Fisica Generale

Settimana 11 – Lezione 28

Facoltà di Ingegneria

Livio Lanceri

Introduzione

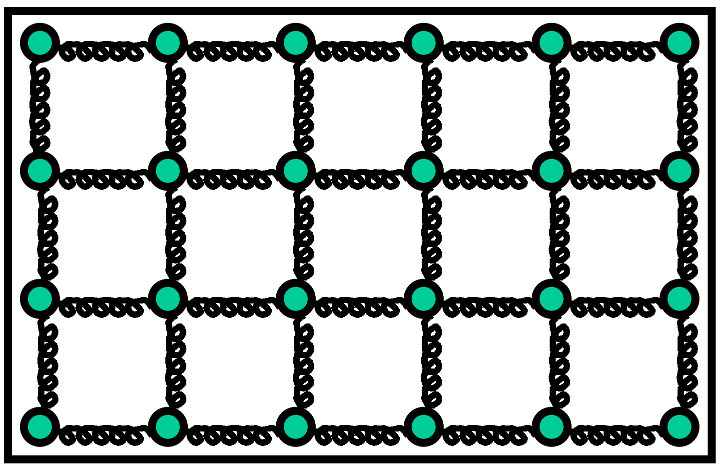
- ***Trasporto di energia***
  - Energia meccanica macroscopica ed "energia interna" di un sistema
  - Lavoro meccanico ("macroscopicamente ordinato")
  - Calore ("macroscopicamente disordinato")
- ***Equilibrio termico***
  - Principio Zero della Termodinamica
  - Temperatura: termometri, scale empiriche
- ***Gas ideali***
  - P.d.v. microscopico: teoria cinetica
  - Termometro a gas; temperatura assoluta (scala Kelvin)
  - P.d.v. macroscopico: equazioni di stato e relazione tra temperatura ed energia cinetica media

Energia di un sistema

- *Energia meccanica (macroscopica) = cinetica + potenziale*

$$E = K + U$$

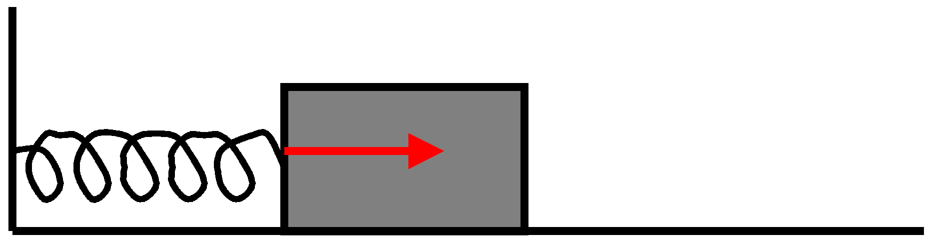
- *Energia interna = cinetica (componenti microscopici) + potenziale (legami chimici etc)*

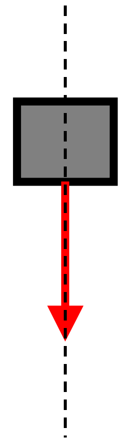


$$E_{\text{int}} = \sum_i \left(K_i + \sum_j U_{ij} \right)$$

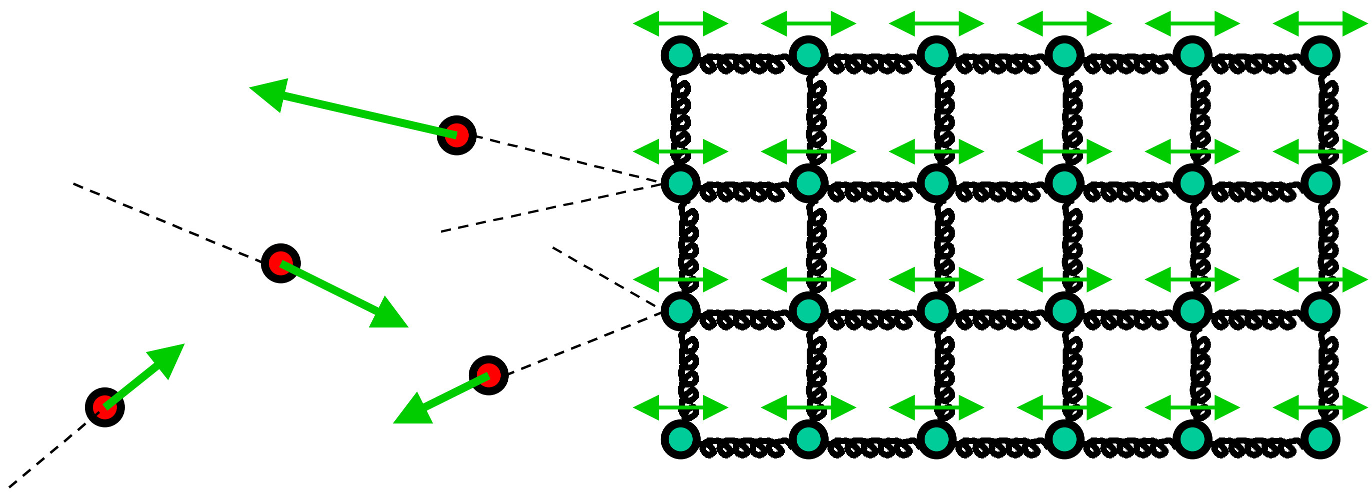
Trasferimenti di energia

- *"Lavoro"* (macroscopicamente "ordinato")





- *"Calore"* (macroscopicamente "disordinato")



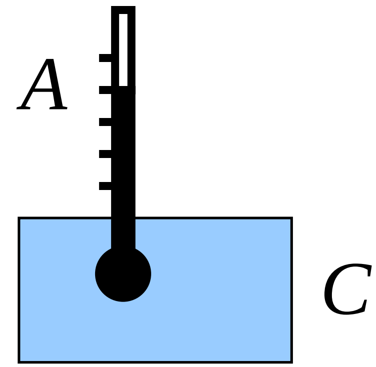
Trasmissione di "calore"

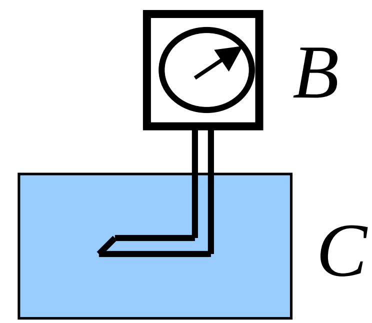
- ***"Calore"***
  - Nuova grandezza fisica, va definita operativamente (vedi prossima lezione):
    - metodi di misura del "calore scambiato" tra corpi o sistemi (calorimetria), unita` di misura ("caloria")
    - Nozioni preliminari necessarie: "equilibrio termico", "temperatura"
  - Si riconosce poi sperimentalmente (Joule) l'equivalenza tra lavoro e calore: il calore e` una forma di energia, si puo` misurare in joule
- ***Trasmissione del calore***
  - "conduzione"
    - p.es. nei solidi: trasferimento di energia senza spostamento di molecole
  - "convezione"
    - p.es. nei fluidi: trasferimento di energia con spostamento di molecole
  - "irraggiamento"
    - Anche nel vuoto: trasferimento per mezzo di onde elettromagnetiche

Equilibrio termico

Equilibrio termico

Due corpi isolati (…) dall'ambiente circostante sono in equilibrio termico fra loro se, una volta messi a contatto, tutte le grandezze fisiche che li caratterizzano (p.es. volume, resistenza elettrica, etc.) rimangono costanti nel tempo

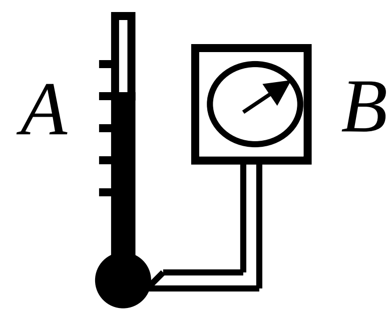




"Principio zero" della termodinamica

se "A in equilibrio con C" e "B in equilibrio con C" separatamente

allora: anche "A in equilibrio con B"



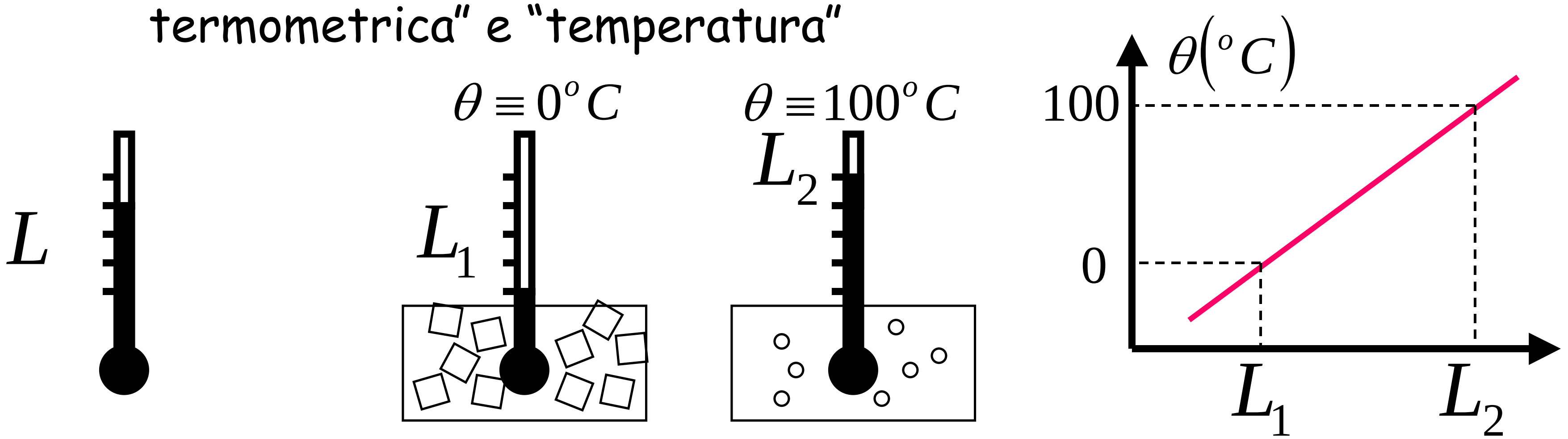
Temperatura (scale empiriche)

Due corpi in equilibrio termico hanno la stessa "temperatura"

Una "scala empirica di temperature" (p.es. Centigrada):

puo` essere ottenuta scegliendo:

- un "termometro" e la corrispondente "grandezza termometrica" (lunghezza, volume, resistenza elettrica…)
- Due condizioni di riferimento riproducibili (p.es. fusione del ghiaccio, ebollizione dell'acqua a pressione standard)
- Una relazione arbitraria (di solito: lineare) tra "grandezza termometrica" e "temperatura"



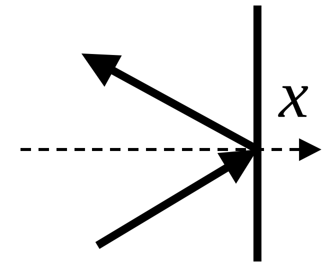
Dettagli su termometria e calorimetria?

Altri corsi (Fisica Tecnica etc….)

Ora: introduciamo piuttosto il significato fisico di temperatura, attraverso la
teoria cinetica dei gas

Gas monoatomici: modello cinetico - 1

- ***Interpretazione microscopica della pressione esercitata da un gas monoatomico sulle pareti rigide, in condizioni di equilibrio termico e meccanico***
  - Ipotesi (gas sufficientemente rarefatto):
    - N molecole puntiformi nel volume V, ciascuna di egual massa m
    - Urti contro le pareti: elastici
    - Interazioni tra molecole: trascurabili



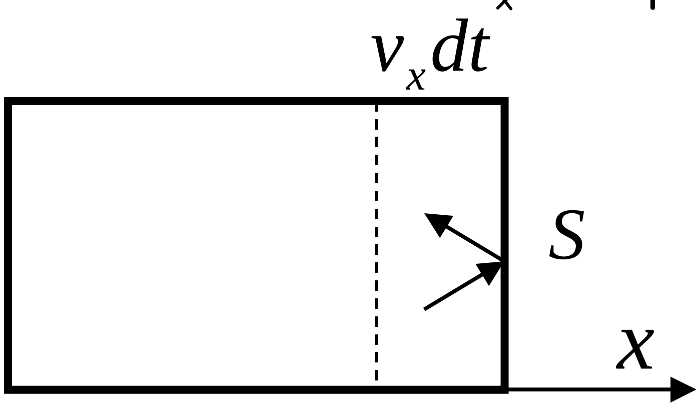
$$\Delta\vec{p} = -2mv_x\hat{i}$$

  - Forza normale esercitata in media **dalla** parete (sup. S); ingredienti:
    - Numero di urti nel tempo dt

$$\frac{1}{2}\frac{N}{V}Sv_x dt$$

    - Forza media F'_x in dt per urto (Impulso)

$$F'_x dt = d(mv_x) = -2mv_x$$



Forza media F_x totale **sulla** parete e pressione:

$$F_x = \frac{1}{2}\frac{N}{V}Sv_x 2mv_x \Rightarrow p = \frac{|F_x|}{S} = \frac{N}{V}mv_x^2$$

Gas monoatomici: modello cinetico- 2

- *Passando alla velocita` quadratica media e supponendo isotropa la distribuzione delle velocita`:*

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{3}\langle v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rangle = \frac{1}{3}\langle v^2 \rangle$$

$$p = \left(\frac{N}{V}\right) m \langle v_x^2 \rangle = \frac{2}{3}\left(\frac{N}{V}\right)\left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle$$

Energia cinetica media

Numero di molecole

$$pV = \frac{2}{3} N \langle K \rangle = \frac{2}{3} U_{\text{int}} \qquad U_{\text{int}} = N \langle K \rangle = N \left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle$$

  - Nelle ipotesi fatte l'energia interna U del gas e` solo cinetica, essendo trascurabili le forze a distanza fra molecole
  - Il prodotto pV risulta essere proporzionale all'energia interna U ed anche all'energia cinetica media per molecola

Gas: equilibrio termico

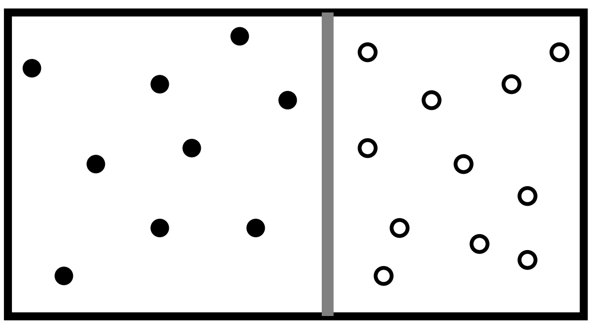
Equilibrio termico dal pdv microscopico?

Due diversi gas monoatomici separati da un pistone mobile:

- Equilibrio **meccanico**: pressioni uguali, cioe` energie cinetiche *per unita` di volume* uguali

$$p_1 = p_2 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{N_1}{V_1}\left\langle \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \right\rangle = \frac{N_2}{V_2}\left\langle \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \right\rangle$$

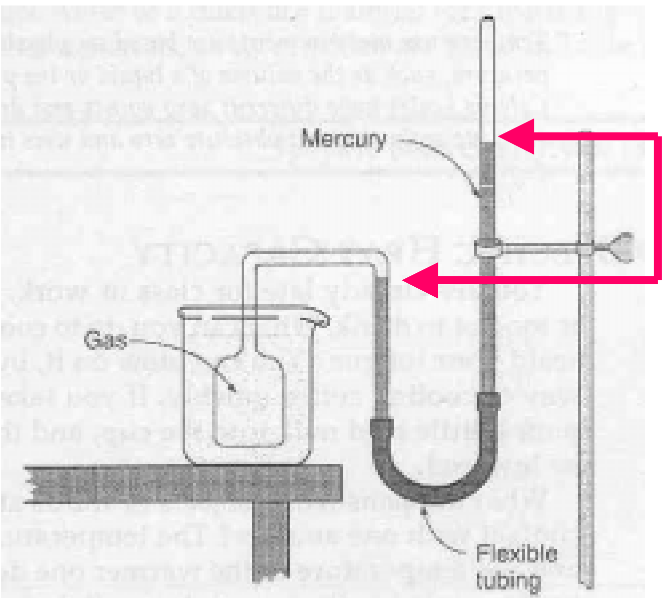
- Equilibrio **termico** (dopo un tempo sufficientemente lungo): ragionando sugli urti fra molecole diverse di due gas mescolati oppure sugli urti tra molecole e parete divisoria, si trova che devono risultare uguali anche le energie cinetiche medie *per molecola*:



$$\left\langle \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \right\rangle = \left\langle \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \right\rangle$$

L'energia cinetica media per molecola risulta essere un *indice di equilibrio termico*, come la temperatura!

Termometro a gas e temperatura assoluta



Termometro a gas:
grandezza termometrica scelta: p (a V costante)

$$h \quad \Rightarrow \quad p$$

Stato di riferimento: punto triplo H_2O (0.01°C), cui viene assegnato (scala Kelvin): $T_{tr} = 273.16K$

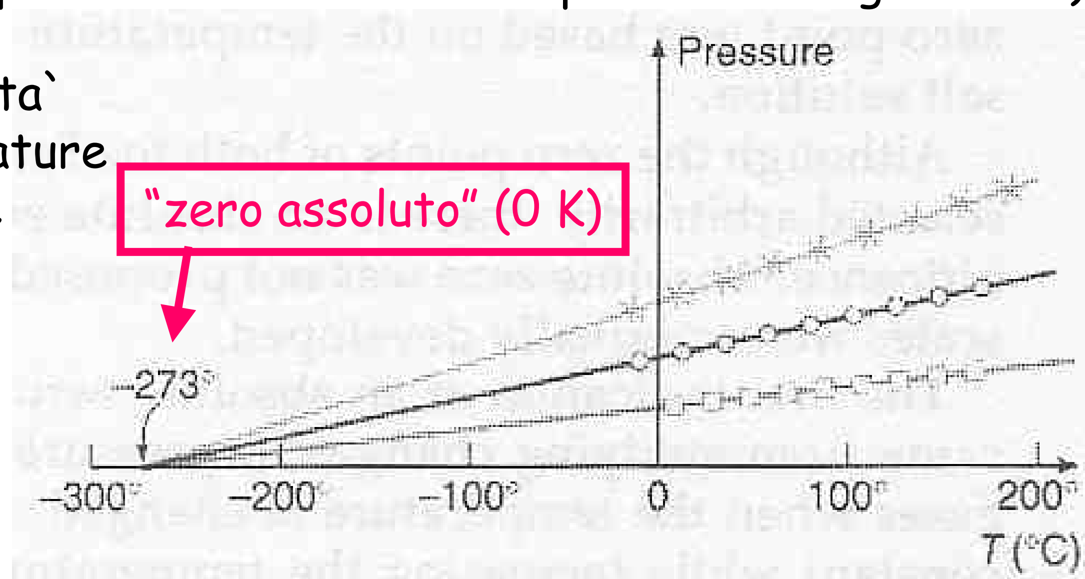
(Nel limite di piccola pressione, con questo metodo la temperatura misurata e` indipendente dal gas usato)

Indipendentemente dal tipo e quantita` di gas, estrapolando a basse temperature la dipendenza lineare della pressione dalla temperatura (°C), si trova che:

$$\theta\left({}^{o}C\right) \to -273.15^{o}C \quad \Rightarrow \quad p \to 0$$

Scala "assoluta" Kelvin:

$$T\left(K\right) = \theta\left({}^{o}C\right) + 273.15$$



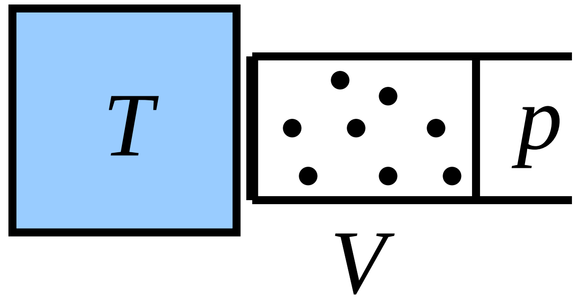
Gas "ideali": equazione di stato

- **Leggi sperimentali:**

$$V = \text{cost.} \quad \Rightarrow \quad p \propto T$$

$$p = \text{cost.} \quad \Rightarrow \quad V \propto T$$

$$T = \text{cost.} \quad \Rightarrow \quad p \propto V^{-1}$$



$$n = 1 mol,\ p_0 = 1 atm, T_0 = 273.15 K \quad \Rightarrow \quad V = 22.4 \times 10^{-3} m^3$$

- **Riassumibili nell'"equazione di stato" (sperimentale)**

$$\boxed{pV = nRT} \qquad R = 8.31\, Pa\, m^3\ K^{-1}$$

Costante universale dei gas

numero di moli

Temperatura assouta (K)

Conclusioni

- *Confrontando l'equazione di stato (sperimentale) con l'equazione ottenuta dalla teoria cinetica:*

$$pV = \frac{2}{3} N \left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle$$

$$pV = nRT$$

$$\Rightarrow \quad \left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle = \frac{3}{2}\frac{n}{N} RT = \frac{3}{2}\frac{R}{N_A} T = \frac{3}{2} k_B T$$

  - La temperatura assoluta T e` una misura della energia cinetica media per molecola;
  - la costante di Boltzmann $\mathbf{k_B}$ permette di convertire (joule ⇔ kelvin)

$$k_B = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K} \qquad (\text{numero di Avogadro}: \quad N_A = 6.02 \times 10^{-23} mol^{-1})$$