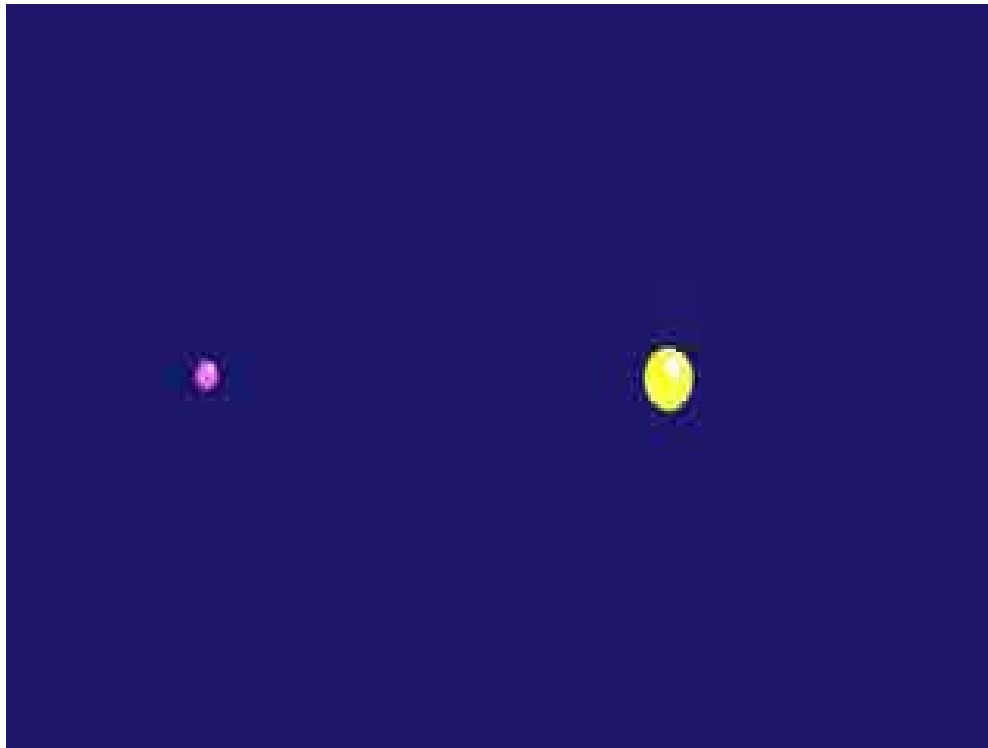


## 24.9 – Uma abordagem estatística da entropia

Entropia e a seta do tempo: todas as leis microscópicas da Física são reversíveis no tempo (tratam igualmente passado e futuro)

Exemplo: Leis de Newton – órbitas dos planetas

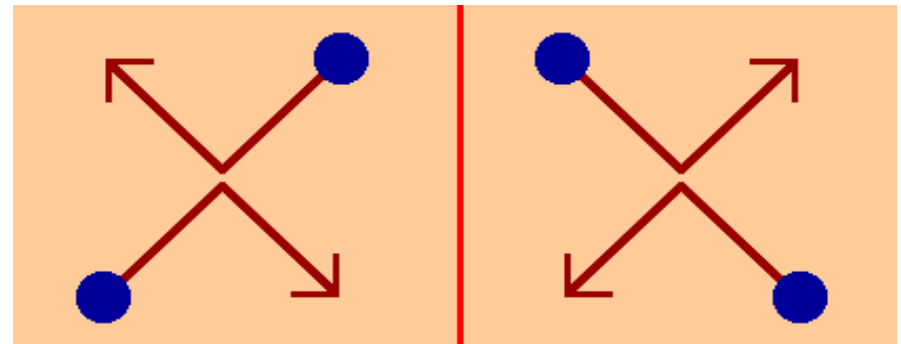
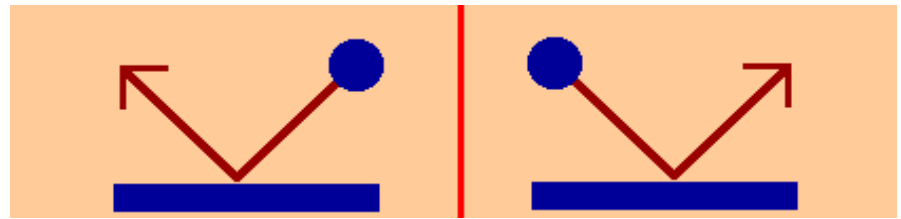
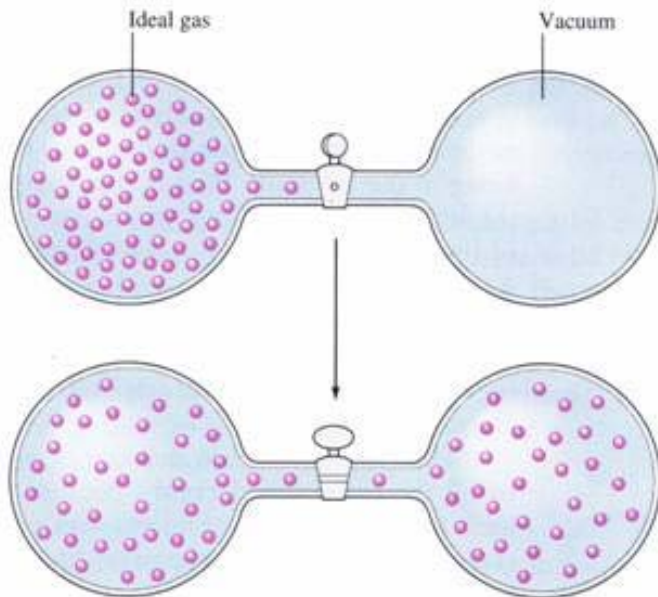


Filme não parece absurdo quando passado de trás para frente

<http://www.youtube.com/watch?v=M3-nQEyBHxg>

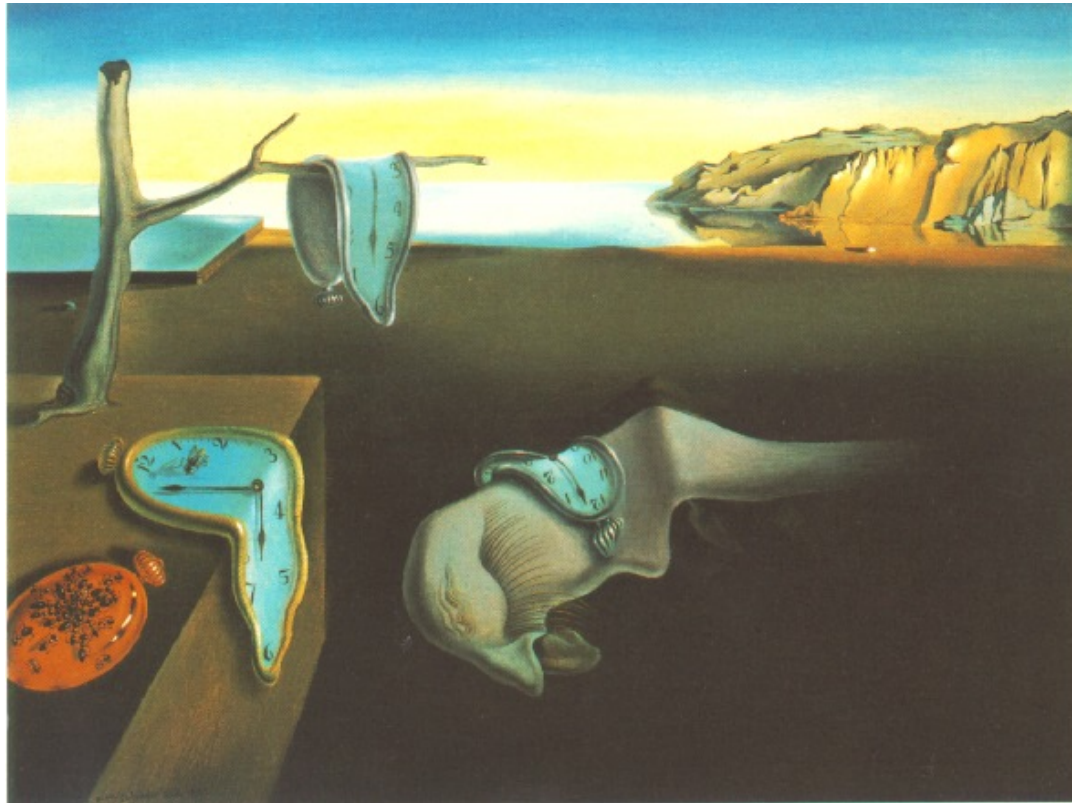
## Outro exemplo: Leis de Newton – colisões

Também é reversível



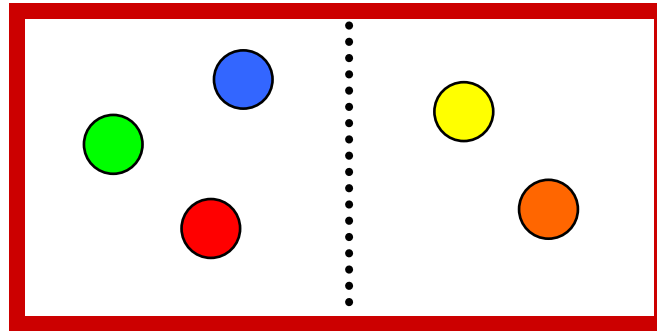
Mas então por que a expansão  
livre é irreversível? Afinal  
consiste apenas em um  
número muito grande de  
colisões...

Aprendemos que a seta do tempo é definida pelo sentido do aumento da entropia... Mas por que a seta do tempo aparece apenas quando temos um número muito grande de partículas?



Para entendermos isso, precisamos formular uma análise microscópica da entropia

## Microestados e macroestados



### Microestado

**Esquerda:** verde, azul, vermelha

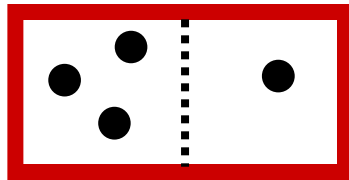
**Direita:** amarela, laranja

### Macroestado

**Esquerda:** 3 bolas

**Direita:** 2 bolas

## Vários microestados diferentes podem corresponder ao mesmo macroestado

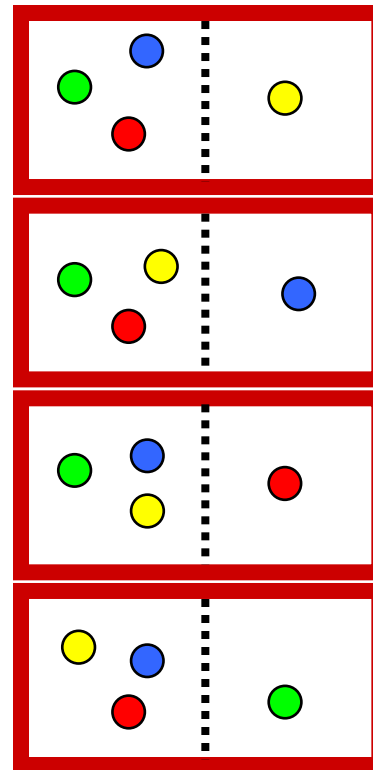


1 macroestado

esquerda = 3

direita = 1

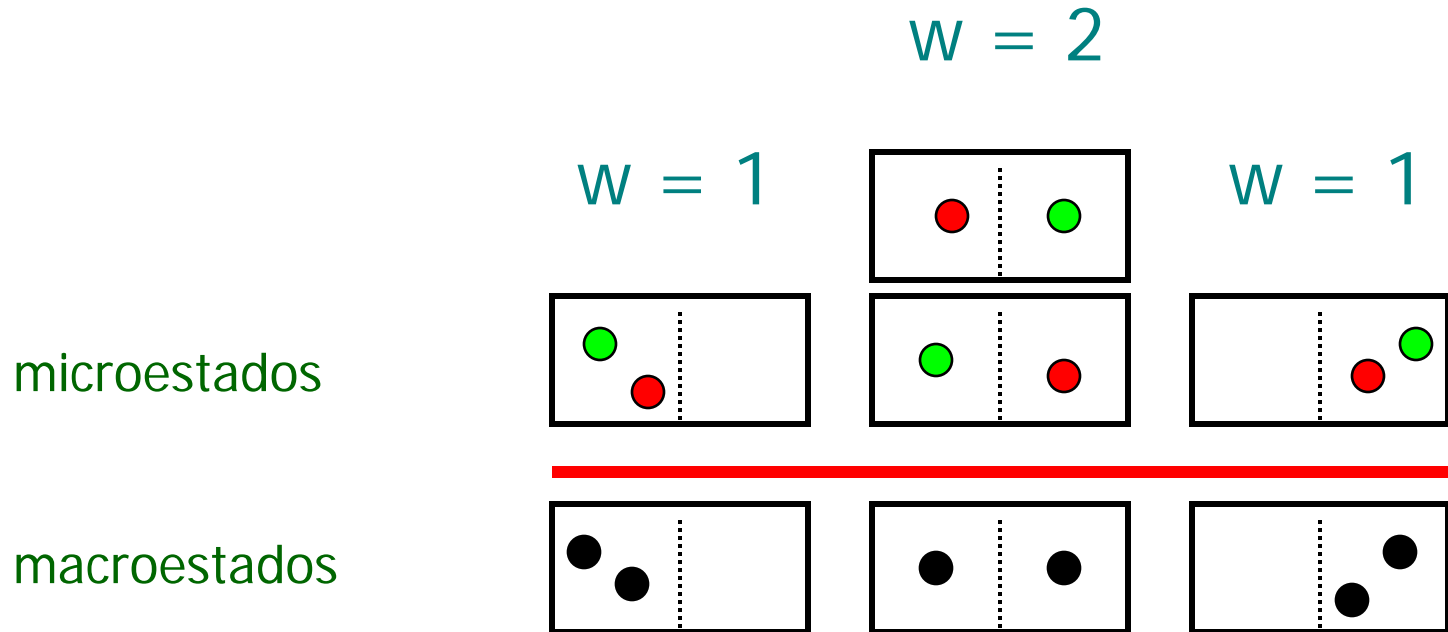
**Multiplicidade:** número de microestados que correspondem a um dado microestado



4 microestados

Lembre-se que as **variáveis termodinâmicas** (pressão, temperatura, etc) dependem do **macroestado** e não do microestado

Note que diferentes macroestados podem ter diferentes multiplicidades:



# 4 partículas

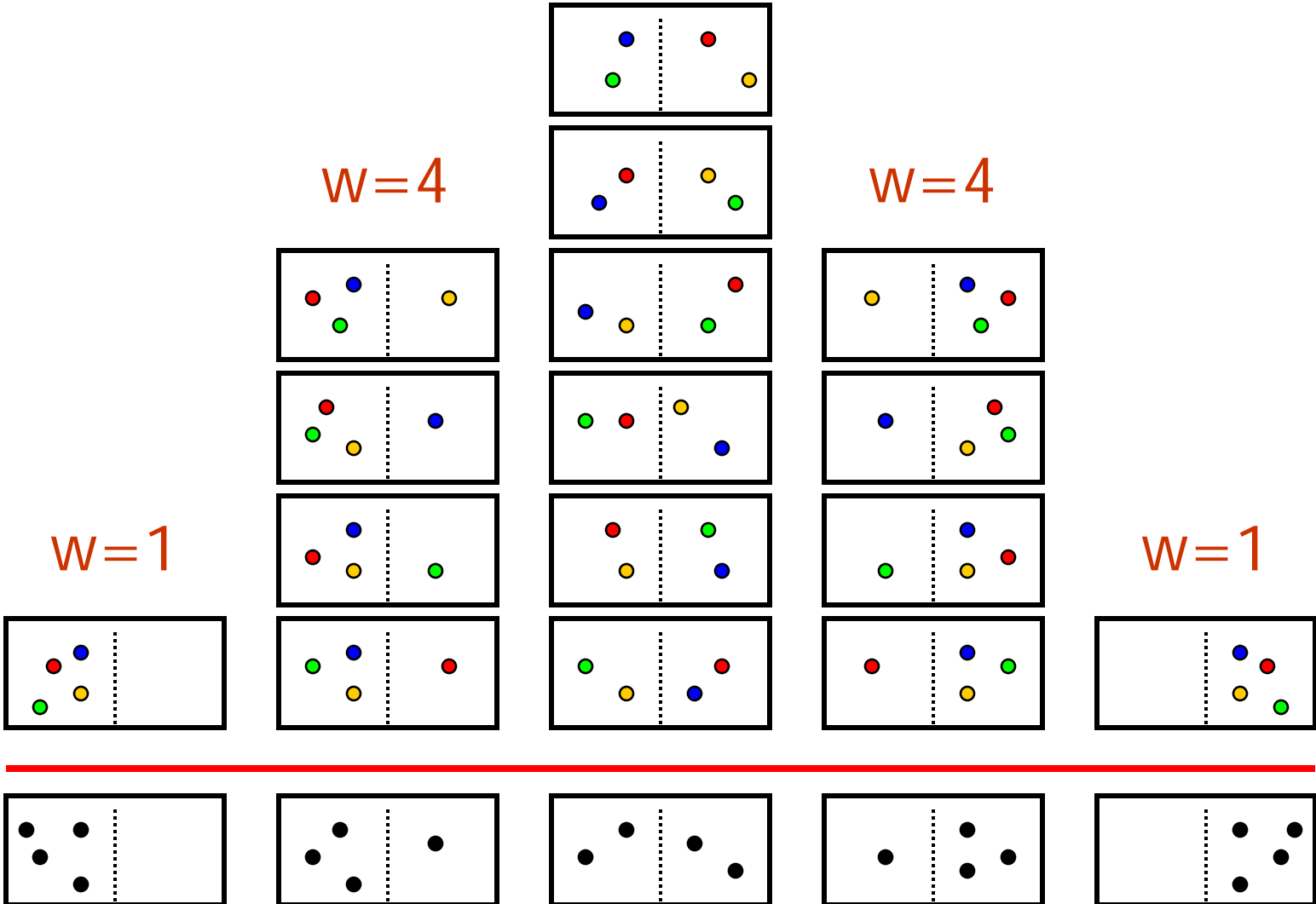
$w=6$

$w=4$

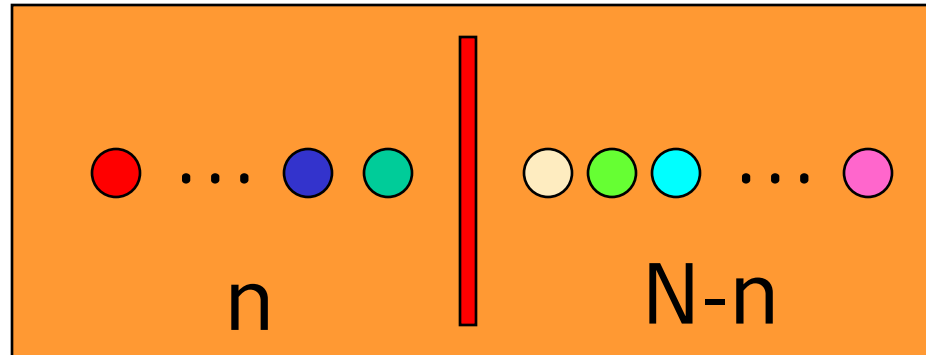
$w=4$

$w=1$

$w=1$



## Como calcular a multiplicidade?

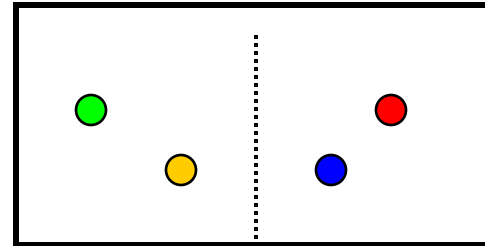
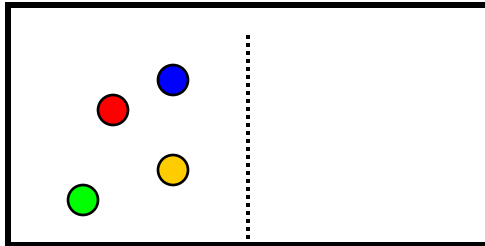


$w(N,n)$  = multiplicidade do macroestado com  $n$  partículas num lado e  $N-n$  no outro (combinação simples)

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

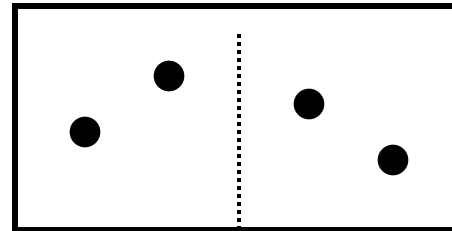
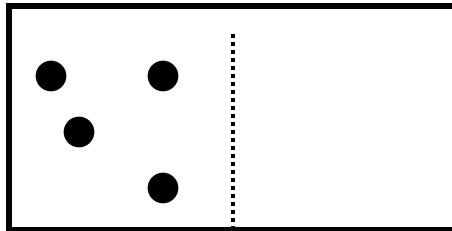


Qual destes microestados é mais provável (ocorre com mais frequência)?



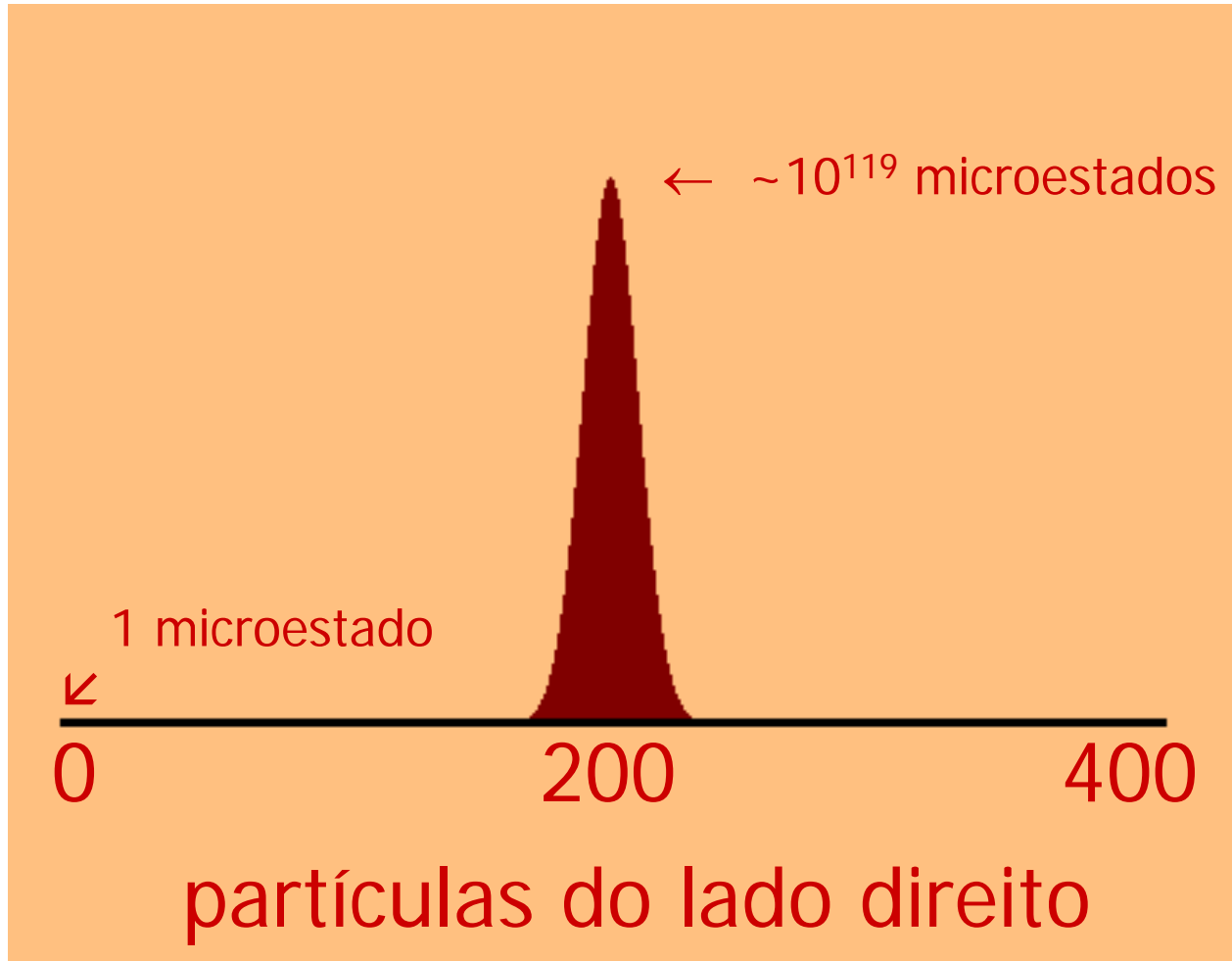
Resposta: todos os microestados são igualmente prováveis (hipótese básica da termodinâmica estatística)

Qual destes macroestados é mais provável?

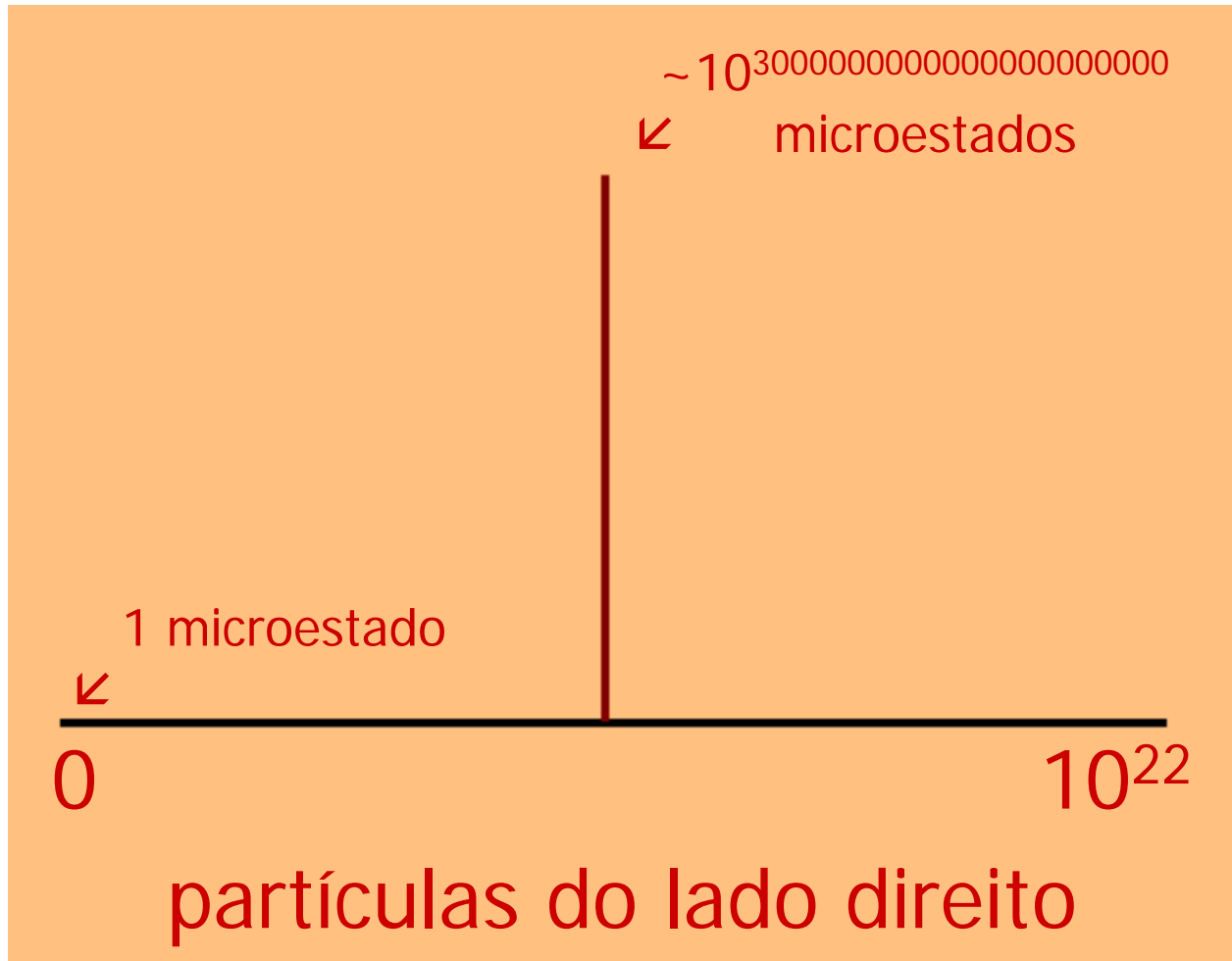


Resposta: O da direita. Como todos os microestados são igualmente prováveis, a probabilidade de um macroestado é proporcional à sua multiplicidade

400 partículas



$10^{22}$  partículas



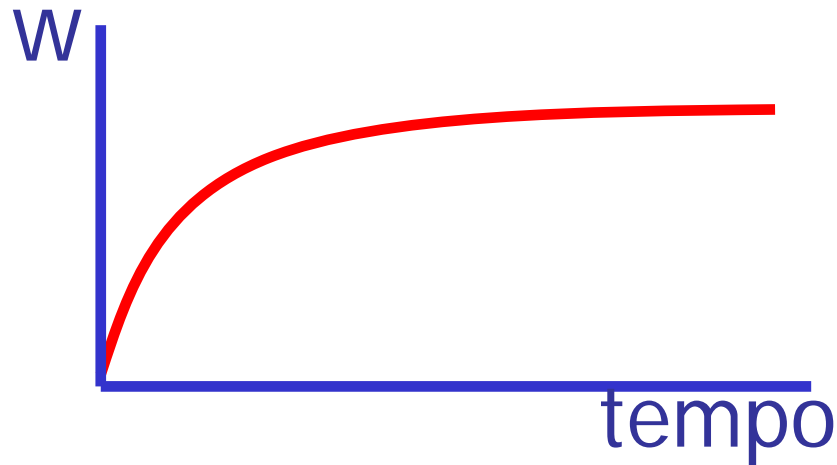
# A Origem da Irreversibilidade

Muito provável:

baixa multiplicidade  $\rightarrow$  alta multiplicidade

Pouco provável:

alta multiplicidade  $\rightarrow$  baixa multiplicidade



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

<http://www.joakimlinde.se/java/gas/container.php>

<http://www.joakimlinde.se/java/gas/mixing.php>

Parece então haver alguma relação entre multiplicidade e entropia... Mas qual?

Vamos pensar em um sistema formado pelo conjunto de dois subsistemas A e B. Entropias se somam, enquanto multiplicidades se multiplicam:

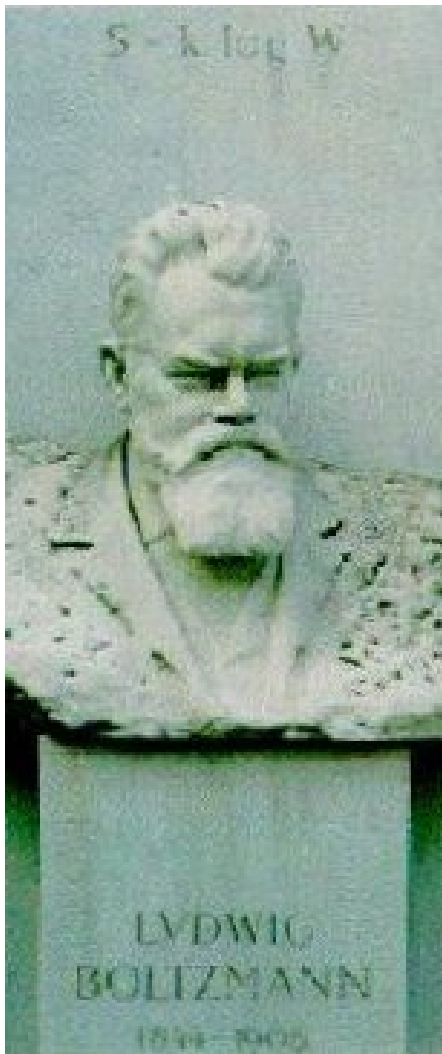
$$S_{AB} = S_A + S_B$$

$$W_{AB} = W_A W_B$$

Qual função matemática  $S(w)$  que pode descrever esta propriedade?

$$\ln(w_A w_B) = \ln w_A + \ln w_B$$

$$S = k \ln w$$

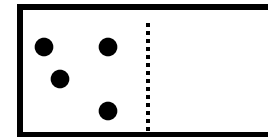


Epitáfio de Boltzmann



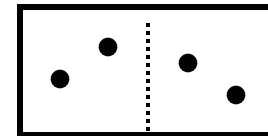
# A entropia é uma medida da desordem

Macroestados ordenados têm baixa multiplicidade.



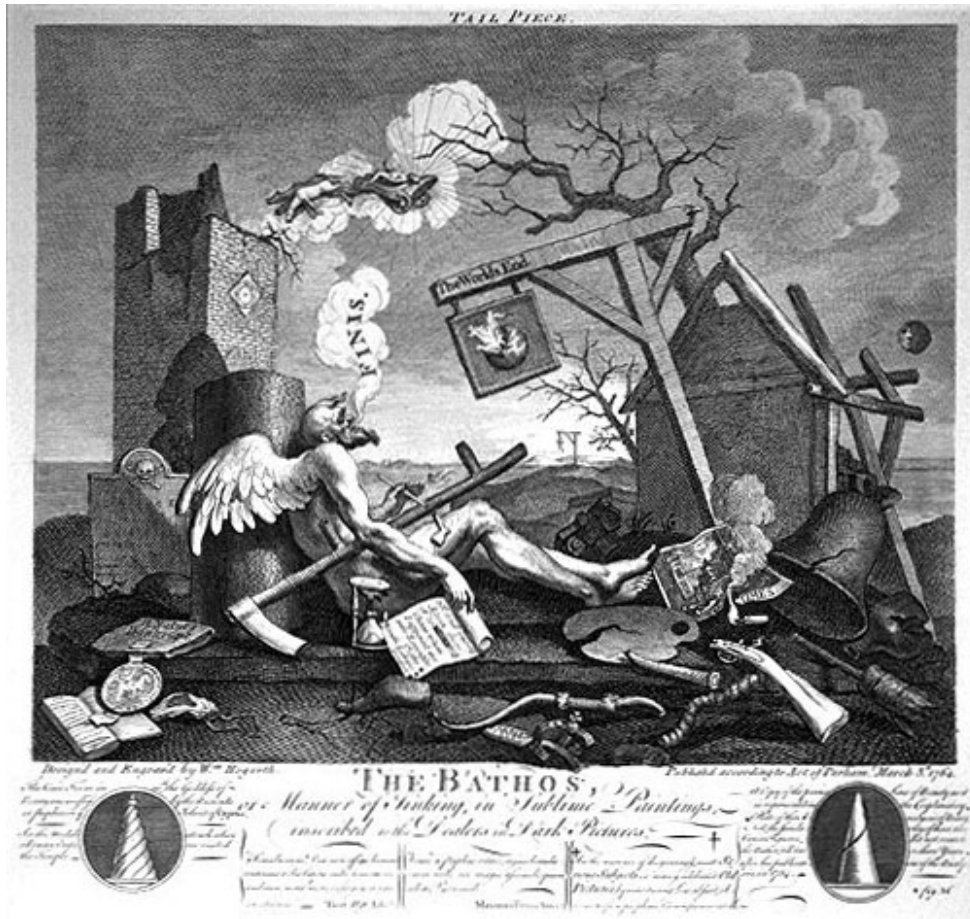
$$W=1$$

Macroestados desordenados têm alta multiplicidade.



$$W=6$$

# A Morte Térmica do Universo

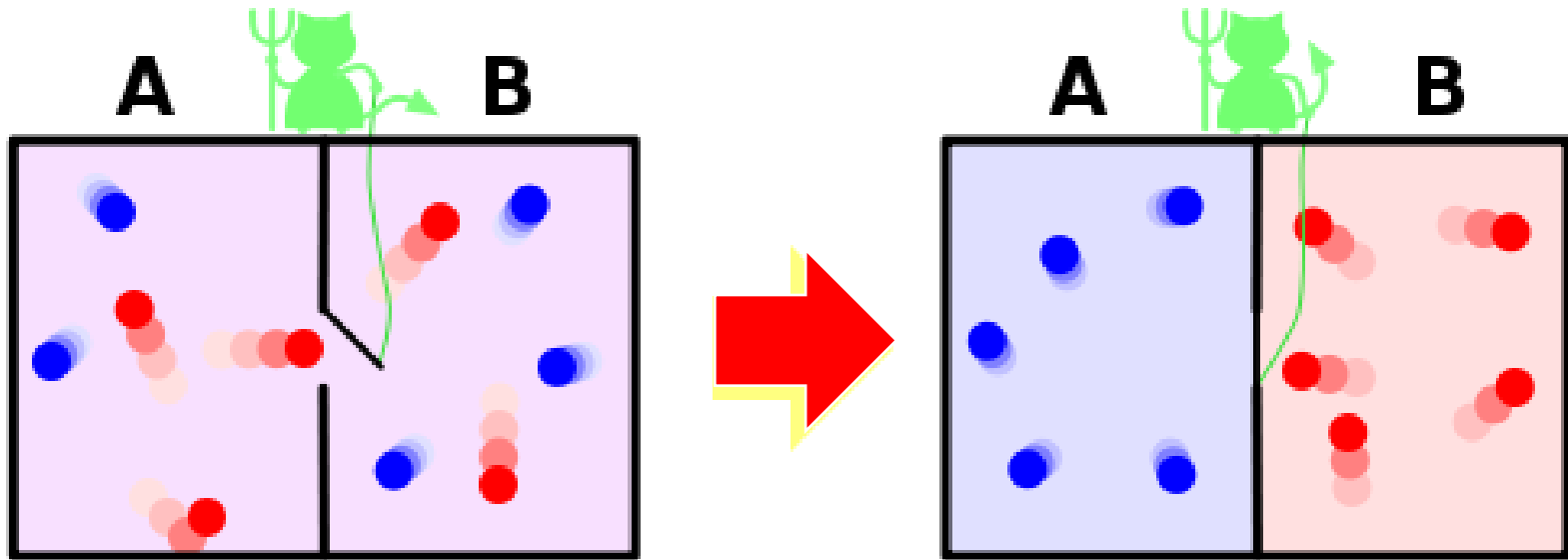


William Hogarth  
(1697-1764)

Neste estágio, a energia do universo estará uniformemente distribuída, de modo que diferenças de temperatura não poderão ser mais utilizadas para realizar trabalho



# Demônio de Maxwell



Não é um sistema isolado: entropia do demônio deve necessariamente aumentar para que a entropia do universo aumente

A existência de flutuações locais e momentâneas de baixa entropia (exemplo: seres vivos) não viola a 2ª Lei da Termodinâmica

“A entropia pode decrescer localmente mesmo que ela aumente na escala cósmica. Pode-se até dizer que a excitação gerada pela vida, arte, ciência e o espetáculo de uma cidade animada com as suas bibliotecas e teatros está na raiz da excitação de ver a lei da entropia sendo frustrada – em um lugar, pelo menos por um instante”

(Timothy Ferris)