



POLITECNICO  
MILANO 1863

# Entropia

*Prof. Ing. Alberto Salioni*

# Bilancio Entropico

## TEOREMA DI GINSBERG

1. Non puoi vincere.
2. Non puoi pareggiare.
3. Non puoi nemmeno abbandonare.



# Bilancio Entropico

“IL CALORE PASSA SPONTANEAMENTE DA UN CORPO CALDO A UNO FREDDO”

Si eseguono i bilanci di energia e di entropia per il sistema Z

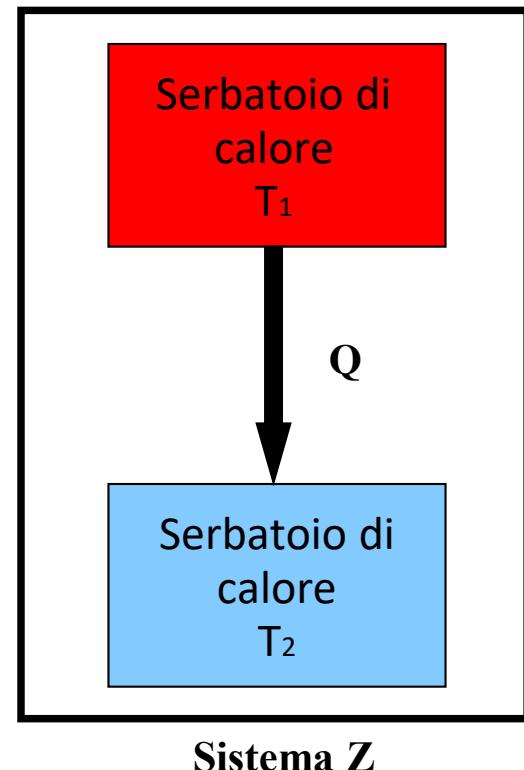
$$\Delta S_Z = S_{irr}$$

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 = S_{irr}$$

$$\Delta U_Z = 0$$

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$$

$$\vec{Q_1} + \vec{Q_2} = 0$$



# Bilancio Entropico

Il bilancio entropico diventa:

$$\frac{Q_1^\leftarrow}{T_1} + \frac{Q_2^\leftarrow}{T_2} = S_{irr}$$

$$-\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = S_{irr}$$

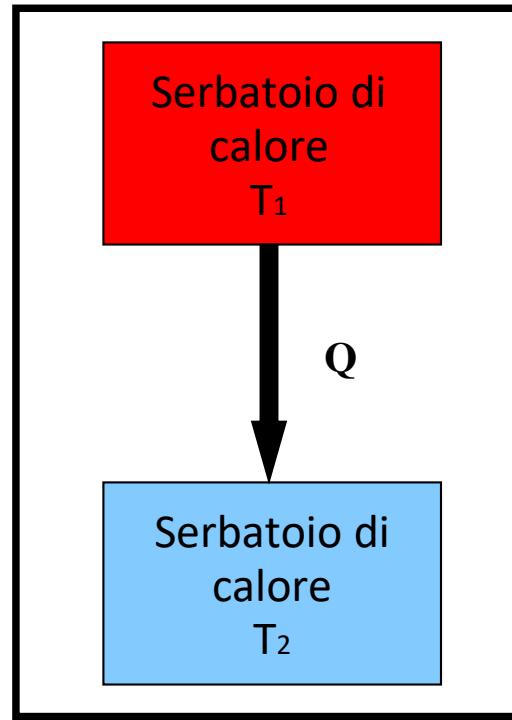
$$S_{irr} > 0$$

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$Q \left( \frac{-1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) = S_{irr} > 0$$
$$T_1 > T_2$$

$$\Delta S_Z = S_{irr}$$

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 = \Delta S_{irr}$$



# Bilancio Entropico

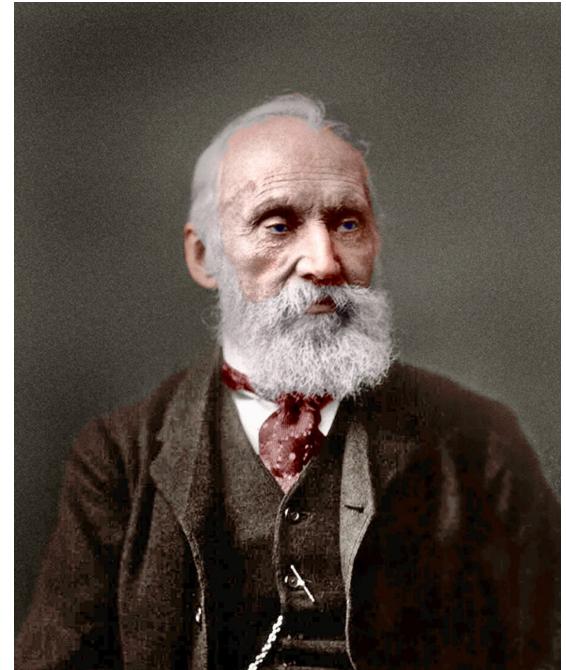
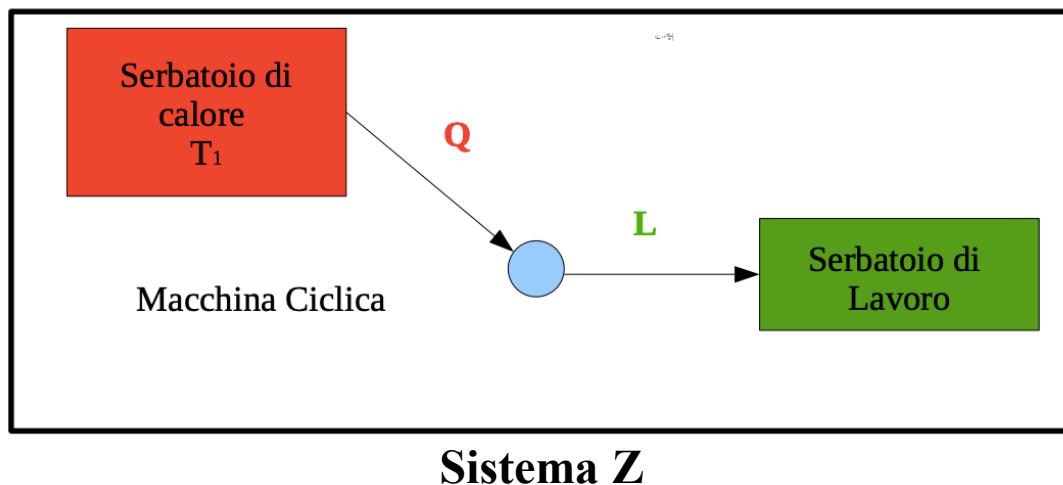
“Non esiste una macchina ciclica che non produca altro effetto che il trasferimento di calore da una sorgente fredda a una sorgente calda”



*Rudolf Julius Emanuel Clausius  
(2/01/1822, 24/08/1888)*

# Bilancio Entropico

“Non esiste una macchina ciclica il cui unico effetto sia l'assorbimento di calore da una sorgente calda e la produzione di un'equivalente quantità di lavoro”  
(Lord Kelvin)



*Lord William Thomson, I barone Kelvin  
(26/06/1824 – 17/12/1907)*

# Bilancio Entropico

$$\begin{cases} \Delta U_Z = 0 \\ \Delta S_Z = S_{irr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta U_{SC} + \Delta U_M + \Delta U_{SL} = 0 \\ \Delta S_{SC} + \Delta S_M + \Delta S_{SL} = S_{irr} \end{cases}$$

Ma essendo

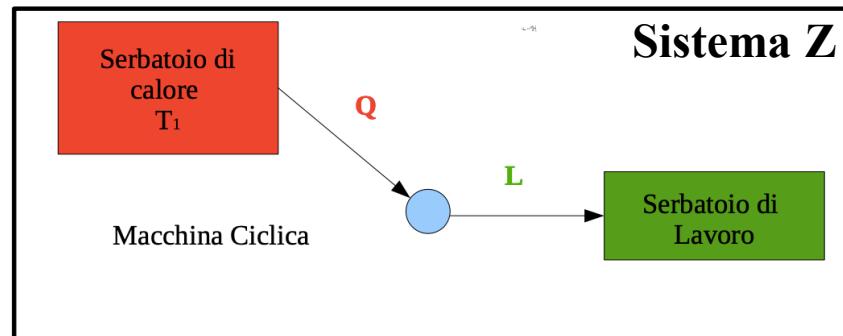
$$\begin{cases} \Delta U_{SC} = Q_{SC}^{\leftarrow} \\ \Delta S_{SC} = \frac{Q_{SC}^{\leftarrow}}{T_{SC}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta U_M = 0 \\ \Delta S_M = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta U_{SL} = -L_{SC}^{\rightarrow} \\ \Delta S_{SL} = 0 \end{cases}$$

Dal bilancio entropico deriva

$$\frac{Q_{SC}^{\leftarrow}}{T_{SC}} = S_{irr}$$



# Bilancio Entropico

Ed essendo  $S_{irr} > 0$  e  $T_{SC} > 0$  si conclude che anche **il calore scambiato dal serbatoio di calore debba essere positivo e quindi entrante nel serbatoio.**

Ciò significa che la situazione descritta in figura viola il secondo principio della termodinamica e che quindi tale macchina è incapace di produrre lavoro.

# Interpretazione fisica del concetto di Entropia

E' evidente ai nostri sensi che l'energia di un sistema termodinamico isolato può essere espressa come somma di due termini:

l'energia disponibile ad essere convertita in lavoro ( $E_{disp}$ ) e energia che non è possibile convertire in lavoro ( $E_{nondisp}$ )

$$E = E_{disp} + E_{nondisp}$$

Definiamo l'entropia come proprietà di un sistema termodinamico la cui variazione  $dS$  a seguito di una trasformazione sia proporzionale alla differenza fra la variazione di energia totale  $dE$  e la variazione dell'energia disponibile per produrre lavoro  $dE_{disp}$  :

$$dS = C(dE - dE_{disp})$$

# Interpretazione fisica del concetto di Entropia

Per un **sistema isolato** che evolve verso una diversa situazione di equilibrio a seguito della rimozione di vincoli, il **principio di conservazione dell'energia** consente di affermare che  $dE = 0$  mentre il **principio di degradazione dell'energia** consente di affermare che  $dE_{disp} < 0$  e quindi che  $dS_{is} \geq 0$

Secondo questa interpretazione l'entropia risulta essere una **misura dell'energia non disponibile**

# Legge dell'Entropia



# Bilancio Entropico



Entropy's purpose is to destroy, juxtaposed to his father, Eternity, whose purpose entails creation.

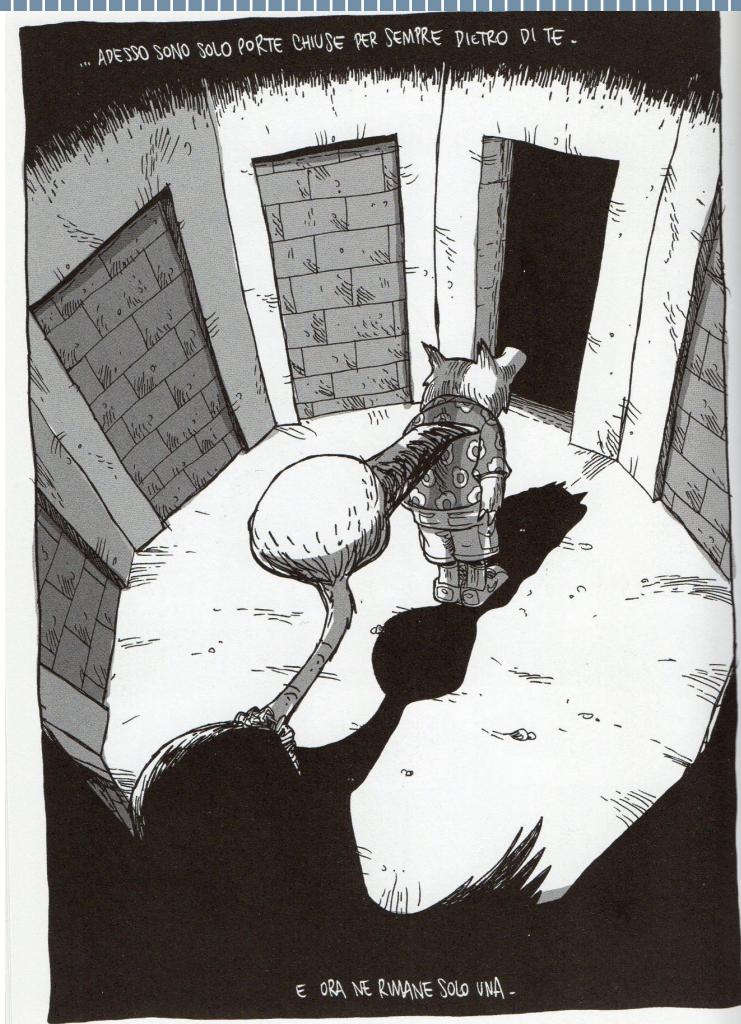
[https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy\\_\(comics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy_(comics))

# Bilancio Entropico

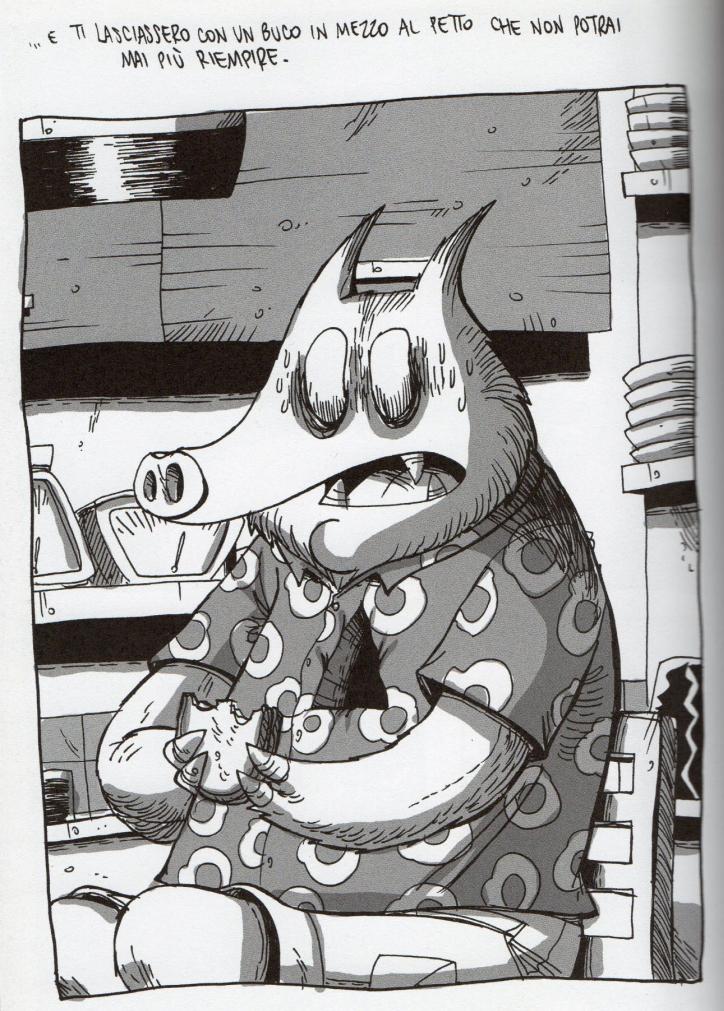
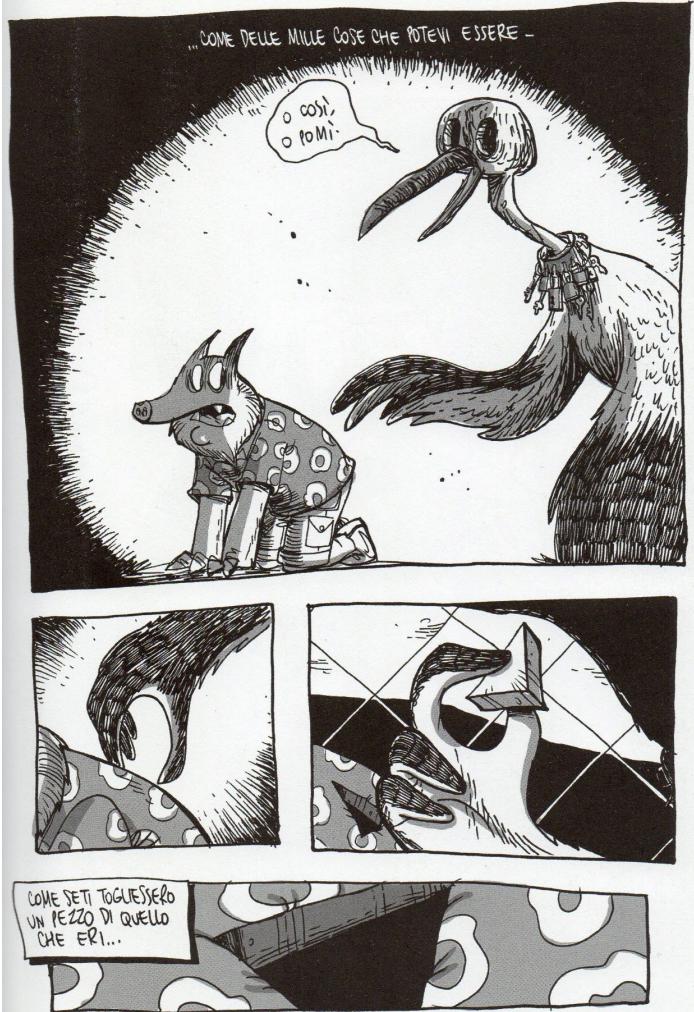
[\*\*Muse - The 2nd Law: Isolated System - YouTube\*\*](#)

*<https://www.youtube.com/watch?v=VXPoJAyeF8k>*

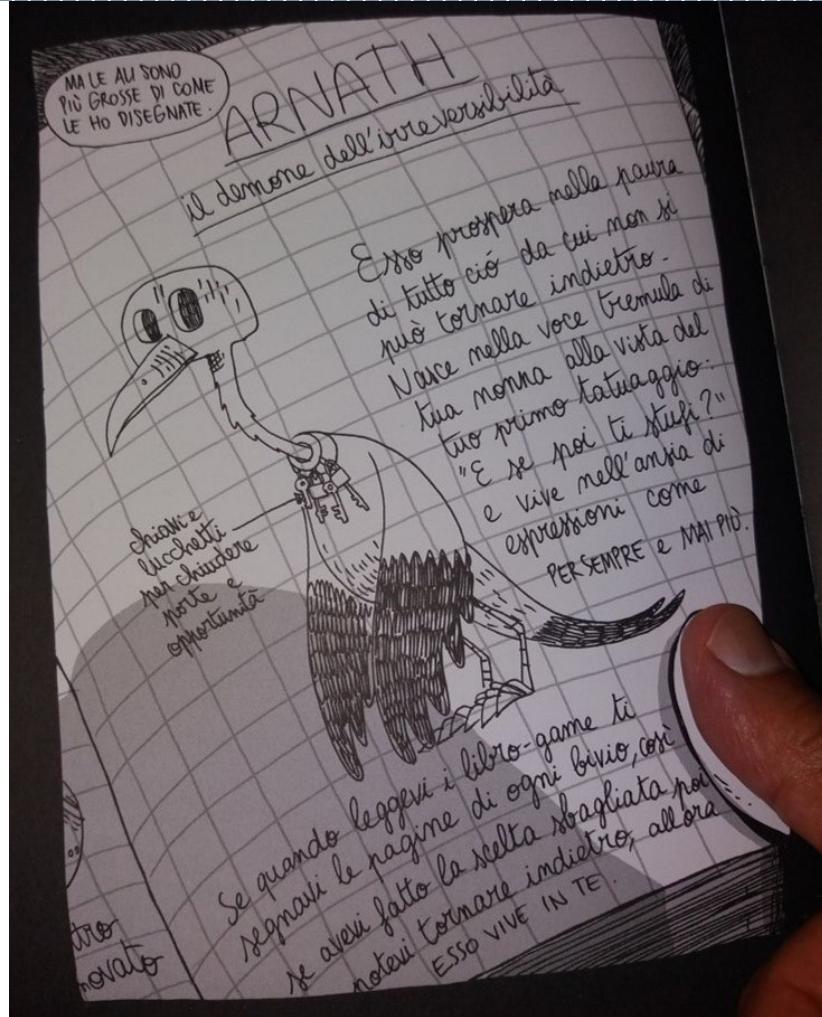
# Bilancio Entropico



# Bilancio Entropico



# Bilancio Entropico



# La visione Meccanicistica

**BACONE**

*Novum organum 1620 (Metodo Scientifico)*

**CARTESIO**

*Descrizione Matematica*

**NEWTON**

*Leggi della Dinamica*

**Sembra una descrizione ineccepibile dell'Universo**

**DISORDINE = NON CONFORMITÀ ALLE LEGGI NATURALI**

# La visione Meccanicistica

**SMITH**



**Politica**

- Estendere il dominio sulla natura
- Crescita illimitata

**LOCKE**



**Economia**

- Laissez faire
- Crescita illimitata

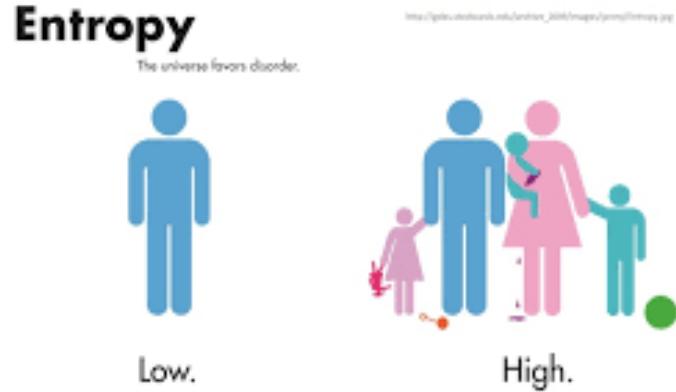
# Legge dell'Entropia

In ogni trasformazione di energia (che complessivamente per un sistema isolato rimane costante) una parte di essa non sarà più utilizzabile

M.Tegmark Vita 3.0 Pag 319

L'entropia è la freccia del tempo (ma non ci dice nulla sulla velocità)

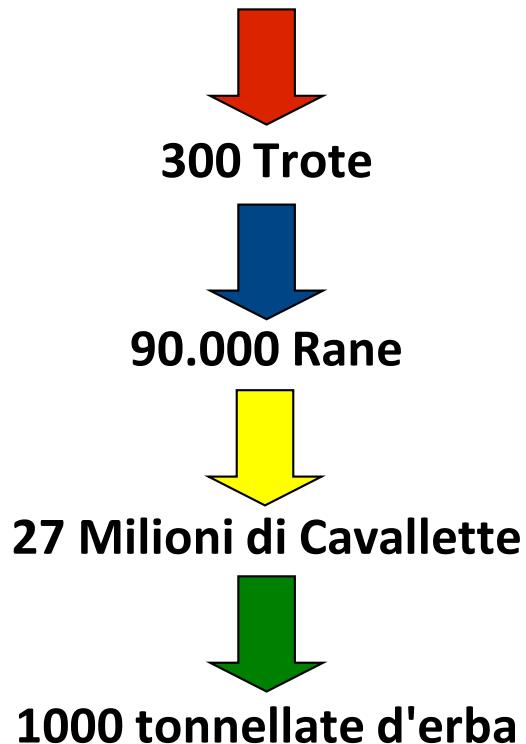
Gli esseri viventi riescono ad andare in direzione opposta a quella del processo entropico perché assorbono energia dall'ambiente circostante



# Legge dell'Entropia

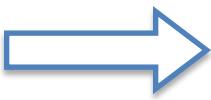
C'è un continuo passaggio di energia attraverso ogni essere vivente, energia che entra nel sistema a un livello più alto uscendone in uno stato degradato

**Per tenere in vita un uomo un anno**



# Legge dell'Entropia

**COLONIZZAZIONE**



- MAX energia utilizzata
- MIN efficienza

**CLIMAX**



- MIN energia utilizzata
- MAX efficienza

**TRANSIZIONE DA UN MODELLO DI COLONIZZAZIONE  
A UN MODELLO DI CLIMAX**

=

**PROGRESSO(?)**

# Legge dell'Entropia

*Esempio*

## UN'ANALISI ENTROPICA: L'INDUSTRIA MILITARE

- Alto impiego di capitale
- Forte intensità energetica
- Bassa intensità di lavoro
- Impatto inflattivo (retribuzioni senza ampliamento del mercato dei beni di consumo)
- Zone di elevata concentrazione energetica pronte a trasformarsi senza alcuna produzione di lavoro

# Legge dell'Entropia

**Possibile solo in presenza di un  
“Humus” composto da:**

- RICERCA DI BASE
- SCIENZA CONDIVISA
- LIBERO SCAMBIO DI IDEE
- SFERA DELLA COOPERAZIONE  
E DELLA COLLABORAZIONE

Innovazione  
Creazione di valore  
Nascita di imprese innovative



Prodotti  
Servizi  
Nuovi modelli di business



Benefici sociali ed economici

# Legge dell'Entropia

Non solo negli esempi citati, ma ***ogni volta che un sistema evolve verso stati di ordine maggiore, significa che il sistema non è isolato.*** Il maggior ordine raggiunto dal sistema è a scapito di un maggior disordine che il sistema riversa nell'ambiente, ovvero la diminuzione di entropia del sistema è più che compensata dall'aumento di entropia di ciò che ha interagito con il sistema stesso. Esula dal nostro tema capire perché questi elevati gradi di ordine (necessari ad ogni forma di vita), si realizzino, tuttavia è importante sapere che questo avviene senza che siano violati i principi della Fisica.

# Legge dell'Entropia

Quanto detto finora benché vero, in molte situazioni non è facilmente applicabile: infatti l'entropia è stata introdotta come funzione di stato (dove per stato si intende uno stato di equilibrio), mentre i sistemi aperti (quali, ad esempio, tutti gli organismi viventi) sono in genere molto lontani dall'equilibrio termodinamico. La termodinamica classica (o termodinamica degli stati di equilibrio) risulta quindi inadeguata alla descrizione di tali sistemi. Per descrivere sistemi di questo tipo e le trasformazioni che essi compiono è necessario ricorrere alla Termodinamica dei sistemi non in equilibrio e alla Sinergetica, la quale (oltre ad occuparsi di sistemi complessi lontani dall'equilibrio) tratta anche di fenomeni che esulano dal campo delle scienze naturali, quali l'economia e la sociologia, cambiando approccio.

# Legge dell'Entropia

*<<...Voi conoscete senz'altro l'episodio biblico della Torre di Babele. Ebbene, molti credono che il Signore disperse le lingue degli uomini per punirli, ma è l'esatto contrario.*

*Egli vide che l'uniformità li rendeva superbi, dediti a imprese tanto eccessive quanto inutili. Allora si rese conto che l'umanità aveva bisogno di un correttivo e ci fece dono delle differenze. Così i muratori, di costumi e fedi diversi, devono trovare un modus vivendi che consenta di portare a termine l'edificio.*

*E per questo non serve una tolleranza concessa, ostentata, com'è quella che viene dal potente, bensì una tolleranza esperita, vissuta ogni giorno, con la consapevolezza che se essa venisse meno, la casa crollerebbe e si rimarrebbe senza riparo. ...>>*

da "Altai" di Wu Ming  
Ed. Einaudi

# Entropia e complessità

Tutti gli esempi concreti di complessità sono riconducibili a situazioni in cui:

- un sistema contiene un sistema di molti oggetti interagenti detti “agenti”;
  - il comportamento di questi oggetti è condizionato da un feed back;
  - ogni agente può adattare il proprio comportamento in modo autonomo;
  - il sistema è tipicamente “aperto”, influenzabile dall’ambiente circostante.

Un sistema di questo tipo:

- sembra essere “vivo”
- dà luogo a fenomeni emergenti sorprendenti e talvolta estremi senza l’intervento di un controllore centrale
- alterna comportamenti ordinati e disordinati in maniera complicata

# Entropia e complessità

Lo spirito della complessità è agli antipodi dell'approccio riduzionistico

La complessità si occupa dei fenomeni complicati e sorprendenti che possono emergere dall'interazione di un insieme di oggetti che individualmente possono essere abbastanza semplici

La ricerca di una teoria quantitativa della complessità non richiede di conoscere dettagliatamente gli elementi costitutivi di un insieme per presagirne il comportamento

I sistemi complessi sono capaci di oscillare spontaneamente tra un comportamento ordinato e il disordine tipico della normalità quotidiana senza alcun aiuto dall'esterno

# Entropia e complessità

La fisica ha tantissime risposte per alcune classi di sistemi ma è ben lontana dall'avere tutte le risposte per l'insieme dei sistemi complessi

Il modo con cui l'output di un sistema complesso cambia col tempo riguarda il dominio più generale della dinamica non lineare

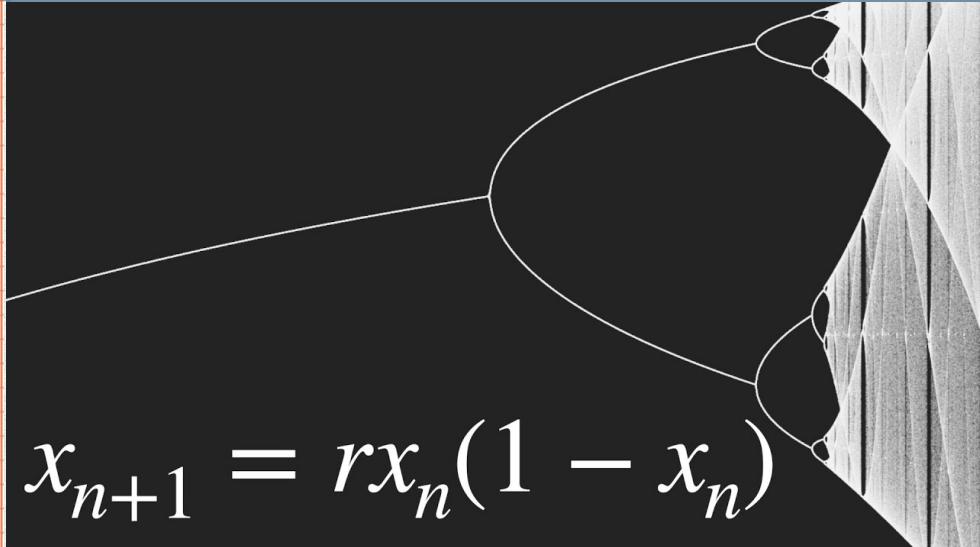
La parola “caos” viene utilizzata quando l'output cambia in maniera così irregolare da sembrare casuale: il caos, infatti, è solo uno degli esempi particolari della dinamica non lineare

Esempio:  $S_2 = r \cdot S_1 \cdot (1 - S_1)$

Veritasium logistic equation <https://www.youtube.com/watch?v=ovJcsL7vyrk>

S2=r\*S1\*(1-S1)

r	0,3	0,9	2	3,2	3,3	3,4	3,5
s1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
s2	0,072	0,216	0,480	0,768	0,792	0,816	0,840
s3	0,020	0,152	0,499	0,570	0,544	0,510	0,470
s4	0,006	0,116	0,500	0,784	0,819	0,850	0,872
...	0,002	0,092	0,500	0,541	0,490	0,434	0,391
0,001	0,076	0,500	0,795	0,825	0,835	0,833	
0,000	0,063	0,500	0,522	0,477	0,468	0,486	
0,000	0,053	0,500	0,798	0,823	0,846	0,874	
0,000	0,045	0,500	0,515	0,480	0,442	0,385	
0,000	0,039	0,500	0,799	0,824	0,839	0,828	
0,000	0,034	0,500	0,513	0,479	0,460	0,498	
0,000	0,029	0,500	0,799	0,824	0,845	0,875	
0,000	0,026	0,500	0,513	0,479	0,446	0,383	
0,000	0,022	0,500	0,799	0,824	0,840	0,827	
0,000	0,020	0,500	0,513	0,479	0,457	0,501	
0,000	0,017	0,500	0,799	0,824	0,844	0,875	
0,000	0,015	0,500	0,513	0,479	0,449	0,383	
0,000	0,014	0,500	0,799	0,824	0,841	0,827	
0,000	0,012	0,500	0,513	0,479	0,455	0,501	
0,000	0,011	0,500	0,799	0,824	0,843	0,875	
0,000	0,010	0,500	0,513	0,479	0,450	0,383	
0,000	0,009	0,500	0,799	0,824	0,841	0,827	
0,000	0,008	0,500	0,513	0,479	0,453	0,501	
	0,007				0,843	0,875	
	0,006				0,451	0,383	
	0,005				0,842	0,827	
	0,005				0,453	0,501	
	0,004				0,842	0,875	
	0,004				0,451	0,383	
	0,004				0,842	0,827	
	0,003				0,452	0,501	
	0,003				0,842	0,875	
	0,003				0,452	0,383	
	0,002				0,842	0,827	
	0,002				0,452	0,501	
	0,002				0,842	0,875	
	0,002				0,452	0,383	
	0,001				0,842	0,827	
	0,001				0,452	0,501	
	0,001				0,842	0,875	
	0,001				0,452	0,383	
	0,001				0,842	0,827	
	0,001				0,452	0,501	
	0,001				0,842	0,875	
	0,001				0,452	0,383	
	0,001				0,842	0,827	
	0,001						
	0,001						
	0,000						



# Entropia e complessità

«I sistemi omeodinamici, come certamente sono i sistemi viventi, organizzano spontaneamente le loro attività quando perdono stabilità, in quei punti di biforcazione essi manifestano comportamenti complessi dalle caratteristiche emergenti come commutatori bistabili, soglie, onde, gradienti e riorganizzazioni molecolari dinamiche.»

Antonio Damasio Lo strano ordine delle cose

NB. Il comportamento dei sistemi complessi del mondo reale è ben più complicato del comportamento ottenuto attraverso l'applicazione ripetuta di una formula matematica

Infatti:

- 1) i sistemi complessi reali attivano interazioni con meccanismi di feedback e memoria
- 2) i sistemi complessi reali si muovono dall'ordine al disordine spontaneamente (è come se  $r$  cambiasse da solo)
- 3) un essere vivente non percorre la propria esistenza compiendo azioni dettate da un'unica complicatissima formula matematica.

E come sempre bisogna stare attenti al modo con cui si osservano i fenomeni: non aggiungere complessità dove non ce n'è e non farsi sfuggire la complessità dove effettivamente è presente

# Entropia e informazione

L'informazione è una misura del numero di alternative possibili per un evento (Shannon).

NB: l'informazione non misura ciò che so, ma il numero di alternative possibili (es.  
conoscere la data del tuo compleanno N=365,  
sapere se tirando una moneta è uscita testa N=2)

Invece di usare il numero N di alternative è più conveniente usare il logaritmo in base 2  
di N, chiamato S.

Così infatti l'unità di misura  $S = 1$  corrisponde a  $N = 2$ , l'alternativa minima  
corrispondente a due sole possibilità. Questa unità di misura è chiamata "bit".

Un punto chiave è che l'informazione può essere da qualche parte.

La nozione di informazione è utile perché misura la possibilità dei sistemi fisici di  
comunicare fra loro.

Amanda Gefter Due intrusi nel mondo di einstein pag 197

# Entropia e informazione

C'è ben più dei soli atomi nell'idea della realtà fisica. Qualcosa è catturato dal modo in cui si dispongono l'uno rispetto all'altro.

Ma quale rilevanza può avere il modo in cui si dispongono gli atomi in un mondo in cui non ci sono che atomi?

Se gli atomi sono alfabeto chi può leggere le frasi scritte in questo alfabeto?

Il mondo non è quindi solo una rete di atomi che si scontrano, è anche una rete di correlazioni fra insiemi di atomi, una rete di reciproca informazione fra sistemi fisici.

# Entropia e informazione

Il calore è movimento microscopico casuale delle molecole: quando il caffè è più caldo le molecole si muovono più in fretta. Ma perché il caffè si raffredda?

Boltzmann ha azzardato un'idea geniale:

	CAFFE' FREDDO	CAFFE' CALDO
N° DI POSSIBILI STATI DELLE MOLECOLE	Basso	Alto
INFORMAZIONE (che non abbiamo)	Bassa	Alta
ENTROPIA	Bassa	Alta

# Entropia e informazione

Ma perché il caffè, se lo lasciamo nella tazzina in cucina esposto all'aria si raffredda?

	CAFFE' CALDO + ARIA FREDDA	CAFFE' E ARIA TIEPIDI
N° DI POSSIBILI STATI DELLE MOLECOLE	Minore	Maggiore
INFORMAZIONE (che non abbiamo)	Minore	Maggiore
ENTROPIA	Minore	Maggiore

Un altro esempio

	Sole invia alla Terra un fotone "caldo"	Terra emette 10 fotoni "freddi"
N° DI POSSIBILI CONFIGURAZIONI DEI FOTONI	Minore	Maggiore
INFORMAZIONE (che non abbiamo)	Minore	Maggiore
ENTROPIA	Minore	Maggiore

# Entropia e informazione



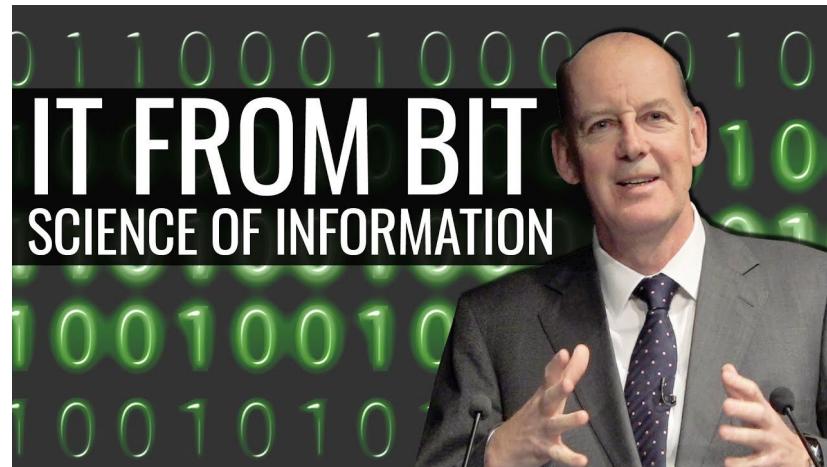
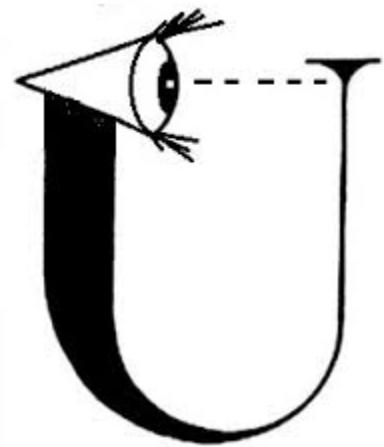
Boltzmann ha calcolato in quanti diversi stati possono essere le molecole di caffè e le molecole di aria. Calcolando l'informazione mancante si scopre che alla fine è aumentata.

$S = k \log W$  esprime l'informazione (mancante) come logaritmo del numero di alternative e coincide con l'entropia. L'informazione può essere usata come strumento concettuale per fare luce sulla scienza del calore.

# Entropia e informazione

Addirittura un numero crescente di teorici afferma che il concetto di informazione possa condurre a comprendere gli aspetti ancora misteriosi della meccanica quantistica

It from bit (John Wheeler)



# Entropia e Tempo

L'entropia è una quantità relativa.

**L'entropia di A rispetto a B conta il numero di configurazioni di A che le interazioni fisiche fra A e B non distinguono.**

Modo classico di interpretare relazione fra tempo e stato di equilibrio:

**Tempo** (assoluto e oggettivo) à **Energia** (governa l'evoluzione nel tempo) à **Stato di equilibrio** (mescola le configurazioni di uguale energia).

Leggendola al contrario:

**Stato di equilibrio** (visione sfocata del mondo) à **Energia** (grandezza che viene preservata) à **Tempo** (generato).

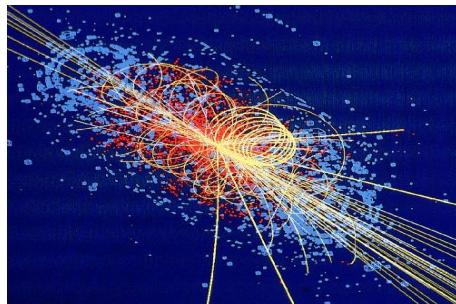
# Entropia e Tempo

E' l'irreversibilità a caratterizzare ciò che chiamiamo "tempo".

Invece che cercare di capire perché il tempo produca dissipazione bisognerebbe chiedersi perché la dissipazione di calore produca il tempo.

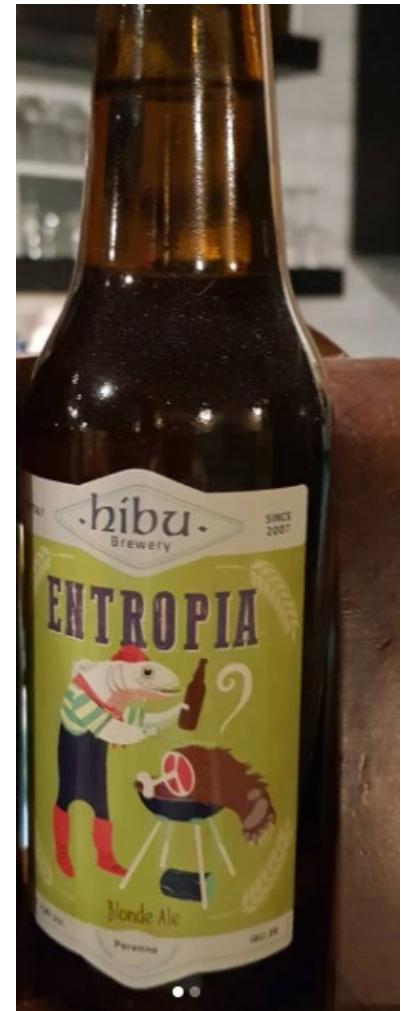
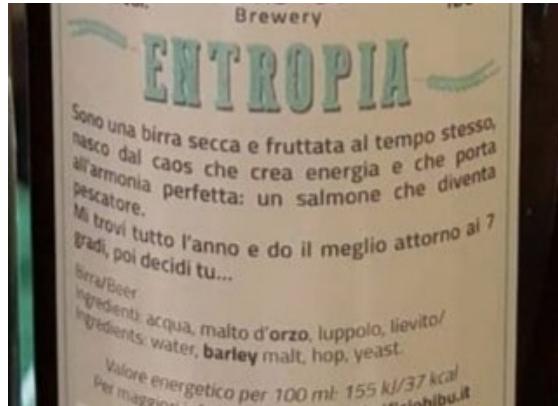
La nozione di calore deriva dal fatto che interagiamo solo con quantità medie di molte variabili. Il tempo non è un costituente fondamentale del mondo ma è lo stesso ubiquo perché il mondo è immenso e noi siamo piccoli sistemi che interagiscono solo con variabili macroscopiche che mediano sempre su innumerevoli variabili microscopiche.

E le medie si comportano sempre come medie: disperdoni calore e intrinsecamente generano tempo.



# Entropia e Tempo

[La filosofia di interstellar](#)  
(NB inizia al minuto 9,37)



Tenet trailer

[https://www.youtube.com/watch?v=a9YE2jl\\_07w&t=27s](https://www.youtube.com/watch?v=a9YE2jl_07w&t=27s)

[pianelli tik tok tenet](#)

# Legge dell'Entropia

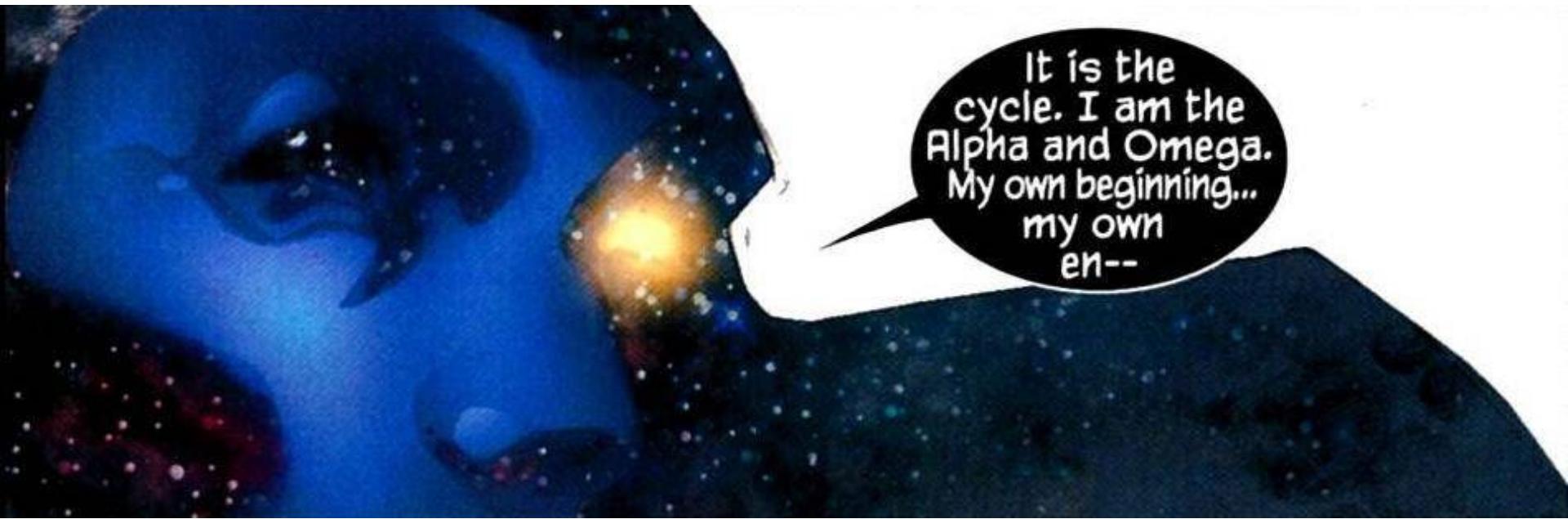
*La conseguenza di tutto questo, conclude Kufmann, è che abbiamo bisogno di storie. Se infatti non possiamo predefinire lo spazio delle configurazioni, le variabili, le leggi e le condizioni iniziali e al contorno di una biosfera, possiamo tuttavia raccontarne le storie mentre essa si dispiega: “Le biosfere esigono i loro Shakespeare non meno dei loro Newton”.*

*Marcello Cini*

Vito Mancuso  
Il bisogno di pensare pag 143

*“Il supermarket di Prometeo”*

# Note per lo studente



[TED Poli sull'entropia](#)

# Note per lo studente