

Geografia dello sviluppo,
ambiente e risorse energetiche.
(Risorse- Economia- Ambiente)

Lezione 6

Martedì 27 marzo 2018

Entropia.
Considerazioni sul secondo
principio della
termodinamica

2 ore

Totale ore 12/48

N.	data	cat.	ore	titolo
1	27.02.18	Z	2	Presentazione del corso
2	13.03.18	C	4	Il picco del petrolio (o picco di Hubbert) I.
3	15.03.18	C	6	Il Picco di Hubbert II
4	20.03.18	A	8	Cosa è l'energia. Conservazione e conversione.
5	22.03.18	A	10	I principi della termodinamica e l'entropia.
6	27.03.18	A	12	Entropia e considerazioni sui principi della termodinamica
7	03.04.18	B	14	Energia in natura e fotosintesi
8	05.04.18	B	16	Energia degli autotrofi e di Homo sapiens
9	10.04.18	B	18	Complessificazione preindustriale. Strumenti e tecnologia.
10	12.04.18	C	20	L'era dei combustibili fossili.
11	17.04.18	C	23	EROEI ed Energia Netta.
12	19.04.18	C	25	Alternative ai combustibili fossili. Il nucleare.
13	24.04.18	C	27	Alternative ai combustibili fossili. Fonti rinnovabili.
14	26.04.18	D	29	Rearefazione delle risorse minerali implicazioni ecologiche, economiche e sociali.
15	04.05.18	D	32	Le Georisorse ed il loro futuro (Prof. F. Di Benedetto)
16	08.05.18	E	34	Misure di impatto ambientale del metabolismo sociale ed economico
17	10.05.18	F	36	Limiti dello sviluppo o della crescita?
18	15.05.18	F	38	I sistemi complessi e la dinamica dei sistemi.
19	17.05.18	F	40	Esercitazione sulla dinamica dei sistemi.
20	22.05.18	E	42	Clima e cambiamenti climatici
21	29.05.18	E	44	Esercitazione sul Picco di Hubbert (gioco da tavolo)
22	31.05.18	G	46	Conclusioni
23	05.06.18	G	48	Esercitazioni d'esame

Table 3.1 Evolution of power outputs of machines available to humans

Machine	Horsepower	Kilowatt	Joules per second
Man pushing a lever	0.05	0.04	40
Ox pulling a load	0.5	0.4	307
Water wheels	0.5–5	0.4–3.7	300–2800
Versailles water works (1600)	75	56	42,000
Newcomen steam engine	5.5	4.1	3070
Watt’s steam engine	40	30	22,000
Marine steam engine (1850)	1000	746	55,200
Marine steam engine (1900)	8000	6000	4.5 million
Steam turbine (1940s)	300,000	224,000	165 million
Nuclear power plant (1970)	1,500,000	1,120,000	840 million

Derived from Cook (1976). *Man, Energy, Society*, W. H. Freeman

Charles A.S. Hall. *Energy Return on Investment A Unifying Principle for Biology, Economics, and Sustainability*.

Abbiamo esaminato i principi della termodinamica che regolano gli scambi energetici fra corpi. **Il principio zero** definisce le condizioni dell'equilibrio termico e come misurarlo attraverso misure termometriche.

Il primo principio generalizza il principio di conservazione dell'energia e registra il fatto che negli scambi di energia fra corpi le due valute interessate sono calore e lavoro. Il primo è la manifestazione macroscopica del moto disordinato delle particelle microscopiche (atomi e molecole) che costituiscono il corpo stesso. **Il secondo principio** stabilisce che in ogni scambio di energia fra corpi si paga una tassa energetica sotto forma di calore. Questo calore è energia di qualità inferiore rispetto a quella (concentrata) di partenza.

Ciascun principio definisce una funzione termodinamica, cioè una grandezza che caratterizza i sistemi che si studiano dal punto di vista degli scambi di energia. Il principio zero definisce la temperatura, il primo principio l'energia, e il secondo principio l'entropia di cui parleremo in questa lezione.

I principi della termodinamica

leggi tratte dall'osservazioni dei fenomeni, quindi non sono dimostrabili come teoremi matematici o deducibili da altre leggi, ma si suppone (fino a prova contraria) che siano leggi di natura inviolabili.

- Equilibrio termico. Principio 0. Temperatura.
- Conservazione dell'energia. Principio I. Energia.
- Direzione dei processi. Principio II. Entropia.

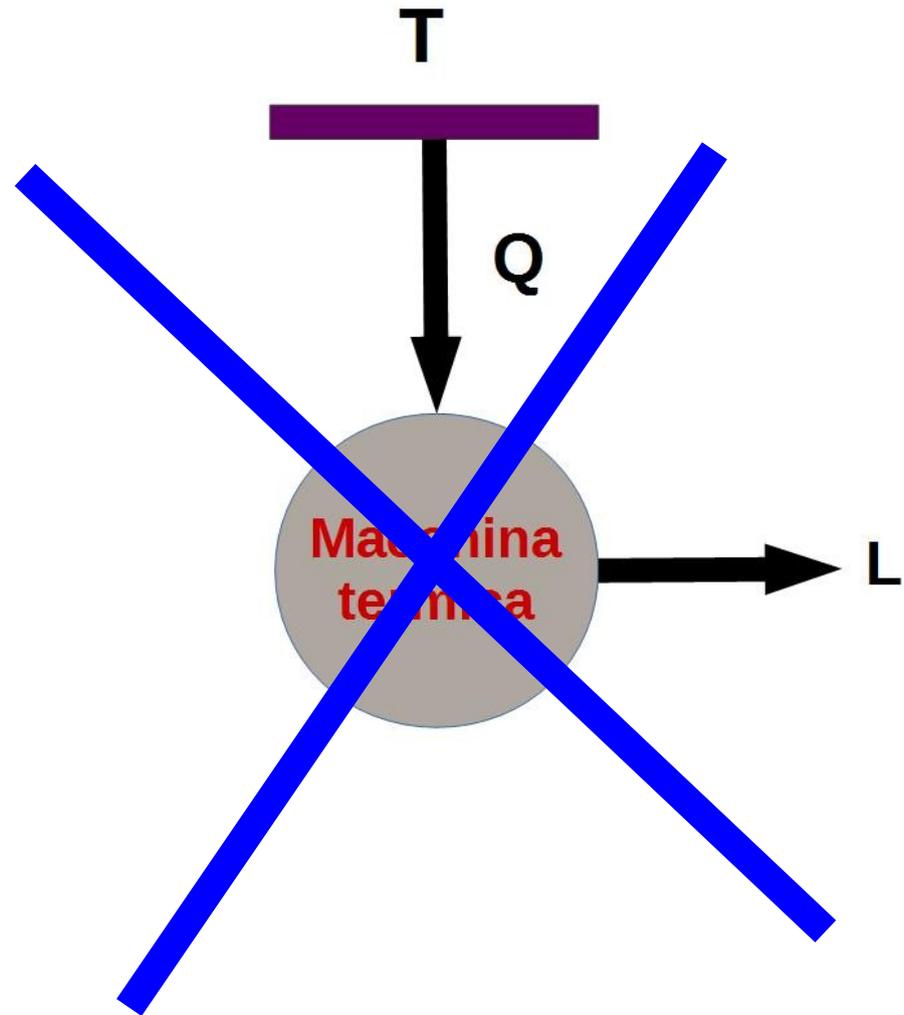
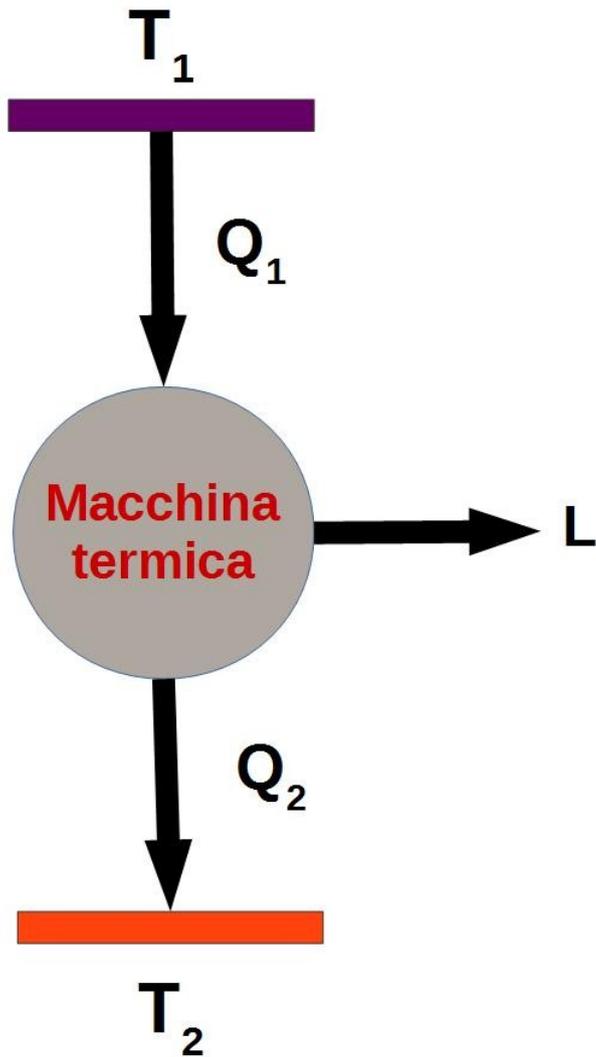
Esistono diverse formulazioni del secondo principio le tre principali sono le seguenti:

*«È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia quello di trasferire calore da un corpo più freddo a uno più caldo senza l'apporto di lavoro esterno»
(formulazione di Clausius).*

*«È impossibile realizzare una trasformazione ciclica il cui unico risultato sia la trasformazione in lavoro di tutto il calore assorbito da una sorgente omogenea»
(formulazione di Kelvin-Planck).*

«È impossibile realizzare una macchina termica il cui rendimento sia pari al 100%.»

Come si vede si tratta in tutti i casi della constatazione sperimentale di una **impossibilità**. La termodinamica, da questo punto di vista, è la scienza del limite. Ma in fisica esistono molteplici limiti.



Macchina impossibile che trasforma tutto il calore Q tratto dalla sorgente a temperatura T in lavoro L .

Impossibilità fisiche

È impossibile superare la velocità
Della luce nel vuoto.
300.000.000 m/s

È impossibile scendere a temperature
inferiori allo zero assoluto. -273,15 C

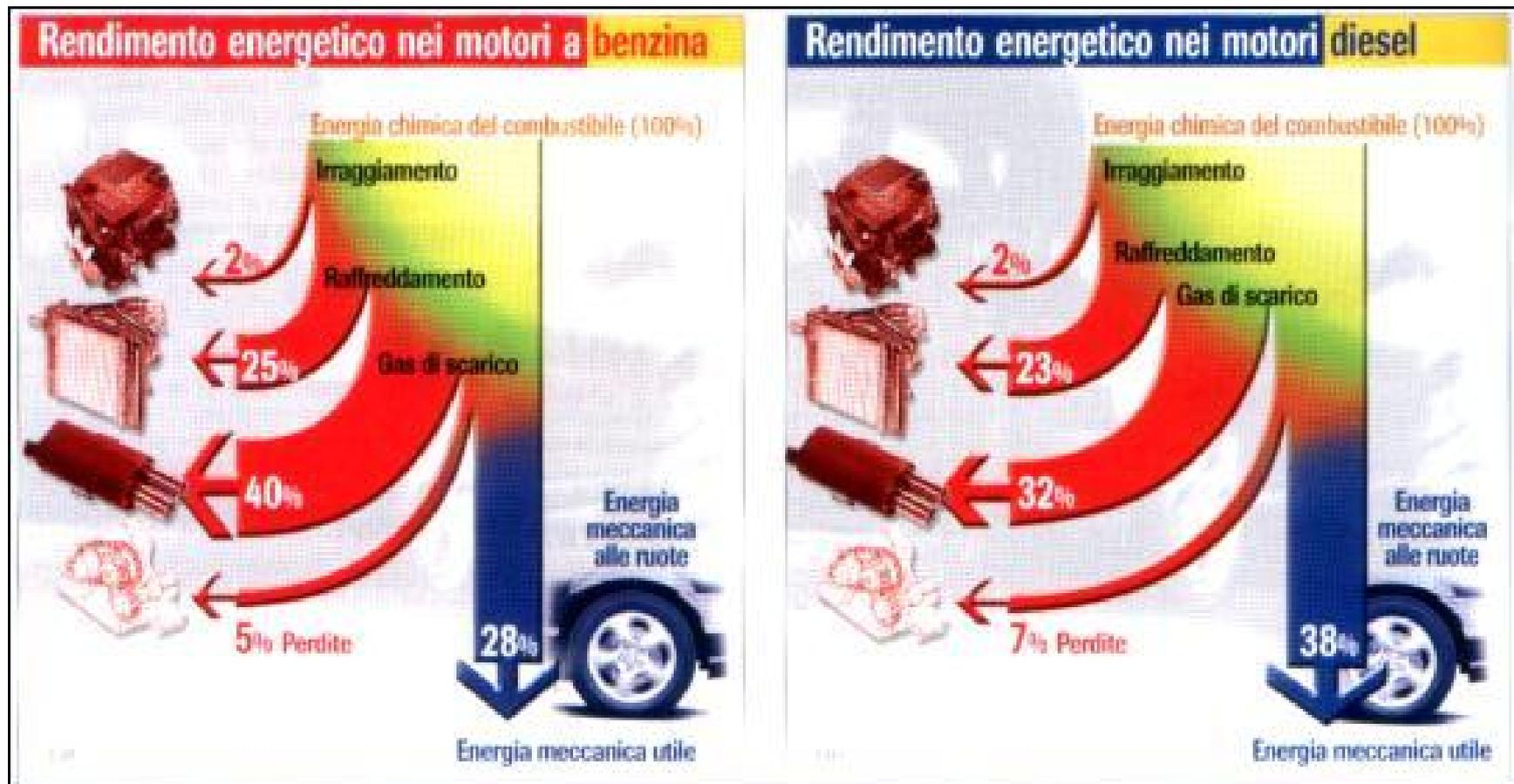
È impossibile il moto perpetuo.

Le conseguenze del secondo principio sono più profonde di quanto potrebbe apparire dagli enunciati. Il secondo principio indica la direzione dei processi spontanei e da una misura della loro irreversibilità.

Prendiamo il caso del motore a scoppio citato nella lezione 5. Al termine del ciclo, la benzina è stata bruciata e i prodotti della combustione vengono scaricati nell'ambiente ad una temperatura molto inferiore a quella della camera di scoppio. Supponiamo che la temperatura sviluppata nella camera di scoppio sia 2500 K e che lo scarico avvenga a 400 K. Il massimo rendimento del motore sarebbe, secondo la formula appresa nella lezione 3 pari a $(2500-400)/2500 = 2100/2500 = 0,84$ o l'84%). Una parte dell'energia che era contenuta nel combustibile si ritrova nell'ambiente come calore irrecuperabile. Una parte del calore prodotto nello scoppio si è trasformato nel movimento della macchina, ma oltre al calore perso nello scarico altro calore viene scambiato al radiatore con l'ambiente circostante e direttamente dal motore per radiazione. Tutto questo calore è irrecuperabile (una parte viene riutilizzata per scaldare l'abitacolo in inverno) e riduce ulteriormente il rendimento del motore che non supera il 30% nel motore a benzina e il 40% nel motore diesel.

La tassa termica ha colpito ancora! Abbiamo trasformato l'energia chimica ordinatamente contenuta nelle molecole di combustibile e l'abbiamo trasformata in energia termica concentrata ad alta temperatura (nella combustione). Quest'ultima ha fornito del lavoro meccanico utile, ordinato, che è servito a spostare l'auto, pagando un prezzo termico di oltre il 70% che è il calore perso al tubo di scappamento, al radiatore e direttamente dal motore nell'aria, nell'attrito delle gomme sulla strada ecc.

Rendimento termico dei motori



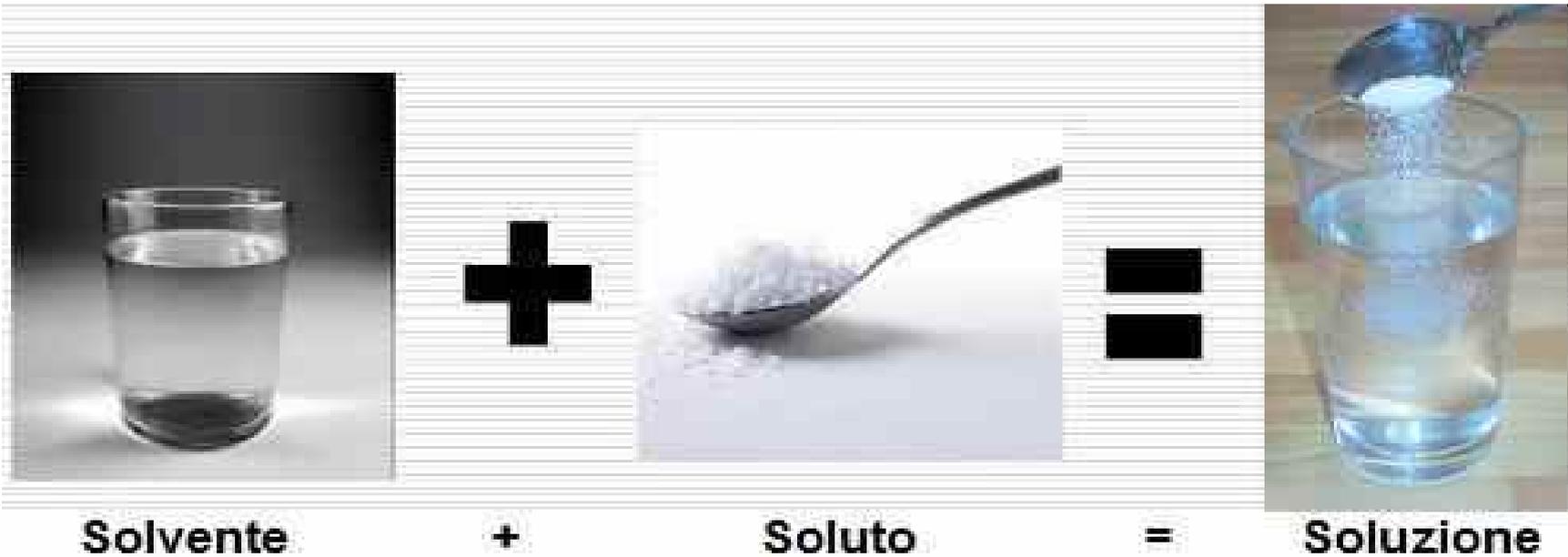
L'intero processo descritto per il motore a scoppio potrebbe essere ripetuto per ogni altra conversione energetica. Ad esempio nella produzione di energia elettrica da combustibili fossili. Ma in questo momento quello che mi preme sottolineare è che questo fenomeno della perdita di una parte più o meno consistente di energia in forma di calore, è una manifestazione dell'irreversibilità del fenomeno.

L'irreversibilità è una manifestazione del secondo principio della termodinamica. In pratica nessuno si aspetta che il calore disperso dal motore si riconcentri e che le molecole dei gas di scarico tornino a combinarsi riformando benzina o gasolio. La direzione del processo è determinata e non si torna indietro.

Potremmo, volendo, tornare indietro, ma al prezzo di una spesa energetica molto maggiore di quella contenuta nel combustibile iniziale. Ammesso che ciò fosse possibile, per recuperare i gas di scarico e ricombinarli per fare benzina dovremmo consumare più energia (molta di più, in effetti) di quella contenuta nel combustibile ottenuto. Questo è il significato che si dà in termodinamica all'irreversibilità.

La irreversibilità dei fenomeni si manifesta in molti altri casi. Prendiamo, ad esempio, il caso della figura che segue. Sciogliendo il sale in una data quantità di acqua otteniamo una soluzione salata (ci voleva poco a capirlo!). Per tornare indietro cioè tornare alla situazione di acqua pura e sale separati dovremmo far evaporare l'acqua fornendogli calore. Il processo costa più energia di quella che è servita per sciogliere il sale nell'acqua.

Impossibilità termodinamica

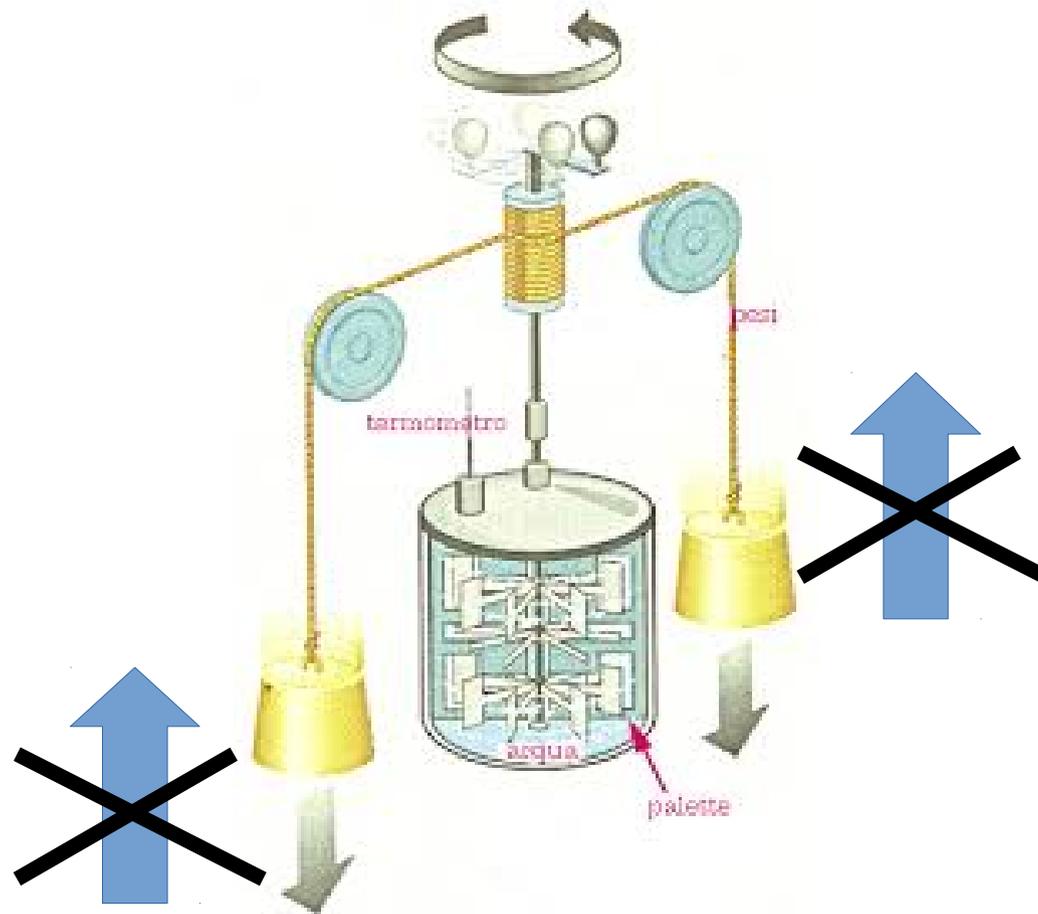


I processi irreversibili mostrano di avere una direzione in cui avvengono in modo spontaneo. Se prendiamo il mulinello di Joule vedremo i pesi cadere spontaneamente e l'acqua contenuta nel contenitore isolato termicamente riscaldarsi sotto l'effetto delle palette, ma non capiterà mai che i pesi risalgano in virtù di un raffreddamento dell'acqua. Per far risalire i pesi si dovrà ricorrere ad altro lavoro esterno, ad esempio quello dello sperimentatore che solleva i pesi con la carrucola (si veda il filmato su youtube all'URL: <https://www.youtube.com/watch?v=MBrTDKc9YZ0>)

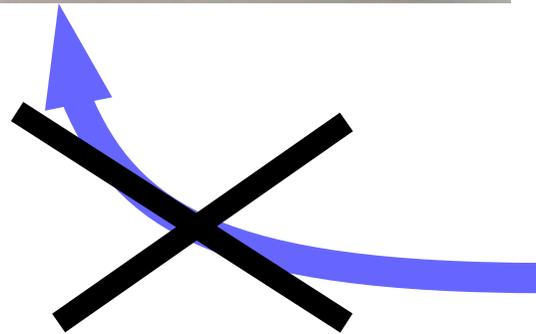
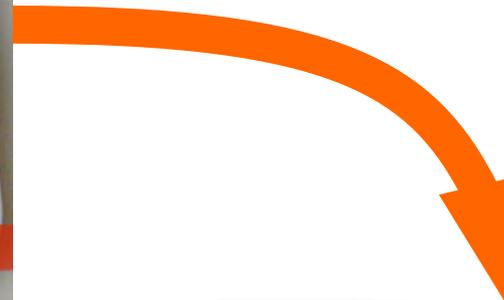
Altrettanto impossibile, termodinamicamente, sarà la ricreazione delle uova da una frittata o della legna ordinatamente accatastata da un mucchio di cenere.

Scopriamo dunque che i cambiamenti procedono spontaneamente in una direzione e per invertire quella direzione bisogna spendere una quantità maggiore di energia di quella che abbiamo speso per andare nella direzione spontanea. **Questa osservazione è un'ulteriore conseguenza del secondo principio della termodinamica.** Forse la più importante.

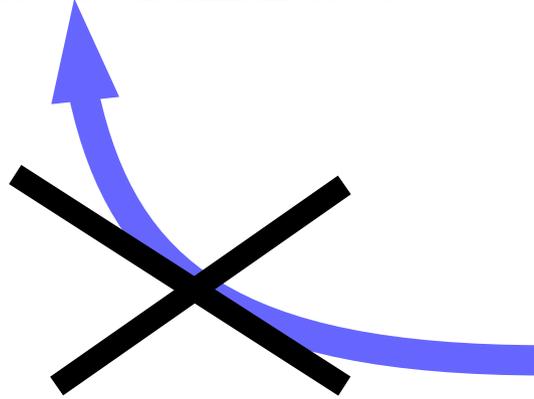
Impossibilità termodinamica



Impossibilità termodinamica

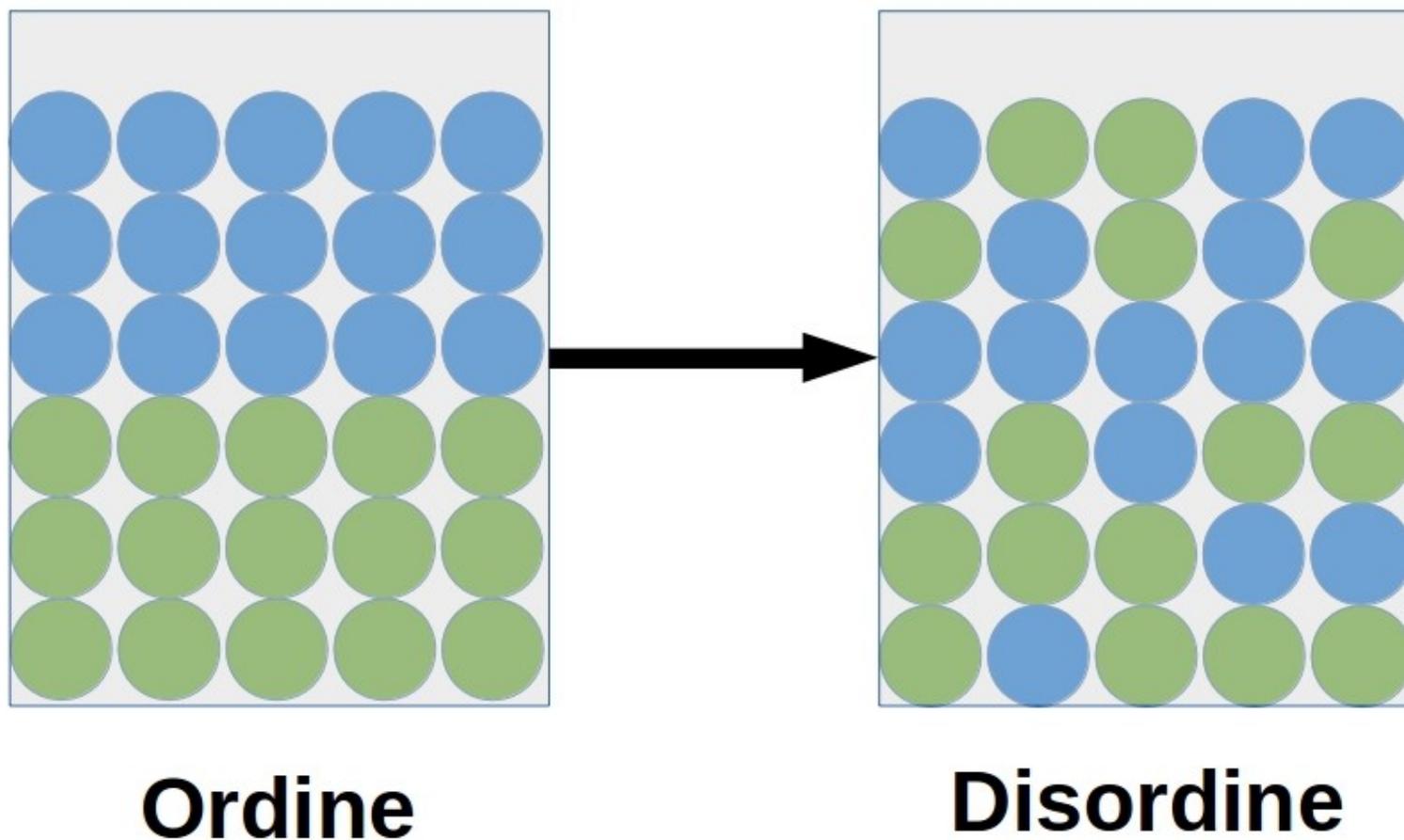


Impossibilità termodinamica



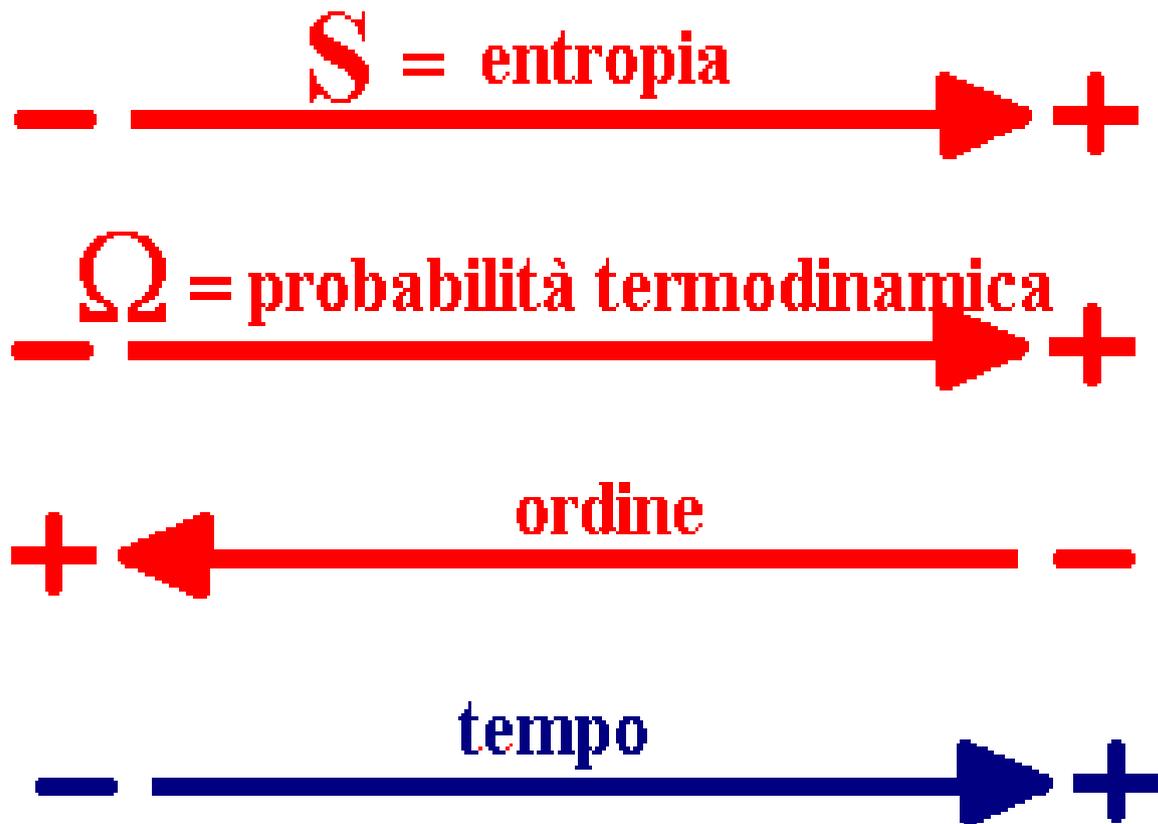
Un'altra osservazione è che i cambiamenti spontanei tendono a portare i sistemi da condizioni di ordine a condizioni di disordine. Si pensi alla spontaneità con cui si sviluppa il caos nella stanza di un bambino (o anche di un adulto) e la fatica che occorre per riportarla ad un livello di ordine ragionevole. Lo stesso vale per la scrivania di un professionista o di uno studioso. In genere il disordine è il prodotto delle trasformazioni spontanee. E il disordine è anche lo stato più probabile di un sistema. Si prenda ad esempio una scatola contenente 30 bilie di vetro, 15 blu e 15 verdi. Si dispongano le bilie in modo ordinato separando le blu dalle verdi. Se scuotiamo vivacemente la scatola le bilie si mescoleranno spontaneamente. Partendo dalla situazione descritta dal disegno a sinistra nella prossima figura, si passa ad una possibile configurazione come quella a destra. Quale probabilità abbiamo che continuando a scuotere la scatola si ritorni alla situazione ordinata? Le probabilità sono molto basse. Si può stimare questa probabilità, in questo caso, con esattezza ricorrendo al calcolo combinatorio (il calcolo non è richiesto), e il risultato è che la configurazione ordinata è 1 delle oltre 155 milioni di possibilità. Dunque la probabilità di ottenere quella configurazione dallo scuotimento casuale della scatola è di 1 su 155 milioni.

Irreversibilità, probabilità e disordine

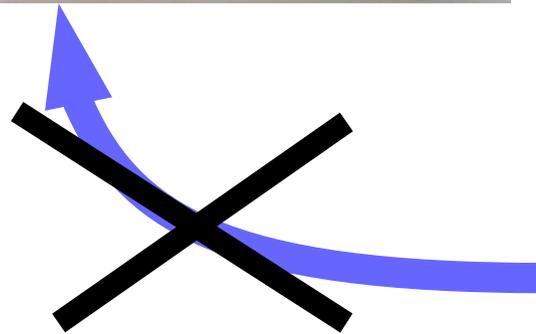


Si definisce a questo punto una nuova grandezza fisica (che prende le unità di un'energia divisa per una temperatura e si misura dunque in J/K) l'entropia, con simbolo **S**, che indica la direzione delle trasformazioni spontanee all'interno di un sistema isolato. Le trasformazioni spontanee sono quelle in cui essa aumenta. L'aumento di entropia di un sistema è quindi corrispondente ad un aumento di disordine interno del sistema stesso ed al compimento di una trasformazione spontanea ed irreversibile. L'aumento dell'entropia in un sistema isolato indica dunque anche la direzione del tempo.

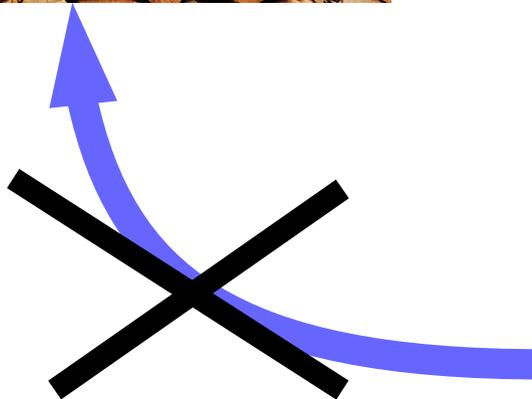
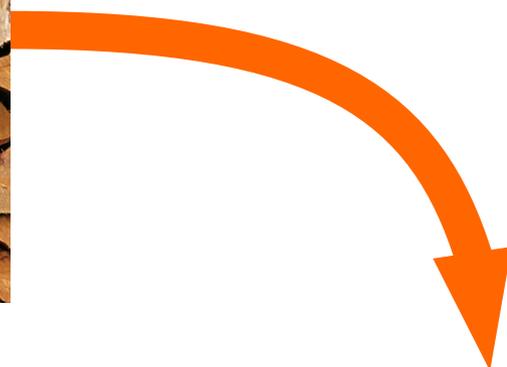
Irreversibilità, disordine Entropia e la freccia del tempo.



Vedendo due stati possiamo dire quale viene prima dell'altro.



Prima e dopo. La freccia del tempo



In un sistema isolato (che non scambia energia e materia con l'esterno) l'entropia può solo aumentare.

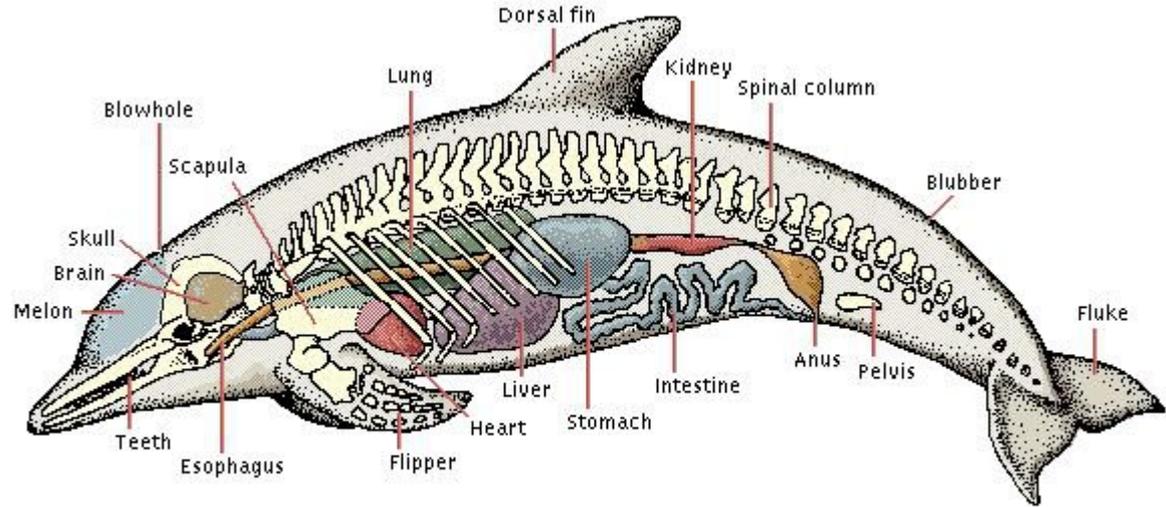
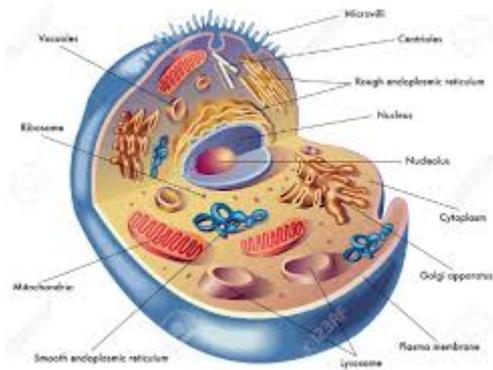


Consideriamo un corpo e il suo intorno (l'ambiente in cui si trova) se il corpo trasforma l'energia che trae dall'ambiente in ordine interno, diminuendo la propria entropia, e scarica energia disordinata nell'ambiente, la somma delle due variazioni di entropia, quella negativa interna al corpo e quella positiva dell'ambiente danno un risultato positivo cioè un aumento dell'entropia totale.

Quello che abbiamo descritto è un sistema dissipativo. Il mondo che ci circonda può essere visto come l'insieme di sistemi dissipativi che assorbono energia dall'ambiente e scaricano entropia nell'ambiente. Gli esseri viventi sono sistemi dissipativi e altrettanto lo sono le società umane. L'energia totale dei processi dissipativi è costante (primo principio), ma l'entropia aumenta costantemente (secondo principio)

Una cellula, un organismo, un pianeta o una società umana o animale sono sistemi che assorbono energia (risorse ordinate) dal proprio ambiente e vi scaricano entropia (disordine)

Entropia e strutture dissipative.



Se si riporta in un grafico cartesiano l'energia dissipata per unità di massa di diversi sistemi dissipativi in funzione del tempo, a partire dal momento in cui l'universo si origina, si ottiene un diagramma sorprendente: le società umane si collocano al massimo storico di energia dissipata per unità di massa in watt/kg.

Il grafico della prossima pagina è tratto dal libro del fisico francese François Roddier. *Thermodynamique de l'évolution. Un essai de thermo-bio-sociologie.*:

L'evoluzione dell'universo e l'evoluzione biologica è la storia del progressivo affermarsi di strutture dissipative sempre più energivore ed entropiche.

