“Complementi di Fisica” Lectures 2, 3

Livio Lanceri
Università di Trieste

Trieste, 25/26-09-2012

Reminder: Classical Particles and Waves

Particles

- Forces, acceleration, velocity (momentum), trajectory
- Potential energy and kinetic energy

Waves

- Wave equation and solutions
- Wave superpositions
- Energy flow

Particles: from forces…

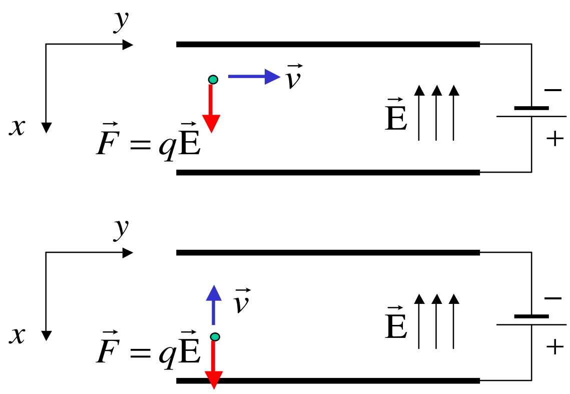
Newton's Law:

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

differential equation linking forces with rate of change of momentum

a specific example: electrostatic force on an electron (mass m, charge q<0)

$$\vec{F} = q\vec{\mathrm{E}}$$



Electrostatic field:

$$\mathrm{E}_x = -\frac{dV}{dx}$$

Electrostatic potential:

$$\Delta V = V(x) - V(0) = -\int_0^x \mathrm{E}_x dx'$$

(defined as force and work per unit charge)

… to trajectories

Newton's Law:

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

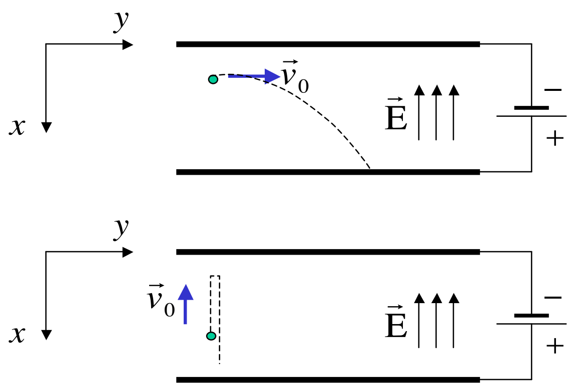
plus initial conditions

$$\vec{r}_0 = \vec{r}(t_0), \quad \vec{v}_0 = \vec{v}(t_0)$$

Unique solution: "trajectory" = = position vs time

$$\vec{r} = \vec{r}(t)$$

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t)$$



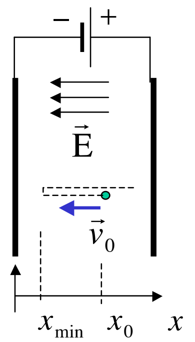
Particles: energy

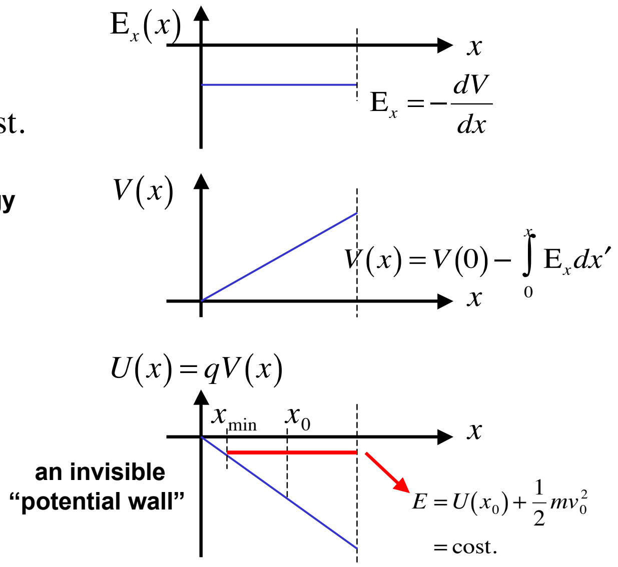
If forces are conservative:

$$E = K + U = \frac{p^2}{2m} + U = \text{cost.}$$

Kinetic Energy **Potential Energy**

Example:
electron
(q < 0)





Waves: equation…

This differential equation with partial derivatives describes several different phenomena:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

z **space coordinate**

t **time**

u **constant parameter (propagation velocity)**

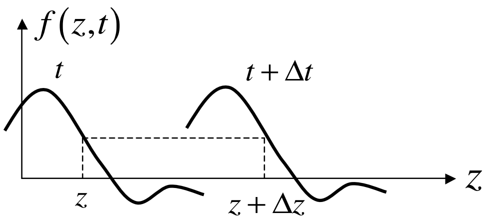
f **e.m. waves: electric (magnetic) field**
sound waves: local gas pressure
transverse waves on a rope: displacement
etc…

… and solutions

$f(\xi),\quad \xi = z \pm ut$ is a solution $\forall f$, easy to check :

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{d^2 f}{d\xi^2}, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = u^2 \frac{d^2 f}{d\xi^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

Interpretation? Family of functions of z: varying the parameter t, they *"move" along z with speed u*



$$u = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \Delta z = u\Delta t \quad \Rightarrow$$

$$f(z,t) = f(z-ut) =$$
$$= f(z+\Delta z - \Delta z - ut) =$$
$$= f(z+\Delta z - u\Delta t - ut) =$$
$$= f(z+\Delta z, t+\Delta t)$$

Sinusoidal waves

Sinusoidal waves: particularly useful
- **if the source of the wave is a harmonic oscillator, and:**
- **can be used in Fourier analysis to approximate any wave**

real form:

$$f(z,t) = f_0 \cos[k(z-ut)] = f_0 \cos(kz - kut) = f_0 \cos(kz - \omega t)$$

dimensions:

$$[z] = [ut] = [L] \qquad [ku] = [\omega] = [t^{-1}] = [T^{-1}]$$
$$[k] = [L^{-1}]$$

$$\boxed{u = \frac{\omega}{k} = v_f \quad \text{“phase velocity”}}$$

complex exponential form:

$$f(z,t) = f_0 e^{ik(z-ut)} =$$
$$= f_0[\cos(kz-\omega t) + i\sin(kz-\omega t)]$$

Sinusoidal waves

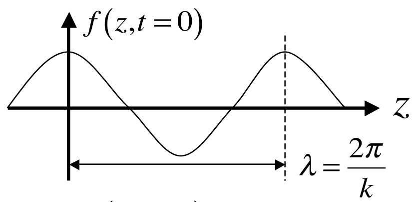
Wave-length λ and wave-number k **(real form for simplicity)**

At fixed $t=0$

$$f(z,t=0)=f_0\cos(kz)$$

$$\lambda=\frac{2\pi}{k}$$

λ "space period"
k "space frequency"



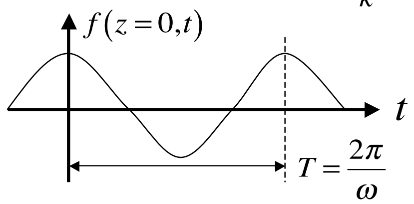
Period T and frequency ν

At fixed $z=0$

$$f(z=0,t)=f_0\cos(\omega t)$$

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{1}{\nu}$$

T "time period"
ν "time frequency"



Phase velocity: $v_f=\frac{\omega}{k}=\frac{\lambda}{T}=\lambda\nu$

Light (e.m.) waves

From Maxwell equations for electric and magnetic fields:
- e.m. fields can propagate in a vacuum!
- in the wave equation fror e.m., derived from Maxwell eq.s:

$$u=v_f=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}=c\approx 3\times10^8\ m/s$$

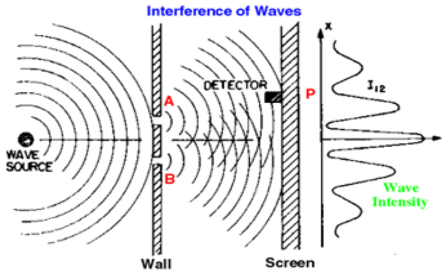
Table 1.3. THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

Type of Radiation		*Frequency*	*Wavelength*	*Quantum Energy*
"Wave" region	radio waves	10^9 Hz and less	300 mm and longer	0.000004 eV and less
	microwaves	10^9 Hz to 10^{12} Hz	300 mm to 0.3 mm	0.000004 eV to 0.004 eV
"Optical" region	infrared	10^{12} Hz to 4.3×10^{14} Hz	300 μ to 0.7 μ	0.004 eV to 1.7 eV
	visible	4.3×10^{14} Hz to 5.7×10^{14} Hz	0.7 μ to 0.4 μ	1.7 eV to 2.3 eV
	ultraviolet	5.7×10^{14} Hz to 10^{16} Hz	0.4 μ to 0.03 μ	2.3 eV to 40 eV
"Ray" region	x-rays	10^{16} Hz to 10^{19} Hz	300 Å to 0.3 Å	40 eV to 40,000 eV
	gamma rays	10^{19} Hz and above	0.3 Å and shorter	40,000 eV and above

Note: The numerical values are only approximate and the division into the various regions are for illustration only. They are quite arbitrary.

Waves: diffraction

Wave equation: linear
⇒ linear combinations of solutions are good solutions
⇒ "superposition principle"
⇒ example 1: diffraction



Electric field from point source i

$$\vec{E}_i(\vec{r},t)=\vec{E}_0(\vec{r})e^{j(\omega t-\vec{k}\bullet\vec{r})}$$

Superposition from slits A and B

$$\vec{E}=\vec{E}_A+\vec{E}_B$$

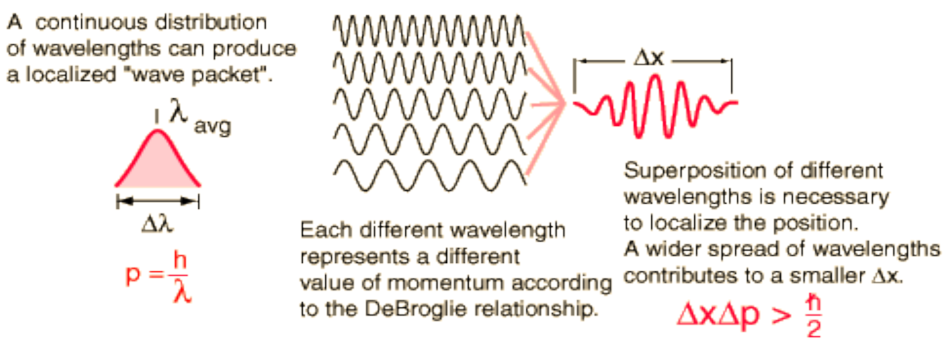
Intensity (~ energy)

$$\langle I(\vec{r})\rangle_t=\vec{E}(\vec{r},t)\vec{E}^*(\vec{r},t)$$

25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 11

Waves: packets

Wave equation: linear
⇒ linear combinations of solutions are good solutions
⇒ "superposition principle"
⇒ example 2: wave packets



From: HyperPhysics (©C.R. Nave, 2003)

25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 12

Waves: energy flow

Even if the medium does not move
(for instance gas for sound waves; no medium needed for e.m.)
waves carry both energy and momentum!

For e.m. waves (…), the energy flux is described by:

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \qquad I = \frac{1}{\mu_0} E\,B = E\,H$$

"Poynting vector" [W/m^2] **"Irradiance"**

$$[E] = V/m = N/C$$
$$[B] = (N/C)(m/s)$$
$$= N/(A \cdot m) = tesla = T$$
$$[H] = A/m$$
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ Tm/A$$

A beam of light exerts pressure *P* on a black surface: $P = \frac{I}{c}$

(This is related to the momentum of photons… more on this later!)

Classical Particles and Waves

Summary of the classical point of view:

Point-like particles (for instance electrons):
- ***localized* in space, with well defined *momentum* (velocity)**
- **predictable *trajectories*, if forces acting on them are known**
- **associated *energy* (potential and kinetic)**

Waves (for instance e.m. waves)
- ***distributed* over all space, if *wave number* (frequency) is well defined**
- **superpositions of waves**
  - ***"diffraction"* and other interference phenomena in *space***
  - ***"wave packets":* only *partially localized* in space, time and frequancy**
- **associated *energy flow***

Classical Particles and Waves

In the next lectures: experimentally,

Can waves (e.m., …) behave like "particles"?

Can particles (electrons, …) behave like "waves"?

Thermodynamics: a reminder

Temperature and ideal gases

1st principle:
work, heat, energy conservation

2nd principle:
restrictions on energy exchange processes, entropy

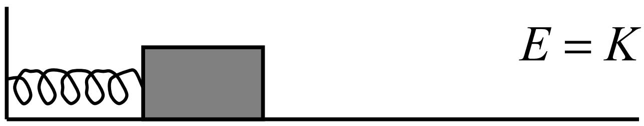
Thermodynamic equilibrium = ?

Temperatura e gas ideali

- Trasporto di energia
  - Energia meccanica macroscopica ed "energia interna" di un sistema
  - Lavoro meccanico ("macroscopicamente ordinato")
  - Calore ("macroscopicamente disordinato")
  - (diffusione, cioè trasporto di particelle: verrà discusso in seguito)
- 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

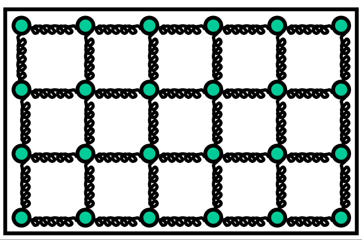
Energia di un sistema

- Energia meccanica (macroscopica) = cinetica + potenziale



$$E = K + U$$

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



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

Termodinamica - sommario

Primo Principio: $\Delta U = Q - W$

Calore scambiato + lavoro scambiato da un sistema = variazione di energia interna del sistema

Secondo Principio:

Un processo (ciclico) il cui unico risultato sia di prelevare calore da un serbatoio e convertirlo integralmente in lavoro e` impossibile

Teorema di Carnot

Nessuna macchina termica che preleva calore Q1 a temperatura T1 e cede Q2 a temperatura T2 puo` fornire piu` lavoro (avere rendimento piu elevato) di una macchina reversibile, per la quale: $W = \eta Q_1 = (1 - T_2/T_1)Q_1$

Entropia

Se un sistema scambia reversibilmente Q alla temperatura T, la sua entropia varia di $\Delta S = (Q/T)_{rev}$

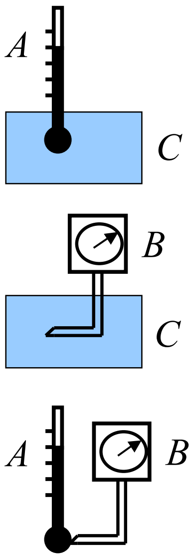
inoltre S = 0 a T = 0 (una delle formulazioni del “Terzo Principio”)

Per l’universo o un sistema isolato, l’entropia **totale** di tutte le sue parti non cambia per trasformazioni reversibili, aumenta sempre per trasformazioni irreversibili.

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”

Equilibrio termodinamico - 1

Equilibrio "termodinamico" dal pdv microscopico?

Tre tipi di "contatto" tra sistemi:

contatto **meccanico**: possibilità di scambio energetico sotto forma di lavoro (che implica variazioni di volume)

contatto **termico**: scambio energetico possibile sotto forma di calore

contatto **diffusivo**: se è possibile uno scambio di particelle (molecole, etc.)

Equilibrio termodinamico - 2

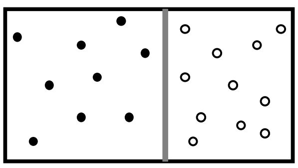
Equilibrio "termodinamico" dal pdv microscopico?

Esempio: due diversi gas monoatomici separati da un pistone mobile:

Equilibrio **meccanico**: pressioni uguali, cioe` energie cinetiche *per unita` di volume* uguali (lavoro netto scambiato: nullo)

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

Equilibrio **termico** (dopo un tempo sufficientemente lungo: scambio di calore nullo): 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*:



$$T_1 = T_2 \quad \Leftrightarrow \quad \left\langle \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \right\rangle = \left\langle \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \right\rangle$$

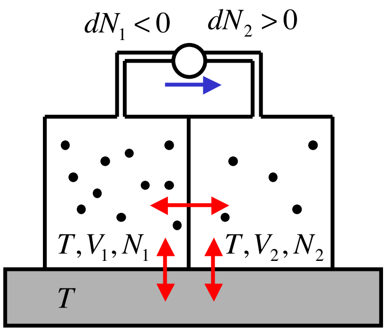
L'energia cinetica media per molecola risulta essere un *indice di equilibrio termico*, come la temperatura!

Equilibrio termodinamico - 3

Equilibrio "termodinamico" dal pdv microscopico?

Gas in recipienti messi in comunicazione fra di loro (contatto termico e "diffusivo") ed in equilibrio termico con un serbatoio a temperatura *T*:

Equilibrio **diffusivo**: se eguali "potenziali chimici" nei due recipienti per ciascuna specie di gas presente



$$\mu_1 = \mu_2 \quad \Leftrightarrow \quad \left(\frac{\partial F_1}{\partial N_1}\right)_{T,V_1} = \left(\frac{\partial F_2}{\partial N_2}\right)_{T,V_2}$$

$F \equiv U - TS$ "energia libera"

S "entropia"

25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 23

Ulteriori sviluppi…

- Generalizzando e approfondendo:
  - Primo principio: scambio di calore, lavoro, particelle (contatto anche diffusivo): $$dU = TdS - pdV + \mu dN$$
  - Temperatura *T*, pressione *p* e potenziale chimico μ come derivate parziali di entropia *S*, energia interna *U*, ed energia libera *F* date come funzioni delle loro variabili indipendenti "naturali":

	$S(U,V,N)$	$U(S,V,N)$	$F(T,V,N)$
$T:$	$\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_{V,N}$	$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,N}$	indep.variab.
$p:$	$\frac{p}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_{U,N}$	$-p = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,N}$	$-p = \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_{T,N}$
$\mu:$	$-\frac{\mu}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial N}\right)_{U,V}$	$\mu = \left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_{S,V}$	$\mu = \left(\frac{\partial F}{\partial N}\right)_{T,V}$

25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 24

Lecture 2 - Homework

- **Exercise 2.1:** Consider the state equation for ideal gases, $pV=nRT=Nk_BT$, where p is the gas pressure, V the occupied volume, $N=nN_A$ the number of molecules expressed in terms of number of moles and Avogadro's number, R the universal gas constant, and T the absolute temperature in the Kelvin scale. In the S.I. system, check that the product pV is dimensionally an energy, and compute the value of Boltzmann's constant k_B from R and N_A (see tables)
- **Exercise 2.2:** Find the kinetic energy, expressed in joule, of an electron accelerated from rest (zero velocity) by an electrostatic field, through electrostatic potential differences ΔV=100 V and ΔV=10 GV
- **Exercise 2.3:** In a modern particle accelerator, an electron beam travels at a speed very close to the speed of light c. If the beam electrical current is about 1A, how many electrons cross a given section of the vacuum pipe per second?
- **Exercise 2.4:** By substitution, check that $f(z,t) = A \exp [i(kz - \omega t)]$ is a solution of the differential wave equation discussed in this lecture, with "phase velocity" $u=\omega/k$.
- **Exercise 2.5:** An e.m. wave propagates at the speed of light c. If the wavelength is about 500 nm, what is the electric field oscillation frequency at a given point in space?

Back-up slides

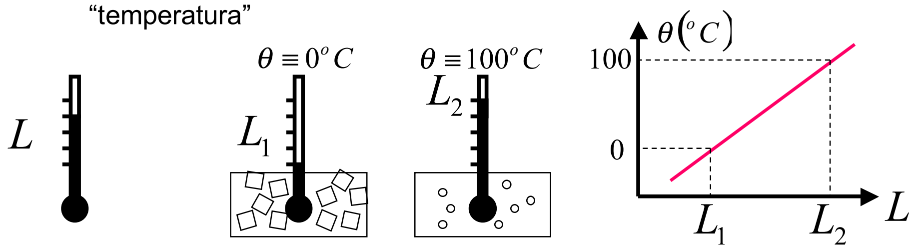
Temperatura (scale empiriche)

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"



25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 27

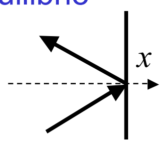
Dettagli su termometria e calorimetria?

Altri corsi (Fisica Tecnica etc.…)

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

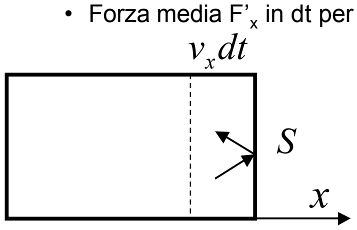
Gas monoatomici: modello cinetico - 1

- 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 $\quad \frac{1}{2}\frac{N}{V}Sv_x dt$
    - Forza media F'_x in dt per urto (Impulso) $\quad F'_x dt = d(mv_x) = -2mv_x$



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\`:

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

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

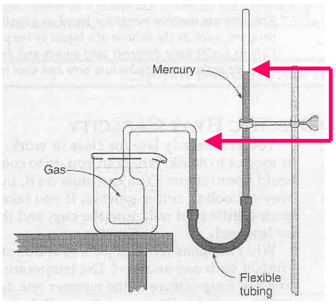
Energia cinetica media

Numero di molecole

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

  - Nelle ipotesi fatte l'energia interna U_{int} del gas e\` solo cinetica, essendo trascurabili le forze a distanza fra molecole (attenzione alle notazioni: in precedenza chiamata E_{int})
  - Il prodotto pV risulta essere proporzionale all'energia interna U_{int} ed anche all'energia cinetica media per molecola

Termometro a gas e temperatura assoluta



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

$h \Rightarrow p$

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

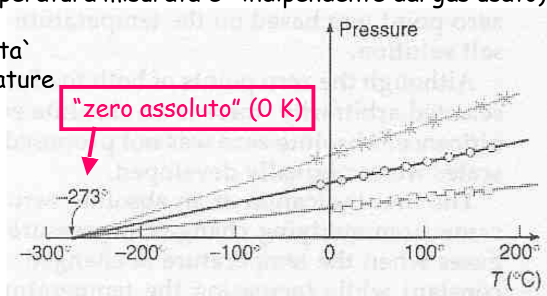
(Nel limite di piccola pressione, con questo metodo la temperatura misurata e` indipendente dal gas usato)

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:

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

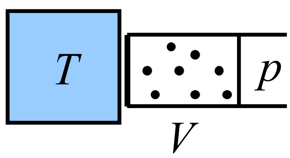


25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 31

Gas "ideali": equazione di stato

- Leggi sperimentali:

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



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

- 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)

25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 32

Temperatura e costante di Boltzmann

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

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

$$pV = nRT$$

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

  – 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)

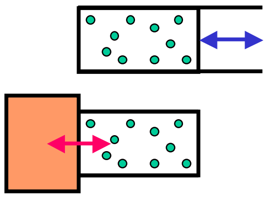
$$k_B = \frac{R}{N_A} = 1.38\times10^{-23}\frac{J}{K} \qquad (\text{numero di Avogadro}: \quad N_A = 6.02\times10^{-23}mol^{-1})$$

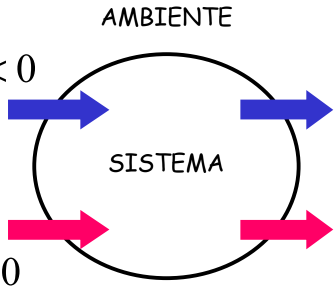
Principi della termodinamica

- Trasferimenti di energia tra sistemi:
  – lavoro W e calore Q
- Primo Principio della Termodinamica
  – Energia interna U di un sistema, lavoro, calore: bilancio energetico (conservazione dell'energia)
- Trasformazioni termodinamiche
  – Sistema e ambiente
  – Trasformazioni reversibili e irreversibili
  – Macchine termiche cicliche, rendimento
- Il secondo principio della termodinamica
  – Non tutte le trasformazioni compatibili con il primo principio sono possibili….
  – Enunciato di Kelvin ("macchine termiche")
  – Enunciato di Clausius ("macchine frigorifere")
  – Entropia

Trasferimenti di energia tra sistemi

- "ordinati": lavoro W
  - p.es.: espansione o compressione di un gas
- "disordinati: calore Q
  - p.es.: contatto tra corpi a temperature diverse





$W_{in} = -|W_{in}| < 0$

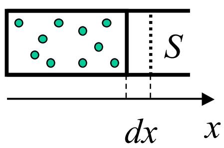
$W_{out} = |W_{out}| > 0$

$Q_{in} = |Q_{in}| > 0$

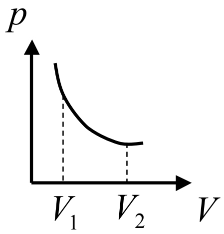
$Q_{out} = -|Q_{out}| < 0$

Lavoro termodinamico

- P.es. Espansione o compressione di un gas:

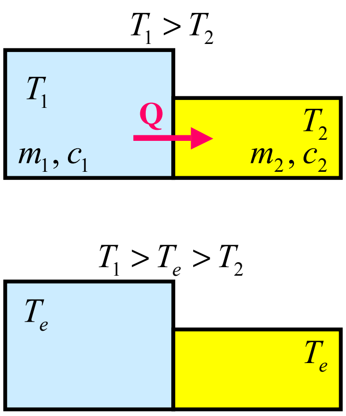


$$\delta W = Fdx = pSdx = pdV \quad (dV > 0 \Rightarrow \delta W > 0)$$



$$W = \int_{V_1}^{V_2} p(V)dV$$

Calore e calori specifici



- Definizione operativa
  - Calore Q dal corpo piu` caldo a quello piu` freddo
  - Corpo 1: cede calore $Q_1 < 0$

$$Q_1 = m_1 c_1 (T_e - T_1) < 0$$

  - Corpo 2: acquista calore $Q_2 = - Q_1 > 0$

$$-Q_1 = Q_2 = m_2 c_2 (T_e - T_2) > 0$$

  - Calore specifico di riferimento e unita` di misura:

$$c_{H_2O} = 1 \frac{kcal}{kg\ K}$$

Equivalenza tra lavoro e calore

- La temperatura di un corpo puo` essere aumentata eseguendo una quantita` nota W (joule) di lavoro meccanico (attrito)
- Il corpo puo` essere riportato allo stato iniziale facendogli cedere calore (Q (calorie), misurabile)
- Si trova che il rapporto e` sempre lo stesso:

$$\frac{W}{Q} = 4.19 \frac{joule}{calorie}$$

- Conclusione: W, Q equivalenti: entrambi sono forme di energia scambiata fra sistemi, misurabili in joule

Calori specifici…

Lo studio dei

- "calori specifici" (calore scambiato per unita` di sostanza per una variazione unitaria di T)
- "calori latenti" (richiesti per ottenere transizioni di fase a T costante)

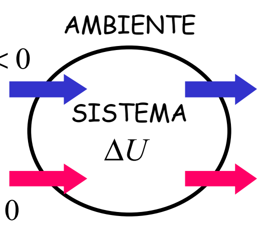
e` importante perche` fornisce informazioni sulla struttura microscopica e le energie di legame

Primo Principio della Termodinamica

- Energia interna, lavoro, calore: bilancio energetico (conservazione dell'energia)
  - Se in una trasformazione termodinamica un sistema scambia lavoro totale W e calore totale Q con l'ambiente, l'energia interna del sistema subisce una variazione ΔU:

$$\Delta U = Q - W \qquad dU = \delta Q - \delta W$$

$W_{in} = -|W_{in}| < 0$ $\qquad W_{out} = |W_{out}| > 0$ $\qquad W = W_{in} + W_{out}$



$Q_{in} = |Q_{in}| > 0$ $\qquad Q_{out} = -|Q_{out}| < 0$ $\qquad Q = Q_{in} + Q_{out}$

Primo Principio della Termodinamica

- Alcune affermazioni non banali implicite nell'enunciato:
  - Lavoro W e calore Q sono entrambi "energie scambiate" dal sistema;
  - W e Q non sono, singolarmente considerate, "funzioni di stato": in generale *a trasformazioni diverse* tra gli stessi due stati (iniziale e finale) *corrispondono lavori e calori scambiati diversi*
  - La combinazione Q-W e` invece una "funzione di stato", e rappresenta la variazione dell' "energia interna del sistema" tra stato iniziale e finale della trasformazione
  - Se la trasformazione e` ciclica (stato finale = stato iniziale), allora su un ciclo:

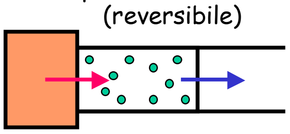
$$\Delta U = 0 = Q - W \quad \Rightarrow \quad Q = W$$

25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 41

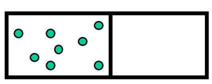
Trasformazioni termodinamiche

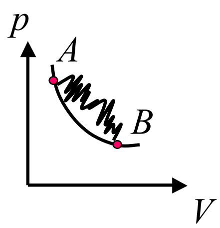
- Trasformazioni reversibili:
  - Se il sistema ed anche l'ambiente possono entrambi essere riportati allo stato iniziale
  - (in pratica: approssimabili con trasf. quasi statiche, senza dissipazione di energia meccanica, con piccole differenze di temperatura)
- Trasformazioni irreversibili:
  - Se, quando il sistema viene riportato allo stato iniziale, l'ambiente e` irrimediabilmente modificato
  - (in pratica: tutte le trasformazioni reali)
- Esempi

Espansione isoterma (reversibile)



Espansione adiabatica contro il vuoto (irreversibile)





25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 42

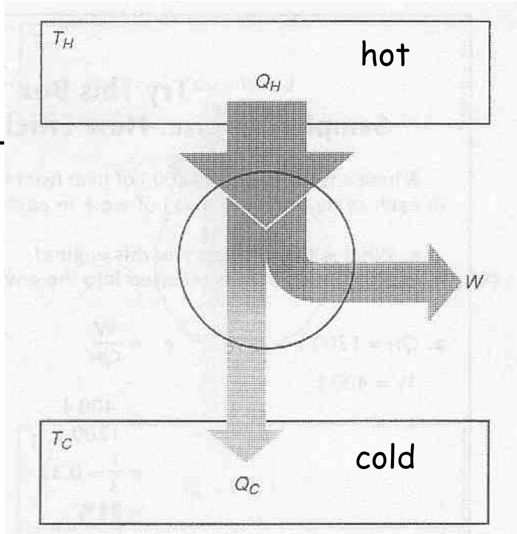
Macchine termiche cicliche

Riconducibili allo schema:

Calore $Q_H > 0$ prelevato a T_H

Lavoro fornito $W > 0$

Calore $Q_C < 0$ ceduto a $T_C < T$



Rendimento

$$\eta \equiv \frac{W}{Q_H} = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|}$$

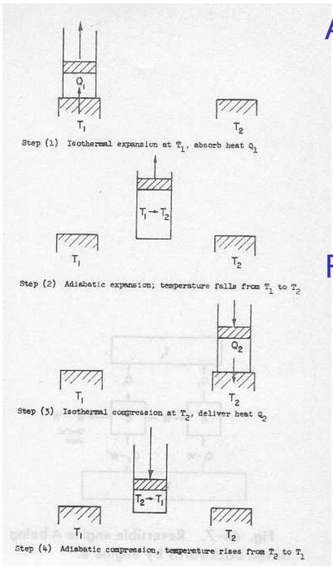
Per il Primo Principio:

$$\Delta U = 0 \quad \text{su un ciclo} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad W = Q = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|$$

25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 43

Ciclo reversibile di Carnot



Analisi fatta da Carnot:

Ciclo idealizzato con rendimento “massimo”

- ab: espansione isoterma reversibile a T1
- bc: espansione adiabatica rev. (da T1 a T2)
- cd: compressione isoterma rev. a T2
- da: espansione adiabatica rev. (da T2 a T1)

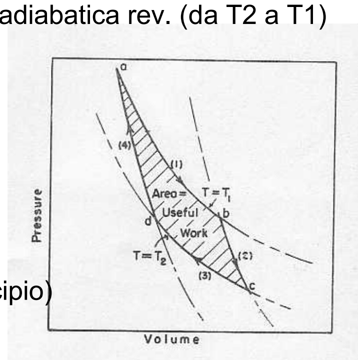
Risultati:

Rendimento

$$\eta \equiv \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Massimo !!!

(dim: Secondo Principio)



25-09-2012 L.Lanceri - Complementi di Fisica - Lectures 2, 3 44

Macchine frigorifere

Frigoriferi e pompe di calore

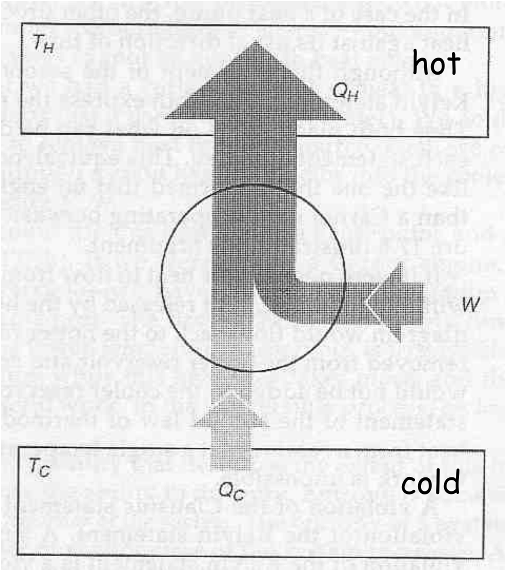
Lavoro "assorbito" **W < 0**

Calore **Q_L > 0** prelevato a **T_L**

Calore **Q_H < 0** ceduto a **T_H > T_L**

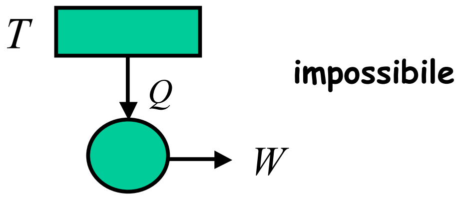
Per il Primo Principio:

$$\Delta U = 0 \quad \text{su un ciclo} \quad \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \quad W = Q = Q_H + Q_C < 0 \quad \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \quad Q_H = W - Q_C \quad \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \quad |Q_H| = |W| + |Q_C|$$



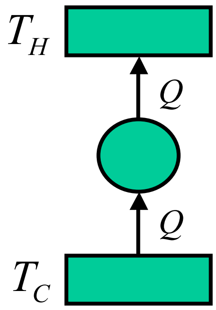
Il secondo principio della termodinamica

- Non tutte le trasformazioni compatibili con il primo principio sono possibili….
- Enunciato di Kelvin
  - Nessuna macchina termica che lavori continuamente (ciclicamente) puo` prelevare calore Q > 0 da una sola sorgente a una temperatura T e convertirlo completamente in lavoro W > 0



Il secondo principio della termodinamica

- Enunciato di Clausius (equivalente a quello di Kelvin)
  - Del calore non puo` fluire da un corpo piu` freddo a uno piu` caldo se non e` coinvolto qualche altro processo



impossibile

L'entropia - 1

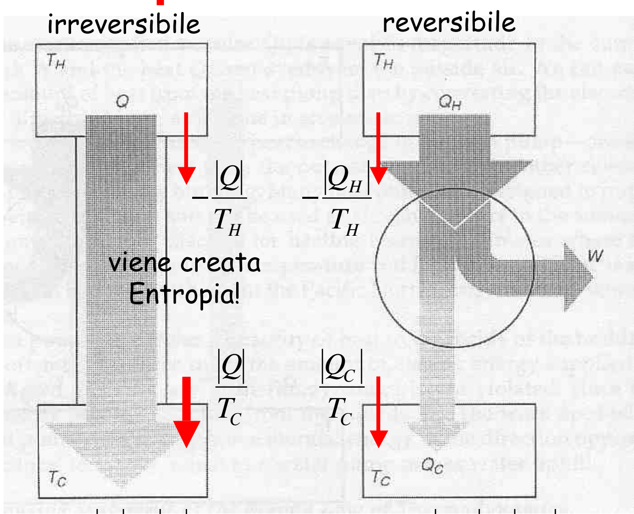
Funzione di stato S:

La sua variazione per ogni parte del sistema e` definita da:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev}$$

Se l'entropia totale aumenta, non e` stato ottenuto il massimo lavoro possibile… ad esempio: lavoro perso nel primo caso:

$$T_C \Delta S = W_{perso}$$



$$\Delta S = -\frac{|Q|}{T_H} + \frac{|Q|}{T_C} > 0 \qquad \Delta S = -\frac{|Q_H|}{T_H} + \frac{|Q_C|}{T_C} = 0$$

L'entropia - 2

- Dal pdv microscopico: "probabilita` termodinamica w" dello stato (misura del "disordine"); entropia:

$$S = k_B \ln w$$

  - Si dimostra che questa definizione e` equivalente alla definizione macroscopica
  - Tutta la termodinamica (inclusi i principi "classici") può essere riformulata in termini statistici… con significato fisico più evidente dal punto di vista microscopico

Entropia e Secondo Principio

Per l'universo o per un sistema isolato, l'entropia **totale** di tutte le sue parti non cambia per trasformazioni reversibili, aumenta sempre per trasformazioni irreversibili.

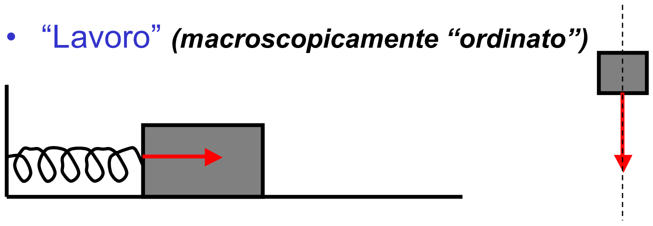
NB se il sistema non e` isolato, la sua entropia puo` diminuire!

Questo enunciato include i precedenti, che possono essere analizzati anche in termini di variazione di entropia

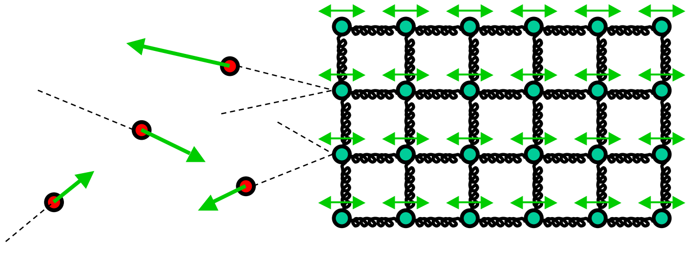
Le "impossibilita`" dichiarate nel Secondo Principio sono di natura statistica: con un elevato numero di molecole, certe trasformazioni sono "estremamente improbabili" (es…)

Trasferimenti di energia

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



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



Trasmissione di "calore"

- "Calore"
  - Nuova grandezza fisica, va definita operativamente:
    - 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