



# Il significato dei primi due principi della termodinamica

Il principio di conservazione dell'energia e quello dell'entropia non si limitano a enunciare "leggi di natura"; piuttosto, rappresentano le nostre concezioni fondamentali di come evolvano i processi naturali, e la forma matematica in cui tali principi sono espressi ne rivela la profondità.

## Il primo principio della termodinamica

Nella seconda metà del XIX secolo, un vivace dibattito si sviluppò attorno al significato dei principi della termodinamica. Come abbiamo visto, il **primo principio** mette in relazione una determinata quantità di calore e il lavoro che questa può produrre. Tale relazione può essere catturata facilmente dal linguaggio matematico:

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - L$$

dove  $E_{\text{int}}$  è l'energia interna di un sistema, cioè la riserva che un sistema può spendere per produrre lavoro,  $Q$  è il calore assorbito (o ceduto) dal sistema ed  $L$  è il lavoro che il sistema ha già svolto (o subito).

Questa formula pare incarnare un'idea ben più antica e generale della fisica stessa, forse legata strettamente al **principio di causalità**: non possiamo produrre lavoro dal nulla. Infatti, la formula ci dice che in un sistema isolato esiste una quantità, che chiamiamo energia, che si conserva sempre, anche se può cambiare forma. In altre parole, la produzione di lavoro avviene sempre al costo di una riserva di energia, che – per quanto possa essere elevata – è finita. Il primo principio della termodinamica, d'altra parte, ci permette di determinare matematicamente il modo in cui la trasformazione avviene e di quantificare quanto calore dobbiamo utilizzare per far compiere un certo lavoro a una qualsiasi macchina e, *viceversa*, quanto calore possiamo sperare di ottenere dal lavoro che facciamo svolgere a tale macchina. Come ha fatto notare il fisico americano **Richard Feynman**, queste equazioni non ci dicono cosa sia

l'energia; ci dicono semplicemente che:

“*vi è una certa quantità, che chiamiamo energia, che non cambia nei molteplici mutamenti subiti dalla natura [...]. Non abbiamo cognizione di cosa l'energia sia. Tuttavia vi sono formule per calcolare alcune quantità numeriche e se le sommiamo tutte [alla fine del processo] otterremo sempre lo stesso numero [che avevamo all'inizio].*<sup>1</sup>

## Dal primo al secondo principio della termodinamica

Immaginiamo un **pendolo in moto senza attrito**. Come sappiamo, il pendolo tornerà alla quota da cui era partito, pronto per una nuova oscillazione che lo porterà alla medesima quota, e così via all'infinito. Una volta che il moto del pendolo è stato prodotto (e quindi ha una certa energia cinetica) lasciandolo cadere da una certa altezza (e quindi con una certa quantità di energia potenziale), il moto del pendolo si conserva in eterno; possiamo esprimere ciò dicendo che in tale sistema l'energia cinetica e l'energia potenziale si equivalgono, ossia che l'energia totale di un sistema isolato si conserva.

Se rendiamo più complesso il sistema e **consideriamo gli attriti**, però, a conservarsi sarà la somma dell'energia cinetica e dell'aumento di temperatura (energia termica) che essi provocano, trasformando parte dell'energia cinetica in calore e disperdendolo nell'ambiente.

<sup>1</sup> R. Feynman, *La fisica di Feynman*, vol. 1, cap. 4.1, Zanichelli, Bologna 2001.

Ma se il primo principio ci assicura che esiste una quantità – l'energia – che globalmente si conserva anche se si trasforma, il secondo principio ci dice che, dopo una trasformazione, parte dell'energia si degrada e non è più impiegabile. Possiamo far tornare alla quota di partenza un pendolo matematico, ma per un pendolo fisico il tempo non bussa mai due volte: non si può tornare indietro.

Questa profonda **dissimmetria fra i due principi della termodinamica** venne esposta con chiarezza nel 1879 dal fisico tedesco **Max Planck**:

“Mentre il primo principio della teoria meccanica del calore [cioè la termodinamica], che esprime l'equivalenza di calore e lavoro, discende dal principio di conservazione dell'energia e riguarda dunque una grandezza che permane immutabile in tutti i processi naturali, al contrario il secondo principio rappresenta una legge secondo la quale la natura tende a realizzare tutti i processi unicamente secondo una certa direzione, in modo tale che sia impossibile far tornare il mondo a uno stato precedente. Fissare matematicamente il verso in cui avvengono tutti i mutamenti naturali, costituisce il significato del secondo principio nella sua forma più generale.”<sup>2</sup>

## L'entropia è la grandezza che misura il "deterioramento" dell'energia

**Rudolf Clausius** aveva chiamato *entropia* la grandezza che “fissando matematicamente” tale freccia del tempo misura il “deterioramento” dell'energia di un sistema. Se consideriamo un sistema isolato e lo sottoponiamo a una trasformazione reversibile ideale (per esempio, un pendolo matematico), l'entropia è uguale a zero; se la **trasformazione è irreversibile** – è un **processo naturale**, per dirla con Planck – l'entropia è positiva. Clausius riuscì a compendiare quest'idea in un'unica formula, che hai incontrato in questo libro nella forma:

$$-\frac{Q_{\text{ass}}}{T} + \frac{Q_{\text{ced}}}{T} \geq 0$$

Al primo membro c'è il calore scambiato dal sistema nel corso di una trasformazione al variare della temperatura  $T$ . Tale grandezza, l'entropia, non è espressa con il linguaggio delle uguaglianze (equazioni) a cui siamo abituati, ma come una **disequazione** (talvolta chiamata *disuguaglianza di Clausius*). Ciò coglie bene l'idea della freccia del tempo che stava a cuore a Planck. Intuitivamente potremmo dire che *uguale* è un segno “bidirezionale”: posso andare da una parte all'altra dell'equazione e nulla cambia. Invece, i segni *maggiore* o *minore*, presi singolarmente, non godono di questa proprietà, che i logici chiamano simmetria. In questo senso, sono tipicamente “unidirezionali”: indicano la direzione in cui devo andare, e non posso tornare indietro. Analogamente, il segno della disuguaglianza di Clausius indica che l'uguaglianza (reversibilità) è un caso limite, mentre in tutti gli altri casi “non possiamo tornare indietro” (irreversibilità).

<sup>2</sup> M. Planck, *Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie* [Sul secondo principio della teoria meccanica del calore], Ackermann, München 1879, p. 1.



▲ Robert Smithson, *Dead Tree*, Biennale di Venezia 2015. Il concetto di entropia divenne popolare, in ambito artistico, negli anni Sessanta del Novecento, quando Smithson (1938-1973), uno dei fondatori del minimalismo, cominciò a esplorare il tema della decadenza e del rinnovamento, dell'ordine e del caos.

## DOMANDE E ATTIVITÀ

- 1 Nel capitolo della *Fisica di Feynman* citato alla nota 1, l'autore presenta un interessante gioco che aiuta a comprendere il concetto di “conservazione di energia”. Leggete il passo e provate a riprodurre il gioco in classe, o ideatene uno voi stessi e presentatelo ai vostri compagni.
- 2 In che cosa consiste la *freccia del tempo*?
- 3 Alla fine dell'Ottocento il fisico austriaco Ludwig Boltzmann propose la cosiddetta “interpretazione statistica” del secondo principio della termodinamica, ora ampiamente accettata ma inizialmente assai controversa. Quale formula fu incisa sulla sua lapide nel cimitero di Vienna?