

# L'entropia

La freccia inesorabile del tempo.

## INTRODUZIONE

Tra il XIX e il XX secolo, il concetto di entropia è passato dalla sua originaria applicazione alle macchine termiche ad essere utilizzato in un'ampia gamma di contesti, come nelle scienze sociali, nella teoria dei segnali, nell'informatica, nell'economia, e addirittura per indicare la direzione verso cui si muove il tempo. L'universalità del concetto di entropia fu dapprima osservata agli inizi del XIX secolo da Carnot e Clausius, nell'ambito dei sistemi termodinamici allora conosciuti. Infatti, nel definire il secondo principio della termodinamica, Clausius e Lord Kelvin notarono che, in un sistema termodinamico, il calore tende a passare da un corpo più caldo a uno più freddo, tendendo così all'equilibrio termico. Per spiegare il *perché* di questo fenomeno non erano sufficienti le grandezze termodinamiche preesistenti, per cui ne venne formulata una nuova. Il termine stesso fu presentato per la prima volta da Clausius nel suo *Trattato sulla teoria meccanica del calore*; entropia deriva dal greco *έν εν*, "dentro", e *τροπή tropé*, "trasformazione", si indica con la lettera S ed ha come unità di misura Joule/Kelvin (J/K).

Il concetto di freccia del tempo è applicato all'entropia sviluppandolo da un punto di vista termodinamico, mentre l'entropia viene applicata in altri campi, come ad esempio quello della probabilità, considerando il fenomeno da un punto di vista molecolare. In verità la freccia del tempo è usata anche al di fuori della termodinamica, in innumerevoli contesti. Uno dei più interessanti è la freccia del tempo cosmologica: la direzione del tempo in cui l'universo si sta espandendo anziché contraendo. Ma per capire meglio il concetto ampio di freccia del tempo e come si applica in relazione alla termodinamica, dobbiamo prima comprendere il concetto di entropia.

## L'ENTROPIA

Come accennato, il concetto di entropia è stato presentato per la prima volta da Clausius nel 1864 per riformulare il secondo principio della termodinamica. Per fare ciò lo scienziato sviluppa il *teorema* o la *disuguaglianza di Clausius*, considerando come sistema due macchine di Carnot, che lavorano tra le stesse temperature  $T_0$  e  $T_i$  e forniscono alla sorgente  $i$ -esima la quantità di calore  $-Q_i$ . Per ogni ciclo si può scrivere la relazione (data dal teorema di Carnot)

$$Q_{i,0} = T_0 \frac{Q_i}{T_i}$$

dove  $Q_{i,0}$  è il calore scambiato con la sorgente a  $T_0$  nel ciclo  $i$ -esimo.

Per costruzione, quindi, ogni sorgente a  $T_i$  scambia una quantità netta di calore pari a zero. La sorgente a  $T_0$ , invece, fornisce una quantità di calore totale pari a

$$Q_0 = \sum_{i=1}^n Q_{i,0} = T_0 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i}$$

Esaminiamo ora il segno di  $Q_0$ . Si è visto che il sistema composto da  $S$  e dalle  $n$  sorgenti a  $T_1$  riceve il calore  $Q_0$  dalla sorgente a  $T_0$ . Se  $Q_0$  fosse positivo, il solo risultato del processo sarebbe la trasformazione ciclica in lavoro (compiuto dalle macchine di Carnot) del calore ottenuto da una sorgente omogenea. Ma ciò è impossibile, perché in aperta contraddizione con il secondo principio della termodinamica nella formulazione di Kelvin. Quindi  $Q_0 \leq 0$ , e poiché  $T_0 > 0$  (trattandosi di una temperatura assoluta) si ottiene

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

Infine, se il ciclo compiuto da  $S$  è reversibile, vale la stessa conclusione invertendo i segni di tutte le quantità di calore  $Q_i$ . Si troverebbe quindi

$$\sum_{i=1}^n \frac{-Q_i}{T_i} \leq 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \geq 0$$

e l'unico modo per soddisfare entrambe le disuguaglianze è che il risultato della somma sia nullo:

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

Considerando lo scambio di calore tra  $S$  ed un sistema continuo di sorgenti, ovvero con  $n \rightarrow \infty$ , la medesima dimostrazione conduce al risultato

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Per definire esattamente *cos'è* l'entropia dobbiamo notare inoltre che l'entropia è una **funzione di stato** e una **grandezza estensiva**.

Consideriamo il caso ideale delle trasformazioni reversibili. Consideriamo una trasformazione reversibile qualunque da uno stato A a uno stato B.

La variazione di entropia  $S(B) - S(A)$  è data dalla formula

$$S(B) - S(A) = \left( \sum \Delta Q_i \div T_i \right)_{rev}$$

$S(B) - S(A)$  dipende quindi soltanto dagli stati A e B, e non dalle trasformazioni che fanno passare il sistema da A a B, facendo dell'entropia una *funzione di stato*.

Essendo definita per mezzo della sua variazione, il livello 0 dell'entropia è fissato scegliendo uno stato di riferimento R, per cui dall'entropia  $S(R) = 0 \text{ J/K}$  si può determinare l'entropia di ogni altro stato C.

Considerando un sistema termodinamico  $\Omega$  con due sottosistemi indipendenti  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ , notiamo che la sua entropia è data dalla somma delle entropie dei due sottosistemi, rendendo l'entropia una *grandezza estensiva*.

Approfondiamo lo studio dell'entropia nei **sistemi isolati**.

In un sistema isolato in cui hanno luogo *solamente* trasformazioni *reversibili*, l'entropia rimane costante.

Nei sistemi in cui hanno luogo invece trasformazioni *irreversibili*, l'entropia aumenta.

La variazione di entropia in un sistema isolato è dunque uguale a zero se le trasformazioni al suo interno sono reversibili, maggiore di zero se sono irreversibili.

Un caso particolare è quello dell'**Universo**, che è per definizione un sistema isolato, non avendo niente al suo esterno. All'interno dell'Universo avvengono continuamente trasformazioni irreversibili, per cui la sua entropia *aumenta sempre*.

Per questo motivo, inoltre, non è possibile avere una reale trasformazione reversibile, perché lo stato finale e quello iniziale differiranno sempre nell'aumento di entropia.

Il concetto di entropia afferma quindi l'asimmetria della natura, (da A si può raggiungere B ma da B non si ritorna ad A), che costituisce l'enunciato più generale del secondo principio della termodinamica (o "principio dell'entropia"): Qualunque trasformazione spontanea è accompagnata da un aumento dell'entropia dell'universo. Questa conseguenza della seconda legge della termodinamica, che il fisico austriaco Ludwig Boltzmann contribuì a formulare, stabilisce che in ogni sistema chiuso (come l'universo stesso), l'entropia - che, come vedremo, rappresenta una misura di **disordine** - può solo aumentare. L'aumento di entropia è una certezza cosmica, perché per un determinato sistema ci sono sempre molti più stati disordinati di quelli ordinati, così come ci sono assai più numerosi modi per sparpagliare i documenti su una scrivania che per impilarli ordinatamente in un unico mucchio.

Questo aspetto è approfondito dalla concezione microscopica, e statistica, dell'entropia, che è ugualmente importante nel definire il concetto di entropia.

Iniziamo dal definire la differenza tra **macrostato** e **microstato**.

In un sistema termodinamico, il macrostato è individuato dalle variabili macroscopiche che ne descrivono le proprietà complessivamente; ad esempio nel gas perfetto il macrostato è definito da due qualsiasi delle variabili di stato pressione, volume e temperatura.

Il microstato, o meglio i vari microstati associati a un macrostato, sono invece precise configurazioni dei costituenti microscopici delle singole particelle, come nel caso del gas perfetto. Logicamente, a ogni microstato si può associare uno e un solo macrostato, ma a ogni macrostato si possono associare diversi microstati. Il numero di microstati associati a un macrostato A è, appunto, la *molteplicità* del macrostato A, e si indica con il simbolo  $W(A)$ .

Supponiamo di avere in un recipiente diviso a metà 4 molecole *diverse* libere di muoversi, e supponiamo di poter osservare il loro movimento.

Dal punto di vista macroscopico, cioè senza distinguere le molecole, abbiamo 5 macrostati:



$A_{0,4}$     $A_{1,3}$     $A_{2,2}$     $A_{3,1}$     $A_{4,0}$

Ma se analizziamo i microstati corrispondenti, ne troviamo un totale di 16.

MICROSTATI E LORO MOLTEPLICITÀ		
Macrostato	Microstati corrispondenti	Molteplicità
$A_{4,0}$		$W(A_{4,0}) = 1$
$A_{3,1}$		$W(A_{3,1}) = 4$
$A_{2,2}$		$W(A_{2,2}) = 6$
$A_{1,3}$		$W(A_{1,3}) = 4$
$A_{0,4}$		$W(A_{0,4}) = 1$

Tuttavia ai macrostati A4,0 e A0,4 corrisponde un microstato a testa, ovvero hanno molteplicità 1, mentre i macrostati A1,3 e A3,1 hanno molteplicità 4 e infine A2,2 ha molteplicità 6.

Dunque ognuno dei 16 microstati ha una probabilità pari a 1/16 di realizzarsi, ma il macrostato A2,2 si realizzerà sei volte più spesso, cioè il macrostato *omogeneo* ha probabilità 6/16 di realizzarsi.

Ogni sistema si evolve dallo stato più ordinato a quello meno ordinato. Il macrostato in cui tutte le molecole si trovano dalla stessa parte è il più ordinato perché, col tempo, le molecole si sposteranno per occupare tutto lo spazio a disposizione. Questo rende il processo inverso, per cui le molecole si riporteranno tutte da una stessa parte, estremamente improbabile, più improbabile maggiore è il numero di molecole prese in considerazione, fino a diventare praticamente impossibile. Se il macrostato in cui le molecole sono tutte da una parte è il più ordinato, il macrostato omogeneo è invece quello più disordinato, e anche quello più probabile.

Quindi più un macrostato è disordinato, maggiore è la probabilità con la quale esso si realizza spontaneamente.

In questo contesto entra in gioco la ***freccia del tempo***.

L'espressione "freccia del tempo" fu introdotta nel 1928 dall'astrofisico Arthur Eddington nel suo libro *The nature of the physical world*.

Con "freccia del tempo" si intende, appunto, l'evidente correlazione tra l'aumento progressivo e incessante di entropia nell'universo e la direzione del tempo. Se pensiamo infatti alla maniera in cui percepiamo lo scorrere del tempo e la differenza tra passato, presente e futuro, essa è fortemente influenzata dall'irreversibilità dei processi termodinamici.

Discutendo della validità del secondo principio della termodinamica, alla base della freccia del tempo, lo stesso Eddington disse ciò:

*"Se qualcuno vi facesse notare che la vostra teoria personale dell'Universo è in disaccordo con le equazioni di Maxwell – allora tanto peggio per le equazioni di Maxwell. Se si scoprisse che è contraddetta dalle osservazioni – beh, questi sperimentatori fanno cose sbagliate a volte. Ma se si trovasse che la vostra teoria è in contrapposizione con la seconda legge della Termodinamica non vi concedo speranze; non ci sarebbe nulla per voi da fare se non cadere nella più profonda umiliazione."*

Tuttavia per molto tempo la teoria sopra illustrata che sostiene l'aumento dell'entropia nel tempo fu vista come un principio statistico più che una legge fisica, poiché, essendo un principio statistico, non è inconfutabile come altre leggi fisiche. In effetti, è possibile che una stanza piena di particelle casualmente distribuite si ritrovi con tutte le particelle ordinate in un angolo – ma è tanto improbabile da essere, appunto, come affermato da Eddington, una delle affermazioni più affidabili della fisica moderna.

Una delle caratteristiche dell'Universo remoto più difficili da spiegare è che possedeva inizialmente un livello di Entropia incredibilmente basso, talmente basso che anche oggi – 13 miliardi di anni dopo – ci ritroviamo a vivere in un mondo con un grado di ordine relativamente elevato. Come conseguenza, molti degli oggetti che ci circondano possiedono bassa entropia: per esempio, macchine nuove e uova perfettamente intere nei loro portauova. E questi oggetti, in pratica, si distruggono davanti a noi mentre si spostano inevitabilmente verso stati di entropia maggiore: le macchine arrugginiscono, le uova cadono sul pavimento e si rompono. Quindi, l'aumento di entropia nel nostro mondo ordinato è una delle ragioni che ci fa percepire un'apparente "freccia del tempo". Riguardo a questo punto, il fisico Carlo Rovelli nel suo saggio *L'ordine del tempo* sostiene che:

*"L'entropia iniziale del mondo ci appare molto bassa. Ma questo non riguarda l'esatto stato del mondo: riguarda il sottoinsieme di variabili del mondo con cui noi, come sistemi fisici, abbiamo interagito.[...] Questo, che è un fatto, apre la possibilità che non sia l'universo a essere stato in una configurazione molto peculiare nel passato: forse siamo noi, e le nostre interazioni con l'universo, a essere particolari.[...] La bassa entropia iniziale dell'universo, e quindi la freccia del tempo, potrebbe essere dovuta a noi, più che all'universo."*

In altre parole, il fluire del tempo per cui l'entropia si configura come bassa non è una caratteristica dell'universo, ma della particolare prospettiva del mondo a cui noi apparteniamo. Rispetto ai sistemi con cui noi ci mettiamo in relazione l'entropia è in costante aumento, e così si configurano i fenomeni tipici dello scorrere del tempo, come la vita, l'evoluzione, e la nostra stessa consapevolezza del fluire del tempo.

## SITOGRAFIA

<http://www.infinitoteatrodelcosmo.it/2016/01/01/2-la-freccia-del-tempo-lentropia-secondo-boltzmann/>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Teorema\\_di\\_Clausius#Dimostrazione](https://it.wikipedia.org/wiki/Teorema_di_Clausius#Dimostrazione)

[http://www.fmboschetto.it/tde/lettura\\_5.htm](http://www.fmboschetto.it/tde/lettura_5.htm)

[https://www.lescienze.it/news/2014/12/13/news/gravit\\_origine\\_freccia\\_del\\_tempo\\_due\\_futuri-2412698/](https://www.lescienze.it/news/2014/12/13/news/gravit_origine_freccia_del_tempo_due_futuri-2412698/)

<https://seipernove42.wordpress.com/cose-la-realta/la-freccia-del-tempo/>

<http://pcfarina.eng.unipr.it/dispensearch01/bontempi139133/bontempi139133.htm>

<http://www.marcellodevita.net/pags/I-principi-della-Termodinamica.html>

<https://books.google.it/books?>

[id=B1jCDgAAQBAJ&pg=PT108&lpg=PT108&dq=all%27inizio+1%27entropia+dell%27universo+era+estremamente+bassa&source=bl&ots=2KUBAotICt&sig=ACfU3U3v8cVNM8X5y6F\\_HeVuGslcyJVWKA&hl=it&sa=X&ved=2ahUKEwiso4yrn-\\_oAhUZi1wKHa8QCh8Q6AEwA3oECAwQNA#v=onepage&q=all'inizio%20l'entropia%20dell'universo%20era%20estremamente%20bassa&f=false](https://books.google.it/books?id=B1jCDgAAQBAJ&pg=PT108&lpg=PT108&dq=all%27inizio+1%27entropia+dell%27universo+era+estremamente+bassa&source=bl&ots=2KUBAotICt&sig=ACfU3U3v8cVNM8X5y6F_HeVuGslcyJVWKA&hl=it&sa=X&ved=2ahUKEwiso4yrn-_oAhUZi1wKHa8QCh8Q6AEwA3oECAwQNA#v=onepage&q=all'inizio%20l'entropia%20dell'universo%20era%20estremamente%20bassa&f=false)