

L'entropia è disordine?

Giorgio F. Signorini

Università di Firenze (IT)
giorgio.signorini@unifi.it

Pianeta Galileo 2023-2024



Sommario

- 1 Introduzione
- 2 Esempi
- 3 Discussione
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

Sommario

1 **Introduzione**

2 Esempi

3 Discussione

4 Rivediamo gli esempi

5 Conclusioni



entropy book

All Images Videos News Maps Shopping Settings

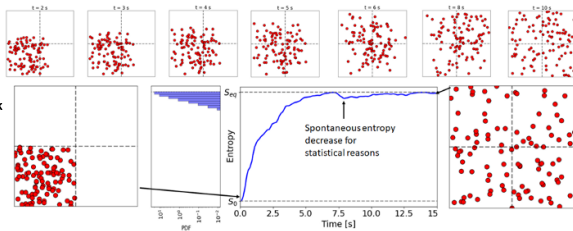
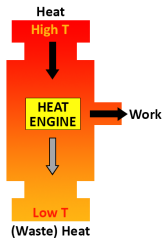
Italy Safe search: off Any time All sizes All colors All types All layouts All Licenses

The image shows a grid of 24 book covers related to Entropy and Thermodynamics. The covers include:

- ROBERT KOOB (1000 + 151)
- Entropy (432 + 648)
- Emergent Quantum Mechanics (600 + 861)
- ENTROPY: A New World View (110 + 225)
- High-Entropy Alloys (757 + 1140)
- ROBERT RAKER ENTROPY (500 + 800)
- The Entropy of Everything (1750 + 2625)
- Thermodynamics: An Engineering Approach (940 + 832)
- Fundamentals of Thermodynamics (1061 + 1448)
- Advanced Thermodynamics... (500 + 800)
- Entropy and Information Theory (330 + 500)
- ENTROPY (50 + 800)
- Thermodynamics 3rd Edition (314 + 500)
- Energy and Entropy: A Thinking Book (1938 + 2738)
- ENTROPY (206 + 800)
- Entropy (Atrophy...) (305 + 375)
- Entropy | Princeton... (305 + 375)
- ENTROPY - Boc (1000 + 1500)
- ENTROPY by Jeremy Rifkin (1000 + 630)
- Energy and Entropy... (907 + 1260)
- ROBERT RAKER ENTROPY (1000 + 630)
- The Entropy Law and the Economic Process by Nichol... (1000 + 630)
- Amazon.com: En (230)

Intro (1)

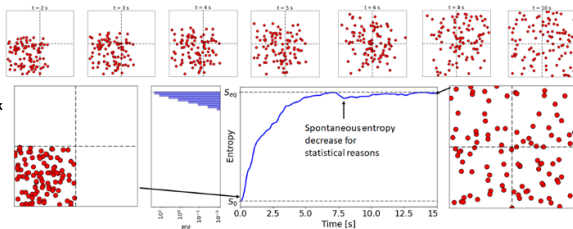
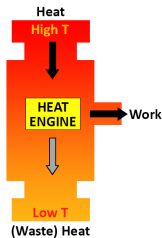
- L'entropia ha contribuito alla fondazione della **termodinamica** su basi teoriche rigorose e al tempo stesso **semplici**



Intro (1)

- L'entropia ha contribuito alla fondazione della **termodinamica** su **basi teoriche rigorose** e al tempo stesso **semplici**
- Inoltre ha permesso di unificare la visione **macroscopica** con quella **microscopica**:

entropia S $\left\{ \begin{array}{l} \text{entropia termodinamica} \quad (\text{macro}) \\ \text{entropia statistica} \quad (\text{micro}) \end{array} \right.$



Intro (2)

- Limitazione: ancora non la si riesce a “comprendere” bene

Intro (2)

- Limitazione: ancora non la si riesce a “**comprendere**” bene
- Attraverso il confronto tra macroscopico e microscopico ci si fa un'idea del **significato fisico dell'entropia**.

Intro (2)

- Limitazione: ancora non la si riesce a “**comprendere**” bene
- Attraverso il confronto tra macroscopico e microscopico ci si fa un'idea del **significato fisico dell'entropia**.
- Però si rischiano eccessive semplificazioni e generalizzazioni...



Everyone You Know is Going to Die: Entropy, Energy, and the Slow Decay of the Universe

Intro (2)

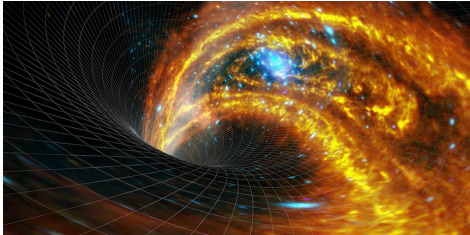
- Limitazione: ancora non la si riesce a “**comprendere**” bene
- Attraverso il confronto tra macroscopico e microscopico ci si fa un'idea del **significato fisico dell'entropia**.
- Però si rischiano eccessive semplificazioni e generalizzazioni...



Everyone You Know is Going to Die: Entropy, Energy, and the Slow Decay of the Universe

Intro (2)

- Limitazione: ancora non la si riesce a “**comprendere**” bene
- Attraverso il confronto tra macroscopico e microscopico ci si fa un'idea del **significato fisico dell'entropia**.
- Però si rischiano eccessive semplificazioni e generalizzazioni...



Everyone You Know is Going to Die: Entropy, Energy, and the Slow Decay of the Universe



Entropia

- L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di evoluzione spontanea dei processi naturali

Processi spontanei



Processi spontanei



Processi spontanei



Entropia

- L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di evoluzione spontanea dei processi naturali

Entropia

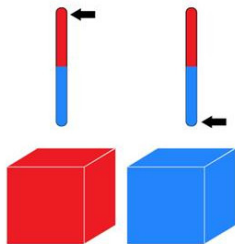
- L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea dei processi naturali**
- La direzione è data dal **secondo principio della termodinamica**, che può essere formulato così:

Entropia

- L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea dei processi naturali**
- La direzione è data dal **secondo principio della termodinamica**, che può essere formulato così:

"Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia maggiore (o uguale)**"

verso entropia maggiore



equilibrio iniziale
 $T(\text{caldo}) > T(\text{freddo})$

verso entropia maggiore

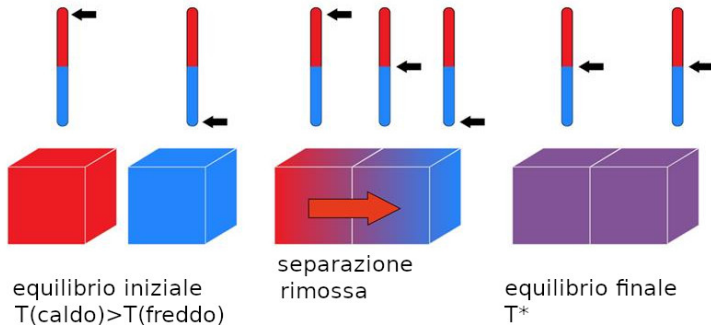


Figura: Se si mettono a contatto i due contenitori, il calore fluisce spontaneamente da quello a T maggiore verso quello a T minore.

verso il disordine?

Secondo Principio della termodinamica

“Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia** maggiore (o uguale)”

È naturale chiedersi:

verso il disordine?

Secondo Principio della termodinamica

“Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia** maggiore (o uguale)”

È naturale chiedersi:

- 1 Che cos'è l'entropia?

verso il disordine?

Secondo Principio della termodinamica

“Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia** maggiore (o uguale)”

È naturale chiedersi:

- 1 Che cos'è l'entropia?
- 2 Perché tende ad aumentare?

verso il disordine?

Secondo Principio della termodinamica

“Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia** maggiore (o uguale)”

È naturale chiedersi:

- 1 Che cos'è l'entropia?
 - “L'entropia misura il **disordine** del sistema”
- 2 Perché tende ad aumentare?

verso il disordine?

Secondo Principio della termodinamica

“Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia** maggiore (o uguale)”

È naturale chiedersi:

- 1 Che cos'è l'entropia?
 - “L'entropia misura il **disordine** del sistema”
- 2 Perché tende ad aumentare?
 - “perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”

verso il disordine?

Secondo Principio della termodinamica

“Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia** maggiore (o uguale)”

È naturale chiedersi:

- 1 Che cos'è l'entropia?
 - “L'entropia misura il **disordine** del sistema”
- 2 Perché tende ad aumentare?
 - “perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”
- Queste risposte, che vengono date spesso, oltre che vagamente inquietanti sono imprecise!

verso il disordine?

Secondo Principio della termodinamica

“Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia** maggiore (o uguale)”

È naturale chiedersi:

- 1 Che cos'è l'entropia?
 - “L'entropia misura il **disordine** del sistema”
- 2 Perché tende ad aumentare?
 - “perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”
- Queste risposte, che vengono date spesso, oltre che vagamente inquietanti sono **imprecise!**

verso il disordine?

Secondo Principio della termodinamica

“Un sistema termodinamico *isolato*, in equilibrio, se le condizioni che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato a **entropia** maggiore (o uguale)”

È naturale chiedersi:

- 1 Che cos'è l'entropia?
 - “L'entropia misura il **disordine** del sistema”
- 2 Perché tende ad aumentare?
 - “perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”
- Queste risposte, che vengono date spesso, oltre che vagamente inquietanti sono **imprecise!**
- Prima di discuterle, vediamo con quali esempi vengono giustificate...

1 Introduzione

2 **Esempi**

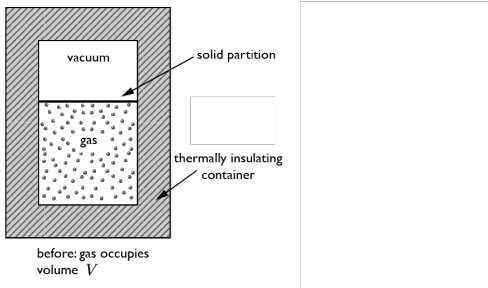
3 Discussione

4 Rivediamo gli esempi

5 Conclusioni

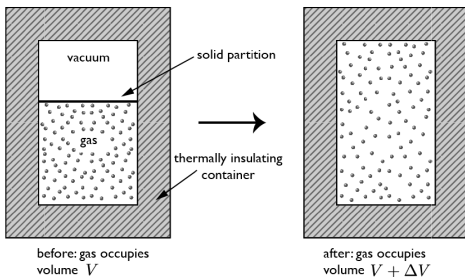
(A) Un gas si espande nel vuoto

- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



(A) Un gas si espande nel vuoto

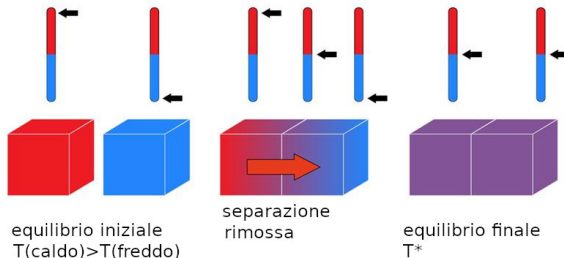
- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



- Si dice:

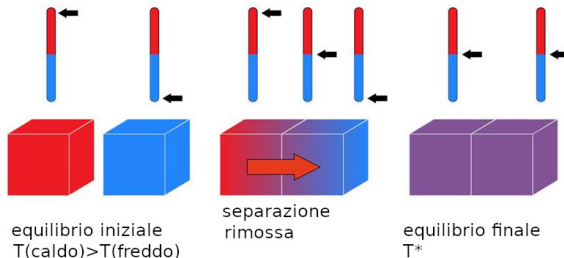
“Nel volume maggiore, gli atomi del gas hanno più spazio per muoversi: è aumentato il disordine”

(B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.



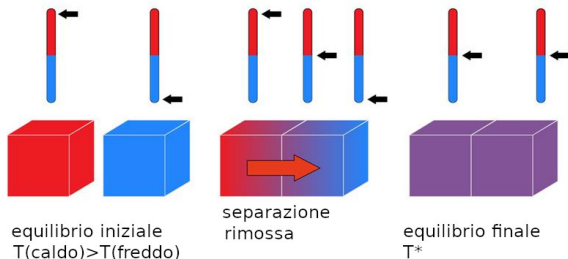
- la temperatura si uniforma

(B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.



- la temperatura si uniforma

(B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.

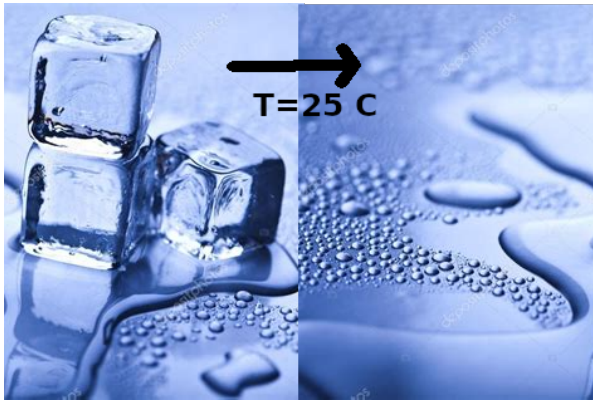


- la temperatura si uniforma

“si passa da uno stato con due zone ben distinte, a temperature diverse, ad una più disordinata in cui la temperatura è uniforme”

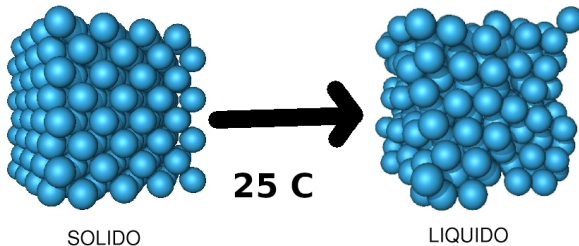
(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

- Un blocco di ghiaccio, portato a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, passa completamente allo stato liquido (fonde)



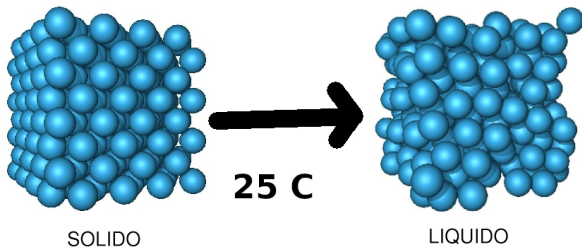
(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

- Un blocco di ghiaccio, portato a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, passa completamente allo stato liquido (fonde)
- La struttura del solido è **regolare**, mentre quella del liquido è **disordinata**.



(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

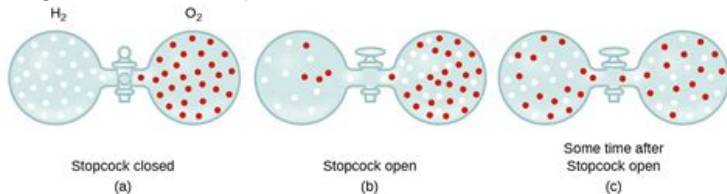
- Un blocco di ghiaccio, portato a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, passa completamente allo stato liquido (fonde)
- La struttura del solido è **regolare**, mentre quella del liquido è **disordinata**.



“Questo processo spontaneo (quindi, con aumento di entropia) porta ad un aumento di disordine”

(D) Due sostanze si mescolano

- Due gas si mescolano spontaneamente



(D) Due sostanze si mescolano

- Liquidi: acqua e alcol (etanolo) formano spontaneamente una miscela uniforme

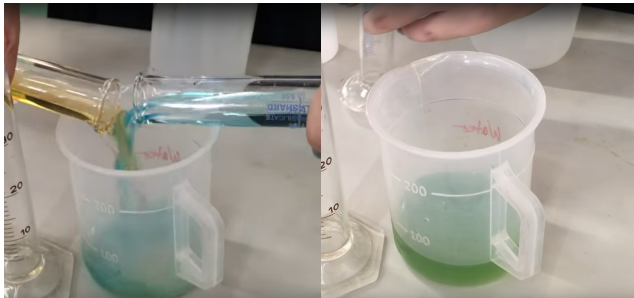
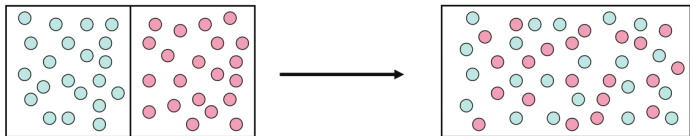


Figura: Acqua e etanolo (qui colorati artificialmente in giallo e blu) si mescolano.

Due liquidi si mescolano



“Si passa da una separazione completa delle due sostanze a una situazione più disordinata”

1 Introduzione

2 Esempi

3 Discussione

4 Rivediamo gli esempi

5 Conclusioni

Domande

- La spiegazione data comunemente:

Domande

- La spiegazione data comunemente:
 - “l'entropia misura il **disordine**”

Domande

- La spiegazione data comunemente:
 - “l’entropia misura il **disordine**”
 - “l’entropia aumenta perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”

Domande

- La spiegazione data comunemente:
 - “l’entropia misura il **disordine**”
 - “l’entropia aumenta perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”
- Cosa si intende esattamente per “disordine” di un sistema?

Domande

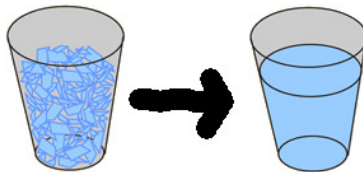
- La spiegazione data comunemente:
 - “l’entropia misura il **disordine**”
 - “l’entropia aumenta perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”
- ① Cosa si intende esattamente per “disordine” di un sistema?
- ② Se il disordine aumenta sempre, come si spiegano fenomeni spontanei in cui si ha un apparente **aumento dell’ordine**?

Quando il disordine diminuisce

- Se il disordine aumenta sempre, come si spiegano fenomeni spontanei in cui si ha un apparente **aumento dell'ordine**?

Quando il disordine diminuisce

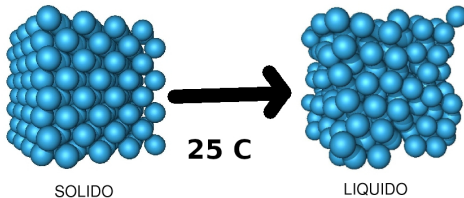
- Ad esempio: (1) un bicchiere con scaglie di ghiaccio, a temperatura ambiente si trasforma in un bicchiere di acqua



- quale è più disordinato?
- se l'acqua pura è più ordinata, allora **si va verso l'ordine?**

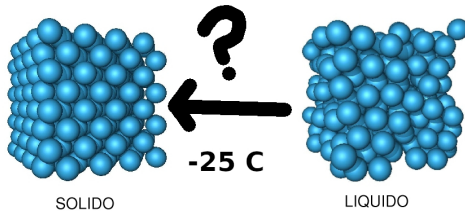
Quando il disordine diminuisce

- Oppure: (2) abbiamo detto che quando un solido fonde, passa ad una forma “più disordinata”



Quando il disordine diminuisce

- ... ma quando un liquido cristallizza, allora passa alla forma “più ordinata”?



Cosa si intende per “disordine”?

- Il concetto di disordine è molto **sogettivo**

Cosa si intende per “disordine”?

- Il concetto di disordine è molto **soggettivo**
- Quale delle due configurazioni è più “disordinata”?

Cosa si intende per “disordine”?

- Il concetto di disordine è molto **soggettivo**
- Quale delle due configurazioni è più “disordinata”?



Cosa si intende per “disordine”?

- Il concetto di disordine è molto **soggettivo**
- Quale delle due configurazioni è più “disordinata”?



Cosa si intende per “disordine”?

- Il concetto di disordine è molto **soggettivo**
- Quale delle due configurazioni è più “disordinata”?

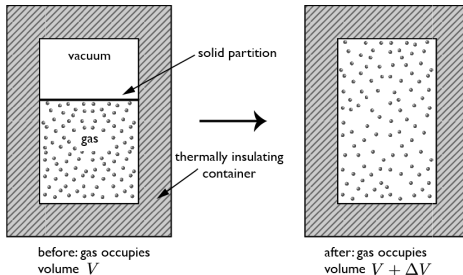


Figura: il sistema a maggior volume è davvero “più disordinato”?

Cosa si intende per “disordine”?

- Il concetto di disordine è molto **soggettivo**
- Quale delle due configurazioni è più “disordinata”?

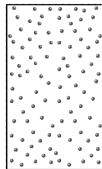
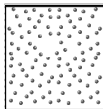


Figura: confronto dei due campioni di gas

Cosa si intende per “disordine”?

- Il concetto di disordine è molto **soggettivo**
- Quale delle due configurazioni è più “disordinata”?

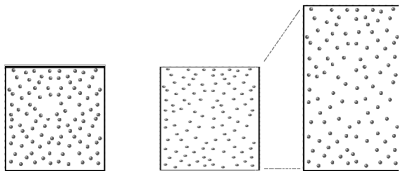
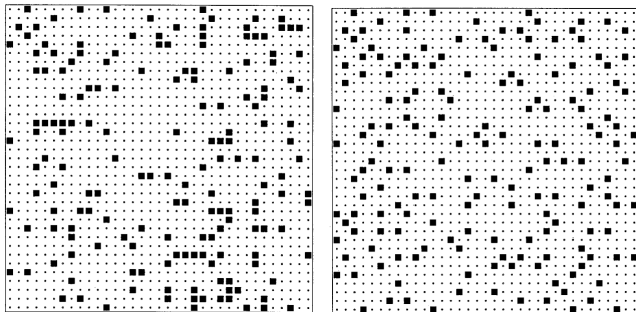


Figura: Se si “comprime” il gas di destra, la somiglianza con quello di sinistra è evidente

E se l'entropia non si riferisse al "disordine"? ...

- Un ricercatore ([Styer, 2000](#)) ha fatto un esperimento al computer
- Ha generato configurazioni di 169 quadratini su una griglia di 1225 possibili posizioni:



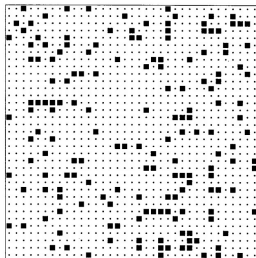
Esempi di configurazioni di 169 quadratini disposti a caso su una griglia $35 \times 35 = 1225$, generate con 2 programmi diversi

Da “disordine” a... “complessità”?

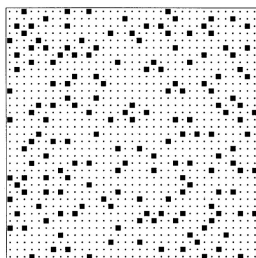
- Sono stati usati due programmi, “LIBERO” e “VINCOLATO”.

Da “disordine” a... “complessità”?

- Sono stati usati due programmi, “LIBERO” e “VINCOLATO”.
- In entrambi, le posizioni dei quadratini sono generate in modo casuale, ma nel programma “VINCOLATO” si è imposto il vincolo che non ci siano atomi adiacenti.



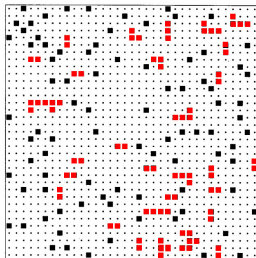
"LIBERO"



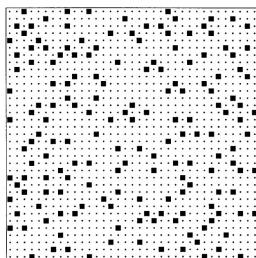
"VINCOLATO"

Da “disordine” a... “complessità”?

- Sono stati usati due programmi, “LIBERO” e “VINCOLATO”.
- In entrambi, le posizioni dei quadratini sono generate in modo casuale, ma nel programma “VINCOLATO” si è imposto il vincolo che non ci siano atomi **adiacenti**.



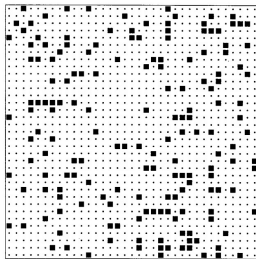
"LIBERO"



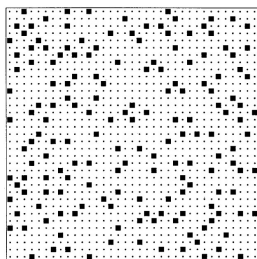
"VINCOLATO"

Da “disordine” a... “complessità”?

- Sono stati usati due programmi, “LIBERO” e “VINCOLATO”.
- In entrambi, le posizioni dei quadratini sono generate in modo casuale, ma nel programma “VINCOLATO” si è imposto il vincolo che non ci siano atomi adiacenti.



"LIBERO"



"VINCOLATO"

- numero totale di configurazioni diverse:

LIBERO > VINCOLATO

Il “disordine” misurato dall'entropia

- L'ultimo esempio illustra bene cosa si intende per “disordine” quando ci si riferisce all'entropia

Il “disordine” misurato dall'entropia

- L'ultimo esempio illustra bene cosa si intende per “disordine” quando ci si riferisce all'entropia

Il “disordine” misurato dall'entropia

- L'ultimo esempio illustra bene cosa si intende per “disordine” quando ci si riferisce all'entropia
- L'entropia non misura il “disordine” di una **singola configurazione**

Il “disordine” misurato dall'entropia

- L'ultimo esempio illustra bene cosa si intende per “disordine” quando ci si riferisce all'entropia
- L'entropia non misura il “disordine” di una **singola configurazione**
- Invece, misura **il numero di configurazioni diverse** con cui può essere realizzato un certo **stato**

Il “disordine” misurato dall'entropia

- L'ultimo esempio illustra bene cosa si intende per “disordine” quando ci si riferisce all'entropia
- L'entropia non misura il “disordine” di una **singola configurazione**
- Invece, misura **il numero di configurazioni diverse** con cui può essere realizzato un certo **stato**
- **Stato**: 169 quadratini su una griglia di 1225 posizioni. In quanti modi (**configurazioni**) diversi si possono sistemare?

Il “disordine” misurato dall'entropia

- L'ultimo esempio illustra bene cosa si intende per “disordine” quando ci si riferisce all'entropia
- L'entropia non misura il “disordine” di una **singola configurazione**
- Invece, misura **il numero di configurazioni diverse** con cui può essere realizzato un certo **stato**
- **Stato**: 169 quadratini su una griglia di 1225 posizioni. In quanti modi (**configurazioni**) diversi si possono sistemare?
- Più sono le configurazioni possibili, maggiore è l'entropia

Il “disordine” misurato dall'entropia

- L'ultimo esempio illustra bene cosa si intende per “disordine” quando ci si riferisce all'entropia
- L'entropia non misura il “disordine” di una **singola configurazione**
- Invece, misura **il numero di configurazioni diverse** con cui può essere realizzato un certo **stato**
- **Stato**: 169 quadratini su una griglia di 1225 posizioni. In quanti modi (**configurazioni**) diversi si possono sistemare?
- Più sono le configurazioni possibili, maggiore è l'entropia
 - LIBERO → tante possibilità → **maggiore entropia**

Il “disordine” misurato dall'entropia

- L'ultimo esempio illustra bene cosa si intende per “disordine” quando ci si riferisce all'entropia
- L'entropia non misura il “disordine” di una **singola configurazione**
- Invece, misura **il numero di configurazioni diverse** con cui può essere realizzato un certo **stato**
- **Stato**: 169 quadratini su una griglia di 1225 posizioni. In quanti modi (**configurazioni**) diversi si possono sistemare?
- Più sono le configurazioni possibili, maggiore è l'entropia
 - LIBERO → tante possibilità → **maggiore entropia**
 - VINCOLATO → meno possibilità → **minore entropia**

Un esempio banale

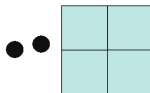
- Verifichiamo con un esempio banale che il numero di configurazioni dipende dalle condizioni poste (vincoli):

Un esempio banale

- Verifichiamo con un esempio banale che il numero di configurazioni dipende dalle condizioni poste (vincoli):
 - proviamo a modificare la condizione sul **numero totale di caselle**

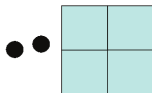
Un esempio banale

- Verifichiamo con un esempio banale che il numero di configurazioni dipende dalle condizioni poste (vincoli):
 - proviamo a modificare la condizione sul **numero totale di caselle**
- Abbiamo **2 pedine da sistemare in un certo numero di caselle**, una per casella



Un esempio banale

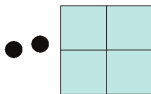
- Verifichiamo con un esempio banale che il numero di configurazioni dipende dalle condizioni poste (vincoli):
 - proviamo a modificare la condizione sul **numero totale di caselle**
- Abbiamo **2 pedine da sistemare in un certo numero di caselle**, una per casella



- Ci sono molti modi (configurazioni) di disporre le pedine. Il numero di modi dipende da quante sono le caselle

Un esempio banale

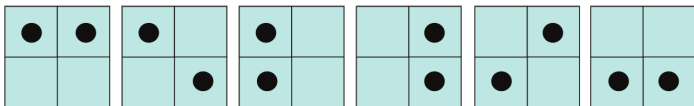
- Verifichiamo con un esempio banale che il numero di configurazioni dipende dalle condizioni poste (vincoli):
 - proviamo a modificare la condizione sul **numero totale di caselle**
- Abbiamo **2 pedine da sistemare in un certo numero di caselle**, una per casella



- Ci sono molti modi (configurazioni) di disporre le pedine. Il numero di modi dipende da quante sono le caselle
 - Esempio: stato = 2 pedine in 4 caselle

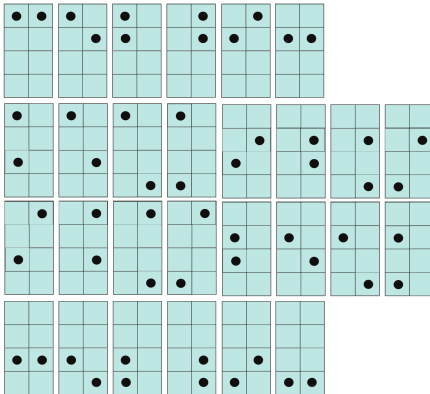
Un esempio banale (2)

2 pedine in 4 caselle \rightarrow 6 configurazioni:



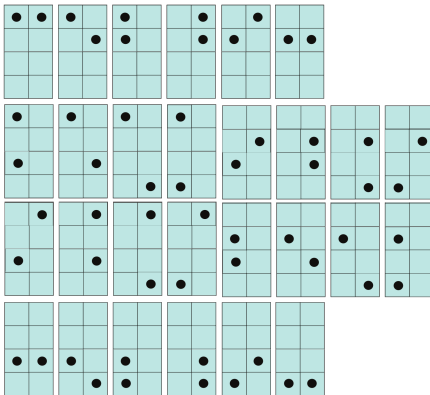
Un esempio banale (2)

2 pedine in 8 caselle \rightarrow 28 configurazioni:



Un esempio banale (2)

2 pedine in 8 caselle \rightarrow 28 configurazioni:



- Se aumento il numero di caselle, aumenta il numero di configurazioni

Macrostatisti e Microstatisti

- Un sistema termodinamico può essere trattato come il sistema di pedine e caselle appena visto

Macrostatisti e Microstatisti

- Un sistema termodinamico può essere trattato come il sistema di pedine e caselle appena visto
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**

Macrostati e Microstati

- Un sistema termodinamico può essere trattato come il sistema di pedine e caselle appena visto
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**
- queste proprietà globali (o **macroscopiche**), se il sistema è isolato e in equilibrio, non cambiano, e definiscono un **macro-stato**:

Macrostati e Microstati

- Un sistema termodinamico può essere trattato come il sistema di pedine e caselle appena visto
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**
- queste proprietà globali (o **macroscopiche**), se il sistema è isolato e in equilibrio, non cambiano, e definiscono un **macro-stato**:

$N \rightarrow$ numero totale di particelle

Macrostati e Microstati

- Un sistema termodinamico può essere trattato come il sistema di pedine e caselle appena visto
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**
- queste proprietà globali (o **macroscopiche**), se il sistema è isolato e in equilibrio, non cambiano, e definiscono un **macro-stato**:

$N \rightarrow$ numero totale di particelle

$V \rightarrow$ volume totale

Macrostati e Microstati

- Un sistema termodinamico può essere trattato come il sistema di pedine e caselle appena visto
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**
- queste proprietà globali (o **macroscopiche**), se il sistema è isolato e in equilibrio, non cambiano, e definiscono un **macro-stato**:

$N \rightarrow$ numero totale di particelle

$V \rightarrow$ volume totale

$E \rightarrow$ energia totale

Macrostati e Microstati

- Un sistema termodinamico può essere trattato come il sistema di pedine e caselle appena visto
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**
- queste proprietà globali (o **macroscopiche**), se il sistema è isolato e in equilibrio, non cambiano, e definiscono un **macro-stato**:
 - $N \rightarrow$ numero totale di particelle
 - $V \rightarrow$ volume totale
 - $E \rightarrow$ energia totale
- Ci sono molti modi di disporre N atomi nel volume V con energia E

Macrostati e Microstati

- Un sistema termodinamico può essere trattato come il sistema di pedine e caselle appena visto
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**
- queste proprietà globali (o **macroscopiche**), se il sistema è isolato e in equilibrio, non cambiano, e definiscono un **macro-stato**:

$N \rightarrow$ numero totale di particelle

$V \rightarrow$ volume totale

$E \rightarrow$ energia totale

- Ci sono molti modi di disporre N atomi nel volume V con energia E
- “**microstati**” = configurazioni in cui si assegna a ciascun atomo una **posizione** ed un’**energia**, mantenendo fisso il valore globale di V e E (oltre che di N)

Microstati e volume

- Esempio: ho 36 atomi in un certo volume

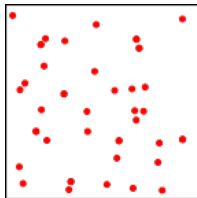


Figura:

Microstati e volume

- Esempio: ho 36 atomi in un certo volume

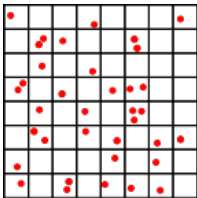


Figura: Volume = 64

- per contare i microstati, divido il volume in piccole celle e conto quante configurazioni sono possibili

Microstati e volume

- Se aumento il volume (macrostato), aumento il numero dei microstati:

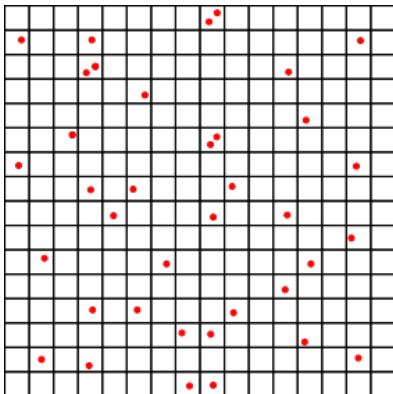


Figura: Volume = 256

Microstati e energia

- Un ragionamento analogo si può applicare all'energia.

Microstati e energia

- Un ragionamento analogo si può applicare all'energia.
- Infatti, secondo la Meccanica Quantistica, l'energia degli atomi in un campione può assumere solo valori discreti ("livelli")

Microstati e energia

- Un ragionamento analogo si può applicare all'energia.
- Infatti, secondo la Meccanica Quantistica, l'energia degli atomi in un campione può assumere solo valori discreti ("livelli")
- Esempio: ho un sistema a energia totale $E = 3$ composto da 3 atomi ciascuno dei quali può possedere energia $\epsilon = 0, 1, 2, 3, \dots$
 Quanti sono i possibili microstati? (N.B. c'è una differenza col caso precedente! la somma deve dare sempre 3)

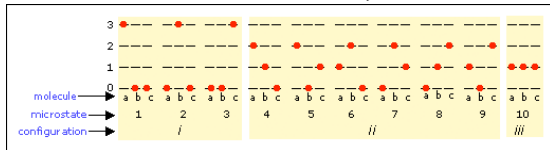


Figura: I microstati di $E = 3$ distribuita su 3 particelle sono 10

Microstati e energia

- Un ragionamento analogo si può applicare all'energia.
- Infatti, secondo la Meccanica Quantistica, l'energia degli atomi in un campione può assumere solo valori discreti (“livelli”)
- Come per il volume, se **aumento l'energia totale**, aumento anche il **numero di microstati compatibili**

Microstati e energia

- Un ragionamento analogo si può applicare all'energia.
- Infatti, secondo la Meccanica Quantistica, l'energia degli atomi in un campione può assumere solo valori discreti ("livelli")
- Come per il volume, se **aumento l'energia totale**, aumento anche il **numero di microstati compatibili**
- Ad esempio, per $E = 4$ il numero di microstati è $= 15$; e così via

Energia totale (E)	modi di distribuire E in quanti unitari tra 3 particelle (microstati, W)
3	10
4	15
10	220
100	171700
1000	$1.67 \cdot 10^9$

entropia statistica

Definizione

Il “disordine” che l'entropia misura è il **numero dei microstati, W**

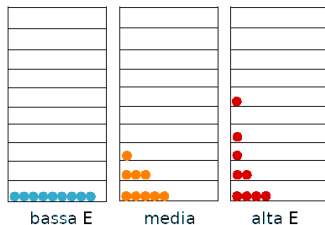
$$S = k \log W$$



Microstati e temperatura

- Abbiamo visto che:

maggiore $E \rightarrow$ maggiore $W \rightarrow$ maggiore S



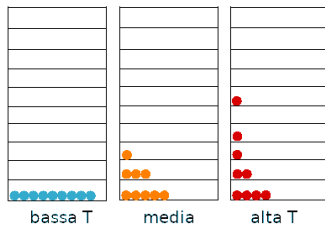
$E = 0$		$E = 12$
1 microstato		molti microst.

- N.B.** Per ogni E è rappresentato solo un microstato rappresentativo

Microstati e temperatura

- Poiché in generale T cresce con E , si ha anche:

maggiore $T \rightarrow$ maggiore $W \rightarrow$ maggiore S



Comprendere l'aumento di entropia

- Riassumendo: quando aumenta il numero di microstati W aumenta l'entropia S

Comprendere l'aumento di entropia

- Riassumendo: quando aumenta il numero di microstati W aumenta l'entropia S
- Ogni stato di equilibrio ha un certo valore (di W e) di S

Comprendere l'aumento di entropia

- Riassumendo: quando aumenta il numero di microstati W aumenta l'entropia S
- Ogni stato di equilibrio ha un certo valore (di W e) di S
 - una variazione di entropia si ha solo con una **trasformazione che porta da uno stato di equilibrio ad un altro stato di equilibrio.**

Comprendere l'aumento di entropia

- Riassumendo: quando aumenta il numero di microstati W aumenta l'entropia S
- Ogni stato di equilibrio ha un certo valore (di W e) di S
 - una variazione di entropia si ha solo con una **trasformazione che porta da uno stato di equilibrio ad un altro stato di equilibrio.**
 - non è che l'entropia aumenta costantemente!

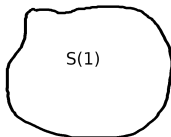
Comprendere l'aumento di entropia

- Riassumendo: quando aumenta il numero di microstati W aumenta l'entropia S
- Ogni stato di equilibrio ha un certo valore (di W e) di S
 - una variazione di entropia si ha solo con una **trasformazione che porta da uno stato di equilibrio ad un altro stato di equilibrio.**
 - non è che l'entropia aumenta costantemente!
 - aumenta solo se si fa una trasformazione sul sistema, rimuovendo una limitazione o "vincolo" al numero di microstati accessibili

Comprendere l'aumento di entropia

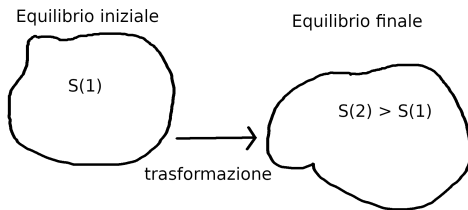
- Riassumendo: quando aumenta il numero di microstati W aumenta l'entropia S
- Ogni stato di equilibrio ha un certo valore (di W e) di S
 - una variazione di entropia si ha solo con una **trasformazione che porta da uno stato di equilibrio ad un altro stato di equilibrio.**
 - non è che l'entropia aumenta costantemente!
 - aumenta solo se si fa una trasformazione sul sistema, rimuovendo una limitazione o "vincolo" al numero di microstati accessibili

Equilibrio iniziale



Comprendere l'aumento di entropia

- Riassumendo: quando aumenta il numero di microstati W aumenta l'entropia S
- Ogni stato di equilibrio ha un certo valore (di W e) di S
 - una variazione di entropia si ha solo con una **trasformazione che porta da uno stato di equilibrio ad un altro stato di equilibrio.**
 - non è che l'entropia aumenta costantemente!
 - aumenta solo se si fa una trasformazione sul sistema, rimuovendo una limitazione o "vincolo" al numero di microstati accessibili



Indice

- 1 Introduzione
- 2 Esempi
- 3 Discussione
- 4 Rivediamo gli esempi**
- 5 Conclusioni

- In questa sezione vedremo come la definizione dell'entropia come misura del numero dei microstati

$$S = k \log W$$

permette

- In questa sezione vedremo come la definizione dell'entropia come misura del numero dei microstati

$$S = k \log W$$

permette

- di interpretare meglio gli esempi mostrati sopra

- In questa sezione vedremo come la definizione dell'entropia come misura del numero dei microstati

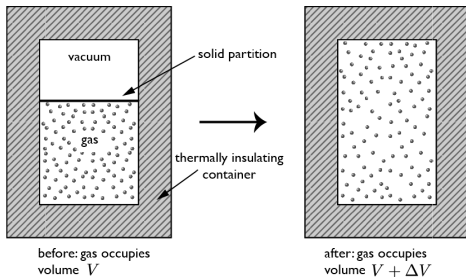
$$S = k \log W$$

permette

- di interpretare meglio gli esempi mostrati sopra
- di spiegare come possano avvenire trasformazioni inverse a quelle viste

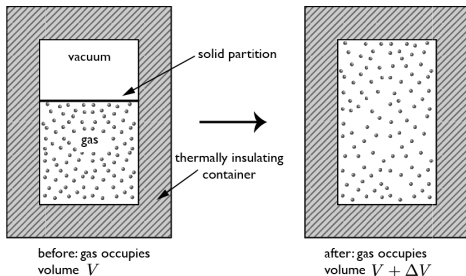
(A) Un gas si espande nel vuoto

- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



(A) Un gas si espande nel vuoto

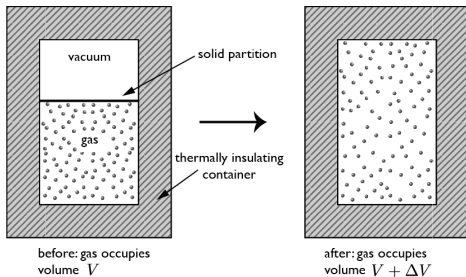
- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



- Abbiamo visto che il campione a volume maggiore **non è “più disordinato”**

(A) Un gas si espande nel vuoto

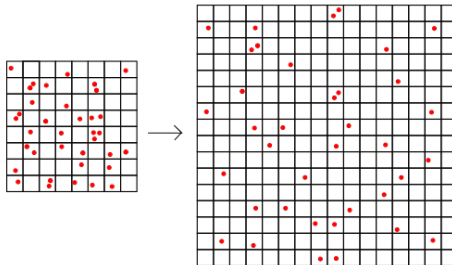
- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



- Semplicemente, **contiene molti più microstati** (molti più modi di disporre gli atomi).

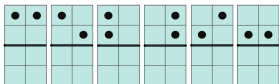
(A) Un gas si espande nel vuoto

- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



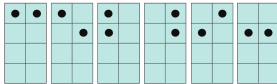
- Semplicemente, **contiene molti più microstati** (molti più modi di disporre gli atomi).

Un gas si espande nel vuoto - Microstati



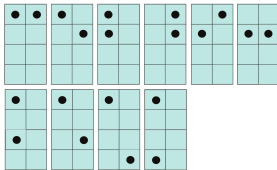
- sostanza confinata in metà del contenitore; $W = 6$; $S = k \log 6$

Un gas si espande nel vuoto - Microstati

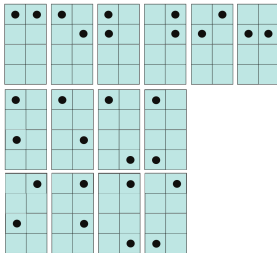


- rimuovo il separatore ...

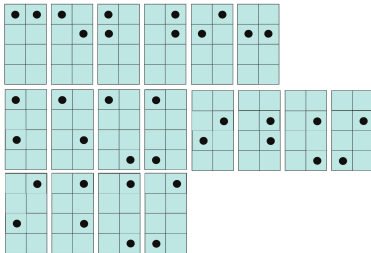
Un gas si espande nel vuoto - Microstati



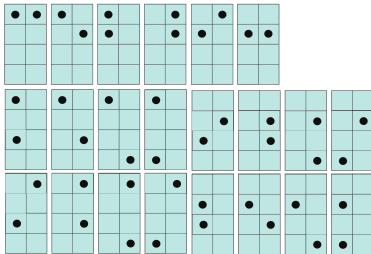
Un gas si espande nel vuoto - Microstati



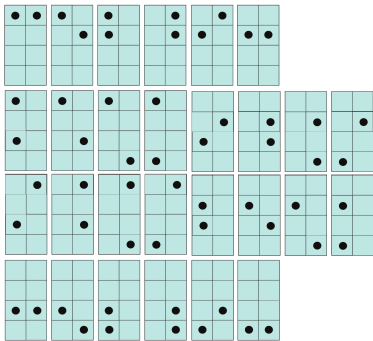
Un gas si espande nel vuoto - Microstati



Un gas si espande nel vuoto - Microstati



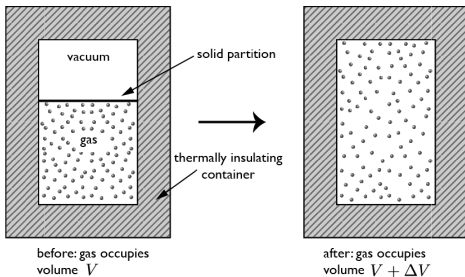
Un gas si espande nel vuoto - Microstati



- la sostanza realizza tutti i microstati $W = 28$; $S = k \log 28$

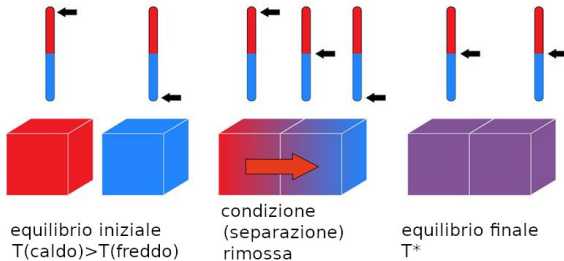
Perché un gas si espande nel vuoto?

- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande

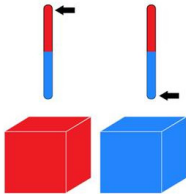


Il volume maggiore contiene **più microstati**, e quindi ha **maggiore entropia**

(B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.



(B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.

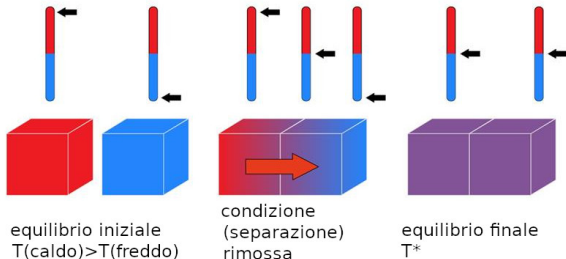


equilibrio iniziale
 $T(\text{caldo}) > T(\text{freddo})$

- Inizialmente:

$$T_{\text{caldo}} > T_{\text{freddo}}$$

(B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.



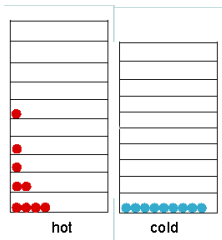
- Inizialmente:

$$T_{\text{caldo}} > T_{\text{freddo}}$$

- Dopo il passaggio di calore, si ha una temperatura intermedia T^* in entrambi i corpi;

$$T_{\text{caldo}} > T^* > T_{\text{freddo}}$$

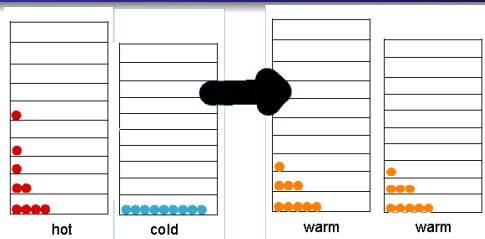
Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo



- Inizialmente:

$$T_{caldo} > T_{freddo}$$

Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo

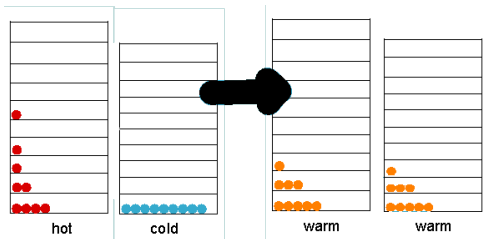


- Inizialmente:

$$T_{caldo} > T_{freddo}$$

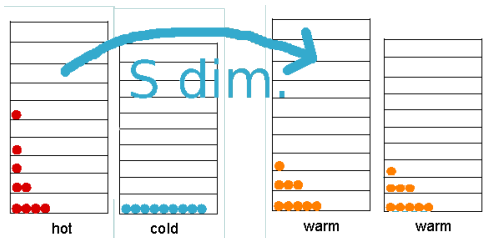
- Dopo il passaggio di calore, si ha una temperatura intermedia T^* in entrambi i corpi;

Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo



• Entropia:

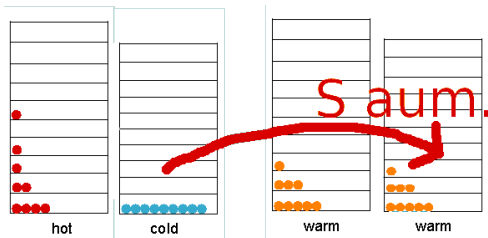
Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo



- Entropia:

- nel corpo caldo l'entropia è diminuita ($T^* < T_c$ e quindi $S^* < S_c$)

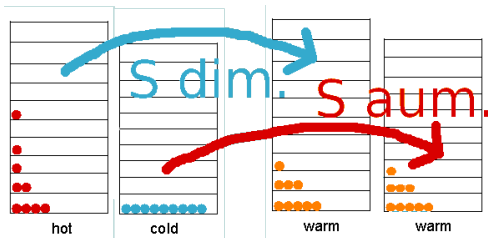
Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo



• Entropia:

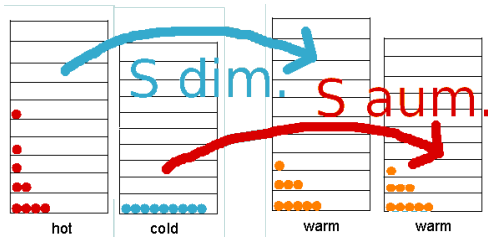
- nel corpo caldo l'entropia è diminuita ($T^* < T_c$ e quindi $S^* < S_c$)
- nel corpo freddo l'entropia è aumentata ($T^* > T_f$ e quindi $S^* > S_f$)

Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo



- Entropia:
 - nel corpo caldo l'entropia è diminuita ($T^* < T_c$ e quindi $S^* < S_c$)
 - nel corpo freddo l'entropia è aumentata ($T^* > T_f$ e quindi $S^* > S_f$)
- si può dimostrare che **sommando le due variazioni, l'entropia totale cresce**

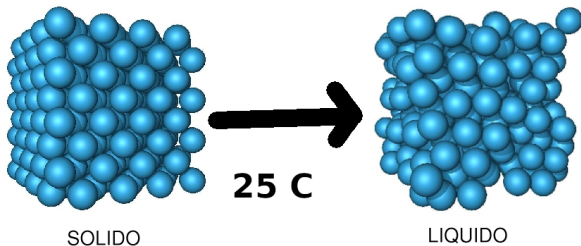
Perché un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.?



in questo modo il corpo caldo perde entropia, ma quello freddo ne guadagna di più

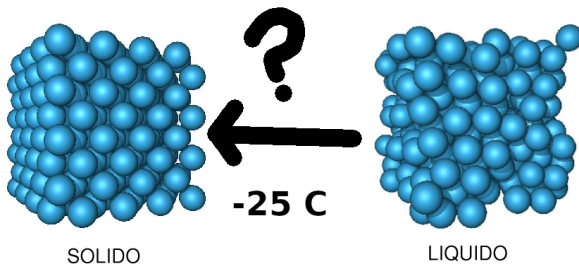
(C) L'acqua solidifica a bassa temperatura

- Un blocco di ghiaccio, portato a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, passa completamente allo stato liquido



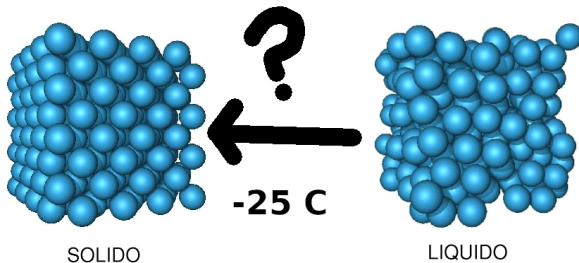
(C) L'acqua solidifica a bassa temperatura

- Ma un campione di acqua, portato a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, passa completamente allo stato **solido**



(C) L'acqua solidifica a bassa temperatura

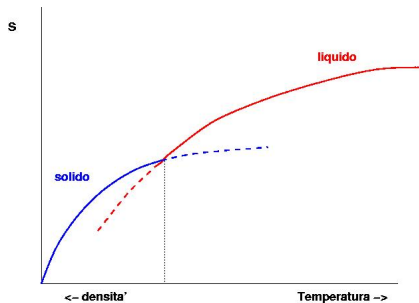
- Ma un campione di acqua, portato a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, passa completamente allo stato **solido**



- Il “disordine” diminuisce. Come fa l'entropia a aumentare?

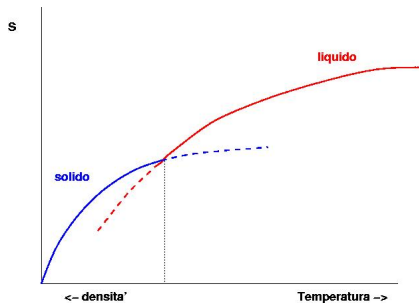
Fusione e cristallizzazione

- Abbiamo visto che l'entropia di una sostanza cresce con la temperatura



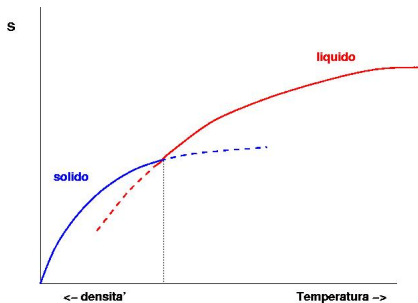
Fusione e cristallizzazione

- Abbiamo visto che l'entropia di una sostanza cresce con la temperatura
- ma cresce in modo diverso per **solido** e **liquido**



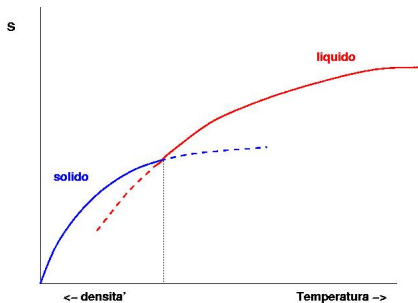
Fusione e cristallizzazione

- Abbiamo visto che l'entropia di una sostanza cresce con la temperatura
- ma cresce in modo diverso per **solido** e **liquido**
- ad alte temperature, l'**entropia del liquido è maggiore** di quella del solido

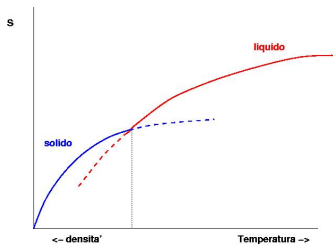


Fusione e cristallizzazione

- Abbiamo visto che l'entropia di una sostanza cresce con la temperatura
- ma cresce in modo diverso per **solido** e **liquido**
- ad alte temperature, l'**entropia del liquido è maggiore** di quella del solido
- a basse temperature, l'**entropia del solido è maggiore** di quella del liquido



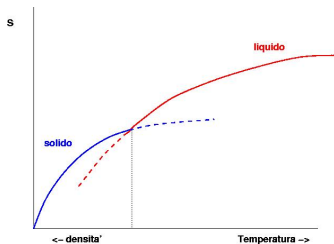
Spiegazione



Proviamo a dare una spiegazione:

- ad **alte temperature**, la densità è bassa e le molecole hanno più spazio per muoversi liberamente nel liquido che nel solido

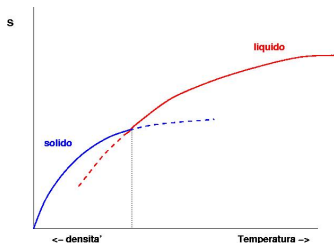
Spiegazione



Proviamo a dare una spiegazione:

- ad **alte temperature**, la densità è bassa e le molecole hanno più spazio per muoversi liberamente nel liquido che nel solido
 - ci sono più microstati nel liquido che nel solido

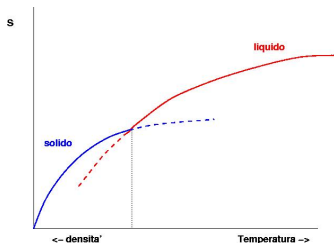
Spiegazione



Proviamo a dare una spiegazione:

- ad **alte temperature**, la densità è bassa e le molecole hanno più spazio per muoversi liberamente nel liquido che nel solido
 - ci sono più microstati nel liquido che nel solido
- a **basse temperature**, la densità è più alta e lo spazio a disposizione delle molecole è poco

Spiegazione



Proviamo a dare una spiegazione:

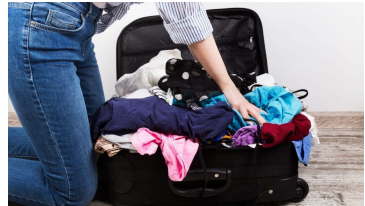
- ad **alte temperature**, la densità è bassa e le molecole hanno più spazio per muoversi liberamente nel liquido che nel solido
 - ci sono più microstati nel liquido che nel solido
- a **basse temperature**, la densità è più alta e lo spazio a disposizione delle molecole è poco
 - è più facile sistemare le molecole in modo regolare (cristallo) che casuale (liquido): ci sono più microstati "ordinati" che "disordinati"!

Sappiamo che...

- Quando lo spazio a disposizione è scarso, ci sono più modi di sistemare gli oggetti ordinatamente...

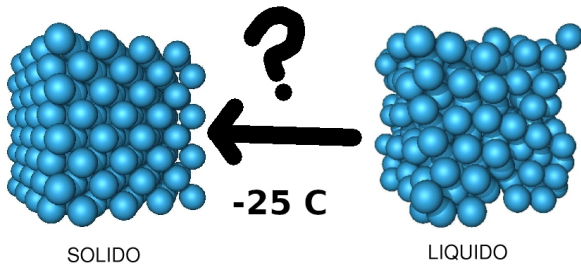


- ... che non disordinatamente





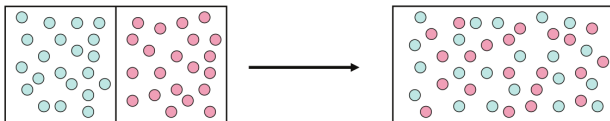
Perché l'acqua solidifica a bassa temperatura?



A bassa temperatura (alta densità) il solido, rispetto al liquido, ha più microstati e quindi maggiore entropia

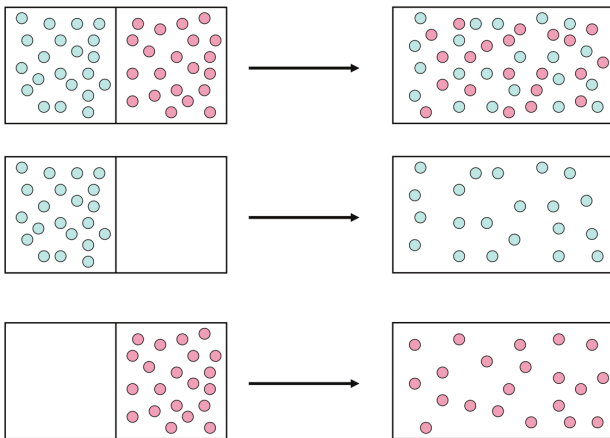
(D) Due liquidi si mescolano (ma non sempre)

- Quando due liquidi si mescolano, l'entropia aumenta perché nella miscela di $A + B$ ci sono **più microstati** che nei due liquidi separati



(D) Due liquidi si mescolano (ma non sempre)

- Infatti, il mescolamento equivale a due espansioni, del liquido A e del liquido B (entrambe con aumento di entropia)

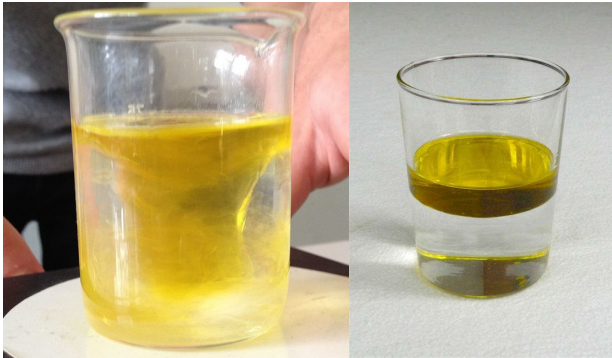


Alcuni liquidi non si mescolano!

- In molti casi, però, si vede che due liquidi A e B **non si mescolano** come acqua e alcool, anzi **se mescolati si separano**

Alcuni liquidi non si mescolano!

- In molti casi, però, si vede che due liquidi A e B **non si mescolano** come acqua e alcool, anzi **se mescolati si separano**
- Ad esempio: acqua e olio



Alcuni liquidi non si mescolano!

- In molti casi, però, si vede che due liquidi A e B **non si mescolano** come acqua e alcool, anzi **se mescolati si separano**
- Ad esempio: acqua e olio



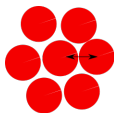
- In questo caso **l'entropia diminuisce?**

spiegazione

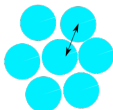
- Se le molecole dei due liquidi interagiscono poco (non si attraggono né respingono molto), le due sostanze si mescolano **sempre**

spiegazione

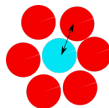
- Quando **non** si mescolano è perché esistono delle **interazioni** tra coppie di molecole: A-A, B-B e A-B:



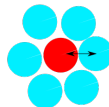
A-A



B-B

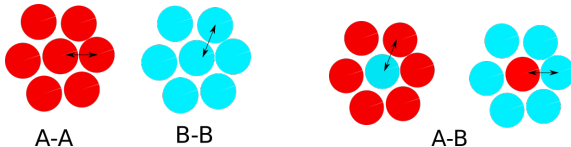


A-B



spiegazione

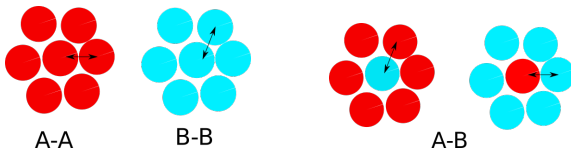
- Quando **non** si mescolano è perché esistono delle **interazioni** tra coppie di molecole: A-A, B-B e A-B:



- Se l'attrazione AA, BB è più **forte** che AB, allora A e B si separano

spiegazione

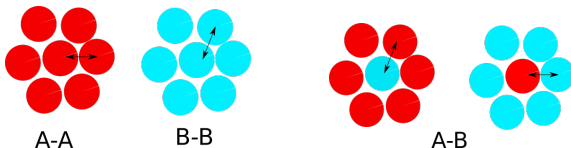
- Quando **non** si mescolano è perché esistono delle **interazioni** tra coppie di molecole: A-A, B-B e A-B:



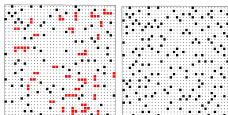
- Se l'attrazione AA, BB è più **forte** che AB, allora A e B si separano
 - infatti, i contatti A-B tendono a non formarsi

spiegazione

- Quando **non** si mescolano è perché esistono delle **interazioni** tra coppie di molecole: A-A, B-B e A-B:

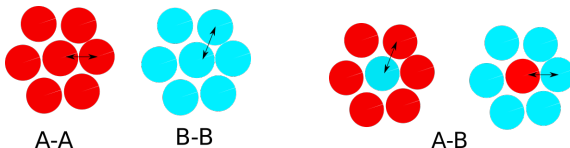


- Se l'attrazione AA, BB è più **forte** che AB, allora A e B si separano
 - infatti, i contatti A-B tendono a non formarsi
 - ricordiamo le disposizioni dei quadratini sulla griglia, nei macro-stati LIBERO e VINCOLATO

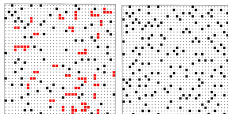


spiegazione

- Quando **non** si mescolano è perché esistono delle **interazioni** tra coppie di molecole: A-A, B-B e A-B:



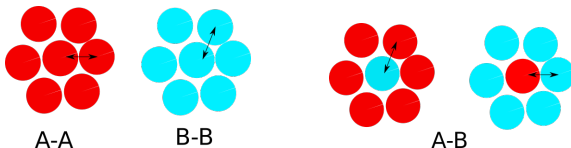
- Se l'attrazione AA, BB è più **forte** che AB, allora A e B si separano
 - infatti, i contatti A-B tendono a non formarsi
 - ricordiamo le disposizioni dei quadratini sulla griglia, nei macro-stati LIBERO e VINCOLATO



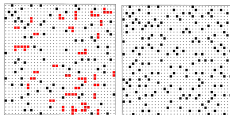
- qui la condizione è: non si devono formare contatti A-B

spiegazione

- Quando **non** si mescolano è perché esistono delle **interazioni** tra coppie di molecole: A-A, B-B e A-B:

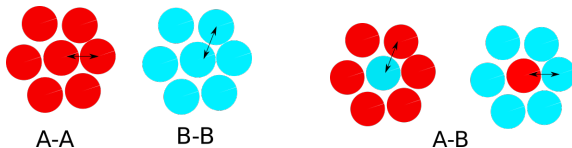


- Se l'attrazione AA, BB è più **forte** che AB, allora A e B si separano
 - infatti, i contatti A-B tendono a non formarsi
 - ricordiamo le disposizioni dei quadratini sulla griglia, nei macro-stati LIBERO e VINCOLATO



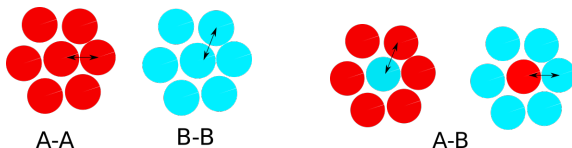
- qui la condizione è: non si devono formare contatti A-B
- lo stato vincolato ha entropia minore, e quindi non si forma

spiegazione alternativa



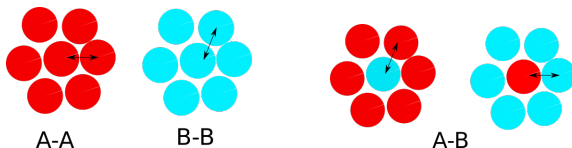
- Se l'attrazione AA, BB è più forte che AB, allora A e B si separano

spiegazione alternativa



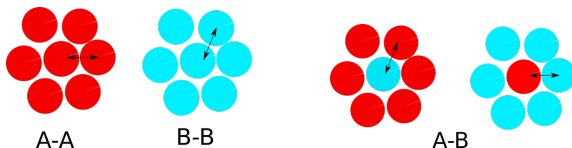
- Se l'attrazione AA, BB è più forte che AB, allora A e B si separano
 - per forzare il sistema a formare legami AB distruggendo legami AA e BB, si deve fornire energia

spiegazione alternativa



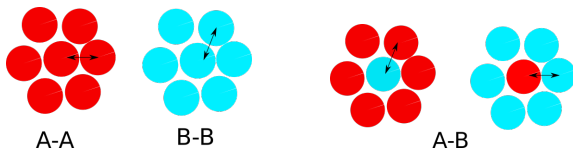
- Se l'attrazione AA, BB è più forte che AB, allora A e B si separano
 - per forzare il sistema a formare legami AB distruggendo legami AA e BB, si deve fornire energia
 - cioè -visto che il sistema è isolato- si consuma parte dell'energia cinetica (temperatura);

spiegazione alternativa



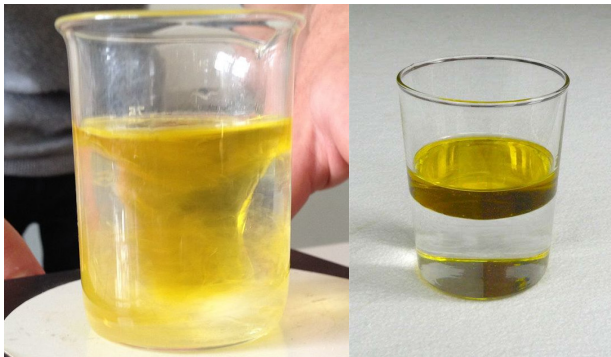
- Se l'attrazione AA, BB è più forte che AB, allora A e B si separano
 - per forzare il sistema a formare legami AB distruggendo legami AA e BB, si deve fornire energia
 - cioè -visto che il sistema è isolato- si consuma parte dell'energia cinetica (temperatura);
 - la T si abbassa, quindi si abbassa l'entropia

spiegazione alternativa



- Se l'attrazione AA, BB è più forte che AB, allora A e B si separano
 - per forzare il sistema a formare legami AB distruggendo legami AA e BB, si deve fornire energia
 - cioè -visto che il sistema è isolato- si consuma parte dell'energia cinetica (temperatura);
 - la T si abbassa, quindi si abbassa l'entropia
 - se questo abbassamento è maggiore della diminuzione di S dovuta al mescolamento, l'entropia totale diminuisce, e A e B non si mescolano

Perché acqua e olio non si mescolano?



Perché i microstati con molti contatti tra molecole di acqua e olio sono sfavoriti; la miscela dei due ha meno microstati e quindi minore entropia dei due liquidi separati

Indice

- 1 Introduzione
- 2 Esempi
- 3 Discussione
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni**

Abbiamo visto che:

Abbiamo visto che:

- L'entropia non misura un non ben chiarito “disordine”,

Abbiamo visto che:

- L'entropia non misura un non ben chiarito “disordine”, ma il numero di microstati compatibili con un certo stato macroscopico

Abbiamo visto che:

- L'entropia non misura un non ben chiarito “disordine”, ma il **numero di microstati** compatibili con un certo stato macroscopico
- Quando si modifica l'equilibrio, il sistema si porta spontaneamente nello **stato più probabile**, cioè quello con il **massimo numero di microstati**;

Abbiamo visto che:

- L'entropia non misura un non ben chiarito “disordine”, ma il **numero di microstati** compatibili con un certo stato macroscopico
- Quando si modifica l'equilibrio, il sistema si porta spontaneamente nello **stato più probabile**, cioè quello con il **massimo numero di microstati**; ovvero, nello stato a maggiore **entropia**

Abbiamo visto che:

- L'entropia non misura un non ben chiarito “disordine”, ma il **numero di microstati** compatibili con un certo stato macroscopico
- Quando si modifica l'equilibrio, il sistema si porta spontaneamente nello **stato più probabile**, cioè quello con il **massimo numero di microstati**; ovvero, nello stato a maggiore **entropia**
- Lo stato più probabile **non necessariamente è quello più disordinato** (qualunque cosa questo voglia dire)

Non abbiamo visto che:

- In molti casi, in una trasformazione si ha davvero una **diminuzione di entropia nel sistema**
- Questo può avvenire perché contemporaneamente si ha un aumento di entropia da un'altra parte, per esempio nell'ambiente

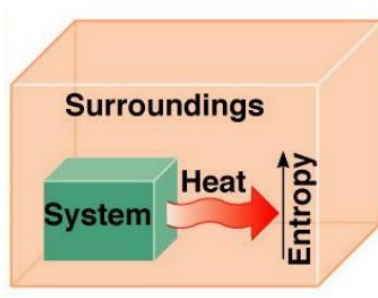
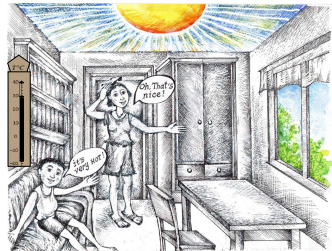


Figura: L'insieme Sistema+Ambiente è isolato. L'entropia del sistema può diminuire se quella dell'ambiente aumenta di più.

perché la stanza di destra ha un'entropia maggiore?



Low Entropy Room



High Entropy Room

Riferimenti bibliografici

Arieh Ben-Naim. *Discover entropy and the second law of thermodynamics: A playful way of discovering a law of nature*. World Scientific, 2010.

Arieh Ben-Naim. Entropy: Order or information. *Journal of Chemical Education*, 88(5):594–596, 2011. doi: 10.1021/ed100922x.
URL <https://doi.org/10.1021/ed100922x>.

Frank L Lambert. Shuffled cards, messy desks, and disorderly dorm rooms-examples of entropy increase? nonsense! *Journal of Chemical Education*, 76(10):1385, 1999.

Daniel F Styer. Insight into entropy. *American Journal of Physics*, 68(12):1090–1096, 2000.