

Lezione XXVII

(Termodinamica:

Principio 0 della termodinamica,

concetto di temperatura,

Dilatazioni termiche, Variabili e

trasformazioni,

Lavoro di una trasformazione)



FRUIZIONE E UTILIZZO DEI MATERIALI DIDATTICI

- ➔ **E' vietata** la **copia**, la **rielaborazione**, la **riproduzione** dei contenuti e immagini presenti nelle lezioni in qualsiasi forma
- ➔ **E' inoltre vietata** la **diffusione**, la **redistribuzione** e la **pubblicazione** dei contenuti e immagini, incluse le registrazioni delle videolezioni con qualsiasi modalità e mezzo non autorizzati espressamente dall'autore o da Unica

Termodinamica: Principio Zero e concetto di temperatura

La grandezza fisica Temperatura

Sebbene abbiamo dimestichezza col **concetto di temperatura**, dobbiamo comunque ancora darne una definizione operativa. Non c'è dubbio che il senso del tatto è il più immediato per distinguere fra corpi caldi e corpi freddi. In base a questa sensibilità siamo in grado di affermare che un corpo A è più caldo di B, B di C, e così via. Questa nostra capacità è connessa al nostro senso della temperatura, che è però troppo soggettivo e troppo approssimato per poterne fare un uso scientifico.

Per esempio sappiamo che se immergiamo la mano destra in acqua fredda e la mano sinistra in acqua calda, e successivamente le immergiamo entrambi in acqua tiepida, alla mano destra quest'acqua sembrerà più calda che alla mano sinistra, mentre ci dovremmo aspettare di registrare la stessa sensazione di temperatura.

Occorre quindi sviluppare un metodo oggettivo e numerico.

Cerchiamo prima di approfondire il significato di temperatura. Sia A un corpo che al tatto sembra caldo e B un corpo che al tatto sembra freddo. Poniamo a contatto questi due corpi.

Dopo un tempo sufficientemente lungo, sia A che B danno origine alla stessa sensazione termica.

Diremo allora che A e B sono in equilibrio termico.

Per verificare l'esistenza di equilibrio termico fra due corpi, se ne può utilizzare un terzo che a tutti gli effetti costituisce una sorta di termometro. Questa operazione si basa sul seguente **postulato** che costituisce il **Principio Zero della Termodinamica**:

Se A e B sono in equilibrio termico con un terzo corpo C, allora lo sono anche fra di loro

Sebbene stiamo ancora ragionando in termini qualitativi, queste considerazioni esprimono un concetto fondamentale: ***la temperatura di un sistema è una grandezza che, trascorso un tempo sufficiente, raggiunge quella dei sistemi con cui è a contatto.***

Vediamo adesso di concretizzare in termini operativi questa discussione, che si basa essenzialmente sulla esperienza, ma non ancora su numeri e/o relazioni o formule.

Vi sono proprietà fisiche che variano con la temperatura, per esempio il volume di un liquido, la lunghezza di una sbarra, la resistenza di un conduttore, la pressione di un gas mantenuto a volume costante, il volume di un gas mantenuto a pressione costante, il colore del filamento di una lampada.

Una qualunque di queste ***proprietà termometriche*** può essere utilizzata per realizzare un ***termometro*** e per formulare quindi una ***definizione operativa della temperatura.***

Per **definire un termometro**, e di conseguenza formulare una definizione operativa di temperatura, dobbiamo innanzitutto scegliere una proprietà termometrica misurabile.

Sia X una qualsiasi proprietà termometrica. Individueremo arbitrariamente la relazione funzionale fra la temperatura T e la proprietà X con la seguente relazione:

$$T(X) = a X \quad \text{dove } a \text{ è una costante da determinare.}$$

Cioè: \rightarrow a eguali differenze o intervalli di temperatura corrispondono eguali variazioni in X

$$\frac{T(X_1)}{T(X_2)} = \frac{X_1}{X_2}$$

Pertanto, una volta rilevato il valore X_0 della proprietà termometrica X in una situazione fisica di riferimento, per esempio il punto triplo dell'acqua, possiamo determinare con lo stesso termometro la temperatura in qualsiasi altra situazione fisica.

In realtà le cose sono però un po' più complicate: l'ipotesi iniziale $T(X) = aX$ con a **costante** contiene l'assunzione implicita che **l'equazione di stato della sostanza** di cui stiamo sfruttando una certa proprietà termometrica obbedisca a certe regole, e questo non è necessariamente vero per tutte le sostanze o per tutti i valori delle variabili termometriche in questione.

Vedremo però che un termometro a gas a pressione relativamente bassa risponde a questa proprietà

In generale, per determinare la costante α , occorre individuare un punto fisso a cui tutti i termometri devono indicare la stessa temperatura. È stato stabilito che questo punto è il punto triplo dell'acqua, cioè lo stato in cui ghiaccio, acqua, e vapore d'acqua coesistono e sono in equilibrio.

Tale stato può essere ottenuto soltanto ad una pressione ben definita.

La temperatura in questo stato vale per convenzione 273,16 K

Indicando i valori al punto triplo con il suffisso 3, possiamo scrivere:

$$\frac{T(X)}{T(X_3)} = \frac{X}{X_3}$$

dove $T(X_3) = 273,16 \text{ K}$ e quindi:

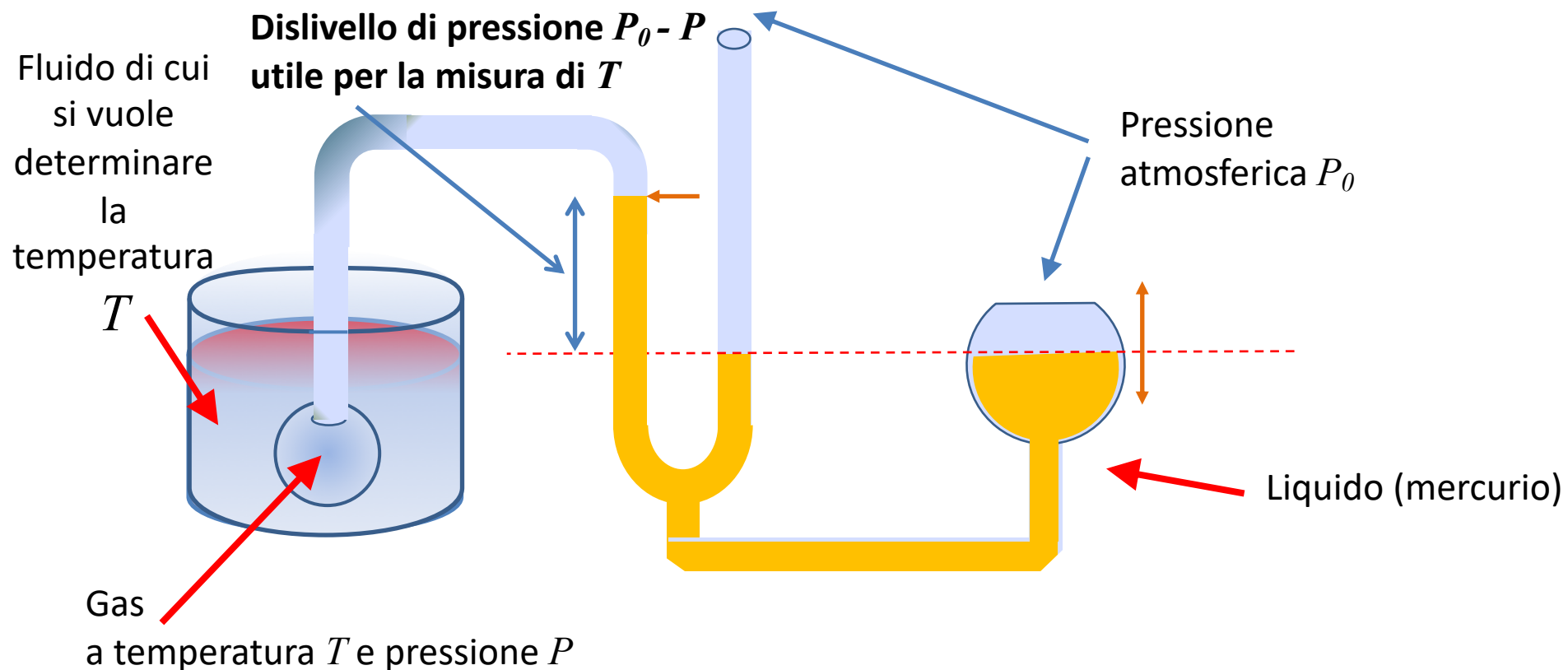
$$T(X) = 273,16 \text{ K} \frac{X}{X_3}$$

Si osserva che ad una data temperatura la pressione di un gas dipende dal suo volume.

Allo stesso tempo, **se il volume viene mantenuto costante, la pressione dipende dalla**

Temperatura: in particolare **crece con questa**. Il termometro a gas a volume costante,

sfrutta come proprietà termometrica la pressione del gas a volume costante.



Il termometro a gas a volume costante

Si dimostra che in un termometro del genere la temperatura in questione T è data da:

$$T(P) = 273,16 \text{ K} \frac{P}{P_3} \quad (V = \text{costante})$$

E si dimostra che se *massa gas* $\rightarrow 0$, la scala di temperatura definita da questo termometro **non** dipende dal particolare gas utilizzato. Definiremo pertanto la temperatura di un termometro a gas ideale come:

$$T = 273,16 \text{ K} \lim_{\text{massa gas} \rightarrow 0} \frac{P}{P_3} \quad (V = \text{costante})$$

Una scala di temperatura usata comunemente **è la scala Celsius t , detta anche centigrada**, definita dalla:

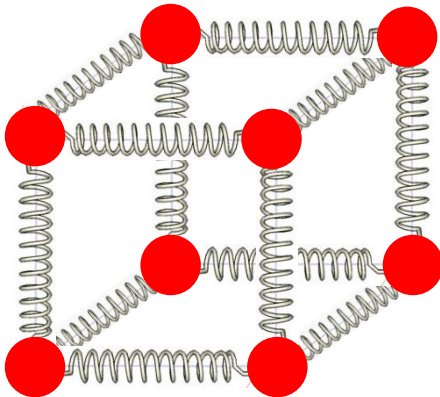
$$t = T - 273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Si noti che il punto triplo dell'acqua corrisponde a $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$, infatti $T(\text{punto triplo}) = 273,16 \text{ K}$ e quindi $t(\text{punto triplo}) = T(\text{punto triplo}) - 273,15 = 273,16 - 273,15 = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$

Espansione termica

Gli effetti più comuni che si osservano quando si aumenta la temperatura di un dato materiale sono la **variazione di dimensione** e i **cambiamenti di stato**. Consideriamo adesso solo le variazioni di dimensioni.

In un semplice modello di un corpo solido gli atomi sono disposti in un reticolo di un insieme di forze elettriche, come delle piccole molle:



- Di queste molle ve ne sono circa 10^{23} per cm^3
- Gli atomi sono in perenne vibrazione a qualunque T
- L'ampiezza di tali vibrazioni è dell'ordine di 10^{-9} cm
- La frequenza di circa 10^{13} Hz
- Aumentando la temperatura, l'ampiezza delle vibrazioni cresce, così pure la distanza media fra gli atomi
- Questo fenomeno provoca una espansione

L'aumento di ciascuna delle dimensioni lineari del solido: lunghezza, spessore e altezza è denominata espansione lineare.

Sia l una di queste dimensioni lineari: una variazione ΔT della temperatura provoca una variazione Δl di l . Si osserva che Δl è proporzionale a ΔT e alla lunghezza iniziale:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T$$

Dove α è denominato **coefficiente di espansione lineare** e dipende dal materiale.

Analogamente, si definisce una variazione di volume per liquidi e solidi:

$$\Delta V = \beta V \Delta T$$

dove β è denominato **coefficiente di espansione volumetrica** e dipende dal materiale

Nel caso dei solidi vale:

$$\beta = 3\alpha$$

Sistemi termodinamici

In meccanica lo stato di un sistema è completamente determinato quando sono note, ad ogni istante t , le funzioni **posizione** e la **velocità** di ciascun punto materiale di cui si compone il sistema. Questo vuol dire **conoscere $6N$ variabili, nel caso in cui il sistema sia composto di N punti o particelle.**

Abbiamo già visto tuttavia, per esempio nel caso dei moti rotatori, o nel caso della propagazione delle onde, che trattare questi fenomeni riferendosi alle equazioni che regolano il moto individuale dei singoli punti di cui si compone il sistema non è per niente pratico, e siamo quindi giunti alla individuazione di altre grandezze fisiche che meglio rappresentano il moto del sistema attraverso formule sintetiche e tutto sommato eleganti.

In termodinamica ci troviamo a fronteggiare una situazione del tutto simile: **definire lo stato termodinamico di un sistema attraverso lo studio individuale del moto degli N atomi o molecole di cui si compone è impossibile**, anche per il carattere statistico del moto.

Come vedremo, **lo stato termodinamico di un gas è determinato dai seguenti parametri: il volume V , la pressione p e la temperatura T**

Tra gli stati termodinamici di un sistema rivestono particolare interesse gli **stati di equilibrio**.

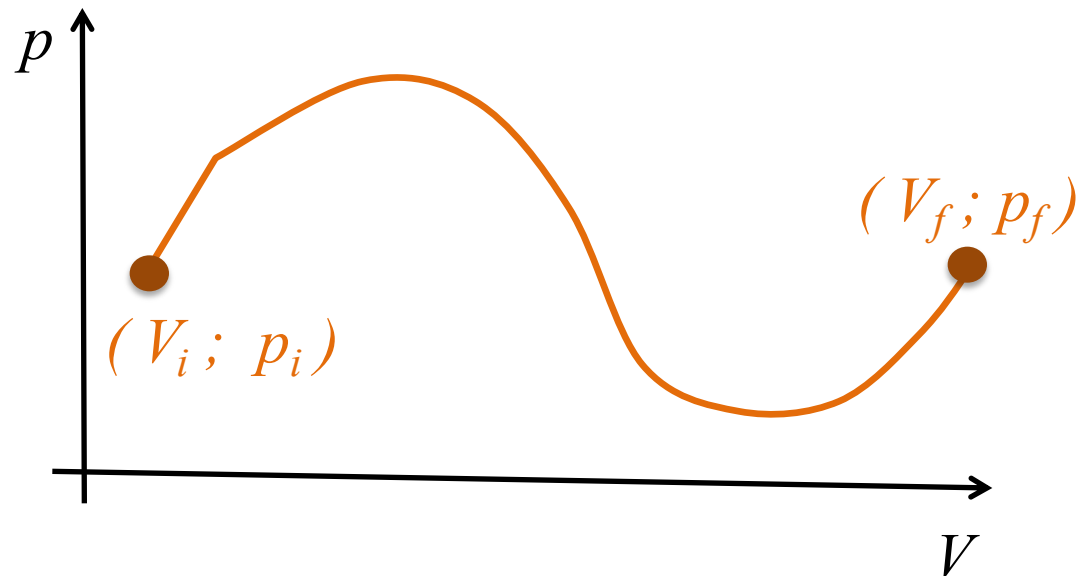
Uno stato termodinamico si definisce di equilibrio se rimane inalterato e non cambiano le condizioni esterne

Così per esempio un gas chiuso in un recipiente è in equilibrio se non viene alterato il volume del recipiente, e la sua temperatura eguaglia quella del recipiente.

Se il sistema è isolato, se cioè non agiscono su di esso cause che ne variano i parametri, **il gas si trova ovviamente in uno stato di equilibrio**. Se un gas è in uno stato di equilibrio quindi, i suoi parametri **non** cambiano e finché rimane isolato, mantiene il suo equilibrio, cioè il suo stato. **Qualcosa di simile** ad una biglia che si muove nel vuoto a velocità costante fino a quando non intervengono forze che ne cambiano lo stato meccanico.

Trasformazioni termodinamiche

In vari casi considereremo *trasformazioni* di un sistema da uno stato iniziale ad uno stato finale cioè cambiamenti delle sue variabili macroscopiche. Per esempio se lo stato di un sistema può essere rappresentato da un punto in un grafico (V, p) , una tale trasformazione sarà rappresentata da una curva nel piano (V, p)



Una **trasformazione di stato** è definita **reversibile** quando gli stati attraverso i quali il sistema passa durante la trasformazione differiscono per quantità infinitesime da **stati di equilibrio**. Per ottenere una trasformazione reversibile bisogna alterare le condizioni esterne molto lentamente, in modo che il sistema si possa adattare gradualmente alle nuove condizioni.

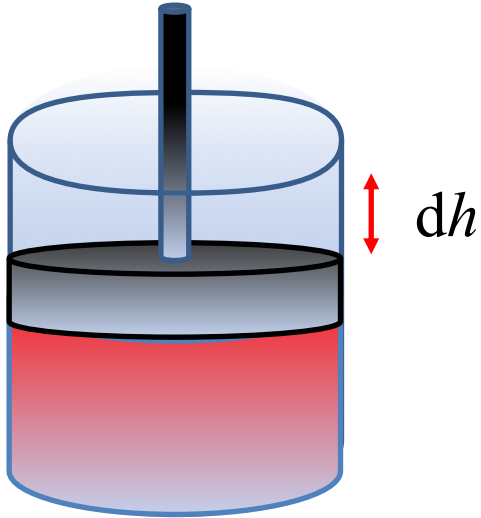
Per esempio, si può ottenere una espansione reversibile di un gas se esso si trova in un recipiente cilindrico con un pistone, e spostando molto lentamente il pistone verso l'esterno. Se il pistone invece venisse spostato rapidamente si produrrebbero delle correnti all'interno e il gas non sarebbe più in equilibrio.

Se trasformiamo un sistema **da uno stato iniziale A ad uno stato finale B in modo reversibile**, possiamo poi riportarlo in A eseguendo gradualmente la stessa successione in senso inverso. Per esempio, nel caso citato possiamo gradualmente comprimere il gas.

Lavoro di un sistema termodinamico sull'ambiente esterno (e viceversa)

Durante l'espansione il sistema che abbiamo preso in considerazione può compiere lavoro positivo o negativo, vale a dire può compiere lavoro sui corpi esterni ovvero questi ultimi possono compiere lavoro su di esso.

Se indichiamo con S la superficie del pistone e con p la pressione esercitata dal gas, la forza F esercitata dal gas sul pistone sarà $p S$.



Pertanto il lavoro infinitesimo fatto dal gas sul pistone durante la sua espansione sarà dato dalla:

$$dL = p S dh$$

dove dh è lo spostamento infinitesimale in altezza.

E cioè:

$$dL = p dV$$

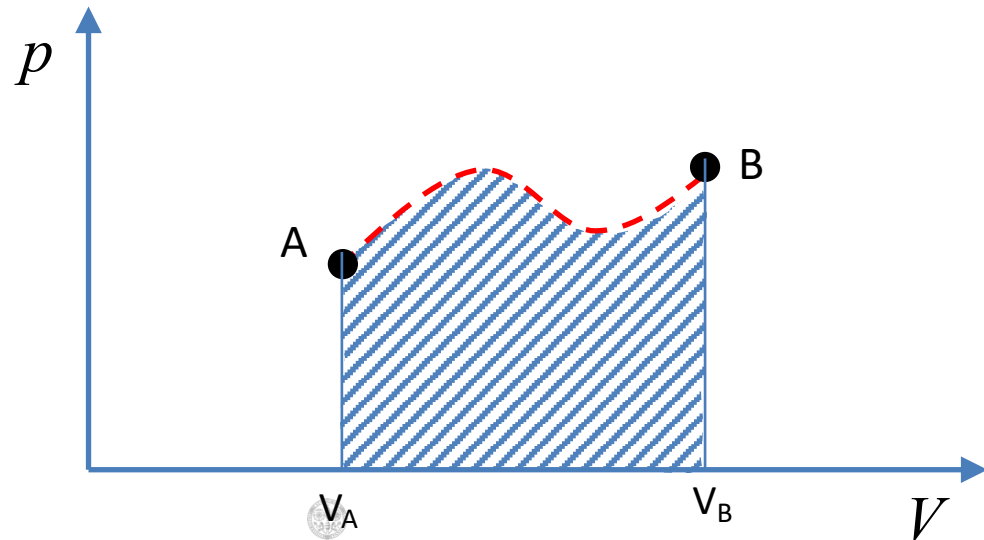
Il lavoro fatto dal sistema si ottiene pertanto integrando l'equazione:

$$dL = p dV$$

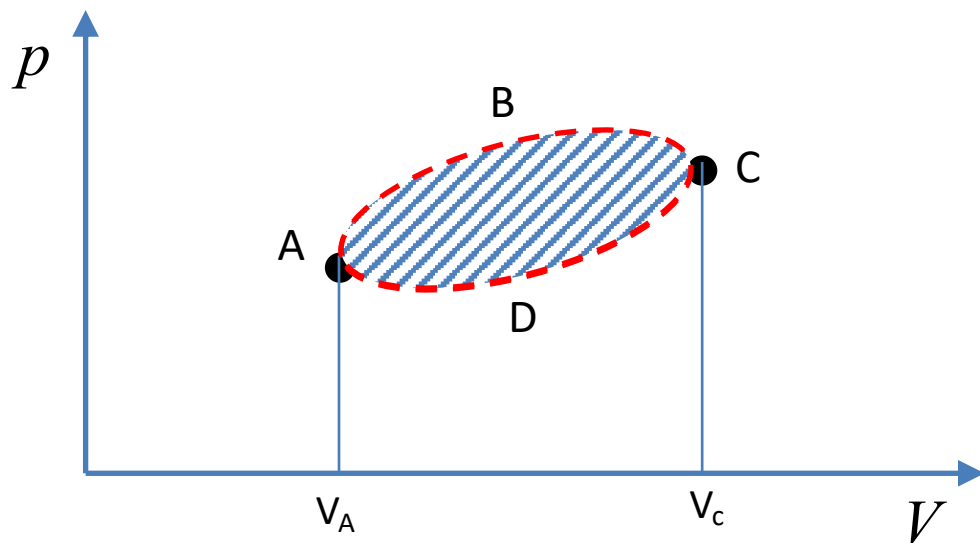
$$L = \int_A^B dL = \int_A^B p dV$$

Nel caso in cui lo stato del sistema può essere rappresentato mediante un diagramma (V, p)

il lavoro in questione ha una semplice rappresentazione geometrica:



Sono di particolare interesse le **trasformazioni cicliche**, cioè quelle **in cui lo stato finale coincide con lo stato iniziale**. Nell'esempio il sistema compie una trasformazione partendo da A e passando per i punti B C D e tornando in A



Si può osservare che il lavoro fatto dal sistema per andare da A a C è l'area sotto la curva ABC, mentre il lavoro fatto per tornare lungo il percorso CDA è l'area sotto questo ramo di curva. **Il lavoro netto risulta dalla differenza delle due aree e corrisponde all'area tratteggiata in figura.** Il lavoro risulta positivo se il ciclo avviene in senso orario, e **negativo** se avviene in senso **antiorario**.