ELETTROMAGNETISMO

CARICA ELETTRICA

Fenomeni di elettrizzazione noti dallôantichità (Talete di Mileto e ambra, etc), produzione di elettricità per strofinamento, elettricità passa da un corpo allôaltro se questi sono collegati ad es da metalli (conduzione)

Interpretazione moderna:

Åelettricitaô dovuta alla presenza di **particelle cariche**
(es. elettrone, 1897, J.J.Thompson)

Å**carica** elettrica q sempre **quantizzata**
(q = n e con n intero, 1909 Millikan)

Sistema internazionale (SI):

unitaô di misura = **coulomb [c]** (derivata dallôampere 1c =1a $\times$ 1s)
carica fondamentale: **e=1,6 $\times$ 10^{-19} c**

2 tipi di cariche: positive o negative

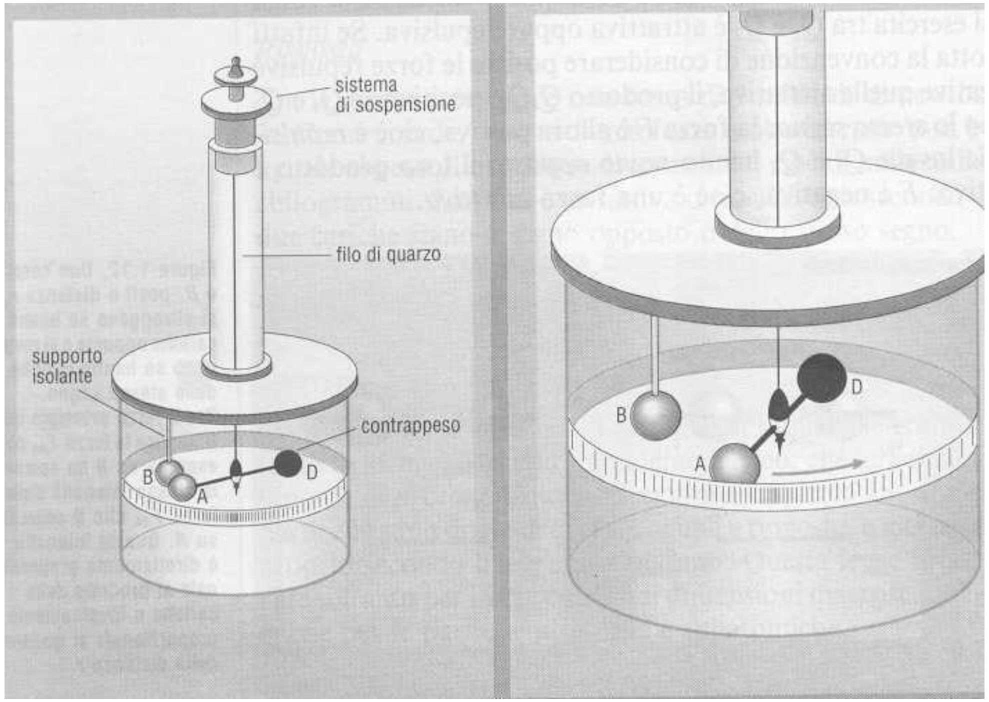
elettrone: q = - e
protone: q = + e
neutrone: q = 0
cariche tipiche in laboratorio = **10^{-8} c-10^{-7} c**

Legge di conservazione della carica elettrica

in un sistema isolato la somma algebrica delle cariche elettriche si mantiene costante.Vale anche in relatività e fisica delle particelle
(conservazione delle particelle o creazione di coppie)

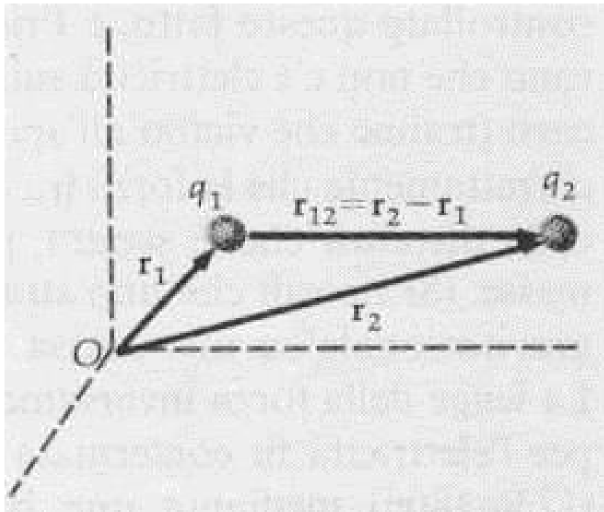
LEGGE DI COULOMB

Bilancia di Torsione:



Caratteristiche della forza:

1. **diretta lungo la congiungente**
2. **attrattiva** o **repulsiva**
3. $\mathbf{F} = k\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{u}}$



unità di misura *k* determinata dalle unità di misura. Determinazione **valore sperimentale:**

$$k = 8{,}99 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{C}^2} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{C}^2}$$

CAMPO ELETTRICO

Definizione del vettore campo elettrico:

(**indipendente dalla carica esploratrice** q_0) $\Rightarrow$ $\mathbf{F} = q_0\,\mathbf{E}$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}$$

Il campo **E sostituisce l'azione a distanza istantanea**

Il campo **E** esercita la forza in un punto, il campo si propaga con la velocità della luce

$$\hat{u}_r \Rightarrow \text{versore della direzione tra le due cariche}$$

Campo elettrico di una carica puntiforme:

$$F = k\frac{q_0 q}{r^2}\hat{u}_r = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0 q}{r^2}\hat{u}_r$$

Alcuni campi elettrici in natura

	E, N/C
impianti elettrici nelle abitazioni	10^{-2}
nelle radioonde	10^{-1}
nell'atmosfera	10^2
nella luce solare	10^3
sotto una nube temporalesca	10^4
in un lampo	10^4
in un tubo per raggi X	10^6
sull'elettrone in un atomo d'idrogeno	$6 \cdot 10^{11}$
sulla superficie di un nucleo di uranio	$2 \cdot 10^{21}$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = k\frac{q}{r^2}\hat{u}_r$$

LINEE DI FORZA

Definizione:
linee tali che in ogni punto la tangente coincide con la direzione del campo **E** in quel punto

(verso coincidente col verso di **E**)

Esempio: carica puntiforme **positiva**

Densità n delle linee $\propto$ intensità di E

Superficie sferica intorno a una carica puntiforme:

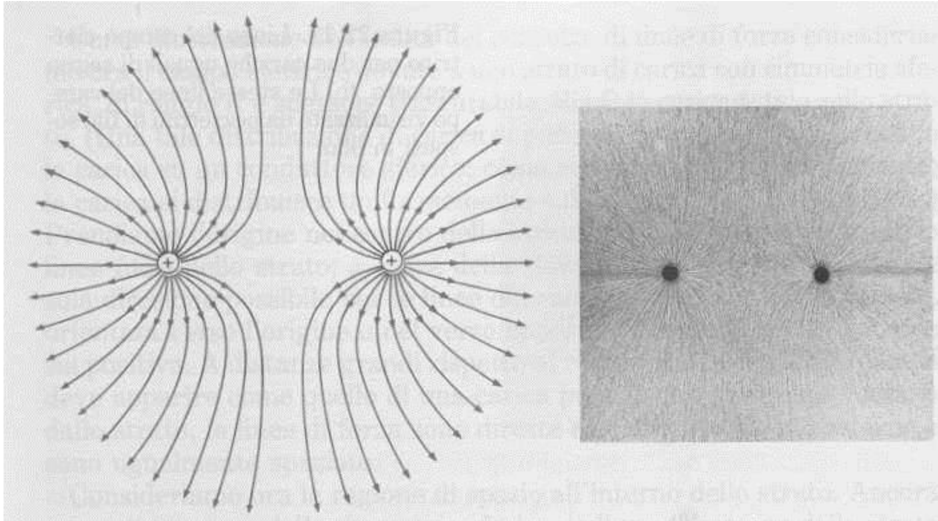
$$A = 4\pi r^2 \Rightarrow n = N/A \propto 1/r^2 \propto E$$

Prescrizioni da osservare: (**Criterio di Faraday**)

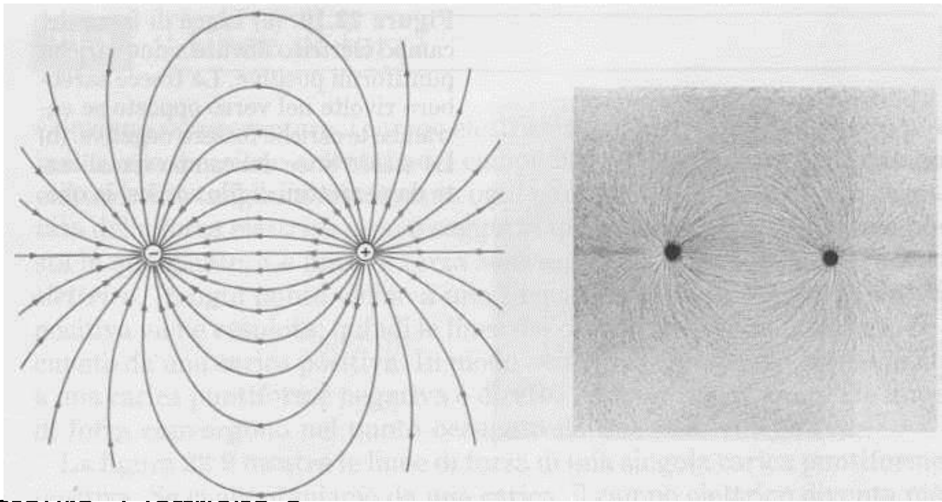
1. **generare le linee solo sulle cariche**
2. **numero di linee proporzionale alla carica**
3. **disposizione simmetrica**

LINEE DI FORZA

Esempio:
2 cariche puntiformi eguali **positive**



Esempio:
2 cariche uguali
e **opposte** in segno (**dipolo**)

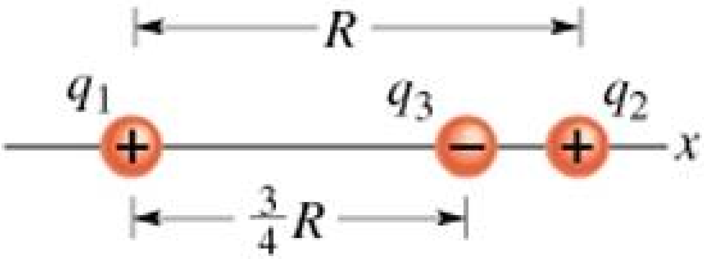


Esempio

Tre cariche fisse q_1, q_2, q_3 sono collocate sullôasse x.

$$q_1 = 1.6 \cdot 10^{-19}\ \text{C},\ q_2 = 3.2 \cdot 10^{-19}\ \text{C},\ q_3 = -\ 3.2 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$$

q_1 e q_2 sono poste alla distanza R = 0.02 m, mentre q_3 si trova tra di loro, alla distanza ¾ R da q_1. Calcolare la forza elettrostatica $\mathbf{F}_1$ agente sulla carica q_1 per effetto della altre due.



La forza $\mathbf{F}_1$ è data dalla somma (vettoriale) delle forze elettrostatiche $\mathbf{F}_{12}$ e $\mathbf{F}_{13}$, che sono esercitate su q_1 rispettivamente dalle cariche q_2 e q_3. Consideriamo per prima la forza $\mathbf{F}_{12}$ e calcoliamone il modulo attraverso la legge di Coulomb:

$$|F_{12}| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{R^2} = 9 \cdot 10^9\ \text{N m}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{(1.6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}) \cdot (3.2 \cdot 10^{-19}\ \text{C})}{(0.02\ \text{m})^2} =$$

$$= 1.15 \cdot 10^{-24}\ \text{N}$$

La forza $\mathbf{F}_{12}$ è di tipo repulsivo, dato che le cariche q_1 e q_2 sono di uguale segno, ed è pertanto diretta nel verso negativo dellôasse x.

Consideriamo ora la forza $\mathbf{F}_{13}$, il cui modulo è uguale a:

$$|\mathbf{F}_{13}| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_3|}{\left(\frac{3}{4}R\right)^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{(1.6 \cdot 10^{-19}\text{ C}) \cdot (3.2 \cdot 10^{-19}\text{ C})}{(0.75 \cdot 0.02\text{ m})^2} =$$

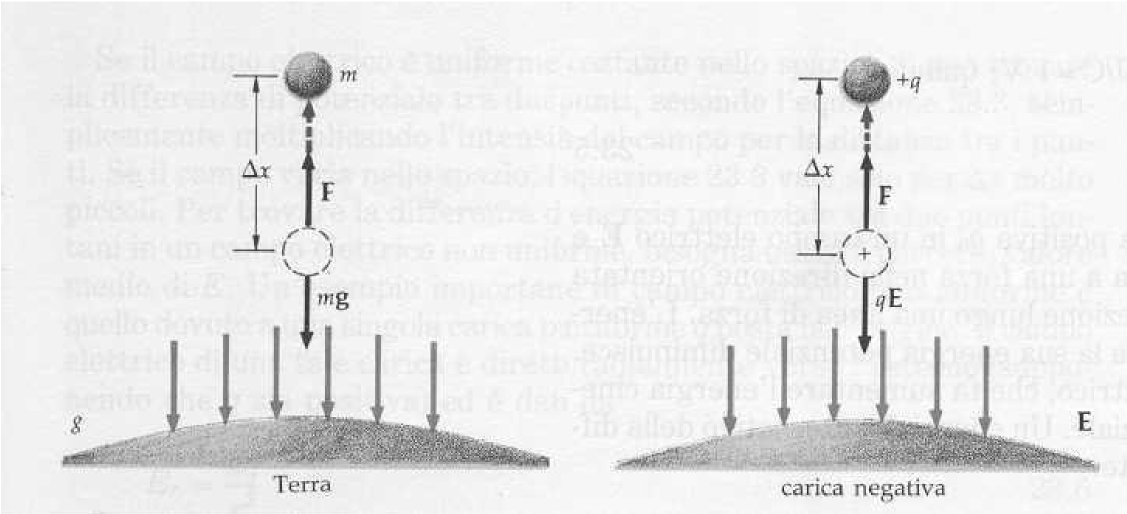
$$= 2.05 \cdot 10^{-24}\text{ N}$$

La forza $\mathbf{F}_{13}$ è di tipo attrattivo, dato che le cariche q_1 e q_3 sono di segno opposto, ed è pertanto diretta nel verso positivo dellôasse x.

La forza $\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13}$ è diretta lungo lôasse x, nel verso positivo (dato che il modulo di $\mathbf{F}_{13}$ è maggiore di quello di $\mathbf{F}_{12}$); il modulo di $\mathbf{F}_1$ è uguale a:

$$|\mathbf{F}_1| = (2.05 - 1.15) \cdot 10^{-24}\text{ N} \cong 9 \cdot 10^{-25}\text{ N}$$

ENERGIA POTENZIALE ELETTROSTATICA



Eô**analogo al caso gravitazionale in cui E= mgh**

Lavoro compiuto da $\mathbf{F}_{ext}$

$\mathbf{L}_{ext} = \mathbf{F}_{ext} \cdot \Delta \boldsymbol{x} = F_{ext,x} \;\; \Delta \boldsymbol{x} = - q_0 \, E_x \, \Delta \boldsymbol{x}$ $\qquad$ $(\mathbf{L}_{ext} = - \mathbf{L}_{campo})$

Aumento di energia potenziale della carica:

$$\boxed{\Delta \mathbf{U} = \mathbf{L}_{ext} = - q_0 \, E_x \, \Delta \boldsymbol{x}}$$

Energia potenziale $\propto$ carica esploratrice

Caso di campo **E** uniforme (quello della figura): energia potenziale definita a meno di una costante:(livello di altezza 0)

POTENZIALE ELETTRICO

Differenza di potenziale ΔV = differenza di energia potenziale elettrostatica riferita allôunitaôdi carica

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_0} = -E_x \Delta x$$

(indipendente dalla carica esploratrice)

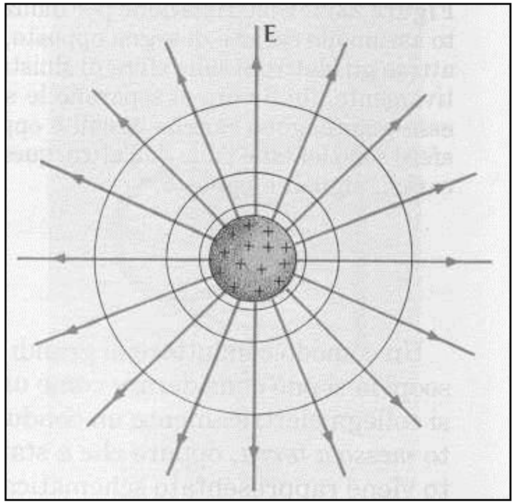
ÅUnità di misura SI: il **Volt** $1\ \mathrm{V} = 1\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}$

Riespressione dellôunità del campo elettrico

$$1\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = 1\frac{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}}{\mathrm{C}\cdot\mathrm{m}} = 1\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}\cdot\mathrm{m}} = 1\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$$

SUPERFICI EQUIPOTENZIALI E LINEE DI CAMPO

Luogo dei punti dove *V* = cost.
Sempre ⊥ alle linee di forza
Il lavoro per spostare carica su superficie equipotenziale è nullo perché campo ⊥a spostamento
Esempio: carica puntiforme

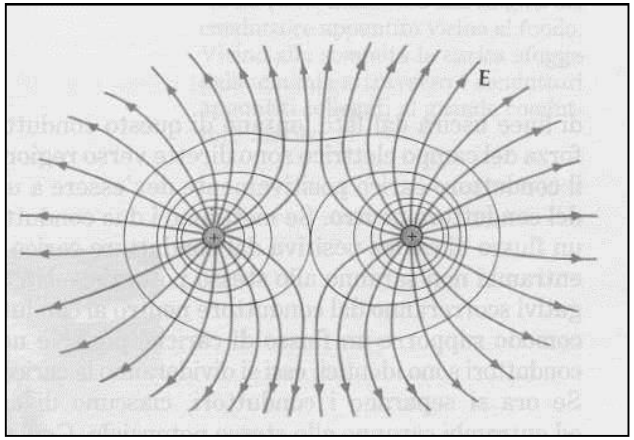


Distanza tra sup. equipotenziali successive:

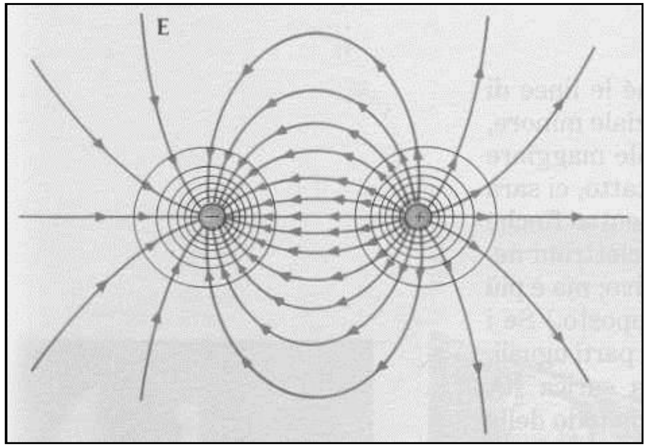
$$\Delta V = -E\Delta x$$

A Δv fissato:
E grande ⇨ Δx piccolo (superfici ravvicinate)
E piccolo ⇨ Δx grande (superfici più lontane)

2 Cariche puntiformi

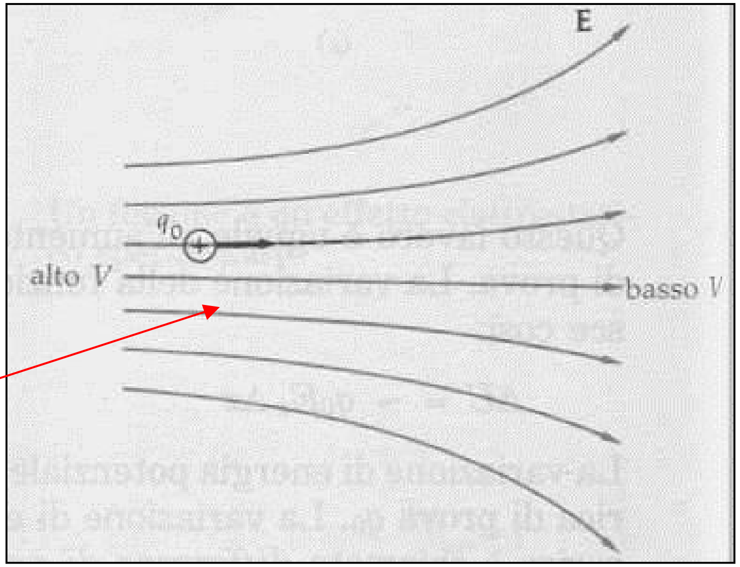


Dipolo



POTENZIALE ELETTRICO

Relazione valore del potenziale $\Leftrightarrow$ Linee di forza



carica di prova q_o libera di muoversi: accelera lungo la linea di forza

Linee di forza orientate da alto ***V*** → basso ***V***

Campo uniforme:

$$E_x = \cos t = -\frac{\Delta V}{\Delta x} \Rightarrow \Delta V = -E_x \Delta x$$

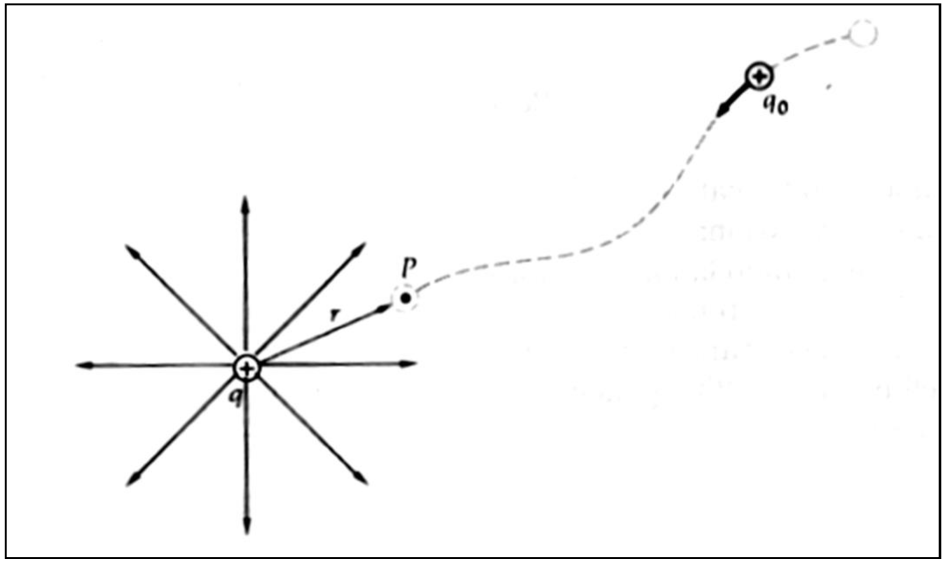
POTENZIALE ELETTRICO

Campo da carica puntiforme: $E_r = k\frac{q}{r^2} \Rightarrow V = k\frac{q}{r}$ (V = 0 per r = Ð)

$$\mathbf{U} = q_0\mathbf{V} = k\frac{qq_0}{\mathbf{r}}$$

con U = 0 per r = Ð

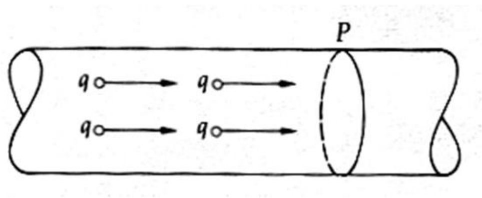
U rappresenta effettivamente il lavoro necessario per formare il sistema delle 2 cariche (**V** il lavoro per una carica di prova unitaria)



Unità di misura speciale (non SI): lô**elettronvolt** (eV)

U = q ***V*** ⟹ 1eV= 1,6 · 10 $^{-19}$ C · 1V = 1,6 · 10 $^{ï 19}$ J

CORRENTE ELETTRICA



Δ**q** attraversa la superficie in Δ**t**

Intensità di corrente: $I = \dfrac{\Delta q}{\Delta t}$

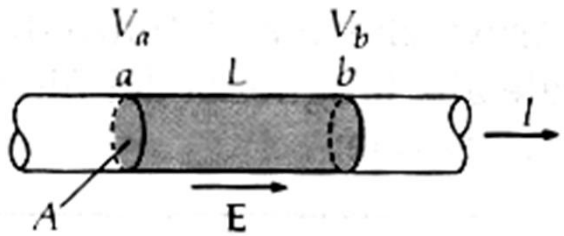
Unità di misura SI: **lôAmpere** (grandezza fondamentale)

$$1A = \frac{1C}{1s} \Rightarrow 1C = 1A \times 1s$$

Verso convenzionale della corrente: **quello delle cariche +**
(il moto reale degli elettroni è in verso opposto)
moto di cariche ï o di cariche + equivalenti, in generale

LEGGE DI OHM

Leggi empiriche per il comportamento dei materiali
applichiamo una ΔV (o un campo **E**, che è lo stesso):



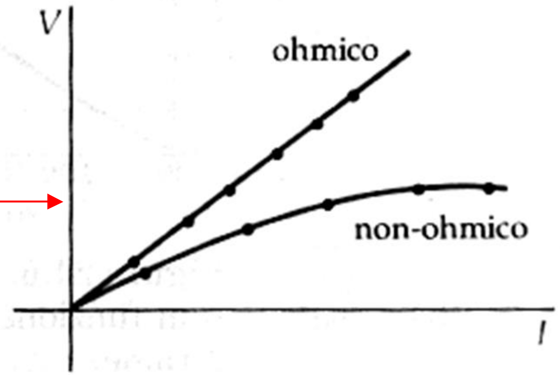
La corrente che si genera è: $I = \frac{V}{R}$

cioè $I \propto V$, con coefficiente di proporzionalità 1/R

quindi gli oggetti possiedono una **resistenza elettrica R:** $R = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$

unità di misura SI, lo **Ohm** (Ω): $1\Omega = \frac{1V}{1A}$

N.B. ci sono anche materiali che **non** seguono la legge di **Ohm**



LEGGE DI OHM

La resistenza di un oggetto dipende da:

- le sue caratteristiche geometriche (L,A)
- il materiale (ρ)

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

(II LEGGE DI OHM)

ρ = **resistività** elettrica del materiale
unitaôdi misura si: $\Omega \cdot m$

Conduttori

Semiconduttori

Isolanti

Cavi elettrici fatti di rame anche perché duttile e per il prezzo

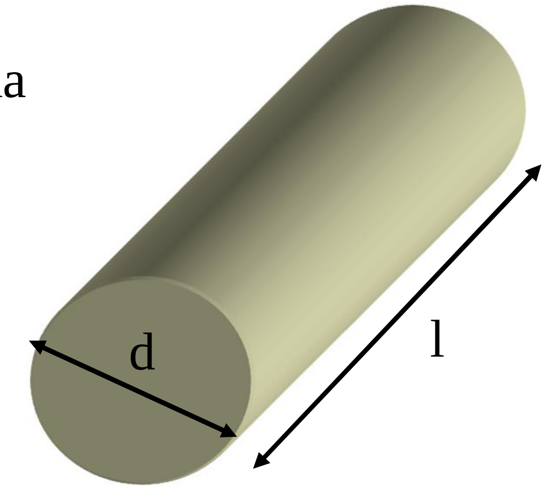
Tabella 24.1
Resistività e coefficienti di tempèratura

Materiale	Resistività ϱ a 20 °C, $\Omega \cdot m$
argento	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$
rame	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$
alluminio	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$
tungsteno	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$
ferro	$10 \cdot 10^{-8}$
piombo	$22 \cdot 10^{-8}$
mercurio	$96 \cdot 10^{-8}$
nichelcromo	$100 \cdot 10^{-8}$
carbonio	$3500 \cdot 10^{-8}$
germanio	0,45
silicio	640
legno	$10^{8} \div 10^{14}$
vetro	$10^{10} \div 10^{14}$
ebanite	$10^{13} \div 10^{16}$
ambra	$5 \cdot 10^{14}$
zolfo	10^{15}

Esempio

Un conduttore per alta tensione è formato da un filo di rame del diametro di 1 cm ed è lungo 20 km. Calcolare la sua resistenza R e l'intensità della corrente I che lo attraversa, sapendo che la differenza di potenziale ai suoi estremi è di 20000 V e che la resistività ρ del rame è pari a $1.7 \cdot 10^{-8}\ \Omega$ m.

Usando la seconda legge di Ohm, dove S indica la sezione del filo trovo R :



$$\mathrm{R} = \rho\frac{\mathrm{l}}{\mathrm{S}} = \rho\frac{\mathrm{l}}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{(1.7\cdot 10^{-8}\,\Omega\cdot \mathrm{m})(2\cdot 10^{4}\,\mathrm{m})}{\pi\cdot(0.005\,\mathrm{m})^2} =$$

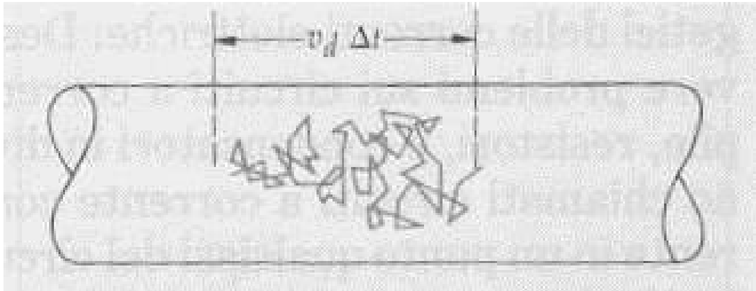
$$= 4.33\Omega$$

Dalla prima legge di Ohm segue poi:

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{R}} = \frac{20000\ \mathrm{V}}{4.33\,\Omega} = 4619\mathrm{A}$$

ENERGIA NEI CIRCUITI (EFFETTO JOULE)

Filo sottoposto a una ΔV:
moto microscopico degli elettroni:

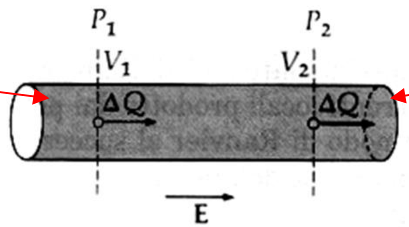


Moto uniformemente accelerato + urto→ moto uniformemente accelerato + urto ecc.→

In **media equivale a moto uniforme con velocitaô*v_d***

Analisi Energetica:

Alto *V*



Basso *V*

(ΔQ positiva)

ENERGIA NEI CIRCUITI (EFFETTO JOULE)

Energia potenziale diminuisce, ma energia cinetica non aumenta.
Dove va l'energia?

Energia Termica (urti)
=
Effetto Joule

Energia dissipata:
$\Delta U = \Delta Q\ (V_1 - V_2) = \Delta Q \cdot V$ (V=diminuzione del potenziale)

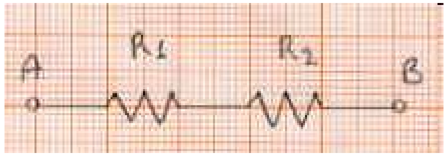
Rapidità con cui viene persa l'energia (P = **Potenza dissipata**):

$$P = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{\Delta V \cdot Q}{\Delta t} = I \cdot V$$

I in Ampere e **V** in Volt → **P** in Watt

Per conduttori ohmici: altre 2 leggi equivalenti **$P = I^2 R$** e $P = \frac{V^2}{R}$

Resistenze in serie



sottoponendo tre resistenze R1, R2, R3 a una tensione V, ho d.d.p. V_{R1}, V_{R2}, V_{R3} diverse tra di loro. Le R_i sono attraversate dalla stessa corrente

$$I= \quad I_{R1}=I_{R2}=I_{R3}$$

Quindi: V_{R1} diverso da V_{R2} diverso da V_{R3}

La tensione totale del circuito sarà quindi :

$$V=V_{R1}+V_{R2}+V_{R3}$$ (secondo la legge di Ohm: V=R Ā)

Rt(otale) Ā =R1 Ā +R2 Ā +R3 Ā (raccogliendo a fattor comune)

$$R_t\bar{A}=(R_1+R_2+R_3)\bar{A}$$

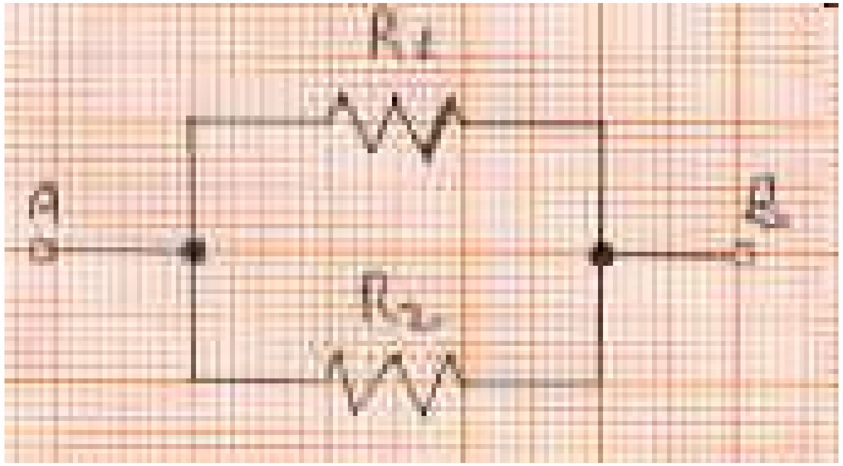
(dividendo ambo i membri per I)

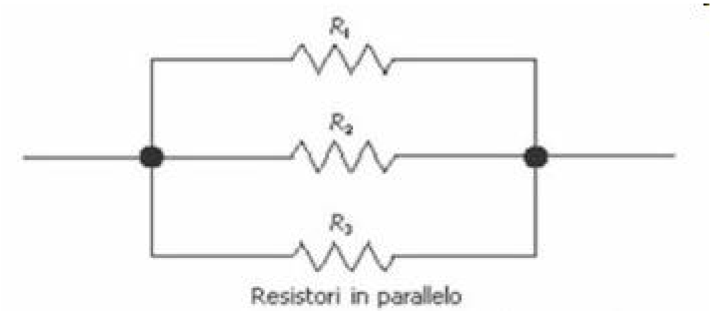
$$R_t =R_1+R_2+R_3$$

Concludendo, quindi, un circuito in cui sono presenti più resistenze in serie, può essere semplificato con unôunica resistenza uguale alla somma di tutti i valori delle resistenze stesse:

$$R_t =R_1+R_2+R_3 +é +R_n$$

Resistenze in parallelo





sottoponendo tre resistenze R1, R2, R3 a una tensione V, ho d.d.p. V_{R1}, V_{R2}, V_{R3} eguali tra di loro. Le R_i sono attraversate da diverse correnti tali che la corrente che entra I sia equale alla somma delle uscenti (come in un **fiume che si divide in tre parti)**

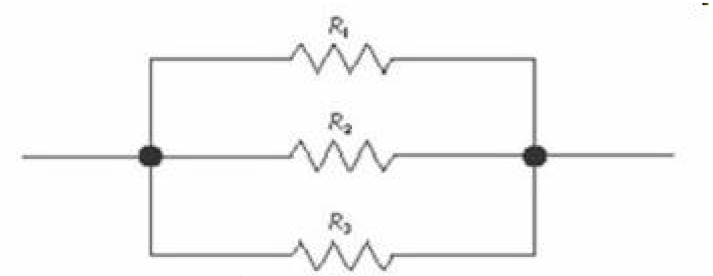
$$\mathbf{I=I_{R1}+I_{R2}+I_{R3}}$$

(secondo la legge di Ohm I=V/R) **V/Rt=V/R1+V/R2+V/R3** :

(raccogliendo a fattor comune) V/Rt=(1/R1+1/R2+1/R3) ĀV

(dividendo ambo i membri per V)

$$\mathbf{1/R_t = 1/R_1+1/R_2+1/R_3}$$



Resistori in parallelo

Concludendo, quindi, un circuito in cui sono presenti più di tre resistenze in parallelo, può essere semplificato con unôunica resistenza equivalente utilizzando la seguente formula generale:

$$\mathbf{1/R_t = 1/R_1+1/R_2+1/R_3+é\ +1/R_n}$$

Esempio

Se hai più lampadine collegate in serie, cosa succede se una di esse si fulmina?

1) Si spegne la lampadina fulminata.
2) Si spengono anche le lampadine buone.

3) Si accendono più forte le lampadine buone

Campo magnetico

Å Magnetismo noto ad antichi greci (magnetite)

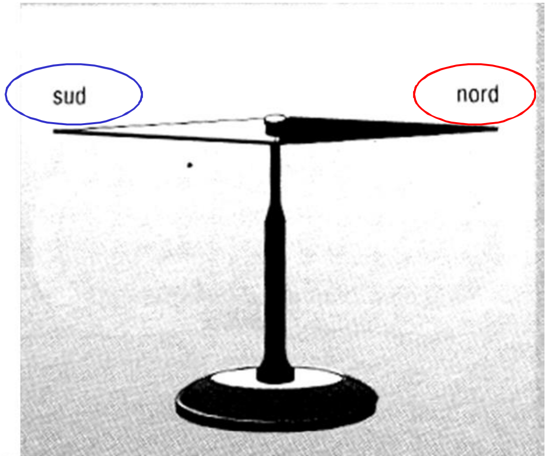
Å 1269 ago bussola (poli magnetici in analogia con poli terrestri)

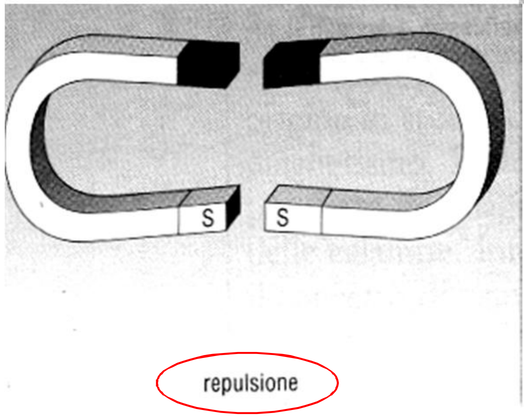
Å Gilbert (1540-1603) capisce perché ago si orienta (terra è magnete permanente polo Nord è polo Sud magnetico)

Å e capisce differenza tra forza ed attrazione elettrica e polo magnetico.

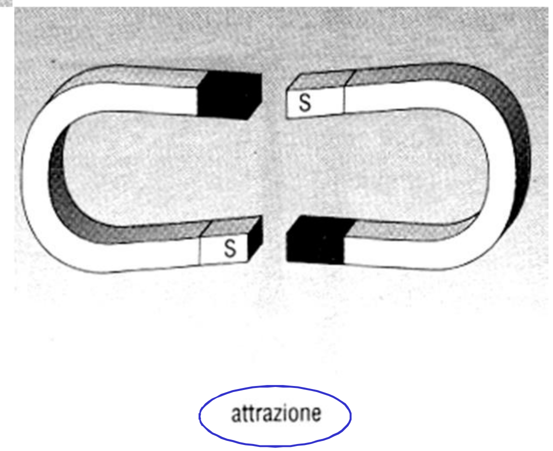
CAMPO MAGNETICO

Noto fin dall'antichità (proprietà della magnetite)
polo **S** e polo **N** magnetico (dall'orientamento sulla superficie terrestre)





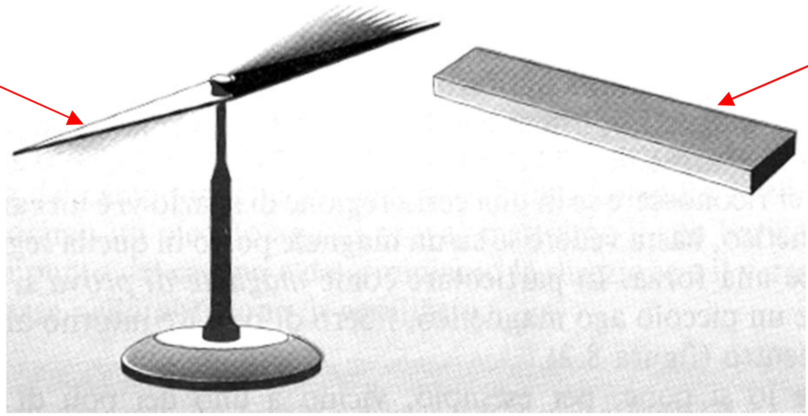
Poli **opposti** si **attraggono**,
poli **identici** si **respingono**



CAMPO MAGNETICO

Interpretazione moderna: proprietà dello spazio

Magnete rivelatore del campo

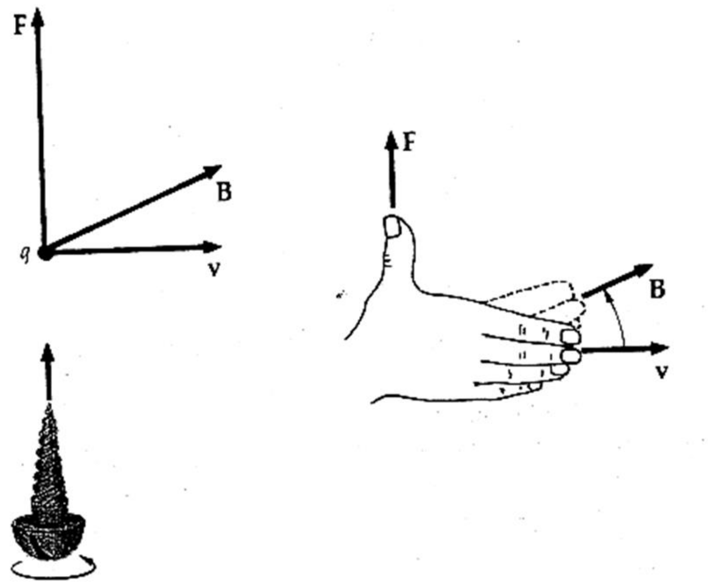


Magnete sorgente del campo

- Definizione del vettore **B:**
direzione e verso: quelle dell'ago magnetico (da S a N)
- Modulo:
osservazione sperimentale per una carica in moto in un campo **B**:
compare una forza (**Forza di Lorentz**)

CAMPO MAGNETICO

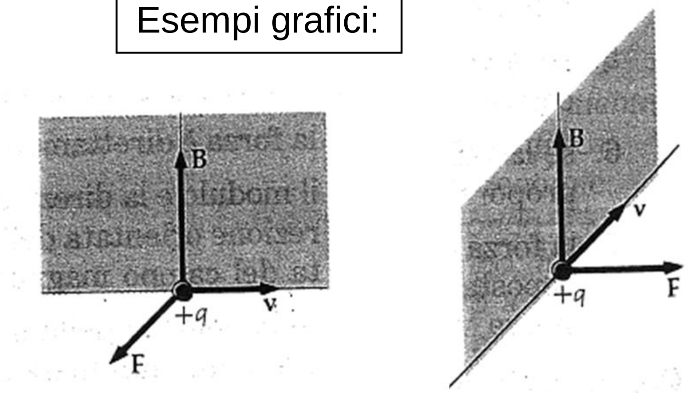
Caratteristiche Forza:
F $\propto$ q
F $\propto$ **v**
F $\propto$ sin θ
F $\perp$ al piano di **v** e **B**
Il verso di **F** dipende da quelli di **V** e **B**
e dal segno di q (q**v**, **B** e **F** =terna destrorsa)



Modulo **B** = costante di proporzionalità:

$$\frac{F}{qv\sin\theta} = B \Rightarrow F = qvB\sin\theta$$

Esempi grafici:



Unità di misura SI: Tesla

$$\frac{1\mathrm{N}}{1\mathrm{C}\cdot 1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = 1\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}} = 1\mathrm{T}$$ (= 10^4 G)

Moto di particella puntiforme carica in campo magnetico

- particella arriva con velocità **v** ϱ a campo **B** uniforme →soggetta a forza in modulo
- (1) $F = qvB$ ϱ sia a **v** e a **B**
- legge della dinamica dice (2) **F**=m**a**
- **a è accelerazione centripeta, orbita è cerchio (3) $a=v^2/r$.**
- **Si trova raggio usando le formule appena scritte**
- $qvB=mv^2/r$ → $r= mv/(qB)$

Moto di particella puntiforme carica in campo magnetico

Å Moto è circolare uniforme con v costante in modulo. Energia cinetica resta costante.

Å Periodo T tempo impiegato a percorrere un giro→ vT=2´ r→ trovo T e frequenza

$$T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow T = \frac{2\pi (mv/qB)}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

Esempio: protone si muove su circonferenza di R=21 cm con campo B di 4000G: trovare T e v

Converto B da Gauss a Tesla

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi 1{,}67 * 10^{-27}}{1{,}6 * 10^{-19} 0{,}4} = 1{,}64 * 10^{-7}\,s$$

$$v = \frac{rqB}{m} = \frac{0{,}21 qB}{m} = 8{,}05 * 10^{6}\,m/s$$