



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TERAMO

Fisica

Medicina Veterinaria — Semestre
Aperto 2026

Prof. Francesco de Pasquale

Lezioni 47, 48 e 49

Outline

Lezione 47

- Applicazione del primo principio alle trasformazioni termodinamiche.
- Trasformazioni reversibili e irreversibili.
- Trasformazioni canoniche nei gas ideali: isoterma, isocora, isobara, adiabatica, con confronto qualitativo dei comportamenti.

Lezione 48

- Secondo principio della termodinamica: enunciati fondamentali e concetto di irreversibilità.
- Cicli termodinamici: definizione e funzionamento.
- Esempi ed esercizi

Lezione 49

- Macchine termiche, rendimento, ciclo di Carnot.
- Esercizi

Esercizi (Tommasi)

Esercizio # 1341

$$T_1 = 327^\circ\text{C}$$

$$P = \text{cost.}$$

$$V_2 = \frac{1}{2} V_1$$

↓

$$V = \text{cost.}$$

$$P_2 = \frac{1}{3} P_1$$

$$T_P = ?$$



A) 100°C

B) $54,5^\circ\text{C}$

C) 600°C

D) -273°C

E) -173°C ←

$$PV = nRT$$

$$P_1 V_1 = nRT_1$$

$$P_2 V_2 = P_1 \frac{1}{2} V_1 = nRT_2$$

$$P_3 V_3 = \frac{1}{3} P_1 V_2 = nRT_3$$

↑

$$T_3 = \frac{1}{3} P_1 V_2 \frac{1}{nR} = \frac{1}{3}$$

Tomasi # 1392

Assorbe 500 J Q

$$\Delta E = 300 \text{ J}$$

Il lavoro compiuto dal sistema:

- A) 200 J ←
- B) 100 J
- C) 0 J
- D) 800 J
- E) 300 J

$$\Delta E = Q - L$$

$$300 = 500 - L$$

$$L = 500 - 300$$

$L = 200 \text{ J}$

A)

Trasformazioni reversibili e irreversibili

Una trasformazione è termodinamicamente reversibile se può essere invertita mediante una variazione infinitesima delle condizioni esterne, in modo che sia il sistema sia l'ambiente ritornino esattamente ai rispettivi stati iniziali, senza lasciare effetti residui

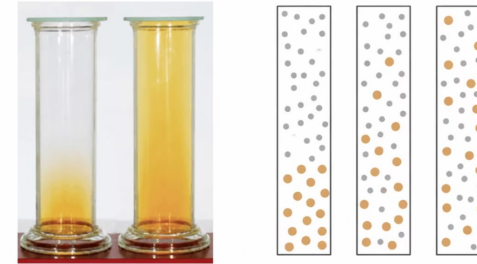
Una trasformazione reversibile costituisce un limite ideale. Richiede l'assenza di dissipazioni e che il processo attraversi una successione di stati di equilibrio, o infinitamente vicini all'equilibrio.

Una trasformazione è irreversibile quando non è possibile invertire il processo riportando contemporaneamente il sistema e l'ambiente ai rispettivi stati iniziali senza produrre altri cambiamenti.

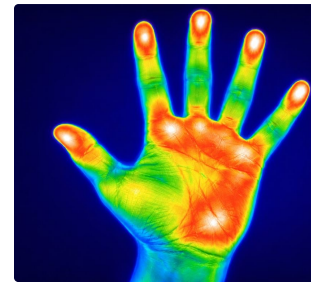
Le trasformazioni irreversibili sono caratteristiche dei processi reali e sono associate alla produzione di entropia.

Principali cause di irreversibilità

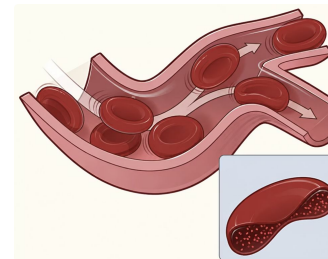
1. **Diffusione e mescolamento** — Le particelle si distribuiscono spontaneamente da regioni a concentrazione maggiore verso regioni a concentrazione minore. Il processo inverso richiederebbe un intervento esterno.



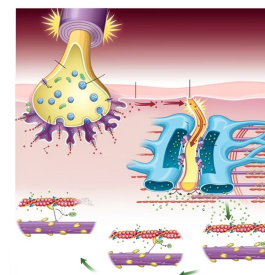
2. **Trasferimento di calore** — Il calore fluisce spontaneamente da una regione a temperatura maggiore verso una regione a temperatura minore, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico.

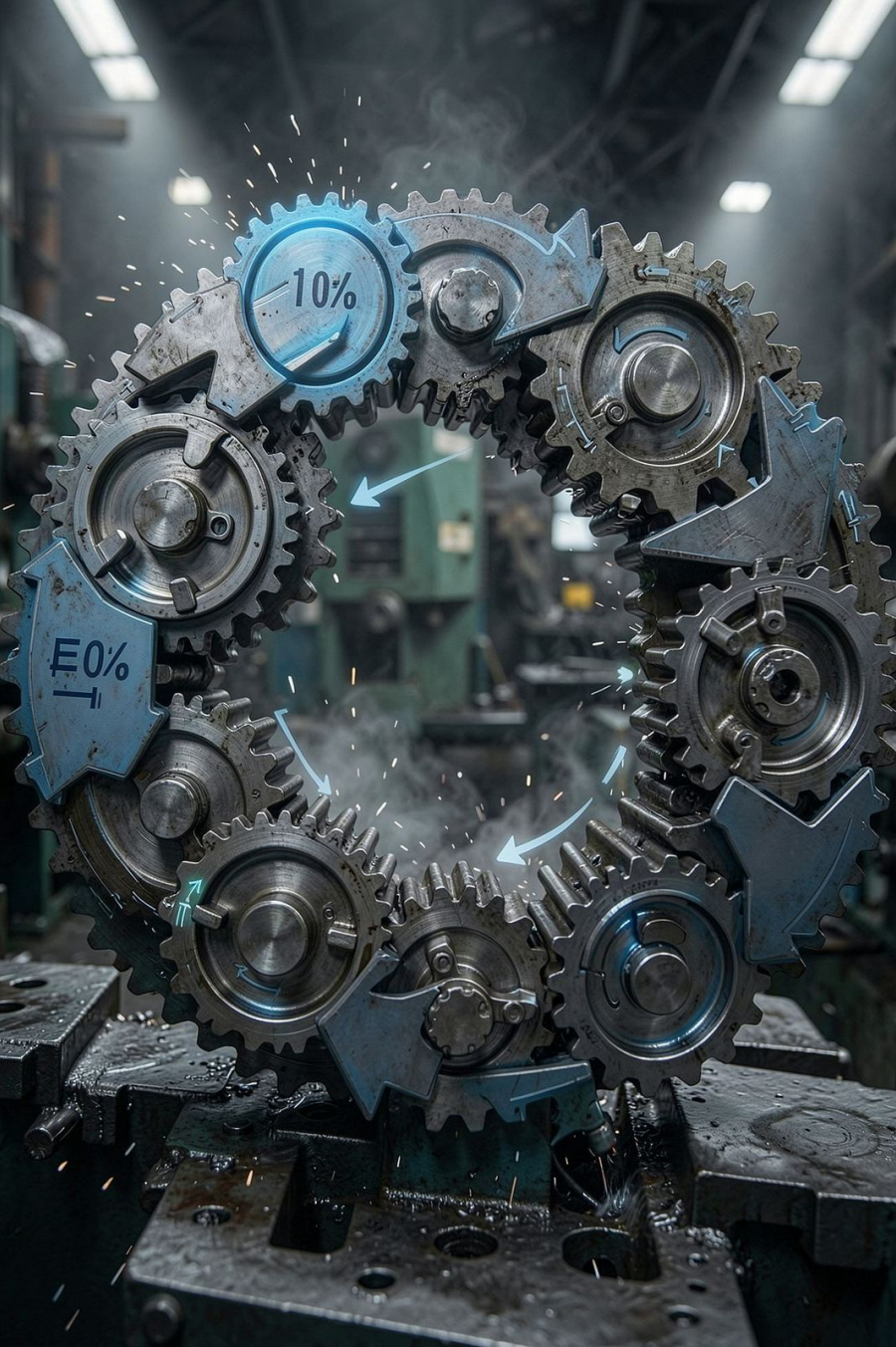


3. **Attrito viscoso e dissipazione** — Il moto di un fluido reale, come il sangue nei vasi, comporta dissipazione di energia meccanica in energia interna a causa della viscosità.



4. **Reazioni biochimiche** — Il metabolismo cellulare comprende reazioni accoppiate e processi dissipativi che, nel loro complesso, producono entropia e sostengono le funzioni vitali.





Il Ciclo Termodinamico

Una serie di trasformazioni termodinamiche tale che lo **stato iniziale coincide con lo stato finale** è definita **ciclo termodinamico**. Poiché ΔE_{int} dipende solo dallo stato:

$$\Delta E_{\text{int}}(\text{ciclo}) = 0 \Rightarrow Q = L$$

Primo Principio Applicato a un ciclo

In un ciclo termodinamico, lo stato iniziale coincide con quello finale, quindi:

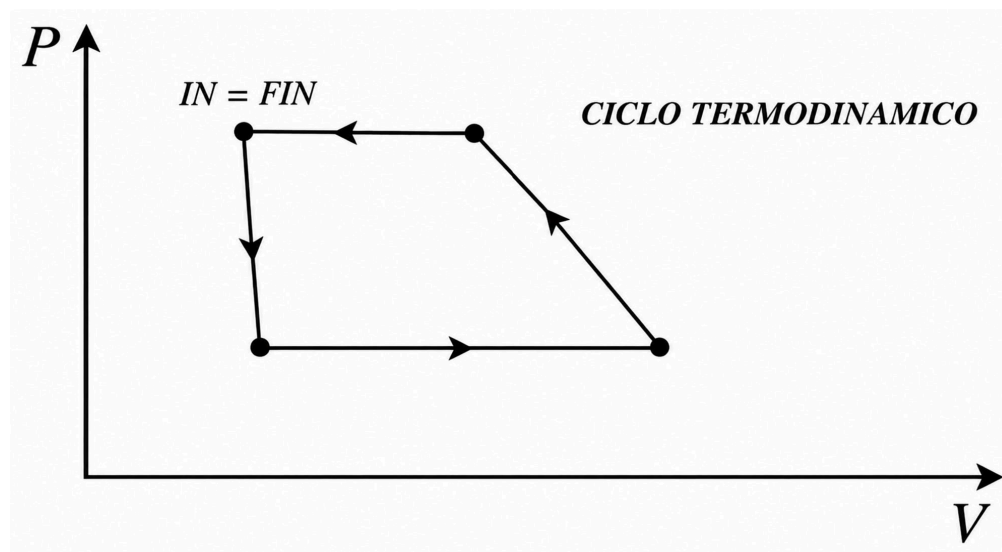
$$\Delta E_{int} = 0$$

Applicando il Primo Principio:

$$0 = Q - L \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q = L}$$

❏ In un ciclo completo, il **calore netto scambiato** è uguale al **lavoro netto compiuto**. Questo principio è alla base del funzionamento del cuore come pompa ciclica.

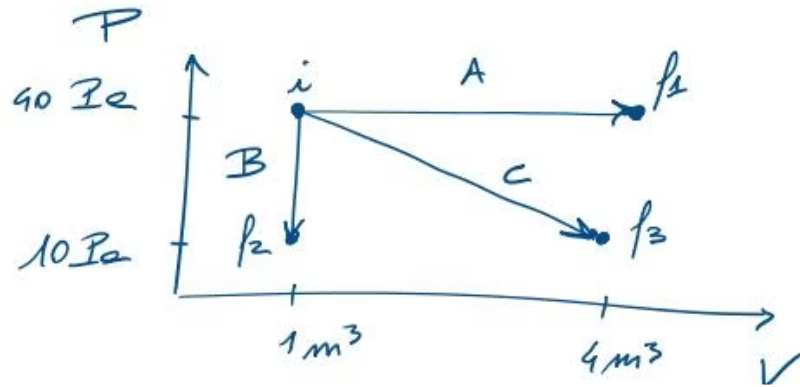
Ciclo Termodinamico nel Piano P-V



In un ciclo termodinamico, il lavoro totale e il calore totale scambiati sono uguali. Il lavoro netto corrisponde all'**area racchiusa dal ciclo** nel piano di Clapeyron.

Esercizio su espansione di un gas

Un gas si espande da 1 m^3 a 4 m^3 mentre la pressione varia da 40 Pa a 10 Pa . Calcolare il lavoro lungo le trasformazioni A, B, C.



Soluzione

A) Isobara ($P = 40 \text{ Pa}$)

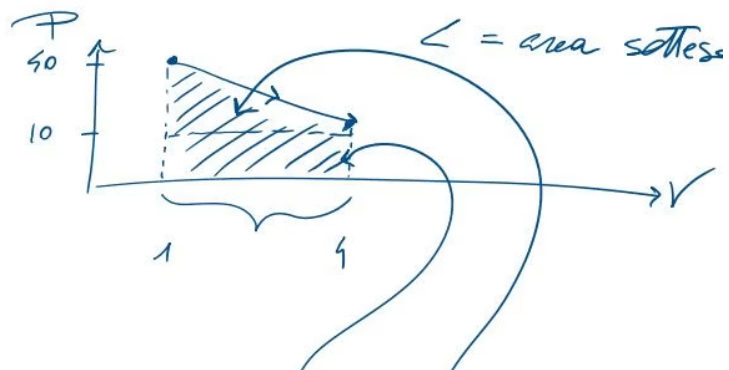
$$L = P\Delta V = 40(4 - 1) = 120 \text{ J}$$

B) Isocora ($\Delta V = 0$)

$$L = 0 \text{ J}$$

Nessuna variazione di volume, nessun lavoro compiuto.

Soluzione

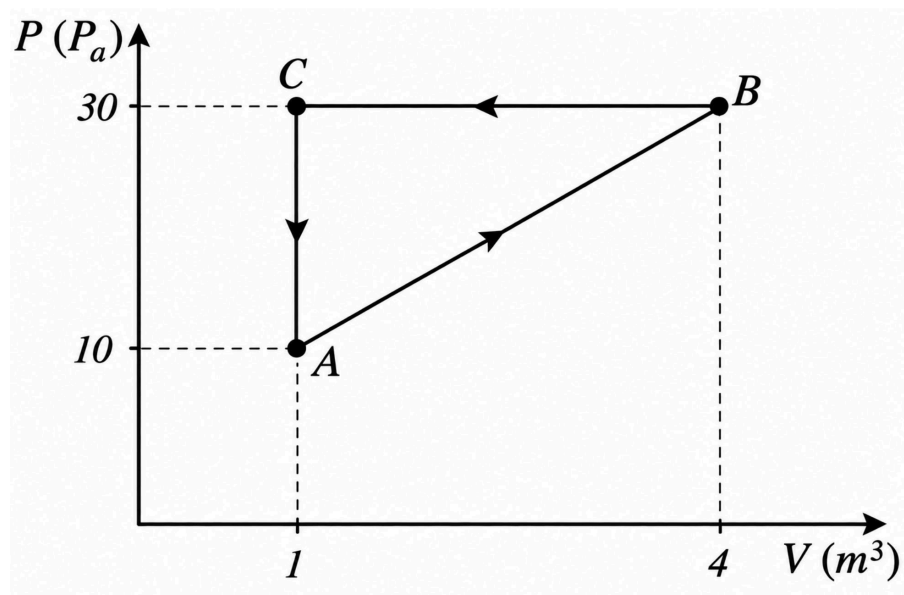


Il lavoro nella trasformazione C si calcola come area sottesa dalla curva nel piano P-V:

$$L = 3 \cdot 10 + 3 \cdot 30 \cdot \frac{1}{2} = 30 + 45 = 75 \text{ J}$$

❏ Il lavoro dipende dalla traiettoria: A dà 120 J, B dà 0 J, C dà 45 J — stessi stati iniziale e finale, risultati diversi.

Esercizio — Il Ciclo Termodinamico



Dato un ciclo termodinamico con tre stati:

A (1 m^3 , 10 Pa)

B (4 m^3 , 30 Pa)

C (1 m^3 , 30 Pa),

calcolare il calore totale Q_{tot} fornito al sistema durante un ciclo completo.

Soluzione

Poiché è un ciclo termodinamico: $\Delta E_{\text{int}} = 0$, quindi:

$$Q_{\text{tot}} = L_{\text{tot}} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CA}$$

In ogni trasformazione avremo:

CA — Isocora

$$\Delta V = 0 \Rightarrow L_{CA} = 0 \text{ J}$$

BC — Isobara

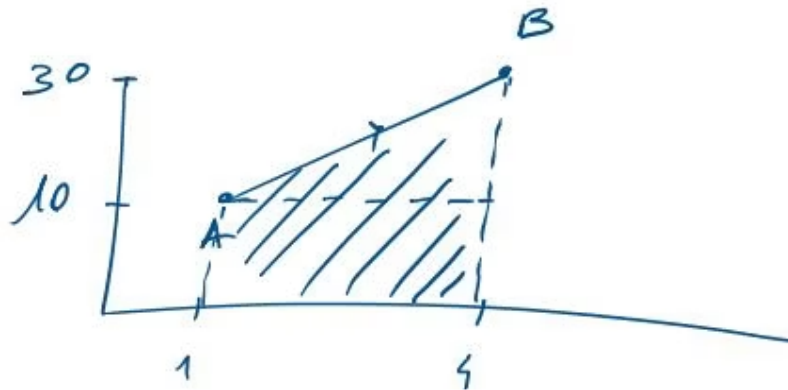
$$L_{BC} = p(V_C - V_B) = \\ 30(1 - 4) = -90 \text{ J}$$

Compressione $\rightarrow$ lavoro
subito $\rightarrow L < 0$

AB — Trasformazione
generica

Calcolato come area
sottesa dalla curva nel piano
P-V.

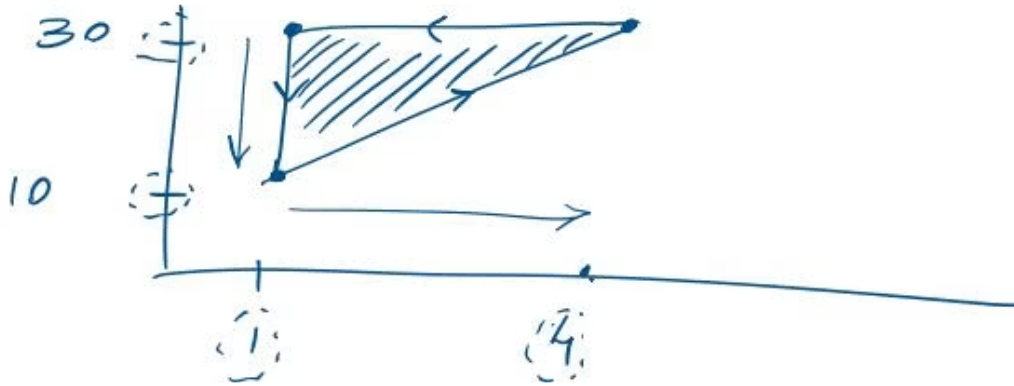
Soluzione



$$L_{AB} = (3 \cdot 10) + 3 \cdot 20 \cdot \frac{1}{2} = 30 + 30 = 60 \text{ J}$$

Soluzione

$$Q_{TOT} = L_{tot} = 60 \text{ J} - 90 \text{ J} + 0 \text{ J} = -30 \text{ J}$$

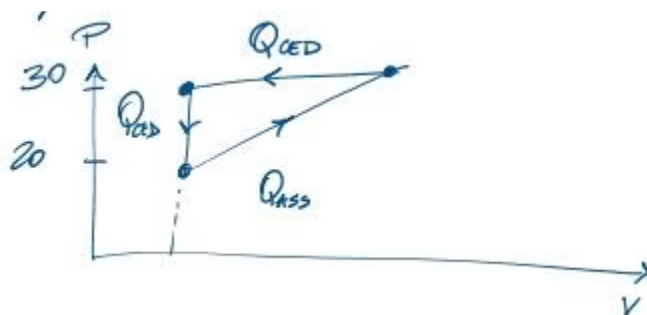


Analogamente, il lavoro totale e quindi il calore, avremmo potuto calcolarlo direttamente come **area interna al ciclo**:

$$Q = L = \text{Area} = \frac{1}{2}(4 - 1)(30 - 10) \cdot (-1) = -30 \text{ J}$$

❏ Il segno negativo indica che il ciclo è percorso in senso orario: il lavoro è subito dal sistema.

Come Distinguere Q Assorbito da Q Ceduto?



Q assorbito (Q_{ass})

Tratti del ciclo in cui il sistema riceve calore dall'esterno. Sul piano PV: tratti percorsi verso destra (espansione).

Q ceduto (Q_{ced})

Tratti del ciclo in cui il sistema rilascia calore. Sul piano PV: tratti percorsi verso sinistra (compressione). Il calore netto è la differenza tra i due contributi.



Applicazione Veterinaria: La Siringa come Sistema Isotermo

Quando un veterinario comprime lo stantuffo di una siringa lentamente (processo quasi-statico), la temperatura rimane circa costante (isoterma). Vale quindi:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Se il volume si dimezza, la pressione raddoppia. Questo principio è usato per calcolare la pressione necessaria per iniettare farmaci in tessuti con diversa resistenza, o per aspirare liquidi da cavità corporee negli animali (toracocentesi, artrocentesi).

Esercizio

Una mole di gas perfetto monoatomico percorre un ciclo con:

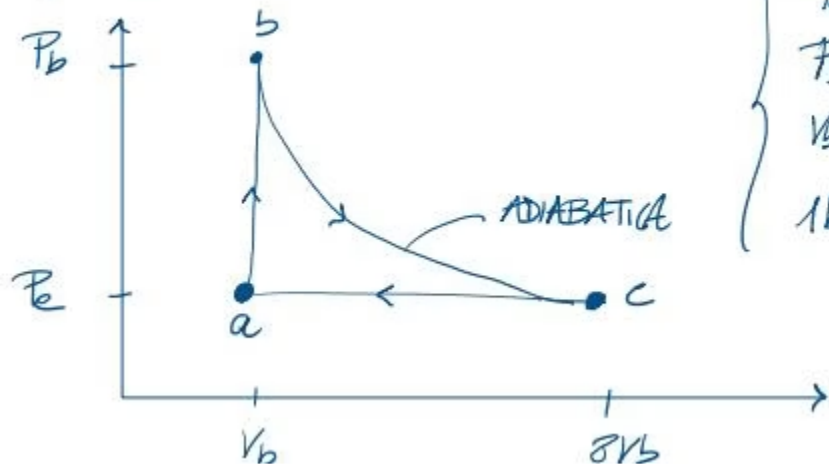
Dati

$P_a = 0,365 \text{ bar}$; $P_b = 10,1 \text{ bar}$; $V_b = 10^{-3} \text{ m}^3$; $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

Richieste

1. Calore assorbito; 2. Calore ceduto; 3. Lavoro totale; 4. Rendimento η (standby lo risolveremo piu' avanti)

è fatto percorso in sequenza così:



$$\left\{ \begin{array}{l} P_c = 0,365 \text{ bar} \\ P_b = 10,1 \text{ bar} \\ V_b = 10^{-3} \text{ m}^3 \\ 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \end{array} \right.$$

$$P_a = 0,365 \text{ bar}$$

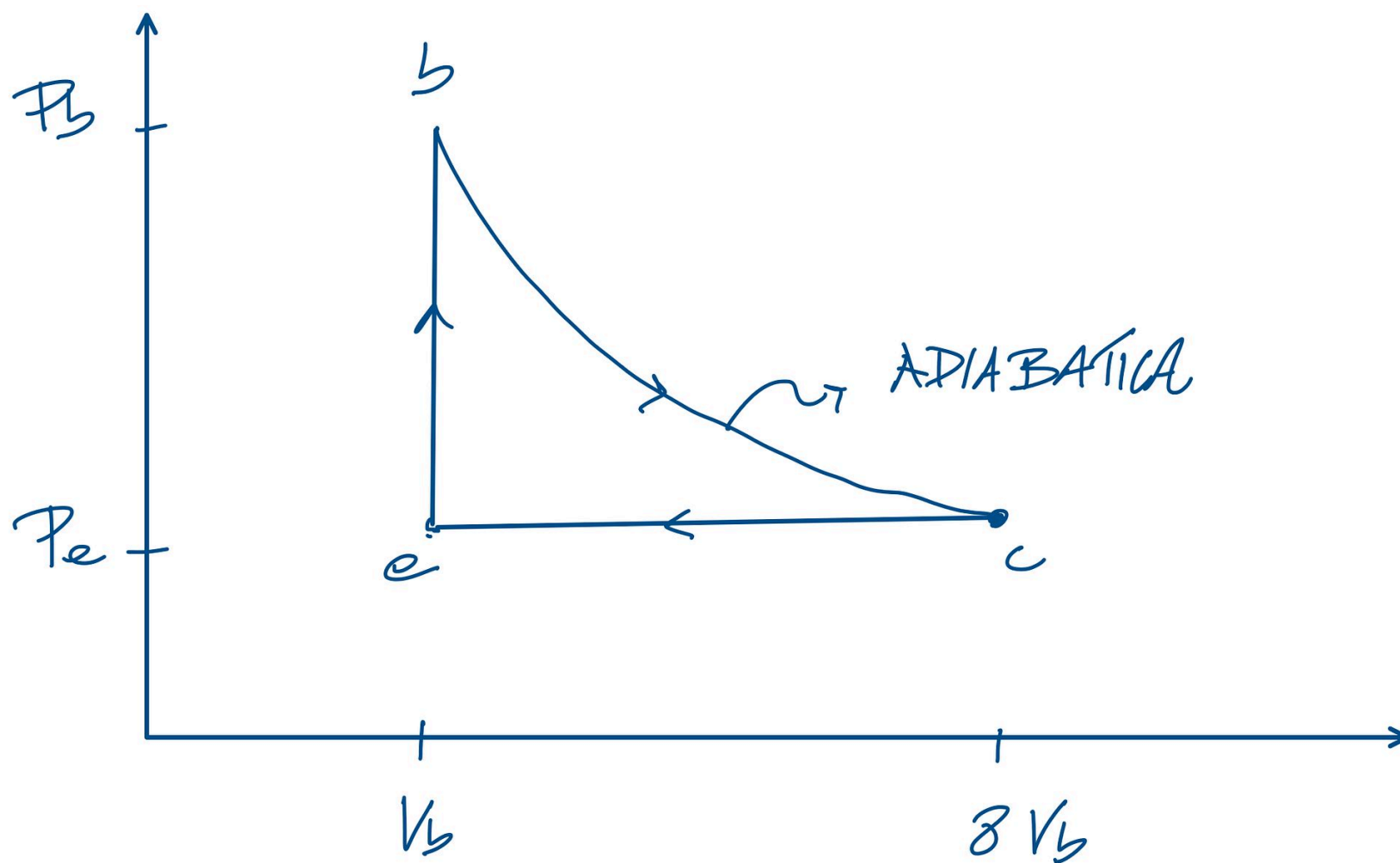
$$V_b = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$n = 1$$

$$P_b = 10,1 \text{ bar}$$

$$(1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}) \quad \text{gas ideale monatomico}$$

- Calcolare:
- 1) Q_{ass}
 - 2) Q_{ced}
 - 3) Lavoro Totale
 - 4) Rendimento η (STANDBY)



$ab \rightarrow$ calore assorbito

$ca \rightarrow$ " ceduto

a)

$$Q = n C_V \Delta T = n C_V (T_b - T_a)$$

$$PV = nRT \Rightarrow T = \frac{PV}{nR}$$

$$Q = n C_V \left(\frac{P_b V_b}{nR} - \frac{P_a V_b}{nR} \right)$$

$$= n \frac{3}{2} R \frac{1}{nR} (P_b V_b - P_a V_b) V_b$$

$$= \frac{3}{2} V_b (P_b - P_a) = 1467,52 \text{ J}$$

c)

Q ceduto

ISOBARA

$$Q_{\text{ced}} = n C_p \Delta T = n \frac{5}{2} R (T_c - T_b)$$

$$T = \frac{PV}{nR}$$

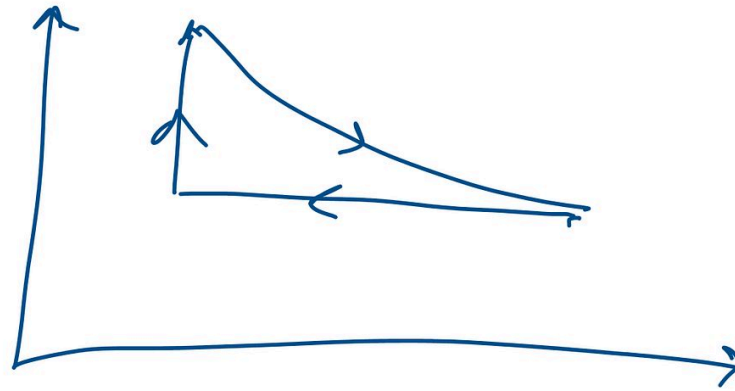
$$= n \frac{5}{2} R \left(\frac{P_c V_b}{nR} - \frac{8 P_c V_b}{nR} \right)$$

$$= \frac{5}{2} (-7 P_c V_b)$$

$$Q_{\text{ced}} = - \frac{35}{2} P_c V_b$$

$$= - 17,5 (0,365 \cdot 10^{-2} \cdot 10^5)$$

3) Zero state?



$$\Delta E = Q - L$$

$\parallel$

0

$$Q = L$$

$$L = Q_{\text{ass}} + Q_{\text{ced}}$$

Il secondo principio della termodinamica

Entropia, trasformazioni spontanee e irreversibilità



Perché il primo principio non è sufficiente?

Il primo principio esprime la conservazione dell'energia. Per un sistema chiuso (Q = calore assorbito dal sistema, L = lavoro compiuto dal sistema sull'ambiente):

$$\Delta U = Q - L$$

L'energia non si crea né si distrugge, ma non ci dice in quale direzione avvenga spontaneamente un processo.

Spontaneo

Un corpo caldo a contatto con uno freddo cede calore fino all'equilibrio termico; un gas si espande nel vuoto.

Non spontaneo

Il calore non passa dal freddo al caldo, e il gas non si concentra in una regione più piccola, se non interviene un dispositivo esterno che compie lavoro.

Serve un nuovo criterio: il secondo principio, basato sul concetto di entropia.

L'entropia: definizione e funzione di stato

L'entropia S è una funzione di stato che descrive l'asimmetria dei processi termodinamici. Per una trasformazione reversibile infinitesima:

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

Per una trasformazione reversibile tra due stati i ed f :

$$\Delta S = \int_i^f \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

Se la temperatura T è costante:

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T}$$

T è la temperatura assoluta (kelvin); unità di misura $[S] = \text{J/K}$.

Funzione di stato — Entropia

Dipende solo dallo stato iniziale e finale, non dal percorso seguito:

$$\Delta S = S_B - S_A$$

Vale anche per processi irreversibili, scegliendo un qualsiasi percorso reversibile tra gli stessi stati.

Dal momento che l'entropia è una funzione di stato posso sempre immaginare una trasformazione isoterma che colleghi i due stati considerati e quindi posso sempre calcolarla come sopra anche se la trasformazione non è isoterma!

Interpretazione fisica: macrostati e microstati

Macroscopica: dispersione dell'energia

Corpo caldo (T_h) e corpo freddo (T_c), con $T_h > T_c$. Il calore passa dal caldo al freddo: l'energia si conserva, ma si distribuisce più uniformemente e l'entropia totale aumenta. Una parte dell'energia non è più convertibile in lavoro.

Lo stato macroscopico è descritto mediante grandezze quali pressione, volume e temperatura;

Microscopica: relazione di Boltzmann

Lo stato microscopico specifica invece le configurazioni delle singole particelle. Allo stesso stato macroscopico possono corrispondere moltissime configurazioni microscopiche, dette microstati.

$$S = k_B \ln \Omega$$

- $k_B = 1,381 \times 10^{-23}$ J/K costante di Boltzmann
- Ω = numero di microstati compatibili con il macrostato.
Più microstati $\rightarrow$ entropia maggiore.

Un macrostato compatibile con un numero maggiore di microstati possiede, secondo questa relazione, un'entropia maggiore.

Il secondo principio della Termodinamica enunciato entropico

Non tutti i processi compatibili con la conservazione dell'energia avvengono spontaneamente. L'entropia totale di un sistema isolato non può diminuire:

$$\Delta S_{\text{isolato}} \geq 0$$

Tipo di processo	Variazione di entropia totale
Reversibile	$\Delta S_{tot} = 0$
Irreversibile	$\Delta S_{tot} > 0$

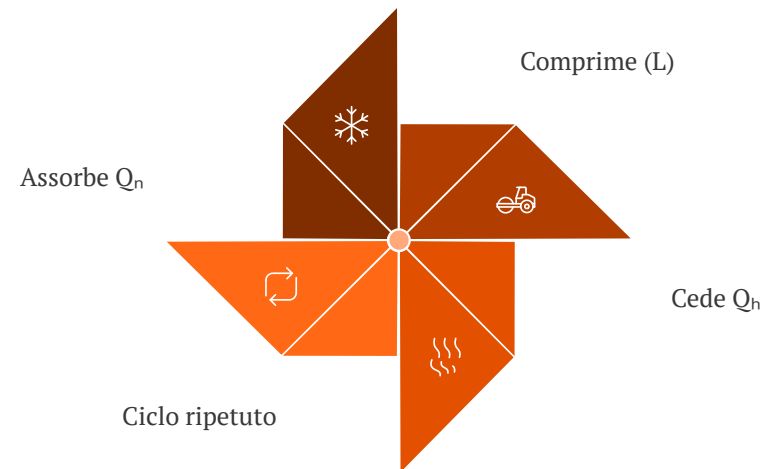
- Aumento dell'entropia
- Enunciato di Clausius
- Enunciato di Kelvin-Planck

 L'entropia di un singolo sistema non isolato può diminuire, purché il bilancio complessivo con l'ambiente rispetti il secondo principio.

Enunciato di Clausius

❏ È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia il trasferimento di calore da un corpo freddo a un corpo caldo.

Il calore passa spontaneamente da temperatura maggiore a minore; il percorso inverso richiede lavoro esterno (frigorifero, pompa di calore).



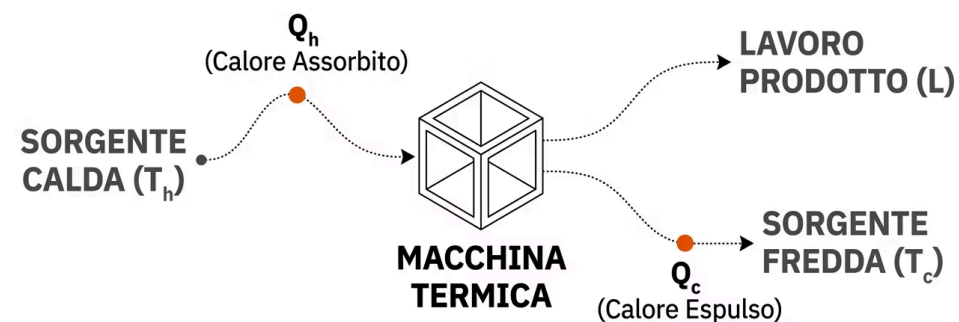
Enunciato di Kelvin-Planck

- ❏ È impossibile realizzare una macchina termica ciclica il cui unico risultato sia assorbire calore da una sola sorgente e convertirlo integralmente in lavoro.

Rendimento:

$$\eta = \frac{L}{Q_{ass}} = 1 - \frac{Q_{ced}}{Q_{ass}}$$

Non è possibile $Q_{ced} = 0$, quindi $\eta < 1$.



La macchina termica converte parte del calore assorbito dalla sorgente calda in lavoro, espellendo il resto alla sorgente fredda.

Equivalenza dei due enunciati: Violare Clausius permetterebbe di costruire una macchina che viola Kelvin-Planck, e viceversa: i due enunciati descrivono lo stesso principio fisico.

Riepilogo

Il secondo principio completa il primo: introduce l'entropia e definisce la direzione dei processi spontanei.

1 Entropia

Funzione di stato; microscopicamente:

$$S = k_B \ln \Omega$$

2 Principio entropico

L'entropia di un sistema isolato non può diminuire:

$$\Delta S_{\text{isolato}} \geq 0$$

3 Clausius

Il calore non passa spontaneamente dal freddo al caldo come unico risultato; per un frigorifero:

$$Q_h = Q_c + L$$

4 Kelvin-Planck

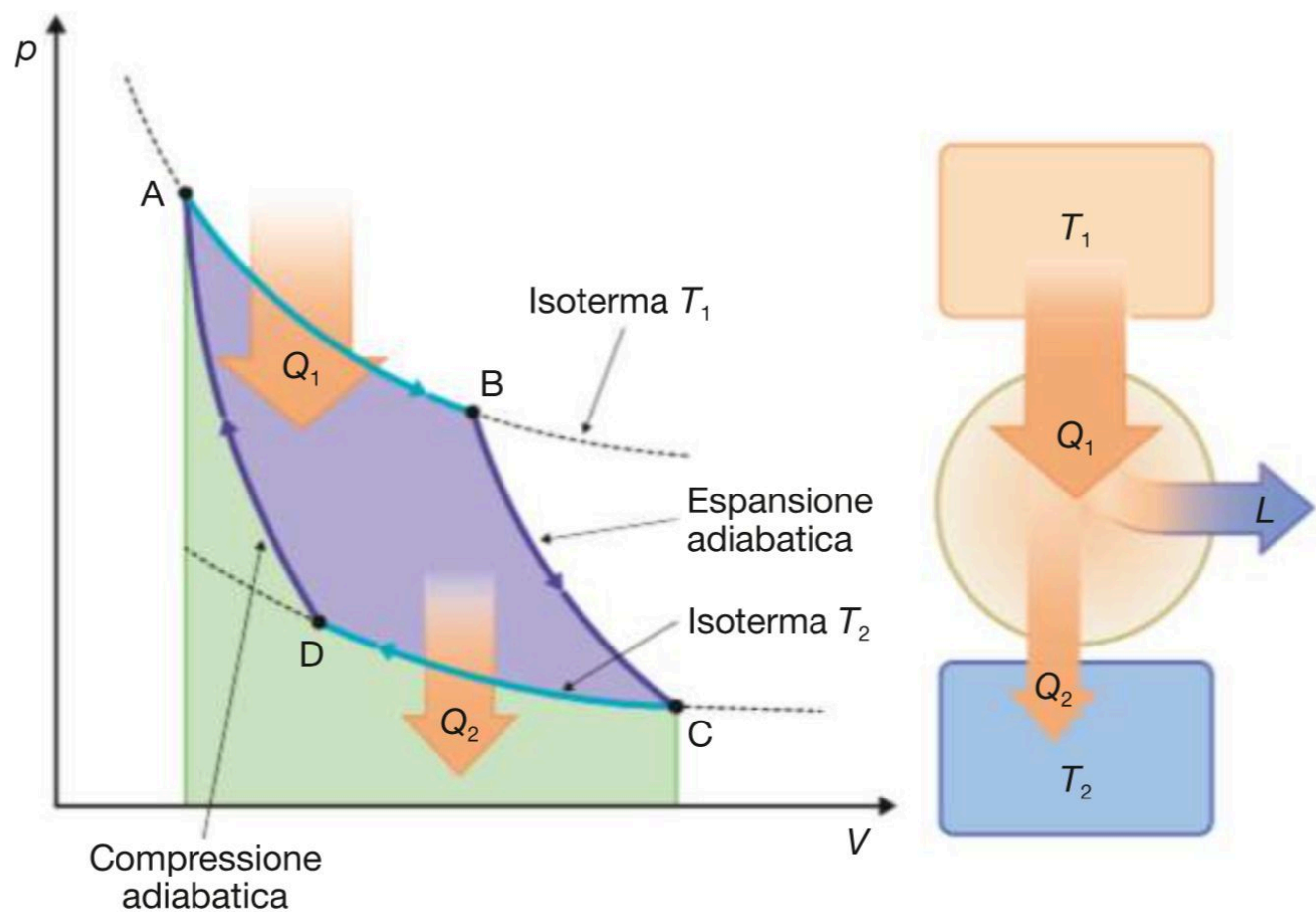
Nessuna macchina ciclica converte integralmente in lavoro il calore di una sola sorgente; il rendimento è sempre minore di 1:

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} < 1$$

❏ Nei processi irreversibili si produce entropia. Questo spiega l'asimmetria temporale dei fenomeni naturali e pone limiti fondamentali alla conversione dell'energia, con conseguenze importanti per la fisiologia e la biofisica degli animali.

Il Ciclo di Carnot

Il ciclo di Carnot è un ciclo termodinamico reversibile teorico che rappresenta il processo più efficiente per convertire calore in lavoro o viceversa. Sebbene non sia realizzabile nella pratica, stabilisce il limite massimo di efficienza per qualsiasi macchina termica che operi tra due determinate temperature, fornendo un benchmark fondamentale per l'ingegneria e la fisica.



1

Espansione Isoterma (A→B)

Il gas assorbe calore (Q_1) da una sorgente calda a temperatura costante (T_1), espandendosi e compiendo lavoro. La pressione diminuisce e il volume aumenta.

2

Espansione Adiabatica (B→C)

Il gas continua ad espandersi, ma senza scambi di calore con l'esterno ($Q = 0$). La temperatura del gas diminuisce da T_1 a T_2 , compiendo ulteriore lavoro.

3

Compressione Isoterma (C→D)

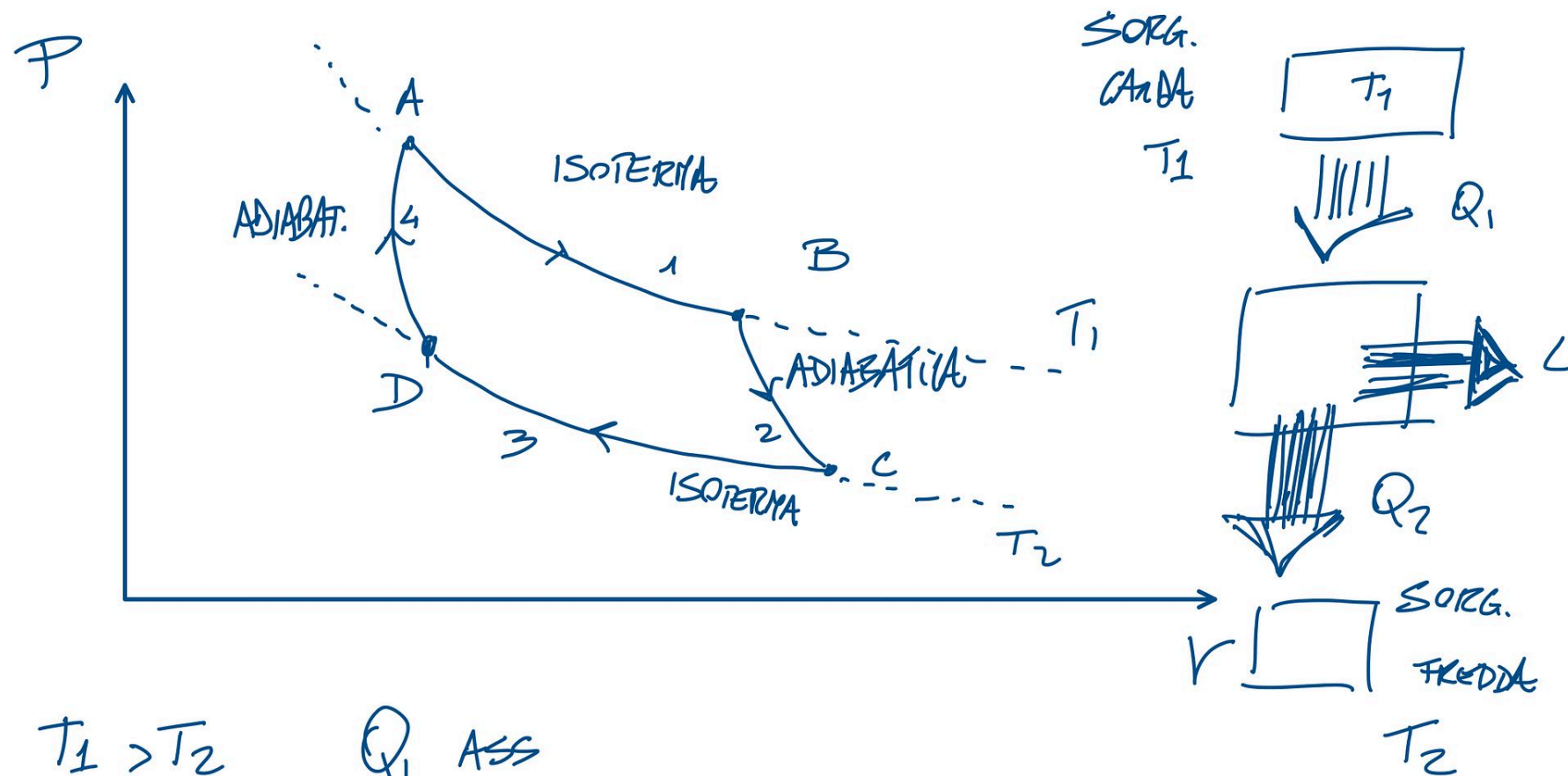
Il gas cede calore (Q_1) a una sorgente fredda a temperatura costante (T_1), venendo compresso. La pressione aumenta e il volume diminuisce, con lavoro compiuto sul gas.

4

Compressione Adiabatica (D→A)

Il gas viene ulteriormente compresso senza scambi di calore ($Q = 0$). La temperatura aumenta da T_2 a T_1 , riportando il sistema allo stato iniziale e completando il ciclo.

CICLO DI CARNOT



$$T_1 > T_2 \quad Q_1 \text{ ASS}$$

$$Q_2 \text{ CED.}$$

$$\Delta S = 0 = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4 = 0 \quad (\text{per } T_{\text{ext}})$$

$$1) \Delta S_1 \quad \text{ISOTERMA} \quad T = T_1$$

$$\Delta S_1 = \frac{Q_1}{T_1} \quad Q_1 \text{ ASS.} \quad \Delta S_1 > 0$$

2) ΔS_2 ADIABATICA $Q = 0$

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = 0 \quad \Delta S_2 = 0$$

3) ΔS_3 ISOTERMA

$$\Delta S_3 = \frac{Q_2}{T_2} < 0 \quad \Delta S_3 < 0$$

4) ΔS_4 ADIABATICA $Q = 0$

$$\Delta S_4 = \frac{Q}{T} = 0 \quad \Delta S_4 = 0$$

$$\Delta S_{\text{tot}} = \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (\text{Trasf. reversibili})$$

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

Per un ciclo di Carnot

$$\Rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{L}{Q_{ASS}} = \frac{Q_{ASS} - Q_{CED}}{Q_{ASS}} = 1 - \frac{Q_{CED}}{Q_{ASS}}$$

Per un qualunque ciclo Termodinamico ↗

Nel caso di un ciclo di Carnot:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$Q_1 = Q_{ASS}$$

$$Q_2 = Q_{CED}$$

$$\frac{Q_{ASS}}{T_1} = \frac{Q_{CED}}{T_2}$$

$$\frac{Q_{CED}}{Q_{ASS}} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_{CED}}{Q_{ASS}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Carnot

$$\eta_{CARNOT} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Il rendimento delle
macchine di Carnot
dipende solo da T !!!

$$\text{se } T_1 \gg T_2 \quad \frac{T_2}{T_1} \text{ trascur.}$$

$$\eta_{CARNOT} \rightarrow 1$$

Il Ciclo di Carnot e il Rendimento Massimo

Il **ciclo di Carnot** è il ciclo reversibile più efficiente tra due sorgenti a temperature T_1 (calda) e T_2 (fredda):

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

- ❏ Nessun motore biologico o meccanico può superare il rendimento di Carnot. Il corpo degli animali opera ben al di sotto di questo limite teorico, dissipando calore per mantenere l'omeotermia.

Esercizi (Tommasi)

Esercizio # 1405 (Tommasi)

$$Q_1 = 1500 \text{ Kcal} \quad T_1$$

$$Q_2 = 1000 \text{ Kcal} \quad T_2$$

$$\angle \text{ e } \eta$$

$$\rightarrow \text{A) } 2053 \text{ KJ} ; 33\%$$

$$\text{B) } \text{ " } \text{ MJ} ; \text{ "}$$

$$\text{C) } \text{ " } \text{ KJ} ; 50\%$$

$$\text{D) } 10,46 \text{ MJ} ; 33\%$$

$$\text{E) } 10,46 \text{ KJ} ; 50\%$$

Ciclo $\sum \Delta E = Q - L = 0 \Rightarrow Q = L$

$$\angle = Q_{\text{ASS}} - Q_{\text{CED}}$$

$$\angle = 1500 - 500 = 500 \text{ Kcal}$$

$$1 \text{ Kcal} = 4,186 \text{ KJ}$$

$$\angle \hat{=} 2000 \text{ KJ}$$

$$\eta_{\text{CARNOT}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{1000}{1500}$$

$$\eta_{\text{CARNOT}} = 1 - 0,666 \hat{=} 0,33 = 33\%$$

$$\angle = 2000 \text{ KJ} ; \eta = 33\% \quad \text{A) } \checkmark$$

Riepilogo della lezione

1. Primo principio

$\Delta E_{\text{int}} = Q - L$: la variazione di energia interna è data dal calore scambiato meno il lavoro compiuto.

2. Reversibilità

Le trasformazioni reversibili sono ideali; le irreversibili hanno cause come diffusione, attrito e scambi di calore con ΔT finita.

3. Trasformazioni canoniche

Isoterma, isobara, isocora e adiabatica. Il lavoro è l'area sotto la curva nel piano P-V.

4. Cicli termodinamici

Con $\Delta E_{\text{int}} = 0$ si ha $Q_{\text{tot}} = L_{\text{tot}}$, distinguendo calore assorbito e calore ceduto.

5. Secondo principio

L'entropia è una funzione di stato: $dS = \delta Q_{\text{rev}}/T$, con $\Delta S_{\text{isolato}} \geq 0$.

6. Enunciati e rendimento

Enunciati di Clausius e Kelvin-Planck; rendimento $\eta = L/Q_{\text{ass}}$.

7. Ciclo di Carnot

Rendimento massimo $\eta = 1 - T_{\text{fredda}}/T_{\text{calda}}$.

Domande teoriche di autovalutazione

- 1 Qual è il significato fisico del primo principio della termodinamica e come si scrive per una trasformazione finita?
- 2 Che differenza c'è tra una trasformazione reversibile e una irreversibile? Quali sono le principali cause di irreversibilità?
- 3 Come si calcola il lavoro in una trasformazione nel piano P-V? Perché dipende dal percorso?
- 4 Perché in un ciclo termodinamico si ha $\Delta E_{\text{int}} = 0$ e quindi $Q_{\text{tot}} = L_{\text{tot}}$?
- 5 Come si distinguono i tratti di ciclo in cui il calore è assorbito da quelli in cui è ceduto?
- 6 Perché il primo principio non è sufficiente a descrivere la direzione dei processi spontanei?
- 7 Cos'è l'entropia? Perché è una funzione di stato e cosa afferma il secondo principio per un sistema isolato?
- 8 Enuncia gli enunciati di Clausius e di Kelvin-Planck e spiega perché sono equivalenti. Cosa stabilisce il teorema di Carnot sul rendimento massimo?