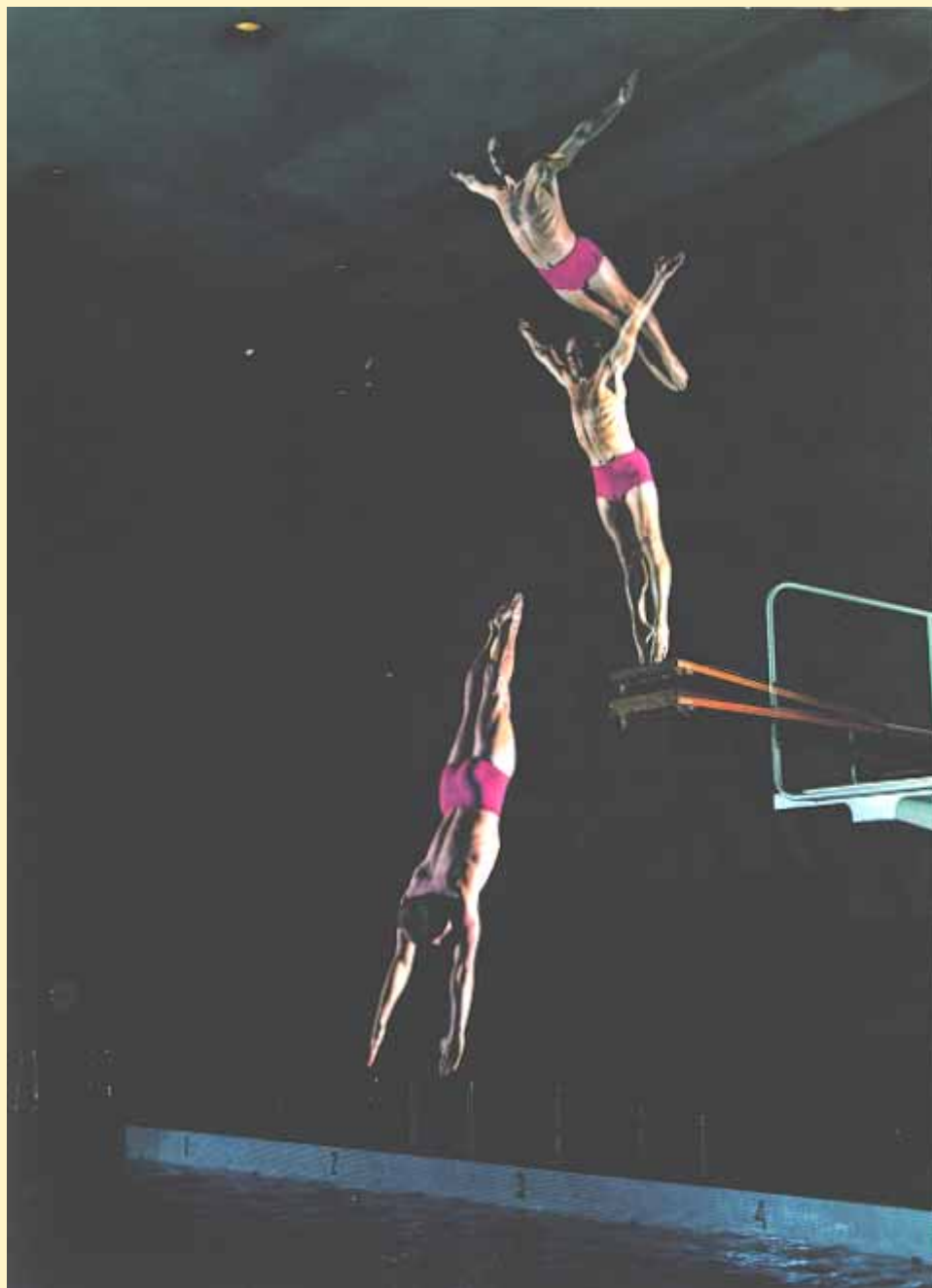
- A seta do tempo
- Macroestados e microestados – Multiplicidade
- Entropia
- 2ª Lei: $\Delta S \geq 0$
- Temperatura absoluta
- Aplicações
 - Máquinas térmicas, eficiência
 - Distribuição de Boltzmann

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?

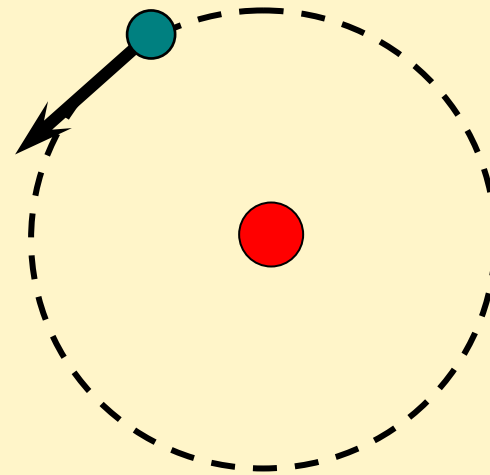
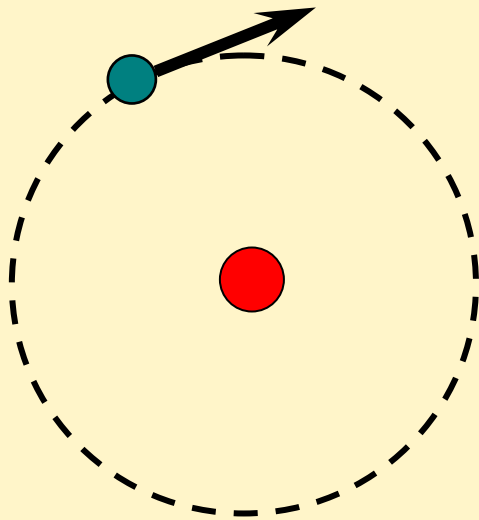
Resposta:

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!**

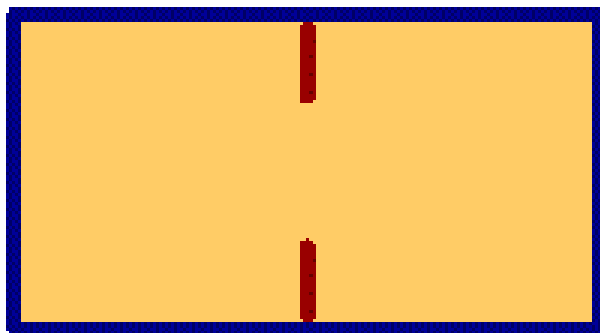
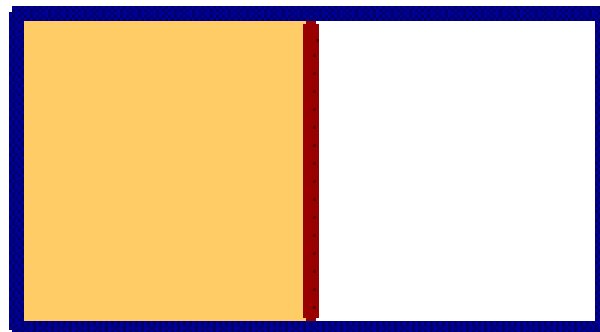
mas...

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

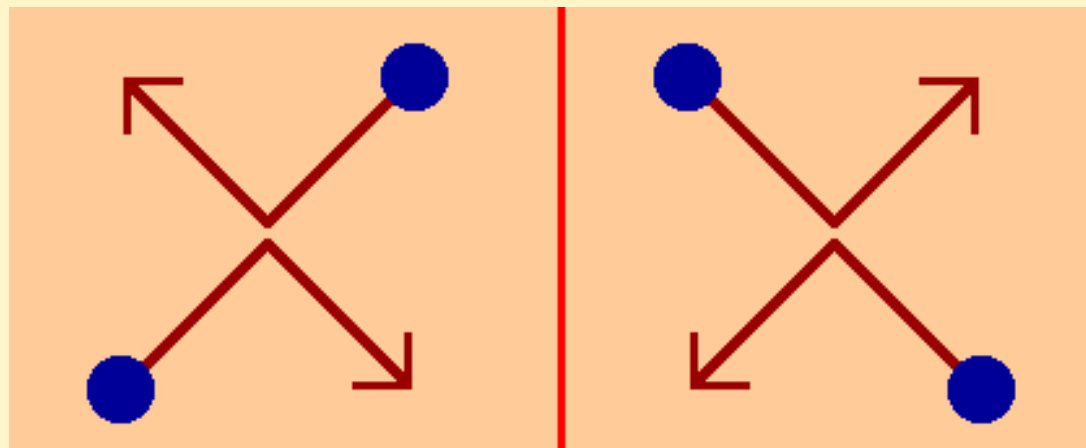
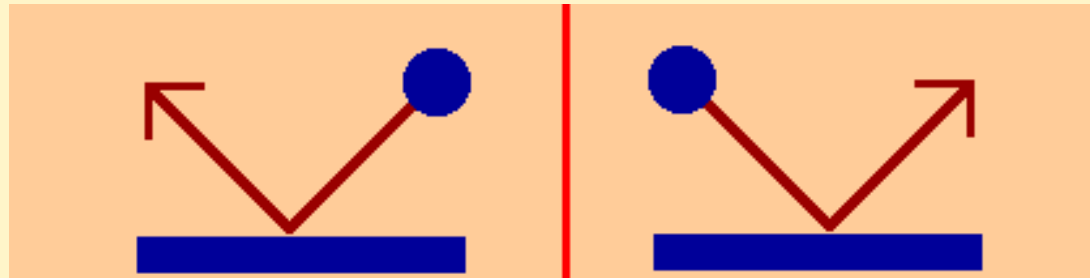


Ludwig Boltzmann

Irreversible



Reversível



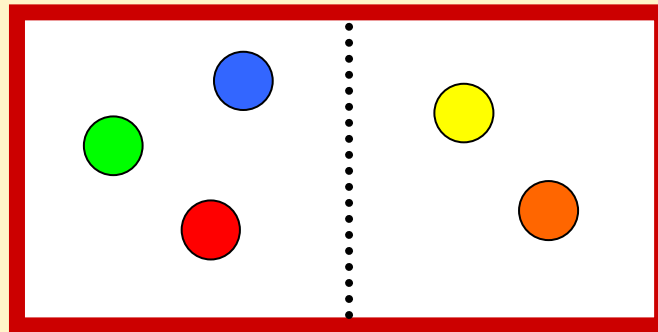
Simulação de uma expansão livre

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

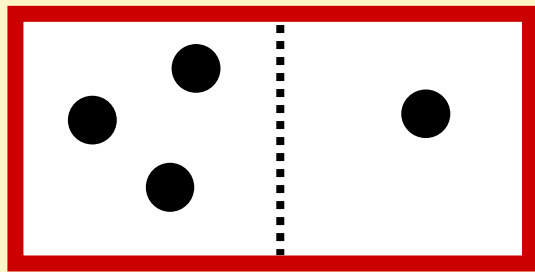
Direita: amarela, laranja

Macroestado

Esquerda: 3 bolas

Direita: 2 bolas

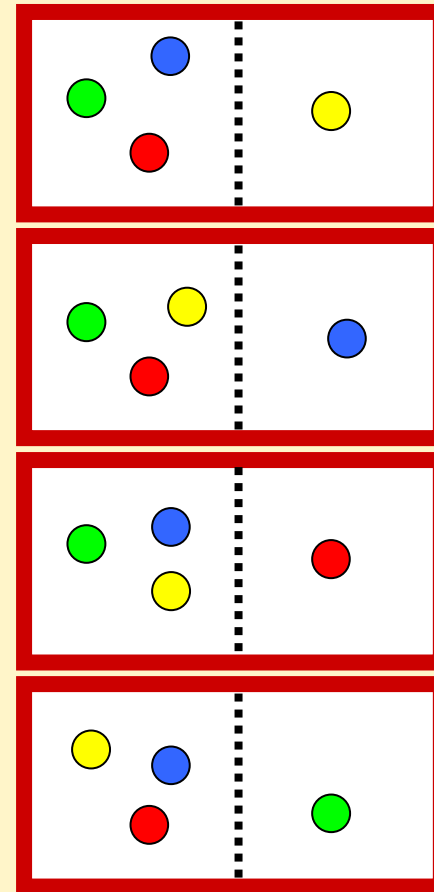
**vários microestados diferentes podem
corresponder ao mesmo macroestado**



1 macroestado

esquerda = 3

direita = 1



4 microestados

Multiplicidade

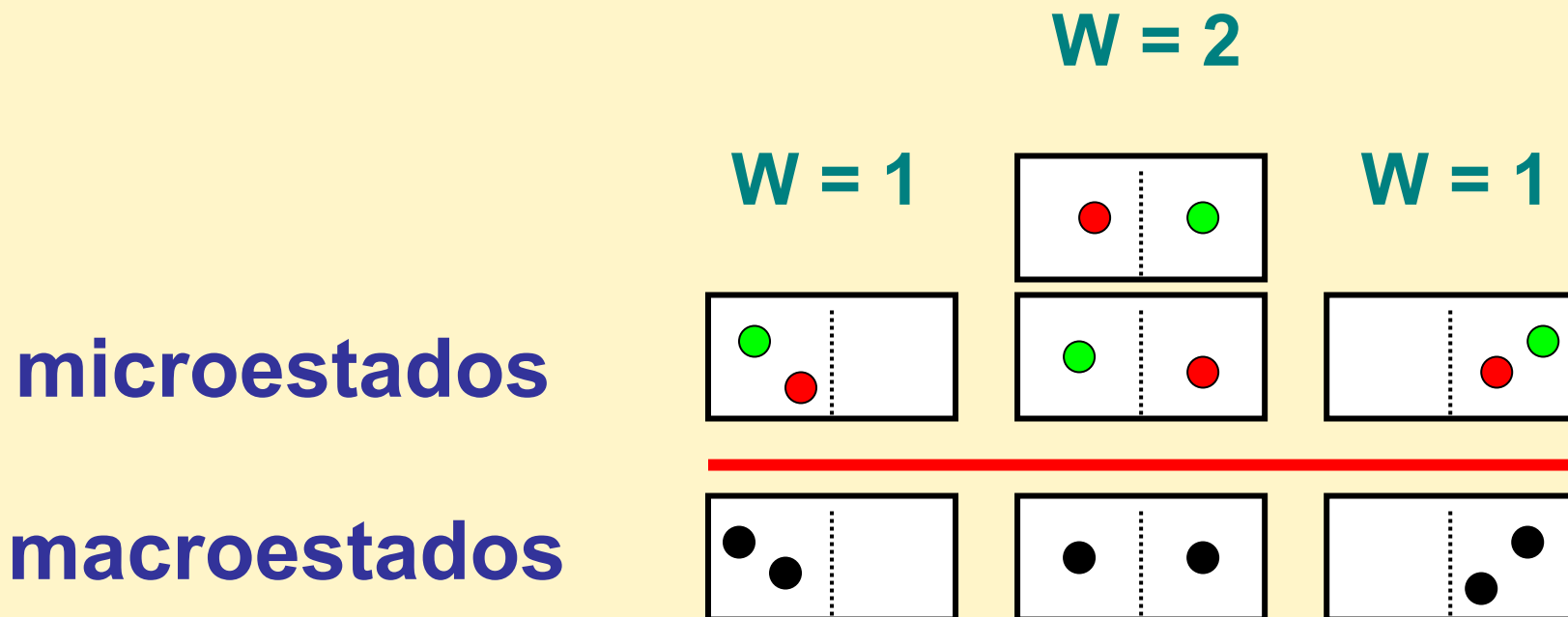
multiplicidade de um macroestado



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

diferentes macroestados podem ter diferentes multiplicidades

$W =$ multiplicidade



4 partículas

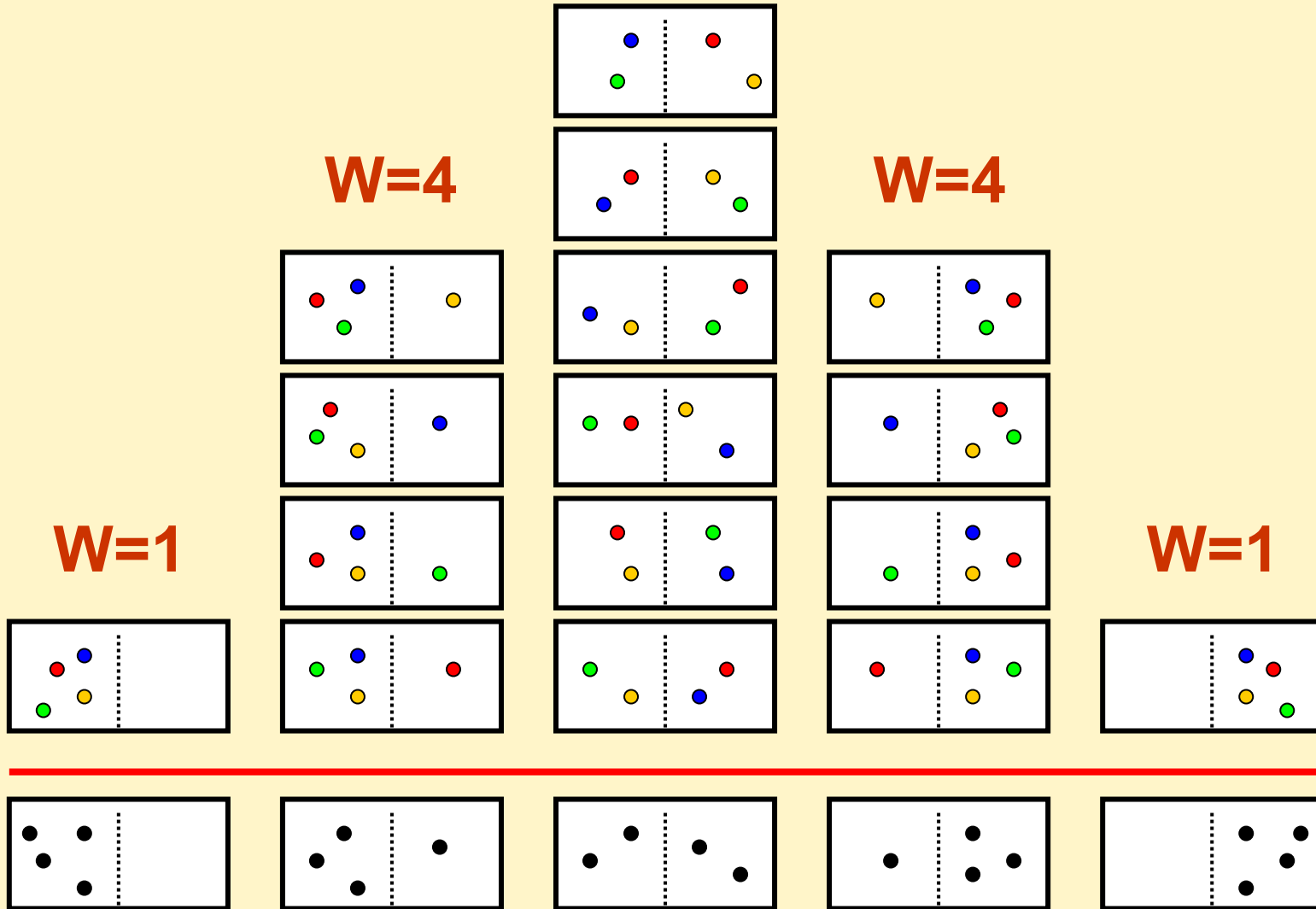
W=6

W=4

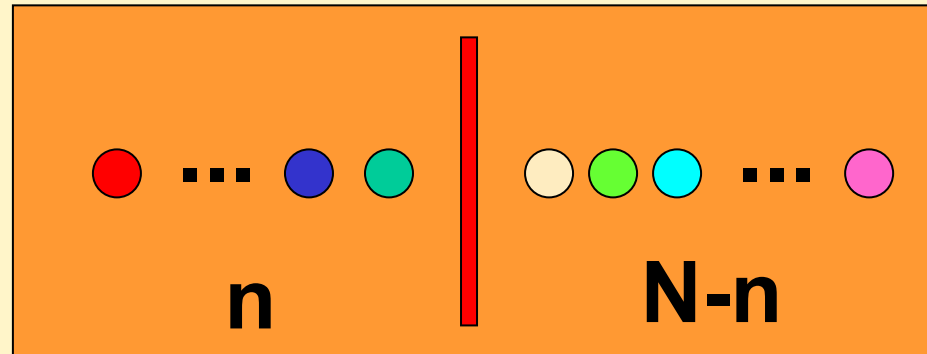
W=4

W=1

W=1



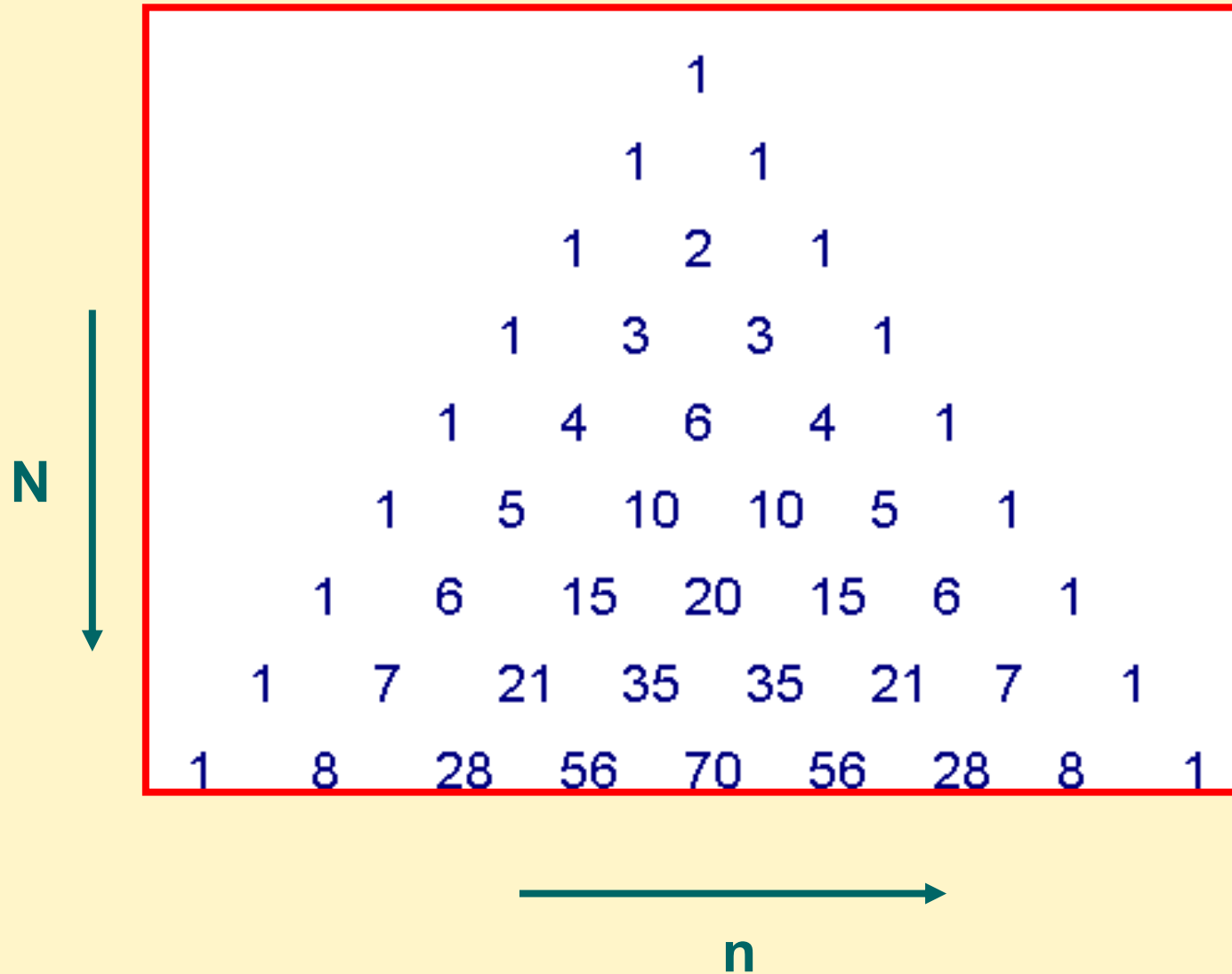
Cálculo da Multiplicidade



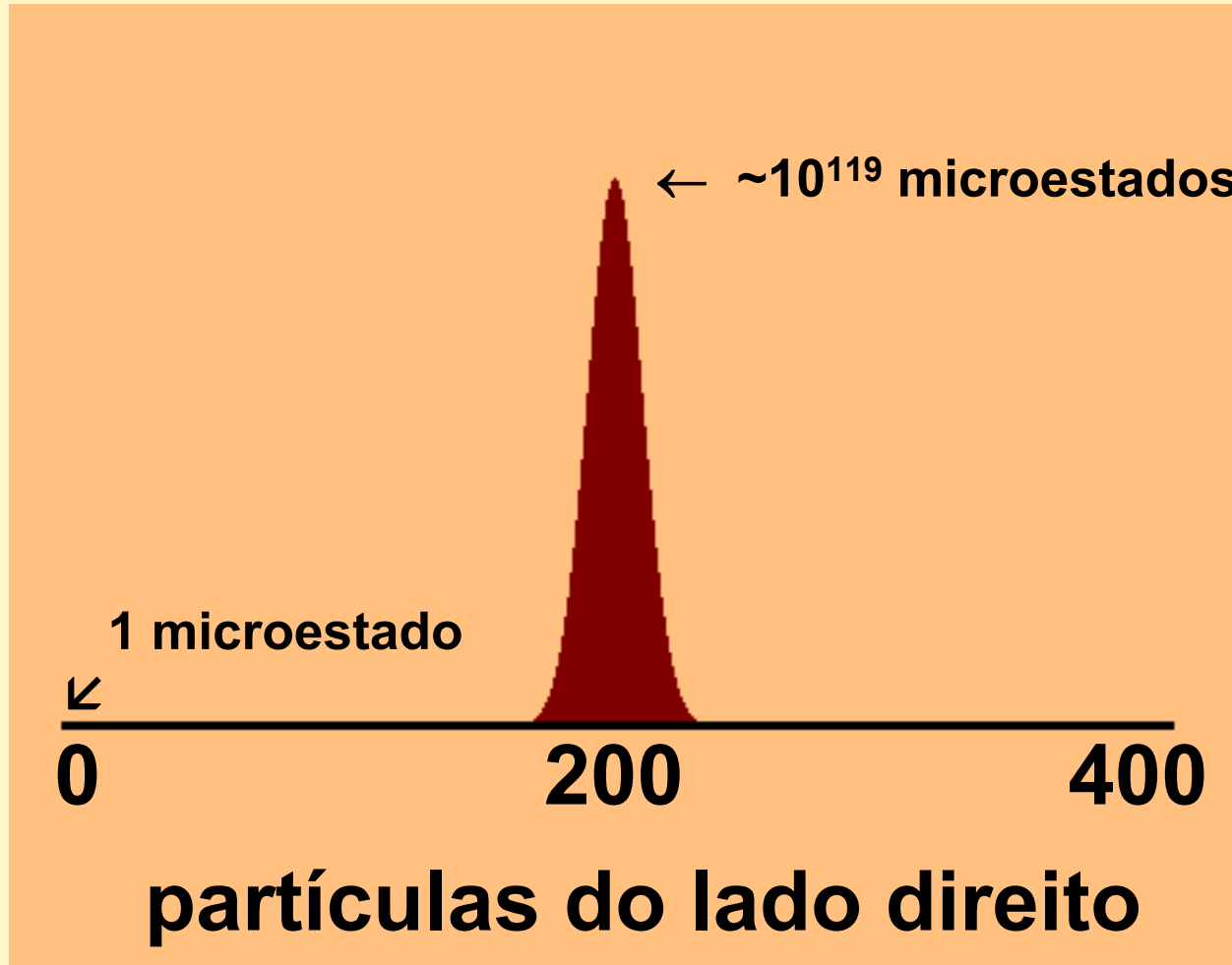
$W(N,n)$ = multiplicidade do macroestado com n partículas num lado e N-n no outro.

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

$W(N,n) \Leftrightarrow$ 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

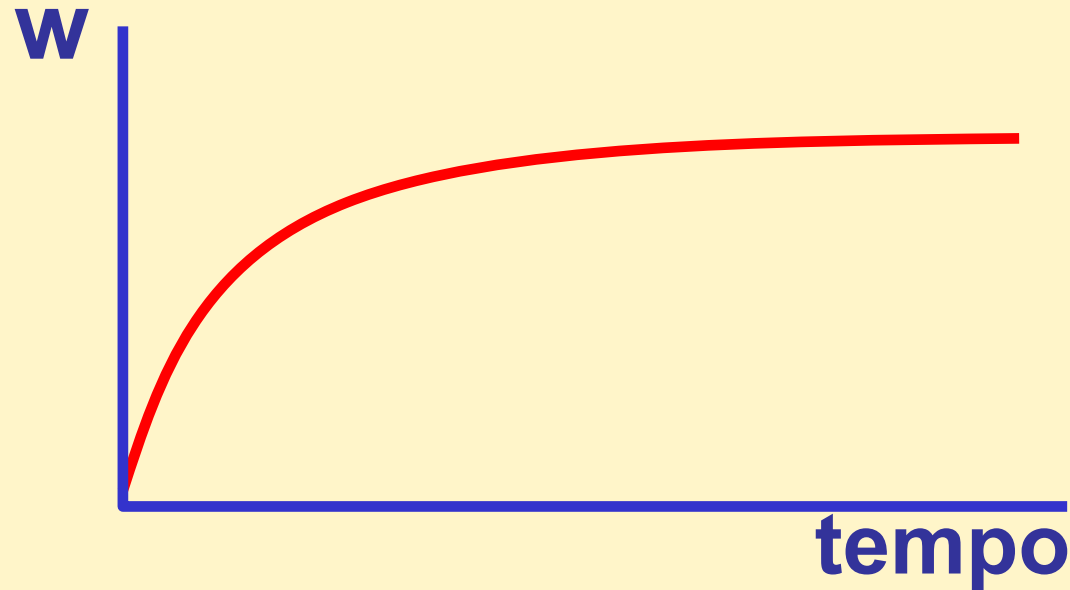
Muitíssimo provável:

baixa multiplicidade → alta multiplicidade

Pouquíssimo provável:

alta multiplicidade → baixa multiplicidade

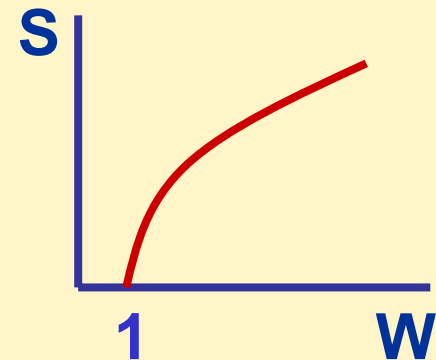
Multiplicidade \times Tempo



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

Entropia

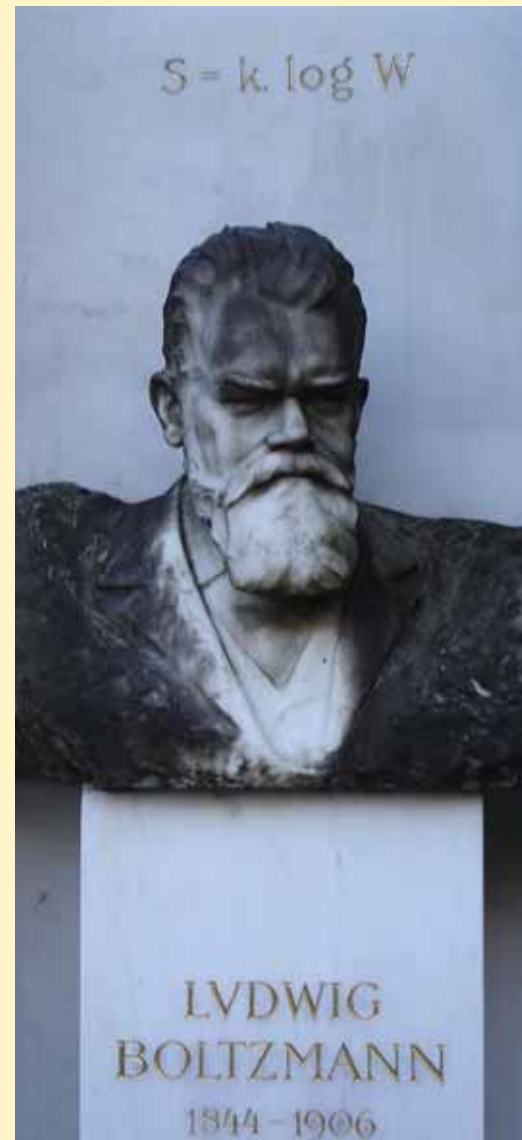
$$S = k \log W$$



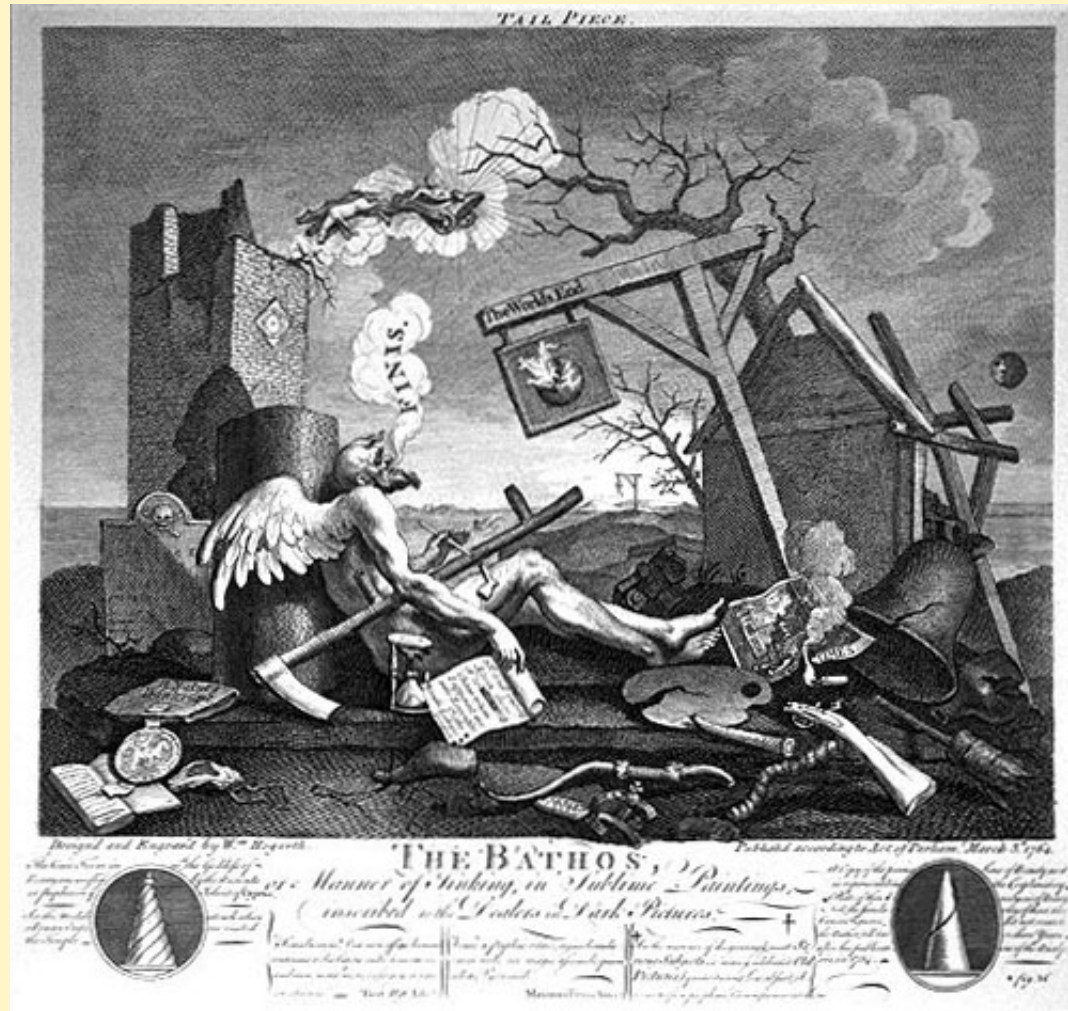
Segunda Lei da Termodinâmica:

A entropia de um sistema isolado nunca diminui.

O Epitáfio de Boltzmann

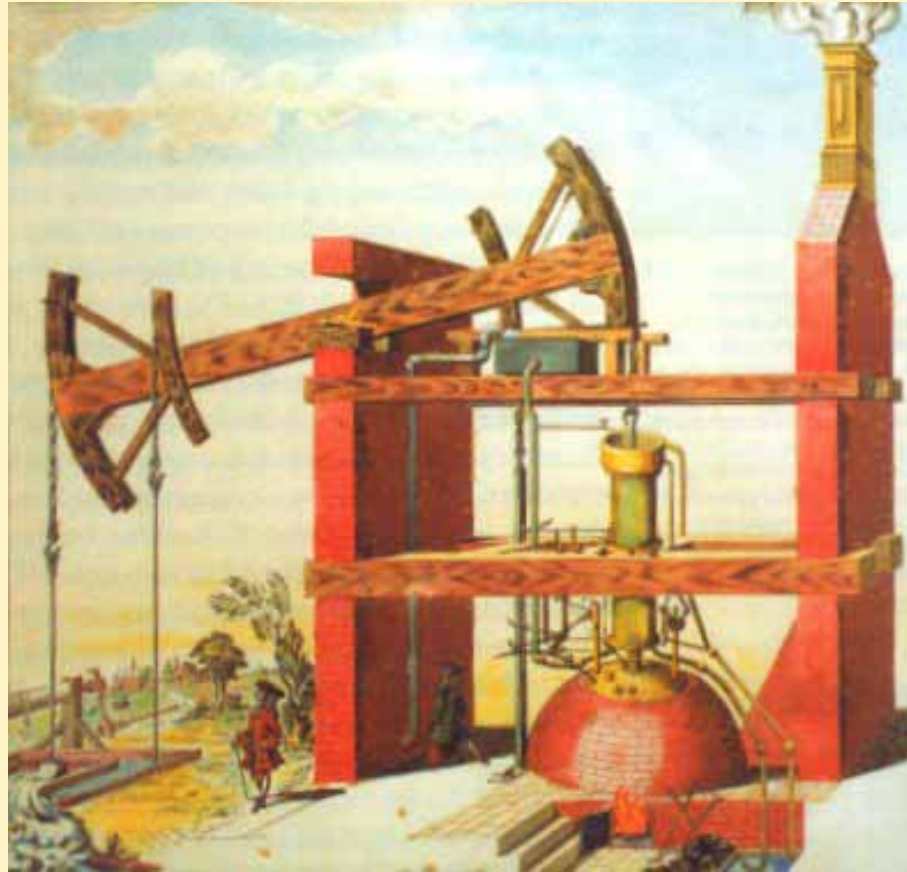


A Morte Térmica do Universo

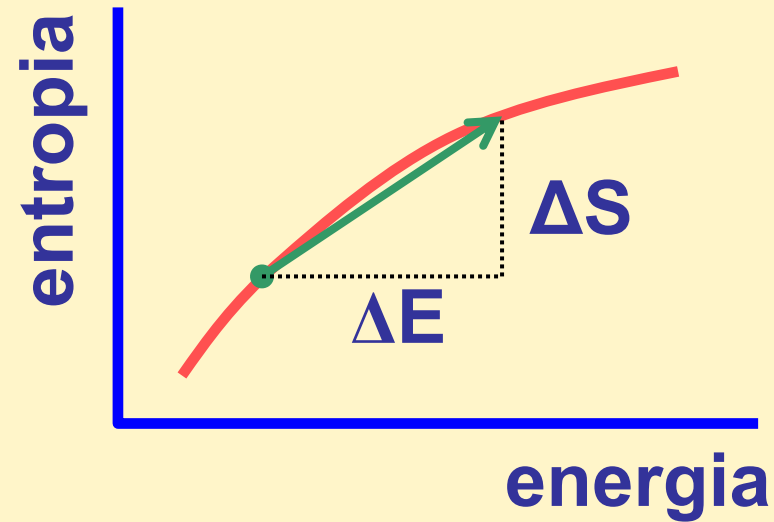


**William Hogarth
(1697-1764)**

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?

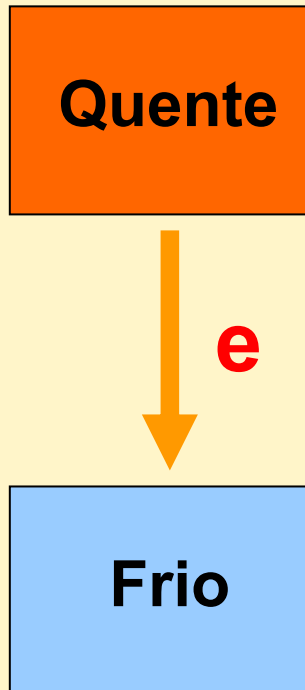
$$\boxed{T = \frac{\Delta E}{\Delta S}} \Rightarrow \boxed{\Delta S = \frac{\Delta E}{T}} \quad V, N, \dots \text{fixos}$$

Para a mesma mudança na energia:

Temperatura alta \Rightarrow pequena variação da entropia

Temperatura baixa \Rightarrow grande variação da entropia

Troca de Calor

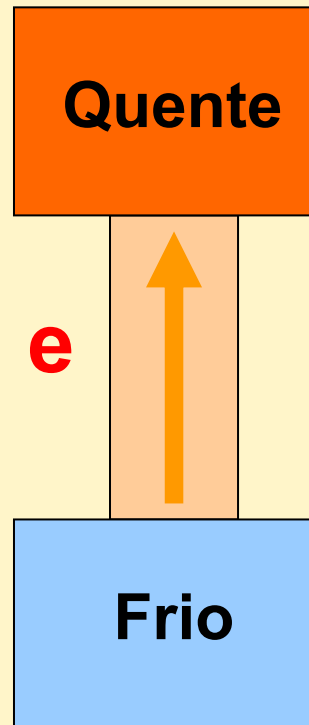


A entropia do corpo quente
diminui pouco.

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.**

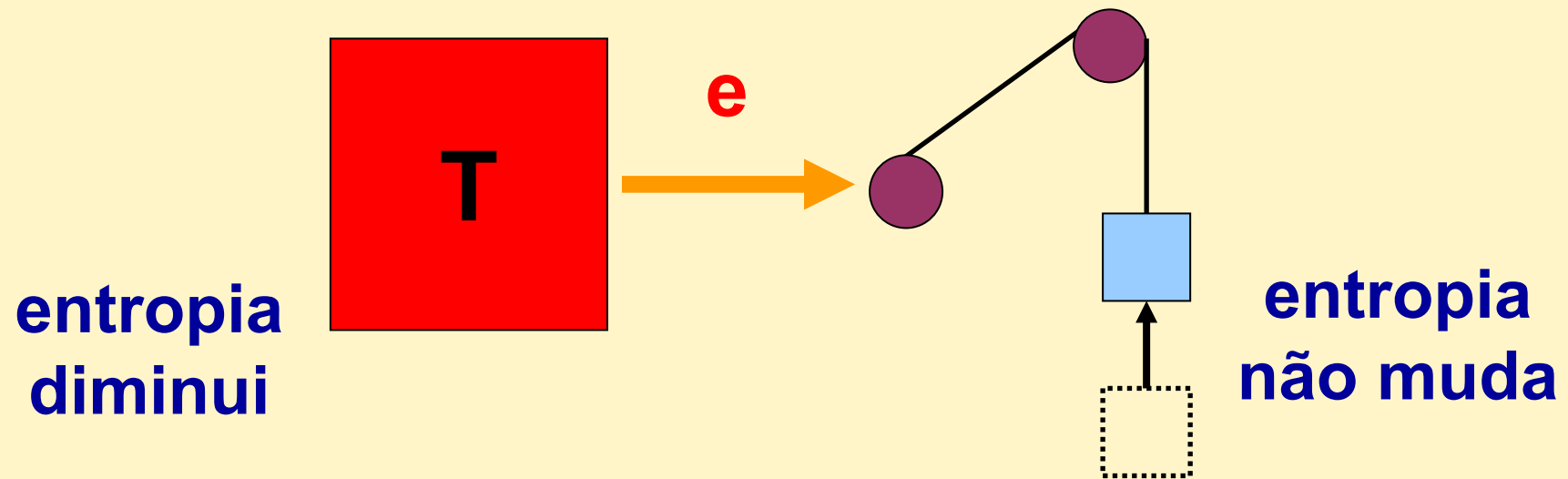
A 2ª Lei da Termodinâmica (Clausius)

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



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

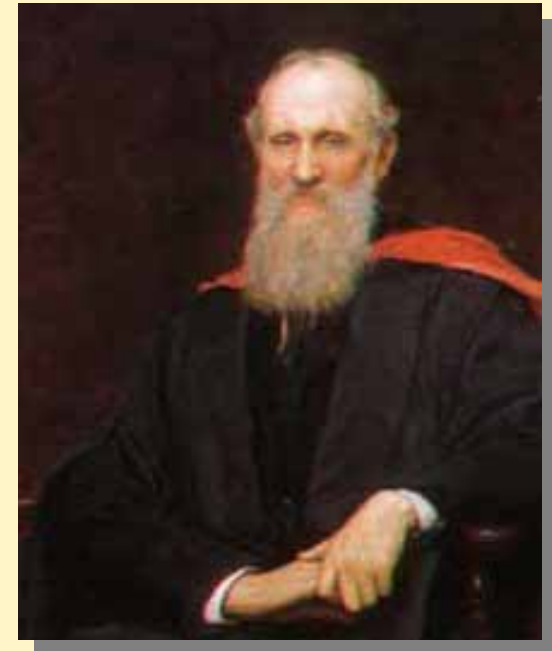
O Motor Milagroso



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

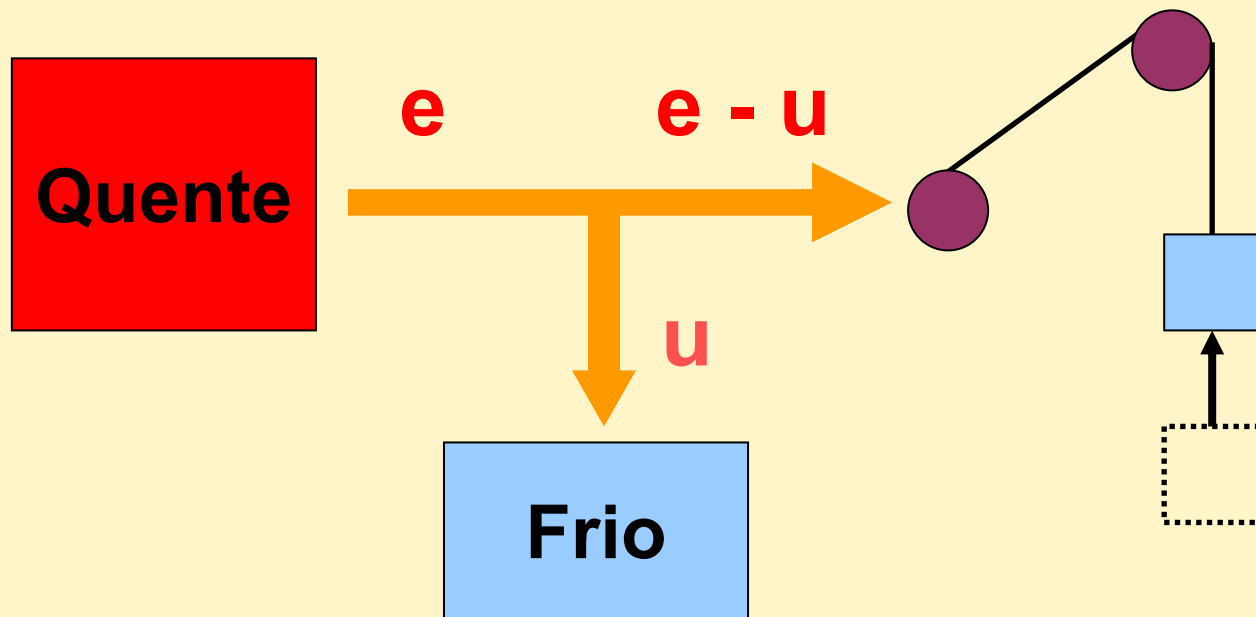
A 2^a Lei da Termodinâmica (Kelvin)

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

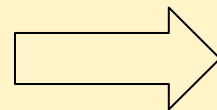


**W. Thomson
Lord Kelvin
(1824-1907)**

O Motor Possível



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



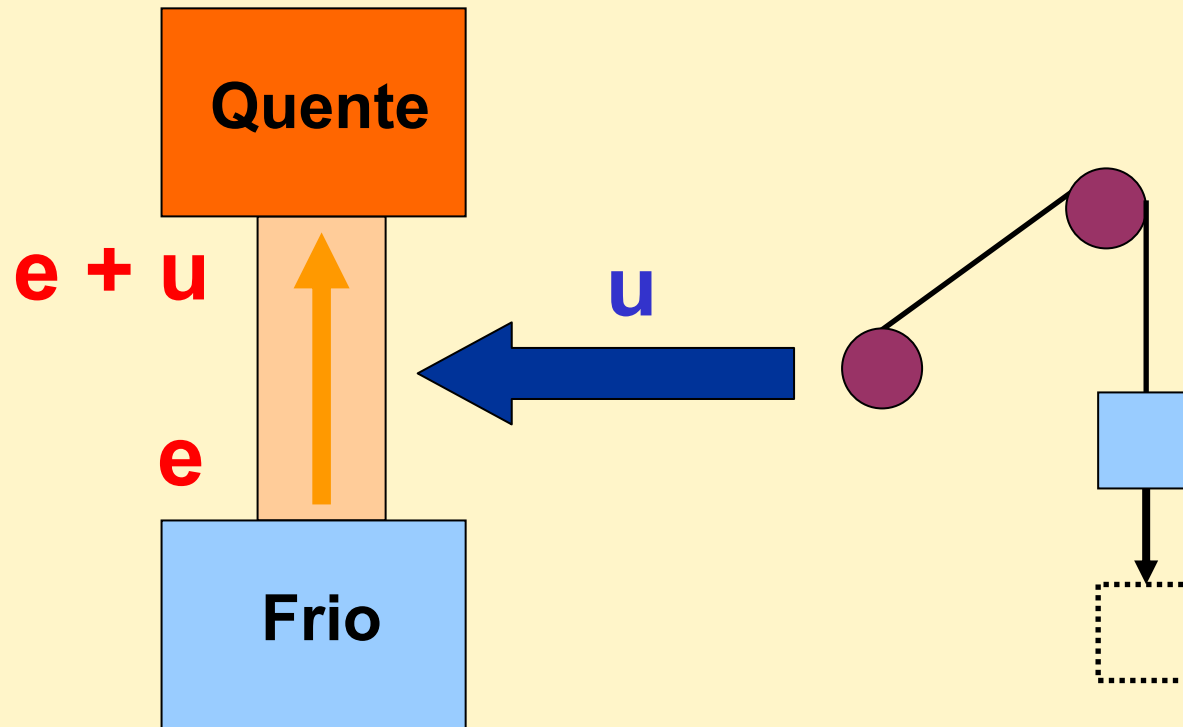
$$\frac{u}{e} \geq \frac{T_{\text{Frio}}}{T_{\text{Quente}}}$$

Eficiência do Motor

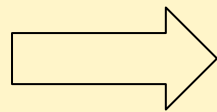
$$\eta = \frac{\text{energia usada}}{\text{energia "paga"}} = \frac{e - u}{e} = 1 - \frac{u}{e}$$

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

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:

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



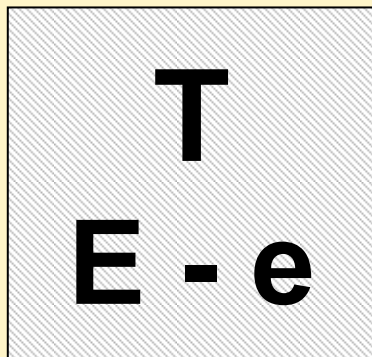
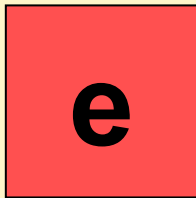
entropia não muda



máquina reversível

A Distribuição de Boltzmann

"sistema"



"reservatório
térmico"

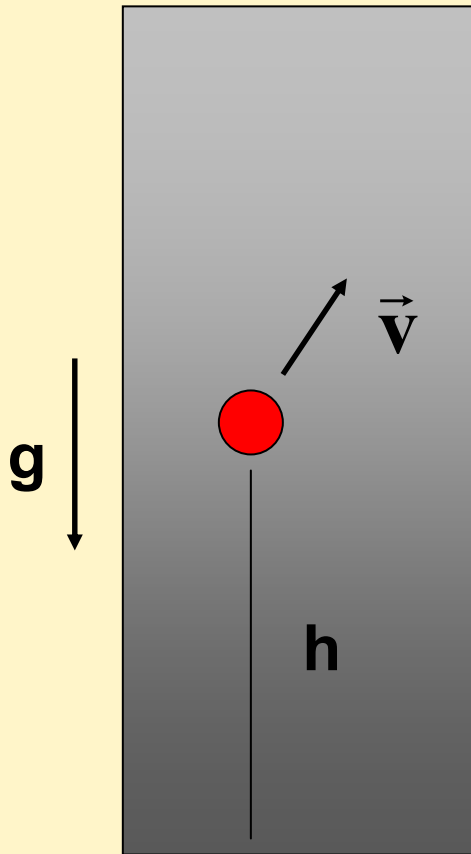
$$P(e) \propto W(E - e)$$

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

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

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

Distribuição da Energia das Moléculas em um Gás

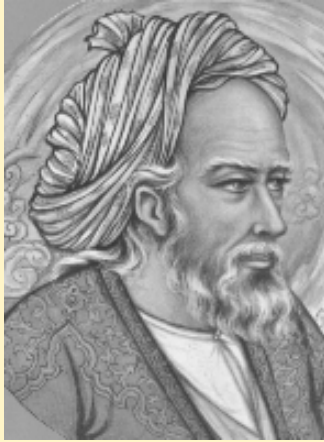


$$e = mv^2 / 2 + mgh$$

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

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

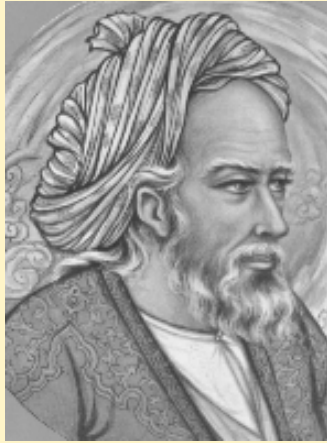
$$P(h) \propto \exp\left(-\frac{mg}{kT} h\right)$$



**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