

Lezione 21

Fisica I – Ingegneria Automazione e Informatica
Università di Napoli "Federico II"
prof. Nicola R. Napolitano

Riepilogo della lezione precedente

- 1) Termodinamica
- 2) Equilibrio
- 3) Principio zero

In questa lezione

- 1) Dilatazione Termica
- 2) Calore e calore specifico
- 3) Cambiamenti di stato
- 4) gas perfetti

Teorema di Bernoulli

pressione varia in
fluido in movimento
in tubo di sezione variabile

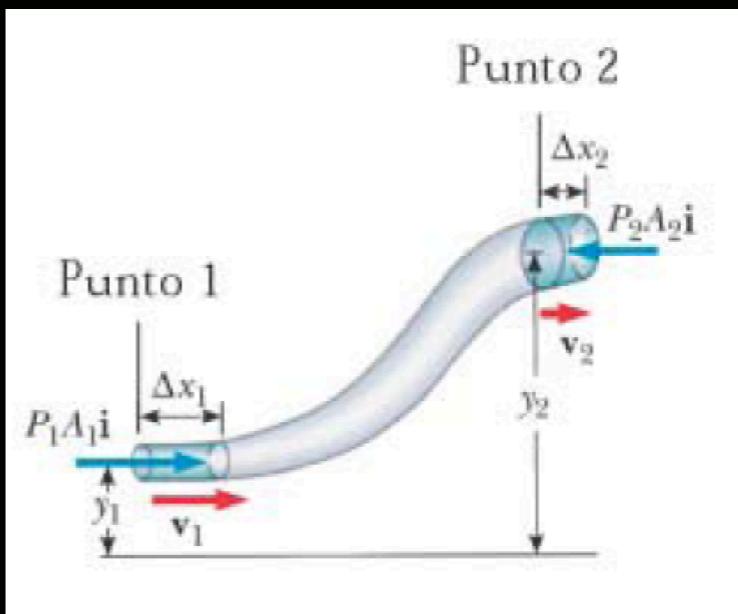
✖ lavoro forze di pressione

$$L_p = F_1 \Delta x_1 - F_2 \Delta x_2$$

spinge
il fluido

si oppone
al moto del fluido

$$\begin{aligned} &= p_1 A_1 \Delta x_1 - p_2 A_2 \Delta x_2 \\ &= (p_1 - p_2) \Delta V \end{aligned}$$



Infatti, come abbiamo visto per
l'eq. di continuità

$$\Delta V = A_1 \Delta x_1 = A_2 \Delta x_2 = \frac{\Delta m}{\rho}$$

la massa si conserva
 ρ è costante

teorema di Bernoulli

in una linea di corrente è costante la somma di pressione (p)

energia cinetica per unità di volume ($1/2\rho v^2$)

energia potenziale gravitazionale per unità di volume (ρgh)

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{costante}$$

N.B. equazione di Bernoulli **non** è un risultato nuovo:

✗ fluido a **riposo**

$$v_1 = v_2 = 0$$

$$p_1 = p_2 + \rho g(y_1 - y_2)$$

Termodinamica

*studio delle
trasformazioni reciproche di energia:*

- **energia meccanica** [lavoro, energia cinetica e potenziale]
- **energia interna-termica** [forma disordinata di energia, moto molecole]

E_{int} \equiv *energia associata ai componenti microscopici def (atomi-molecole) del sistema.*

include:

- ✖ **energia cinetica** e **potenziale** associata al moto casuale traslazionale, rotazionale e vibrazionale di atomi e molecole
- ✖ **energia di legame** fra molecole

Conservazione dell'energia in generale

l'energia non si può né creare né distruggere

l'energia si conserva

*l'energia totale di un sistema può variare
solo se viene **trasferita** energia
dal di fuori o al di fuori del sistema*

$$\Delta E_{sistema} = \sum E_{trasferite}$$

equazione di continuità

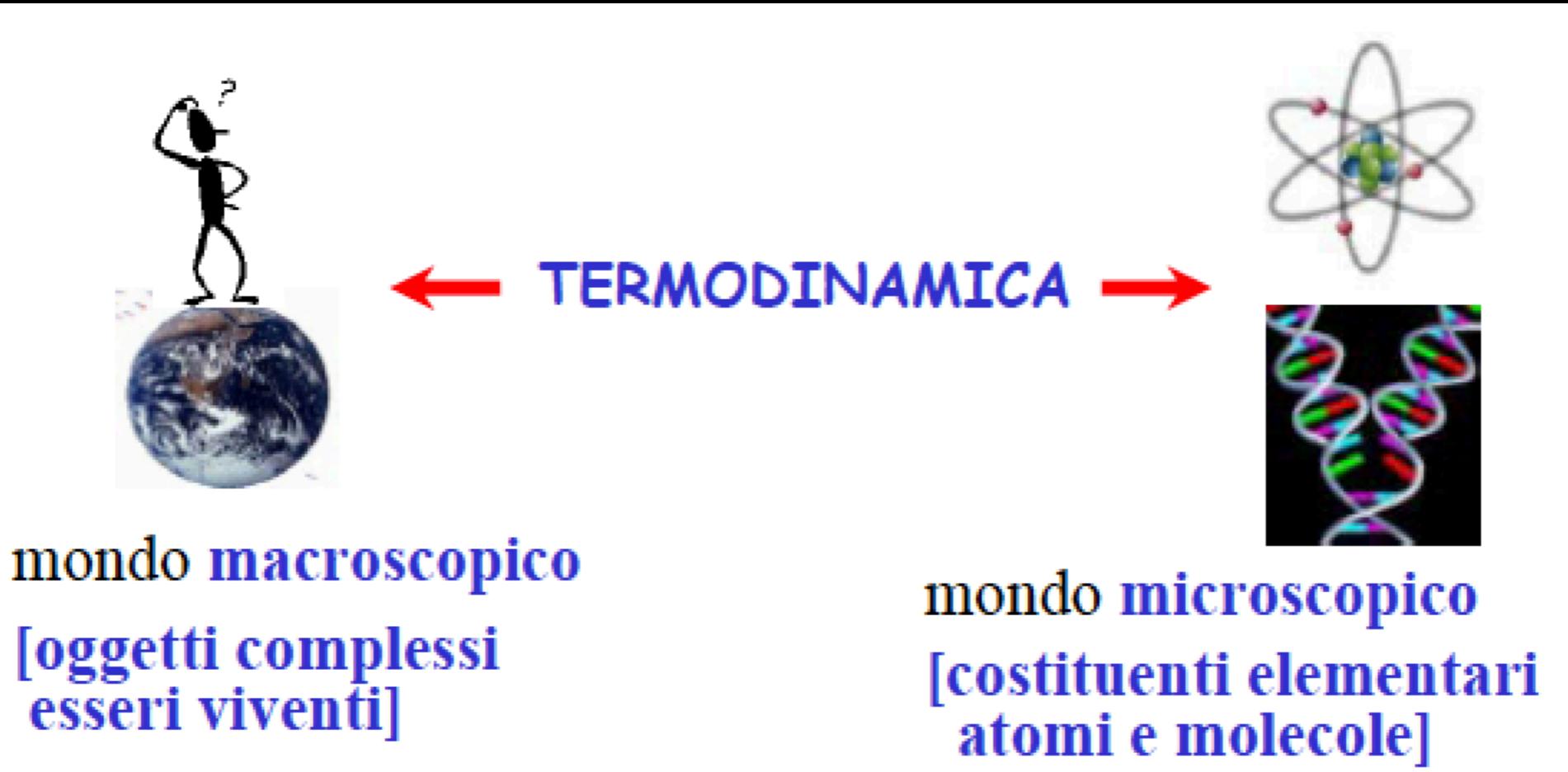
$$\underbrace{\Delta E_{sistema}}_{\Delta E_{sistema}} = L + Q + E_{OM} + E_{TM} + E_{TE} + E_{RE}$$

- ▶ energia non può essere né creata né distrutta
- ▶ energia si può **trasformare** da una forma in un'altra,
- ▶ ma **E_{tot}** = **costante**, sempre
- ▶ energia dell'**Universo** è costante

equazione di continuità contiene
teorema energia cinetica

$$\Delta K = L$$

Steam Locomotive
by
www.mekanizmalar.com



concetti fondamentali della **termodinamica**:

- ✗ **temperatura**
- ✗ **calore** [**meccanismo** di trasferimento di energia sistema-ambiente causato da differenza di temperatura
è anche **quantità Q** di **energia trasferita**]

Temperatura

- nel S.I. si misura in **gradi kelvin** (K)
- la temperatura può essere innalzata a piacere
- non posso abbassare la temperatura sotto lo **0 assoluto** [della scala Kelvin]

$$0^\circ K = - 273.15^\circ C$$

$$T_K = T_C - 273.15^\circ$$

ampio intervallo
di temperature
effettive riscontrate
[≈ 50 ordini di grandezza]



Legge Zero della Termodinamica

per definire la **temperatura** uso i concetti di

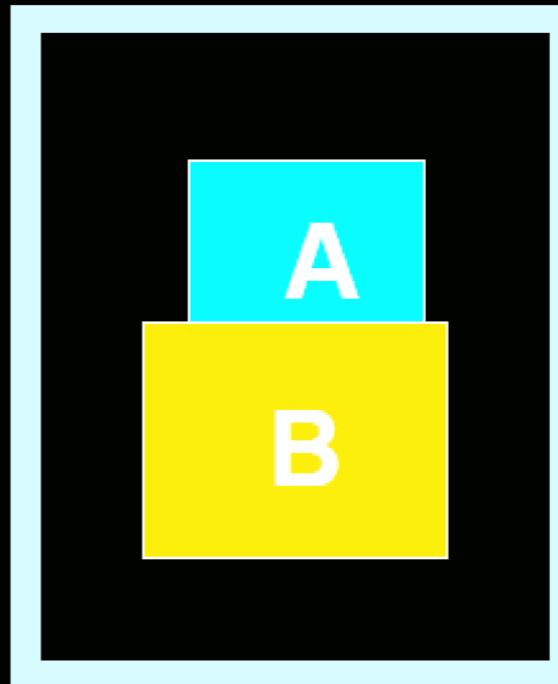
- ✖ contatto termico
- ✖ equilibrio termico

**contenitore
isolante**

contatto termico

oggetti a contatto
in contenitore isolante:

a temperature diverse
si scambiano energia
[detta **calore**]



equilibrio termico

situazione in cui
due oggetti a contatto termico
cessano di avere scambio di energia [**calore**]

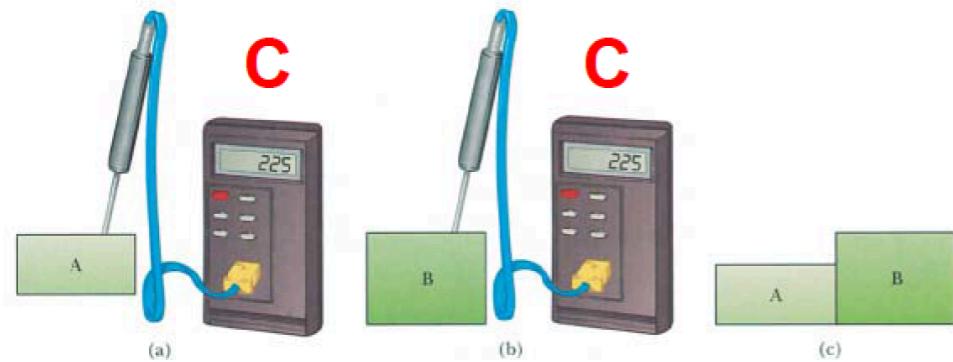
principio zero della termodinamica

se i corpi A e B sono separatamente in equilibrio termico con il corpo C, allora A e B sono in equilibrio termico se posti a contatto termico

temperatura \Rightarrow proprietà che determina se un corpo è in **equilibrio termico** con altri corpi

due corpi in equilibrio termico hanno la stessa temperatura

Termometri



termometro: strumento per **misurare** la temperatura basato su **variazione** di una **proprietà fisica** con la temperatura

variazione di
→

- ✗ **volume** di un liquido
- ✗ **lunghezza** di un solido
- ✗ **pressione** di gas a volume costante
- ✗ **volume** di gas a pressione costante
- ✗ **resistenza** elettrica di conduttore
- ✗ **colore** di corpo caldo

principio zero della termodinamica:

se le letture del termometro **C** sono le stesse
dopo che **C** è stato messo a contatto con **A** e **B** separatamente

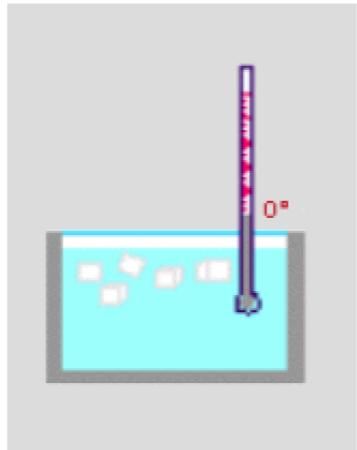
A e B si dicono in **equilibrio termico**:

- ⇒ **NON** vi sarà scambio di energia fra essi
(se posti a contatto termico)
- ⇒ A e B sono alla **stessa temperatura**

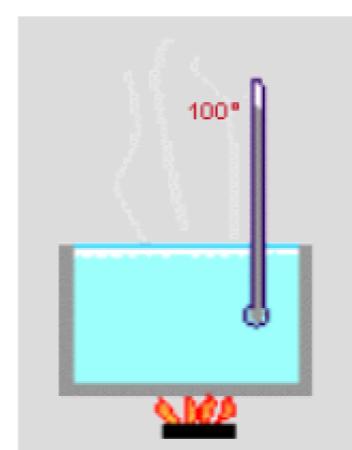
il termometro viene **tarato** ponendolo a contatto con sistema naturale a temperatura costante

esempio:

miscela **acqua-ghiaccio**
a pressione atm $\Rightarrow 0^{\circ}\text{C}$

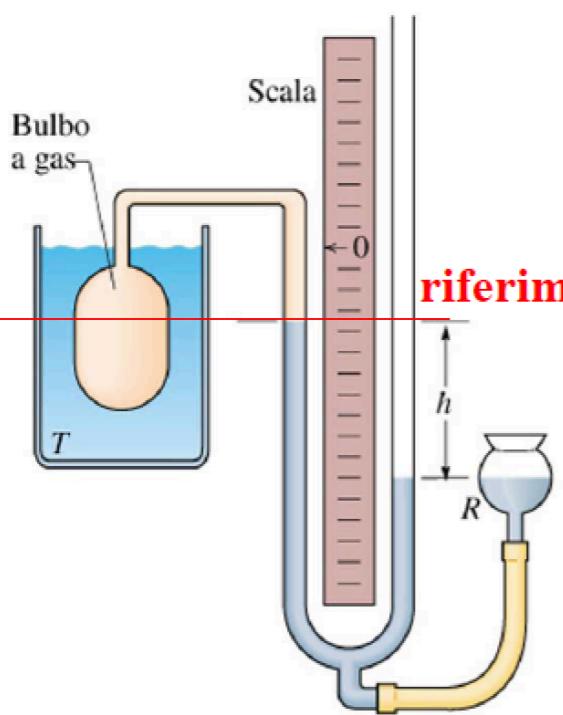


miscela **acqua-vapore**
a pressione atm $\Rightarrow 100^{\circ}\text{C}$



1°C = centesima parte della dilatazione del mercurio tra
punto di fusione ghiaccio (0 C°)
punto di ebollizione acqua (100 C°)

termometro a gas [universale]



bulbo di vetro riempito di **gas** collegato a capillare con mercurio:

- ✗ la **pressione** del gas varia con la **temperatura**
- ✗ alzando/abbassando serbatoio R porta il livello gas/mercurio al **livello di riferimento**
⇒ **[volume gas costante]**

$$T = Cp$$

$$p = p_0 - \rho gh$$

C = costante
[si determina con la taratura]

NOTA

La pressione dipende dalla densità del gas. Quindi C deve dipendere dal particolare gas per avere la stessa misura di temperatura. Ma questa proprietà può essere usata per un esperimento interessante....

RICORDATE

manometro a tubo aperto

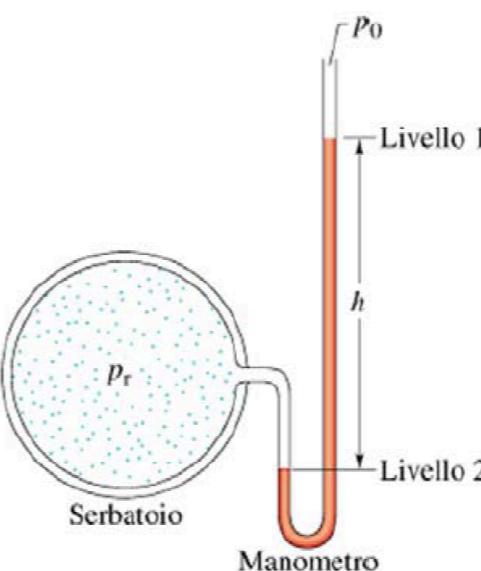
tubo aperto pieno di liquido collegato con sistema a pressione incognita p

$$p = p_0 + \rho gh$$

pressione **assoluta**

$$p_r = p - p_0 = \rho gh$$

pressione **relativa**



Supponiamo di fare misure di temperatura e pressione di una sostanza...e di farlo con differenti gas, si trova che estrapolando le temperature queste convergono tutte allo stesso valore (-273 gradi celsius), indipendentemente dal gas.

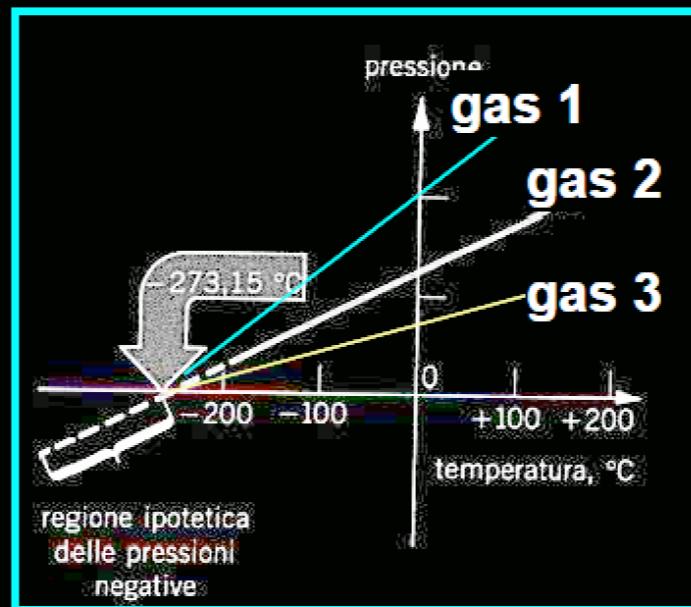
✗ lettura di T **indipendente** dal gas

zero assoluto

$$p = 0$$

$$T = -273.15 \text{ } ^\circ\text{C} = 0 \text{ K}$$

più bassa temperatura
mai **raggiungibile**



$$T_C = T_K - 273.15$$

Scale di Temperatura

scala Celsius

$$T_C = T_K - 273.15^{\circ}$$

scala Fahrenheit

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

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

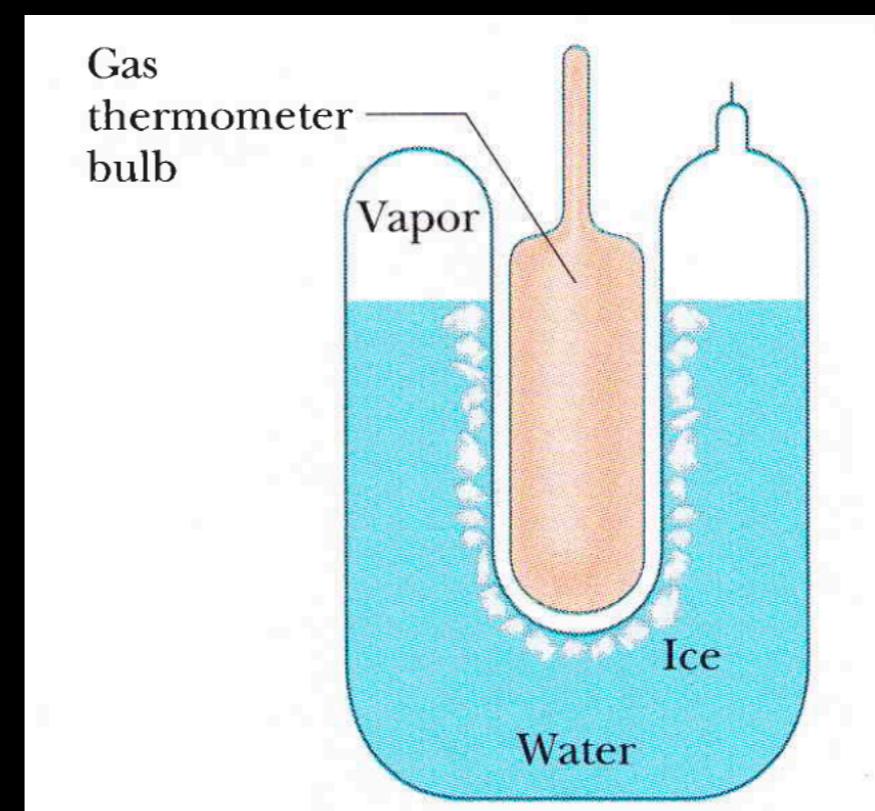
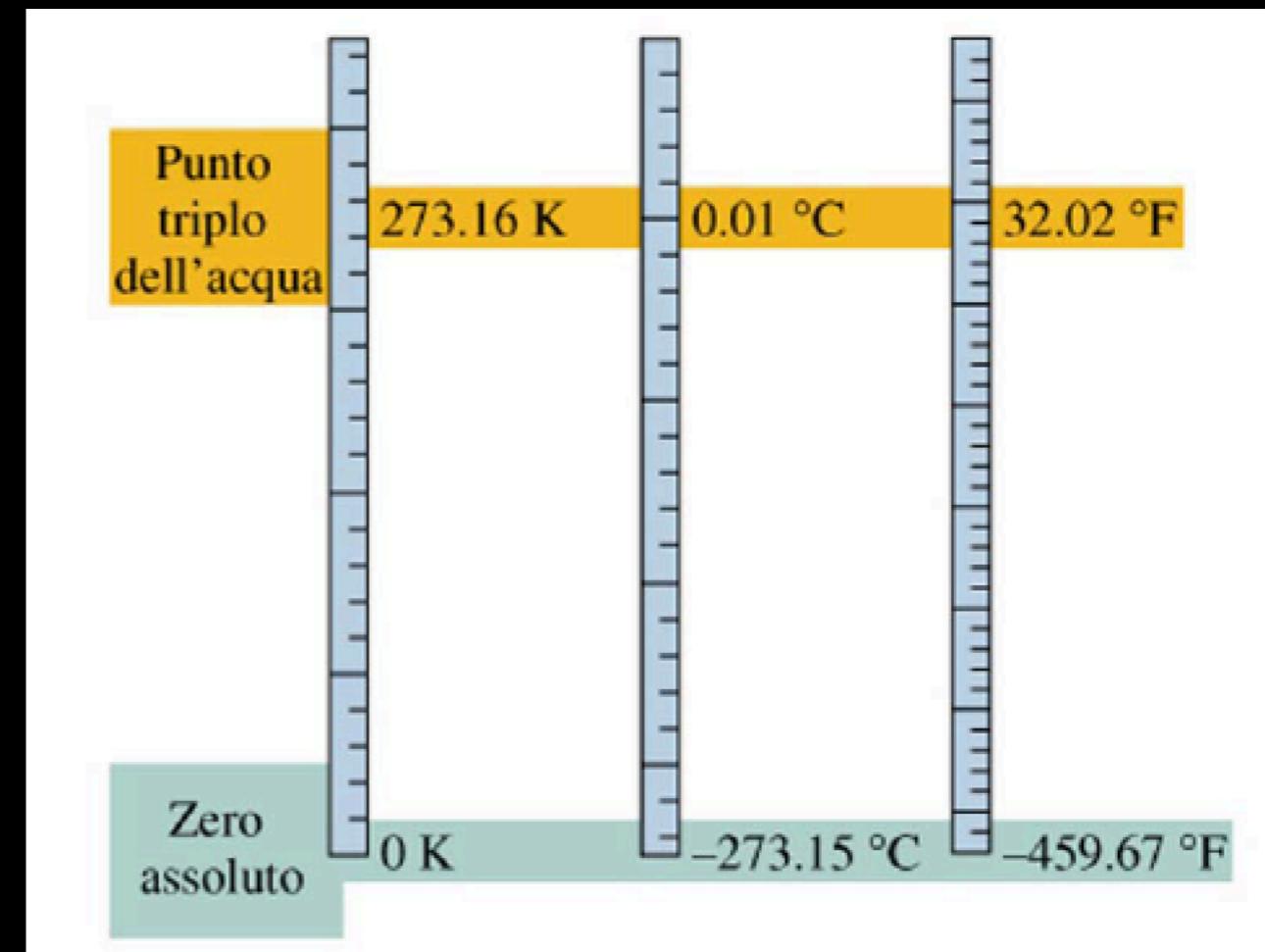
$$\Delta T_F = \frac{9}{5} \Delta T_C$$

N.B. **punto triplo** dell'acqua :

stato di temperatura e pressione
in cui coesistono all'equilibrio
acqua, vapore d'acqua e ghiaccio

$$p = 4.55 \text{ mm Hg} = 606.6 \text{ Pa}$$

$$T = 0.01^{\circ}\text{C}$$



La scala Fahrenheit

La scala delle temperature (gradi Fahrenheit) era costruita scegliendo come 0°F la temperatura di una miscela frigorifera di ghiaccio e sale ammonico e con 96°F la temperatura del corpo di una persona in salute.

Con questa scelta, la temperatura di fusione del ghiaccio corrisponde a 32°F e quella di ebollizione dell'acqua a 212°F. Il motivo per cui la temperatura di fusione del ghiaccio non fosse usata per la taratura e' che lo stesso Fahrenheit aveva osservato il fenomeno di soprafusione dell'acqua, per cui non dava molto credito alla stabilita' di questo punto fisso.

Dilatazione Termica di Solidi e Liquidi

dilatazione termica: solidi e liquidi variano dimensioni lineari con temperatura [è principio di funzionamento di termometri a liquido]

applicazioni:
fabbricati, autostrade,
ferrovie, ponti
usano giunti per compensare
variazione di dimensioni
con temperatura



per piccole variazioni di temperatura:

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T \Rightarrow L_f - L_i = \alpha L_i (T_f - T_i) \quad \alpha = \text{coefficiente dilatazione lineare}$$

$$\Delta A = \gamma A_i \Delta T \Rightarrow A_f - A_i = 2\alpha A_i (T_f - T_i) \quad \gamma = 2\alpha = \text{coefficiente dilatazione superficiale}$$

$$\Delta V = \beta V_i \Delta T \Rightarrow V_f - V_i = 3\alpha V_i (T_f - T_i) \quad \beta = 3\alpha = \text{coefficiente dilatazione volumica}$$

Alcuni valori del coefficiente di dilatazione lineare^a

Sostanza	$\alpha(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	Sostanza	$\alpha(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	dimensioni [a]=1/[T]
Ghiaccio (a 0 °C)	51	Acciaio	11	unità misura
Piombo	29	Vetro (ordinario)	9	$(^\circ\text{C})^{-1}$
Alluminio	23	Vetro (Pyrex)	3.2	
Ottone	19	Diamante	1.2	
Rame	17	Invar ^b	0.7	
Calcestruzzo	12	Quarzo fuso	0.5	

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

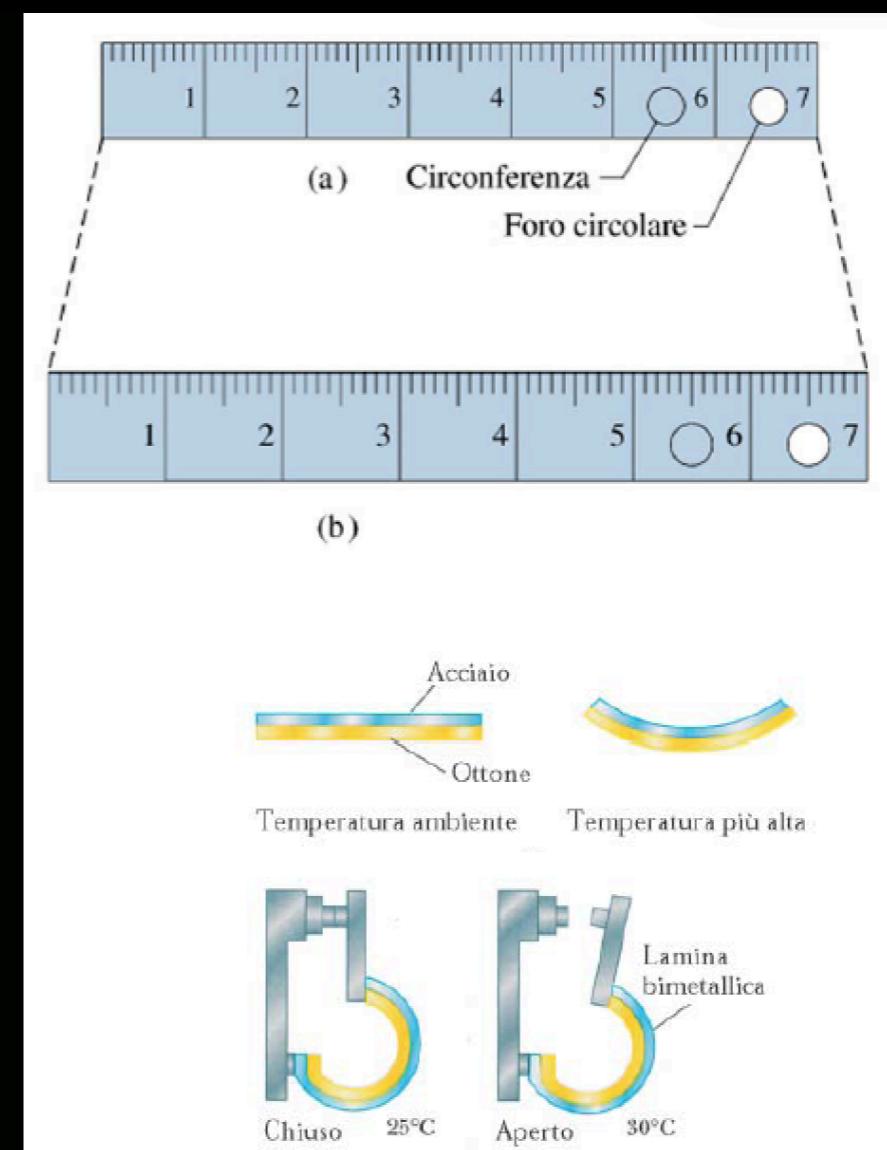
attenzione:

TUTTE le dimensioni
aumentano con la temperatura,
anche i fori si espandono!!!

applicazione

termostato bi-metallico:
lamina si piega con T
[diversi coefficienti α]

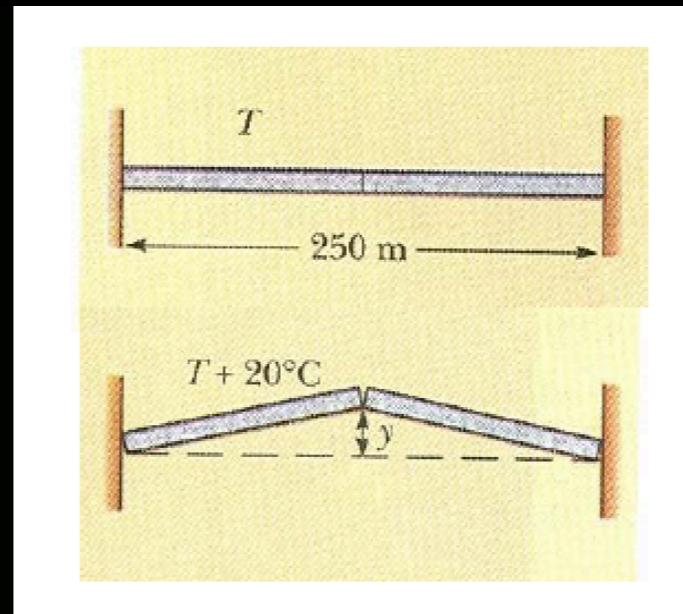
usato per **aprire e chiudere**
contatti elettrici



esempio:

due blocchi di **calcestruzzo** in un ponte lungo **250 m** sono disposti consecutivamente senza spazio fra di essi.

se **T** aumenta di **20 °C** qual è altezza **y** a cui si alzano i blocchi per deformazione ?



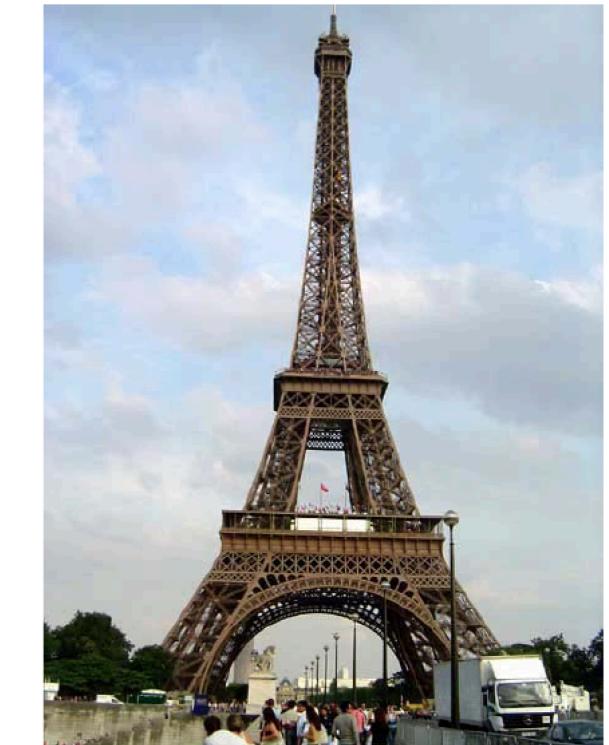
$$L_f = L_i(1 + \alpha \Delta T) = 125 \text{ m} [1 + 12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} (20.0 \text{ }^{\circ}\text{C})] = 125.03 \text{ m}$$

applico il **teorema di Pitagora**:

$$(L_f)^2 = (L_i)^2 + y^2$$

$$(125.03 \text{ m})^2 = (125.0 \text{ m})^2 + y^2$$

$$y = 2.74 \text{ m} \quad !!!$$



la Torre Eiffel cresce di
~ **4mm** per ogni aumento di **1 °C** !!!

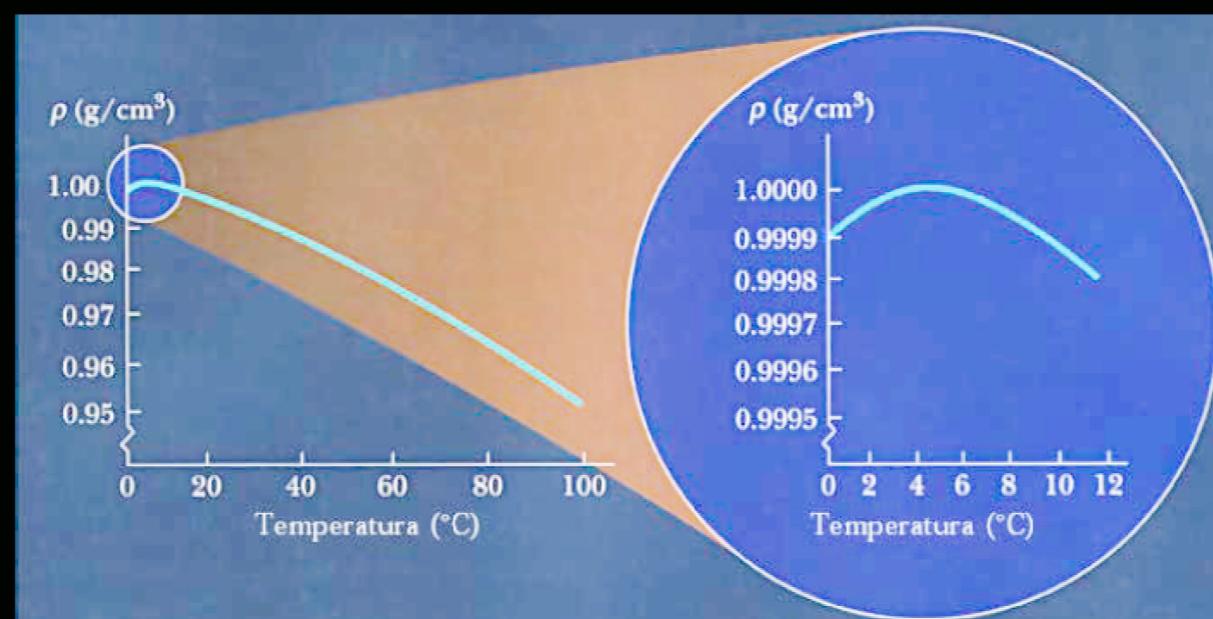
comportamento anomalo dell'acqua

in generale: volume liquido aumenta con T

ad eccezione dell'acqua

da 0 a 4 °C il volume diminuisce !!!
[densità aumenta]

Viceversa, andando da 4° a 0° la densità diminuisce
e il volume aumenta



conseguenze biologiche:

mari e laghi ghiacciano in superficie
(ghiaccio è meno denso di acqua)

mentre acqua sottostante rimane a 4 °C
permettendo forme di vita

Infatti: mentre si abbassa la temperatura verso lo zero, la densità diminuisce e il ghiaccio tende a salire verso la superficie.

esempi:

bottiglia di vetro con acqua in freezer si spacca

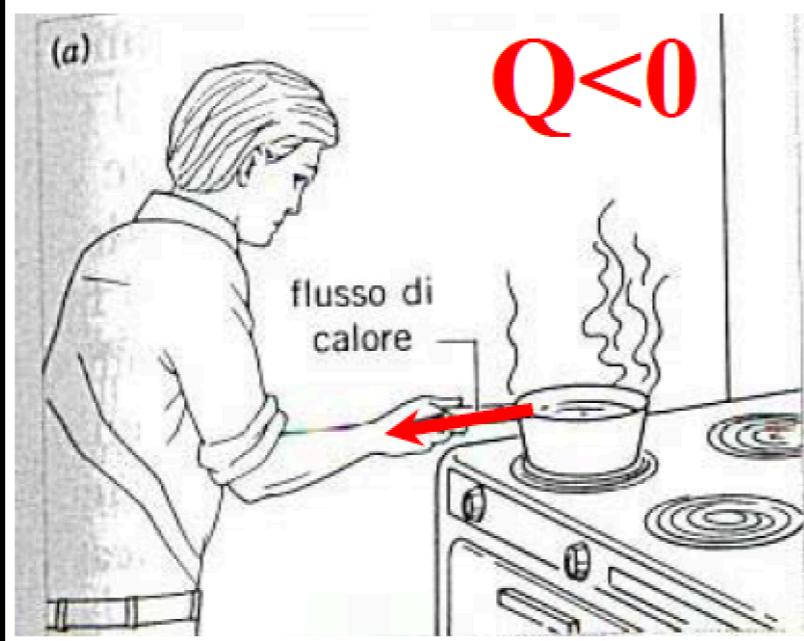
tubature acqua in appartamenti si spaccano in inverni rigidi

Infatti: mentre si abbassa la temperatura verso lo zero, il volume aumenta e il ghiaccio tende ad espandersi.

Calore

calore = *def* energia trasferita fra un corpo (sistema) e ambiente circostante a causa di una differenza di temperatura

1. **temperatura**: osservabile che determina direzione flusso di calore [da T_{maggiore} a T_{minore}]
2. **calore**: forma di energia scambiata tra due corpi a diversa temperatura
3. la **parità di temperatura** blocca il trasferimento di calore
4. la **temperatura** non misura la quantità di calore



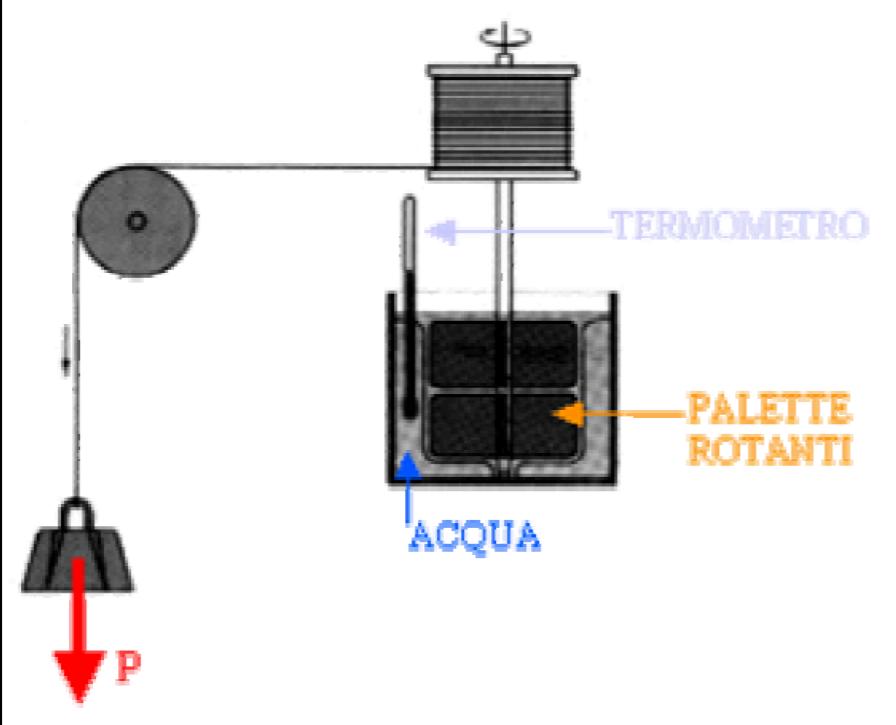
unità di misura

caloria = quantità di calore necessaria
per aumentare la temperatura
di 1 g di acqua da 14.5° a 15.5° C

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

equivalente meccanico
del calore

Esperimento di Joule



1. trasformo **energia potenziale gravitazionale** in **lavoro** sulle palette [contro le forze di attrito dell'acqua]
2. **dissipo energia** fornita alle palette in attrito e turbolenza del fluido
3. all'equilibrio: osservo **innalzamento temperatura** dell'acqua
4. ottengo stesso risultato **riscaldando** direttamente **acqua**

ho trasformato **lavoro meccanico** in **energia termica**

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

apparato:

- ▶ **calorimetro** ad acqua isolato termicamente
- ▶ **sistema di palette** collegate mediante carrucola ad un peso

in **fisiologia**:

caloria = unità di misura **quantità di energia utilizzabile** contenuta negli **alimenti**

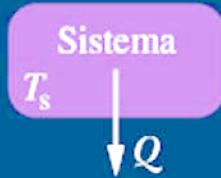
[si misura tale energia **bruciando le sostanze alimentari** in presenza di **ossigeno**, per mezzo di un calorimetro:
si cede il calore a acqua
si misura innalzamento T acqua]

in campo **nutrizionale**:
si impiega un multiplo caloria:

Cibo	Apporto calorico
1 g lipidi	9 kcal
1 g glicidi	4 kcal
1 g proteine	4 kcal

Ambiente

T_a



$T_s > T_a$

$Q < 0$

$T_s > T_a$

(a)

il sistema **cede** calore
energia **esce** dal sistema
[finché si ristabilisce equilibrio]

$Q < 0$

T_a



$T_s < T_a$

$Q > 0$

$T_s < T_a$

(c)

il sistema **assorbe** calore
energia **entra** nell sistema
[finché si ristabilisce equilibrio]

$Q > 0$

N.B.: $Q \sim \Delta T = T_f - T_i$

Ambiente

T_a

Sistema

T_s

$T_s = T_a$

$Q = 0$

(b)

$T_s = T_a$

sistema e ambiente
in **equilibrio**

$Q = 0$

Calore Specifico

La **quantità** di calore necessaria per aumentare la **temperatura** di una data sostanza dipende dalla sostanza

**calore
specifico**

[quantità di calore
per unità di materia
per unità di T]

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad \Rightarrow \quad Q = cm\Delta T$$

Il valore di **c** dipende dalle condizioni sperimentali soprattutto per i **gas**

[**c_p** = c.s. a **pressione** costante, **c_V** = c.s. a **volume** costante]

Calori specifici per alcune sostanze a temperatura ambiente

Sostanza	Calore specifico	
	cal/(g · K)	J/(kg · K)
<i>Solidi elementari</i>		
Piombo	0.0305	128
Tungsteno	0.0321	134
Argento	0.0564	236
Rame	0.0923	386
Alluminio	0.215	900
<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



valore elevato !!

mole = quantità di sostanza che contiene
numero di atomi/molecole pari al
numero di Avogadro $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$

*il Numero di Avogadro è definito tale che
1 mole ^{12}C abbia massa pari a 12 g*

Calcolo del numero di moli di una sostanza di massa M_{camp} :

$$n = \frac{M_{\text{camp}}}{M}$$

M_{camp} = peso sostanza
 M = peso di una mole
[peso molare]

$$M = m N_A \quad m = \text{peso di una molecola}$$

Il peso **M** di una mole di una sostanza si ricava dalla tabella periodica degli elementi

	1	
1	H	2
1	1.00794	9.0122
2	Li	Be
2	6.941	22.9898
3	Na	Mg
3	11	12
4	Li	Be
4	3	4
5	Rb	Sr
5	22.9898	24.3050
6	Cs	Ba
6	132.9054	137.327
7	Fr	Ra
7	223.0197	226.0254

$$\begin{aligned}
 M_H &= 1.00794 \text{ g} \\
 M_{H^2} &= 2 \cdot 1.00794 \text{ g} \\
 M_{Be} &= 9.0122 \text{ g} \\
 M_{C^{12}} &= 12 \text{ g} \\
 &\text{def}
 \end{aligned}$$

1	1.00794
1	H
2	Li
3	Na
4	K
5	Rb
6	Cs
7	Fr

2	9.0122
2	Be
3	4
4	Ca
5	Sr
6	Ba
7	Ra

Based on carbon-12

3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
88.9059	91.224	92.9064	95.94	98.9063	101.07	102.9055	106.42	107.8662	112.411
Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
138.9055	178.49	180.9479	183.85	186.207	190.2	192.22	195.08	196.9665	200.59
La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg
57	72	73	74	75	76	77	78	79	80
227.0278	261.1087	262.1138	263.1182	262.1229	Uno	Uno	Uno	Uno	Uno
Ac	b	Unq	Unp	Unh	Uns	Uno	Uno	Uno	Uno
89	104	105	106	107	108	109	109	109	109

13	14	15	16	17	18
B	C	N	O	F	He
5	6	7	8	9	2
26.9815	28.0855	30.9738	32.066	35.4527	4.0026
Al	Si	P	S	Cl	Ar
13	14	15	16	17	18
69.723	72.61	74.9216	78.86	79.904	83.80
Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
31	32	33	34	35	36
114.82	118.710	121.75	127.80	126.9045	131.29
In	Sn	Sb	Te	I	Xe
49	50	51	52	53	54
204.3833	207.2	208.9804	208.9824	209.9871	222.0176
Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
81	82	83	84	85	86

a	140.115	140.9077	144.24	146.9151	150.36	151.985	157.25	158.9253	162.50	164.9303	167.26	168.9342	173.04	174.967
b	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
b	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
b	232.0381	231.0359	238.0269	237.0482	244.0842	243.0614	247.0703	247.0703	251.0788	252.0829	257.0951	258.0986	259.1009	260.1053
b	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
b	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103

Calori specifici per alcune sostanze a temperatura ambiente

Sostanza	Calore specifico		Calore specifico
	cal/(g · K)	J/(kg · K)	molare 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	valore elevato !!

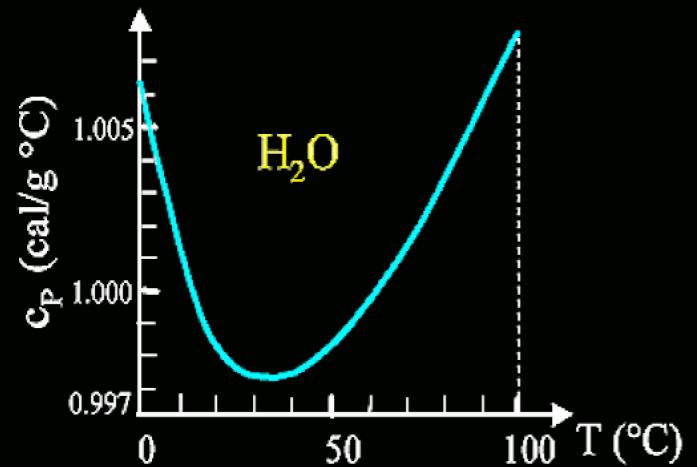
La mole è la quantità di sostanza che contiene un numero di Avogadro di particelle elementari, atomi o molecole. Quindi: per prelevare una mole di qualsiasi sostanza, basterà pesarne una quantità in grammi pari al peso atomico o molecolare.

N. Avogadro $\sim 6 \times 10^{23}$ atomi o molecole

applicazione

Il **calore specifico** dell'**acqua**
[1 Cal/g °C a 14.5 °C e 1 atm]

è **superiore** a quello della maggior parte delle altre **sostanze**



dipende
dalla temperatura
[scala molto ampliata]

≈ 1 Cal/g °C



L'acqua è un raccoglitore di calore naturale
mari e laghi **stabilizzano** la temperatura dell'ambiente a causa dell'alto calore specifico [capacità termica] dell'acqua

meccanismo:
viceversa in estate

- in inverno il mare si raffredda
- rilascia calore all'ambiente
- venti trasportano calore verso terra

Calore Latente e Cambio di Fase

non sempre l'**energia** assorbita/ceduta da un corpo corrisponde ad una variazione di **temperatura**

cambio di fase:
energia trasferita
modifica struttura
della sostanza
solido \leftrightarrow liquido
liquido \leftrightarrow gas



La quantità di energia scambiata (sotto forma di calore) durante lo svolgimento di una transizione di fase (o "passaggio di stato") è detto **calore latente**. Si misura in Joule/kg

**calore necessario
per cambio di fase**

$$Q = \pm mL$$

L = calore latente
[di fusione, di evaporazione]

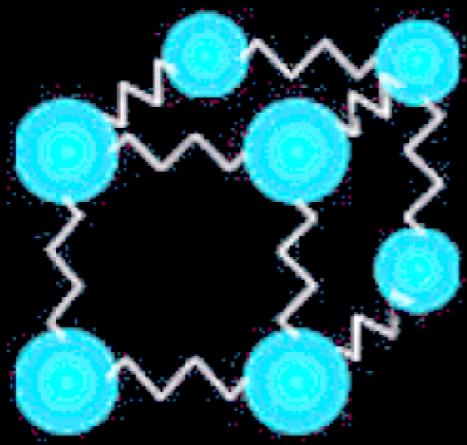
Alcuni valori di calore latente

Sostanza	Fusione		Evaporazione	
	Punto di fusione (K)	Calore latente di fusione L_F (kJ/kg)	Punto di ebollizione (K)	Calore latente di evaporazione L_V (kJ/kg)
Idrogeno	14.0	58.0	20.3	455
Ossigeno	54.8	13.9	90.2	213
Mercurio	234	11.4	630	296
Acqua	273	333	373	2256
Piombo	601	23.2	2017	858
Argento	1235	105	2323	2336
Rame	1356	207	2868	4730



Solido

le molecole **non** sono immobili nello spazio
oscillano attorno posizione di equilibrio
[continua agitazione]



forti legami tengono unite le molecole [forma e volume del solido sono ben definiti]

oscillazione delle molecole aumenta con energia termica

[temperature elevate: oscillazioni ampie
temperature inferiori: oscillazioni ridotte]

Al punto di fusione: oscillazioni così ampie da permettere agli atomi di muoversi in **nuove posizioni**

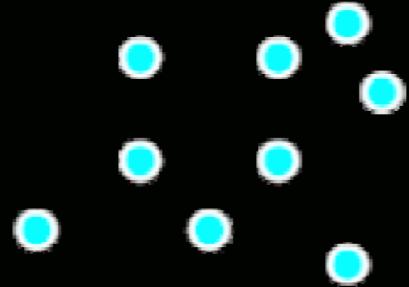
[**indebolisco i legami**, fase liquida disordinata]

Liquido

molecole legate tra loro da forze più **deboli**
[un liquido non possiede una forma propria]

Al punto di evaporazione: separo le molecole
compiendo lavoro (energia) contro forze attrattive
molecolari
[rompo i legami, fase gassosa di moto casuale]

Gas



molecole godono **estrema libertà** di movimento
[moto casuale che aumenta con energia termica]
grande distanza media fra atomi/molecole

$$L_{vaporizzaz\ e} \gg L_{fusione}$$

Stato di un Sistema

sistema termodinamico:
corpo o oggetto [anche vivente]
in relazione con ambiente esterno
mediante scambio di materia o energia

ogni sistema termodinamico è descritto da
grandezze macroscopiche

- ▶ pressione p
- ▶ volume V
- ▶ temperatura T
- ▶ numero di moli n
- ▶ composizione chimica
- ▶ tensione elastica [nei solidi]
- ▶ polarizzazione elettrica
- ...

- ✖ descrivono **collettivamente** sistema
[costituito da numero elevato di costituenti elementari ($\approx N_A$)]
- ✖ **NON** sono indipendenti, ma legate da **equazione di stato**
[nota quando il sistema è in **equilibrio termico**]

più semplice sistema: **gas perfetto all'equilibrio termico**

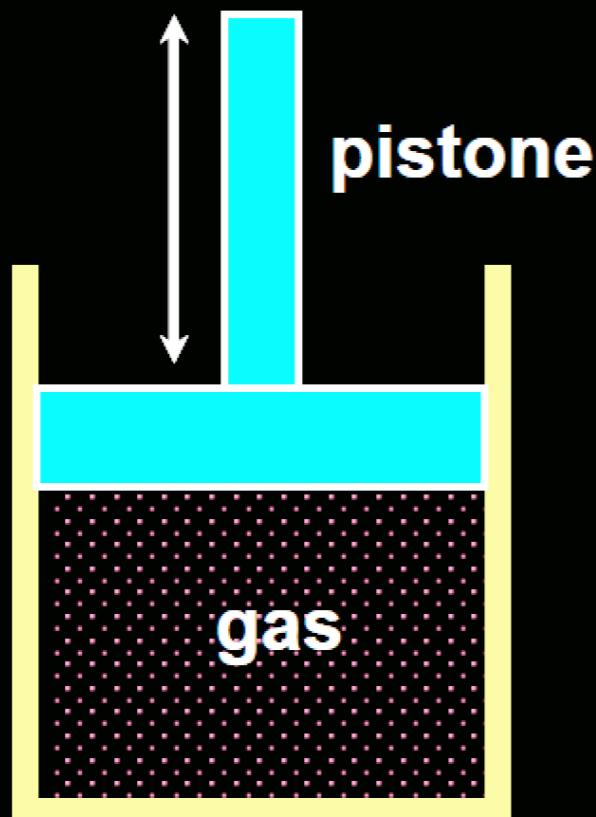
Gas Perfetti

[gas ideali]

gas perfetto:
[ideale]

- ▶ gas a **bassa** densità
- ▶ moto **casuale** di atomi o molecole
- ▶ trascurare forze a distanza

N.B. molti gas a T ambiente e p atmosferica sono gas perfetti



massa	m
volume	V
pressione	p
temperatura	T

l' **equazione di stato** mette in
relazione queste grandezze
[molto complicata]

Sperimentalmente si osserva che p , V , T , n sono osservabili legate tra loro

1. misurando la **pressione** del gas in funzione della **temperatura** (in Kelvin) si osserva che tra le due quantità esiste una **relazione lineare**

$$p \propto T$$

2. se aumento il **numero di molecole** presente in un recipiente **aumenta la pressione** nel recipiente stesso

$$p \propto n = \text{numero moli}$$

3. se a parità di massa e temperatura **riduco il volume** di un gas, la **pressione aumenta**

$$p \propto \frac{1}{V}$$

Dall' **evidenza sperimentale** si può quindi ricavare
l' **equazione di stato** dei **gas perfetti**

$$p \propto n \frac{T}{V}$$

$$pV = nRT$$

$$PV = nRT = n \frac{R}{N_A} N_A T = N k_B T$$

$$R = 8.31 \text{ J/(mole}\cdot\text{K}^\circ)$$

$$N_A = 6.02 \times 10^{23}$$

$$N = n N_A$$

$$k_B = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}^\circ$$

costante universale dei gas

numero di Avogadro

numero di molecole presenti

costante di Boltzmann

Attenzione:

- ✗ è una legge sperimentale **approssimata**
- ✗ non tiene conto **volume finito** del gas
[suppone molecole puntiformi di volume nullo]
- ✗ non tiene conto **forze** tra le molecole del gas
- ✗ vale solo per **gas rarefatti**, a temperatura molto lontana da zero assoluto e per volumi macroscopici
- ✗ vale per sistema **omogeneo** all' **equilibrio termico**
[ove posso definire p, V, T, n ...]

esempio: non posso applicarla nel riscaldamento di una pentola d'acqua [vortici, temperature diverse ...]

- gas perfetto:** [ideale]
- ▶ gas a **bassa** densità
 - ▶ moto **casuale** di atomi o molecole
 - ▶ trascurare forze a distanza

N.B. molti gas a T ambiente e p atmosferica sono gas perfetti

sperimentalmente si trova
equazione di stato molto semplice per gas **perfetti**

$$pV = nRT$$

n = numero di moli = M_{camp}/M

[M =massa molare o grammomolecola]

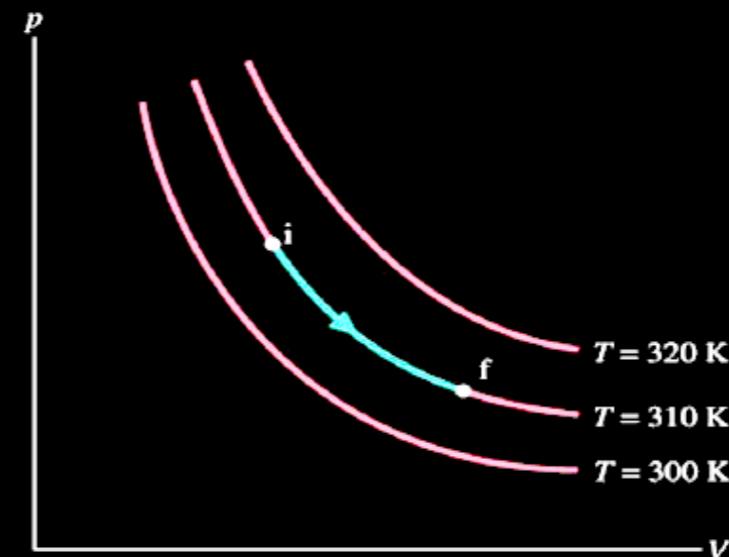
$R = 8.31 \text{ J}/(\text{mole}\cdot\text{K})$

costante universale dei gas

Equazione dei Gas Perfetti

$$pV = nRT$$

mostro graficamente
equazione di stato
gas perfetti
mettendo
pressione in ordinata
volume in ascissa



ciascuna curve mette in relazione volume e pressione
a temperatura costante (**curva isoterna**)

a partire da equazione di stato dei gas perfetti
si ricavano altre leggi comuni dei gas

Legge di Boyle

a temperatura costante

il prodotto del volume di una massa m di gas
per la pressione risulta costante

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Legge di Gay-Lussac

a pressione costante

il rapporto del volume di una massa m di gas
per la temperatura (in Kelvin) risulta costante

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Legge di Dalton

in una **miscela di gas** la pressione totale è uguale alla somma delle pressioni parziali dei suoi gas componenti

$$\begin{aligned} p_{Tot} &= p_1 + p_2 + p_3 + \dots \\ &= n_1 \frac{RT}{V} + n_2 \frac{RT}{V} + n_3 \frac{RT}{V} + \dots \\ &= (n_1 + n_2 + n_3 + \dots) \frac{RT}{V} \end{aligned}$$

Nota: in una miscela di gas, per definizione, la temperatura deve essere la stessa per tutti i gas