

“Ma cos'è questo DISORDINE?...” La vera natura dell'entropia

Giorgio F. Signorini

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

Pianeta Galileo 2025-2026



Sommario

1 Introduzione

Sommario

- 1 Introduzione
- 2 Esempi

Sommario

- 1 Introduzione
- 2 Esempi
- 3 Discussione

Sommario

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

Sommario

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

- Si parla molto di **entropia** ...

entropy book

Q All Images Videos News Maps Shopping Settings

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

ROBERT KOOB
1000 x 1581

A Student's Guide...
432 x 648

entropy-book.com...
600 x 861

A New World View
430 x 225

High-Entropy Alloys
757 x 1040

ROBERT RAKER
ENTROPY
500 x 680

The Entropy of Everything: Why Things Happen
1750 x 2625

Thermodynamics
768 x 1024

Fundamentals of Thermodynamics
1061 x 1468

Entropy by Robert Koob
ebay.com

A Student's Guide to Entropy
cambridge.org

entropy-book.com...
phenoscience.com

Entropy by Jeremy Rifkin
goodreads.com

Read High-Entropy Alloys
scribd.com

ENTROPY Read Online
readernook.com

The Entropy of Everything
matthewphilon.com

Best Books for Thermodynamics
gradesup.co

Fundamentals of Thermodynamics
flickart.com

Advanced Thermodynamics
600 x 800

Entropy and Information Theory
330 x 500

ENTROPY
50 x 804

Thermodynamics 3rd Edition
34 x 504

Energy and Entropy
838 x 2738

ENTROPY
GERALD 78094860

Entropy (Atraphy, ...
398 x 275

Entropy
1015 x 2754

ENTROPY - Boc
gerardinkilby.com

Advanced Thermodynamics...
madreshop.com

Entropy and Information Theory
e-booksdirectory.com

Entropy - KSP Books...
books.ksplibrary.org

20 Best Entropy Books
bookauthority.org

Energy and Entropy
taylorfrancis.com

Entropy 9781999...
ebay.com

Entropy (Atraphy, ...
pinterest.com

Entropy | Princeton...
press.princeton.edu

ENTROPY - Boc
gerardinkilby.com

Entropy by Jeremy Rifkin
goodreads.com

Energy and Entropy...
walmart.com

Entropy by Robert Raker
goodreads.com

The Entropy Law and the Economic Process by Nichol...
goodreads.com

Amazon.com: Entropy and Information Theory
amazon.com

- Il termine “entropia” ha un preciso significato in termodinamica, ma nella cultura generale è associato all’idea di disordine:



- ... anche se in ambito scientifico sono molti gli autori che mettono in guardia contro l'identificazione di “entropia” con “disordine”:



- ... anche se in ambito scientifico sono molti gli autori che mettono in guardia contro l'identificazione di "entropia" con "disordine":



Entropia: misura del disordine?
di Marco Marchetti

Foto: Riccardo Pizzani - Contrasto / Contrasto, Riccardo Pizzani - Contrasto / Contrasto

Un'immagine di un sistema fisico in equilibrio termodinamico con un sistema di riferimento esterno. Il sistema è descritto da un insieme di variabili termodinamiche: temperatura, pressione, volume, ecc. L'entropia è una funzione di stato che misura il grado di disordine del sistema. In un sistema in equilibrio, l'entropia è massima. Quando il sistema si evolve verso uno stato di maggiore disordine, l'entropia aumenta.

Entropia e disordine

La parola "entropia" è spesso usata in modo impreciso per indicare il "disordine". In realtà, l'entropia è una funzione di stato che misura il grado di disordine del sistema. In un sistema in equilibrio, l'entropia è massima. Quando il sistema si evolve verso uno stato di maggiore disordine, l'entropia aumenta.

... [Marchetti et al., 2011]:

Qualcosa non va...nella definizione dell'entropia

Bene, iniziamo col dire subito che la classica definizione di entropia, quale funzione di stato termodinamica che misura il grado di disordine di un sistema, **NON** è corretta!

Giugno – Agosto 2011

CnS – La Chimica nella Scuola

Sommario

- 1 **Introduzione**
 - Entropia e processi spontanei
 - Principio di massima entropia
 - Domande e risposte
- 2 Esempi
- 3 Discussione
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

Cos'è l'entropia?

- 1 concetto filosofico?

Cos'è l'entropia?

- 1 concetto filosofico?
- 2 proprietà di un insieme di oggetti?

Cos'è l'entropia?

- 1 concetto filosofico?
- 2 proprietà di un insieme di oggetti?
- 3 grandezza fisica misurabile?

Cos'è l'entropia?

- 1 concetto filosofico?
- 2 proprietà di un insieme di oggetti?
- 3 grandezza fisica misurabile?
- 4 grandezza fisica non misurabile?

Cos'è l'entropia?

- 1 concetto filosofico?
- 2 proprietà di un insieme di oggetti?
- 3 **grandezza fisica misurabile?**
- 4 grandezza fisica non misurabile?

Cos'è l'entropia?

- 1 concetto filosofico?
- 2 proprietà di un insieme di oggetti?
- 3 **grandezza fisica misurabile?**
- 4 grandezza fisica non misurabile?

Table A3.1 Thermodynamic data for organic compounds at 298.15 K

	$M/(g\ mol^{-1})$	$\Delta_f H^\ominus / (kJ\ mol^{-1})$	$\Delta_f G^\ominus / (kJ\ mol^{-1})$	$S_m^\ominus / (J\ K^{-1}\ mol^{-1})^\ddagger$
C(s) (graphite)	12.011	0	0	5.740
C(s) (diamond)	12.011	+1.895	+2.910	2.377
CO ₂ (g)	44.040	-393.51	-394.36	213.74

Entropia

Cos'è l'entropia?

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

Entropia

Cos'è l'entropia?

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

- Esempi di processi **spontanei** (e non-spontanei) :

Entropia

Cos'è l'entropia?

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

- Esempi di processi **spontanei** (e non-spontanei) :
 -

Entropia

Cos'è l'entropia?

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

- Esempi di processi **spontanei** (e non-spontanei) :
 -
 -

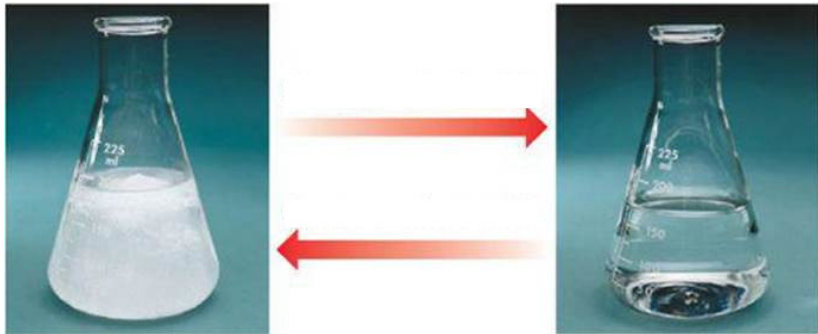
Processi spontanei



Processi spontanei



Processi spontanei



Processi spontanei



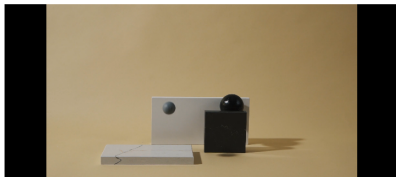
Processi spontanei



In che verso è spontaneo?

- Il moto di una pallina:

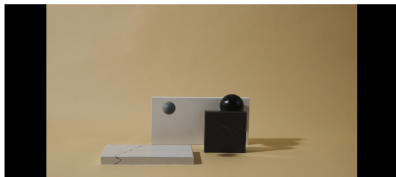
(1)



In che verso è spontaneo?

- Il moto di una pallina:

(2)



In che verso è spontaneo (2)?

- Il fumo di una ciminiera:

(1)



In che verso è spontaneo (2)?

- Il fumo di una ciminiera:

(2)



In che verso è spontaneo (3)?

- Liquido denso (colorato) in liquido meno denso (incolore):

(1)



In che verso è spontaneo (3)?

- Liquido denso (colorato) in liquido meno denso (incolore):

(2)



Sommario

- 1 **Introduzione**
 - Entropia e processi spontanei
 - **Principio di massima entropia**
 - Domande e risposte
- 2 Esempi
- 3 Discussione
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

“Un sistema

evolve verso uno stato

a **entropia** maggiore

”

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

“Un sistema

evolve verso uno stato

a **entropia** maggiore

”

- le precisazioni sono importanti!

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

“Un sistema

evolve verso uno stato

a **entropia** maggiore

”

- le precisazioni sono importanti!

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

“Un sistema *termodinamico*

evolve verso uno stato

a **entropia** maggiore

”

- le precisazioni sono importanti!

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

“Un sistema *termodinamico isolato*,

evolve verso uno stato

a **entropia** maggiore

”

- le precisazioni sono importanti!

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

“Un sistema *termodinamico isolato*,
in equilibrio,

evolve verso uno stato

a **entropia** maggiore

”

- le precisazioni sono importanti!

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

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

- le precisazioni sono importanti!

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

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

- le precisazioni sono importanti!

Entropia

entropia

L'entropia S è una grandezza che determina la direzione di **evoluzione spontanea** di alcuni processi fisici

principio

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

- le precisazioni sono importanti!

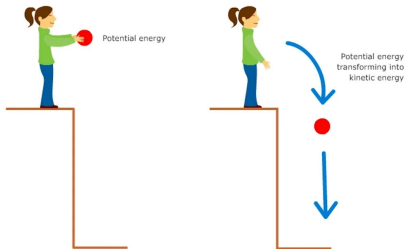
Energia potenziale

- Analogia con l'energia potenziale:
- Energia di un corpo si distingue in **potenziale** e **cinetica**



Energia potenziale

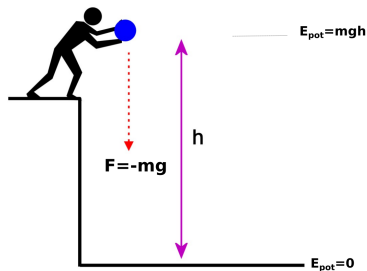
- Analogia con l'energia potenziale:
- Principio: un corpo si muove verso minore energia potenziale



© 2007-2010 The University of Waikato | www.sciencelearn.org.nz

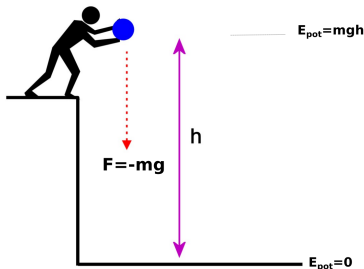
Energia potenziale

- Analogia con l'energia potenziale:
- Principio: un corpo si muove verso minore energia potenziale



Energia potenziale

- Analogia con l'energia potenziale:
- Principio: un corpo si muove verso minore energia potenziale



- Detto meglio:

energia potenziale

un corpo in un campo di forze conservative, in stato di quiete, se lasciato libero, si muove verso zone a minore **energia potenziale**

principi a confronto

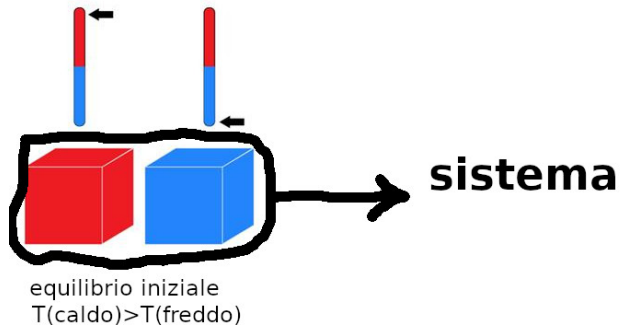
energia potenziale

“un corpo in un campo di forze conservative, in stato di quiete, se lasciato libero, si muove verso zone a **minore energia potenziale**”

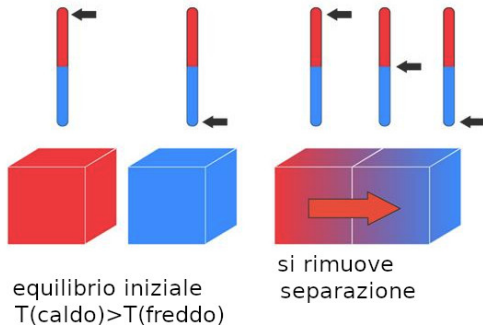
entropia

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

evoluzione spontanea: da un equilibrio a un altro



evoluzione spontanea: da un equilibrio a un altro



evoluzione spontanea: da un equilibrio a un altro

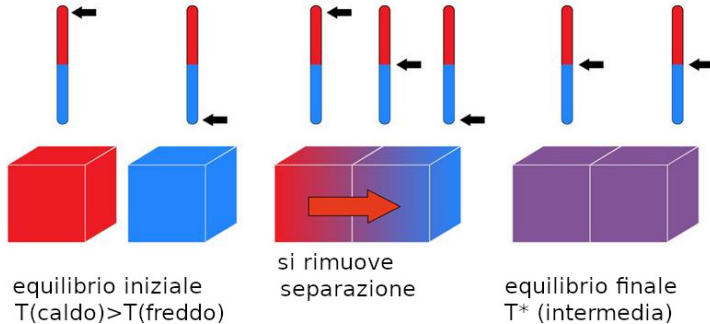
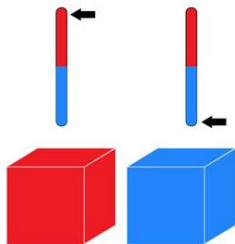


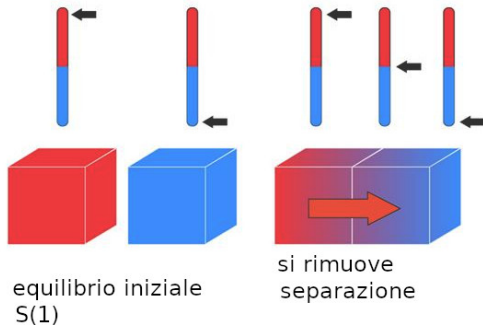
Figura: Se si mettono a contatto i due contenitori, il calore fluisce spontaneamente da quello a T maggiore verso quello a T minore.

verso entropia maggiore



equilibrio iniziale
 $S(1)$

verso entropia maggiore



verso entropia maggiore

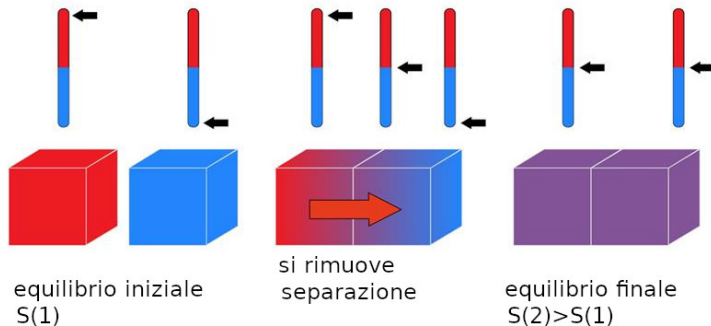


Figura: L'entropia finale del sistema complessivo (isolato) è maggiore di quella iniziale

Sommario

- 1 **Introduzione**
 - Entropia e processi spontanei
 - Principio di massima entropia
 - **Domande e risposte**
- 2 Esempi
- 3 Discussione
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

cos'è l'entropia? e perché aumenta?

Principio di max entropia (Secondo principio della termodinamica)

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

È naturale chiedersi:

cos'è l'entropia? e perché aumenta?

Principio di max entropia (Secondo principio della termodinamica)

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

È naturale chiedersi:

- 1 Che cos'è l'entropia?

cos'è l'entropia? e perché aumenta?

Principio di max entropia (Secondo principio della termodinamica)

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

È naturale chiedersi:

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

cos'è l'entropia? e perché aumenta?

Principio di max entropia (Secondo principio della termodinamica)

“Un sistema termodinamico isolato, in equilibrio, se le condizioni interne che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato di equilibrio 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?

cos'è l'entropia? e perché aumenta?

Principio di max entropia (Secondo principio della termodinamica)

“Un sistema termodinamico isolato, in equilibrio, se le condizioni interne che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato di equilibrio 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**”

cos'è l'entropia? e perché aumenta?

Principio di max entropia (Secondo principio della termodinamica)

“Un sistema termodinamico isolato, in equilibrio, se le condizioni interne che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato di equilibrio 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!

cos'è l'entropia? e perché aumenta?

Principio di max entropia (Secondo principio della termodinamica)

“Un sistema termodinamico isolato, in equilibrio, se le condizioni interne che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato di equilibrio 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!**

cos'è l'entropia? e perché aumenta?

Principio di max entropia (Secondo principio della termodinamica)

“Un sistema termodinamico isolato, in equilibrio, se le condizioni interne che determinano l'equilibrio sono rimosse, evolve verso uno stato di equilibrio 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!**
- Vediamo intanto con quali esempi vengono giustificate...

Le due facce dell'entropia

Precisazione:

L'entropia ha due aspetti:

Le due facce dell'entropia

Precisazione:

L'entropia ha due aspetti:

- 1 termodinamico (si fa riferimento al [calore](#))

Le due facce dell'entropia

Precisazione:

L'entropia ha due aspetti:

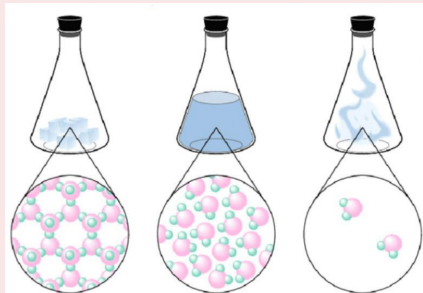
- 1 termodinamico (si fa riferimento al **calore**)
- 2 statistico (si fa riferimento alle **molecole** che compongono il sistema)

Le due facce dell'entropia

Precisazione:

L'entropia ha due aspetti:

- 1 termodinamico (si fa riferimento al **calore**)
 - 2 statistico (si fa riferimento alle **molecole** che compongono il sistema)
- Quando si parla di **disordine**, si adotta il punto di vista **statistico**:

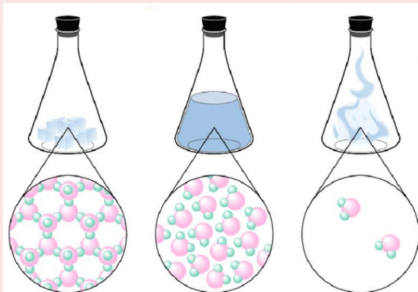


Le due facce dell'entropia

Precisazione:

L'entropia ha due aspetti:

- 1 termodinamico (si fa riferimento al **calore**)
- 2 statistico (si fa riferimento alle **molecole** che compongono il sistema)
- Quando si parla di **disordine**, si adotta il punto di vista **statistico**:
 - sostanza = insieme di molecole che seguono le leggi della meccanica



(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

Indice

1 Introduzione

2 Esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente
- (D) Due sostanze si mescolano

3 Discussione

4 Rivediamo gli esempi

5 Conclusioni

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente
- (D) Due sostanze si mescolano

In un tipico libro di chimica ...



Figura 10.6

Dentro la scatola, i fiammiferi sono tutti allineati nella medesima direzione e nel medesimo verso: sono disposti in modo ordinato; i fiammiferi, cadendo a terra, si sparpagliano in maniera disordinata e casuale e quello riportato è solo uno dei tantissimi modi in cui si possono disporre: il sistema è passato da uno stato ordinato e di minore entropia a un sistema più disordinato e di maggiore entropia.

(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

Sommario

1 Introduzione

2 Esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente
- (D) Due sostanze si mescolano

3 Discussione

4 Rivediamo gli esempi

5 Conclusioni

(A) Un gas si espande nel vuoto

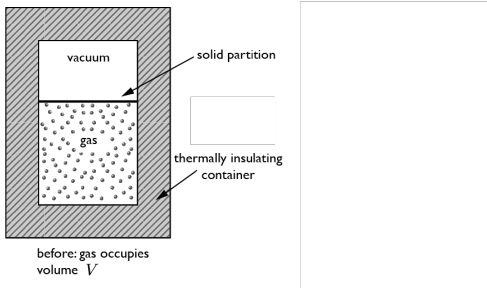
(B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

(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

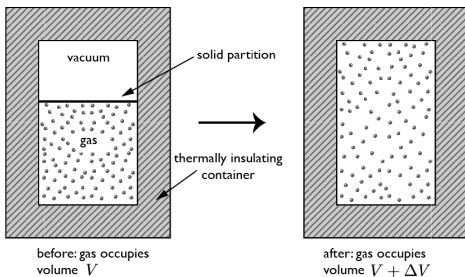
(B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

(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”

(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

Sommario

1 Introduzione

2 Esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente
- (D) Due sostanze si mescolano

3 Discussione

4 Rivediamo gli esempi

5 Conclusioni

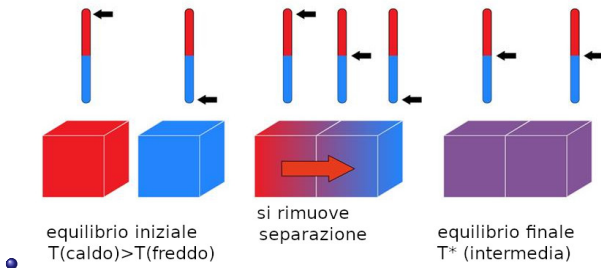
(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

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



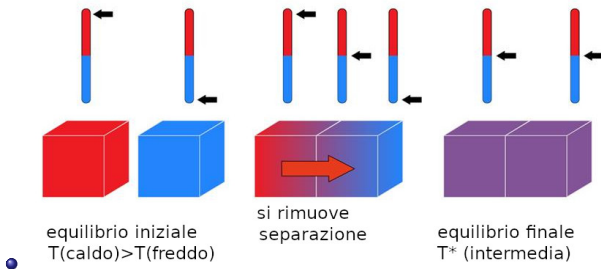
(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

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



- la temperatura si uniforma

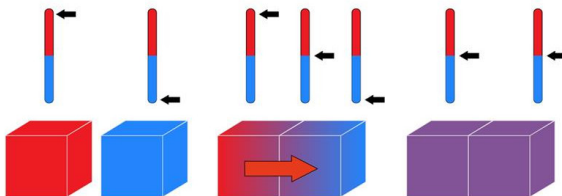
(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

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



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

si rimuove
 separazione

equilibrio finale
 T^* (intermedia)

- 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”

(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

Sommario

1 Introduzione

2 Esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- **(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente**
- (D) Due sostanze si mescolano

3 Discussione

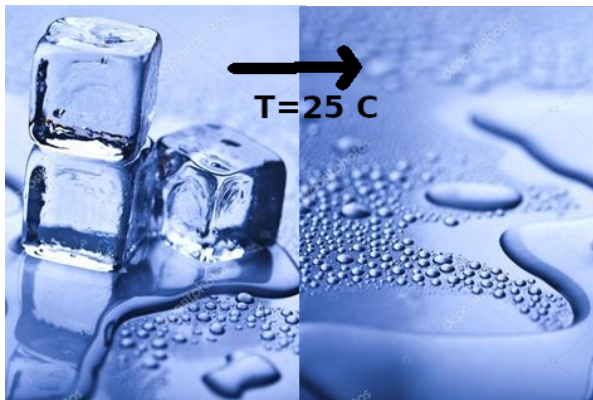
4 Rivediamo gli esempi

5 Conclusioni

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente
- (D) Due sostanze si mescolano

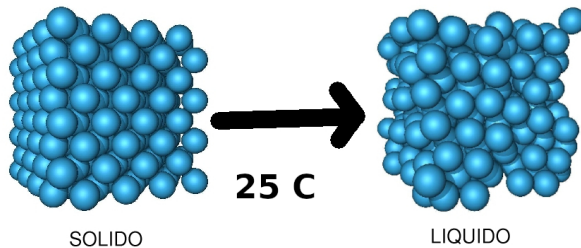
(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

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



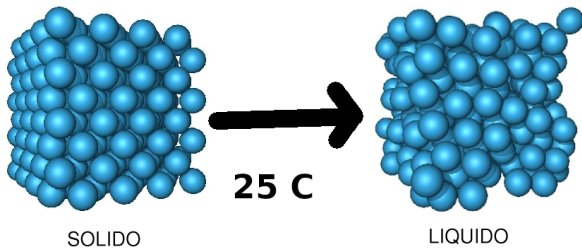
(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

- 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 è spontaneo perché porta ad un aumento di disordine”

(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) Due sostanze si mescolano

Sommario

1 Introduzione

2 Esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente
- **(D) Due sostanze si mescolano**

3 Discussione

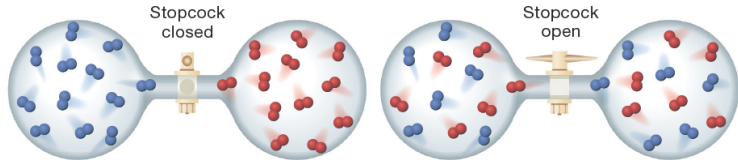
4 Rivediamo gli esempi

5 Conclusioni

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente
- (D) Due sostanze si mescolano

(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

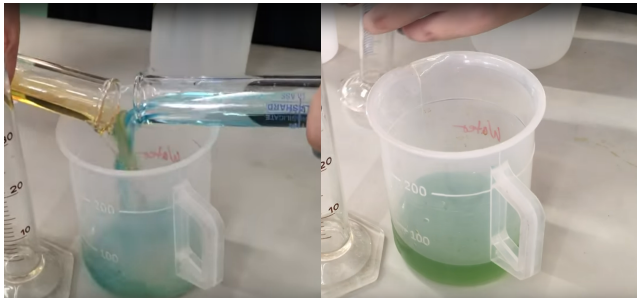


Figura: Acqua e etanolo (qui colorati artificialmente in giallo e blu) si mescolano.

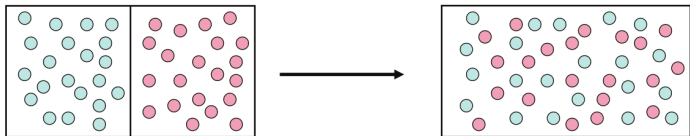
(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) Il ghiaccio fonde a temperatura ambiente

(D) **Due sostanze 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**
 - Cos'è il disordine?
 - Un esempio banale
 - Passiamo alla termodinamica
 - La misura dell'entropia
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

Domande

- Secondo la spiegazione data comunemente:

Domande

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

Domande

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

Domande

- Secondo la spiegazione data comunemente:
 - “l'entropia misura il **disordine**”
 - “l'entropia aumenta perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”
- Due aspetti problematici:

Domande

- Secondo la spiegazione data comunemente:
 - “l'entropia misura il **disordine**”
 - “l'entropia aumenta perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”
- Due aspetti problematici:
 - ④ Cosa si intende esattamente per “disordine” di un sistema?

Domande

- Secondo la spiegazione data comunemente:
 - “l'entropia misura il **disordine**”
 - “l'entropia aumenta perché **la natura tende verso il caos o il disordine**”
- Due aspetti problematici:
 - 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**?

Sommario

- 1 Introduzione
- 2 Esempi
- 3 **Discussione**
 - **Cos'è il disordine?**
 - Un esempio banale
 - Passiamo alla termodinamica
 - La misura dell'entropia
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

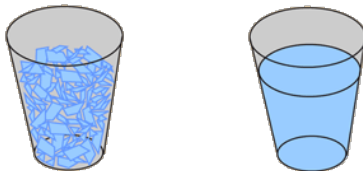
Cos'è il disordine? Ed è vero che aumenta sempre?

- Esempio: un bicchiere con scaglie di ghiaccio e lo stesso bicchiere con la stessa acqua, liquida:



Cos'è il disordine? Ed è vero che aumenta sempre?

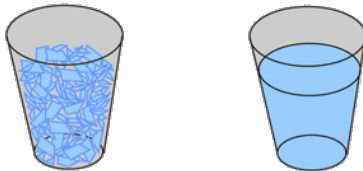
- Esempio: un bicchiere con scaglie di ghiaccio e lo stesso bicchiere con la stessa acqua, liquida:



- quale dei due sistemi è più “disordinato”?

Cos'è il disordine? Ed è vero che aumenta sempre?

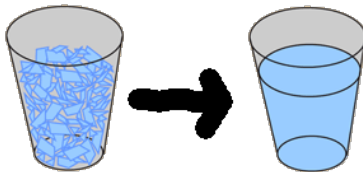
- Esempio: un bicchiere con scaglie di ghiaccio e lo stesso bicchiere con la stessa acqua, liquida:



- quale dei due sistemi è più “disordinato”?
 - Molti rispondono: quello con scaglie di ghiaccio

Cos'è il disordine? Ed è vero che aumenta sempre?

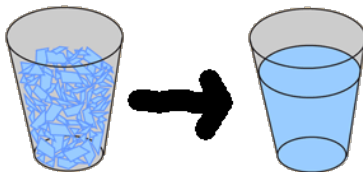
- Esempio: un bicchiere con **scaglie di ghiaccio** e lo stesso bicchiere con la stessa **acqua**, liquida:



- quale dei due sistemi è più “**disordinato**”?
 - Molti rispondono: quello con scaglie di ghiaccio
- Però: a temperatura ambiente, **il primo si trasforma nel secondo**

Cos'è il disordine? Ed è vero che aumenta sempre?

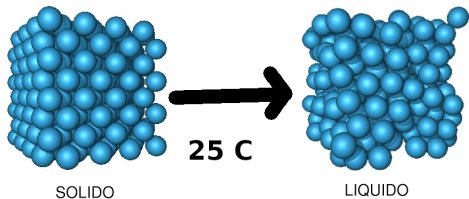
- Esempio: un bicchiere con scaglie di ghiaccio e lo stesso bicchiere con la stessa acqua, liquida:



- quale dei due sistemi è più “disordinato”?
 - Molti rispondono: quello con scaglie di ghiaccio
- Però: a temperatura ambiente, **il primo si trasforma nel secondo**
 - Allora, **si va dal disordine verso l'ordine?**

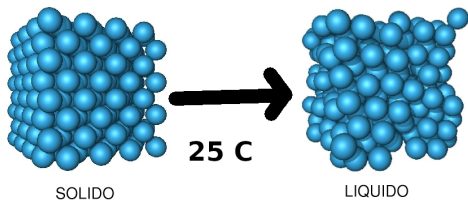
Cos'è il disordine? Ed è vero che aumenta sempre?

- Non cambia molto se guardiamo la sostanza a livello **microscopico** (una scaglia). È chiaro che il liquido ha una struttura “più disordinata”, quindi **quando il solido fonde aumenta il suo disordine**:

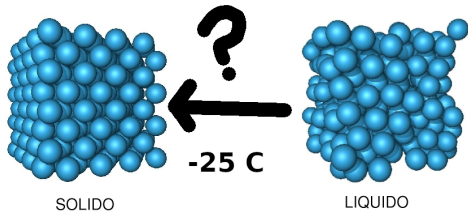


Cos'è il disordine? Ed è vero che aumenta sempre?

- Non cambia molto se guardiamo la sostanza a livello **microscopico** (una scaglia). È chiaro che il liquido ha una struttura “più disordinata”, quindi **quando il solido fonde aumenta il suo disordine**:



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



Cosa si intende per “disordine”?

- Il concetto di disordine è **soggettivo**

Cosa si intende per "disordine"?

- Il concetto di disordine è **soggettivo**
- Quale delle due disposizioni è più "disordinata"?



Cosa si intende per "disordine"?

- Quale delle due configurazioni è più "disordinata"?



Cosa si intende per "disordine"?

- Quale delle due configurazioni è più "disordinata"?



- (Scopriremo che in realtà la seconda stanza ha entropia maggiore)

Cosa si intende per “disordine”?

- Quale delle due configurazioni è più “disordinata”?



Cosa si intende per "disordine"?

- Quale delle due configurazioni è più "disordinata"?



- (Scopriremo che in realtà i due sistemi hanno [la stessa entropia](#))

Cosa si intende per "disordine"?

- Quale delle due configurazioni è più "disordinata"?

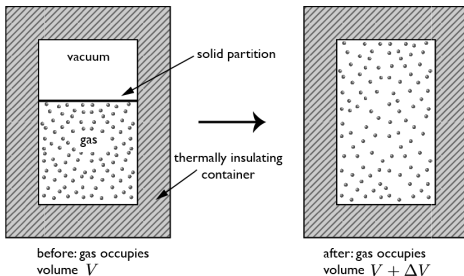


Figura: il sistema a maggior volume è davvero "più disordinato"?

Cosa si intende per "disordine"?

- Quale delle due configurazioni è più "disordinata"?



Figura: confronto dei due campioni di gas

Cosa si intende per "disordine"?

- Quale delle due configurazioni è più "disordinata"?

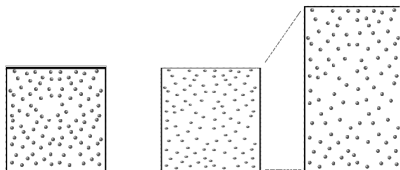
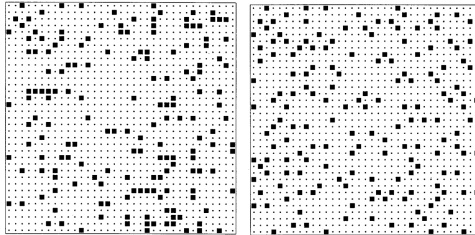


Figura: Se si "comprime" il gas di destra, la disposizione degli atomi è praticamente uguale a quella di quello di sinistra. **Quindi, stessa entropia?**

Simulazioni

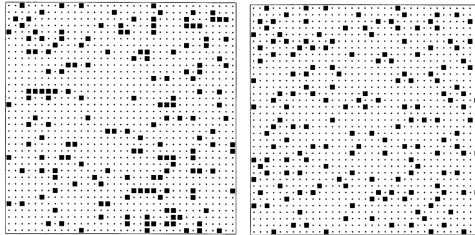
- Un ricercatore ([Styer, 2000](#)) ha generato al computer configurazioni di quadratini su una griglia usando due programmi diversi:



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

Simulazioni

- Un ricercatore (Styer, 2000) ha generato al computer configurazioni di quadratini su una griglia usando due programmi diversi:



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

- Quale configurazione è "più disordinata"?

Sommario

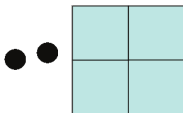
- 1 Introduzione
- 2 Esempi
- 3 **Discussione**
 - Cos'è il disordine?
 - **Un esempio banale**
 - Passiamo alla termodinamica
 - La misura dell'entropia
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

Un esempio banale

- Per chiarire il rapporto tra entropia e disordine, partiamo da un esempio semplicissimo

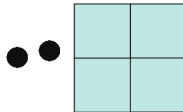
Un esempio banale

- Per chiarire il rapporto tra entropia e disordine, partiamo da un esempio semplicissimo
- Abbiamo delle pedine che possono andare in un certo numero di caselle, una per casella

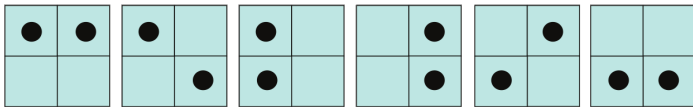


Un esempio banale

- Per chiarire il rapporto tra entropia e disordine, partiamo da un esempio semplicissimo
- Abbiamo delle pedine che possono andare in un certo numero di caselle, una per casella



- Ci sono molti modi (configurazioni) di disporre le pedine:
2 pedine in 4 caselle \rightarrow 6 configurazioni:



Istantanee e sovrapposizione

- Ora immaginiamo che le pedine si muovano **molto velocemente**.

Istantanee e sovrapposizione

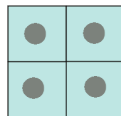
- Ora immaginiamo che le pedine si muovano **molto velocemente**.
- Non riesco a vedere una singola “istantanea” (una configurazione) ma solo la **sovrapposizione** di tutte le configurazioni

Istantanee e sovrapposizione

- Ora immaginiamo che le pedine si muovano **molto velocemente**.
- Non riesco a vedere una singola “istantanea” (una configurazione) ma solo la **sovrapposizione** di tutte le configurazioni
- in ogni casella vedrò una “immagine parziale” di pedina pari alla **probabilità** che lì ci sia una pedina:



CONFIGURAZIONI (MICRO-STATI)



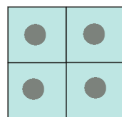
(MACRO-STATO)

Istantanee e sovrapposizione

- Ora immaginiamo che le pedine si muovano **molto velocemente**.
- Non riesco a vedere una singola “istantanea” (una configurazione) ma solo la **sovrapposizione** di tutte le configurazioni
- in ogni casella vedrò una “immagine parziale” di pedina pari alla **probabilità** che lì ci sia una pedina:



CONFIGURAZIONI (MICRO-STATI)

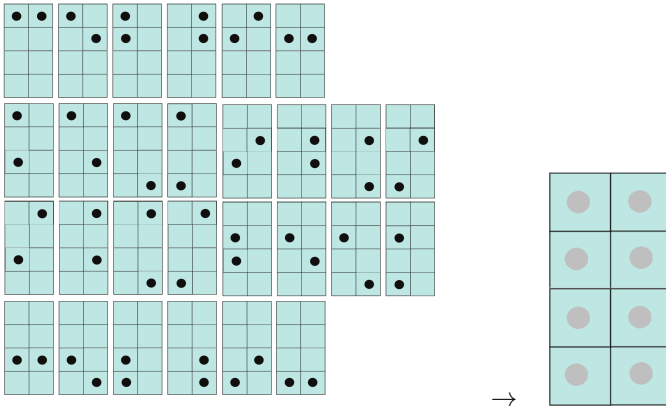


(MACRO-STATO)

- (la probabilità di trovare una pedina in una data casella è il 50% ($= \frac{3}{6}$))

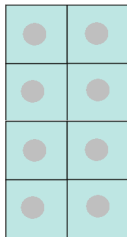
Aumentiamo le caselle

- Se ho 2 pedine in 8 caselle \rightarrow 28 micro-stati:



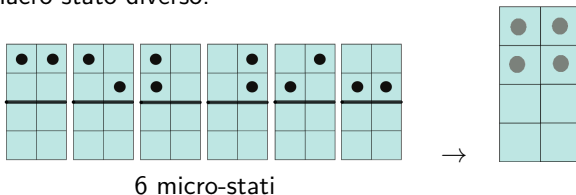
Aumentiamo le caselle

- La probabilità di trovare una pedina in una casella è sempre uguale in tutte le caselle, ma ora è il 25% ($= \frac{7}{28}$):

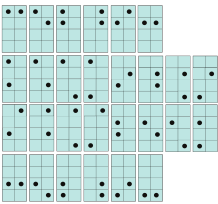
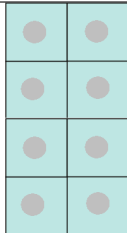
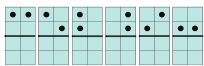
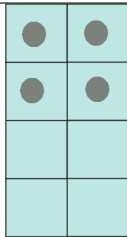


Configurazioni non accessibili

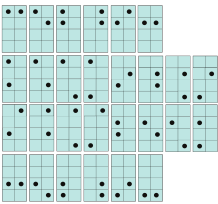
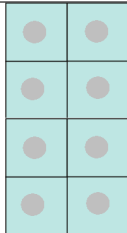
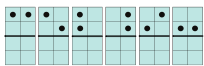
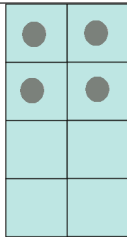
- Notare che se alcune configurazioni non fossero accessibili vedrei un macro-stato diverso:



Macro-stati a confronto

<i>micro-stati</i>	<i>N. micro-stati</i>	<i>macro-stato</i>
	28	
	6	

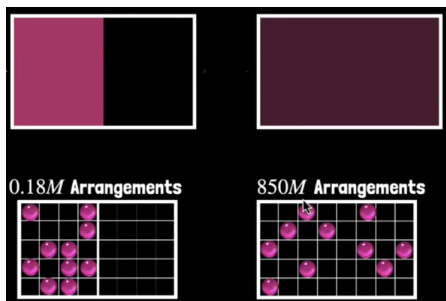
Macro-stati a confronto

<i>micro-stati</i>	<i>N. micro-stati</i>	<i>macro-stato</i>
	28	
	6	

Aumentiamo ancora le dimensioni

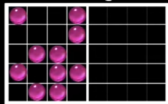
- Possiamo aumentare il numero di caselle e/o di pedine:

caselle	pedine	n. configurazioni vincolate ($\frac{1}{2}$ caselle)	n. configurazioni totali
8	2	6	28
100	2	1225	4950
40	10	184.756	847.660.528

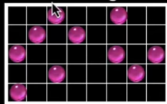


Definizione e comportamento del “sistema”

0.18M Arrangements



850M Arrangements



- “sistema” definito da: n. pedine (10), n. caselle (40)

Definizione e comportamento del “sistema”



- “sistema” definito da: n. pedine (10), n. caselle (40)
- senza vincoli interni assume tutti i microstati possibili

Definizione e comportamento del “sistema”



- “sistema” definito da: n. pedine (10), n. caselle (40)
- senza vincoli interni assume tutti i microstati possibili
 - aspetto macroscopico = uniforme

Definizione e comportamento del “sistema”



- “sistema” definito da: n. pedine (10), n. caselle (40)
- senza vincoli interni assume tutti i microstati possibili
 - aspetto macroscopico = uniforme
- se inserisco un vincolo, riduco il numero dei microstati

Definizione e comportamento del “sistema”



- “sistema” definito da: n. pedine (10), n. caselle (40)
- senza vincoli interni assume tutti i microstati possibili
 - aspetto macroscopico = uniforme
- se inserisco un vincolo, riduco il numero dei microstati
 - aspetto macroscopico = **non** uniforme

Definizione e comportamento del “sistema”



- “sistema” definito da: n. pedine (10), n. caselle (40)
- senza vincoli interni assume tutti i microstati possibili
 - aspetto macroscopico = uniforme
- se inserisco un vincolo, riduco il numero dei microstati
 - aspetto macroscopico = **non** uniforme
- se rimuovo il vincolo, il sistema può nuovamente assumere tutti i microstati

Definizione e comportamento del “sistema”



- “sistema” definito da: n. pedine (10), n. caselle (40)
- senza vincoli interni assume tutti i microstati possibili
 - aspetto macroscopico = uniforme
- se inserisco un vincolo, riduco il numero dei microstati
 - aspetto macroscopico = **non** uniforme
- se rimuovo il vincolo, il sistema può nuovamente assumere tutti i microstati
 - stato macroscopico ritorna uniforme, **spontaneamente**

Definizione e comportamento del “sistema”



- “sistema” definito da: n. pedine (10), n. caselle (40)
- senza vincoli interni assume tutti i microstati possibili
 - aspetto macroscopico = uniforme
- se inserisco un vincolo, riduco il numero dei microstati
 - aspetto macroscopico = **non** uniforme
- se rimuovo il vincolo, il sistema può nuovamente assumere tutti i microstati
 - stato macroscopico ritorna uniforme, **spontaneamente**

Il sistema assume “spontaneamente” tutti i microstati accessibili, creando il macrostato corrispondente al **massimo numero di microstati**

... vi ricorda qualcosa?

- Nell'evoluzione del sistema da vincolato a non-vincolato, aumenta il **numero di microstati** possibili

... vi ricorda qualcosa?

- Nell'evoluzione del sistema da vincolato a non-vincolato, aumenta il **numero di microstati** possibili
- Se si definisce l'**entropia** del sistema come una grandezza che misura il **numero di microstati**, essa **aumenta spontaneamente**

... vi ricorda qualcosa?

- Nell'evoluzione del sistema da vincolato a non-vincolato, aumenta il **numero di microstati** possibili
- Se si definisce l'**entropia** del sistema come una grandezza che misura il **numero di microstati**, essa **aumenta spontaneamente**
- il sistema finale non è "più disordinato" di quello iniziale:



... vi ricorda qualcosa?

- Nell'evoluzione del sistema da vincolato a non-vincolato, aumenta il **numero di microstati** possibili
- Se si definisce l'**entropia** del sistema come una grandezza che misura il **numero di microstati**, essa **aumenta spontaneamente**
- il sistema finale non è "più disordinato" di quello iniziale:
 - si potrebbe dire: "più disperso", "più uniforme", "meno differenziato", ...



L'equivoco: guardare al singolo microstato

Importante:

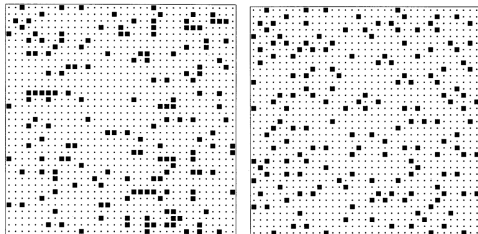
non conta l'aspetto di singoli microstati, ma l'insieme di tutti i microstati

L'equivoco: guardare al singolo microstato

Importante:

non conta l'aspetto di singoli microstati, ma l'insieme di tutti i microstati

- Torniamo all'esempio citato sopra. Sono state generate configurazioni con due programmi diversi:



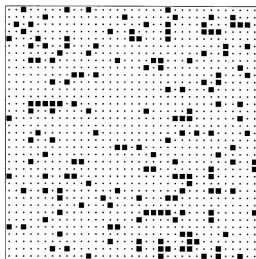
Esempi di configurazioni di 169 quadratini disposti a caso su una griglia $35 \times 35 = 1225$, generate con 2 programmi diversi

L'equivoco: guardare al singolo microstato

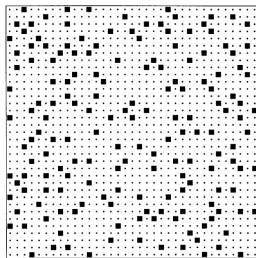
- Sono stati usati due programmi, "LIBERO" e "VINCOLATO".

L'equivoco: guardare al singolo microstato

- 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 quadratini adiacenti.



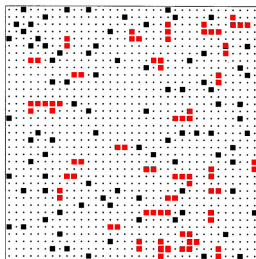
"LIBERO"



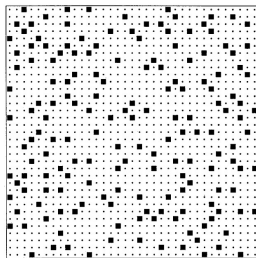
"VINCOLATO"

L'equivoco: guardare al singolo microstato

- 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 quadratini adiacenti.



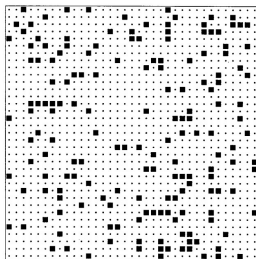
"LIBERO"



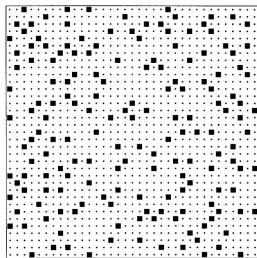
"VINCOLATO"

L'equivoco: guardare al singolo microstato

- 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 quadratini adiacenti.



"LIBERO"



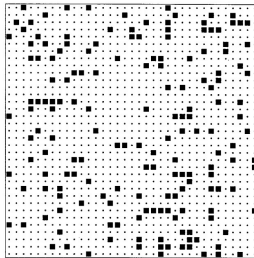
"VINCOLATO"

- numero totale di configurazioni diverse:

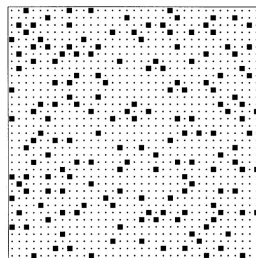
LIBERO > VINCOLATO

L'equivoco: guardare al singolo microstato

- In realtà non ha senso confrontare singoli microstati presi dall'uno o dall'altro insieme, né tantomeno chiedersi qual è il più "disordinato"



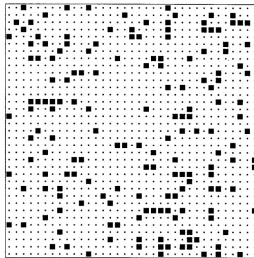
"LIBERO"



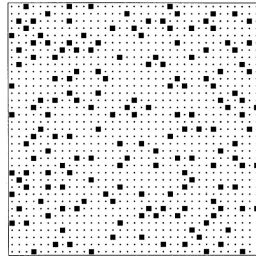
"VINCOLATO"

L'equivoco: guardare al singolo microstato

- In realtà non ha senso confrontare singoli microstati presi dall'uno o dall'altro insieme, **né tantomeno chiedersi qual è il più "disordinato"**



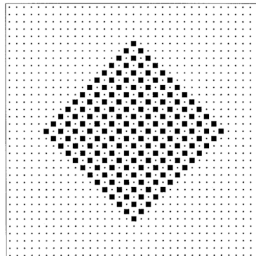
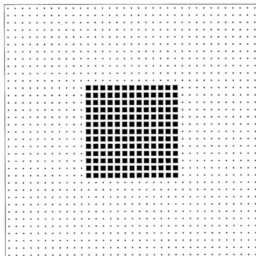
"LIBERO"



"VINCOLATO"

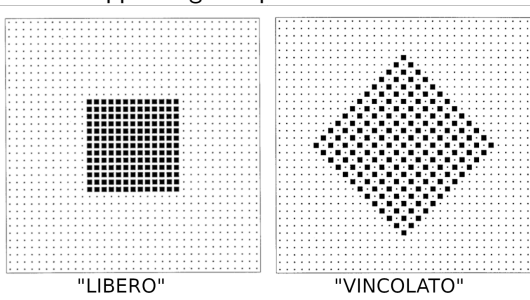
L'equivoco: guardare al singolo microstato

- A quale insieme appartengono questi microstati?



L'equivoco: guardare al singolo microstato

- A quale insieme appartengono questi microstati?



Sommario

- 1 Introduzione
- 2 Esempi
- 3 **Discussione**
 - Cos'è il disordine?
 - Un esempio banale
 - **Passiamo alla termodinamica**
 - La misura dell'entropia
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

Macrostati e Microstati in termodinamica

- Esattamente la stessa trattazione si può applicare ad un sistema termodinamico

Macrostati e Microstati in termodinamica

- Esattamente la stessa trattazione si può applicare ad un sistema termodinamico
- 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 in termodinamica

- Esattamente la stessa trattazione si può applicare ad un sistema termodinamico
- 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 **macrostato**:

Macrostati e Microstati in termodinamica

- Esattamente la stessa trattazione si può applicare ad un sistema termodinamico
- 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 **macrostato**:

$N \rightarrow$ numero totale di particelle

Macrostati e Microstati in termodinamica

- Esattamente la stessa trattazione si può applicare ad un sistema termodinamico
- 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 **macrostato**:

$N \rightarrow$ numero totale di particelle

$V \rightarrow$ volume totale

Macrostati e Microstati in termodinamica

- Esattamente la stessa trattazione si può applicare ad un sistema termodinamico
- 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 **macrostato**:

$N \rightarrow$ numero totale di particelle

$V \rightarrow$ volume totale

$E \rightarrow$ energia totale

Macrostati e Microstati in termodinamica

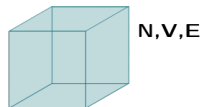
- Esattamente la stessa trattazione si può applicare ad un sistema termodinamico
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**
- Queste proprietà globali (o **macroscopiche**), se il sistema è isolato e in equilibrio, non cambiano, e definiscono un **macrostato**:
 - $N \rightarrow$ numero totale di particelle
 - $V \rightarrow$ volume totale
 - $E \rightarrow$ energia totale
- Ci sono molti modi di disporre N molecole nel volume V con energia E

Macrostati e Microstati in termodinamica

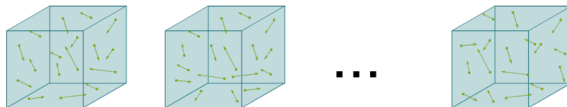
- Esattamente la stessa trattazione si può applicare ad un sistema termodinamico
- Ad es. un campione di gas è formato da un certo **numero** di particelle (atomi o molecole) che occupano un certo **volume** ed hanno una certa **energia totale**
- Queste proprietà globali (o **macroscopiche**), se il sistema è isolato e in equilibrio, non cambiano, e definiscono un **macrostato**:
 - $N \rightarrow$ numero totale di particelle
 - $V \rightarrow$ volume totale
 - $E \rightarrow$ energia totale
- Ci sono molti modi di disporre N molecole nel volume V con energia E
- stati microscopici o "**microstati**" = configurazioni in cui ciascuna particella possiede una determinata **posizione** ed **energia**, tenendo fisso il valore globale di V e E (e N)

Macrostate e Microstate in termodinamica

Macrostate



Microstates



Microstati e Volume

- 1 Quanti sono i microstati corrispondenti ad un dato macrostato?

Microstati e Volume

- 1 Quanti sono i microstati corrispondenti ad un dato macrostato?
- 2 E come dipende il numero di microstati dal volume e dall'energia a disposizione delle molecole?

Microstati e Volume

- 1 Quanti sono i microstati corrispondenti ad un dato macrostato?
 - 2 E come dipende il numero di microstati dal volume e dall'energia a disposizione delle molecole?
- Ad esempio, ho 36 molecole in un certo volume:

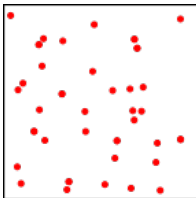


Figura: $N = 36$

Microstati e Volume

- 1 Quanti sono i microstati corrispondenti ad un dato macrostato?
 - 2 E come dipende il numero di microstati dal volume e dall'energia a disposizione delle molecole?
- Ad esempio, ho **36 molecole** in un certo volume:

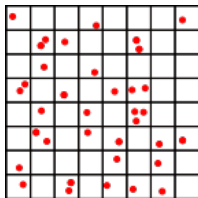


Figura: Esempio di microstato con $N = 36$, $V = 64$

- per contare i microstati, divido il volume in piccole celle (p. es. di lato = 1 nm) e conto quante configurazioni sono possibili

Se cambio il macrostato: Volume

- Se aumento il **volume**, con lo stesso numero di molecole, aumento il numero dei microstati:

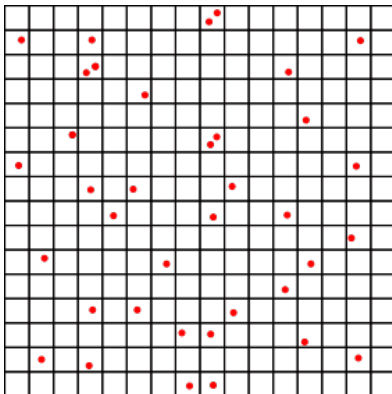


Figura: Esempio di microstato con $N = 36, V = 256$

Se cambio il macrostato: Volume

- Se aumento il **volume**, con lo stesso numero di molecole, aumento il numero dei microstati:

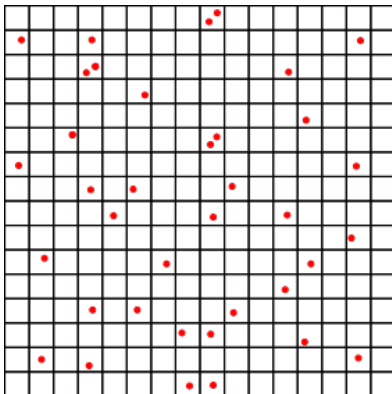


Figura: Esempio di microstato con $N = 36$, $V = 256$

Microstati ed Energia

- Un ragionamento simile si può applicare all'**energia**.

Microstati ed Energia

- Un ragionamento simile si può applicare all'**energia**.
- Secondo la fisica quantistica, l'energia delle molecole può assumere solo valori discreti ("livelli"):

Microstati ed Energia

- Un ragionamento simile si può applicare all'**energia**.
- Secondo la fisica quantistica, l'energia delle molecole può assumere solo valori discreti ("livelli"):

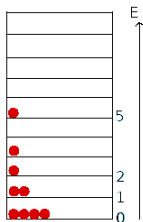


Figura: Una possibile popolazione dei livelli da parte di **9 molecole**

- In questo caso però **non tutte le combinazioni sono possibili**: infatti la somma deve dare il valore totale di E che è fisso. (Qui:
 $0 + 0 + 0 + 0 + 1 + 1 + 2 + 3 + 5 = 12$)

Microstati ed Energia

- Esempio: ho un sistema composto da 3 molecole $\{a, b, c\}$ ciascuna delle quali può possedere energia $= 0, 1, 2, 3, \dots$

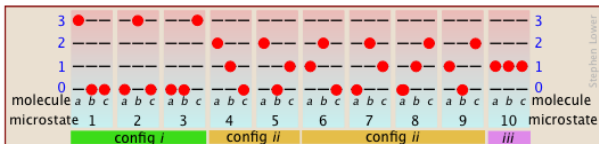


Figura: I microstati di $E = 3$ distribuita su 3 particelle sono 10

Microstati ed Energia

- Esempio: ho un sistema composto da 3 molecole $\{a, b, c\}$ ciascuna delle quali può possedere energia $= 0, 1, 2, 3, \dots$
- L'energia totale è costante: $E = 3$

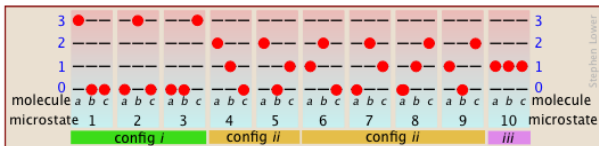


Figura: I microstati di $E = 3$ distribuita su 3 particelle sono 10

Microstati ed Energia

- Esempio: ho un sistema composto da 3 molecole $\{a, b, c\}$ ciascuna delle quali può possedere energia $= 0, 1, 2, 3, \dots$
- L'energia totale è costante: $E = 3$
- Quanti sono i possibili microstati?

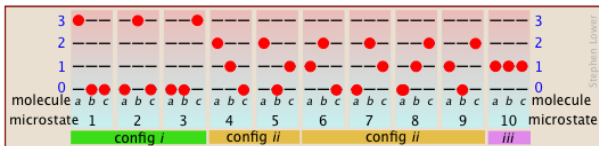


Figura: I microstati di $E = 3$ distribuita su 3 particelle sono 10

Se cambio il macrostato: Energia

- Come per il volume, se **aumento l'energia totale**, aumento anche il **numero di microstati compatibili**

Se cambio il macrostato: Energia

- Come per il volume, se **aumento l'energia totale**, aumento anche il **numero di microstati compatibili**
- Ad esempio, se porto $E = 4$ il numero di microstati è $= 15$; e così via

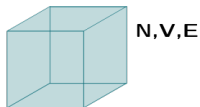
Energia totale (E)	modi di distribuire E in quanti unitari tra 3 particelle (microstati, W)
3	10
4	15
10	220
100	171700
1000	$1.67 \cdot 10^9$

Sommario

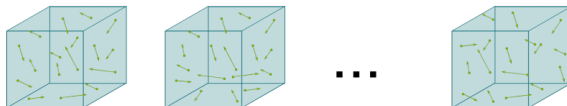
- 1 Introduzione
- 2 Esempi
- 3 **Discussione**
 - Cos'è il disordine?
 - Un esempio banale
 - Passiamo alla termodinamica
 - **La misura dell'entropia**
- 4 Rivediamo gli esempi
- 5 Conclusioni

Numero di microstati = W

Macrostate

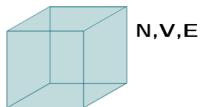


Microstates

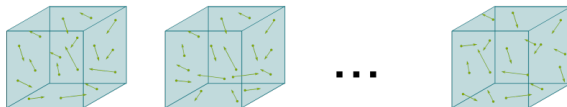


Numero di microstati = W

Macrostate



Microstates



←Numero di microstati = W ... →

LA MISURA DELL'ENTROPIA

Definizione

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

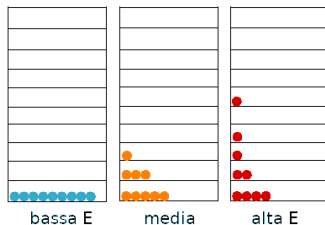
$$S = k \log W$$



Microstati e temperatura

- Abbiamo visto che:

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



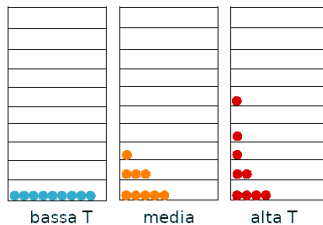
$E = 0$		$E = 12$
1 microstato		molti microst.

- 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!

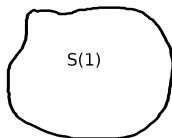
Comprendere l'aumento di entropia

- 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

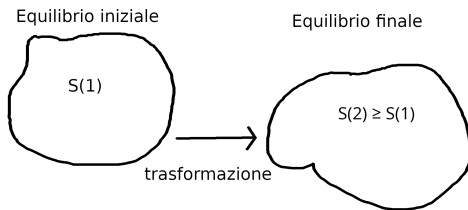
- Riassumendo: quando aumenta il numero di microstati W aumenta l'entropia S
- Ogni stato di equilibrio ha un certo valore (di W e) di S
 - una variazione di entropia si ha solo con una **trasformazione che porta da uno stato di equilibrio ad un altro stato di equilibrio.**
 - non è che l'entropia aumenta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

Equilibrio iniziale



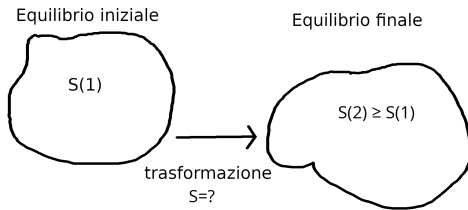
Comprendere l'aumento di entropia

- 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



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



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

1 Introduzione

2 Esempi

3 Discussione

4 Rivediamo gli esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

5 Conclusioni

(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) L'acqua solidifica a bassa temperatura

(D) Due sostanze si mescolano

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

$$S = k \log W$$

permette

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

- 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 **-senza** far ricorso al (fuorviante e ambiguo!) concetto di **"disordine"**

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

- 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 **-senza** far ricorso al (fuorviante e ambiguo!) concetto di **"disordine"**
- di spiegare come possano avvenire **trasformazioni inverse** a quelle viste

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Il tipico libro di chimica ...

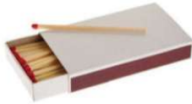


Figura 10.6

Dentro la scatola, i fiammiferi sono tutti allineati nella medesima direzione e nel medesimo verso: sono disposti in modo ordinato; i fiammiferi, cadendo a terra, si sparpagliano in maniera disordinata e casuale e quello riportato è solo uno dei tantissimi modi in cui si possono disporre: il sistema è passato da uno stato ordinato e di minore entropia a un sistema più disordinato e di maggiore entropia.

“il semplice fatto di **cambiare la disposizione di oggetti macroscopici**, da una che comunemente riteniamo ordinata (relativamente rara) ad un'altra che appare disordinata (relativamente probabile), rappresenta una **“variazione nulla”** di entropia degli oggetti, perché il numero di microstati in ciascuno di essi non è cambiato”

[Lambert, 1999]

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Sommario

1 Introduzione

2 Esempi

3 Discussione

4 Rivediamo gli esempi

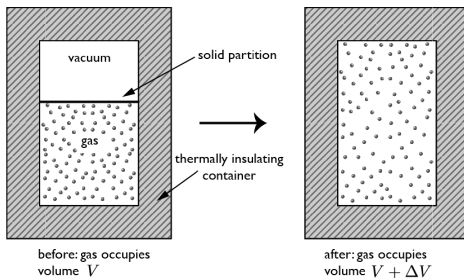
- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

5 Conclusioni

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(A) Un gas si espande nel vuoto

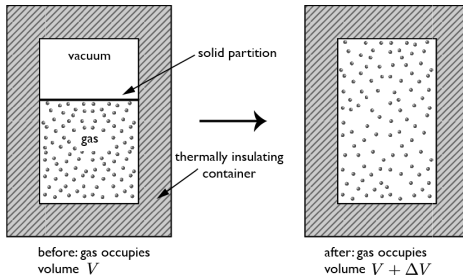
- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(A) Un gas si espande nel vuoto

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

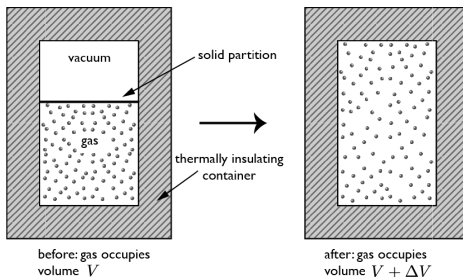


- Abbiamo visto che il campione a volume maggiore **non è “più disordinato”**

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(A) Un gas si espande nel vuoto

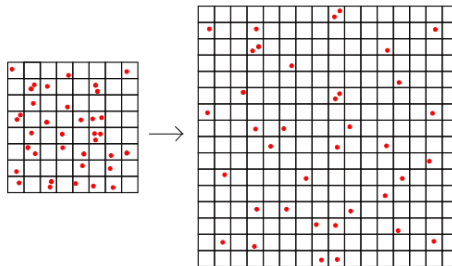
- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



- Semplicemente, **contiene molti più microstati** (molti più modi di disporre le molecole e le loro energie).

(A) Un gas si espande nel vuoto

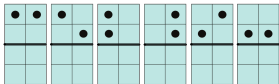
- Un gas confinato in un certo volume, se ha a disposizione un volume maggiore, si espande



- Semplicemente, **contiene molti più microstati** (molti più modi di disporre le molecole e le loro energie).

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Un gas si espande nel vuoto - Microstati

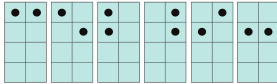


- sostanza confinata in metà del contenitore; $W = 6$

$$S = k \log 6$$

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

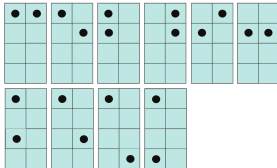
Un gas si espande nel vuoto - Microstati



- rimuovo il separatore ...

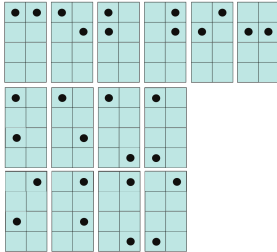
- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Un gas si espande nel vuoto - Microstati



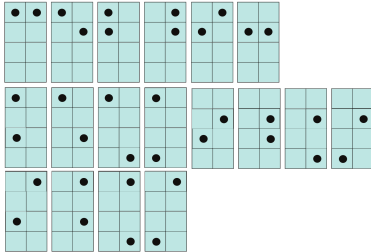
- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Un gas si espande nel vuoto - Microstati



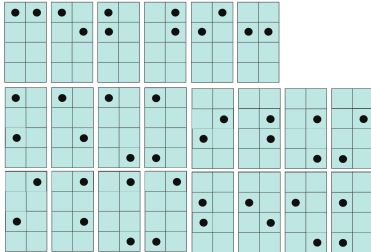
- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Un gas si espande nel vuoto - Microstati



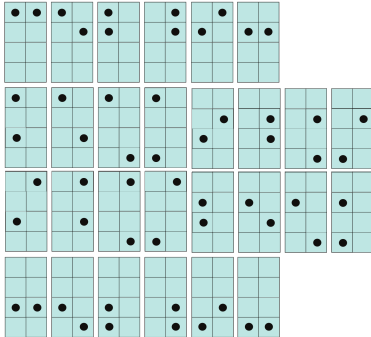
- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Un gas si espande nel vuoto - Microstati



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Un gas si espande nel vuoto - Microstati



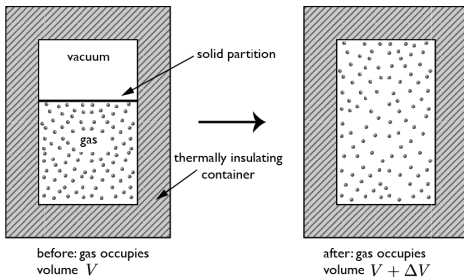
- la sostanza realizza tutti i microstati; $W = 28$

$$S = k \log 28$$

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

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**

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Sommario

1 Introduzione

2 Esempi

3 Discussione

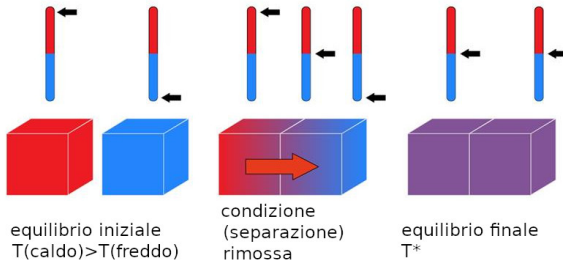
4 Rivediamo gli esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

5 Conclusioni

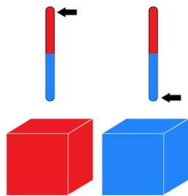
- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

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



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

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

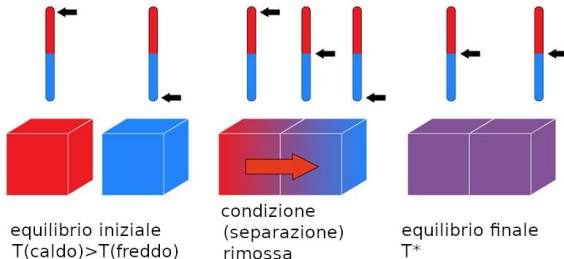


equilibrio iniziale
 $T(\text{caldo}) > T(\text{freddo})$

- Inizialmente:

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

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



- Inizialmente:

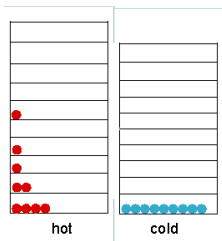
$$T_{\text{caldo}} > T_{\text{freddo}}$$

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

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

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo

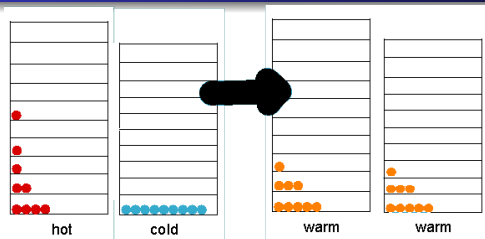


- Inizialmente:

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

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo



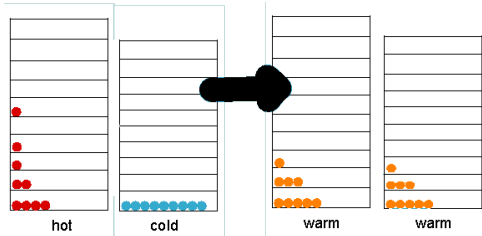
- Inizialmente:

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

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

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

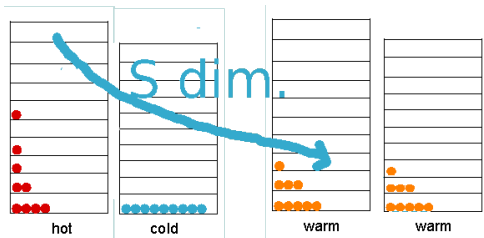
Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo



● Entropia:

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo

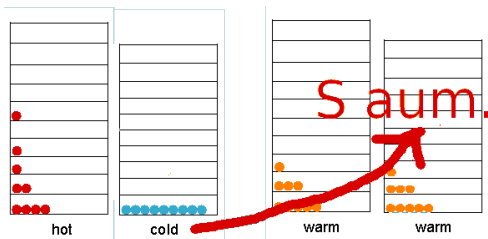


• Entropia:

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

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo

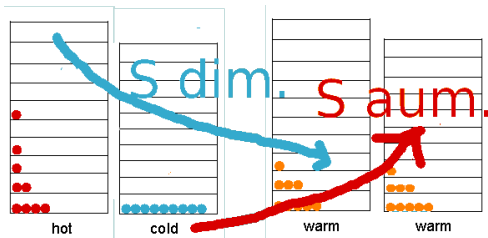


• Entropia:

- 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 $S^* > S_f$)

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

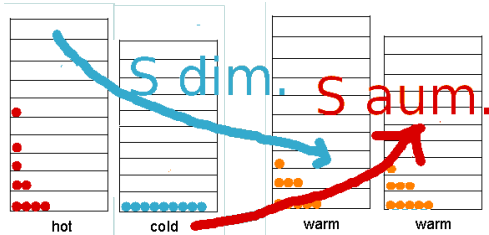
Microstati: corpo caldo a contatto con un corpo freddo



- 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**

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

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

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura**
- (D) Due sostanze si mescolano

Sommario

1 Introduzione

2 Esempi

3 Discussione

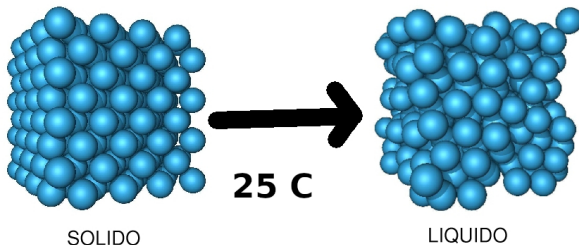
4 Rivediamo gli esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- **(C) L'acqua solidifica a bassa temperatura**
- (D) Due sostanze si mescolano

5 Conclusioni

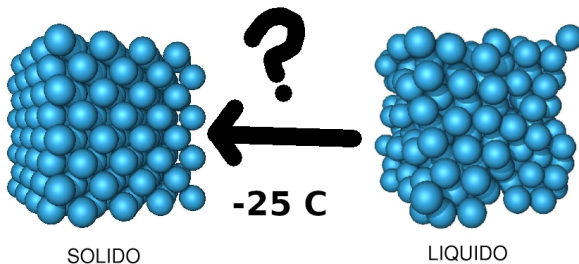
(C) L'acqua solidifica a bassa temperatura

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



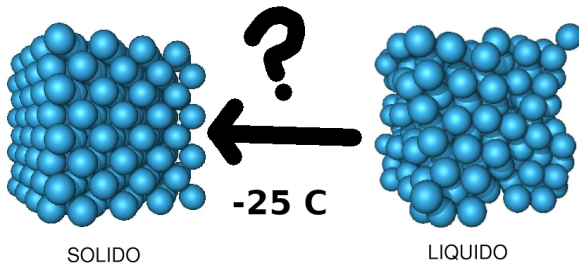
(C) L'acqua solidifica a bassa temperatura

- 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**

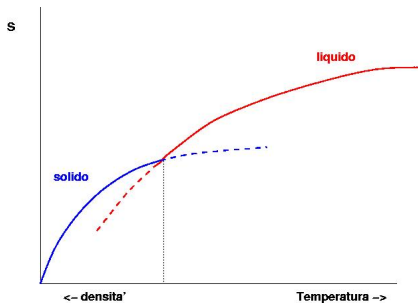


- Il “disordine” diminuisce. Come fa l'entropia a aumentare?

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Fusione e cristallizzazione

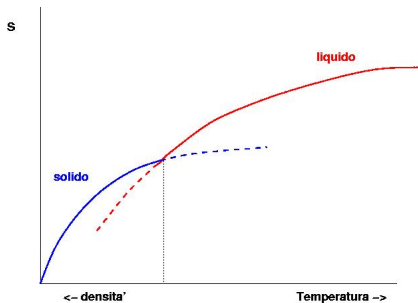
- Abbiamo visto che l'entropia di una sostanza cresce con la temperatura



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

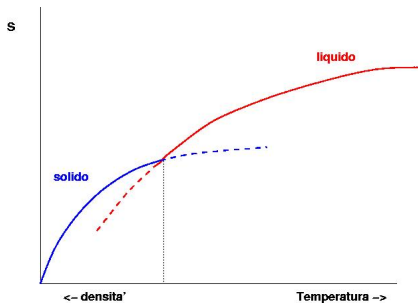
Fusione e cristallizzazione

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



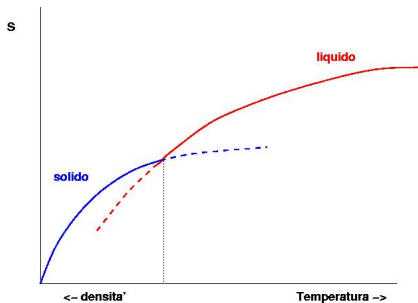
Fusione e cristallizzazione

- 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



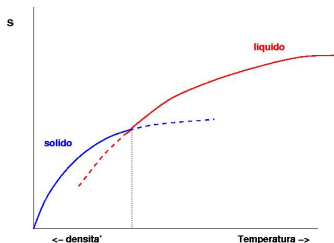
Fusione e cristallizzazione

- 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



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

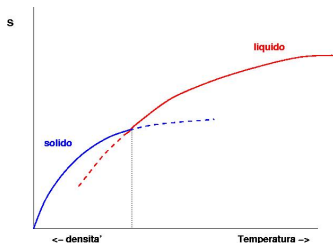
Spiegazione



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

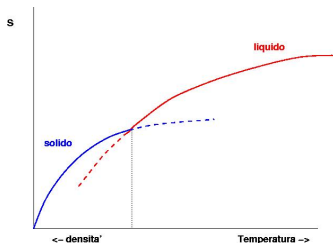


Proviamo a dare una spiegazione:

- 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

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Spiegazione

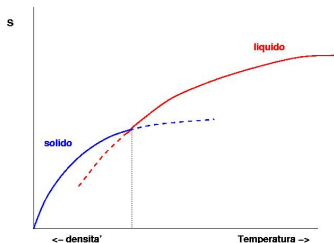


Proviamo a dare una spiegazione:

- 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

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

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"!

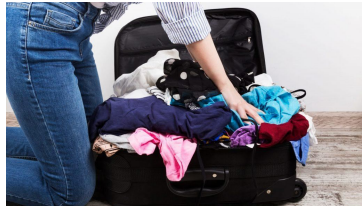
- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Sappiamo che...

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



- ... che non disordinatamente



Introduzione

Esempi

Discussione

Rivediamo gli esempi

Conclusioni

Riferimenti bibliografici

(A) Un gas si espande nel vuoto

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

(C) L'acqua solidifica a bassa temperatura

(D) Due sostanze si mescolano



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(precisazione!)

attenzione!

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(precisazione!)

attenzione!

- In realtà quella appena data è solo **una parte** della spiegazione.

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(precisazione!)

attenzione!

- In realtà quella appena data è solo **una parte** della spiegazione.
 - Se ci fosse solo questo effetto, per solidificare, l'acqua dovrebbe scendere **molto sotto** 0°C

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(precisazione!)

attenzione!

- In realtà quella appena data è solo **una parte** della spiegazione.
 - Se ci fosse solo questo effetto, per solidificare, l'acqua dovrebbe scendere **molto sotto** 0°C
- Bisogna considerare anche il **calore sviluppato nella solidificazione:**

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(precisazione!)

attenzione!

- In realtà quella appena data è solo **una parte** della spiegazione.
 - Se ci fosse solo questo effetto, per solidificare, l'acqua dovrebbe scendere **molto sotto** 0°C
- Bisogna considerare anche il **calore sviluppato nella solidificazione:**
 - L'acqua nel formare ghiaccio rilascia energia sotto forma di calore

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

(precisazione!)

attenzione!

- In realtà quella appena data è solo **una parte** della spiegazione.
 - Se ci fosse solo questo effetto, per solidificare, l'acqua dovrebbe scendere **molto sotto** 0°C
- Bisogna considerare anche il **calore sviluppato nella solidificazione:**
 - L'acqua nel formare ghiaccio rilascia energia sotto forma di calore
 - Se il sistema non è isolato questo calore viene ceduto all'ambiente aumentando l'entropia di questo

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

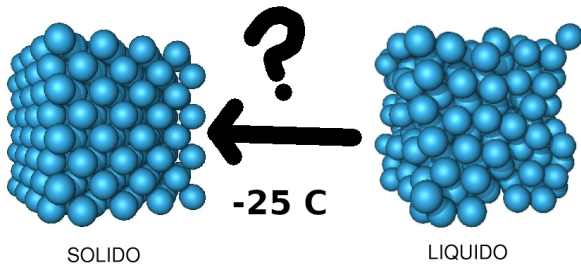
(precisazione!)

attenzione!

- In realtà quella appena data è solo **una parte** della spiegazione.
 - Se ci fosse solo questo effetto, per solidificare, l'acqua dovrebbe scendere **molto sotto** 0°C
- Bisogna considerare anche il **calore sviluppato nella solidificazione**:
 - L'acqua nel formare ghiaccio rilascia energia sotto forma di calore
 - Se il sistema non è isolato questo calore viene ceduto all'ambiente aumentando l'entropia di questo
 - Quindi nel sistema l'entropia può diminuire, purché nell'ambiente aumenti di più, in modo che l'**entropia totale** aumenti (v. avanti)

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Perché l'acqua solidifica a bassa temperatura?



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

Sommario

1 Introduzione

2 Esempi

3 Discussione

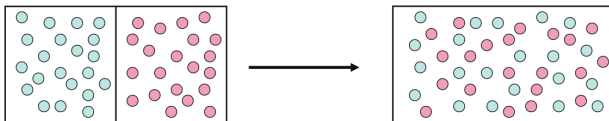
4 Rivediamo gli esempi

- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

5 Conclusioni

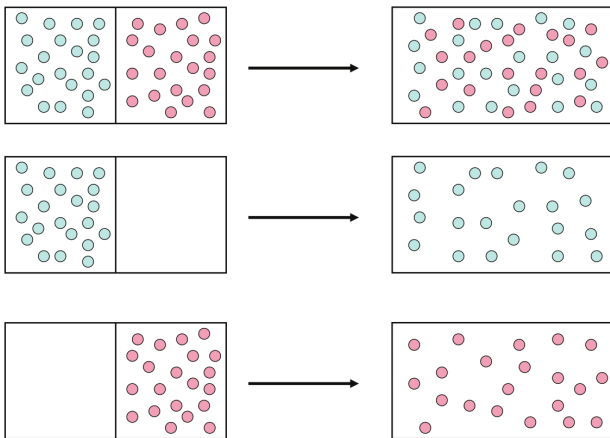
(D) Due liquidi si mescolano (ma non sempre)

- 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)

- Si può anche vedere il mescolamento come due espansioni, del liquido A e del liquido B (entrambe con aumento di entropia)

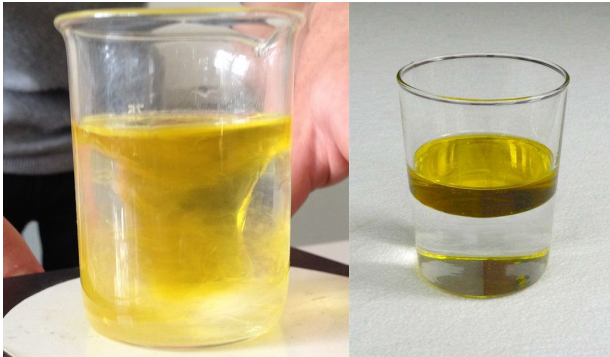


Alcuni liquidi non si mescolano!

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

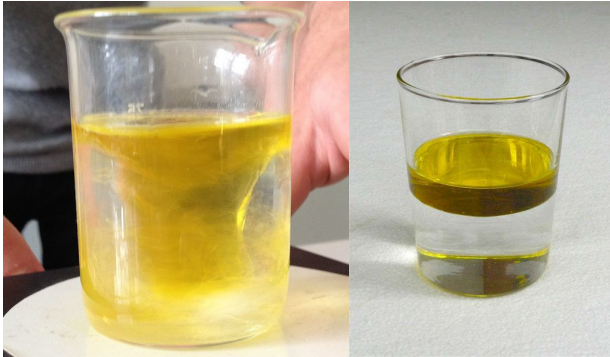
Alcuni liquidi non si mescolano!

- 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?**

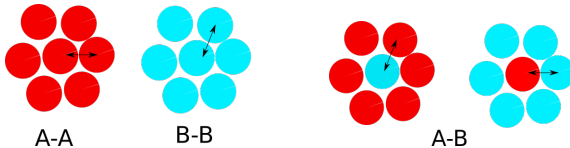
- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) **Due sostanze si mescolano**

spiegazione

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

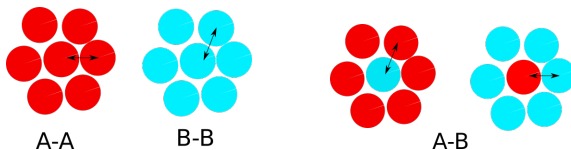
spiegazione

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



spiegazione

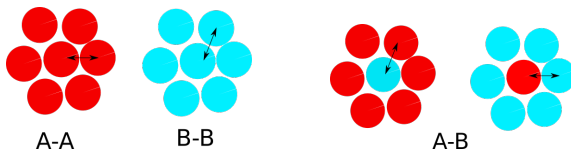
- Quando **non** si mescolano è perché esistono delle **interazioni** tra coppie di molecole: A-A, B-B e A-B:



- 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:

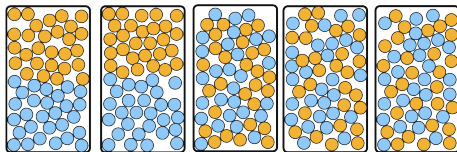


- Se l'attrazione AA, BB è più **forte** che AB, allora A e B si separano
 - N.B.: In questo caso tutti i contatti A-B hanno *energia più alta* che quelli A-A e B-B

stati mescolati non sono accessibili

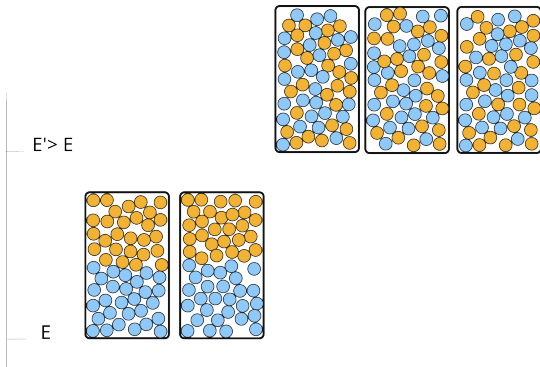
- Se le interazioni sono nulle, o tutte uguali, i microstati hanno tutti la stessa energia

E



stati mescolati non sono accessibili

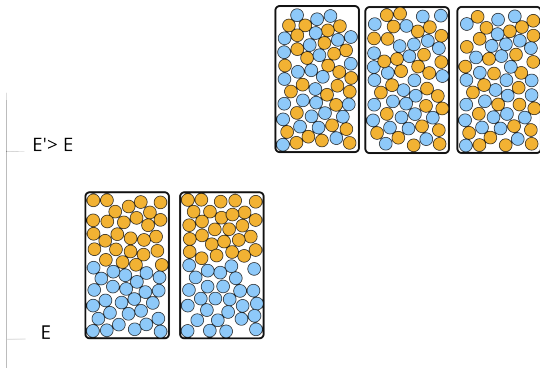
- Se l'attrazione AA, BB è più forte che AB, gli stati misti hanno energia maggiore degli altri, E che deve essere fornita dall'esterno



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) **Due sostanze si mescolano**

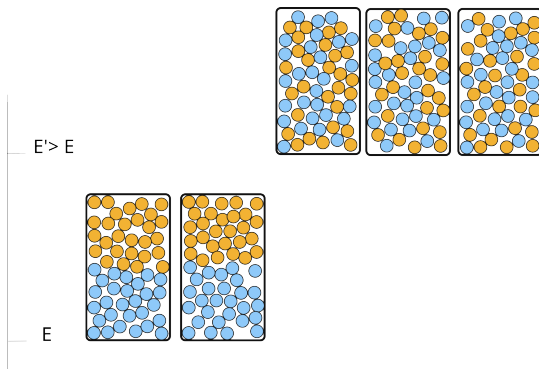
stati mescolati non sono accessibili

- Se l'attrazione AA, BB è più forte che AB, gli stati misti hanno energia maggiore degli altri, **E che deve essere fornita dall'esterno**
 - se il sistema è isolato **gli stati misti non sono accessibili**



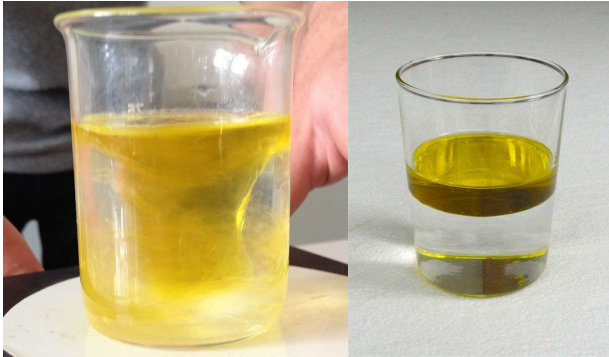
stati mescolati non sono accessibili

- Se l'attrazione AA, BB è più forte che AB, gli stati misti hanno energia maggiore degli altri, **E che deve essere fornita dall'esterno**
 - (se il sistema è a $T = \text{cost}$, gli stati misti sono poco popolati)



- (A) Un gas si espande nel vuoto
- (B) Un corpo caldo a contatto con un corpo freddo si raffredda e v.v.
- (C) L'acqua solidifica a bassa temperatura
- (D) Due sostanze si mescolano

Perché acqua e olio non si mescolano?



Perché i microstati con molecole di acqua e olio adiacenti sono a energia maggiore, e quindi non possono realizzarsi senza apporto di energia dall'esterno

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

Abbiamo visto che:

- 1 Il “**disordine**” misurato dall'entropia non ha niente a che vedere con l'aspetto macroscopico del sistema, né con quello di alcuna configurazione microscopica, ma è piuttosto il numero di possibilità (microstati) che le sue molecole hanno di realizzare quello stato macroscopico.

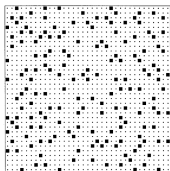
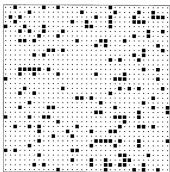
Abbiamo visto che:

- 1 Il “disordine” misurato dall'entropia **non ha niente a che vedere con l'aspetto macroscopico** del sistema, né con quello di alcuna configurazione microscopica, ma è piuttosto il numero di possibilità (microstati) che le sue molecole hanno di realizzare quello stato macroscopico.



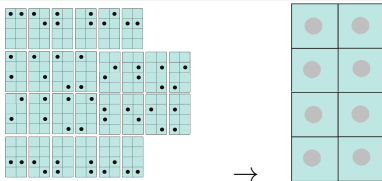
Abbiamo visto che:

- 1 Il “disordine” misurato dall'entropia non ha niente a che vedere con l'aspetto macroscopico del sistema, né con quello di alcuna configurazione microscopica, ma è piuttosto il numero di possibilità (microstati) che le sue molecole hanno di realizzare quello stato macroscopico.



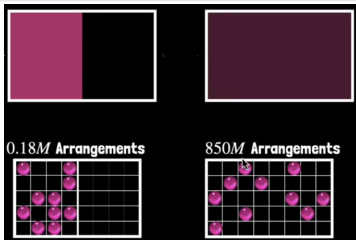
Abbiamo visto che:

- 1 Il “disordine” misurato dall'entropia **non ha niente a che vedere con l'aspetto macroscopico** del sistema, **né con quello di alcuna configurazione microscopica**, ma è piuttosto **il numero di possibilità (microstati)** che le sue molecole hanno di realizzare quello stato macroscopico.



Abbiamo visto che:

- 1 Il “disordine” misurato dall'entropia **non ha niente a che vedere con l'aspetto macroscopico** del sistema, **né con quello di alcuna configurazione microscopica**, ma è piuttosto **il numero di possibilità (microstati)** che le sue molecole hanno di realizzare quello stato macroscopico.
- 2 La **tendenza di S ad assumere il massimo valore** possibile è semplicemente la naturale tendenza delle molecole a realizzare tutte le possibilità compatibili con le condizioni poste sul macrostato



Abbiamo visto che:

- 1 Il “disordine” misurato dall'entropia non ha niente a che vedere con l'aspetto macroscopico del sistema, né con quello di alcuna configurazione microscopica, ma è piuttosto il numero di possibilità (microstati) che le sue molecole hanno di realizzare quello stato macroscopico.
- 2 La tendenza di S ad assumere il massimo valore possibile è semplicemente la naturale tendenza delle molecole a realizzare tutte le possibilità compatibili con le condizioni poste sul macrostato



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 nell'ambiente**

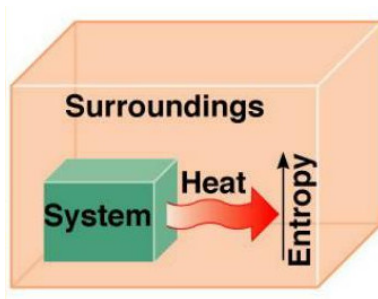


Figura: L'insieme Sistema+Ambiente è isolato. L'entropia del sistema può diminuire se quella dell'ambiente aumenta di più.

perché la stanza di destra ha un'entropia maggiore?



Low Entropy Room



High Entropy Room

- 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.
- Fabio Marchetti, Claudio Pettinari, Corrado Di Nicola, and Riccardo Pettinari. Entropia: misura del disordine?... o della dispersione di energia?! *Chimica: possibile ponte fra scuole europee*, 2011.
- Giorgio F. Signorini. Elementi di termodinamica per studenti di biotecnologie, 2026. URL <http://www1.chim.unifi.it/u/signo/did/td-biotec/td.pdf>.
- Daniel F Styer. Insight into entropy. *American Journal of Physics*, 68(12):1090–1096, 2000.

Video interessanti

- [The Misunderstood Nature of Entropy - PBS Space Time](#) Video con simulazione di microstati e del relativo macro-stato su una scacchiera di Go e (@5:38) un volume di aria
- [I wish I was taught Entropy this way!](#) Video con:
 - processi senza direzione e con direzione (@1:35);
 - due microstati sono sempre ugualmente probabili, sia che ci appaiano ordinati sia che ci appaiano disordinati (@4:12);
 - palline in una griglia di dimensioni crescenti, espansione libera (@8:54);
 - microstati e macrostati del precedente (@13:01);
 - animazione - perché caffè e latte nel caffelatte non si separano spontaneamente (@15:44);