

Termologia e Termodinamica (A)

Corso di Fisica
A.A. 2024-2025



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

1

Sommario

- Introduzione (come nasce la Termodinamica e di cosa si occupa).
- Termodinamica fenomenologica e statistica.
- Definizioni base (sistema termodinamico, stato termodinamico, sistema isolato, sistema chiuso, sistema in equilibrio dinamico, microstato, macrostato).
- Concetto di Temperatura
 - Misura della Temperatura
 - Principio Zero della Termodinamica (Principio dell'equilibrio termico)
 - Punto triplo dell'acqua
 - Misura della temperatura e apparecchi termometrici
 - Effetti della temperatura (dilatazione)
- Energia interna
- Calore
- Calore specifico e Capacità termica
- Lavoro termodinamico



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

2

Sommario

- 1° Principio della termodinamica
- Trasformazioni termodinamiche nei gas perfetti
 - Trasformazioni isoterme
 - Trasformazioni adiabatiche
 - Trasformazioni cicliche
 - Trasformazioni a espansione libera



Nascita della Termodinamica

- Molti fenomeni riguardano le trasformazioni
 - interazione di materia con altra materia,
 - interazione di materia con un campo di forze esterno,
 - interazione di materia con radiazione elettromagnetica, quale la luce, e così via.
- In questo tipo di fenomeni naturali intervengono delle *quantità fisiche* che, a prima vista, appaiono estranee alle leggi della Meccanica.
- Esempi:
 - fenomeni in cui una certa quantità di sostanza viene *riscaldata e raffreddata*,
 - reazioni chimiche,
 - transizioni di fase.
- Perciò nell'800 fu sviluppata una disciplina, la **Termodinamica**, capace di descrivere questi fenomeni attraverso quantità fisiche ad hoc, come il calore, la temperatura, etc.

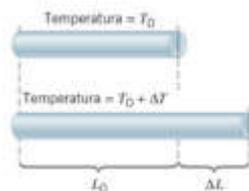
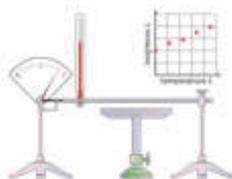
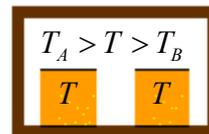
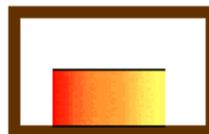
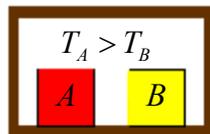


Termodinamica

- A causa dello sviluppo storico, si può presentare la Termodinamica in due modi:
 - **formulazione fenomenologica**, in cui non viene fatto riferimento alle proprietà meccaniche microscopiche delle particelle che costituiscono il sistema,
 - **formulazione statistica**, in cui si parte dalle quantità meccaniche microscopiche e si stabiliscono delle leggi che legano fra di loro i valori medi di tali quantità.



Concetto “intuitivo” di temperatura



$$\frac{L_T - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha(T - T_0)$$



Importanza della scala



Importanza della scala

Risorse idriche terrestri

[modifica | modifica wikitesto]

Lo stesso argomento in dettaglio: [Idrogeologia](#)



Vasca naturale fiume Corna, Basso-⁶²
Piavero

Il volume di acqua presente sulla Terra è stimato in $1\,360\,000\,000\text{ km}^3$, all'incirca un millesimo del volume complessivo del pianeta; di questi:^[97]

- $1\,320\,000\,000\text{ km}^3$ (pari a circa il 97,3% del totale) sono acque marine (in maggioranza oceanico).
- $25\,000\,000\text{ km}^3$ (pari a circa il 2%

del totale) sono nei ghiacciai e nelle calotte polari.

- $13\,000\,000\text{ km}^3$ (pari a circa l'1% del totale) sono nel suolo, nelle falde acquifere.
- $250\,000\text{ km}^3$ (pari a circa lo 0,02% del totale) sono acque dolci nei laghi, nei mari interni^[98] e nei fiumi.
- $13\,000\text{ km}^3$ sono vapore acqueo nell'atmosfera.



Cascata d'acqua ⁶³



Importanza della scala

$$\begin{aligned}
 &1,320,000,000 \text{ km}^3 \\
 &1 \text{ km} = 1000 \text{ m} \\
 &1 \text{ km}^2 = 1000 \times 1000 \text{ m}^2 = 10^6 \text{ m}^2 \\
 &1 \text{ km}^3 = 10^9 \text{ m}^3 \\
 &1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litri} \\
 &H_2O = 1,320,000,000 \times 10^9 \times 1000 = \\
 &= 1.32 \times 10^9 \times 10^9 \times 10^3 = 1.32 \times 10^{21} \text{ l}
 \end{aligned}$$



Importanza della scala

- La mole è il metodo più conveniente per contare grandi numeri di particelle.
 - 1 mole di atomi contiene $6,022 \times 10^{23}$ atomi,
 - 1 mole di molecole contiene $6,022 \times 10^{23}$ molecole,
 - 1 mole di ioni contiene $6,022 \times 10^{23}$ ioni.
- Nel caso di una molecola come l'acqua, data la massa molecolare (H_2O) pari a 18,016, si ottiene che una mole di acqua corrisponde a **18,016 grammi** (quantità in grammi uguale alla massa molecolare).

$$N = 6.02 \times 10^{23} \frac{1}{\text{mole}} \longrightarrow \begin{array}{l} \sim 10^{24} \text{ molecole} \\ N_{\text{molecole}} = 10 \times 6 \times 10^{23} = 6 \cdot 10^{24} \\ \underline{\underline{\quad}} \end{array}$$



Importanza della scala

$$N_{\text{litri}} = 1.32 \times 10^{21} \text{ l}$$

$$N_{\text{bicchieri}} = 7.4 \times 10^{21}$$

$$N_{\text{litri}} = 0.18 \text{ l}$$

$$N_{\text{molecole X}} = 6.02 \times 10^{24}$$



Termodinamica

- **Modello microscopico**
- **Modello macroscopico**

Relazioni tra grandezze macroscopiche e microscopiche che descrivono il gas perfetto		
	Punto di vista macroscopico	Punto di vista microscopico
Grandezze	n, p, V, T, \dots	$N, m, v, K_{\text{medio}}, \dots$
Relazione	$K_{\text{medio}} = \frac{3}{2} k_B T$	
Leggi	Boyle, Gay-Lussac, Avogadro, equazione di stato	principio della dinamica
Modelli	gas perfetto	molecole puntiformi non interagenti, urti elastici

- Mostriamo Termodinamica privilegiando
 - la *formulazione fenomenologica*,
 - ma inserendo qualche elemento della *formulazione statistica* quando questi possono rivelarsi utili alla migliore comprensione.



Alcune definizioni di base

- DEF: **sistema termodinamico** è un sistema macroscopico, chimicamente definito, costituito da un gran numero di atomi o di molecole (es. *una quantità definita di un gas, di un solido o di un liquido*)
- DEF: **stato termodinamico** è l'insieme dei valori assunti dai parametri macroscopici che lo caratterizzano (es. *pressione, volume, entropia, temperatura* etc.).

- *Lo stato di un sistema termodinamico e la sua evoluzione nel tempo non possono essere studiati dal punto di vista microscopico, perché questo richiederebbe la soluzione delle equazioni di moto di tutte le particelle del sistema.*



Alcune definizioni di base

- I sistemi termodinamici sono descritti, dal punto di vista macroscopico, introducendo **grandezze fisiche "ad hoc"**, che lo caratterizzano nel suo insieme.
- parametri termodinamici:
 - temperatura,
 - pressione,
 - volume,
 - stato di aggregazione.
- grandezze termodinamiche ulteriori
 - quantità di calore,
 - energia interna,
 - altre funzioni di stato quali
 - l'entropia,
 - l'energia libera.



Sistema termodinamico

- Il sistema termodinamico si dice *isolato*, se non scambia né materia, né energia con l'intorno.
- Il sistema termodinamico si dice *chiuso*, se esso scambia energia, ma non materia con l'intorno.
- Il sistema termodinamico si dice in *equilibrio*, se tutti i parametri termodinamici che specificano il suo stato non variano nel tempo (*equilibrio dinamico*, non statico) .
- Lo stato di un sistema termodinamico è definito dall'insieme delle proprietà macroscopiche del sistema stesso.



Temperatura



Temperatura

- La **temperatura** è una delle sette grandezze fondamentali del SI.
- In Fisica si misura la temperatura con la scala Kelvin ma ne esistono altre “pratiche”.
- All’origine dell’universo, circa 14 miliardi di anni fa, la temperatura era di circa **10^{39} K**.
- Dopo l’espansione iniziale, esso si è raffreddato e ha ora raggiunto una temperatura media di circa **3 K**.

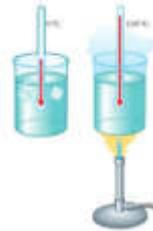


Misura della Temperatura



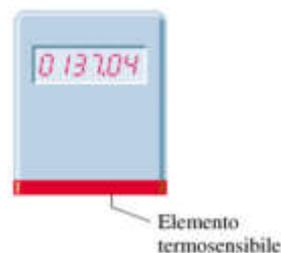
Temperatura

- Trovare un *metodo* ed un *mezzo* preciso per misurare la temperatura non è semplice e può costituire un problema.
- Non avendo dimensioni fisiche e concrete non è possibile misurarla direttamente.
- Mentre la lunghezza di un oggetto qualunque può essere espressa in “*metri*“ e la massa in “*kg*“, la temperatura può essere misurata solo in relazione ai suoi effetti e solo avendo a disposizione una scala concordata (Fahrenheit, Celsius).
- Esempi:
 - *Un utile punto di taratura è il punto di congelamento dell'acqua (0°C e 32 °F)*
 - *Un altro punto affidabile è il punto in cui l'acqua inizia a bollire (100°C e 212°F)*



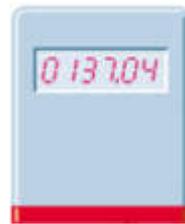
Termoscopio

- Possiamo impiegare la proprietà di molti corpi di cambiare stato a seconda dell'ambiente in cui si trovano (prossimità di una fonte di calore – stufa –, frigorifero, etc.)
- Esempi:
 - *allungamento*
 - *dilatazione*
 - *aumento di volume*
 - *lamina bimetallica*
 - *etc.*
- Avremo così un **Termoscopio**



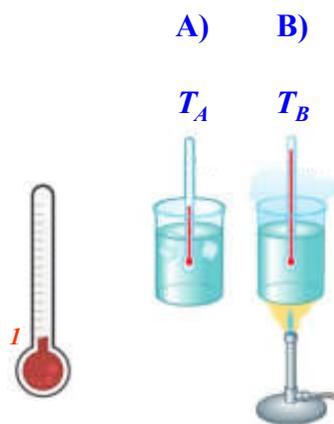
Misura della temperatura

- Per impiegare il Termoscopio come misuratore della temperatura dobbiamo assicurarci che quanto letto sulla scala indichi una misura fisica (sia legata senza ambiguità al fenomeno che misuriamo) ed inoltre essa deve risultare attendibile e ripetitiva (dotata, cioè di *risoluzione*, *precisione e accuratezza*).
- Dobbiamo, quindi, tarare lo strumento.



Creazione di una scala di misura

- Usiamo la dilatazione del mercurio.
- Prendiamo un sistema *A* a temperatura T_A .
 - Esempio: *ghiaccio in fusione nell'acqua* (condizione di equilibrio fra la *fase solida* e la *fase liquida* dell'acqua).
 - In queste condizioni la temperatura è fissata (anche se non possiamo ancora dire che valore abbia).
 - Lo strumento si porrà in equilibrio.
- Fissiamo l'altezza del termometro ad un valore $T_A = I$.

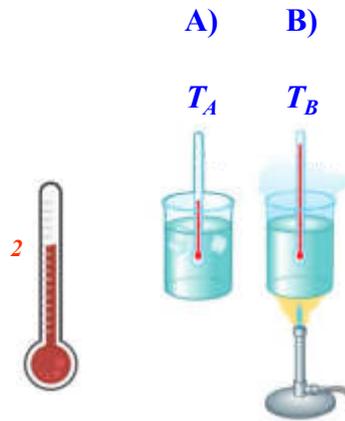


- *Ipotizziamo che il bulbo dello strumento di misura non perturbi lo stato termodinamico del sistema da misurare*



Creazione di una scala di misura

- Usiamo la dilatazione del mercurio.
- Prendiamo un sistema **B** a temperatura T_B .
 - Esempio: acqua in ebollizione (condizione di equilibrio fra la fase liquida e la fase gassosa -vapor acqueo- dell'acqua).
 - Anche in queste condizioni la temperatura è fissata (anche se non possiamo ancora dire che valore abbia).
 - Lo strumento si porrà in equilibrio.
- Fissiamo l'altezza del termometro ad un valore $T_B=2$.

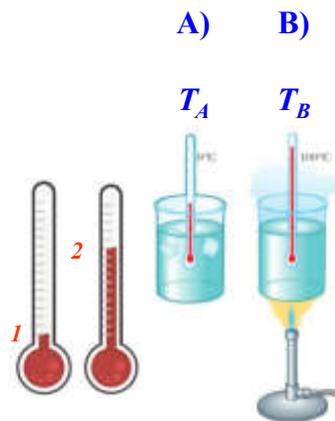


- *Ipotizziamo che il bulbo dello strumento di misura non perturbi lo stato termodinamico del sistema da misurare*



Creazione di una scala di misura

- Possiamo suddividere l'estensione tra "1" e "2" in 100 spazi e, supponendo la linearità della dilatazione del mercurio, avremo un sistema di misurazione.
- *Poniamo*
 - "1" assegnato a 0°C
 - "2" assegnato a 100°C
- Questa è la scala Celsius

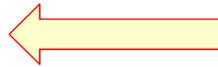


- *Ipotizziamo che il bulbo dello strumento di misura non perturbi lo stato termodinamico del sistema da misurare*



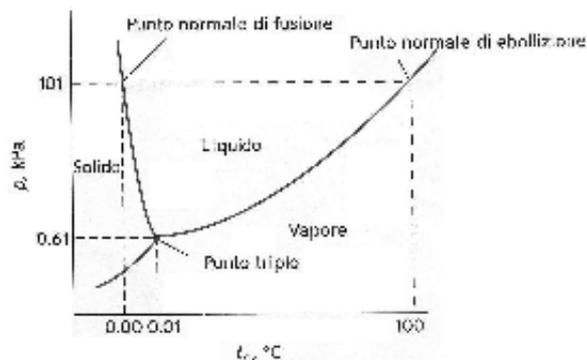
Punto triplo dell'acqua

- Definizione di una scala di temperatura:
 - scelta di fenomeni termici riproducibili,
 - attribuzione arbitraria di una determinata temperatura nella scala Kelvin ai suddetti eventi termici.
- Possibilità:
 - *punto di congelamento dell'acqua,*
 - *punto di ebollizione dell'acqua,*
 - *punto triplo dell'acqua.*
- Scegliamo quest'ultimo.



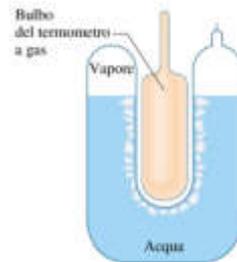
Punto triplo dell'acqua

- Una porzione del diagramma delle fasi per l'acqua (le scale orizzontali e verticali non sono lineari). Al punto triplo dell'acqua le tre fasi solida, liquida e di vapore (aeriforme) sono in equilibrio



Punto triplo dell'acqua

- L'*acqua liquida*, il *ghiaccio solido* e il *vapor acqueo* possono coesistere, in equilibrio termico, ad un solo valore di pressione e di temperatura.
- Al punto triplo dell'acqua è stato attribuito il valore di **273,16 K**, ed è indicato come punto fisso standard della temperatura per la taratura dei termometri.



$T_3 = 273,16 \text{ K (+0.01}^\circ\text{C)}$
(temperatura del punto triplo dell'acqua)

$$1 \text{ K} = \frac{1}{273.16} (T_3 - \text{zero assoluto})$$



Principio Zero della Termodinamica



Principio Zero della Termodinamica

- La definizione operativa (basata su esperienze sperimentali) richiede il contatto tra “strumento” e “sistema termodinamico”.



- Come fare se ciò non è possibile?
 - Come confrontare la temperatura di due sistemi distanti A e B?



- Abbiamo bisogno, quindi, di un principio operativo:

Principio Zero della Termodinamica



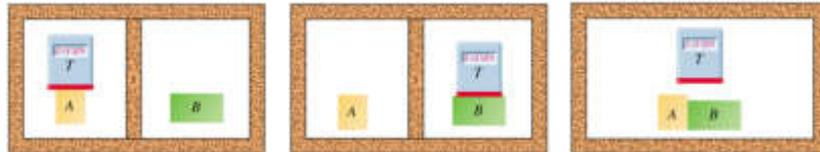
Principio Zero della Termodinamica

- Quando tutte le proprietà misurabili del corpo (Termoscopio) e del corpo A, oppure B, assumono un valore stabile, affermiamo allora che i due corpi si trovano in **equilibrio termico**.



Principio Zero della Termodinamica

- *Se*
 - T ed A sono all'equilibrio termico
 - T e B sono all'equilibrio termico



- *allora*
 - A e B sono all'equilibrio termico ed hanno pari temperatura



Principio zero della Termodinamica

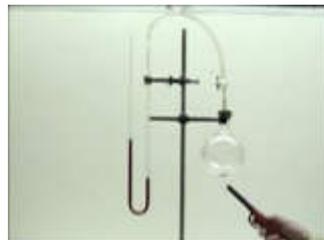
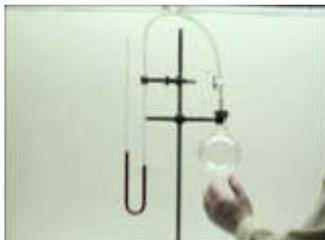
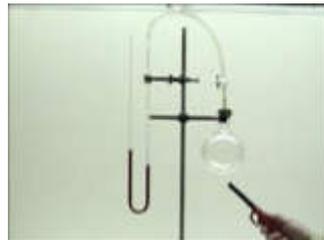
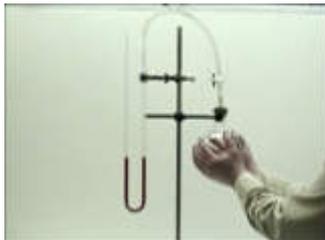
- Possiamo riassumere il **Principio Zero della Termodinamica** come:
- *Se due corpi A e B si trovano in equilibrio termico con un terzo corpo T, allora essi sono in reciproco equilibrio termico.*
- Con significato:
- *“Qualsiasi corpo possiede una proprietà chiamata **temperatura**. Quando due corpi si trovano in equilibrio termico, le loro temperature sono uguali“.*



Termometro a gas



Termometro a gas (a volume costante)



Termometro a gas (a volume costante)

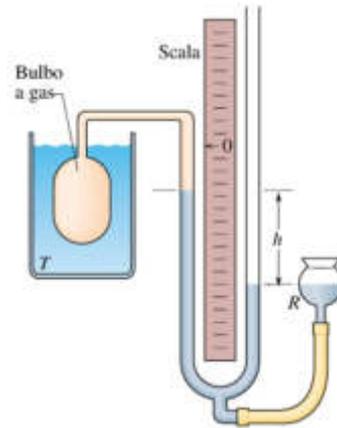
- La temperatura di qualsiasi corpo a contatto termico con il bulbo è definita come:

$$T = Cp$$

- p : è la pressione esercitata dal gas

$$p = p_0 - \rho gh$$

- p_0 : pressione atmosferica,
- ρ : massa volumica del mercurio
- h : differenza di livello nei due bracci del tubo capillare.
- C : costante di proporzionalità



Taratura al punto triplo

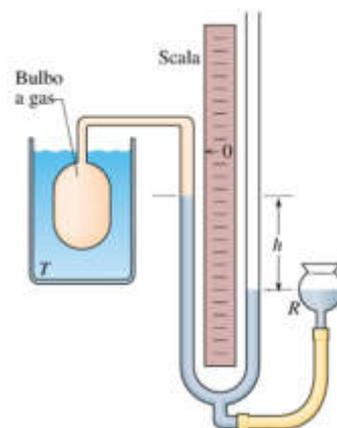
- Per tarare il termometro, immergiamo il bulbo nella cella a punto triplo dell'acqua ed aspettiamo che giungano all'equilibrio termico:

$$T_3 = Cp_3$$

$$T = Cp$$

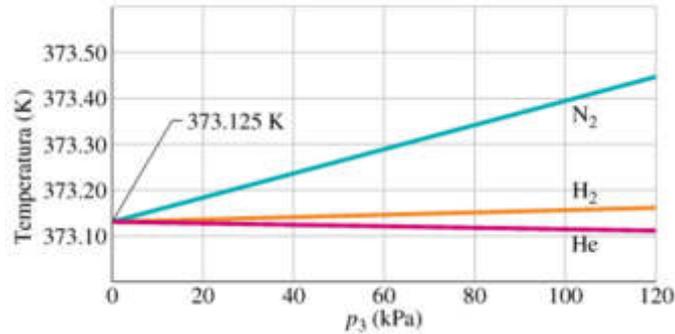
$$T = T_3 \left(\frac{p}{p_3} \right) = (273.16 \text{ K}) \left(\frac{p}{p_3} \right)$$

dipende dal gas e dalla sua quantità nel bulbo



Taratura al punto triplo

- Il funzionamento dello strumento dipende dal tipo di gas.
- Se utilizziamo gas differenti e, contemporaneamente, quantità di gas sempre più piccole nel bulbo, si nota “sperimentalmente“ le letture convergono a una singola temperatura.



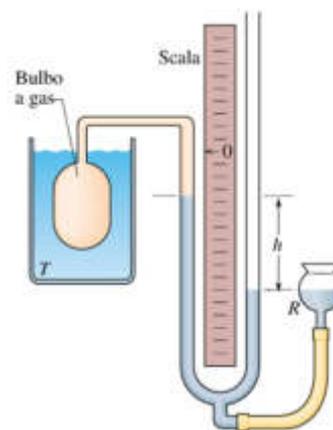
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

56

Taratura al punto triplo

- Il funzionamento dello strumento dipende dal tipo di gas.
- Se utilizziamo gas differenti e, contemporaneamente, quantità di gas sempre più piccole nel bulbo, le letture convergono a una singola temperatura.
- Quindi

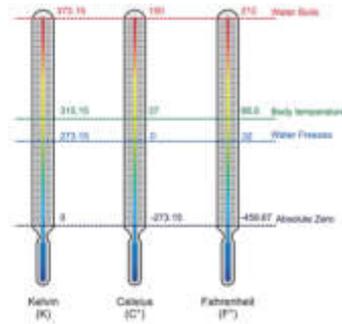
$$T = (273.16 \text{ K}) \left(\lim_{p_3 \rightarrow 0} \frac{p}{p_3} \right)$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

57

Scale Celsius e Fahrenheit



$$64^{\circ}\text{F} = 18^{\circ}\text{C}$$

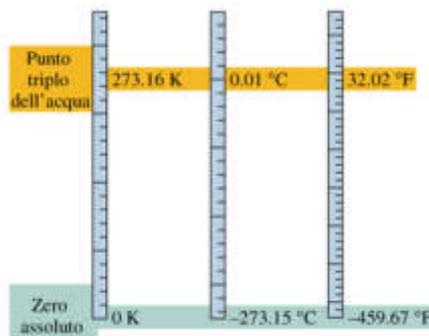
$$97^{\circ}\text{F} = 36^{\circ}\text{C}$$



Scale Celsius e Fahrenheit

$$T_C = T - 273.16 \text{ K}$$

$$T_F = \frac{9}{5} T + 32^{\circ}$$



Alcuni valori corrispondenti di temperatura

Temperatura	°C	°F
Punto di ebollizione dell'acqua ^a	100	212
Temperatura corporea normale	37.0	98.6
Temperatura ambiente ottimale	20	68
Punto di congelamento dell'acqua ^a	0	32
Zero per la scala Fahrenheit	≈ -18	0
Coincidenza delle due scale	-40	-40

^a Per essere precisi, il punto di ebollizione dell'acqua nella scala Celsius è pari a 99.975 °C e il punto di congelamento è 0.00 °C. Quindi vi è una differenza lievemente inferiore ai 100 gradi Celsius tra i due punti.



Misuratori di temperatura



Termometro clinico

- Tre diversi tipi di termometro clinico, uno digitale e due a mercurio, graduati secondo la scala di temperatura Fahrenheit.
- La divisione in gradi appare più fitta che sui termometri in gradi Celsius: fra i gradi delle due scale, infatti, esiste un rapporto di 180 a 100.
- La temperatura $95,4\text{ }^{\circ}\text{F}$ mostrata dal termometro digitale è pari a $35,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre la scala dei termometri a mercurio copre da $35,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (corrispondente a $96\text{ }^{\circ}\text{F}$) a $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($106\text{ }^{\circ}\text{F}$).



Termometri industriali

- Strumenti realizzati per l'industria alimentare, conserviera, farmaceutica, chimica, petrolchimica, centrali convenzionali e nucleari, adatti a resistere alle condizioni di esercizio più sfavorevoli determinate dall'aggressività del fluido di processo e dell'ambiente.
- Il sistema consiste in un bulbo termometrico, un capillare di trasmissione e una molla bourdon a spirale contenuta nella cassa dello strumento. Questo sistema vien pressurizzato con gas inerte. Le variazioni di temperatura causano un variazione di pressione all'interno del sistema che viene rilevato dalla molla spirale sottoforma di spostamento trasmessa attraverso il movimento all'indice. Le variazioni della temperatura ambiente che possono influire sulla precisione sono compensate per mezzo di un tirante bimetallico posto all'interno della cassa.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

67

Pericolosità del mercurio nell'ambiente



COOL OK HOT



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

71

Termometro a Galistan

Termometro a Galistan

Questa tipologia è il "sostituto ufficiale" del termometro a mercurio. Molto simile nell'aspetto e anche nel funzionamento, assicura una misurazione precisa, ma richiede più tempo dei termometri precedentemente descritti (circa 5 minuti).

Al suo interno, al posto del bandito mercurio, ci sono Gallio, Indio e Stagno, che creano un composto fluido termosensibile.



Pericolosità del mercurio nell'ambiente

TERMOMETRI CLINITEMP PER ANESTESIA



Sono termometri a cristalli liquidi di ridotte dimensioni dove la barretta colorata scema mostrando la temperatura. Sono leggermente autoadesivi e si posizionano sulla fronte del paziente. Calibrati per la temperatura interna. Non c'è presenza di lattice. Facili e pratici da usare anche come monouso.

Scala di temperatura: 29-41°C con gradini di 0,5°C
Precisione: 0,3°C
Confermi alla ISO 13485 2003E
CE 0434

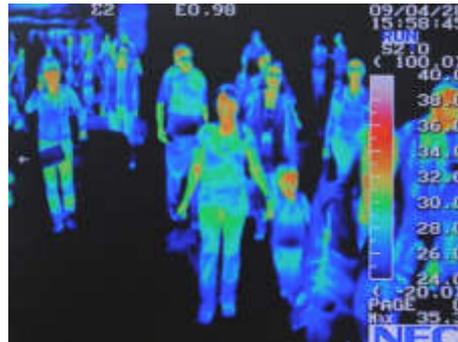
Applicazioni:



- Anestesia e sorveglianza post anestesiológica
- Controllo Ipotermia e Ipertermia
- Controllo della temperatura durante il trasporto del malato
- Squadre di emergenza esterne



Termometro agli infrarossi



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

75

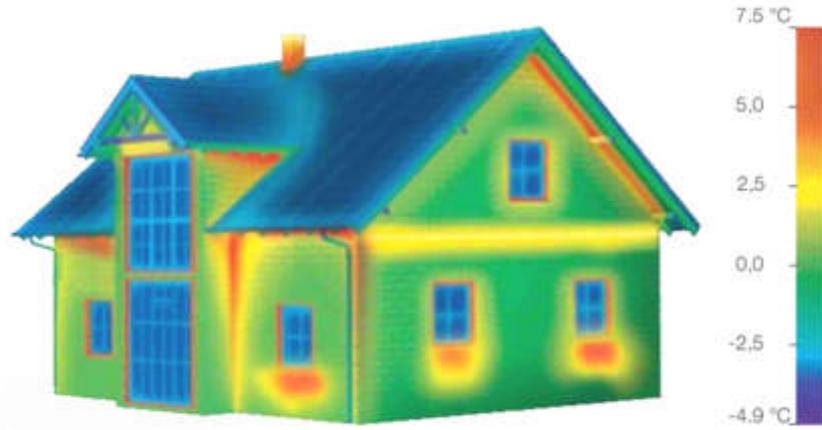
Termografia



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

76

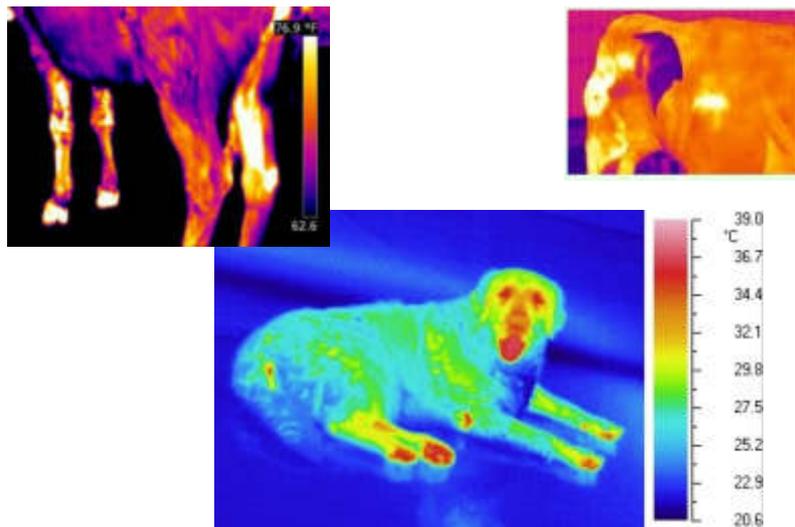
Termografia



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

77

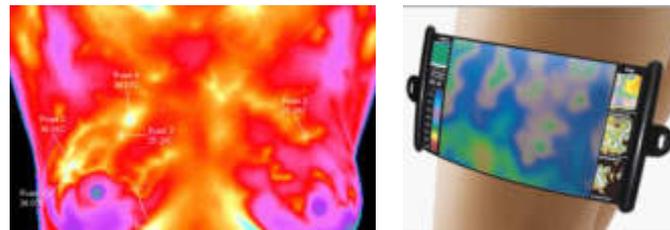
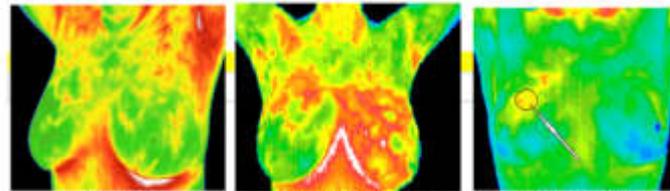
Termografia



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

78

Termografia



Variazione delle dimensioni con la temperatura



Dilatazione termica



Dilatazione termica

- Se la temperatura di una barra metallica di lunghezza l_0 viene elevata di una temperatura ΔT , la sua lunghezza risulta aumentare di una quantità

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$$

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

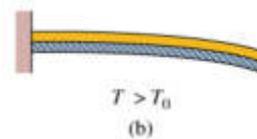
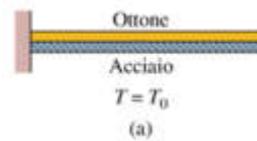
- α : **coefficiente di dilatazione lineare.**

Alcuni valori del coefficiente di dilatazione lineare*

Sostanza	$\alpha (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	Sostanza	$\alpha (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
Ghiaccio (a 0 °C)	51	Acciaio	11
Piombo	29	Vetro (ordinario)	9
Alluminio	23	Vetro (Pyrex)	3,2
Ottone	19	Diamante	1,2
Rame	17	Invar [†]	0,7
Calcio	12	Quarzo fuso	0,5

* Valori determinati a temperatura ambiente eccetto quello relativo al ghiaccio.

[†] Questa lega è stata studiata per ottenere un metallo a basso coefficiente di dilatazione lineare. Il suo nome è un'abbreviazione di «invariable».



Principio di funzionamento di un termostato a lamina bimetallica



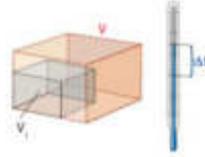
Dilatazione termica volumetrica

- Se si incrementa di una quantità ΔT la temperatura di un solido o di un liquido di volume dato V , l'incremento di volume che si ottiene è

$$\Delta V = V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$V = V_0(1 + \beta \Delta T)$$

- β : **coefficiente di dilatazione volumica**



Sfera di Gravesande



Esempio

- Una sottile piastrina di rame (coeff. di dilatazione del rame $17 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) avente un diametro di $10,0 \text{ cm}$ si trova ad una temperatura di 30°C . Calcoliamo a quale temperatura bisogna raffreddarla per poterla infilare perfettamente in un tubo di diametro costante pari a $9,996 \text{ cm}$.

Per trovare la temperatura necessaria T_x applichiamo la legge di dilatazione lineare

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$$

$$l_x - l_0 = l_0 \alpha \Delta T$$

$$9,996 - 10 = 10 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 30)$$

$$T - 30 = -\frac{4 \cdot 10^{-3}}{17 \cdot 10^{-5}} \text{ }^\circ\text{C} = -23,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

da cui

$$T_x = (30 - 23,5) \text{ }^\circ\text{C} = 6,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Materiale	Coefficiente di dilatazione lineare $1/^\circ\text{C}$
alluminio	$24 \cdot 10^{-6}$
acciaio	$12 \cdot 10^{-6}$
oro	$17 \cdot 10^{-6}$
piombo	$29 \cdot 10^{-6}$
stagno	$22 \cdot 10^{-6}$
stagno	$22 \cdot 10^{-6}$
stato	$20 \cdot 10^{-6}$



Possiamo usare le lunghezze in cm, poiché $\Delta l/l_0$ è adimensionale



Dilatazione nei liquidi



Dilatazione nei liquidi

- Anche i **liquidi**, a seguito di un ΔT , si dilatano con la stessa legge di dilatazione volumetrica dei solidi.
- Essi, però, sono caratterizzati da coefficienti di dilatazione volumetrica maggiori di quelli dei solidi e quindi, a parità di variazioni di temperatura, da una maggiore dilatazione.

Tabella 1. Coefficienti di dilatazione lineare medi tra 0 °C e 100 °C di alcuni solidi.

Sostanza	α (°C ⁻¹)
ferro	12 · 10 ⁻⁶
cromo	17 · 10 ⁻⁶
platino	9 · 10 ⁻⁶
zinc	31 · 10 ⁻⁶
alluminio	24 · 10 ⁻⁶
bronzo	18 · 10 ⁻⁶
acciaio dolce	9 · 10 ⁻⁶
argento	19 · 10 ⁻⁶
oro	14 · 10 ⁻⁶
piombo	30 · 10 ⁻⁶
coltello	12 · 10 ⁻⁶
antimonio	11 · 10 ⁻⁶
nickel	13 · 10 ⁻⁶
solfanico (lungitero)	9 · 10 ⁻⁶
costante	15 · 10 ⁻⁶
invar	2 · 10 ⁻⁶

Tabella 2. Coefficienti di dilatazione cubica di alcuni liquidi.

Liquidi	β (°C ⁻¹)
alcol etilico	11 · 10 ⁻⁴
mercuro	1,8 · 10 ⁻⁴
etere	1,6 · 10 ⁻⁴
glicerolo	5 · 10 ⁻⁴
petrolio	9,2 · 10 ⁻⁴
acetone	14,3 · 10 ⁻⁴
temperatura	9,6 · 10 ⁻⁴
acido acetico	10,7 · 10 ⁻⁴
carbonte	11,9 · 10 ⁻⁴
benzolo	12,1 · 10 ⁻⁴

- Ciò dipende dal fatto che le forze di coesione molecolari dei liquidi sono più deboli di quelle dei solidi.



Esempio

- Un'autocisterna viene riempita con 40'500 l di benzina durante la notte, quando la temperatura è di 8 °C. Durante il viaggio di giorno, il sole scalda la benzina a 26 °C. Di quanto aumenta il volume della benzina?

- ($\beta = 1.0 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)



SISTEMA DI DILATAZIONE VOLUMICA	
Materiali	α (% / $^\circ\text{C}$)
Alumino	$2,4 \times 10^{-5}$
Acciaio	$1,12 \times 10^{-5}$
Benzina	$1,0 \times 10^{-3}$
Olio	$7,2 \times 10^{-4}$
Glicerina	$5,3 \times 10^{-4}$
Mercurio	$1,8 \times 10^{-4}$

- Quindi:

$$V = V_0 \cdot [1 + \beta(T - T_0)] = 40.50 \text{ m}^3 [1 + (1.0 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \cdot 18 \text{ } ^\circ\text{C}] = 40.50 \text{ m}^3 (1 + 0.018) = 40.50 \text{ m}^3 \cdot 1.018 = 41.23 \text{ m}^3$$

- L'aumento in volume è

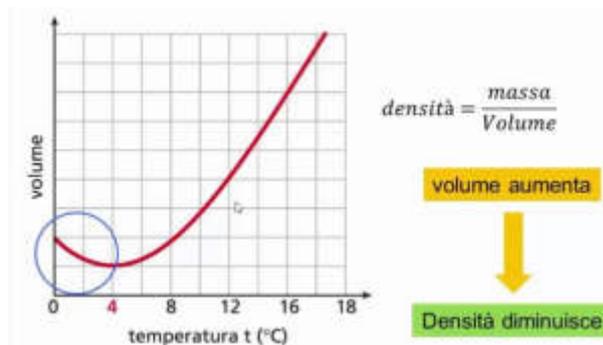
$$\Delta V = V - V_0 = 41.23 - 40.50 = 0.73 \text{ m}^3 \quad \text{corrispondente a 730 litri}$$

- L'aumento percentuale $\Delta V/V_0$ è di quasi il 2% il che comporta che la cisterna non debba essere riempita completamente prima del viaggio.



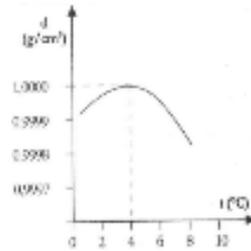
Il caso dell'acqua

- Mentre la quasi totalità dei corpi si dilatano all'aumentare della temperatura, l'acqua non segue questo normale comportamento.
- Quando la temperatura aumenta da 0°C a 4°C, il volume dell'acqua diminuisce, per poi aumentare come gli altri liquidi.



Il caso dell'acqua

- Poiché a 4 °C il volume di una certa quantità di acqua raggiunge il suo valore minimo, la sua densità, definita dal rapporto tra la massa e il volume, raggiunge a questa temperatura il suo valore massimo, corrispondente a $1,000 \text{ g/cm}^3$ (1000 kg/m^3).
- Proprio per questo motivo il ghiaccio (stato solido dell'acqua a 0 °C), essendo più leggero, galleggia sull'acqua.
- Così facendo, tra l'altro, protegge gli strati inferiori, che possono rimanere liquidi. L'insolito comportamento del liquido più diffuso sulla Terra, pur essendo caratterizzato da una deviazione piuttosto piccola, ha così una importante conseguenza in natura. Si deve, infatti, a questa anomalia se, nella stagione invernale, in certe regioni particolarmente fredde, l'acqua del mare, dei laghi e dei fiumi gela solo in superficie permettendo così la vita sul fondo.



Variazione della densità dell'acqua con la temperatura



Energia interna



Concetto di energia interna

- Se consideriamo un sistema termodinamico in equilibrio, ogni atomo (o molecola) che costituisce il sistema è dotato di una certa energia cinetica dovuta al cosiddetto *moto di agitazione termica*.
- Moto traslazionale
 - nei gas e nei liquidi
 - gli urti tra atomi e molecole provocano delle continue variazioni nella loro direzione di moto.
 - nei solidi
 - i moti di agitazione termica consistono, invece, in vibrazioni delle particelle intorno alle loro posizioni di equilibrio.
- Interazione tra le molecole
 - Le particelle, se libere di muoversi, interagiscono tra di loro (e con quelle del contenitore) con forze di vario tipo e natura.
 - Esse posseggono, pertanto, anche un'energia potenziale, detta *energia di legame*, che corrisponde al lavoro necessario a separarle completamente.



Concetto di Energia Interna

- L'energia interna del sistema è la somma di differenti tipi di energie:
- **Moto di agitazione termica** $\rightarrow K_{\text{particella}}$
 - *moti traslazionali* 
 - *moti rotazionali* 
 - *moti vibrazionali* 
- **Energia di legame e potenziale** $\rightarrow U_{\text{particella}}$
 - legami chimici
 - interazione elettroni-nucleo
 - etc. 
- È, quindi, utile, per una descrizione dei sistemi termodinamici da un punto di vista macroscopico, il concetto di *energia interna*.
- L'energia è definita come la somma delle energie cinetiche e potenziali medie dei singoli costituenti.

$$U = \sum_{i=1}^{N_{\text{particelle}}} (K_i + U_i)$$



Concetto di Energia Interna

- L'energia interna dipende dal valore dei parametri termodinamici:
 - volume,
 - temperatura,
 - pressione,
 - stato di aggregazione.
- Con gli stessi valori dei parametri termodinamici, sistemi aventi composizione diversa (per esempio corpi dalla composizione chimica diversa) hanno in generale una differente energia interna a causa della diversa energia di legame.
- Pertanto, data una certa quantità di una sostanza, la sua energia interna è definita univocamente quando viene definito il macrostato del sistema.

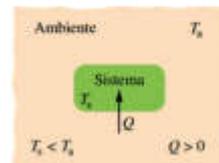
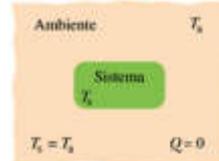
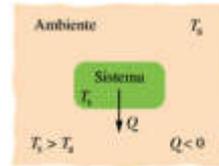


Calore



Temperatura e calore

- Un cambiamento di temperatura è dovuto al trasferimento di un tipo di energia tra il sistema e il suo ambiente.
- Questa energia è un' **energia interna (energia termica)**, cioè l'insieme delle energie cinetiche e potenziali associate ai moti casuali degli atomi, delle molecole e degli altri corpi microscopici all'interno di un oggetto.
- L'energia interna, quando viene trasferita, è chiamata **calore** e assume il simbolo Q .

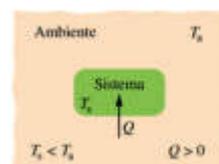
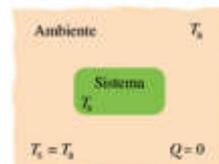
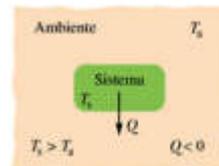


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

108

Temperatura e calore

- Il calore è considerato
 - **calore negativo** quando viene trasferita energia da un sistema al suo ambiente (diciamo che quel calore viene *ceduto* o *perso* dal sistema).
 - **calore positivo** quando viene trasferita energia dall'ambiente al sistema (diciamo che quel calore viene *assorbito* dal sistema);

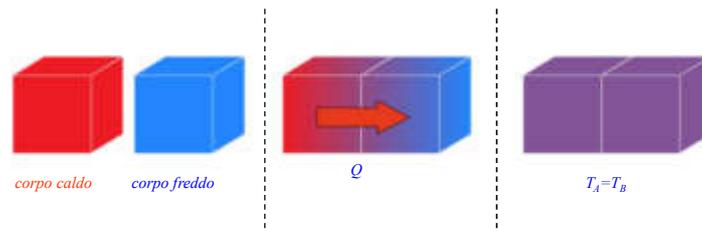


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

109

Equilibrio termico

- Consideriamo due corpi che si trovino inizialmente a temperatura diversa. Se i due corpi sono posti a contatto e sono isolati dall'ambiente esterno, essi raggiungono dopo un certo tempo una nuova condizione di equilibrio in cui la temperatura dei due corpi è la stessa.



- In questo processo c'è stato un passaggio di energia interna dal corpo caldo al corpo freddo.



Temperatura e calore

- Poiché il travaso di energia è avvenuto senza la necessità di compiere lavoro meccanico sul sistema, si dice che del *calore* è *passato spontaneamente* dal corpo caldo a quello freddo.

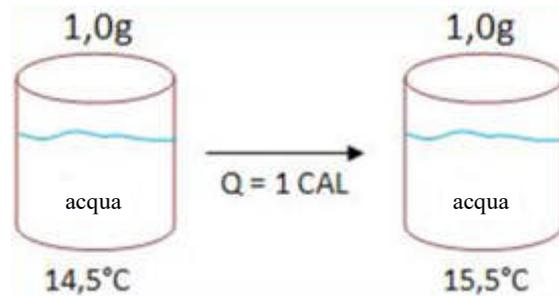


- Pertanto per *calore* si deve intendere quantità di calore ceduta o assorbita da un sistema termodinamico.
- *DEF: Il calore è l'energia che viene trasferita tra un sistema e l'ambiente circostante a causa della differenza di temperatura esistente tra di essi.*



Concetto di Caloria

- DEF: **caloria** (cal): una caloria è la quantità di calore che, quando viene assorbita da un grammo d'acqua a 14,5°C, produce un aumento di temperatura pari ad un grado.

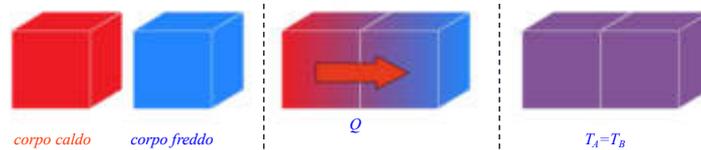


Equivalente meccanico della caloria

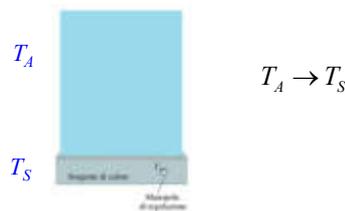


Equivalente meccanico della caloria

- Il mettere a contatto due corpi per raggiungere l'equilibrio **termico**

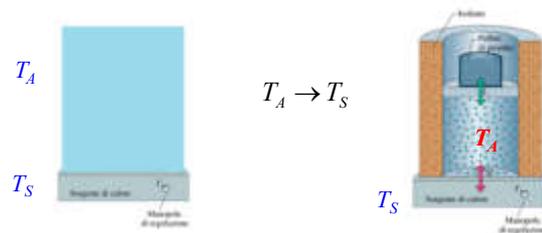


- Equivale a mettere a contatto un fluido, a temperatura T_A , ad esempio, con una sorgente di calore a temperatura fissa T_S .

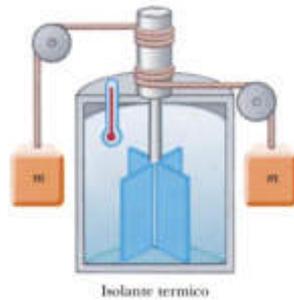


Equivalente meccanico della caloria

- Sulla stessa sorgente di calore potrei mettere un cilindro adiabatico con del gas sovrastato da un pistone, libero di muoversi.
- Una variazione della quota del pistone, dovuta all'espansione del sistema gas, significa che è stato compiuto del lavoro meccanico.



Esperienza di James Prescott Joule



Equivalente meccanico della caloria

- Sperimentalmente si misura:

$$\frac{L}{Q} = j \quad (j = 4.18 \text{ J/caloria})$$

↑
equivalente meccanico della caloria.

- Se, invece, si misura il calore in Joule, basta scrivere

$$Q = L$$

- Oppure, equivalentemente

$$\Delta Q = \Delta L$$



Capacità termica e calore specifico



Calore

- Per riscaldare un corpo bisogna fornirgli energia tramite:
 - un flusso di **calore** (da un corpo più caldo)
 - il **lavoro** (compiuto da una forza).
- *Calore e lavoro* sono, quindi, forme di energia che possono essere trasferite.

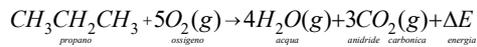


- Dopo essere stata trasferite (tramite calore o lavoro) tale energia diviene **energia interna** del sistema.



Calore

- l'assorbimento delle stessa quantità di energia non provoca lo stesso aumento di temperatura ΔT in tutti i corpi.
- *Ad esempio, il calore prodotto da un accendino a propano rende incandescente uno spillo di metallo, ma farebbe aumentare di pochissimo la temperatura di 1 kg di acqua.*



Capacità termica

- Definiamo la **capacità termica C** di un corpo come il rapporto tra la quantità di energia ΔE (*variazione da energia iniziale ad energia finale*) che un corpo assorbe e il corrispondente aumento di temperatura ΔT

$$\text{capacità termica [J/K]} \quad C = \frac{\Delta E}{\Delta T}$$

energia assorbita [J]

aumento di temperatura [K]

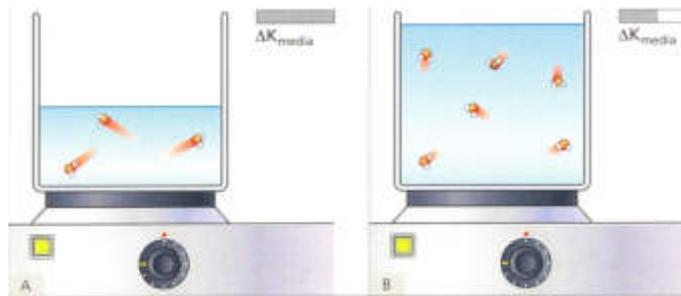
- Se l'energia è fornita sotto forma di calore:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{Q}{T_f - T_i}$$



Perché dipende dalla massa?

- Consideriamo 2 pentole con 1 kg e 2 kg d'acqua.
- La massa m è proporzionale al numero di molecole.
- Scaldiamo entrambe per lo stesso Δt (es. 10 minuti).
- Le molecole della pentola A acquistano il doppio dell'energia cinetica delle molecole della pentola B.



$$Q \propto m$$

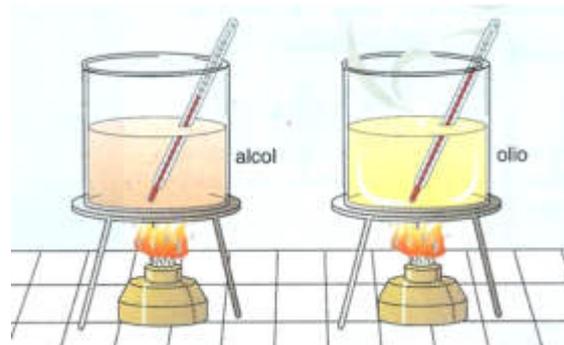


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

133

Perché dipende dalla sostanza?

- Consideriamo 2 pentole con 1 kg d'alcol e d'olio.
- Scaldiamo entrambe per lo stesso Δt (es. 10 minuti).
- La temperatura raggiunta dall'alcol è minore di quella raggiunta dall'olio. La stessa quantità di calore non ha prodotto uno stesso aumento di temperatura nelle due sostanze.



$$Q = c_{sp}$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

134

Calore specifico

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

- La capacità termica dipende dalla massa, è necessario introdurre la *capacità specifica*:

$$\text{capacità termica [J/K]} \quad C = c_{sp} m$$

\downarrow calore specifico [J/kg K] \uparrow massa [kg]

- da cui

$$\text{calore scambiato [J]} \quad Q = c_{sp} m \Delta T$$

\downarrow calore specifico [J/kg K] \downarrow massa [kg] \uparrow variazione di temperatura [K]



Calore specifico

CALORE SPECIFICO A TEMPERATURA AMBIENTE (T = 293 K) E A PRESSIONE ATMOSFERICA

Sostanza	Calore specifico J/(kg · K)
Acqua	4186
Alluminio	880
Anidride carbonica (273 K)	820
Argento	240
Aria (273 K)	1005
Carbonio	850
Elio (273 K)	5100
Ferro	460
Idrogeno (273 K)	14 300
Mercurio	138
Oro	129
Ossigeno (273 K)	291
Ottone	380
Rame	387
Vapore d'acqua (273 K)	2000
Vetro (in media)	800

$$Q = c_{sp} m \Delta T$$



- Il calore specifico dell'*acqua* è molto elevato: occorre cioè molta energia per ottenere piccoli incrementi di temperatura.
- Il calore specifico del *rame*, invece, è piuttosto piccolo, per cui modeste quantità di energia provocano grandi aumenti di temperatura.



Calore specifico: tabella

Calori specifici per alcune sostanze a temperatura ambiente

Sostanza	Calore specifico		Calore specifico molare
	cal/(g · K)	J/(kg · K)	J/(mol · K)
<i>Solidi elementari</i>			
Piombo	0.0305	128	26.5
Tungsteno	0.0321	134	24.8
Argento	0.0564	236	25.5
Rame	0.0923	386	24.5
Alluminio	0.215	900	24.4
<i>Altri solidi</i>			
Ottone	0.092	380	
Granito	0.19	790	
Vetro	0.20	840	
Ghiaccio (−10 °C)	0.530	2220	
<i>Liquidi</i>			
Mercurio	0.033	140	
Alcol etilico	0.58	2430	
Acqua di mare	0.93	3900	
Acqua	1.00	4190	

1 cal = 4.184 J



Definizione alternativa

- DEF:
 - Il **calore specifico** può essere definito come quella quantità di calore che bisogna somministrare a un grammo della sostanza per innalzarne la temperatura di un grado.
- DEF:
 - La **capacità termica** può essere definita come la quantità di calore che bisogna somministrare al corpo intero per innalzarne la temperatura di un grado: essa è quindi uguale al prodotto del calore specifico per la massa.

$$\text{capacità termica [J/K]} \quad C = c_{sp} m$$

\downarrow calore specifico [J/kg K]
 \uparrow massa [kg]



Lavoro termodinamico



Trasformazione termodinamica

- Quando un sistema termodinamico subisce una trasformazione, le forze interne al sistema possono compiere *in generale* lavoro meccanico.
- Tuttavia, poiché il sistema termodinamico viene descritto da un punto di vista *macroscopico*, il lavoro meccanico compiuto all'interno del sistema non interviene esplicitamente nella descrizione della trasformazione.
- Il sistema può però compiere un lavoro meccanico globale esterno.

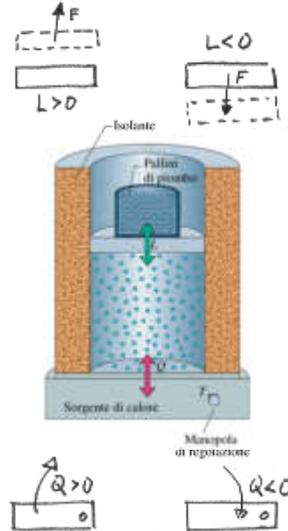


Trasformazione termodinamica

- Sistema:
 - Gas con pistone flottante
 - Scatola adiabatica
 - Sorgente di calore regolabile
- Stati:
 - Stato iniziale (p_i, V_i, T_i)
 - Stato finale (p_f, V_f, T_f)
- Trasformazione termodinamica:
 - Spostamenti lenti (equilibrio termodinamico):
 - Spostamenti ds piccoli ($F=cost$)

$$dL = \vec{F} \cdot d\vec{s} = (pA)(ds) = p(Ad s) = pdV$$

$$L = \int_{V_i}^{V_f} dL = \int_{V_i}^{V_f} pdV$$



Trasformazione termodinamica

- Durante la trasformazione termodinamica, il *volume*, la *pressione* e la *temperatura* del gas possono cambiare.
- Il calcolo dell'integrale:

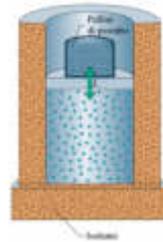
$$L = \int_{V_i}^{V_f} pdV$$

- richiede la conoscenza di come varia la *pressione* in funzione della variazione di *volume* nella transizione dallo stato iniziale a quello finale (dallo stato «i» allo stato «f»).
- Studiamo alcuni modi nei quali ciò avviene.



Trasformazione termodinamica: $p=cost$

- Consideriamo una situazione iniziale a volume V_i
- Consideriamo delle variazioni *estremamente lente* del sistema, *senza dissipazione*, in modo tale che tutto il sistema segua un processo reversibile e dunque, istante per istante, le variabili termodinamiche siano ben definite
- Ipotizziamo che $p=cost$
- Supponiamo di alzare il pistone di dh

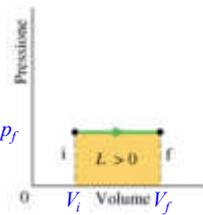


$$L = \int_{h_i}^{h_f} dL = \int_{h_i}^{h_f} F_h dh = \int_{h_i}^{h_f} pS dh = pS \int_{h_i}^{h_f} dh$$

$$L = pS \Delta h = p \Delta V = p_i (V_f - V_i)$$

$$dL = p dV$$

Area del rettangolo \rightarrow



- Se $V_f > V_i \rightarrow L > 0$
- Se avessi abbassato il pistone, $L < 0$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

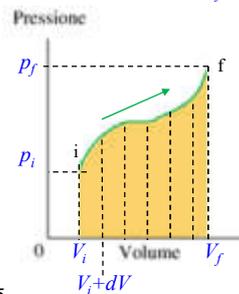
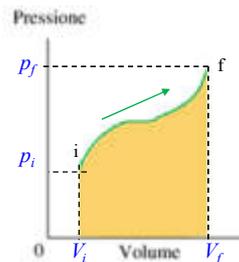
153

Trasformazione termodinamica: $p \neq cost$

- In generale, la pressione del mio sistema non sarà costante, ma varierà.

$$L = \int_{V_i}^{V_f} dL = \int_{V_i}^{V_f} p(V) dV > 0$$

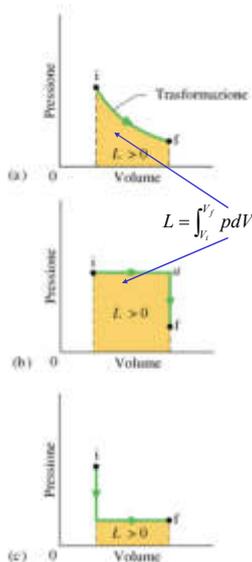
- In ogni dV_i infinitesimo, posso considerare che la pressione p_i non vari molto e sia costante e, quindi, dovrò semplicemente (com'è tipico dell'integrale) fare la somma di infiniti rettangoli di area $dV_i \times p_i$
- Il lavoro totale, quindi, non è altro che l'area sottesa alla curva algebrica che rappresenta $p(V)$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

154

Trasformazione termodinamica



- $L > 0$ (il gas aumenta il proprio volume spingendo il pistone verso l'alto).

- Trasformazione a pressione costante +
- Trasformazione a volume costante

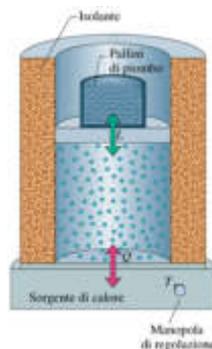
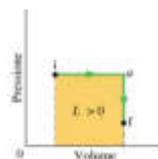
- Trasformazione a volume costante +
- Trasformazione a pressione costante
- *Il lavoro è inferiore che nel caso centrale*

Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

156

Trasformazione termodinamica

- **STADIO 1 (pressione costante)**
 - non si levano pallini sopra il pistone,
 - Tramite il controllo di temperatura si aumenta la temperatura,
 - Il volume del gas aumenta,
 - Il gas, espandendosi, compie lavoro e solleva il pistone,
 - Il calore è positivo perché viene fornito al sistema.
- **STADIO 2 (volume costante)**
 - Il pistone deve essere bloccato, per impedirne lo spostamento,
 - Tramite il controllo di temperatura si riduce la temperatura,
 - La pressione diminuisce,
 - Poiché la sorgente di calore (serbatoio) è più fredda del gas, viene ceduto calore dal gas al serbatoio.
- Il lavoro L , positivo, viene compiuto solo durante il primo stadio.
- Il calore viene trasferito durante entrambi gli stadi.

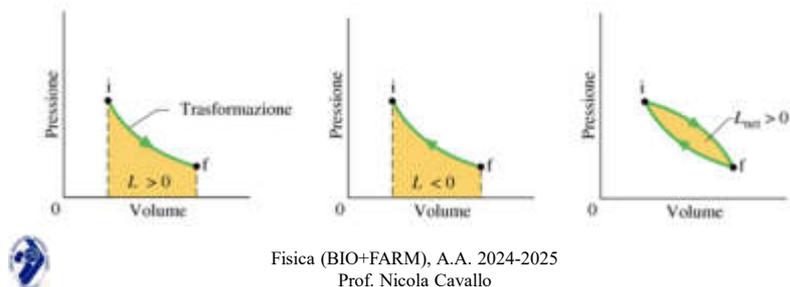


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

157

Trasformazione termodinamica

- Un sistema può essere portato da un determinato *stato iniziale* a un dato *stato finale* mediante un numero infinito di trasformazioni.
- In generale, il lavoro L e il calore Q avranno valori diversi per ognuno di questi processi.
- Possiamo affermare che il **calore** e il **lavoro** sono quantità che dipendono dal percorso seguito.



158

1° Principio della Termodinamica

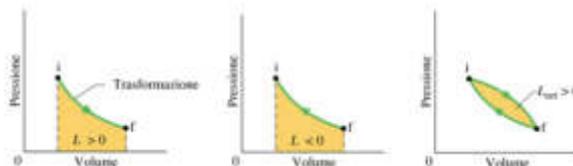


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

164

Prima legge della Termodinamica

- Nel passaggio da uno *stato iniziale* (i) ad uno *finale* (f), sia il lavoro (L) che il calore scambiato (Q) dipendono dal particolare tipo di trasformazione termodinamica.



- Sperimentalmente si verifica che la quantità ($Q-L$) è costante, qualsiasi sia il percorso seguito durante la trasformazione.
- La quantità ($Q-L$) dipende solo, ed esclusivamente, dallo stato iniziale e da quello finale.



Prima legge della Termodinamica

- La quantità ($Q-L$) deve, quindi, rappresentare un cambiamento di una proprietà intrinseca del sistema che chiameremo “**energia interna**“:

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

- Questa relazione esprime la Prima Legge della Termodinamica
- Nel caso di cambiamenti infinitesimi:

$$dE_{\text{int}} = dQ - dL$$

- *L'energia interna di un sistema cresce quando vi trasferiamo energia mediante l'immissione di calore Q e diminuisce quando se ne asporta energia mediante il lavoro L compiuto dal sistema.*



Casi particolari

- Analizzeremo ora quattro diverse trasformazioni termodinamiche particolari:

Prima legge della termodinamica: quattro casi particolari

Trasformazione	Vincolo	Conseguenza
Adiabatica	$Q = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = -L$
Isocòra	$L = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = Q$
Ciclo chiuso	$\Delta E_{\text{int}} = 0$	$Q = L$
Espansione libera	$Q = L = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = 0$



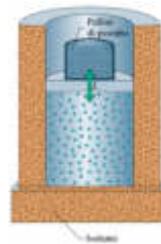
Casi particolari: trasformazioni adiabatiche

- Il sistema è isolato

$$\Delta E_{\text{int}} = E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i} = \cancel{Q} - L$$

$$\Downarrow$$

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



- Se il lavoro è compiuto dal sistema ($L > 0$) l'energia interna diminuisce ($dE_{\text{int}} < 0$)
- Se il lavoro è compiuto sul sistema ($L < 0$) l'energia interna aumenta ($dE_{\text{int}} > 0$)
- Se leviamo i pallini, il gas si espande ($L > 0$) e la temperatura del gas diminuisce ($dE_{\text{int}} < 0$)
- Se aggiungiamo pallini, il gas si comprime ($L < 0$) e la temperatura del gas aumenta ($dE_{\text{int}} > 0$)



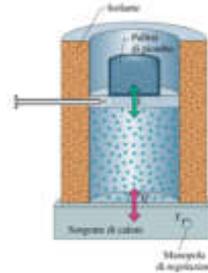
Casi particolari: trasformazioni a volume costante

- Se $V=cost$, il sistema non compie lavoro:

$$\Delta E_{int} = E_{int,f} - E_{int,i} = Q - \cancel{L}$$

$$\Downarrow$$

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



- se viene fornito del calore al sistema ($Q > 0$), l'energia interna del sistema aumenta.
- se viene estratto calore durante il processo ($Q < 0$), l'energia interna del sistema deve diminuire.
- se viene fornito del calore al sistema ($Q > 0$), la temperatura del gas aumenta.
- se viene estratto calore durante il processo ($Q < 0$), la temperatura del gas diminuisce.



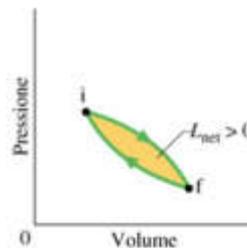
Casi particolari: trasformazioni cicliche

- Sono trasformazioni nella quali, attraverso scambi di calore e di lavoro, si ritorna ad uno stato iniziale.

$$\Delta E_{int} = E_{int,f} - E_{int,i} = 0; \quad Q - L = 0$$

$$\Downarrow$$

$$Q = L$$

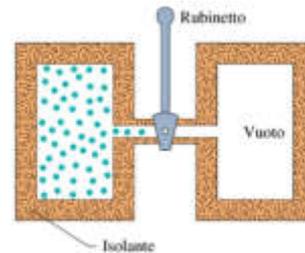


Casi particolari: trasformazioni a espansione libera

- Si tratta di trasformazioni adiabatiche nelle quali non è compiuto alcun lavoro ($L=0$).

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

$$\Downarrow$$
$$Q = L = 0$$



- All'apertura del rubinetto, il gas fluisce e si espande nella seconda cavità senza scambi termici (cavità adiabatiche) e senza alcun lavoro (nessuna opposizione alla espansione)



Casi particolari: trasformazioni a espansione libera

- Non c'è modo di eseguire l'espansione libera lentamente.
- Sebbene il sistema sia in equilibrio termico nel suo stato iniziale e in quello finale, esso non è in equilibrio durante il processo.
- Negli stati intermedi, T , p e V cambiano continuamente.
- Non è, quindi, possibile tracciare un grafico dell'andamento dell'espansione su un diagramma pressione-volume.

