

Docente

Vincenzo Pappalardo

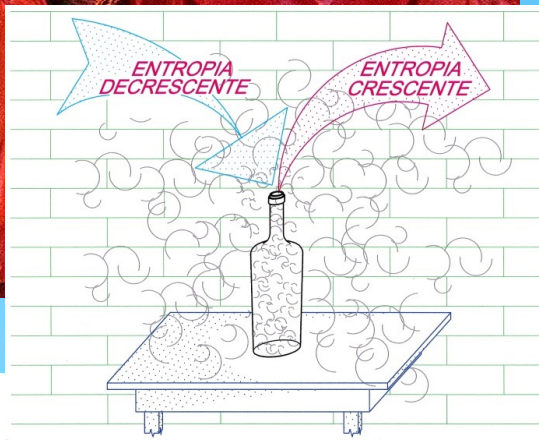
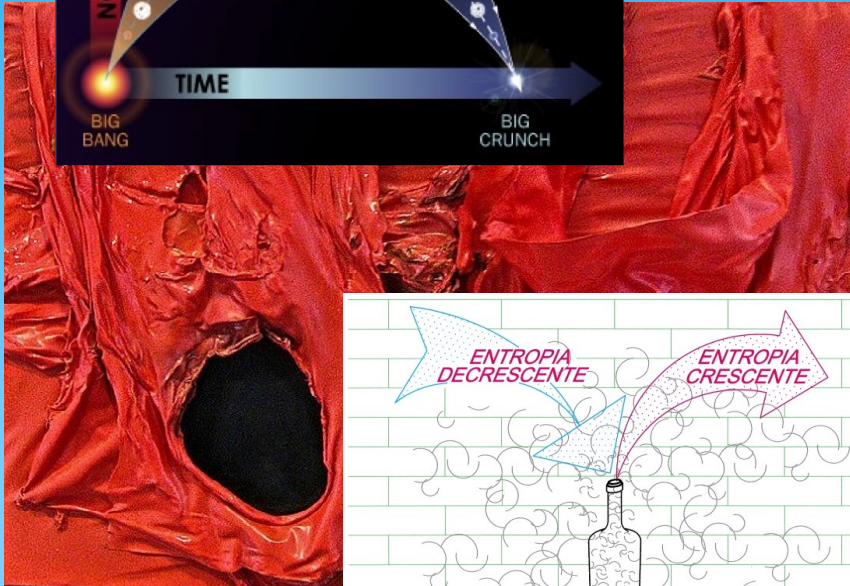
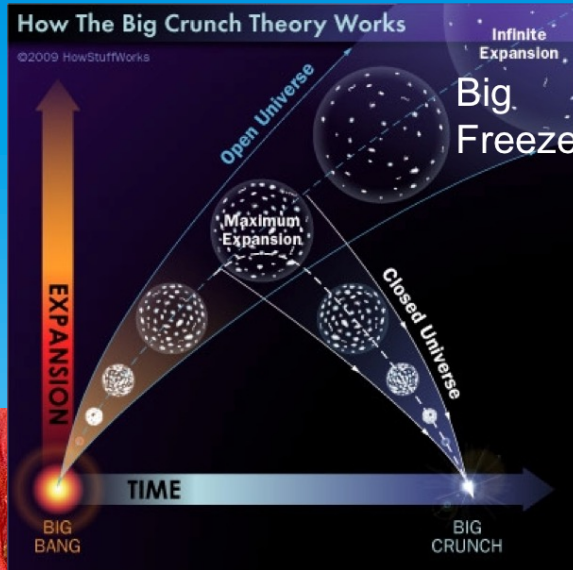
Liceo Scientifico "Severi"

Salerno

Seminario

Mercoledì 8 ottobre 2025

Ore 10³⁰ - 11³⁰



Questo costante fluire della luce
verso le tenebre.
Dell'amore verso l'oblio.

Entropia
tra arte,
letteratura, tempo
e informazione



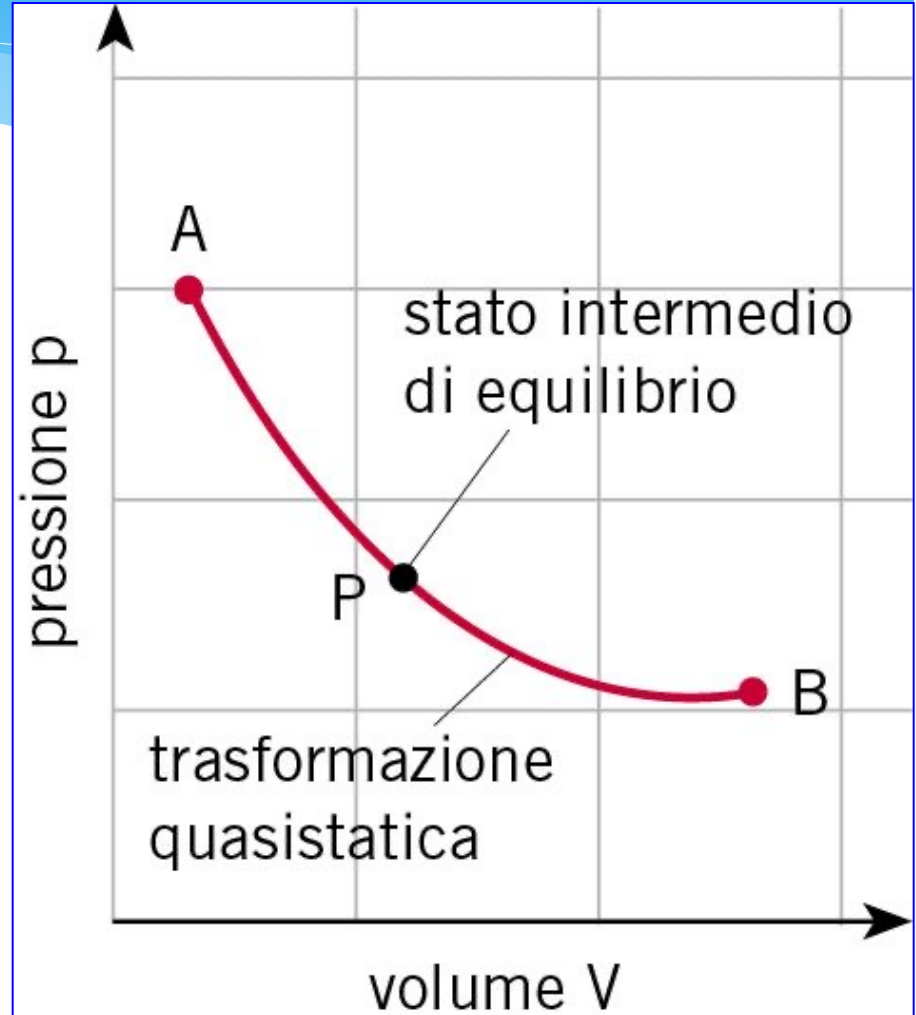
Introduzione

La **termodinamica** si occupa principalmente degli scambi energetici

fra un sistema e l'ambiente esterno con cui esso può interagire, con particolare riguardo alle *trasformazioni di lavoro in calore e di calore in lavoro.*

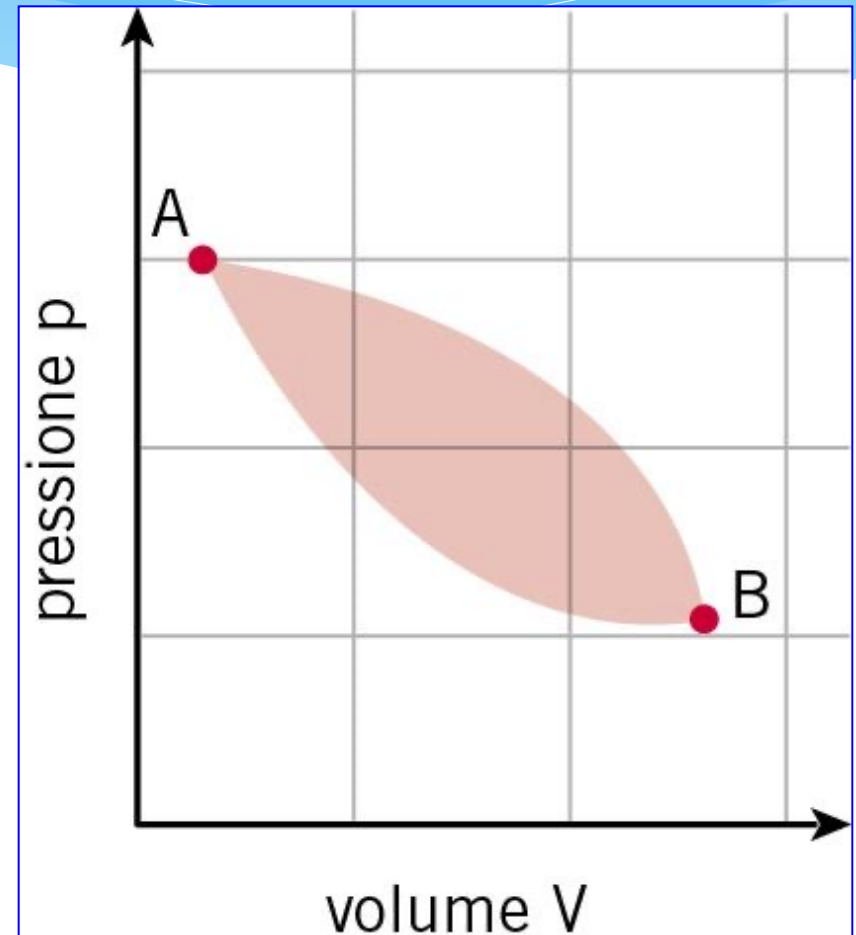


Una **trasformazione reversibile** è composta da una successione di stati di equilibrio, in cui ogni stato si distingue dal precedente e dal successivo per differenze infinitesime dei valori dei parametri termodinamici (p, V, T).



Se trasformiamo un sistema reversibilmente da uno stato iniziale A a uno stato finale B , possiamo poi riportare il sistema da B ad A attraverso la stessa successione di stati percorsi in ordine inverso.

Una **trasformazione irreversibile** può avvenire in una sola direzione e, una volta raggiunto lo stato finale, non è possibile tornare allo stato iniziale senza comportare alcun cambiamento nel sistema stesso e nell'ambiente circostante.





Per distinguere un processo
reversibile da uno irreversibile
Clausius introdusse il concetto di
entropia.

L'ENTROPIA TOTALE

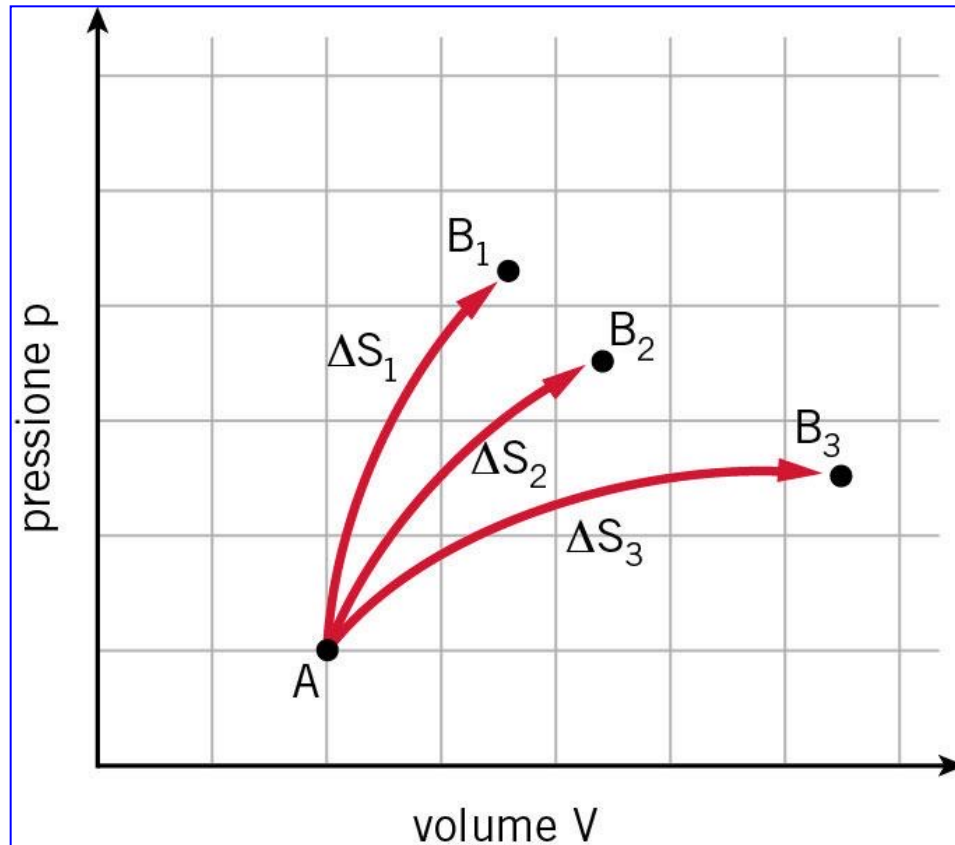
DELL'UNIVERSO NON CAMBIA
IN UN PROCESSO REVERSIBILE.

$$\Delta S_{\text{universo}} = 0$$

L'ENTROPIA TOTALE
DELL'UNIVERSO AUMENTA
SEMPRE IN UN PROCESSO
IRREVERSIBILE.

$$\Delta S_{\text{universo}} > 0$$

Conclusione



Lo stato finale B
verso cui si porterà
spontaneamente
un sistema fisico è
quello a cui
corrisponde il
**massimo aumento
di entropia.**



Entropia e probabilità

Definizione di probabilità

$$p = \frac{\text{casi favorevoli}}{\text{casi possibili}} = \frac{n}{N}$$

- In un contenitore vi sono due molecole che indichiamo con 1 e 2. Le possibili distribuzioni delle due molecole nei recipienti A e B sono date dal seguente schema:

A		1,2	1	2	0
B		0	2	1	1,2

La probabilità che entrambe siano in
A (o in B) vale:

$$P(A) = \frac{\text{casi favorevoli}}{\text{casi possibili}} = \frac{1}{4} = \frac{1}{2^2} = 0,25 = 25\%$$

➤ Nel contenitore ci sono tre molecole che indichiamo con 1,2,3. Le possibili distribuzioni delle tre molecole nei recipienti A e B sono:

A		1,2,3	2,3	1,3	1,2	0	1	2	3
B		0	1	2	3	1,2,3	2,3	1,3	1,2

La probabilità che tutte e tre siano in A (o in B) vale:

$$P(A) = \frac{\text{casi favorevoli}}{\text{casi possibili}} = \frac{1}{8} = \frac{1}{2^3} = 0,125 = 12,5\%$$

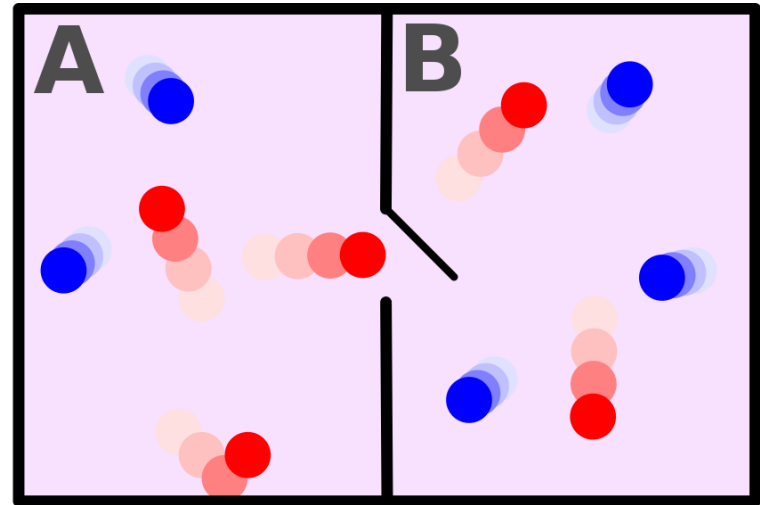
- Se le molecole sono $n=10^{23}$ (pari all'ordine di grandezza del numero di Avogrado, ossia 1 mole) la probabilità che le molecole siano tutte in A (o in B) diventa:

$$P(A) = \frac{\text{casi favorevoli}}{\text{casi possibili}} = \frac{1}{2^{(10)^{23}}} \approx 0 \text{ ma non zero}$$

La probabilità è talmente piccola da rendere l'evento praticamente irrealizzabile, ossia improbabile.

Conclusioni

- ✓ Fra tutti gli stati possibili, quale si verificherà?
Quello a cui corrisponde la massima probabilità
(molecole che riempiono uniformemente i due
ambienti A e B).



- ✓ Che tipo di processo è quello che tende a riempire uniformemente i due ambienti A e B?
Processo irreversibile.

✓ Cosa succede all'entropia per i processi irreversibili? Aumenta sempre.

✓ I processi in natura evolvono sempre verso la condizione di aumento dell'entropia = stato più probabile.

Ogni aumento di entropia in un processo irreversibile significa che la natura preferisce uno stato più probabile a uno meno probabile.

Boltzmann (1844-1906) dimostrò che l'entropia e la probabilità di uno stato macroscopico sono legate dalla seguente equazione:

The diagram illustrates Boltzmann's equation for entropy, $S(A) = k_B \ln W(A)$, within a central yellow box. Annotations include: 'entropia di A (J/K)' pointing to $S(A)$; 'costante di Boltzmann (J/K)' pointing to k_B ; and 'molteplicità di A (numero puro)' pointing to $W(A)$. Below the equation, two boxes provide further details: the value of k_B as $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ and the definition of $\ln$ as the natural logarithm with base $e \approx 2,72$. Blue arrows connect these boxes to their respective terms in the equation.

entropia di A (J/K)

$$S(A) = k_B \ln W(A)$$

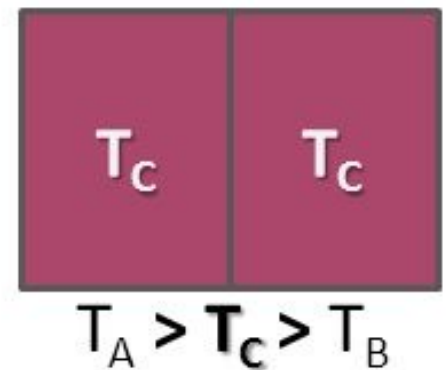
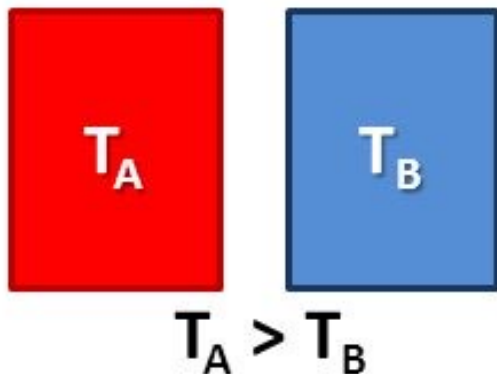
costante di Boltzmann (J/K)

molteplicità di A (numero puro)

$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

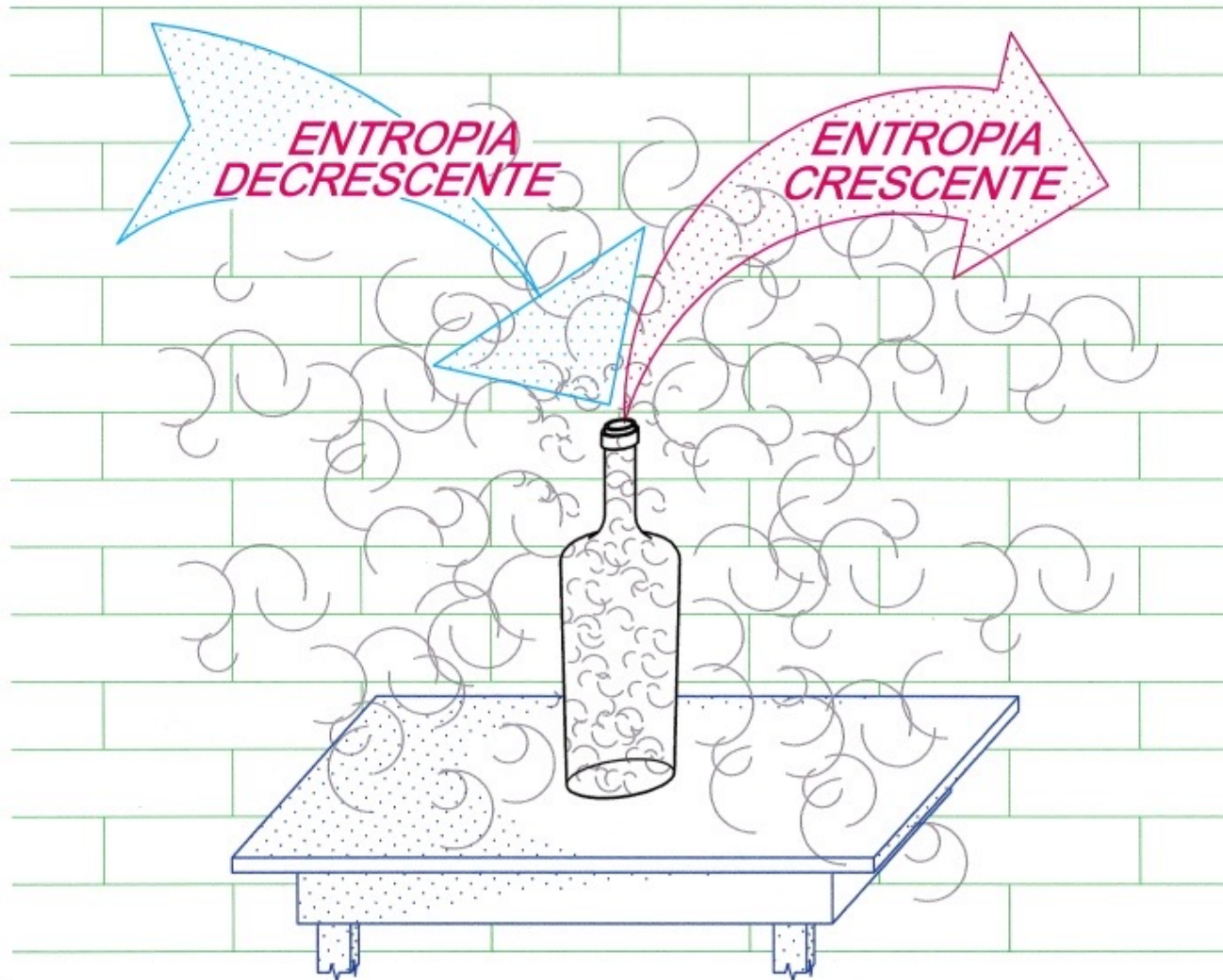
$\ln$: logaritmo in base e ($e \approx 2,72$)

Il calore perché passa da un corpo a temperatura maggiore a uno a temperatura minore?



Perché l'equilibrio termico è lo stato più probabile = massima entropia

Perché il profumo esce dalla bottiglia e
non rientra più?

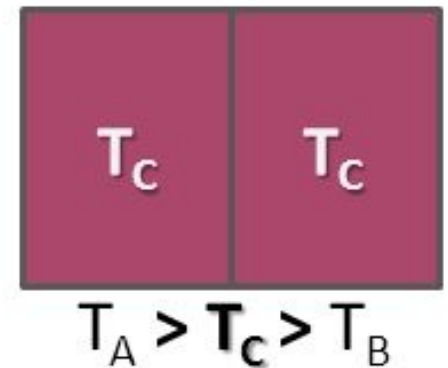
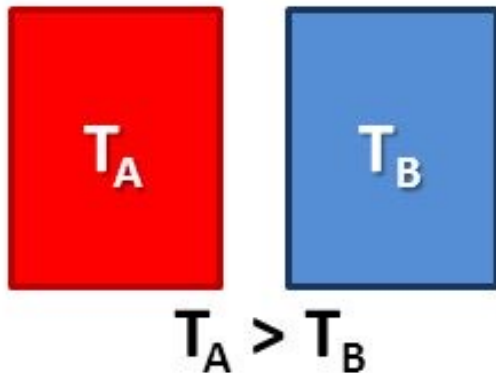


La relazione fra entropia e probabilità ci permette di comprendere la causa fondamentale dell'irreversibilità.

Man mano che un sistema fisico si evolve verso stati più probabili, e dunque a entropia crescente, aumenta anche il grado di *disordine* della sua organizzazione.

L'aumento di entropia è pertanto connesso con il passaggio da una condizione di ordine a una di **disordine**.

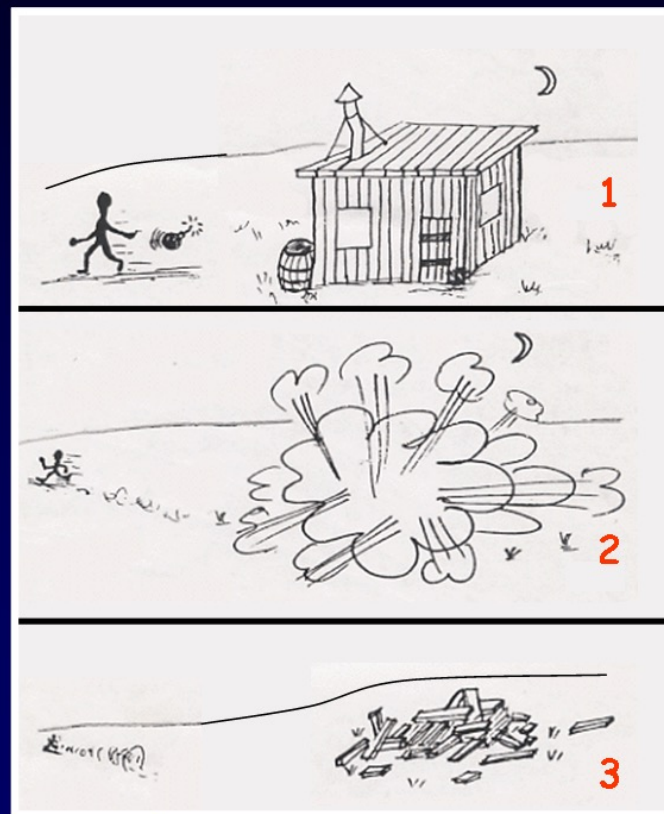
Quando il calore passa da un corpo a temperatura maggiore a uno a temperatura minore, inizialmente è facile distinguere, a causa della diversa temperatura, i due corpi. A equilibrio raggiunto è cresciuto il disordine, essendo diminuita la possibilità di differenziare le parti del sistema.



***L'entropia** di un sistema rappresenta
una misura del **grado di disordine**
molecolare del sistema.*

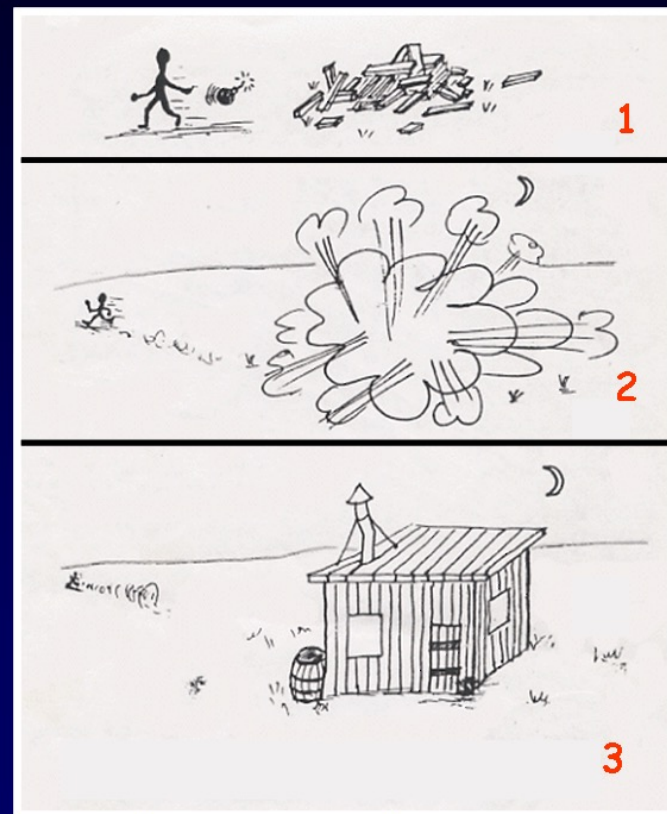
Siamo così in grado di giustificare l'origine
dell'irreversibilità e quindi il verso naturale degli
eventi:

Esso proviene dall'ordine che si trasforma in
disordine o, il che è lo stesso, dal passaggio da
una condizione poco probabile a una più
probabile.



L'entropia cresce
(ha senso)

ordine → disordine

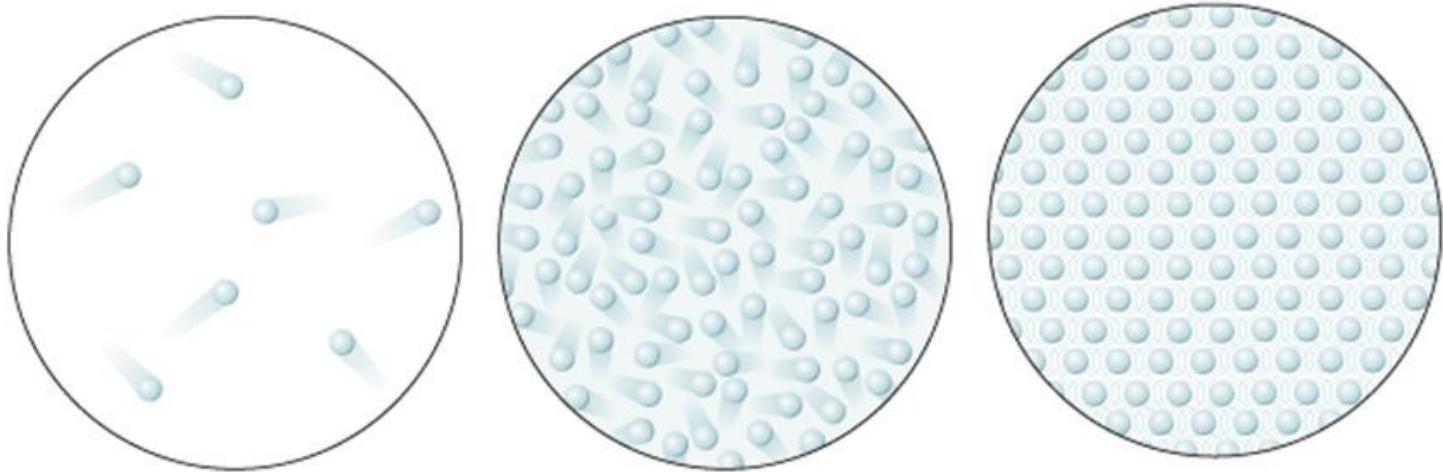


L'entropia decresce
(non ha senso)

disordine → ordine

Entropia e disordine

L'entropia di un gas è in genere molto maggiore di quella di un liquido e questa a sua volta è maggiore di quella di un solido

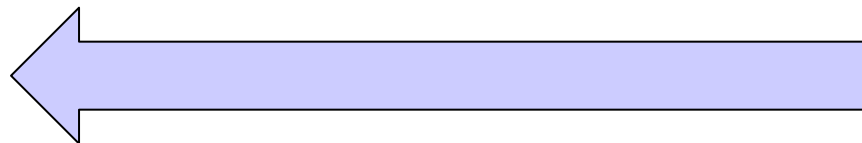


Gas

Liquido

Solido

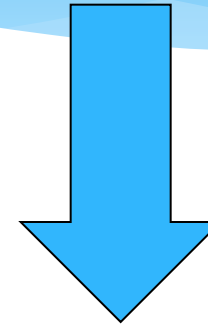
disordine



ordine

ordine
(stato poco probabile)

processo
irreversibile
(processo
spontaneo)



**stato con massima
entropia**

=

disordine
(stato più probabile)

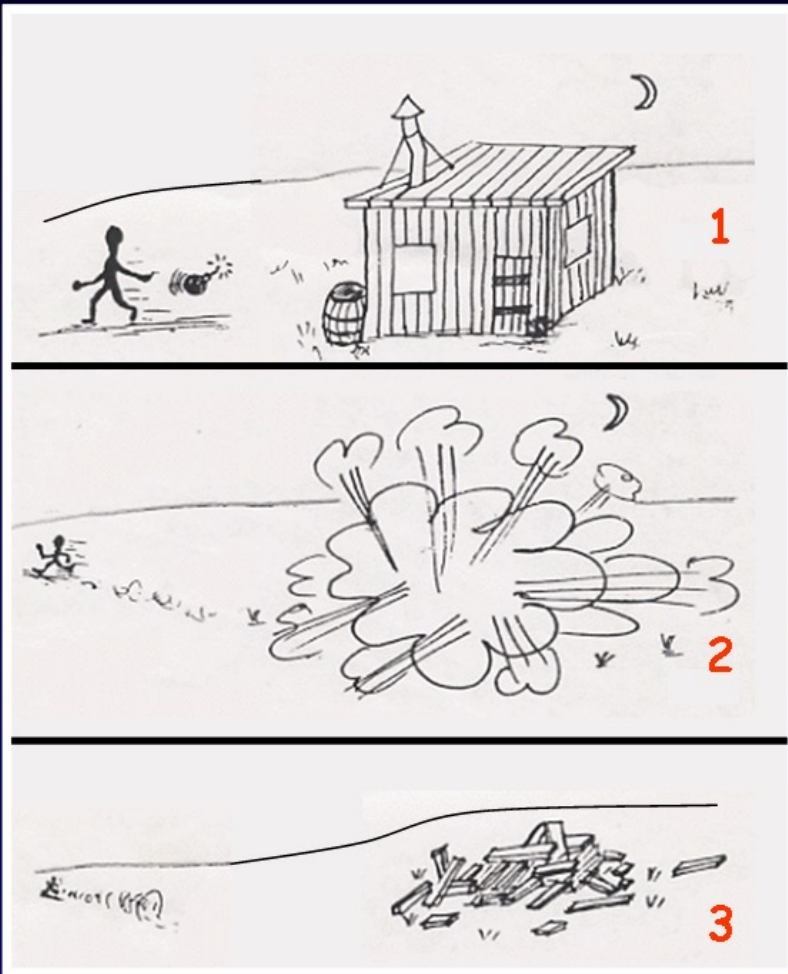




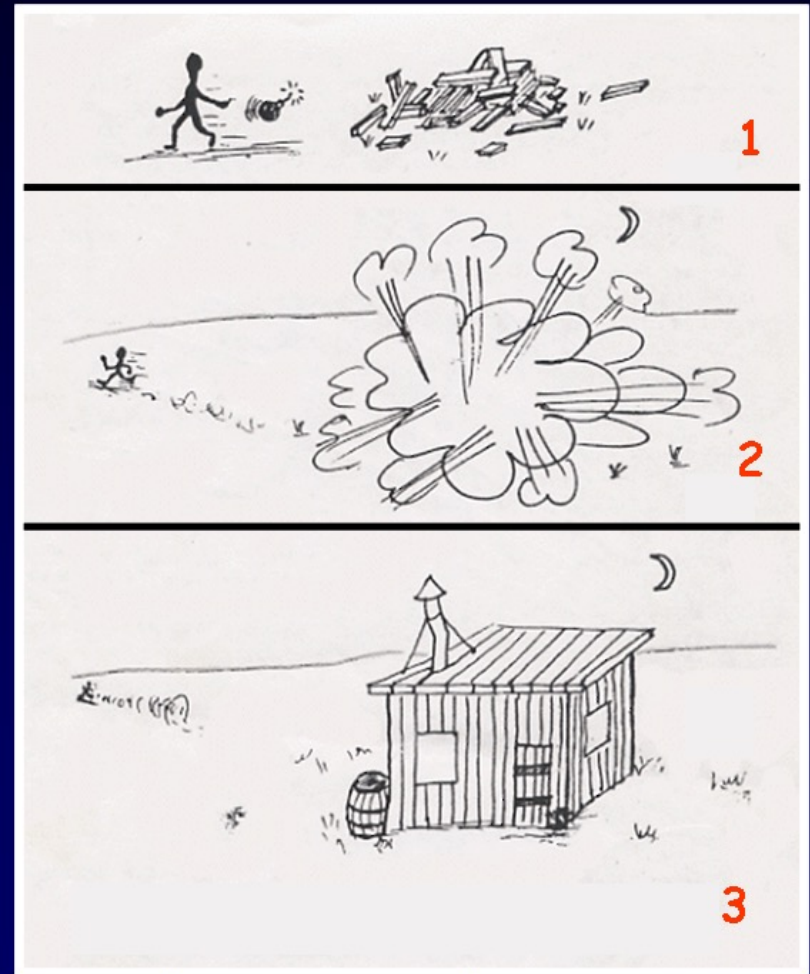
Entropia e Tempo

L'aumento di entropia indica il verso secondo il quale si succedono gli eventi, cioè caratterizza lo scorrere del tempo.

Entropia = freccia del tempo



L'entropia cresce
(ha senso)



L'entropia decresce
(non ha senso)



Entropia e Biologia

Che cos'è la vita?

Da un punto di vista termodinamico, possiamo definire *materia vivente un sistema caratterizzato dalla possibilità di realizzare diminuzioni locali e temporanee di ordine, e quindi di entropia, per mezzo di particolari processi metabolici.*

Questi processi sono però localizzati e interessano sistemi soggetti a continue interazioni e scambi con l'ambiente esterno (sistemi non isolati).

Perciò l'evoluzione biologica non viola il secondo principio della termodinamica, o meglio il principio dell'aumento dell'entropia.



La diminuzione di entropia che si manifesta negli esseri viventi è trascurabile rispetto al grande aumento di entropia prodotto dai processi energetici necessari per mantenere la vita.



Morte termica dell'universo

Quando un sistema isolato avrà raggiunto l'entropia massima, anche la probabilità del suo stato sarà massima.

Questa è la situazione di equilibrio termico, per cui, non essendoci differenze di temperatura, tutta la quantità di energia di quel sistema non potrà più essere utilizzata, e il sistema non potrà modificarsi spontaneamente.



Considerando l'intero universo
cosmologico come un sistema isolato,
quando esso avrà raggiunto la massima
entropia, dovrà trovarsi in equilibrio
assoluto, cioè in quello stato che portò
Clausius ad affermare:

*l'entropia dell'Universo è destinata sempre ad aumentare, fino al raggiungimento di un valore massimo coincidente con uno “**stato di morte immodificabile**” dell'Universo, la cosiddetta “**morte termica**”, uno stato in cui vi è la totale assenza di ogni processo fisico, chimico e biologico.*

Un'ipotesi: la morte termica dell'Universo.

- Dato che l'evoluzione spontanea dell'universo segue la direzione corrispondente al massimo aumento dell'entropia, nell'universo il calore continuerà a passare da zone più calde (stelle) a zone più fredde (pianeti) finchè tutti i corpi raggiungeranno la stessa temperatura.
- Senza differenze di temperatura non si potrà eseguire lavoro e nell'universo non avverrà più nessuna trasformazione

Il Futuro dell' Universo?





*"Lo scopo finale di tutte le forme di vita
è la morte".*

Sigmund Freud



Entropia e Arte

Cosa c'entra l'entropia con l'arte?

L'idea che i processi naturali hanno una direzione privilegiata lungo la quale l'entropia aumenta e quindi la tendenza verso uno stato di massimo disordine, ha una potenza metaforica straordinaria.



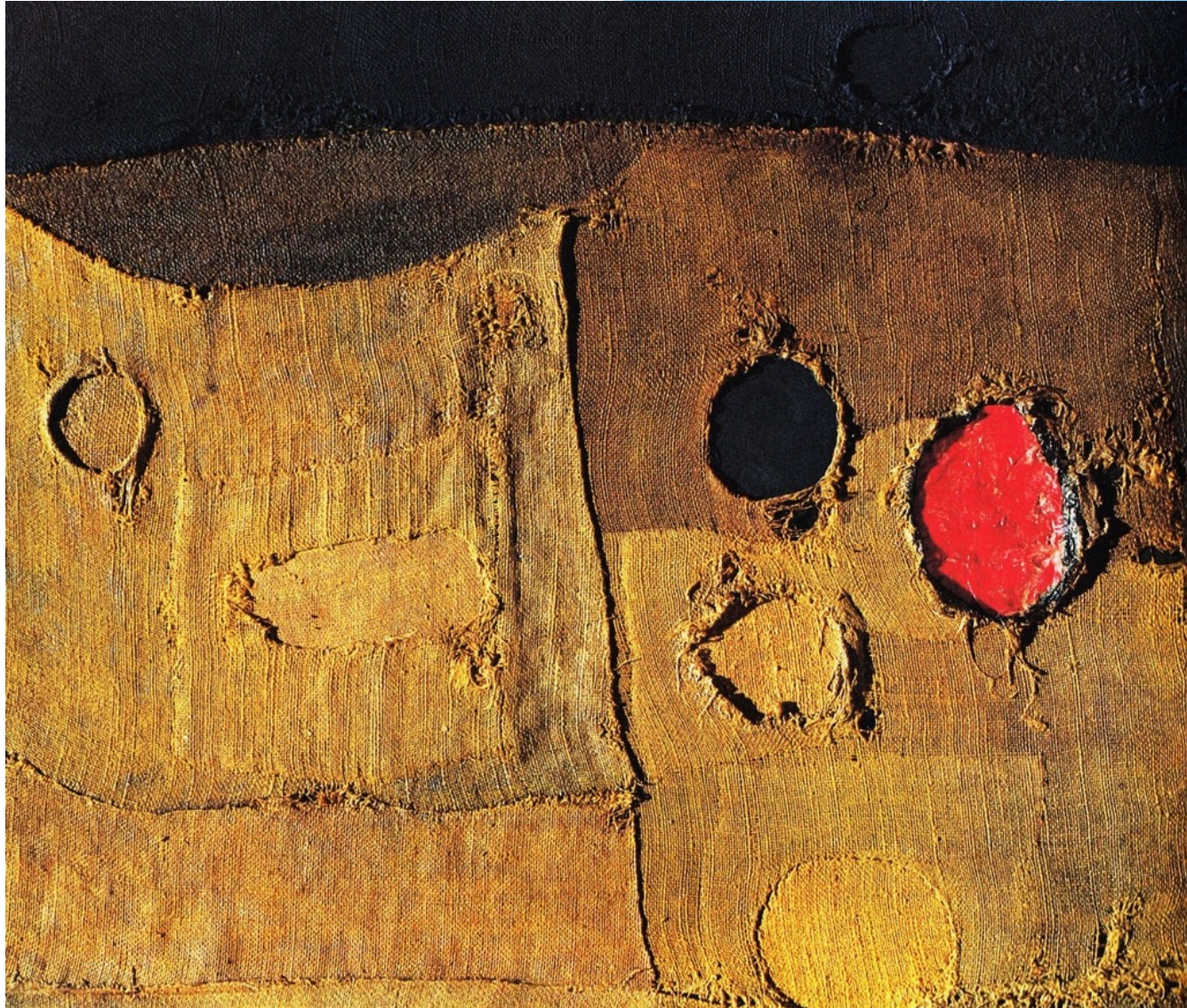
In fondo l'arte, manipolando la
materia, attraverso il lavoro e
l'energia, tenta di opporsi alla
degradazione della stessa, cerca di
arrestarne la dissoluzione definitiva,
dandole una forma riconoscibile.



Il gesto dell'artista arresta o inverte il
processo naturale di degradazione.

L'atto creativo come una barriera
prima del disordine infinito.

Alberto Burri - Sacco nero rosso, 1953





Il **sacco**, materiale poverissimo (quindi poetico), destinato alla **dissoluzione** (degradazione energetica), viene salvato dal gesto dell'artista e **ricomposto** (ordine) sulla tela.

Alberto Burri – Rosso plastica, 1966



Attraverso il fuoco (l'energia) si avvia il disfacimento della plastica (aspetto sofferente della materia) verso l'aumento dell'entropia e quindi del disordine per poi arrestarne la morte attraverso la cristallizzazione, e quindi l'aumento dell'entropia, un momento prima della distruzione totale (entropia massima).

Alberto Burri – Bianco cretto, 1972





Se la mano creatrice fosse la natura,
la bellezza geometrica della textura
sarebbe casuale, ossia il formarsi delle
placche tenderebbe verso un
aumento del disordine e quindi
dell'entropia.



Ma anche qui, la mano creatrice
dell'**artista**, come se avesse un
potere sulla natura, **interrompe il**
corso naturale degli eventi con un
atto deliberato, un'azione artistica.

Le trasformazioni operate dalla
natura vanno verso il grado più
basso delle forme e dell'energia
(**disordine**), mentre l'**arte** tende, in
direzione opposta, a salvare la
materia attraverso la ricerca di senso
(**ordine**).



Entropia e Informazione



Nella teoria dell'informazione
l'entropia S di una sorgente di
messaggi è l'informazione media I
contenuta in ogni messaggio emesso.

Si dimostra che vale la relazione:

$$I = -S$$

A un **aumento di entropia** corrisponde una **perdita di informazione** su un dato sistema, e viceversa".



Tenendo conto del carattere
probabilistico dell'entropia,
l'informazione contenuta in un
messaggio è tanto più grande quanto
meno probabile era.



Un messaggio scontato, che ha un'alta probabilità di essere emesso dalla sorgente contiene poca informazione, mentre un messaggio inaspettato, poco probabile contiene una grande quantità di informazione.



Una sequenza di lettere come
aaaaaaaaaa possiede meno entropia
(e più informazione) di una stringa
completamente casuale come
j3s0vek3 (meno informazione).



L'entropia può essere vista come la casualità contenuta in una stringa, ed è strettamente collegata al numero minimo di bit necessari per rappresentarla senza errori.



L'entropia di una sorgente risponde a domande come: qual è il numero minimo di bit che servono per memorizzare in media un messaggio della sorgente? Quanto sono prevedibili i messaggi emessi dalla sorgente?

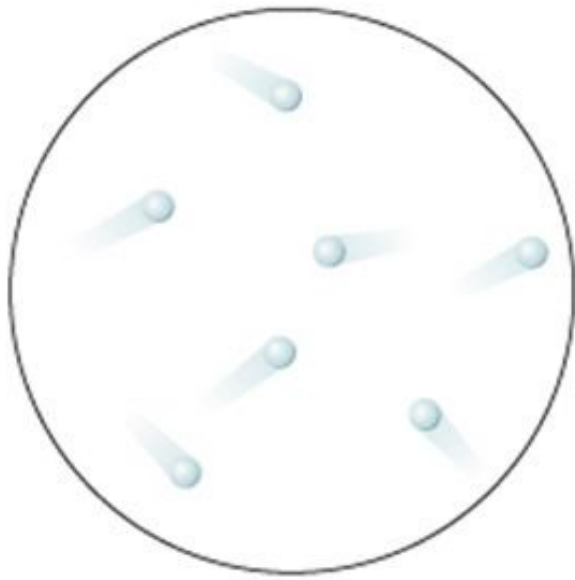


Si è dimostrato che una sequenza di messaggi emessi da una sorgente possono essere compressi senza perdita d'informazione fino ad un numero minimo di bit per messaggio uguale all'entropia della sorgente.

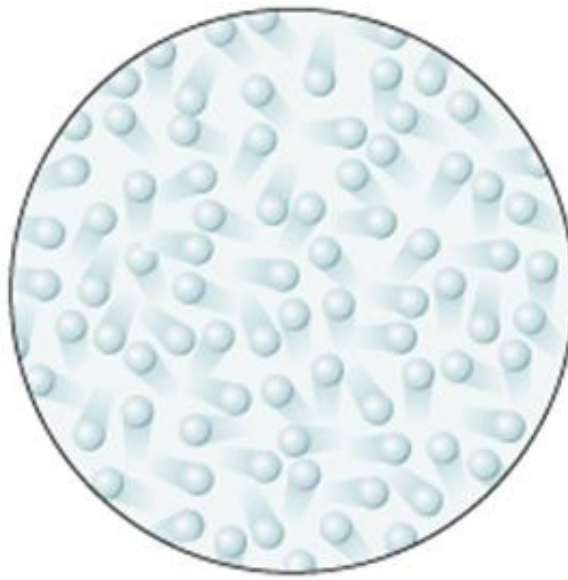


Primo teorema di Shannon:

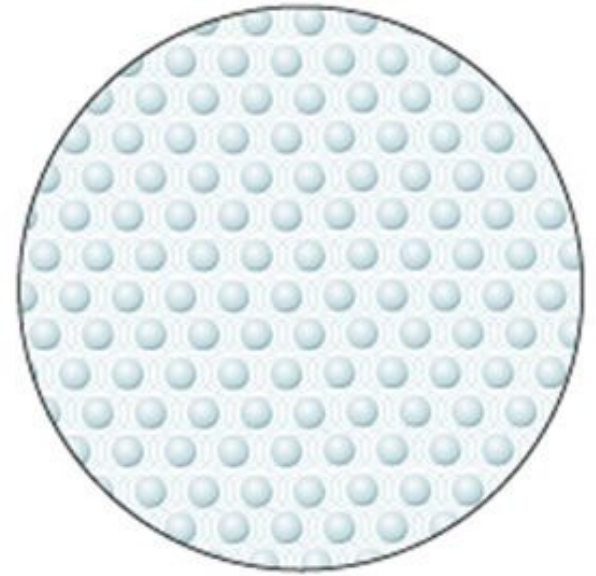
una sorgente casuale d'informazione
non può essere rappresentata con un
numero di bit inferiore alla sua
entropia, cioè alla sua
autoinformazione media.



Gas



Liquido



Solido



bassa informazione
alta entropia

elevata informazione
bassa entropia



Entropia e Letteratura

Cardenal Ernesto (Granada 1925)

Canto cosmico



Nascevano, crescevano e morivano le stelle.

E la galassia andava acquistando forma di fiore
come oggi la vediamo nella notte stellata.

La nostra carne e le nostre ossa vengono da altre stelle
e anche forse da altre galassie,

siamo universali,

e dopo la morte contribuiremo a formare altre stelle
e altre galassie.

Di stelle siamo fatti e alle stelle torneremo.



Treno più acuto man mano che si avvicina.

E gli oggetti celesti più azzurri nell'avvicinarsi
e più rossi nell'allontanarsi.

Perché è nera la notte...

È nera a causa dell'espansione dell'universo.

Altrimenti tutto il cielo brillerebbe come il sole.

E non ci sarebbe nessuno per vedere quella notte.

E le galassie verso dove muovono?

In espansione come il fumo che il vento disperde.



La seconda legge della termodinamica:
Questo costante fluire della luce verso le tenebre.
Dell'amore verso l'oblio.

• • •



FINE