

La termodinamica

Alessandro Bolis, Alessandro Gubitosi, Anna Picchi

June 2026

Indice

1	1	2
1.1	Introduzione	2
1.2	I primi esperimenti	2
1.3	Ai giorni nostri	4
2	I gas perfetti	5
2.1	L'equazione dei gas perfetti	5
2.2	Le tre leggi dei gas perfetti	6
2.3	Modello microscopico dei gas perfetti	7
3	I principi	8
3.1	Il principio 0	8
3.2	Il primo principio	8
3.3	Il secondo principio	10
3.4	Il terzo principio	10
4	Formulario	11
4.1	Tabella	11

Capitolo 1

1

1.1 Introduzione

La termodinamica è un ramo della fisica classica che studia trasformazioni termodinamiche causate da calore e lavoro, le quali cambiano le variabili di temperatura e energia, all'interno di un lavoro un sistema.

La termodinamica si basa sul concetto di *sistema macroscopico*, una parte di massa separata dall'ambiente esterno, che spesso per comodità si considera isolato, ovvero che non ha scambi di alcun tipo con l'esterno. Lo stato di un sistema macroscopico è determinato da quelle che sono chiamate le *variabili termodinamiche*, ovvero la temperatura, la pressione, il volume e la composizione chimica.

1.2 I primi esperimenti

La nascita della termodinamica come scienza vera e propria è avvenuta tra il diciassettesimo e il diciannovesimo secolo, spinta non tanto da una curiosità puramente teorica, ma da un'esigenza pratica: capire come migliorare l'efficienza delle macchine a vapore durante la Rivoluzione Industriale. Inizialmente, i fisici cercavano di comprendere come trasformare il calore, generato dal fuoco, in lavoro meccanico, ovvero il movimento di una pompa o di una locomotiva.

Le origini di questo percorso risalgono al Seicento, quando scienziati come Robert Boyle e Denis Papin iniziarono a studiare la pressione dei gas e del vapore. Papin, in particolare, inventò la prima pentola a pressione (detta *digestore*) e intuì che il vapore poteva essere utilizzato per muovere un pistone all'interno di un cilindro. Nel Settecento si passò alla costruzione delle prime macchine reali: Thomas Newcomen e, successivamente, James Watt progettaron macchine a vapore efficienti per pompare l'acqua fuori dalle miniere di carbone.

I Padri Della Termodinamica



James Watt Ingegnere e inventore scozzese che introdusse il condensatore separato che ridusse drasticamente gli sprechi di energia, trasformando una macchina inefficiente nel motore della Prima Rivoluzione Industriale. In suo onore, l'unità di misura della potenza nel Sistema Internazionale si chiama watt.



Robert Boyle Chimico e fisico irlandese, è considerato uno dei padri del metodo scientifico moderno. È noto per la Legge di Boyle che afferma: a temperatura costante, il volume di un gas è inversamente proporzionale alla sua pressione. I suoi esperimenti sul vuoto e sulla compressione dell'aria hanno gettato le basi per lo studio dei gas reali.



Denis Papin Inventore e fisico francese, fu il ponte tra la teoria scientifica e l'ingegneria meccanica. Nel 1679 inventò il digestore a vapore, scoprendo che la pressione elevata aumenta il punto di ebollizione dell'acqua.

1.3 Ai giorni nostri

La termodinamica è un ramo della fisica nato da delle esigenze pratiche, ovvero comprendere il funzionamento delle macchine termiche; ancora oggi, questa materia è fondamentale in svariati ambiti:

Sostenibilità e Clima

Essa è lo strumento fondamentale per calcolare l'efficienza delle energie rinnovabili come l'*idrogeno verde* e per gestire lo stress termico delle batterie nelle auto elettriche. Inoltre, permette di modellare il cambiamento climatico analizzando la Terra come un immenso sistema termodinamico fuori equilibrio.

Idrogeno verde $\implies$ L'idrogeno verde è idrogeno prodotto a impatto climatico zero.

Informatica e IA

Con l'avvento dei *computer e dell'intelligenza artificiale*, la gestione del calore è diventata cruciale. La termodinamica studia come dissipare l'enorme calore generato dai data center e come l'energia si comporta nei microchip a livello atomico.

Tecnologie Quantistiche

Alla frontiera della fisica, la nanotermodinamica si unisce alla meccanica quantistica. Studiare il comportamento della materia a temperature vicinissime allo zero assoluto è indispensabile per far funzionare i computer quantistici e i materiali superconduttori.

Nanotermodinamica $\implies$ La nanotermodinamica è l'estensione della termodinamica classica allo studio di sistemi microscopici

Capitolo 2

I gas perfetti

2.1 L'equazione dei gas perfetti

Le leggi e i principi su cui si fonda la termodinamica sono spesso, per semplicità, espressi utilizzando il modello dei gas perfetti, ovvero gas ideali aventi specifiche caratteristiche:

- Si trovano a temperatura ideale, ovvero lontani dalla temperatura di liquefazione.
- Presentano una pressione ridotta.
- Sono molto rarefatti e, quindi, le particelle che li compongono sono molto distanti fra loro.

Quando si compiono osservazioni utilizzando suddetto modello, è possibile utilizzare una particolare equazione, ovvero l'*equazione di stato dei gas perfetti*:

$$pV = nRT$$

Dove:

p = pressione
 V = volume
 n = numero di moli del gas
 R = 8,31J/mol K
 T = temperatura

R è la costante universale dei gas, una delle costanti fondamentali della fisica.

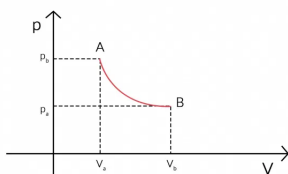
I gas perfetti possono essere *monoatomici* oppure *biatomici*; a ciascuna di queste due tipologie di gas corrisponde una costante l che ha valore rispettivamente di $l = 3$ per i primi e di $l = 5$ per i secondi.

2.2 Le tre leggi dei gas perfetti

Se si sottopone un gas perfetto ad una trasformazione dove una delle variabili termodinamiche è costante, si possono osservare tre relazioni, note come *leggi dei gas perfetti*:

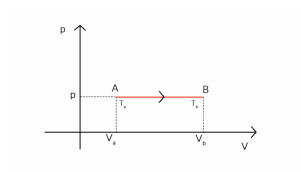
Legge di Boyle: in una trasformazione isoterma la pressione e il volume sono inversamente proporzionali:

$$p_i V_i = p_f V_f$$



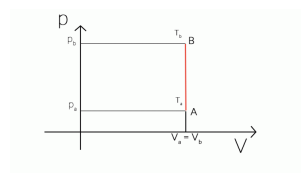
I legge di Gay-Lussac: in una trasformazione isobara il volume e la temperatura sono direttamente proporzionali:

$$\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$$



II legge di Gay-Lussac: in una trasformazione isocora la pressione e la temperatura sono direttamente proporzionali:

$$\frac{p_i}{T_i} = \frac{p_f}{T_f}$$



2.3 Modello microscopico dei gas perfetti

Pressione, temperatura e volume sono riconducibili al movimento delle particelle. La pressione, in particolare, è dovuta agli urti elastici che le particelle del gas hanno contro le pareti del contenitore.

Le particelle dei gas hanno un'energia cinetica media, calcolabile come:

$$K_m = \frac{\sum_{i=1}^N K_i}{N} \text{ e } K_m = \frac{1}{2} m \langle v \rangle^2$$

$$K_m = \frac{\frac{1}{2} m \sum_{i=1}^N v_i^2}{N}$$

Dove $\langle v \rangle$ si dice *velocità quadratica media*.

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N}}$$

La pressione è calcolabile come:

$$p = \frac{Nm \langle v \rangle^2}{3V}$$

$$pV = \frac{Nm \langle v \rangle^2}{3} \text{ e } pV = nRT$$

$$nRT = \frac{Nm \langle v \rangle^2}{3}$$

$$\frac{nRT}{2} = \frac{Nm \langle v \rangle^2}{6} \text{ e } \frac{1}{2} m \langle v \rangle^2 = K_m$$

$$\frac{nRT}{2} = \frac{NK_m}{3}$$

$$T = \frac{2}{3} K_m \frac{N}{nR}$$

$$T = \frac{2}{3} K_m \frac{N_A}{R}$$

$\frac{R}{N_A}$ è la costante di Boltzmann $k_b = 1,38 * 10^{-23} \text{ J/K}$, quindi:

$$T = \frac{2}{3} \frac{K_m}{k_b}$$

La *temperatura* è una grandezza fisica fondamentale che misura l'energia cinetica media delle particelle di un gas.

Capitolo 3

I principi

3.1 Il principio 0

Per parlare del *principio 0* della termodinamica occorre, innanzitutto, introdurre il concetto di *equilibrio termico*: due corpi si trovano in equilibrio termico tra loro se hanno la stessa temperatura.

Il principio 0, il più recente ad essere stato formulato, è in realtà una definizione coniata dai libri di testo nel '900 per introdurre le basi su cui si fonda l'intera termodinamica.

Enunciato: se un corpo A è in equilibrio termico con un corpo C, e un corpo B è in equilibrio termico con il corpo C, allora A è in equilibrio termico con B.

3.2 Il primo principio

Prima di enunciare il *I principio*, occorre definire un *sistema fisico*: un ente descritto da un insieme di corpi contenuti in uno spazio.

Ciò che si trova al di fuori del sistema fisico, invece, è detto *ambiente*.

Enunciato: la variazione di energia interna ad un sistema è uguale alla differenza tra il calore scambiato e il lavoro compiuto.

$$\Delta U = Q - W$$

$\Delta U = U_f - U_i$ ed è la variazione di energia interna del sistema.

Ora applichiamo il *I principio* a vari tipi di trasformazioni:

Trasformazione isobara (p costante):

$$\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$$

$$W = p\Delta V \text{ e } p\Delta V = nR\Delta T \text{ quindi } W = nR\Delta T$$

$$\Delta U = \frac{l}{2}nR\Delta T \text{ e } \Delta U = Q - p\Delta V$$

$$\frac{l}{2}nR\Delta T = Q - p\Delta V$$

$$\frac{l}{2}nR\Delta T + nR\Delta T = Q$$

$$Q = nR\Delta T(\frac{l}{2} + 1)$$

Trasformazione isocora (V costante):

$$\frac{p_i}{T_i} = \frac{p_f}{T_f}$$

$$W = 0$$

$$\Delta U = \frac{l}{2}nR\Delta T \text{ e } \Delta U = Q$$

$$Q = \frac{l}{2}nR\Delta T$$

Trasformazione isoterma (T costante):

$$p_i V_i = p_f V_f$$

$$\Delta U = \frac{l}{2}nR\Delta T \text{ e } \Delta T = 0 \text{ quindi } \Delta U = 0$$

$$Q - W = 0$$

$$Q = W$$

$$W = \text{area sottesa}$$

$$p = \frac{nRT}{V} \text{ quindi } \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V}$$

$$\int_{V_i}^{V_f} \frac{1}{V} nRT = \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) nRT$$

$$Q = \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) nRT$$

Trasformazione adiabatica (Q = 0)

$$\Delta U = Q - W \text{ quindi } \Delta U = -W$$

$$pV^\gamma = \text{costante} \text{ dove } \gamma = \frac{l+2}{l}$$

$$p_i V_i^\gamma = p_f V_f^\gamma \text{ e } pV = nRT$$

$$\left(\frac{nRT_i}{V_i}\right) V_i^\gamma = \left(\frac{nRT_f}{V_f}\right) V_f^\gamma$$

3.3 Il secondo principio

Il *II principio* riguarda le *macchine termiche*, ovvero macchine che prendono calore da una sorgente calda e generano lavoro. Questo principio ha 4 principali formulazioni.

I formulazione (Carnot): non si può trasferire calore in modo spontaneo da un corpo più freddo ad uno più caldo.

II formulazione (Clausius): non esiste una trasformazione il cui unico risultato è il trasferimento di calore da un corpo più freddo ad uno più caldo.

III formulazione (Kelvin): non esiste una trasformazione il cui l'unico risultato sia il trasferimento di calore da una sorgente calda ad una macchina termica che trasforma interamente il calore in lavoro.

IV formulazione (entropia): l'entropia nel nostro universo non può diminuire.

L'*entropia* (S) è la misura del disordine nell'universo, che aumenta ad ogni trasformazione irreversibile compiuta e rimane costante se essa è reversibile, ma non può diminuire.

Si definisce rendimento di una macchina termica:

$$\eta = \frac{W}{Q} \text{ dove } 0 \leq \eta < 1 \text{ e } \eta \neq 1$$

Una trasformazione si dice reversibile è una trasformazione che può essere percorsa in entrambi i versi.

Teorema di Carnot: tutte le macchine termiche reversibili che lavorano tra sorgenti alla stessa temperatura hanno lo stesso rendimento, che è il massimo possibile tra tutte le macchine termiche che lavorano tra le stesse sorgenti.

$$\begin{aligned} \eta_r &> \eta_{nr} \\ \eta &= \frac{W}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} \\ \eta_r &= 1 - \frac{T_1}{T_2} \end{aligned}$$

3.4 Il terzo principio

Il *terzo principio* riguarda lo zero assoluto ($0K$).

Enunciato: è impossibile raggiungere lo $0K$ mediante un numero finito di operazioni.

Capitolo 4

Formulario

4.1 Tabella

Tipo Trasformazione	Formula
Legge Universale	$pV = nRT$
Legge di Boyle (isoterma)	$p_i V_i = p_f V_f$
1 Legge di Gay-lussac (isobara)	$\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$
2 Legge di Gay-lussac (isocora)	$\frac{p_i}{T_i} = \frac{p_f}{T_f}$
I principio (isoterma)	$W = Q = \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)nRT$
I principio (isobara)	$Q = nR\Delta T\left(\frac{l}{2} + 1\right)$
I principio (isocora)	$Q = \frac{l}{2}nR\Delta T$
Teorema di Carnot	$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$
Teorema di Carnot (reversibile)	$\eta_r = 1 - \frac{T_1}{T_2}$