Elettromagnetismo

Corso di Fisica per CQPS

AA 2008/09

Elettrostatica

Carica elettrica, preliminari

- la materia è costituita da atomi (Ø ~1 Å = 10^{-10} m)
- atomo: nucleo (Ø ~ 10^{-15} m), composto di p e n, attorno a cui ruotano gli elettr., in numero uguale ai p
- forza all'interno degli a.: attrattiva, gli el. che girano intorno al nucleo sono trattenuti da una f. centripeta
- forza fra a.: si osserva sperim. che solidi e liquidi sono quasi incompressibili → gli a. non possono essere avvicinati troppo: f. repulsiva

⇨ non si può trattare della f. gravit., sempre attrattiva,

⇨ nuova f. attrattiva fra el. e p, repulsiva fra el. ed el. (o fra p e p), nulla fra p e n (o fra el. e n), dovuta a una carica elettrica posseduta da el. e p, non da n

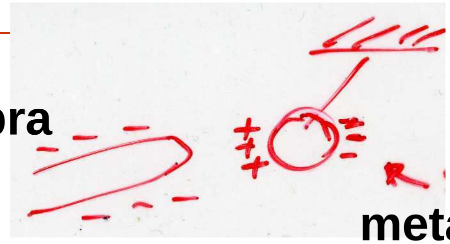
Carica elettrica

- f. elettrostatica: per avere sia attrazione che repulsione occorrono cariche di due segni + e –, quelle di segno opposto si attraggono, mentre quelle di segno uguale si respingono
- la materia ordinaria è neutra, contiene cioè tante cariche +ve quante –ve, e non esercita azioni elettrostatiche
- quando però ad un corpo si tolgono o si aggiungono cariche, le f. e.s. si manifestano: elettrizzazione ad es.
  - strofinando con una pelliccia o panno di lana/seta una bacchetta di ambra (ηλεκτρον in greco), ebanite, zolfo, vetro, plexiglas, ceramica ... si può attirare una pallina leggera sospesa ad un filo etc.
  - togliendosi una camicia sintetica ci si sente ‘elettrici’

Carica elettrica (2)

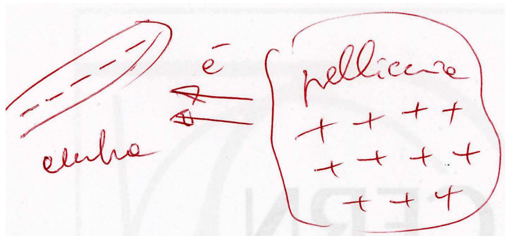
- si osserva

ambra



metallo

  - un'azione a distanza (vicinanze!)
  - elettrizzazione diversa: per convenzione (Bj. Franklin) –va quella dell'ambra, +va quella del vetro
- studio sperim. dell'elettrizzazione (triboelettricità):
  - induzione e.s., un corpo carico attira uno scarico
  - la carica el. si può trasmettere per contatto, c'è passaggio da un corpo ad un altro: si conserva



  - corpi isolanti: l'elettrizzazione è localizzata
  - corpi conduttori: " si propaga
  - in un conduttore in equilibrio, la carica si trova in superficie

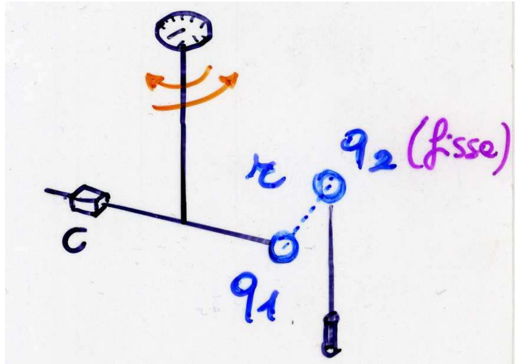
Carica elettrica e forza elettrostatica

- f. elettrostatica $\propto$ carica (al prodotto delle cariche che interagiscono) (C. Coulomb)
  " $\propto 1/r^2$ "

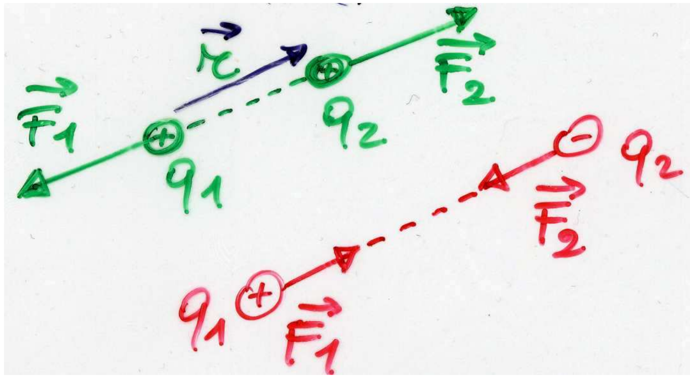
- $\exists$ e^-, carica $-e = -1.60\ 10^{-19}$ C (J.J. Thomson)
- $\exists$ p, " $+e = -(-e)$ "

- la carica è quantizzata $\pm Ne$ con N intero (quarks a parte, $\pm\frac{1}{3}$ e, $\pm\frac{2}{3}$ e) (R.A. Millikan)
- gli atomi sono neutri, +Ze nel nucleo, –Ze nella nuvola elettronica (E. Rutherford e N. Bohr)
- gli e^- interni sono ben legati, quelli esterni più asportabili

Forza elettrostatica, legge di Coulomb



- (*)bilancia di torsione,cariche~puntif. ($r_{sferette}$ << distanza): es. con sferette uguali, per contatto, q, q/2, q/4 … per induzione (e messa a terra), -q, -q/2, -q/4 … → ‘azione a distanza’ lungo r



- forza $\boxed{F = kq_1q_2/r^2}$ (cfr. grav.)
  – diretta lungo r
  – attrattiva fra car. di segno + -
  – repulsiva fra car. di segno ++, --
  – $k = 1/(4\pi\varepsilon_0) = 8.99\ 10^9\ Nm^2/C^2$ con q in coulomb (C), nel SI, caratterizza il mezzo: vuoto (~aria)

(*) paragrafo facoltativo

Confronto fra forze e.s. e gravit.

- nel SI in realtà si def. operat. l'unità di corrente (vedi oltre): 1 ampère (A) = 1 C/s $\rightarrow$ coulomb
- carica dell'el. $-e = -1.60217733(49)\ 10^{-19}$ C
- f. e.s. vs f. gravitazionali, es. in modulo fra due p
  - $F_e = ke^2/r^2 \quad \propto \cancel{r^2}$ nel rapporto
  - $F_g = Gm_p^2/r^2 \quad \propto \cancel{r^2}$ "

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{ke^2}{Gm_p^2} = \frac{8.99\times10^{9}\,\mathrm{Nm^2C^{-2}}\times(1.60\times10^{-19}\,\mathrm{C})^2}{6.67\times10^{-11}\,\mathrm{Nm^2kg^2}\times(1.67\times10^{-27}\,\mathrm{kg})^2} = 1.24\times10^{36}$$

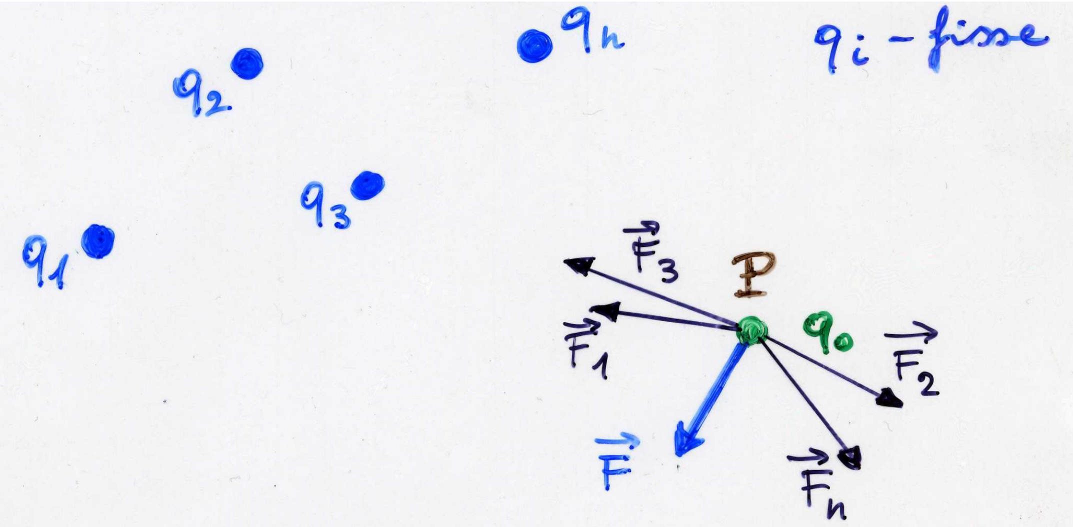
  - rapporto enorme $\rightarrow$ gravitazione trascurabile a livello atomico e subatomico
  - NB $\varepsilon_0 = 8.85\ 10^{-12}\ C^2/(Nm^2)$ costante dielettrica del vuoto (ε - materiale; $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0 > 1$ – relativa, vedi oltre)

Campo elettrico

- dato un sistema di n cariche fisse, una carica q_0 sentirà una forza $\mathbf{F} = \Sigma_i \mathbf{F}_i$
- distribuzione di q_i

  $\rightarrow$ **F** nel punto P
- ciascuna $F_i \propto q_0$

  $\rightarrow F \propto q_0 \rightarrow = Eq_0$
- campo elettrico



$\boxed{\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_0}$ $\mathbf{E} = \mathbf{E}(P)$ (si ottiene muovendo q_0)

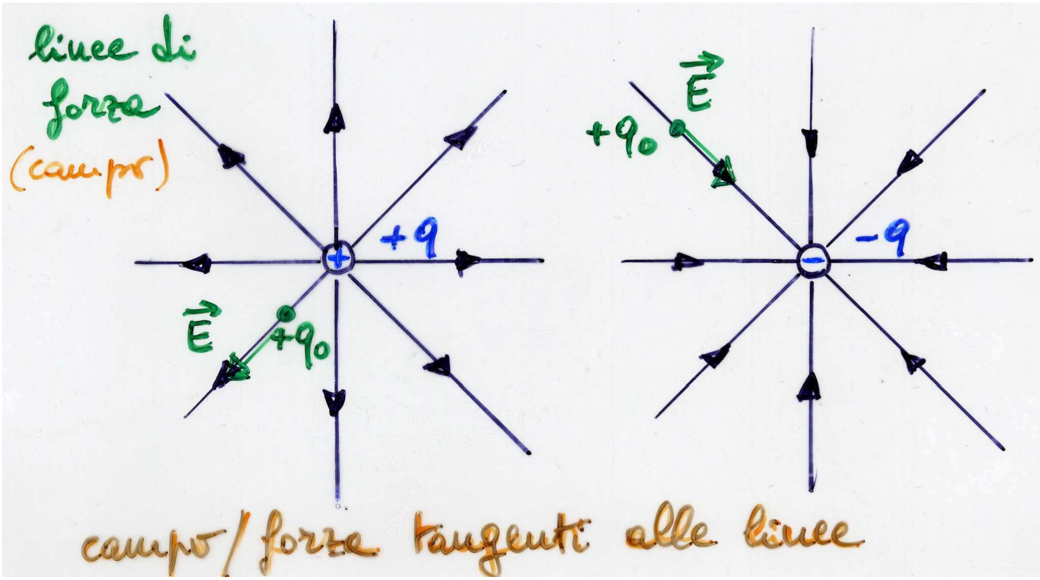
  – unità SI: newton/coulomb = N/C

- se il campo elettrico è noto

  $\mathbf{F}(P) = q\mathbf{E}(P)$ è la f. che agisce in P su q

Campo elettrico di una carica puntiforme

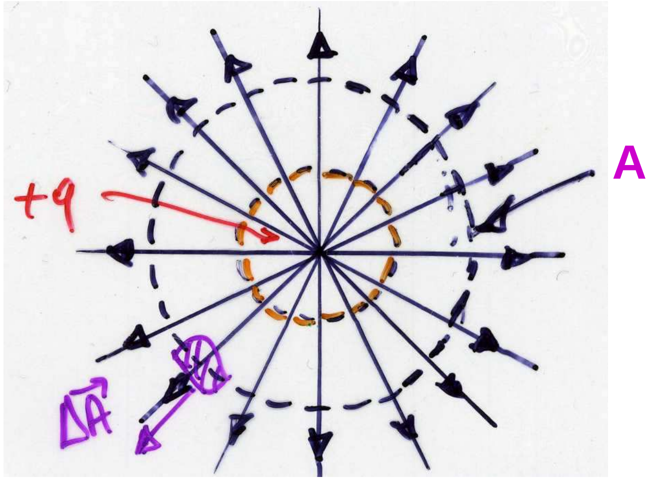
- q nell'origine, q_0 a distanza r: componente di **F** lungo r
  $F = k\,qq_0/r^2$
  $\rightarrow E = F/q_0 = (kq\cancel{q_0}/r^2)/\cancel{q_0} = kq/r^2 = (1/4\pi\varepsilon_0)q/r^2$



- campo el. rappresentato dalle linee di forza: più dense = campo più intenso

Linee di forza (o di campo) (*)

- es. carica puntif. circondata da una sfera di raggio r ($A=4\pi r^2$)
- il n. di linee di **E** che traversa A è lo stesso $\forall$ r
- flusso di **E**



$d\Phi = EdA$ (sono paralleli)

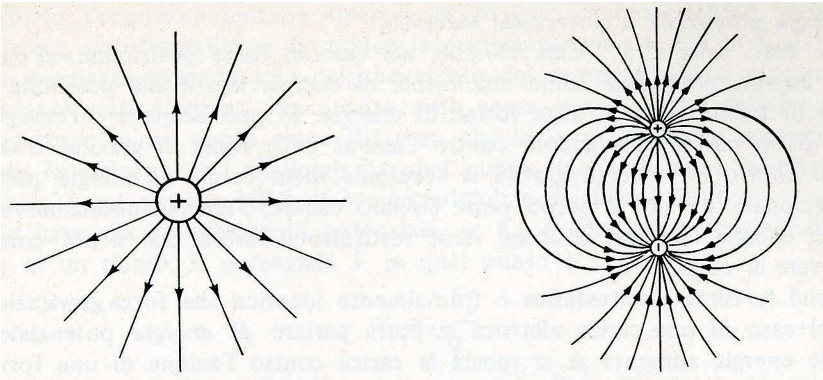
$\Phi = EA = (kq/\cancel{r^2})4\pi\cancel{r^2} = 4\pi kq = q/\varepsilon_0 \qquad \forall r$

- linee di forza
  - $N \propto AE$ densità di linee $N/A \propto E \propto q$
  - linee simmetriche, carica puntif.
  - originano da +q, finiscono in –q: non si intersecano mai, esclusi i poli (le cariche o sorgenti)

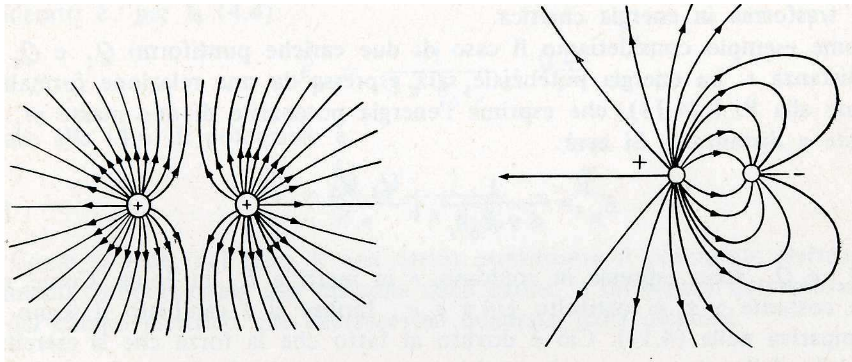
(*) facoltativo

Linee di forza (o di campo) (2)

- distribuzioni di cariche e linee di campo

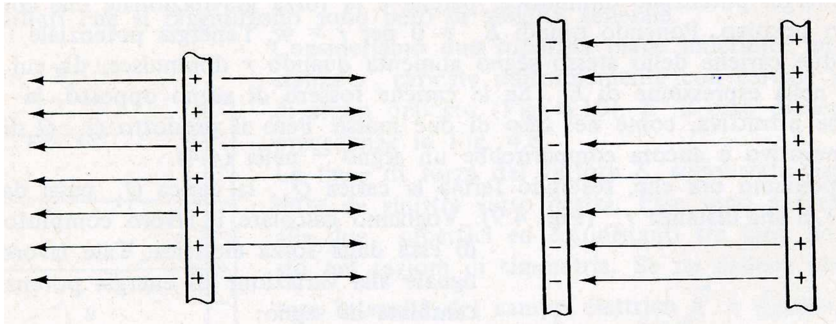


dipolo, +q, -q



due cariche +q

+2q, -q

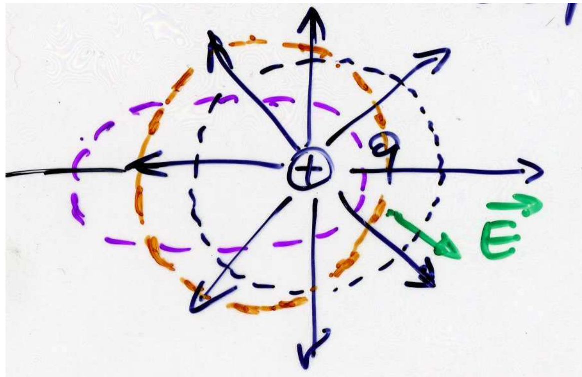


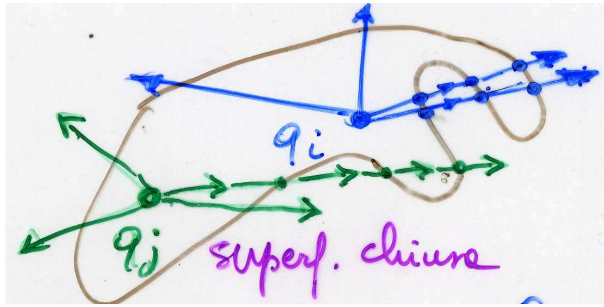
piano carico

2 piani carichi

Teorema di Gauss(*)

- es. carica puntif.: abbiamo già visto
  $\Phi(E) = EA = q/\varepsilon_0$ sfera, $\forall r$
  la proprietà è vera per $\forall$ superficie chiusa con q al suo interno; si vede che resta vera deformando comunque la superficie
  $\boxed{\Phi_{tot} = q_{int}/\varepsilon_0}$
  tot - sup. chiusa, int – somma algebrica delle q all'interno (teorema di Gauss, una delle leggi fondamentali dell'e.m.)
- viceversa, con simmetria, date le q si può ricavare **E**





(*) facoltativo

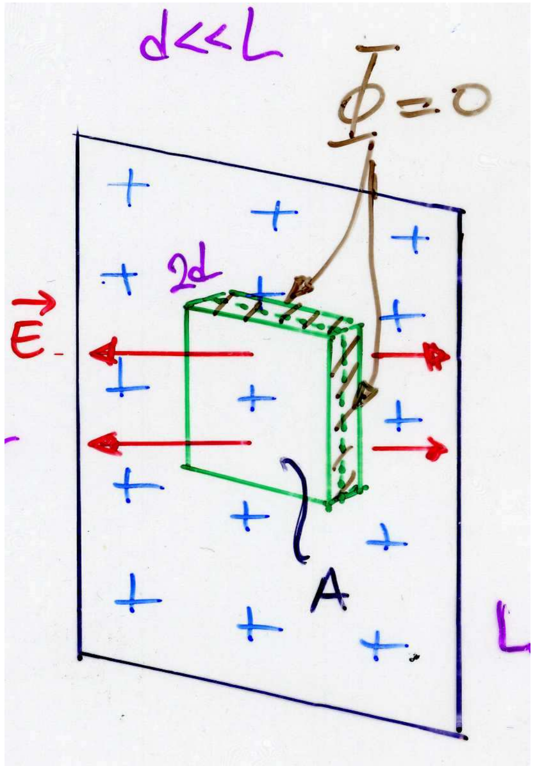
Applicazione: piano uniformemente carico(*)

- piano carico (o quadrato di lato $L >> d$): $\sigma(C/m^2) = q/A$ densità superficiale di carica
- per simmetria: **E** $\perp$ piano [e costante (uniforme) su un $\forall$ piano parallelo]
- applico t. di Gauss al parallelepipedo

$\Phi_{tot} = EA + 0 + EA = q_{int}/\varepsilon_0 = \sigma A/\varepsilon_0$

$\rightarrow E = \sigma/(2\varepsilon_0)$

che non dipende dalla distanza dal piano (campo uniforme), come deve essere per simmetria



(Differenza di) potenziale elettrostatico

- Forza e.s. (Coulomb) dipende solo da r (non da t o v) → conservativa → energia potenziale e.s.; anche **E** dipende solo dalla posizione → campo conservativo → potenziale = en. potenz./carica
- es. forza lungo x:

  $\Delta\mathcal{L} = F\Delta x = q_0 E\Delta x = -\Delta W = -q_0\Delta V$

  $\cancel{q_0} E\Delta x = -\cancel{q_0}\Delta V$

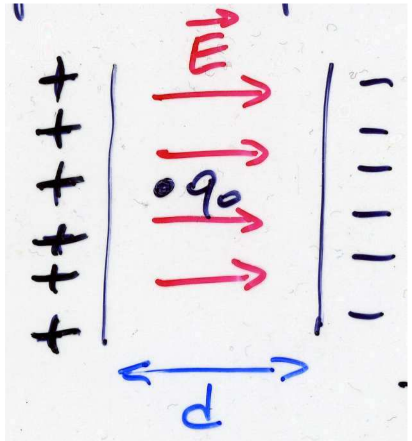
  NB si definisce la d.d.p. (come si definisce solo la *differenza* di en. pot.)

  $E = -\Delta V/\Delta x$

  il campo **E** è il gradiente del potenz.,– il potenz. cresce in verso opposto ad **E**

Potenziale elettrostatico (2)

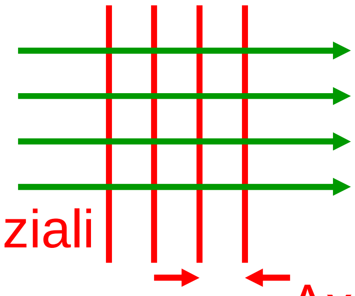
- unità SI: 1 volt(V) = 1 J/1 C ⟹ E in V/m
  [1J = 1Nm; 1 N/C = 1 Nm/(1 Cm) = 1 J/(Cm) = 1 V/m]
- es. d.d.potenziale fra due piani carichi, spostando q_0 dal – al +



  $\mathcal{L} = -q_0Ed$

  $V_+ = Ed$ con $V_- = 0$

  NB è definito solo $\Delta V = V_+ - V_- = Ed$
- su una q in un campo **E**: **F** = q**E**
  tende a spostare q>0 (q<0) verso una regione di minore (minore) W ossia di minore (maggiore) V
- superfici equipotenziali ⊥ ad **E**
  es.1 campo uniforme $\Delta V = -E\Delta x$



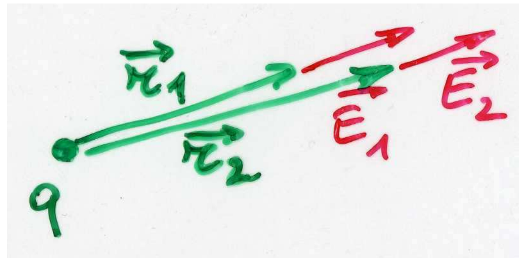
Potenziale elettrico (3)(*)

- es.2 conduttori in equilibrio: equipot. su tutto il volume (**E** e le sue linee escono ⊥ alla superficie)
- es.3 potenziale prodotto da una carica puntif.

$E_r = kq/r^2$ $\Delta V = -E_r\Delta r = -kq\Delta r/r^2$

prendiamo Δr piccolo ossia $r_1 \sim r_2$

$\Delta r = r_2 - r_1 << r_1, r_2$

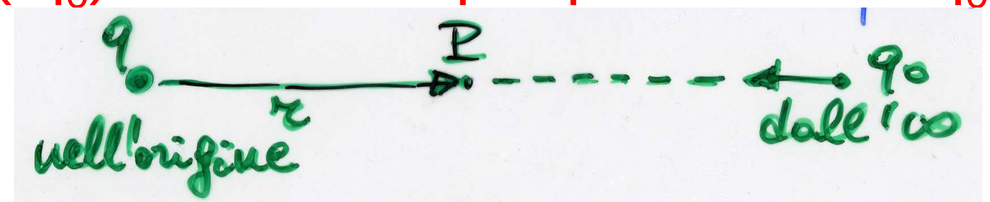


⇨ $r^2 \sim r_1 r_2$ media geometrica, approx.

$\Delta V = -kq(r_2-r_1)/(r_1r_2) = -kq(1/r_1-1/r_2)$

$V_2-V_1 = kq/r_2 - kq/r_1$ cioè $\boxed{V(r) = q/(4\pi\varepsilon_0 r)}$ ponendo $V(\infty) = 0$

$V(P) = -\mathcal{L}/q_0$ –lavoro(/q_0) necessario per portare una q_0 +va dall'∞ al punto P



(*) facoltativo

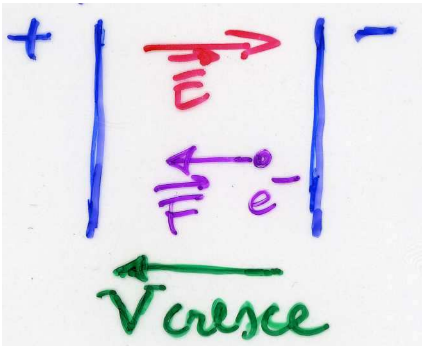
L'elettronvolt

- l'elettronvolt (eV) è una unità energia: en. acquistata da un e^- sottoposto alla d.d.p. di 1 V

  $1\ \text{eV} = 1.602\ 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1\ \text{V} = 1.602\ 10^{-19}\ \text{J}$

  l'eV è l'energia tipica dei processi atomici (es. l'en. di ionizzazione dell'atomo di H è 13.6 eV)

- esercizio: velocità acquistata da un e^- in una ddp di 1 V



  $\mathbf{F} = -e\mathbf{E}$ m.r.u.v./II principio

  $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m = -e\mathbf{E}/m$

  $\frac{1}{2}mv^2 = e\Delta V$ cons. en. meccanica $v^2 = 2e\Delta V/m$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 1}{9.11 \times 10^{-31}}} = 5.93 \times 10^5\ \text{m/s}$$

Capacità

- conduttore in equilibrio: stesso V (equipotenziale), cariche in superficie, **E** esterno $\perp$ superficie
- se aumento q, aumenta V – si def. capacità elettrica la carica divisa per il potenziale stesso

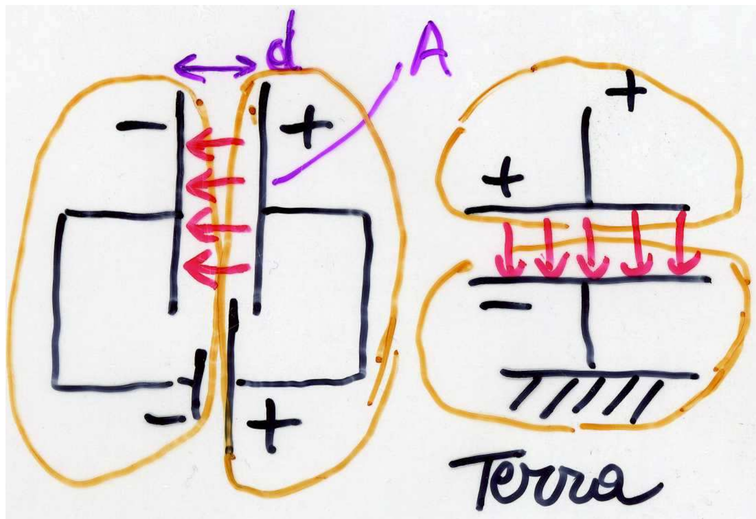
$$\boxed{C = q/V}$$

unità SI: farad (F), sottomultipli usati μF, nF, pF

- condensatore: due conduttori affacciati, carichi di segno opposto, es. facce piane e parallele ($V = Ed = \sigma d/\varepsilon_0$)

$$C = q/V = \cancel{\sigma}A/(\cancel{\sigma}d/\varepsilon_0) = \varepsilon_0 A/d$$

con $\sigma = q/A$ dens. sup. di carica



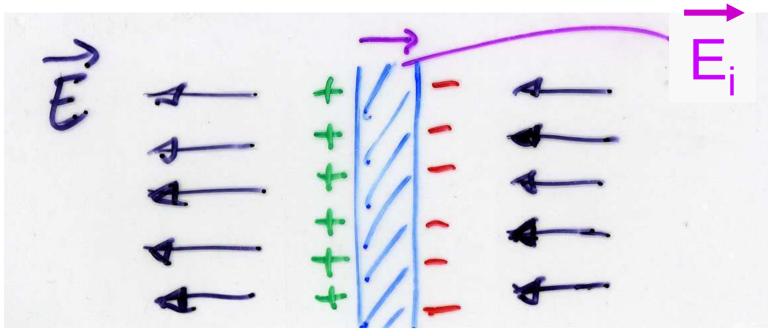
Capacità (2)(*)

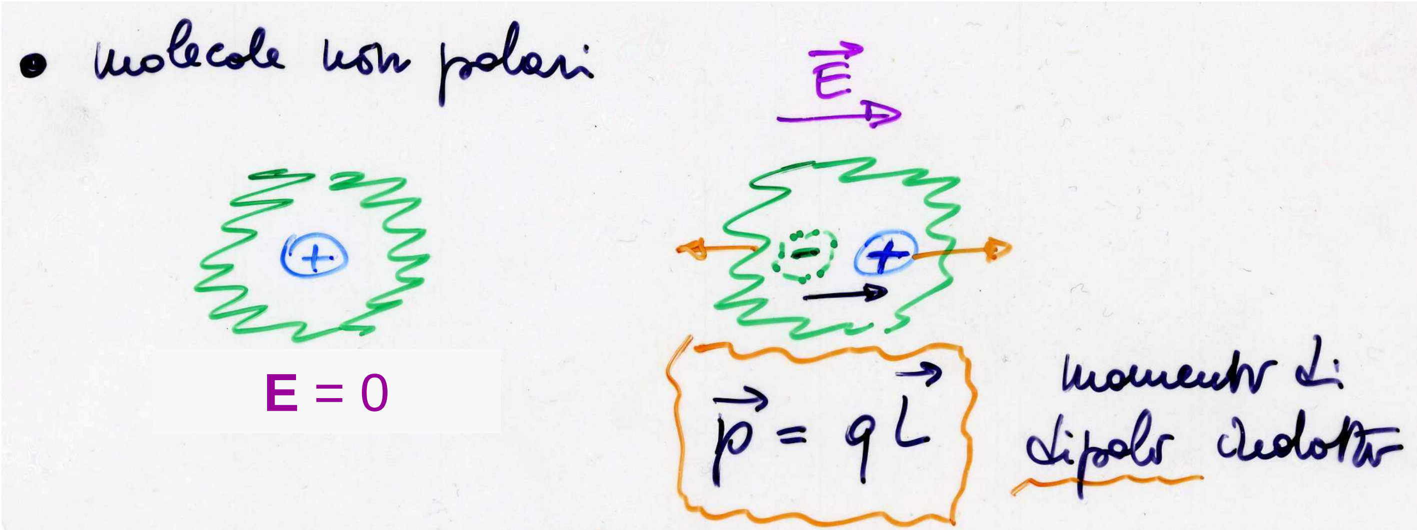
- limite alla carica accumulabile su un conduttore / condensatore: dipende dalla forma dei conduttori, dal mezzo in cui sono immersi;
  se E cresce troppo $\Rightarrow$ scarica
  es. aria secca E_{max} ~ 3 10^6 V/m, vetro ~ 40 10^6 V/m
  (rigidità dielettrica)
  [sulle punte σ locale è maggiore, E è maggiore e la scarica avviene prima]
- inserendo un dielettrico, la capacità del condensatore aumenta (ed aumenta anche la rigidità dielettrica), es. condensatore piano (vedi oltre per la dim. che $\varepsilon_r > 1$)
  $C = \varepsilon A/d = \varepsilon_r \varepsilon_0 A/d = \varepsilon_r C_0$ $\qquad (\varepsilon_r > 1)$

(*) facoltativo

Materiali immersi in **E** esterno(*)

- conduttori / metalli: all'interno il campo **E** + $\mathbf{E_i}$(indotto) = 0



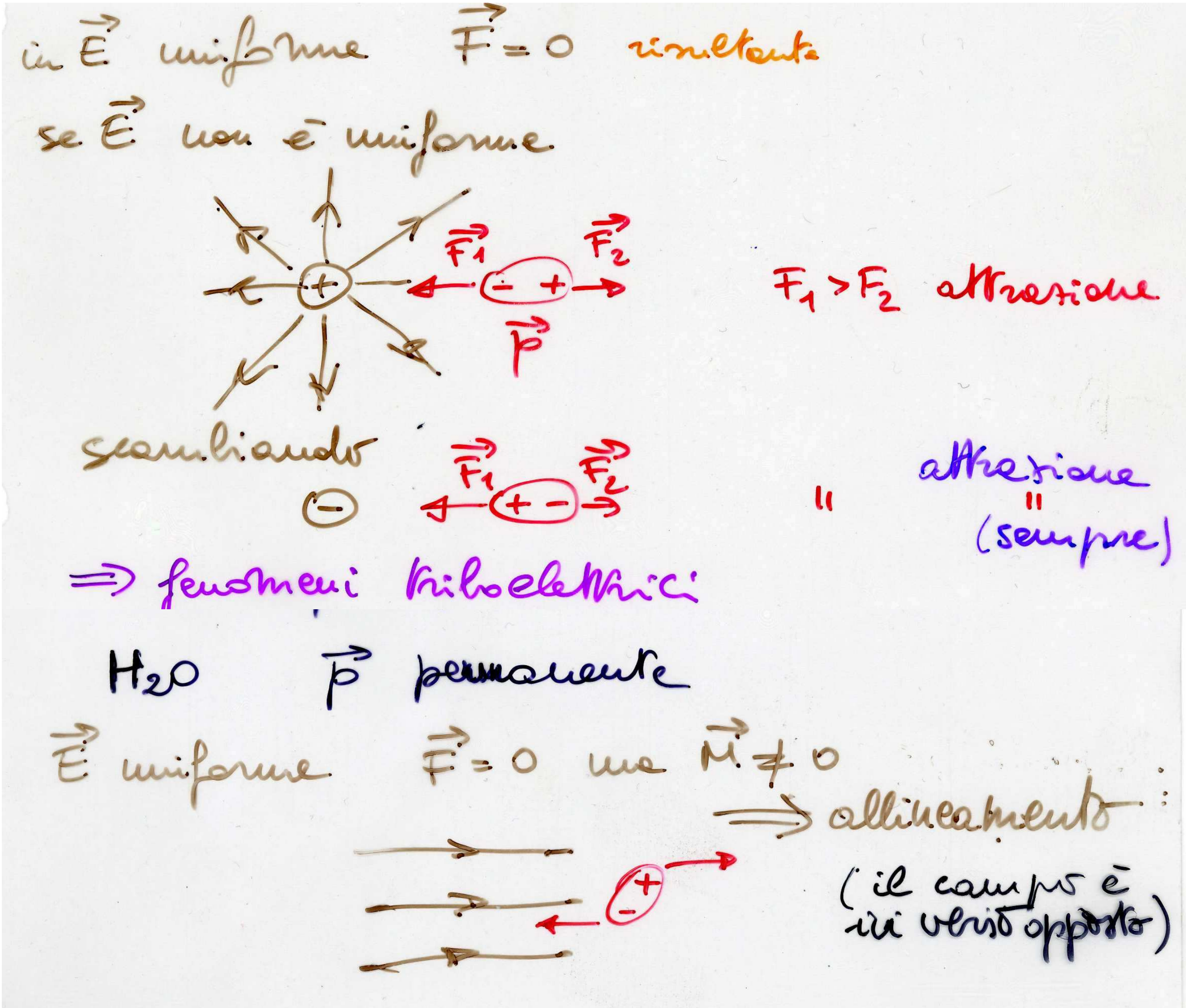


il dipolo indotto produce un campo $\mathbf{E_i}$ in verso opposto ad **E**, il campo risultante è ridotto rispetto a **E**

(*) facoltativo

- molecole non polari (continua)

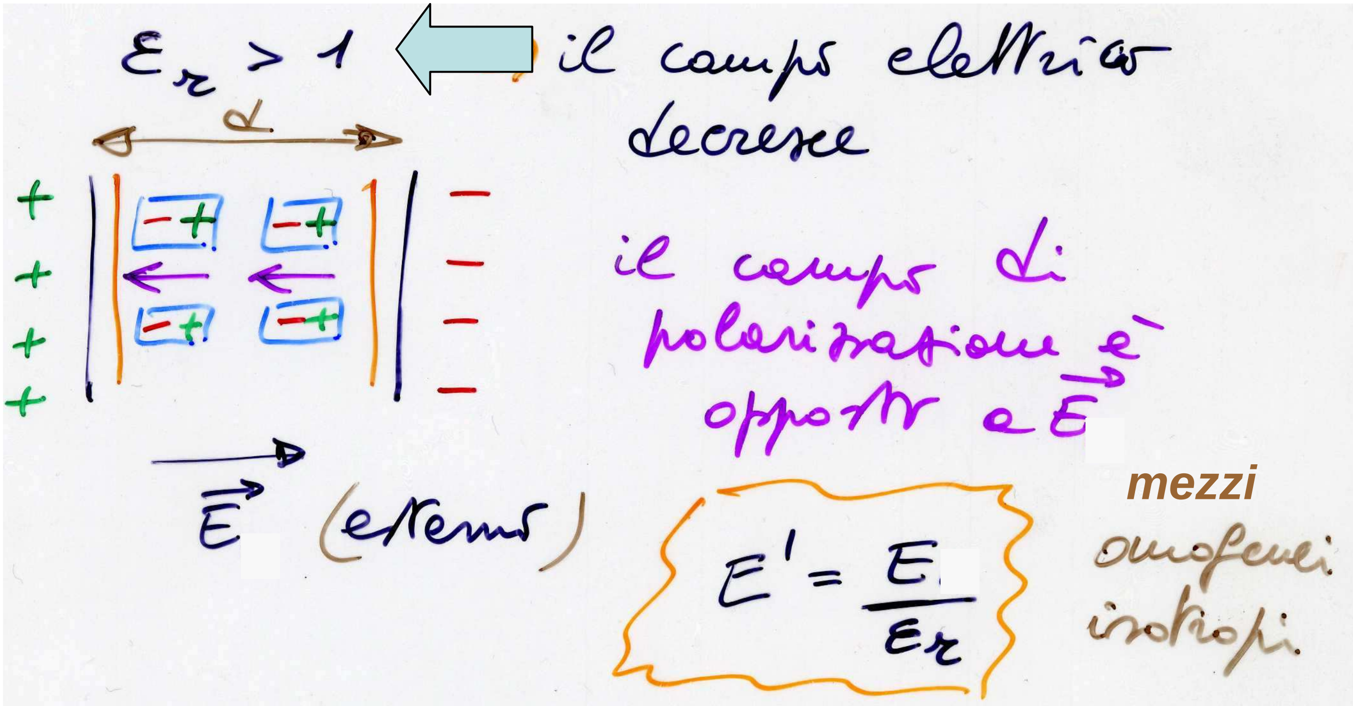
- molecole polari con dipoli permanenti



(*) facoltativo

Dielettrici in un campo esterno(*)

- dielettrici / isolanti: $\vec{\mathbf{E}}' = \vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{E}}_i$; $\quad E' = E - E_i = E/\varepsilon_r < E$



$V' = E'd = Ed/\varepsilon_r = V/\varepsilon_r$ (q = cost)

$C = q/V' = \varepsilon_r q/V = \varepsilon_r C$ inserendo un dielettrico C aumenta

(*) facoltativo

La costante dielettrica relativa(*)

- il dielettrico aumenta C ed aumenta la rigidità dielettrica (da 10 a 100 volte)
  es. mica $\varepsilon_r = 7.0$ $E_{max} \sim 10–100\ 10^6$ V/m
  kapton $\varepsilon_r \sim 7$ $E_{max} \sim 300\ 10^6$ V/m
- altri materiali
  polietilene $\varepsilon_r = 2.3$; aria $\varepsilon_r = 1.00059$ ($\varepsilon \sim \varepsilon_0$);
  H_2O $\varepsilon_r = 81$
- la grande costante dielettrica dell'acqua favorisce la dissociazione dei composti ionici (al suo interno il campo è fortemente ridotto)
- eserc. 10x10x0.01 cm^3 in aria
  $C = \varepsilon_0 A/d = 8.85x10^{-12}x10^{-2}/10^{-4} = 885$ pF $V_{max} = ?$

(*) facoltativo

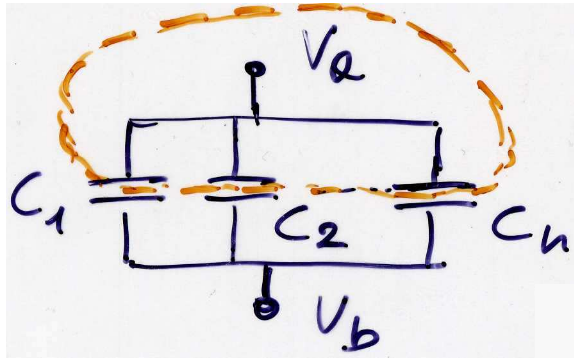
Condensatori in parallelo ed in serie(*)

- parallelo: $\Delta V = V_a - V_b$ è lo stesso

  $q_1 = C_1\Delta V$; $q_2 = C_2\Delta V$; $q_n = C_n\Delta V$

  $q_{tot} = q_1 + q_2 + ... + q_n =$
  $= (C_1+C_2 + ... + C_n)\Delta V$

  $$C_{eq} = C_1 + C_2 + ... + C_n$$



condensatore equivalente
in parallelo

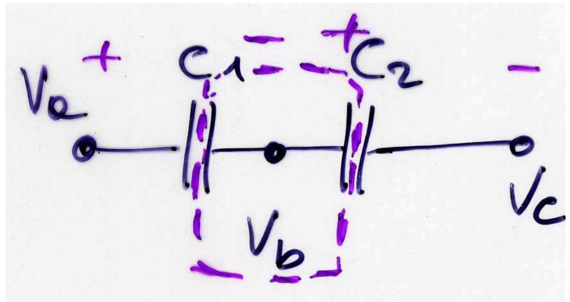
- serie: q è la stessa, ossia

  $(V_a-V_b)=q/C_1$; $(V_b-V_c)=q/C_2$

  $V_a-V_c = (V_a-V_b)+(V_b-V_c) =$
  $= q(1/C_1 + 1/C_2)$

  $$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2$$

  $$C_{eq} = C_1C_2/(C_1+C_2)$$ mcm

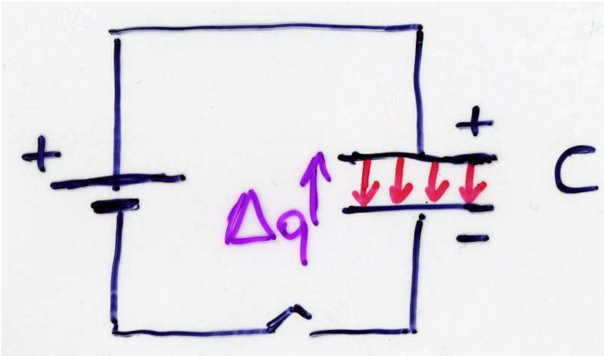


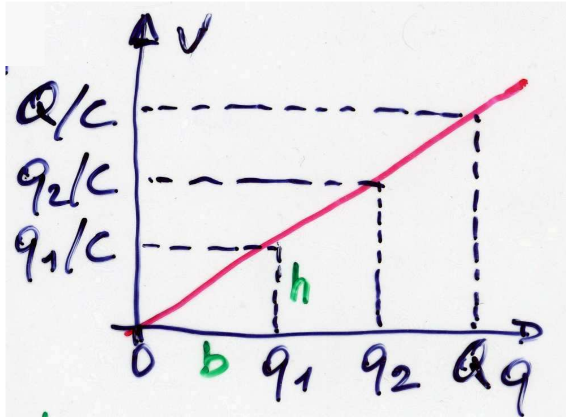
condensatore equivalente
in serie

(*) facoltativo

Carica del condensatore(*)

- q, v=q/C durante la carica (Q, V quantità finali, carico)
- inizio (tasto aperto) q=0 v=0 (scarico)





- lavoro (della pila) per spostare Δq:

$\Delta\mathcal{L} = \underline{v}\Delta q = (1/C)\underline{q}\Delta q = (1/C)½(q_1+q_2)(q_2-q_1) = ½C(q_2^2-q_1^2)$

fra 0 e Q: $\mathcal{L} = ½\,(Q/C)\,Q = Q^2/(2C)$

$\boxed{W = Q^2/(2C) = ½CV^2}$

energia immagazzinata nella carica

V è la d.d.p. ai capi del condensatore

(*) facoltativo

Energia immagazzinata nel campo elettrico(*)

- es. condensatore piano nel vuoto

  $V = Ed$ $\qquad C = \varepsilon_0 A/d$

  volume di C

  $W = ½CV^2 = ½(\varepsilon_0 A/\cancel{d})(E^2 d^{\cancel{2}}) = ½\varepsilon_0 E^2 (Ad)$
- energia per unità di volume (densità di en. potenziale)

  $\eta = W/(Ad) = ½\varepsilon_0 E^2$

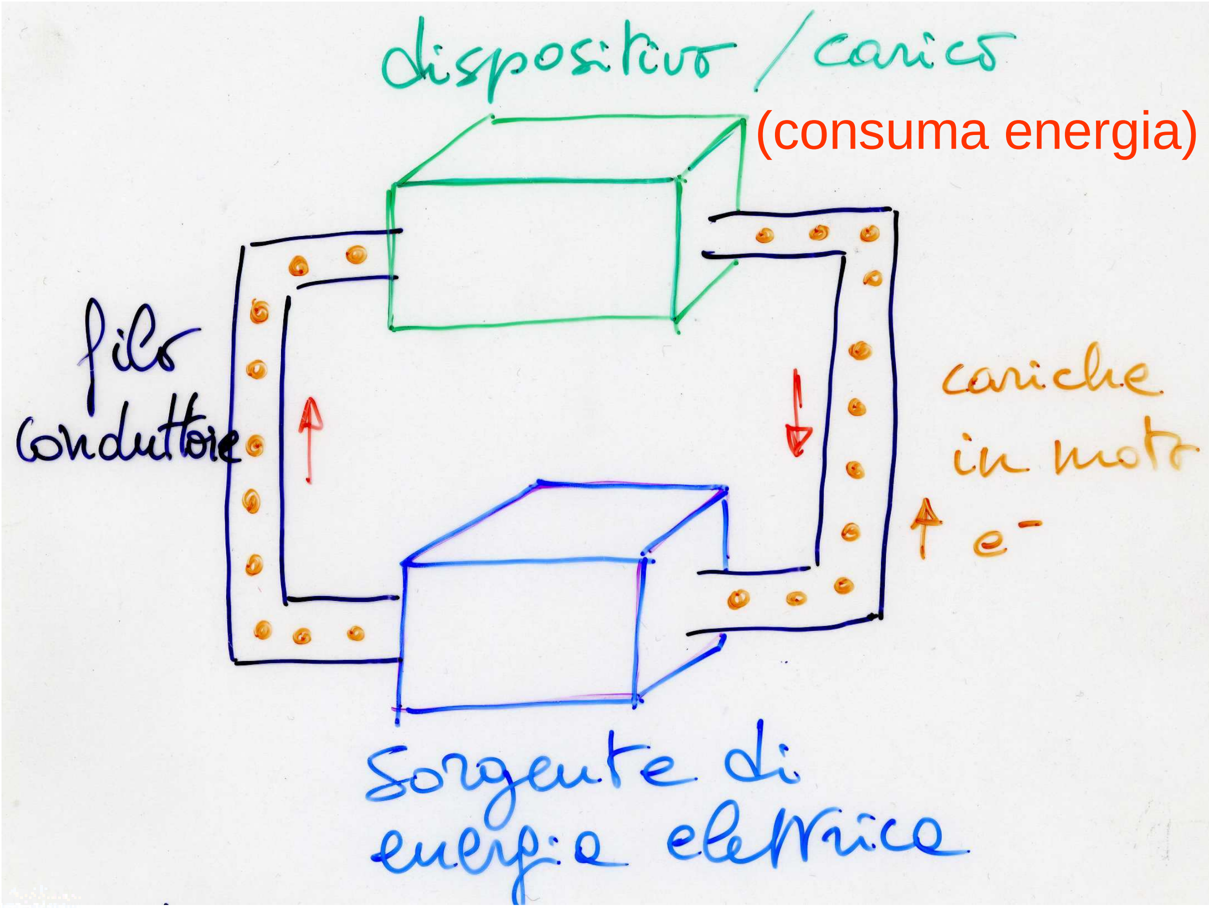
  (cfr. en. potenziale elastica di una molla spostata di x dalla posizione di equilibrio: $W_{molla} = ½kx^2$
- la formula è valida anche per campi **E** comunque variabili
- se c'è un dielettrico, basta mettere ε al posto di ε_0

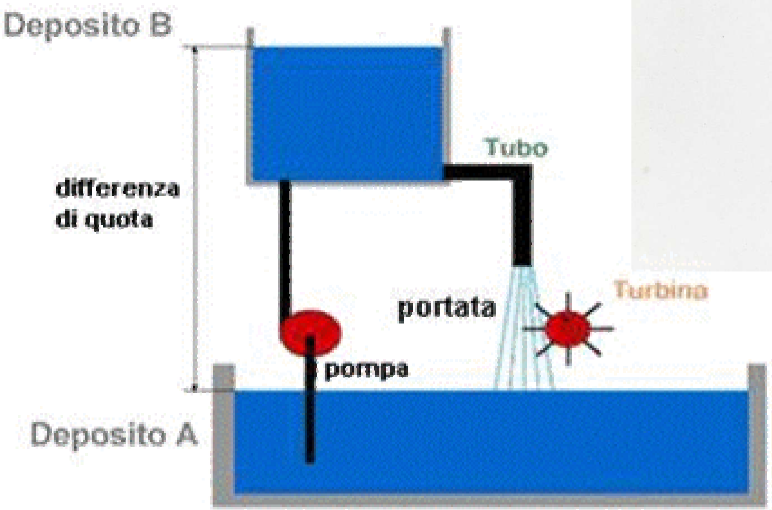
(*) facoltativo

Corrente elettrica

Circuito elettrico(*)

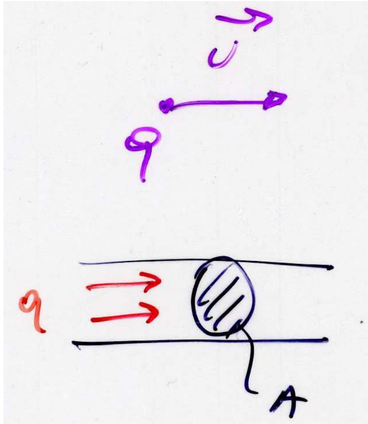
- sorgente ad es. pila: en. chimica → en. elettrica
- analogia con un circuito idraulico





(*) facoltativo

Corrente elettrica

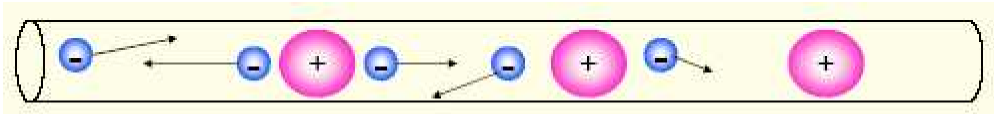


- in generale la corrente elettrica è la carica per unità di t attraverso una superficie A

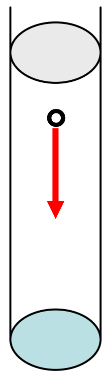
  $i = \Delta q/\Delta t$ (al lim per $t \rightarrow 0$, $i=dq/dt$)
- unità SI: 1 ampère(A) = 1 C/s
  sottomultipli: mA, μA, nA
- convenzione (Bj. Franklin): i è +va nel verso in cui si muovono le cariche +ve
- conduttori: il realtà si muovono gli e^-
- altri casi (semiconduttori, elettrolisi, acceleratori): si possono muovere sia cariche –ve che +ve
- corrente continua (stazionaria): i non varia nel tempo, analoga allo scorrimento stazionario di un fluido

Elettroni nei metalli(*)

- nei metalli gli e$^-$ più esterni sono in comune al cristallo (e$^-$ di conduzione), tipicamente ~1/atomo
- modello: gas di e$^-$ 'classico', $v_T \sim 1.2\ 10^5$ m/s (300 K), λ~100Å, τ~10^{-13}s



- se **E** = 0 ($\Delta V = 0$): agitazione termica, $v_d = 0$, con v_d velocità di deriva
- se **E** ≠ 0: **F** = –e**E**, urti sugli ioni, 'resistenza viscosa', cfr. legge di Stokes ⇨ $v_d \neq 0$, molto piccola, ~0.1mm/s (ma un segnale elettrico si propaga con v~c)
- se **E** (o ΔV) cost. nel tempo, anche v_d è cost. → i continua (analoga a cariche in moto con vel. cost., analogia col viscosimetro a caduta)



(*) facoltativo

Resistenza elettrica

- se in generale applico una d.d.p. V agli estremi di un pezzo di materiale (metallo o meno) si def. resistenza elettrica il rapporto fra la d.d.p. e la corrente i che lo attraversa

  $\boxed{R = V/i}$ (def. di resistenza)

  ho soppresso Δ, ma è una ddp

  con in genere $R = R(i)$

  unità SI: 1 ohm (Ω) = 1 volt/ampère = 1 V/A
- se applico la d.d.p. ad un metallo (conduttore ohmico) a T = cost., la resistenza risulta costante

  $\boxed{R = V/i = \text{cost.}}$ [1) conduttore ohmico, 2) T = cost.]

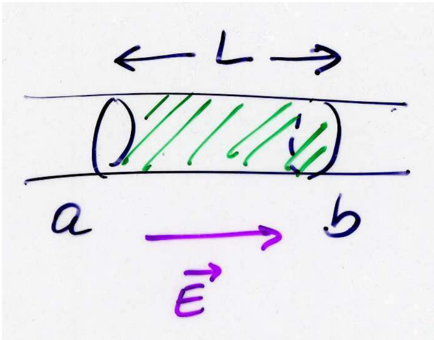
  1a legge di Ohm, che vale solo per i buoni conduttori, metalli, se la temperatura non varia

Resistenza elettrica (2)

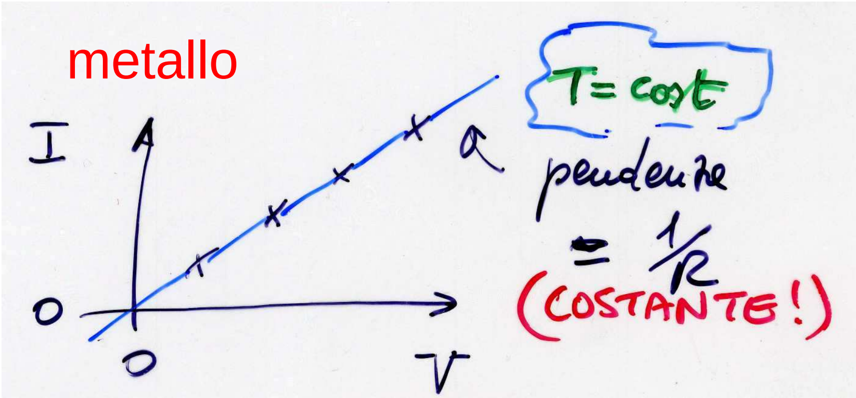
- relazione fra campo e d.d.p.:

  $V = V_a - V_b = EL$

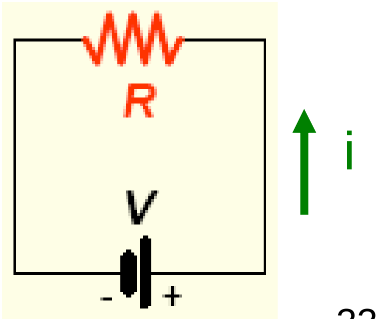
  quindi il campo è la ddp divisa la lunghezza del campione



- se sono verificate le condizioni della 1a legge di Ohm, i vs V è una retta per l'origine (cfr. leggi di Poiseuille, Fick)

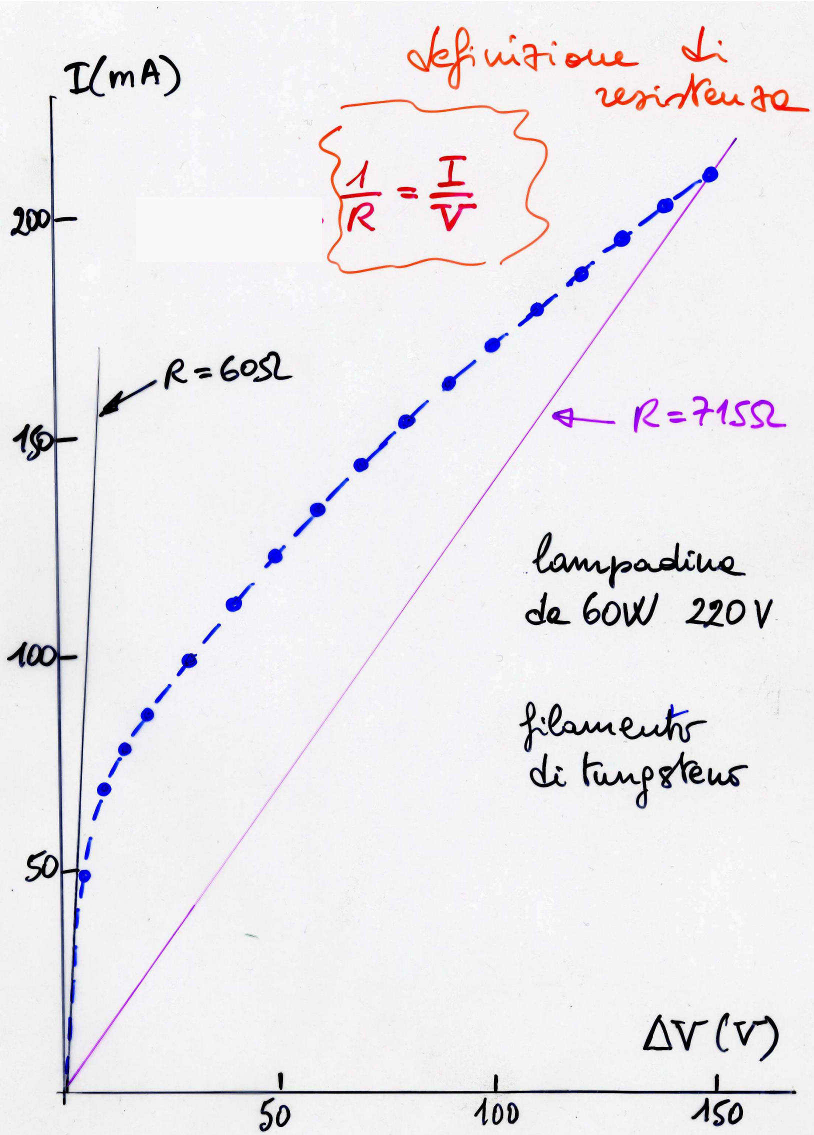


- in un circuito la resistenza R è indicata da una linea seghettata (NB le linee continue hanno R = 0, sono equipotenz.)



Resistenza elettrica (3) (*)

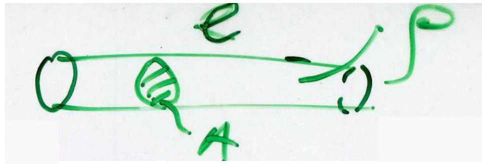
- normale lampadina da 60 W (filamento metallico), misuro i vs V e non trovo una retta! R aumenta ~10 volte se V va da qualche volt a 150 V, perchè?
- un indizio: a qualche volt la lampadina non emette luce, mentre a 150 V sì
- l'emissione di luce sempre più visibile implica che il filamento si scalda (legge di Wien), *la condizione T= cost. non è rispettata*



(*) facoltativo

Resistività elettrica

- per un campione di materiale di lunghezza ℓ e di area trasversa A



$\boxed{R = \rho\ell/A}$

2a legge di Ohm, dove $\rho = \rho(T)$ in $\Omega\cdot m$ è la resistività

W: $\rho_W = 5.5\ 10^{-8}\ \Omega m$ a 20 ℃

$\alpha_W = 4.5\ 10^{-3}\ K^{-1}$ $(\approx 1/273\ K)$

$\rho_T = \rho_{20℃}[1+\alpha(T-293)] \quad \rightarrow \quad \rho_{2000℃} \sim \rho_{20℃} \times 10$

- C: $\rho_C = 3.5\ 10^{-5}\ \Omega m$ (grafite $0.8\ 10^{-5}\ \Omega m$)

  $\alpha_C = -5\ 10^{-4}\ K^{-1}$ dipende poco da T

- resistori discreti: in C a impasto (ad es. Allen-Bradley)

Resistività elettrica dei materiali, 20℃(*)

- nei metalli ρ cresce con T↗ ed in presenza di impurezze (aumentano ostacoli al moto degli e⁻)
- nei semic. e isolanti succede il contrario
- cfr conduc. termica

Materiale	ρ ($\times 10^{-8}\,\Omega m$)		α (10^{-3} gradi^{-1})
Ag	1.53	conduttori	3.8
Cu	1.72		4.0
costantana	49		0.03
Hg	98		0.99
C	3.5×10^{3}	semi-cond.	-0.5
Ge	4.6×10^{7}		-50
Si	2.0×10^{9}		-70
vetro	$10^{18} \div 10^{22}$	isolanti	
gomma dura	$10^{21} \div 10^{24}$		
polistirolo	$10^{13} \div 10^{24}$		

(*) facoltativo

Resistenze in serie ed in parallelo

- serie: i = cost $\qquad iR_1 = V_b - V_a \qquad iR_2 = V_c - V_b$

ma $\quad iR_{eq} = V_c - V_a = (V_c - V_b) + (V_b - V_a) = i(R_1 + R_2)$

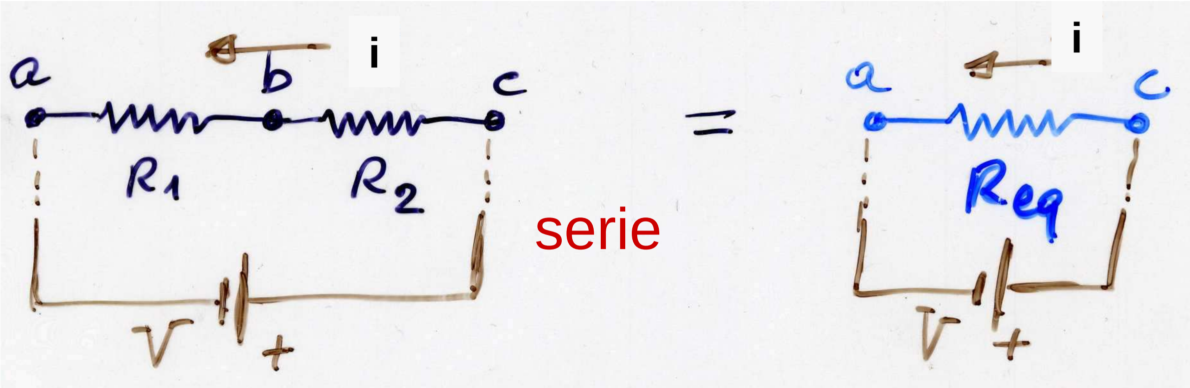
$$\boxed{R_{eq} = R_1 + R_2 \, (+ \ldots + R_n)}$$ serie

- parallelo: $V = V_b - V_a$ = cost $\qquad i_1 = V/R_1 \qquad i_2 = V/R_2$

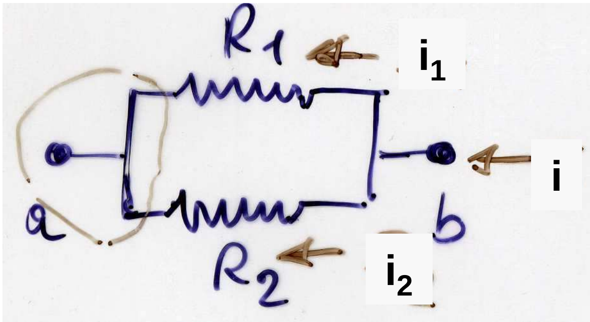
ma $\quad V/R_{eq} = i = i_1 + i_2 = V(1/R_1 + 1/R_2)$

$$\boxed{1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2} = (R_2 + R_1)/(R_1 R_2)$$ parallelo

$$R_{eq} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$ "



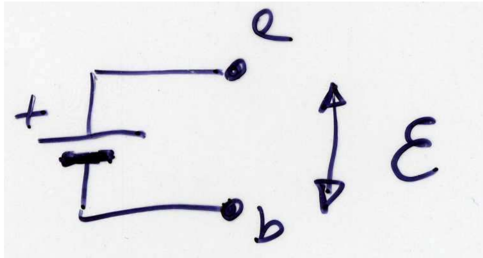
serie



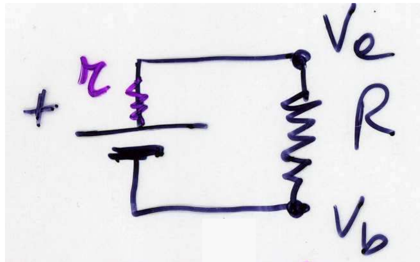
parallelo

f.e.m. e resistenza interna del generatore(*)

- la forza elettromotrice $\mathcal{E}$ è il lavoro per unità di carica che fa la pila, batteria (o un ∀ altro generatore): si misura a morsetti aperti (i = 0, R = ∞)



- chiudendo su un carico R



$\mathcal{E} = i(r+R)$

$i = \mathcal{E}/(r+R) < \mathcal{E}/R$

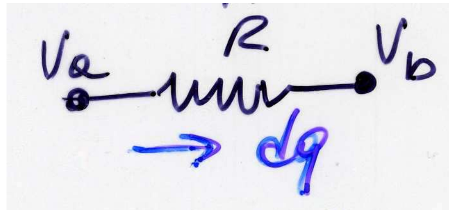
$V = V_a - V_b = iR = \mathcal{E}R/(r+R) < \mathcal{E}$

dove r è la resistenza interna del generatore (piccola), in serie col carico: la corrente erogata è < di quella erogabile con r = 0 e la ddp utile < della fem

(*) facoltativo

Effetto Joule e lavoro del generatore

- per far passare una carica dq attraverso una R occorre fornire un lavoro



  $d\mathcal{L} = (V_a-V_b)dq = Vdq = Vidt$

  usando $i = dq/dt$; questo $\mathcal{L}$ scalda la R (effetto termico della corrente); la potenza corrispondente è

  $\boxed{\mathcal{P} = d\mathcal{L}/dt = Vi}$

  (oppure, usando $V=Ri$, $\mathcal{P} = i^2R = V^2/R$)

- il lavoro per unità di t fornito dalla pila per far passare le cariche in r+R (r resistenza interna) è

  $\mathcal{P} = \mathcal{E}i$ mentre la potenza dissipata su R (utile) è solo $\mathcal{P}' = Vi < \mathcal{P}$

Misure di corrente e ddp

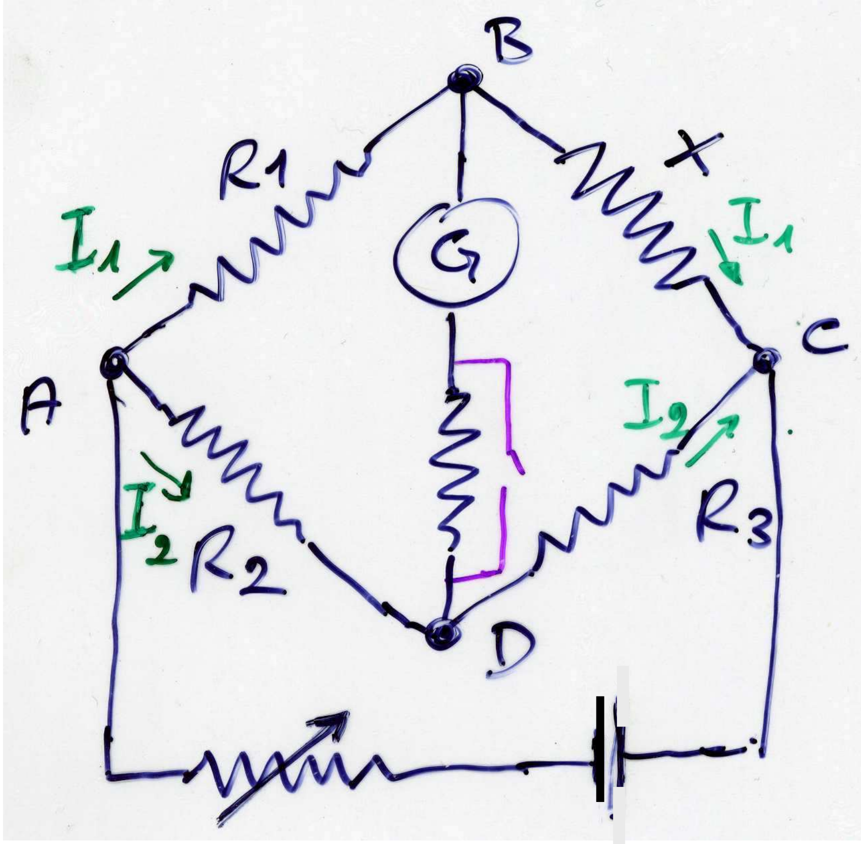
A amperometro, misura i e si connette in serie (r interna piccola)

V voltmetro, misura V e si connette in parallelo (R' interna grande)

- in ambedue i casi si può usare un multimetro (digitale) che misura A, V (sia in cc che in c. alternata), Ω e C
- in casi particolari si usa un galvanometro G ossia un amperometro molto sensibile (strumento di zero, per verificare se i $\simeq$ 0)

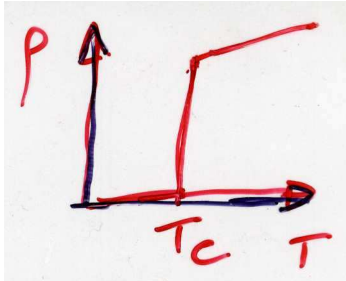
Ponte di Wheatstone (*)

- G è un galvanometro usato per misurare una corrente nulla
- R_2,R_3 sono aggiustabili ad es. a filo, X è la resistenza da misurare
- ponte in equilibrio: G indica 0, quindi $V_B = V_D$ ossia
  $i_1R_1=i_2R_2 \quad i_1X=i_2R_3$
  da cui $X = R_3R_1/R_2$
- applicazione: termometro a resistenza



(*) facoltativo

Superconduttività (cenno) (*)



- metalli: se T ↘, ρ↘ (l'agitazione termica, la "viscosità" decrescono)
- se $T<T_{critica}$ ⇒ fenomeno nuovo (ρ ~ 0)
- scoperta: Kamerlingh Omnes (1911); prime applicazioni, 50 anni dopo (1960)
- T_c ad es.: Hg 4.2 K; Nb 9.2 K, lega Nb_3Ge 23 K; alcune ceramiche > 125 K ("alta temperatura", in effetti -150 ℃ ma > T_{LN2} , Berdnorz e Müller, 1986)
- spiegazione (quanto meccanica): coppie di e^- (coppie di Cooper)
- applicazioni: ρ=0, R=0, grandi i (→ campi magnetici) senza dissipazione, risparmio di potenza (ma occorre raffreddare)

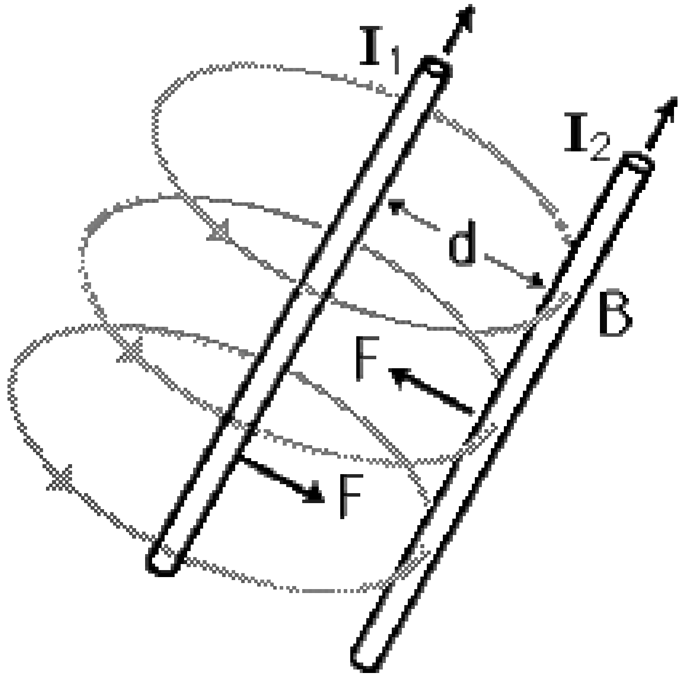
(*) facoltativo

Leggi di Kirchhoff(*)

in un ∀ circuito elettrico

- 1a legge, maglie: $\Sigma_j V_j = 0$ somma su tutte le fem (+ve) e cadute di tensione (-ve) nel verso di circolazione della corrente (di maglia) – giustificazione: quando faccio un giro completo ritorno allo stesso potenziale
- 2a legge, nodi: $\Sigma_j i_j = 0$ somma algebrica su tutte le i entranti nel nodo (+ve) ed uscenti (-ve) – conservazione della corrente
- note le R e le $\mathcal{E} \rightarrow$ tante equaz. quante sono le i incognite (n_{maglie}, n_{nodi}-1)
- nelle leggi di Kirchhoff possono essere incluse altre ddp, ad es. q/C per il condensatore

(*) facoltativo



Forces Between
Currents

Campo magnetico

Campo magnetico

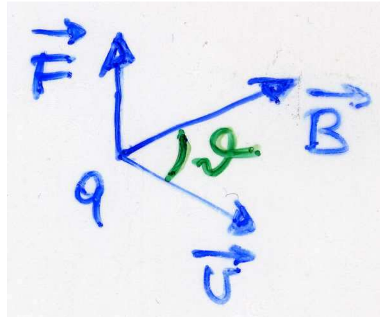
- esempi
  - campo magnetico terrestre orienta una bussola (ago di acciaio magnetizzato)
  - $FeO \cdot Fe_2O_3$ (magnetite) attira Fe, Co, Ni ...
  - una corrente elettrica agisce su una bussola (Oersted) o su un'altra i / limatura di Fe
- campo magnetico intorno a magneti / correnti:

  B (= **B**(P)) vettore induzione magnetica

  (eventualmente se ci sono più sorgenti $\mathbf{B} = \Sigma_i \mathbf{B}_i$)
- la presenza di **B** si manifesta con una forza magnetica su altri magneti / correnti / cariche in moto

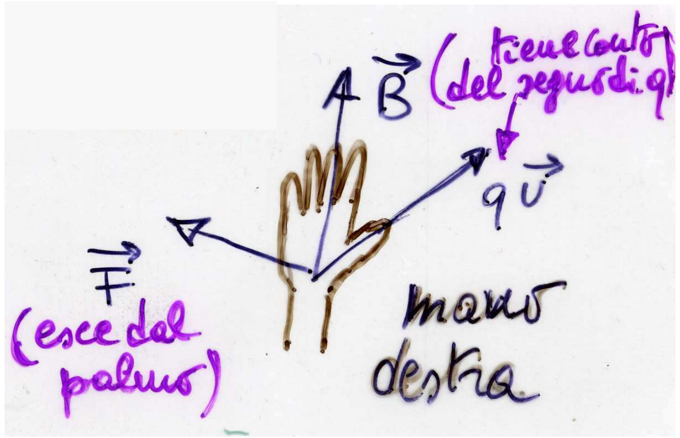
Forza magnetica, definizione di B

- es. f. magnetica su una carica in moto, sperimentalmente



$|\mathbf{F}| \propto |q|, |\mathbf{v}|, |\mathbf{B}|, |\sin\theta|$

$\mathbf{F} \perp \mathbf{v}, \mathbf{B}$ (forza di Lorentz)



⇨ $\mathbf{F} = q\mathbf{v}\wedge\mathbf{B}$

$F = qvB\sin\theta$

$F = 0$ per $\theta = 0,\pi$

$F = \pm F_{max} = \pm qvB$ per $\theta=\pi/2, 3\pi/2$

quindi B può essere definito come

⇨ $B = F_{max}/(qv)$ **B** vettore induzione magnetica

direz. $\perp$ **F**, **v**; verso definito dalla regola della mano dx

Unità di B

- unità SI: da $B = F_{max}/(qv)$,

  $1\ N/(C\cdot m/s) = 1\ N/(Am) = 1$ tesla(T)

  oppure

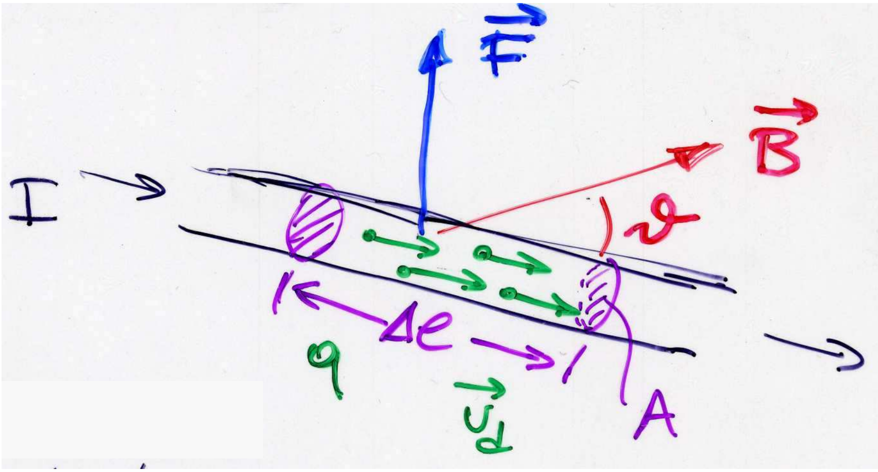
  $1\ N/(C\cdot m/s) = 1\ (N/C)/(m/s) = 1\ (V/m)/(m/s) =$
  $= 1\ V\cdot s/m^2 = 1\ Wb/m^2$ [weber(Wb)]

  $\rightarrow \boxed{1\ T = 1\ Wb/m^2}$
- (*) il flusso di B attraverso una superficie $\Phi_B = B_n A$, dove B_n è la componente $\perp$ ad A, si misura in Wb = Vs
- siccome 1 T è grande, si usa anche il gauss(G), unità del sistema CGSem: $\boxed{1\ T = 10^4\ G}$

  ad es. $|\mathbf{B}_{terra}| \approx 0.3$ G

(*) paragrafo facoltativo

Elemento di corrente e forza magnetica(*)



- n di cariche q per unità di volume $\approx 10^{29}$ m^{-3} (grande)
- velocità di deriva $v_d \approx 10^{-4}$ m/s (piccola)
- in Δt: $\Delta\ell = v_d \Delta t$, volume "svuotato" = $(v_d \Delta t)A$, $\Delta Q = n(v_d \Delta t A)q$ traversa A in Δt, $i = \Delta Q/\Delta t = n v_d A q$

  $\rightarrow$ $i\Delta\ell = (nA\Delta\ell q)v_d = \Delta Q v_d$

  un elemento di corrente equivale ad una carica in moto
- f. magnetica su un filo percorso da corrente

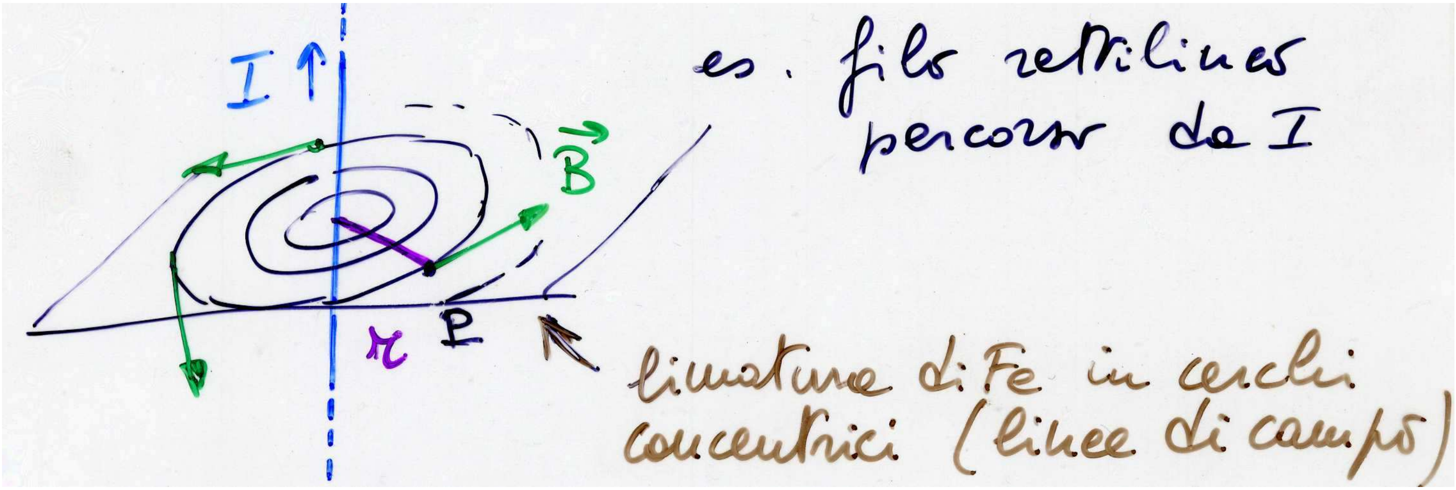
  $\Delta F = (n\Delta\ell A q)v_d B \sin\theta = iB\sin\theta\Delta\ell$

  filo rettilineo, B uniforme: $F = iB\ell\sin\theta$

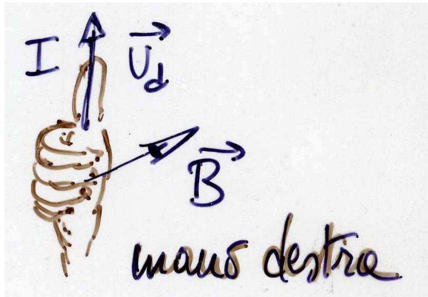
  es. $B=0.01$ T, $\ell=1$ m, $i=10^2$ A, $\theta=90°$ $\rightarrow F = 1$ N

(*) facoltativo

Sorgenti di B, legge di Biot-Savart



- $|\mathbf{B}| \propto$ i, 1/r, mezzo interposto $\mathbf{B} \perp \mathbf{v_d}$
- $\boxed{B = (\mu_0/2\pi)\ i/r}$



$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ Tm/A (o H/m)

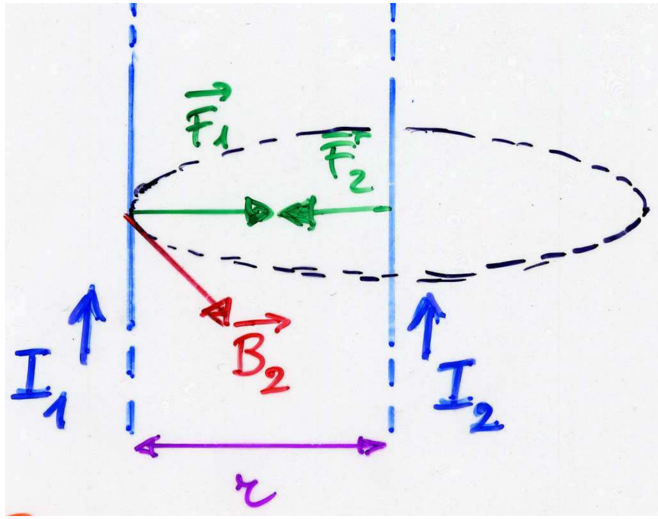
(Tm/A = Wb/(Am) = N/A^2 = (Vs)/(Am) = Ωs/m = henry/m)

μ_0 permeabilità magnetica del vuoto

es. i=10^2 A, r=1 cm → B = 2 $10^{-7}10^2/10^{-2}$ = 2 10^{-3} T = 20 G

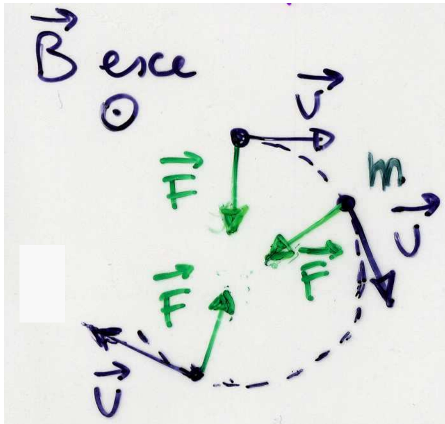
Forza fra correnti parallele(*)

- due correnti parallele: una produce B, l'altra sente la F (e viceversa)
- $B_2 = (\mu_0/2\pi)\ i_2/r$
  $F_1 = i_1 B_2 \ell$ $\qquad\qquad (\theta = \pi/2)$
  $\boxed{\square_{\square}/\ell\ = (\mu_0/2\pi)\ i_1 i_2/r}$ $\quad (= F_2/\ell)$
  la f. per unità di lunghezza è $\propto$ alle correnti, ad 1/r e dipende dal mezzo interposto: correnti parallele si attraggono, c. antip. si respingono
- def. operativa di ampère: due correnti parallele di 1 A distanti 1m, esercitano una forza di 2 10^{-7} N/m l'una sull'altra



(*) senza dimostrazione

Moto di cariche in campo magnetico



- in **B**: **F** sempre $\perp$ **v** $\rightarrow$ $\mathcal{L} = 0$
  $K = \frac{1}{2}mv^2 = \text{cost}$ $|\mathbf{v}| = \text{cost}$
  varia solo la direzione di **v**
- caso semplice: **v** $\perp$ **B** $\rightarrow$ orbita circolare (altrimenti elicoidale); dal II principio

  $ma = mv^2/r = F = qvB$

  $r = mv/(qB)$

  è il raggio dell'orbita del moto circolare uniforme;

  $\nu = v/(2\pi r) = qB/(2\pi m)$

  frequenza di ciclotrone (indipendente da v e r)

Fine dell’elettromagnetismo