

# Fisica

**Leonello Servoli**

[Leonello.servoli@pg.infn.it](mailto:Leonello.servoli@pg.infn.it)

Tel.: 0039-348-3345847

<http://www.fisica.unipg.it/~servoli>

<b>8 novembre</b>	<b>5</b>	
<b>11 novembre</b>	<b>6</b>	
<b>15 novembre</b>	<b>7</b>	
<b>29 novembre</b>	<b>8</b>	
<b>6 dicembre</b>	<b>9</b>	
<b>9 dicembre</b>	<b>10</b>	
<b>13 dicembre</b>	<b>11</b>	
<b>20 dicembre</b>	<b>12</b>	

# ELETTRICITÀ (1)

---

Le prime osservazioni sui fenomeni elettrici risalgono ai greci: Talete di Mileto ( $\approx 600$  aC) con l'osservazione che piccoli pezzetti di paglia vengono attratti da un pezzo di ambra strofinato.

Il vetro strofinato con la seta *respinge* il vetro strofinato con la seta.

Il caucciù strofinato con la pelle *respinge* il caucciù strofinato con la pelle, ma *attrae* il vetro strofinato con la seta.

# ELETTRICITÀ (2)

Riassumendo:

1. alcuni corpi (vetro, ambra, caucciù ...) se strofinati acquistano una *carica elettrica*;
2. le cariche elettriche esercitano delle forze fra di loro;
3. le cariche sul vetro e sul caucciù devono avere natura diversa.

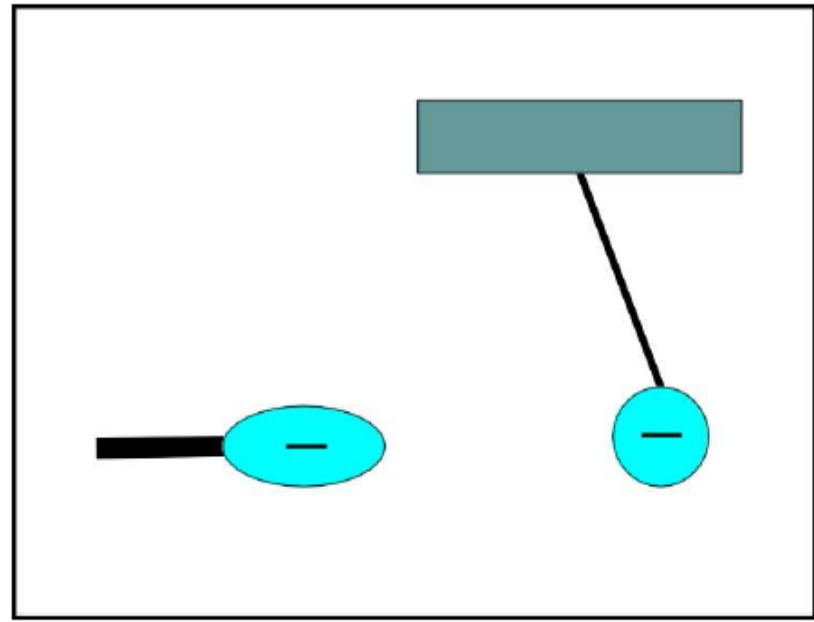
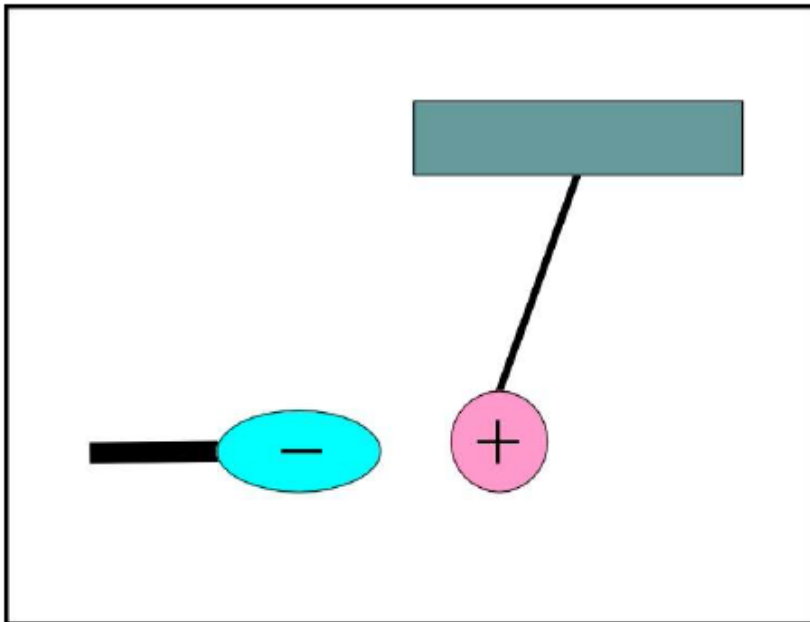
**Benjamin Franklin (1706-1790):**

**le cariche elettriche stanno all'interno dei corpi ed esistono due tipi di elettricità:**

***positiva e negativa.***

# ELETTRICITÀ (3)

Cariche di segno opposto si attraggono e cariche dello stesso segno si respingono.



# CONDUTTORI ED ISOLANTI

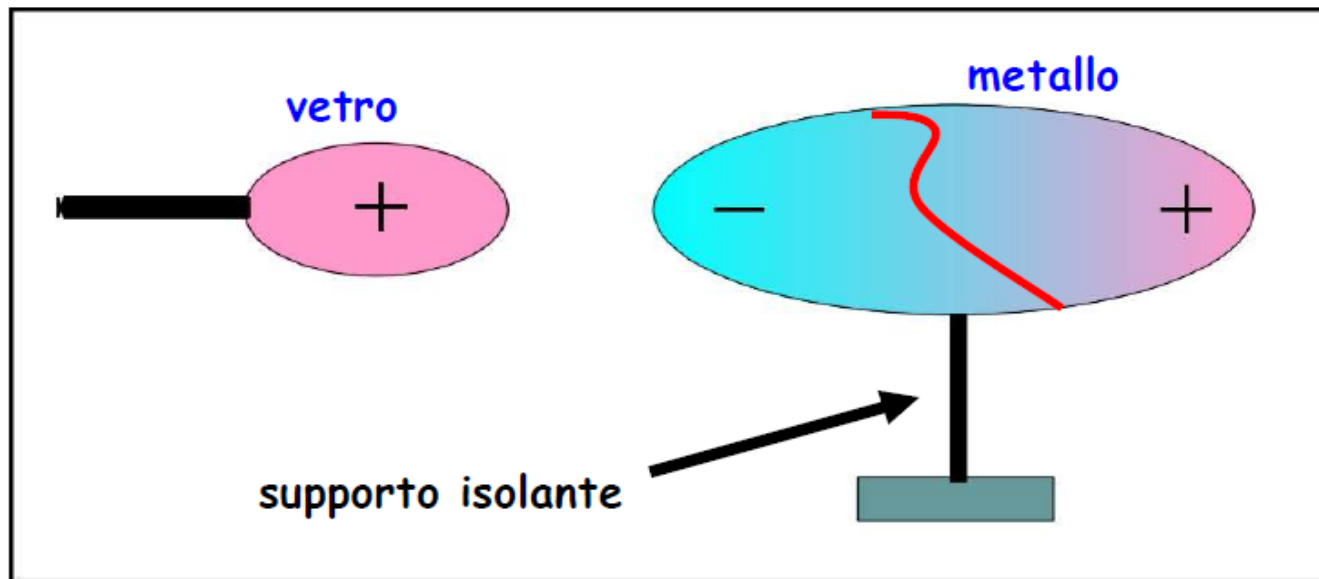
I materiali non si comportano tutti nella stessa maniera rispetto alla carica elettrica. Per esempio non è possibile elettrizzare, per strofinio, una sbarretta di Fe.

**CONDUTTORI:** le cariche sono libere di muoversi  
(metalli, soluzioni ioniche...)

**ISOLANTI o  
DIELETTRICI** le cariche non sono libere di muoversi  
(vetro, plastiche, legno...)

# INDUZIONE ELETTROSTATICA

L'elettricità si produce anche per *induzione*, cioè avvicinando un corpo elettrizzato ad un metallo isolato.

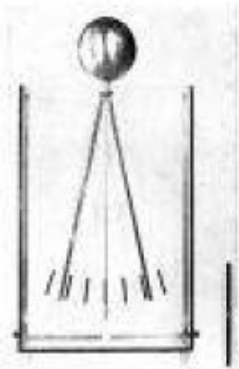


Se in presenza del vetro elettrizzato si divide il metallo, si ottengono due corpi carichi.

# ELETTROSCOPIO A FOGLIE



Utilizzando la mobilità delle cariche elettriche depositate su di un conduttore, è possibile costruire uno strumento per misurare la carica elettrica.





# CARICHE ELETTRICHE (1)

Consideriamo due cariche elettriche *puntiformi*  $q_1$  e  $q_2$ . Puntiforme significa che le dimensioni fisiche dei due corpi che portano le cariche sono trascurabili rispetto alla loro distanza e quindi possono essere considerati dei punti.

La terra  
( $r=6400$  Km) non  
è puntiforme  
rispetto a me  
che ci cammino  
sopra.



La terra è  
puntiforme  
rispetto alla  
Via Lattea  
( $r=10^5$  anni-  
luce).

# LEGGE DI COULOMB (1)

---

Per due cariche elettriche puntiformi Coulomb nel 1785 osservò sperimentalmente che:

1)  $F \propto \frac{1}{r^2}$

2)  $F \propto q_1 q_2$

3) direzione → la congiungente le cariche

4) segni concordi → repulsiva    discordi → attrattiva

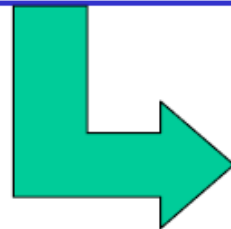
# LEGGE DI COULOMB (2)

---

$$|\vec{F}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1q_2}{r^2}$$

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$  costante dielettrica del vuoto

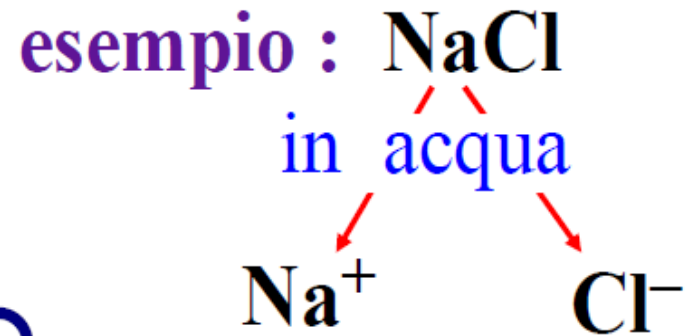
$\epsilon_r$  = costante dielettrica del mezzo rispetto al vuoto



**$\text{H}_2\text{O} \epsilon_r \approx 80$**

# DISSOCIAZIONE ELETTROLITICA (1)

**legame ionico**  
(forza di Coulomb)



**I° : indebolimento del legame**

$$F_c = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{qQ}{r^2} \quad \left. \begin{array}{l} \epsilon_r \text{ (aria)} \approx 1 \\ \epsilon_r \text{ (acqua)} \approx 80 \end{array} \right\} F_{c(\text{acqua})} \approx \frac{1}{80} F_{c(\text{aria})}$$

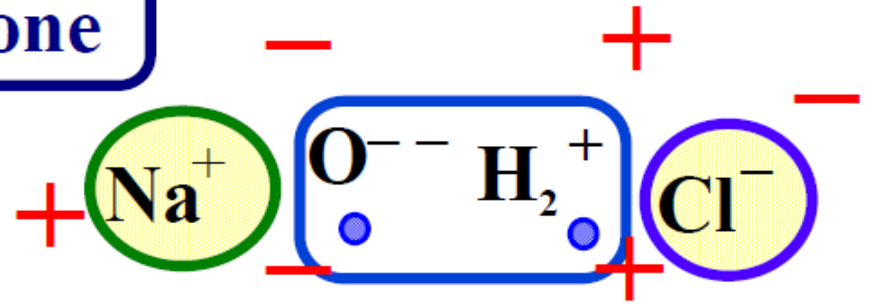
**II° : rottura del legame**

da urti per agitazione termica → **dissociazione elettrolitica**

# DISSOCIAZIONE ELETTROLITICA (2)

III° : mancata ricombinazione

da polarità molecola H<sub>2</sub>O



conduttori elettrolitici : acidi, basi, sali in H<sub>2</sub>O → forte  
sostanze organiche } → debole  
forte legame covalente } dissociazione

esempio

NaCl in H<sub>2</sub>O → dissociazione 84 %  
100 molecole NaCl → 84 Na<sup>+</sup>  
84 Cl<sup>-</sup>  
16 NaCl (non dissociate)  

---

184 particelle

# LEGGE DI COULOMB (3)

---

L'unità di misura della carica elettrica nel S.I. è il coulomb (C).

$$|\vec{F}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1q_2}{r^2}$$

La carica elettrica di 1 C è quella carica che posta nel vuoto ad 1 m di distanza da una carica elettrica uguale la respinge con la forza di  $9 \cdot 10^9$  N.



# CARICHE ELETTRICHE (2)

---

La carica elettrica è **quantizzata**, cioè non è possibile isolare cariche elettriche che siano frazioni di una carica elementare  $e$ .

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Qualsiasi carica elettrica è un numero  $n$  intero di cariche elettroniche  $e$  con  $n=0,1,2,\dots$

# CARICHE ELETTRICHE (3)

---

Se si sommano, con i rispettivi segni, tutte le cariche elettriche prima di un fenomeno, alla fine dello stesso il numero totale di cariche elettriche è rimasto invariato.

## La carica elettrica si conserva

La conservazione  
della carica



La conservazione  
dell'energia



# AZIONE A DISTANZA E TEORIA DI CAMPO (1)

---

Come fanno due cariche elettriche ad interagire fra di loro?

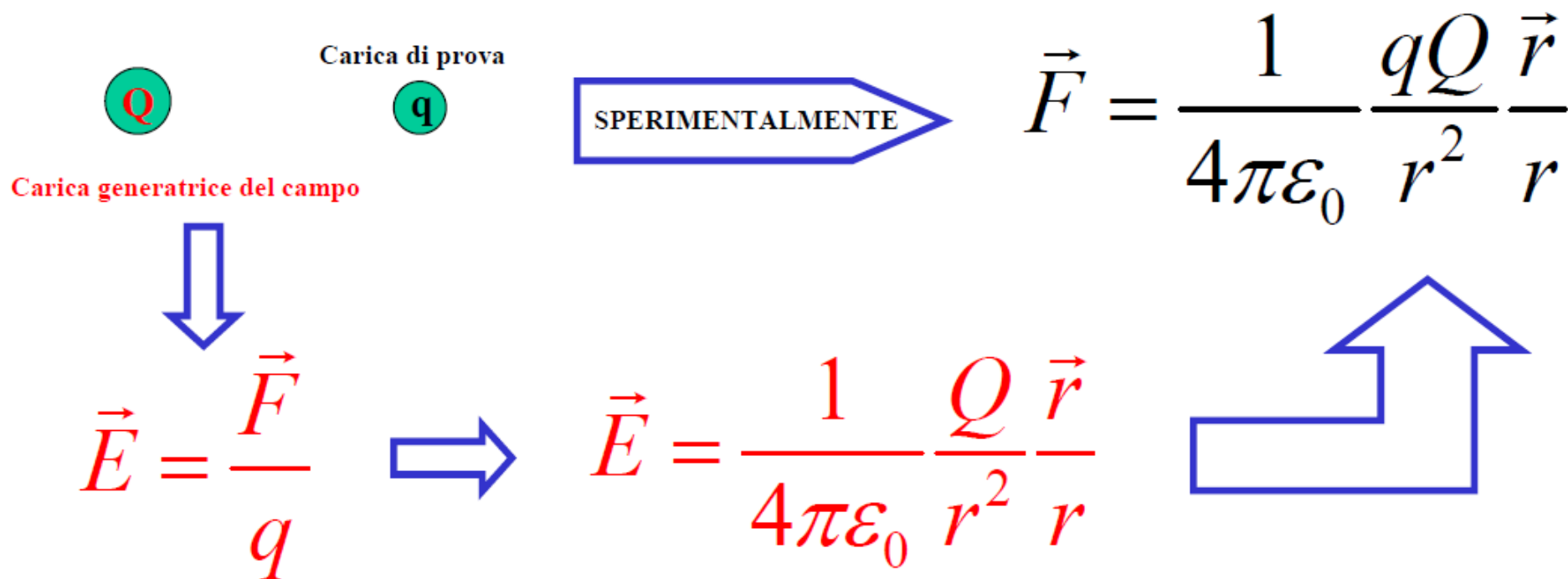
All'inizio del '900 si sono confrontate due ipotesi:

1. le cariche si scambiano dei messaggeri e quindi si accorgono della reciproca esistenza (*AZIONE A DISTANZA*);
2. una carica modifica lo spazio d'intorno e questo permette all'altra di accorgersi della sua esistenza (*TEORIA DI CAMPO*).

# AZIONE A DISTANZA E TEORIA DI CAMPO (2)

Storicamente fu scelta la teoria di campo perché più semplice.

Supponiamo di avere due cariche puntiformi  $Q$  e  $q$

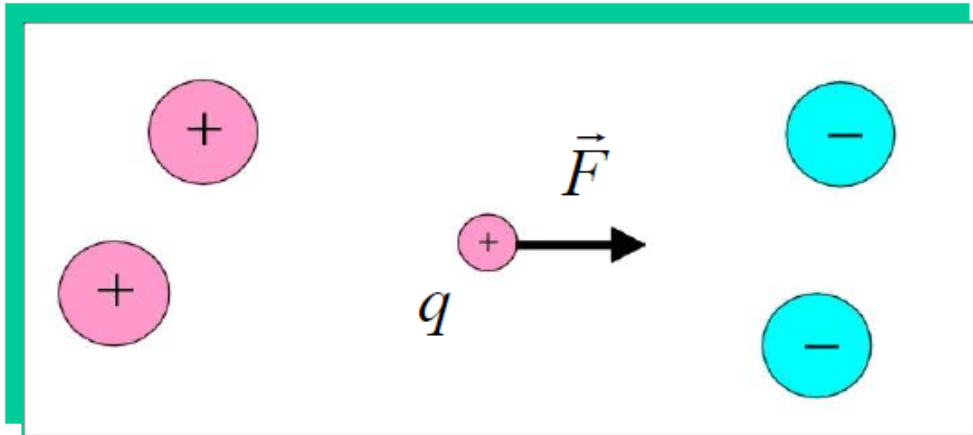


# CAMPO ELETTRICO

Una o più cariche elettriche creano nello spazio circostante un campo elettrico.

Indicando con  $F$  la forza agente sulla carica  $q$ , il campo elettrico è definito da

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



Il campo elettrico si misura in N/C

# LINEE DI FORZA DEL CAMPO ELETTRICO

---

Le linee di forza di un campo sono così costruite:

1. la tangente ad una linea di forza, in ogni punto, dà la direzione del campo in quel punto;
2. le linee sono tracciate in maniera tale che la loro densità superficiale sia proporzionale all'intensità del campo. Dove il campo è alto si addensano, dove è basso si diradano.

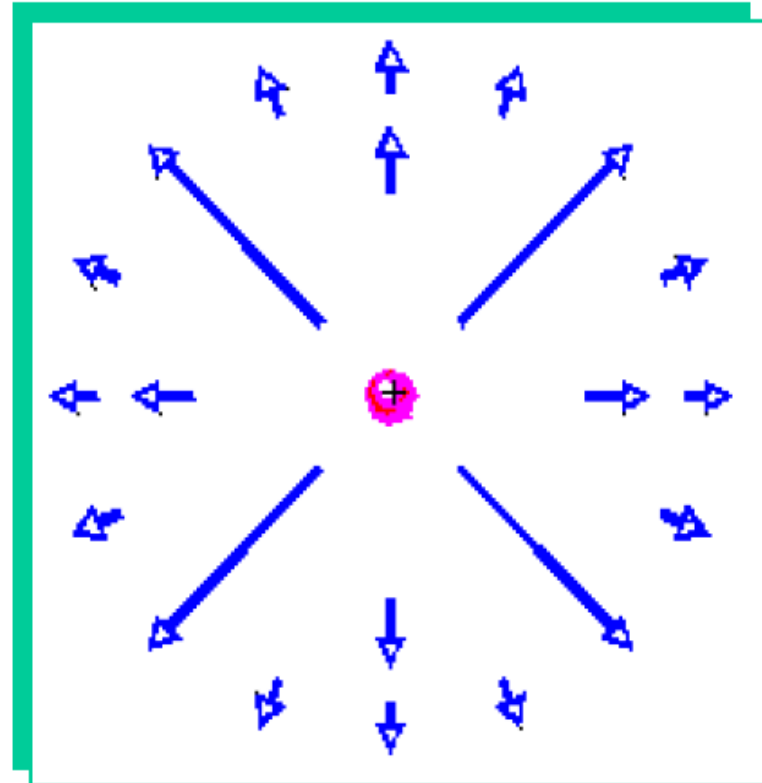
**Il campo elettrico è un vettore e quindi date  $n$  cariche il campo totale sarà**

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

# CAMPO ELETTRICO

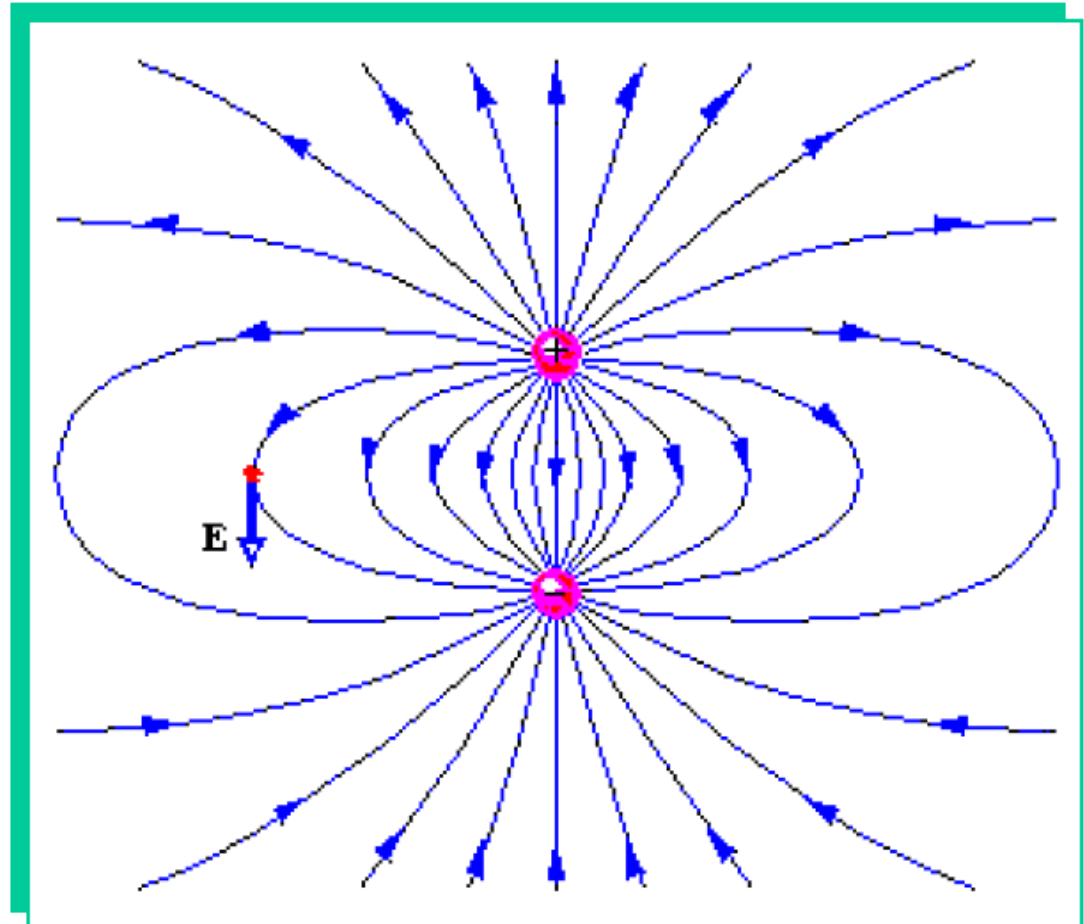
Campo elettrico  
generato da una  
carica puntiforme  $q$ .

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

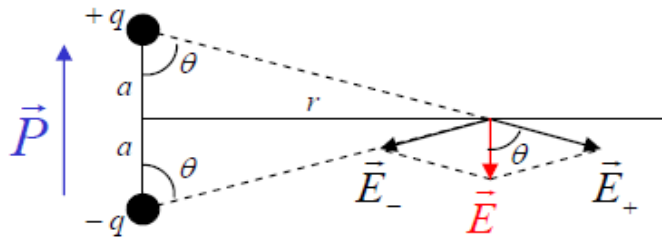


# CAMPO ELETTRICO

Campo elettrico  
generato da un  
dipolo elettrico.



# DIPOLO ELETTRICO: campo sull'asse



$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

$$|\vec{E}_+| = |\vec{E}_-| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{a^2 + r^2}$$

$$E = 2E_+ \cos\theta$$

d'altra parte

$$a = \cos\theta \sqrt{a^2 + r^2} \Rightarrow \cos\theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}}$$

$$E = 2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{a^2 + r^2} \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2aq}{(a^2 + r^2)^{3/2}}$$

Definendo il momento di dipolo elettrico  $P=2aq$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{P}{r^3} \quad (\text{con } r \gg a)$$

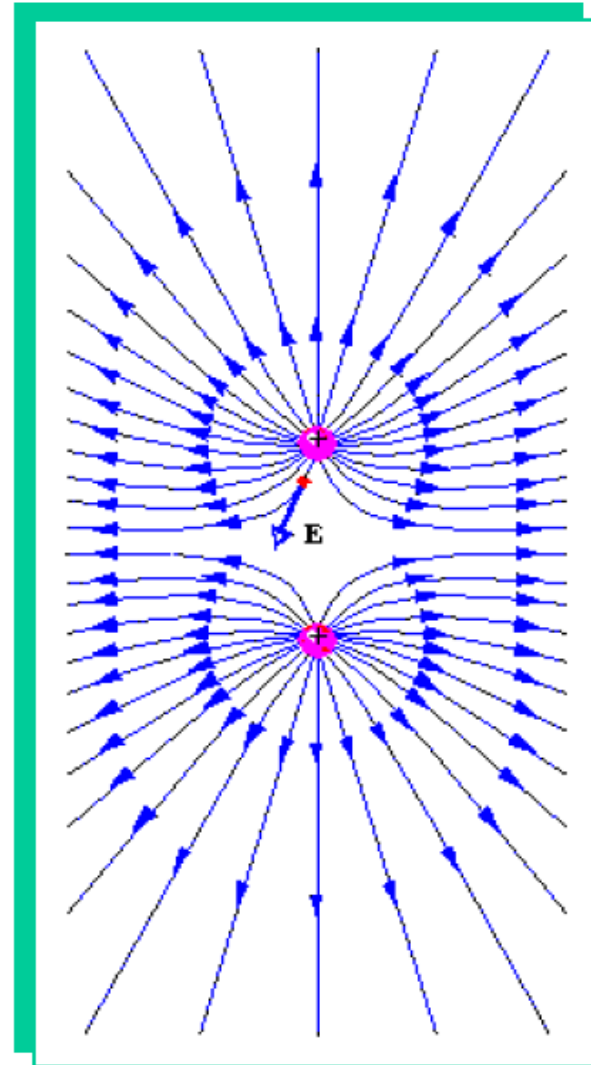
**Un corpo elettricamente neutro può avere un campo elettrico diverso da zero.**

*Questo succede perché le cariche sono separate spazialmente.*

# CAMPO ELETTRICO

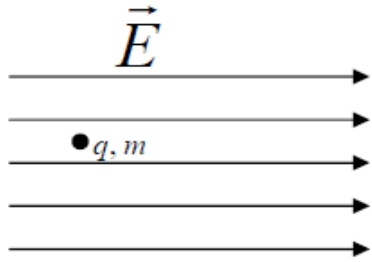
---

Campo elettrico  
generato da due  
cariche uguali.





# CARICA ELETTRICA IN CAMPO UNIFORME



Supponiamo di avere una carica elettrica  $q$  di massa  $m$  immersa in campo uniforme  $\vec{E}$ .

$$F = qE = \text{cost} \Rightarrow a = \frac{qE}{m} = \text{cost}$$

$$\frac{dv}{dt} = a = \frac{qE}{m}$$

$$dv = \frac{qE}{m} dt \Rightarrow \int dv = \frac{qE}{m} \int dt \Rightarrow v = \frac{qE}{m} t$$

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{qE}{m} t$$

$$dx = \frac{qE}{m} t dt \Rightarrow \int dx = \frac{qE}{m} \int t dt \Rightarrow x = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2$$

$$x = \frac{1}{2} at^2$$

Equazione  
oraria del  
moto  
uniformemente  
accelerato

# ENERGIA ELETTRICA

---

La forza generata dal campo elettrico è una forza conservativa, come quella gravitazionale.

Si definisce energia potenziale elettrica  $U$  posseduta da una carica elettrica  $q$ , una funzione della posizione tale che il lavoro elettrico per uno spostamento dalla posizione iniziale  $i$  alla posizione finale  $f$  è:

$$L = U_i - U_f = -\Delta U$$

# POTENZIALE ELETTRICO (1)

---

Il potenziale elettrico è definito da

$$V = U/q$$

Il lavoro per uno spostamento dalla posizione iniziale  $i$  alla posizione finale  $f$  è dato da

$$L = U_i - U_f = q(V_i - V_f) = -q\Delta V$$

# POTENZIALE ELETTRICO (2)

Nel S.I. il potenziale elettrico si misura in volt (V)

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$$

Fra due punti esiste la d.d.p. di 1 V, quando le forze del campo elettrico compiono il lavoro di 1 J per spostare la carica elettrica di 1 C fra i due punti.

# POTENZIALE ELETTRICO (3)

Che legame c'è fra il campo elettrico ed il potenziale elettrico?

$$\Delta U = -L = -\int \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

$$q\Delta V = -q\int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\Delta V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$



$$\vec{E} = -\text{grad}(V)$$

Campo di Coulomb :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

Campo uniforme :

$$E = \text{cost}$$

$$V = Ex$$



Il campo elettrico può essere misurato anche in volt/m

# POTENZIALE ELETTRICO (4)

---

Le cariche si muovono spontaneamente:  
quelle positive verso i potenziali decrescenti,  
quelle negative verso i potenziali crescenti.

$$L = q(V_i - V_f) > 0$$

$$q > 0 \implies V_i > V_f$$

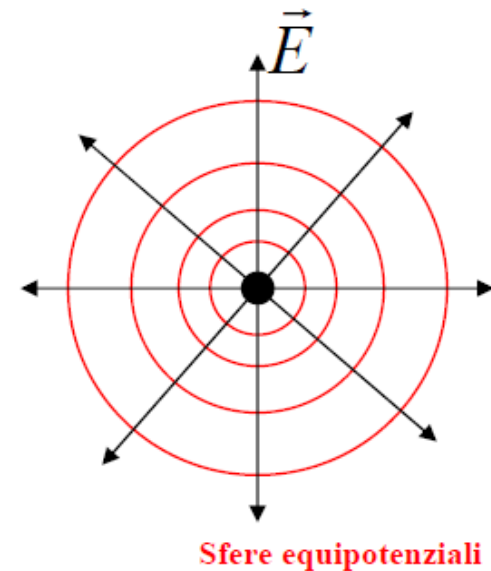
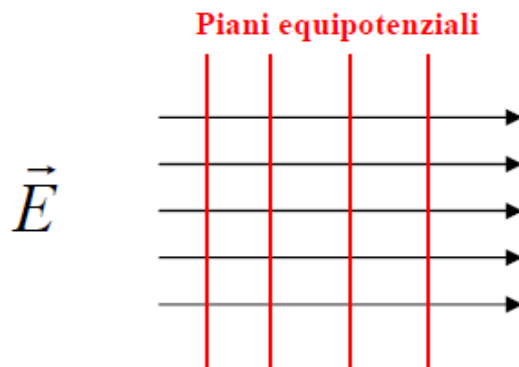
$$q < 0 \implies V_i < V_f$$

# SUPERFICI EQUIPOTENZIALI

Se una carica si muove ortogonalmente al campo elettrico

$$\Delta V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int E dl \cos\theta = 0$$

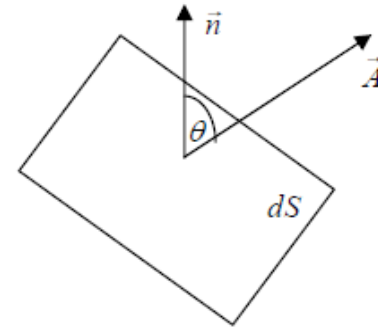
Le superfici equipotenziali sono ortogonali ai campi elettrici



# FLUSSO DI UN VETTORE

Si definisce flusso di un vettore attraverso una superficie la grandezza  $\Phi$

$$d\Phi = \vec{A} \cdot \vec{n} dS$$



$$\Phi = \int \vec{A} \cdot \vec{n} dS = \int A \cos \theta dS$$

Il flusso di un vettore è uno *scalare*



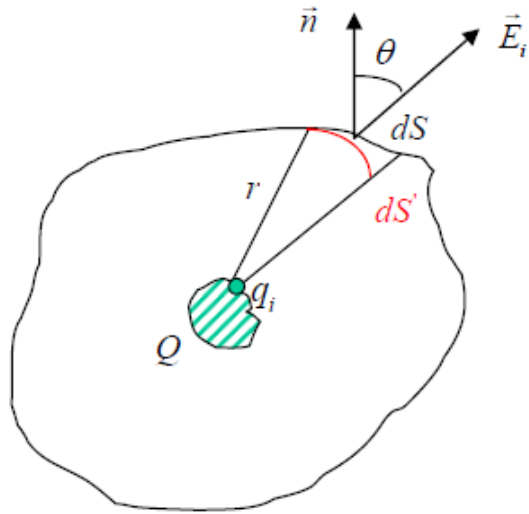
# TEOREMA DI GAUSS

---

Il flusso del campo elettrico (nel vuoto) attraverso una qualsiasi superficie chiusa  $S$  è eguale alla somma delle cariche interne  $q_i$  alla superficie diviso la costante dielettrica del vuoto.

$$\Phi_S(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$$

# TEOREMA DI GAUSS: cariche interne



$$d\Phi_i = E_i dS \cos \theta$$

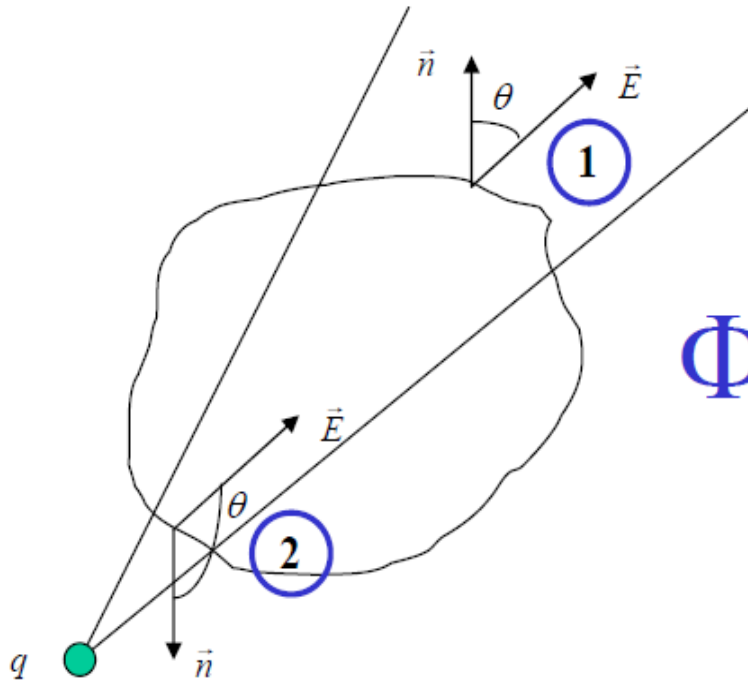
$$dS' = dS \cos \theta$$

$$d\Phi_i = E_i dS'$$

$$\Phi_i = \int d\Phi_i = \int E_i dS' = E_i \int dS' = E_i 4\pi r^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r^2} 4\pi r^2 = \frac{q_i}{\epsilon_0}$$

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

# TEOREMA DI GAUSS: cariche esterne

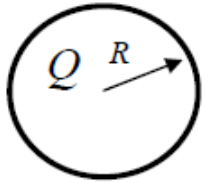


$$\Phi_1 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\Phi_2 = -\frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\Phi = 0$$

# TEOREMA DI GAUSS: sfera conduttrice (1)



Consideriamo una sfera conduttrice di raggio  $R$  caricata con una carica  $Q$ . In condizioni stazionarie vogliamo calcolare il campo elettrico ed il potenziale associato, all'interno ed all'esterno di questa distribuzione di carica.

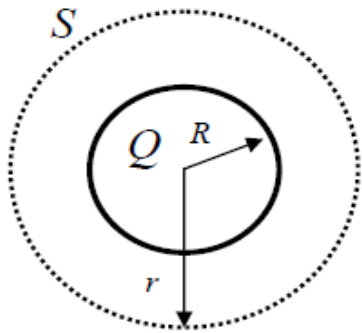
All'interno della sfera il campo elettrico deve essere nullo, altrimenti le cariche presenti sulla sfera si muoverebbero sotto l'azione di questo campo elettrico.

$$\vec{E}_{\text{int}} = 0 \Rightarrow \Phi_{\text{sfera}}(\vec{E}) = 0$$

$$\Rightarrow \sum q_{\text{int}} = 0$$

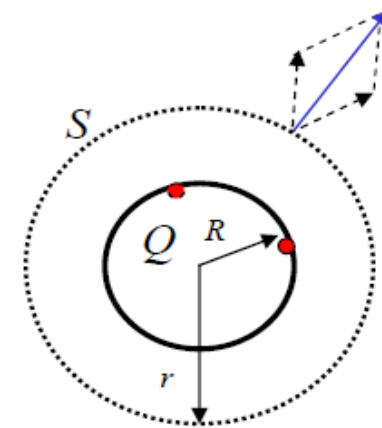
Non ci sono cariche all'interno della sfera. Le cariche si distribuiscono sulla superficie esterna dei conduttori.

# TEOREMA DI GAUSS: sfera conduttrice (2)

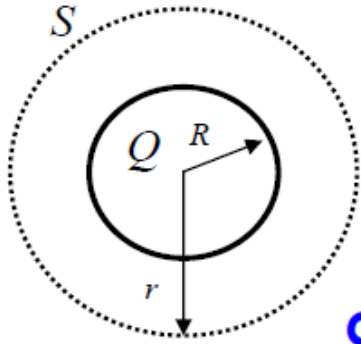


Possiamo utilizzare il teorema di Gauss per calcolare il campo all'esterno della distribuzione di carica. Poiché il teorema di Gauss vale per una qualsiasi superficie chiusa,

conviene sceglierne una sulla quale sia agevole il calcolo del flusso. Per evidenti ragioni di simmetria in questo caso la superficie di Gauss migliore è una sfera, concentrica alla sfera conduttrice, con raggio  $r > R$ . Infatti sulla sfera  $S$  il campo  $E$  ha simmetria radiale ed è costante in modulo, potendo immaginarlo come la somma dei contributi di moltissime cariche puntiformi uniformemente distribuite sulla superficie della sfera conduttrice



# TEOREMA DI GAUSS: sfera conduttrice (3)



$$\Phi_S(\vec{E}) = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = E \int_S dS = E 4\pi r^2$$

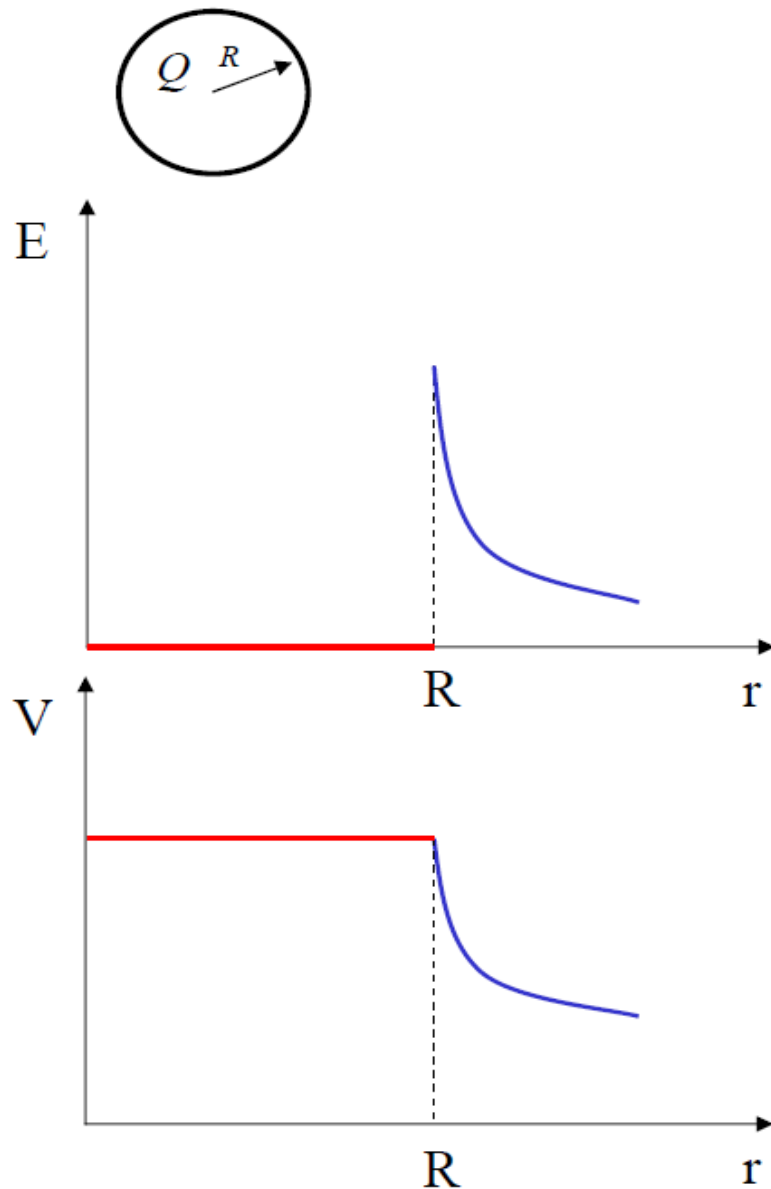
d'altra parte per il teorema di Gauss

$$\Phi_S(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_{\text{contenute in } S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

da cui avremo

$$E 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \Rightarrow \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

# TEOREMA DI GAUSS: sfera conduttrice (4)



**esterno**

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

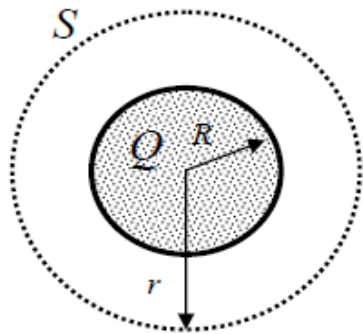
**interno**

$$E = 0$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}$$



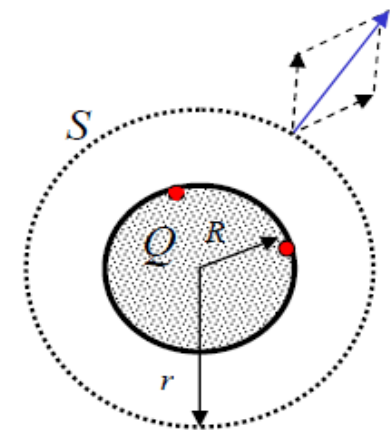
# GAUSS: distribuzione uniforme sferica di carica (1)



Possiamo utilizzare il teorema di Gauss per calcolare il campo all'esterno della distribuzione di carica. Poiché il teorema di Gauss vale per una qualsiasi superficie chiusa,

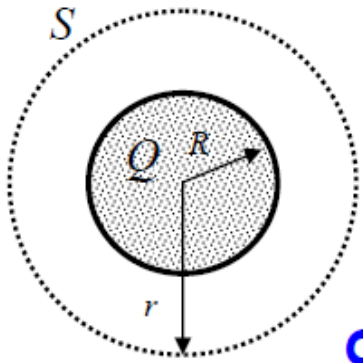
conviene sceglierne una sulla quale sia agevole il calcolo del flusso. Per evidenti ragioni di simmetria in questo caso la superficie di Gauss migliore è una sfera, concentrica alla distribuzione sferica di carica, con raggio  $r > R$ . Infatti sulla sfera S il campo E ha simmetria radiale ed è costante in modulo, potendo immaginarlo come la somma dei contributi di moltissime cariche puntiformi uniformemente distribuite nel volume della sfera di raggio R.

$$\text{Densità di carica } \rho = \frac{Q}{\text{Volume}} = \text{cost}$$





## GAUSS: distribuzione uniforme sferica di carica (2)



$$\Phi_S(\vec{E}) = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = E \int_S dS = E 4\pi r^2$$

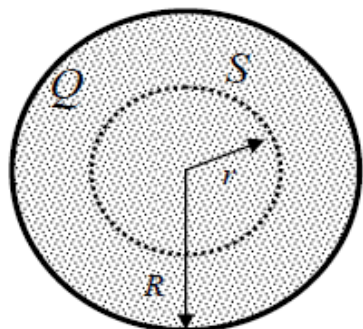
d'altra parte per il teorema di Gauss

$$\Phi_S(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_{\text{contenute in } S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

da cui avremo

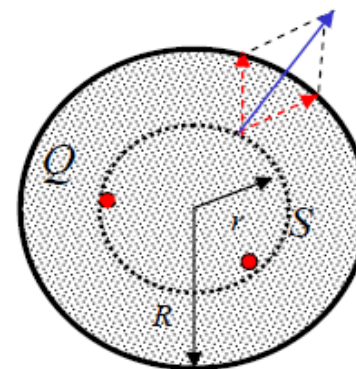
$$E 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \Rightarrow \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

## GAUSS: distribuzione uniforme sferica di carica (3)

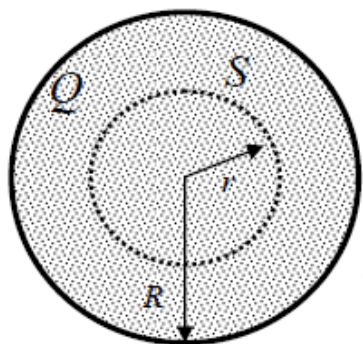


Possiamo utilizzare il teorema di Gauss per calcolare il campo all'interno della distribuzione di carica. Poiché il teorema di Gauss vale per una qualsiasi superficie chiusa,

conviene sceglierne una sulla quale sia agevole il calcolo del flusso. Per evidenti ragioni di simmetria in questo caso la superficie di Gauss migliore è una sfera, concentrica alla distribuzione sferica di carica, con raggio  $r < R$ . Infatti sulla sfera S il campo E ha simmetria radiale ed è costante in modulo, potendo immaginarlo come la somma dei contributi di moltissime cariche puntiformi uniformemente distribuite nel volume della sfera di raggio r.



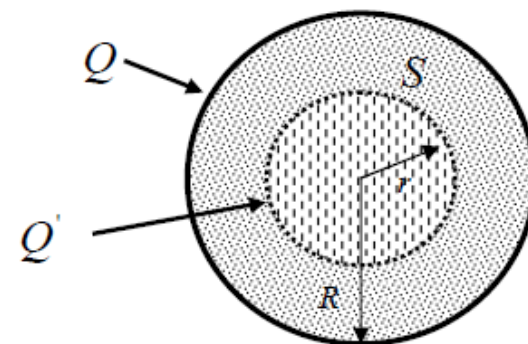
# GAUSS: distribuzione uniforme sferica di carica (4)



$$\Phi_S(\vec{E}) = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = E \int_S dS = E 4\pi r^2$$

d'altra parte per il teorema di Gauss

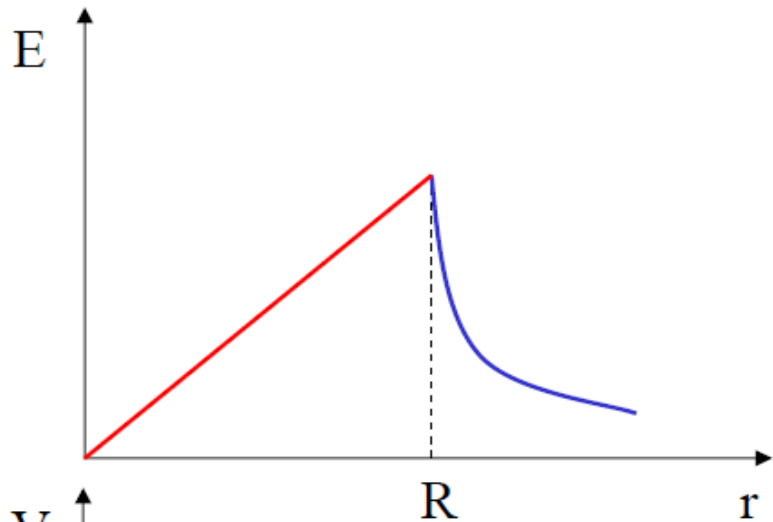
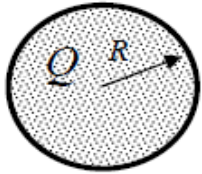
$$\Phi_S(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_{\text{contenute in } S} = \frac{Q'}{\epsilon_0}$$



$$Q' = \rho V_S = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$E 4\pi r^2 = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \Rightarrow \quad E = \frac{\rho}{3\epsilon_0} r$$

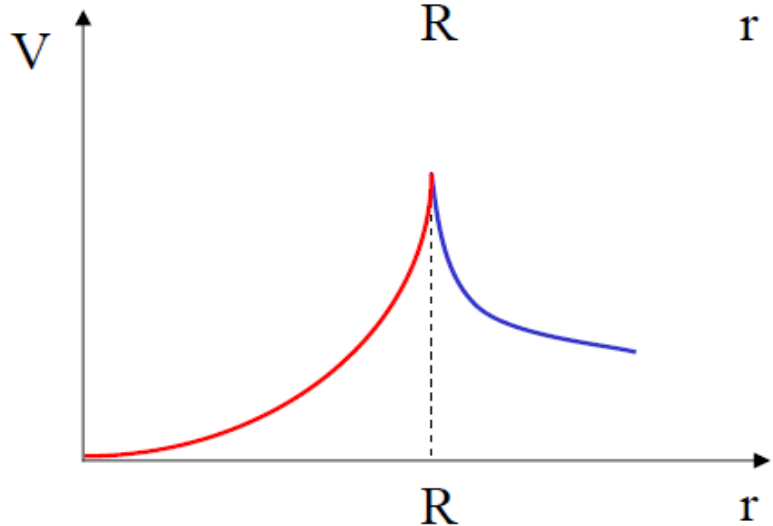
# GAUSS: distribuzione uniforme sferica di carica (5)



**esterno**

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$



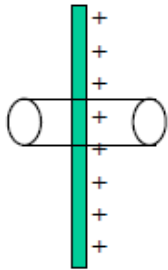
**interno**

$$E = \frac{\rho}{3\epsilon_0} r$$

$$V = \frac{\rho}{6\epsilon_0} r^2$$

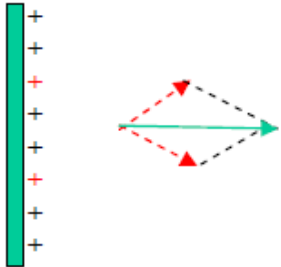
# GAUSS: piano conduttore infinito carico (1)

$$\sigma = \frac{q}{s} = \text{cost}$$



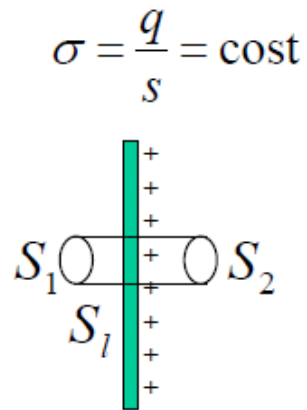
Possiamo utilizzare il teorema di Gauss per calcolare il campo della distribuzione di carica. Poiché il teorema di Gauss vale per una qualsiasi superficie chiusa, conviene sceglierne una sulla quale sia agevole il calcolo del flusso.

Per ragioni di simmetria in questo caso la superficie di Gauss migliore è un cilindro con le basi parallele al piano conduttore.



Infatti il campo  $E$  è ortogonale e costante rispetto a piani paralleli al piano conduttore, potendo immaginarlo come la somma dei contributi di moltissime cariche puntiformi uniformemente distribuite sulla superficie del piano conduttore.

# GAUSS: piano conduttore infinito carico (2)



$$\Phi_{cil} = \underbrace{\Phi_{S_1}}_{\text{nullo perchè } \vec{E} = 0} + \underbrace{\Phi_{S_1}}_{\text{nullo perchè } \vec{E} \perp \vec{n}} + \Phi_{S_2}$$

$$\Phi_{S_2}(\vec{E}) = \int_{S_2} \vec{E} \cdot d\vec{S}_2 = E \int_{S_2} dS_2 = ES_2$$

d'altra parte per il teorema di Gauss

$$\Phi_{S_2}(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_{contenute\ in\ S_2} = \frac{\sigma S_2}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$



# CAPACITÀ ELETTRICA

Quando ad un conduttore isolato viene conferita una carica elettrica  $Q$ , esso assume un potenziale  $V$ .

Si definisce  
capacità elettrica

$$C = \frac{Q}{V}$$

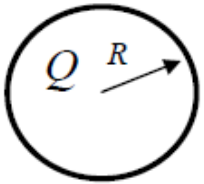
Dipende solo dalla  
forma geometrica del  
conduttore e dal  
mezzo dielettrico nel  
quale è immerso

Unità di misura  
della capacità  
elettrica nel S.I.

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ F} = 1 \frac{\text{coulomb}}{\text{volt}}$$

# CAPACITA' ELETTRICA: esempio

---



Consideriamo una sfera conduttrice di raggio  $R$  caricata con una carica  $Q$  immersa nel vuoto.

Abbiamo visto che il potenziale  $V$  sulla sfera vale

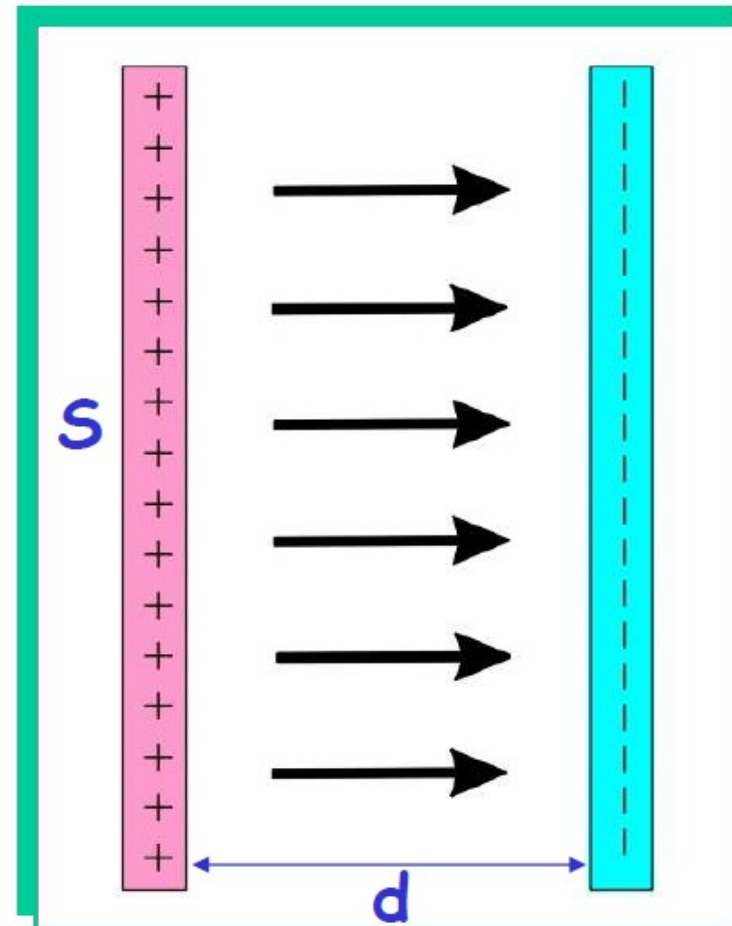
$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}$$

$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon_0 R$$



# CONDENSATORE PIANO (1)

Campo elettrico  
generato da due  
lastre parallele  
uniformemente  
cariche.



S superficie delle armature  
d distanza fra le armature

# CONDENSATORE PIANO (2)



$$\Phi_1 = 0 \quad \text{perchè } \vec{E} = 0$$

$$\Phi_2 = 0 \quad \text{perchè } \vec{E} \perp \vec{n}$$

$$\Phi_3 = S \cdot E = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$V = E \cdot d = \frac{Q}{\epsilon_0 S} d$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

# CAPACITA' ELETTRICA

---

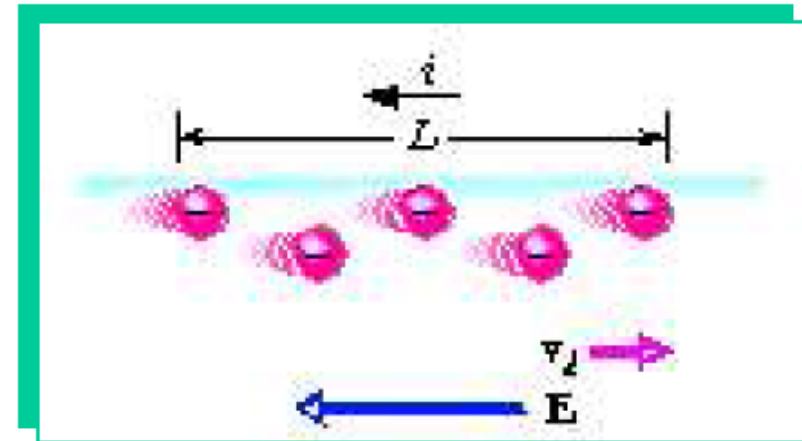
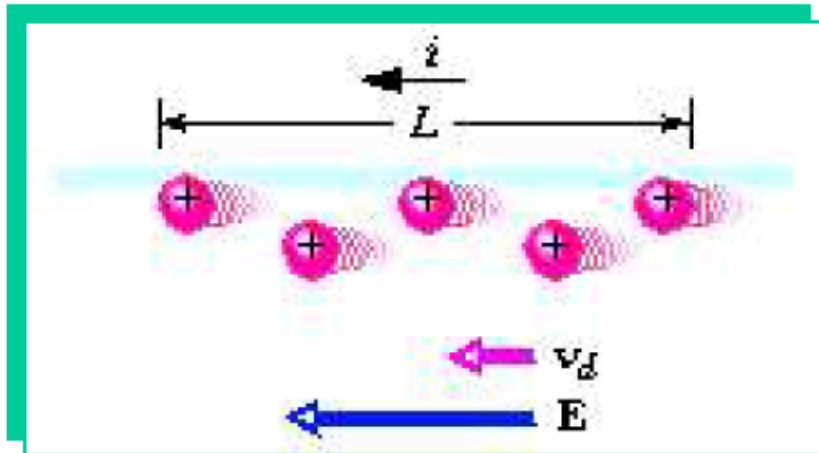
La capacità non dipende dalla carica, ma solo dalle caratteristiche geometriche del conduttore e dal mezzo dielettrico in cui è immerso.

La capacità di un conduttore scarico è eguale a quella di quando è carico.

**V dipende linearmente da Q**

# CORRENTE ELETTRICA (1)

Applicando una d.d.p. ai capi di un filo conduttore, poiché in esso vi sono delle cariche libere di muoversi, si produce una **corrente elettrica**.



**PER CONVENZIONE:** Il verso della corrente è quello del moto delle cariche positive (opposto a quello delle cariche negative).

# CORRENTE ELETTRICA (2)

---

La corrente elettrica è quindi un flusso di cariche elettriche ed è definita come la carica che passa nell'unità di tempo in una sezione del conduttore

$$i = \frac{dq}{dt}$$

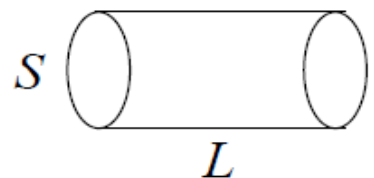
Se  $i$  è costante la corrente è definita *continua*

$$[i] = Cs^{-1} = A \longleftarrow \text{Ampère}$$

# CORRENTE ELETTRICA (3)

Nei metalli sono i cosiddetti *elettroni di conduzione* che si muovono sotto l'azione del campo elettrico.

Supponiamo di avere una velocità media di migrazione  $v$  e di avere  $n$  elettroni per unità di volume


$$i = \frac{Q}{t} = \frac{enSL}{L/v} = enSv$$

Una velocità piuttosto bassa: ~4200 s (più di 1h) per percorrere 1 m.

Quando si preme l'interruttore la lampada si accende "subito"

$$v \sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} !!!$$

Consideriamo un filo di rame di raggio  $r$

$$r = 10^{-3} \text{ m}$$

$$i = 10 \text{ A}$$

$$\rho = 8.9 \cdot 10^3 \text{ Kg m}^{-3}$$

$$1 \text{ uma} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$M = 64 \text{ uma}$$



$$n = \frac{8.9 \cdot 10^3}{64 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27}} = 8.4 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$v = \frac{i}{en\pi r^2} = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$$

# CORRENTE ELETTRICA (4)

I conduttori metallici si possono considerare costituiti da un reticolo entro il quale si può muovere, quasi liberamente, un "gas di elettroni" (**Gas di Fermi**) originato dal fatto che più elettroni appartenenti alle orbite più esterne dei singoli atomi, quando questi si avvicinano per costituire un cristallo metallico, si svincolano pressoché totalmente dal proprio atomo originario.

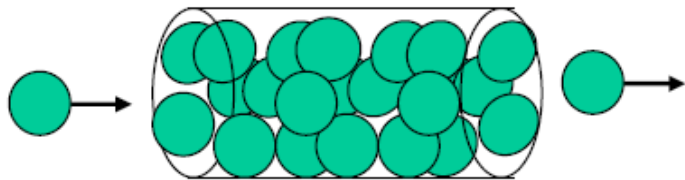
Metallo	$\rho_e$ elettronica (elettroni/m <sup>3</sup> )*10 <sup>28</sup>	$\rho_a$ atomica (atomi/m <sup>3</sup> )*10 <sup>28</sup>	$\rho_e/\rho_a$
Alluminio	18.1	6.0	3
Argento	5.9	5.9	1
Litio	4.6	4.6	1
Oro	5.9	5.9	1
Rame	8.4	8.4	1
Zinco	13.2	6.5	2

A titolo indicativo, nella tabella viene riportata la densità di questo gas di elettroni per alcuni metalli, la corrispondente densità atomica (numero di atomi per unità di volume) e il rapporto fra i due valori. Tale rapporto consente di evidenziare il numero medio di elettroni liberi donati da ciascun atomo al gas di Fermi.



# CORRENTE ELETTRICA (5)

La similitudine meccanica del gas di Fermi è un tubo metallico riempito di sfere metalliche indeformabili. Se si prova ad inserire, da una parte del tubo, un'altra sfera, nei tempi legati agli urti fra le sfere, ne uscirà un'altra dalla parte opposta.



Il fatto sperimentale che il segnale elettrico (l'urto fra le sferette metalliche nel modello) si propaghi ad una velocità

$\sim 3 \cdot 10^8$  m/s ci dice che le cariche si scambiano fra loro luce (fotoni).

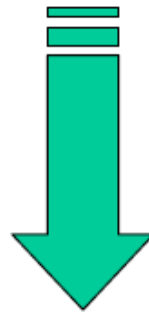
**Un conduttore percorso da corrente è neutro elettricamente!!!!**



# RESISTENZA ELETTRICA (1)

---

Se applichiamo ad un conduttore una d.d.p.  $\Delta V = \text{cost}$  allora  $E = \Delta V/d$  e quindi la forza che agisce sulle cariche è costante. *Dunque gli elettroni si dovrebbero muovere di moto accelerato e la corrente dovrebbe crescere!*  
Invece si nota sperimentalmente che se la d.d.p. è costante lo è anche la corrente



**DEVE ESISTERE UNA  
"FORZA D'ATTRITO"**

# RESISTENZA ELETTRICA (2)

---

Questa "forza di attrito" è descritta dalla cosiddetta  
**RESISTENZA ELETTRICA**

*R è uno scalare*

$$R = \frac{V}{i}$$

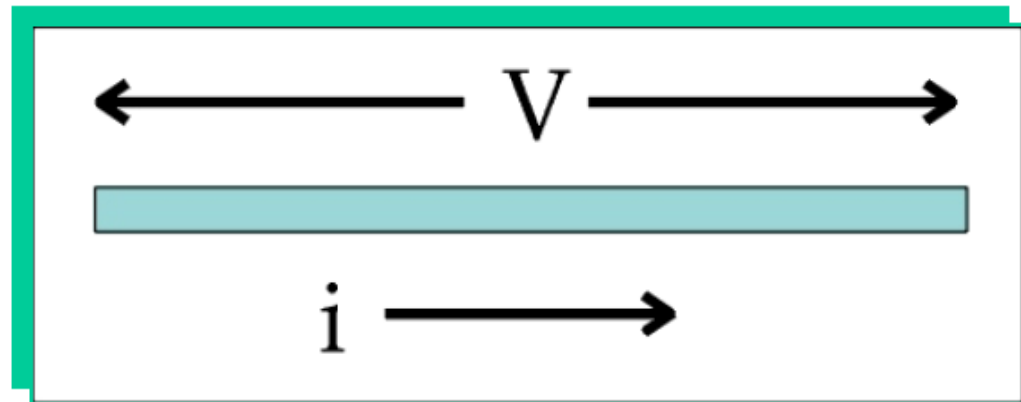
$$[R] = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampère}} = \text{Ohm} = \Omega$$

# LEGGI DI OHM

1<sup>a</sup> legge di Ohm:

In un conduttore metallico l'intensità della corrente elettrica è proporzionale alla d.d.p. applicata ai suoi estremi.

$$V = R \cdot i$$



# LEGGI DI OHM

---

2<sup>a</sup> legge di Ohm:

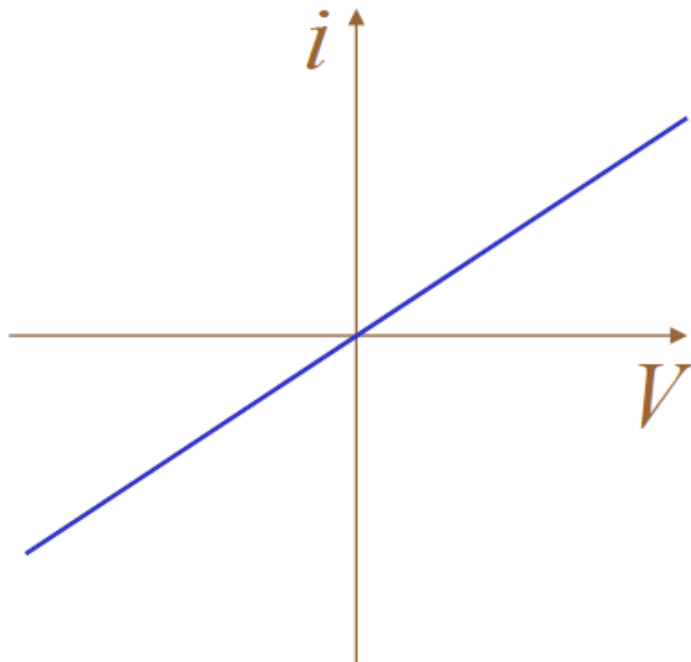
La resistenza di un conduttore metallico, di lunghezza  $d$  ed area della sezione  $A$ , è data dalla formula

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

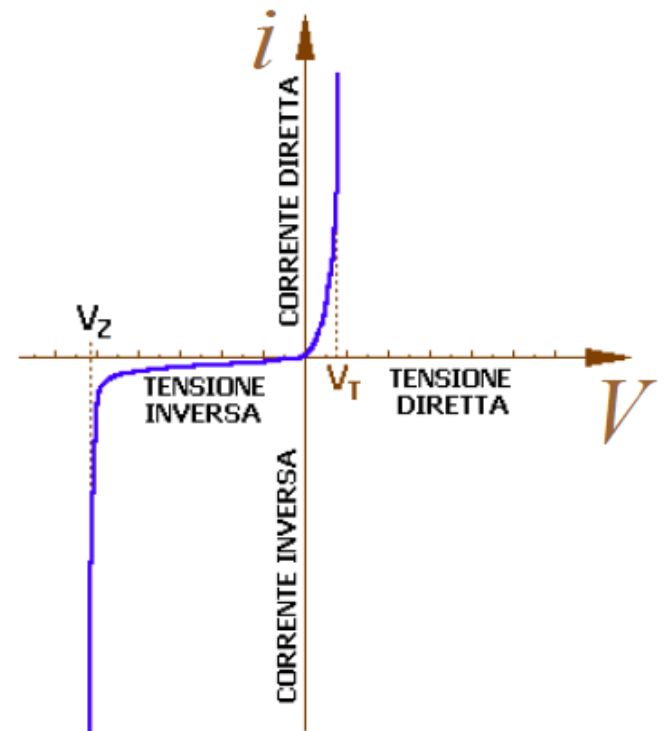
$\rho$  si chiama **resistività**, dipende dalla natura del materiale e dalla sua temperatura.

# RESISTENZA ELETTRICA (3)

## Conduttori ohmici



## Diodi raddrizzatori



# RESISTIVITA'

La resistività  $\rho$  si misura in  $\Omega \cdot m$  e dipende dalla temperatura. Per  $T=300 \text{ }^\circ K$

conduttori

semiconduttori

isolanti

Materiale	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )
Argento	$1.5 \cdot 10^{-8}$
Rame	$1.7 \cdot 10^{-8}$
Alluminio	$2.6 \cdot 10^{-8}$
Sangue	0.2
Germanio	0.6
Silicio	$2.3 \cdot 10^3$
Vetro	$10^{14}$

# PRINCIPI DI KIRCHOFF

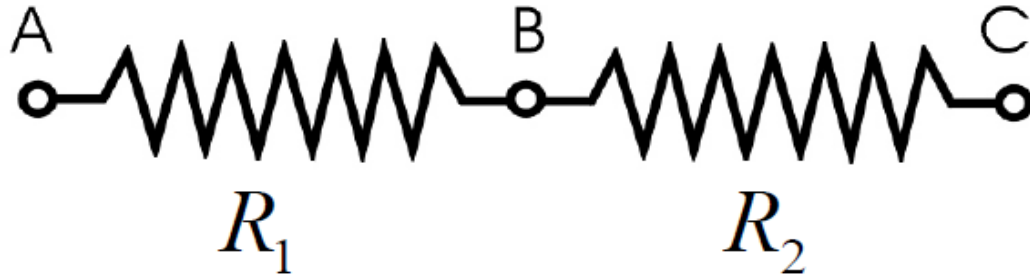
---

Un circuito elettrico è un percorso chiuso dove passa della corrente  $i$

1. La somma algebrica delle variazioni di potenziale elettrico lungo un percorso chiuso è zero.

2. La somma delle correnti che entrano in un nodo deve essere eguale alla somma delle correnti che escono

# RESISTENZE IN SERIE



**DEFINIZIONE:**  
Sono attraversate  
dalla stessa  
corrente

$$V_B - V_A = R_1 \cdot i$$

$$V_C - V_B = R_2 \cdot i$$

Sommando  $V_C - V_A = (R_1 + R_2) \cdot i$

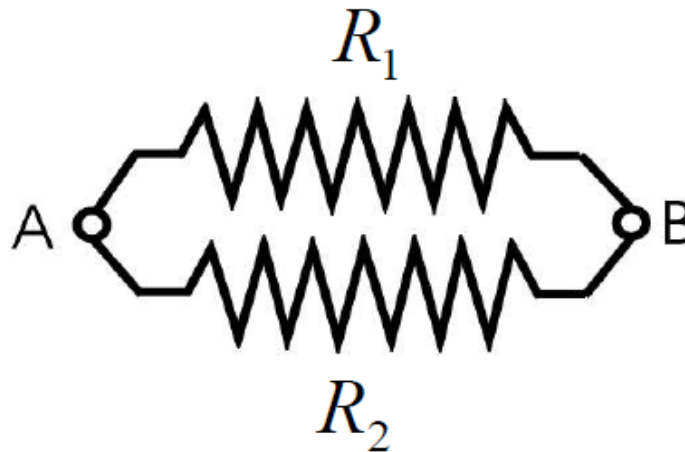
$$R_{equivalente} = R_1 + R_2$$



# RESISTENZE IN PARALLELO

$$i_1 = \frac{V_B - V_A}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{V_B - V_A}{R_2}$$



**DEFINIZIONE:**  
Si trovano alla  
stessa  
differenza di  
potenziale

Sommando

$$i = i_1 + i_2 = (V_B - V_A) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$R_{equivalente} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

# EFFETTO JOULE

---

L'energia erogata dalla d.d.p.  $V$  per il passaggio della carica  $q = i \cdot t$ , è data dalla formula

$$L = V \cdot q = V \cdot i \cdot t = R \cdot i^2 \cdot t$$

La potenza dissipata in calore è

$$P = \frac{L}{t} = R \cdot i^2$$

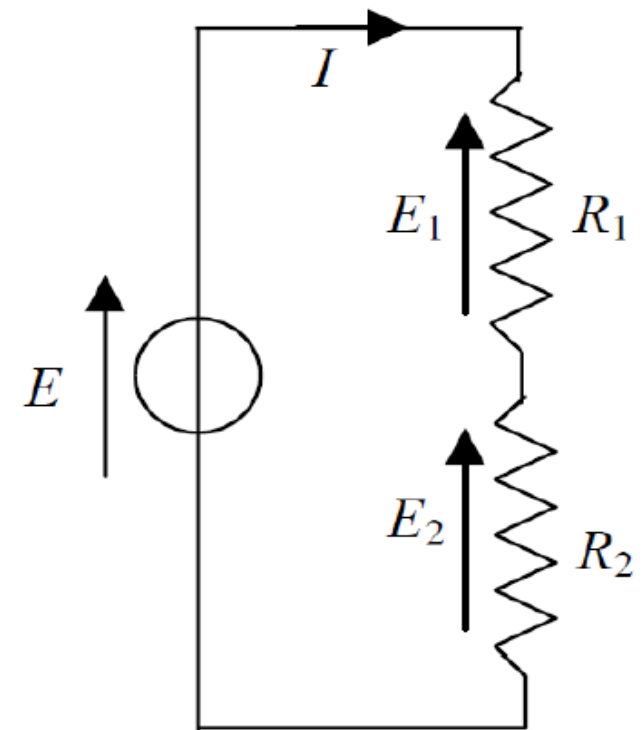
# Esempio 1

Consideriamo il circuito di figura comprendente un generatore di tensione continua  $E$  e due resistenze  $R_1$  e  $R_2$ .

$E=100\text{ V}$ ;  $R_1=10\ \Omega$  e  $R_2=15\ \Omega$ .

Calcolare:

- la corrente totale circolante nel circuito;
- le correnti e le cadute di tensione sulle due resistenze;
- la potenza totale dissipata nel circuito.



## Esempio 1 (cont..)

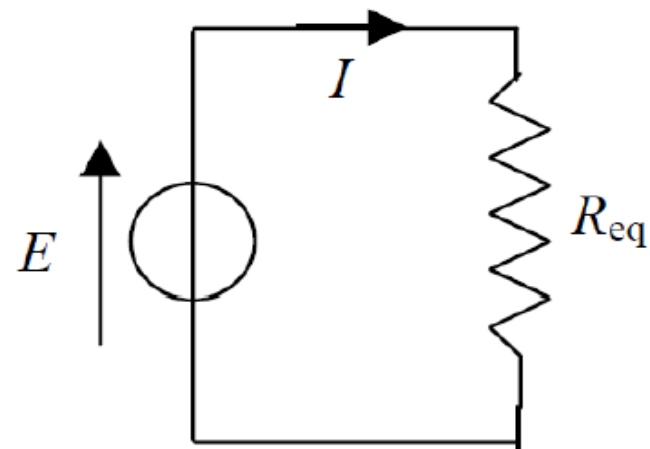
Le due resistenze  $R_1$  ed  $R_2$ , sono collegate in serie, infatti attraverso di esse passa la stessa corrente. La resistenza equivalente di due resistori in serie è pari alla somma delle due resistenze:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 25 \ \Omega$$

Il circuito originale è quindi equivalente al circuito di figura.

Possiamo quindi calcolare, usando una delle leggi di Ohm, la corrente totale circolante nel circuito

$$I = \frac{E}{R_{eq}} = \frac{100}{25} = 4 \ \text{A}$$



## Esempio 1 (cont..)

---

La corrente circolante nelle due resistenze  $R_1$  e  $R_2$ , per la definizione stessa di resistenze in serie, è la stessa in entrambe le resistenze ed è quella circolante in  $R_{eq}$  precedentemente calcolata.

La caduta di tensione sulle due resistenze si calcola applicando la legge di Ohm:

$$E_1 = R_1 I = 40 \text{ V}$$

$$E_2 = R_2 I = 60 \text{ V}$$

Si può facilmente verificare che  $E = E_1 + E_2$  come imposto dalla legge di Kirchoff.

## Esempio 1 (cont..)

---

La potenza totale dissipata nel circuito è pari a

$$P = R_{eq} I^2 = 400 \text{ W}$$

Essa è la somma delle potenze dissipate rispettivamente in  $R_1$  e  $R_2$ :

$$P_1 = R_1 I^2 = 160 \text{ W}$$

$$P_2 = R_2 I^2 = 240 \text{ W}$$

$$P = P_1 + P_2 = 400 \text{ W}$$

Si può dimostrare che la potenza totale dissipata nel circuito è pari alla potenza erogata dal generatore:

$$P_{gen} = EI = 400 \text{ W}$$

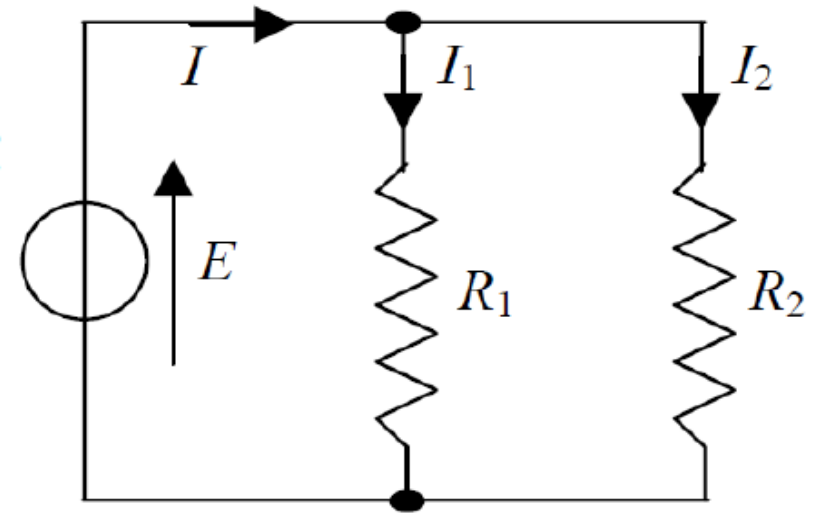
## Esempio 2

Consideriamo il circuito di figura comprendente un generatore di tensione continua  $E$  e due resistenze  $R_1$  e  $R_2$ .

$E=100\text{ V}$ ;  $R_1=10\ \Omega$  e  $R_2=15\ \Omega$ .

Calcolare:

- la corrente totale circolante nel circuito;
- le correnti e le cadute di tensione sulle due resistenze;
- la potenza totale dissipata nel circuito.



## Esempio 2 (cont..)

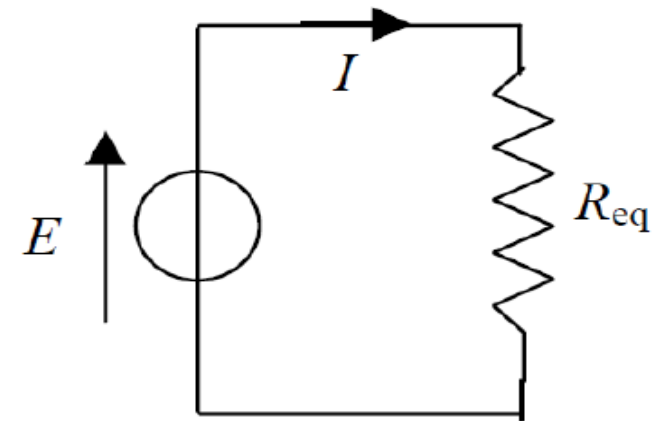
Le due resistenze  $R_1$  ed  $R_2$ , sono collegate in parallelo, infatti sono poste alla stessa ddp. La resistenza equivalente di due resistori in parallelo è:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 6 \ \Omega$$

Il circuito originale è quindi equivalente al circuito di figura.

Possiamo quindi calcolare, usando una delle leggi di Ohm, la corrente totale circolante nel circuito

$$I = \frac{E}{R_{eq}} = \frac{100}{6} = 16.67 \text{ A}$$





## Esempio 2 (cont..)

---

Le correnti circolanti nelle due resistenze  $R_1$  e  $R_2$ , si calcolano applicando la legge di Ohm:

$$I_1 = \frac{E}{R_1} = 10 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{E}{R_2} = 6.67 \text{ A}$$

La caduta di tensione sulle due resistenze, per la definizione stessa di resistenze in parallelo, è la stessa per entrambe.

Si può facilmente verificare che  $I=I_1+I_2$  come imposto dalla legge di Kirchoff.

## Esempio 2 (cont..)

La potenza totale dissipata nel circuito è pari a

$$P = R_{eq} I^2 = 1667 \text{ W}$$

Essa è la somma delle potenze dissipate rispettivamente in  $R_1$  e  $R_2$ :

$$P_1 = R_1 I^2 = 1000 \text{ W}$$

$$P_2 = R_2 I^2 = 667 \text{ W}$$

$$P = P_1 + P_2 = 1667 \text{ W}$$

Si può dimostrare che la potenza totale dissipata nel circuito è pari alla potenza erogata dal generatore:

$$P_{gen} = EI = 1667 \text{ W}$$

# Stufetta

Quindi se avete due resistenze  $R_1$  ed  $R_2$  e con loro volete costruire una stufa, vi conviene collegare le due resistenze in

# PARALLELO

$$P_{\text{parallelo}} = 1667 \text{ W}$$

$$P_{\text{serie}} = 400 \text{ W}$$

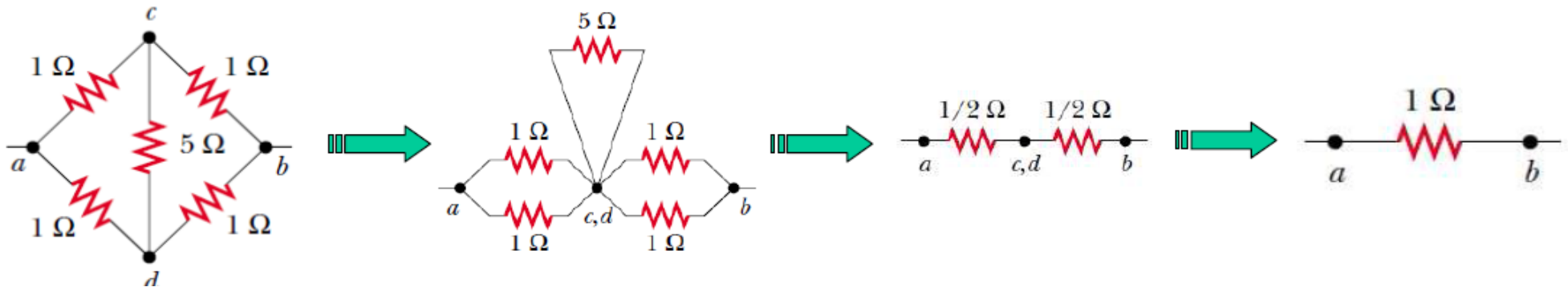
# Esempio 3

Consideriamo le cinque resistenze connesse come in figura. Supponendo che la corrente entri in  $a$ , quanto vale la resistenza equivalente fra i punti  $a$  e  $b$ ?

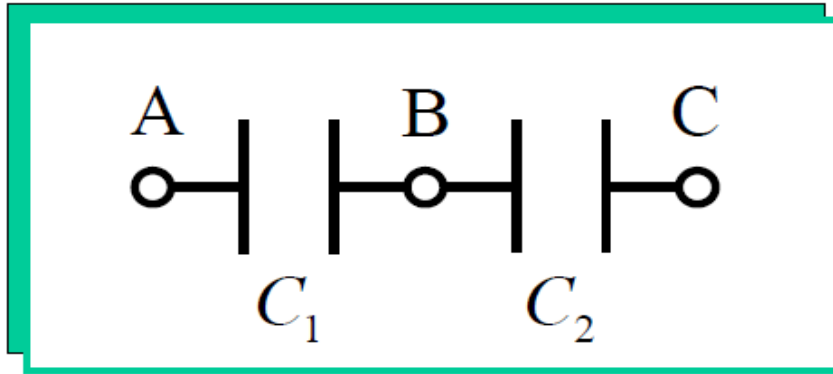
## SIMMETRIA

La corrente arriva in  $a$  e si divide in parti eguali nei rami  $ac$  ed  $ad$ . Quindi la d.d.p. fra  $c$  e  $d$  deve essere zero.

Dunque la resistenza da  $5\ \Omega$  è come se non ci fosse



# CONDENSATORI IN SERIE



**DEFINIZIONE:**  
Sono attraversati  
dalla stessa  
corrente

Sommando

$$(V_B - V_A) = \frac{Q_1}{C_1}$$

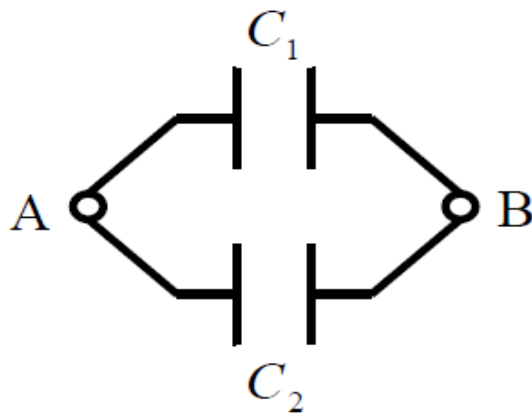
$$(V_C - V_B) = \frac{Q_2}{C_2}$$

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$V_C - V_A = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

$$C_{equivalente} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

# CONDENSATORI IN PARALLELO



**DEFINIZIONE:**  
Si trovano alla  
stessa  
differenza di  
potenziale

$$Q_1 = C_1(V_B - V_A)$$

$$Q_2 = C_2(V_B - V_A)$$

Sommando  $Q = Q_1 + Q_2 = C_1(V_B - V_A) + C_2(V_B - V_A) = (V_B - V_A)(C_1 + C_2)$

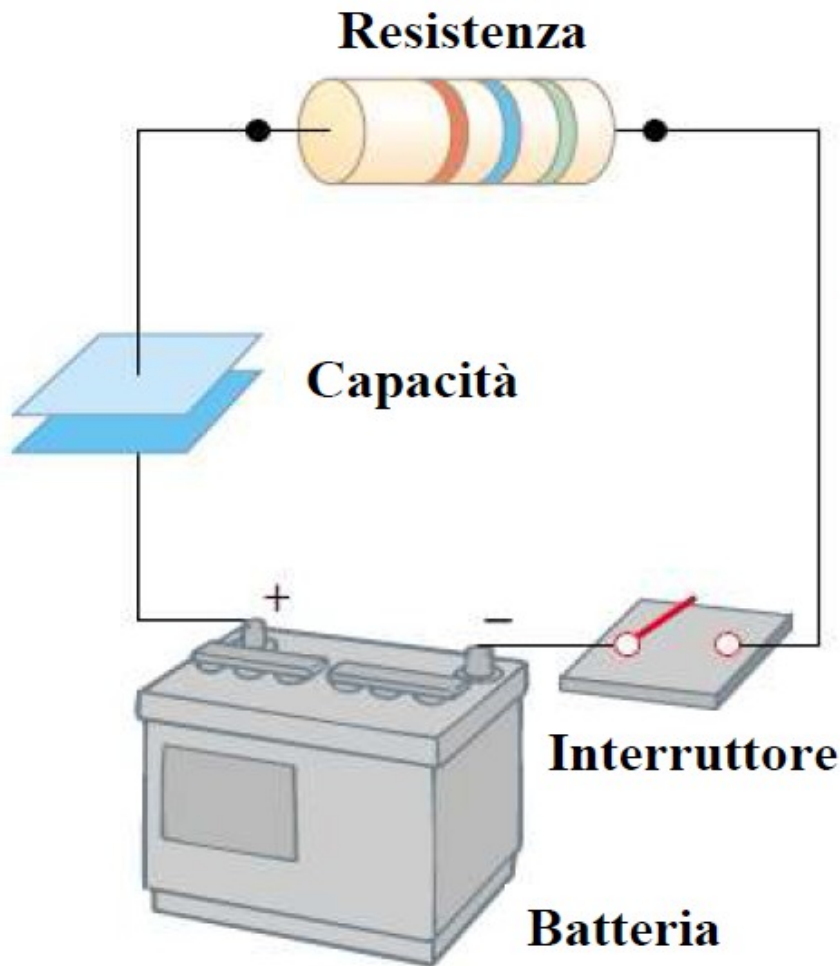
$$C_{equivalente} = C_1 + C_2$$



# Circuiti RC

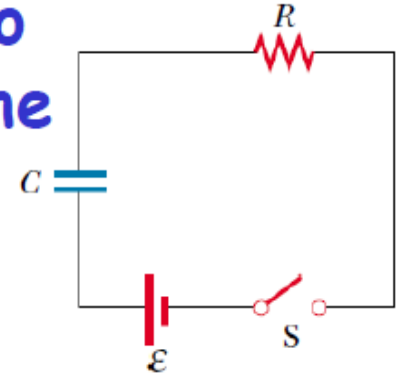
Finora abbiamo analizzato circuiti nei quali la corrente è costante nel tempo, ma nei circuiti contenenti condensatori, la corrente varia nel tempo.

Il più semplice circuito RC è costituito da una combinazione in serie di una resistenza  $R$ , una capacità  $C$ , una batteria  $\varepsilon$  ed un interruttore  $S$ .

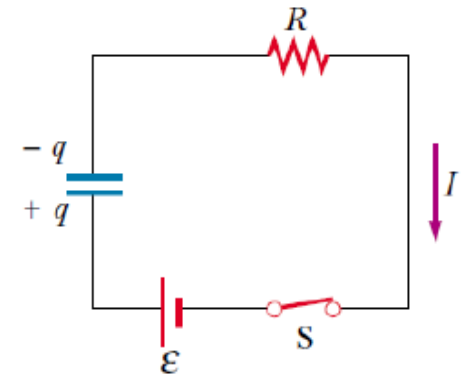


# Circuiti RC: carica di un condensatore (1)

Assumiamo che all'inizio il condensatore  $C$  sia **scarico**. Nel circuito di figura non passa corrente fin quando l'interruttore  $S$  è aperto. Se al tempo  $t=0$  viene chiuso l'interruttore, inizia a passare corrente nel circuito ed il condensatore comincia a caricarsi.



Notate che, durante la carica, la corrente non può passare attraverso il condensatore, perché lo spazio fra le due armature (isolante) è un circuito aperto.



La carica è trasferita, lungo i fili, sulle armature dal campo elettrico prodotto dalla batteria, fino a quando il condensatore è completamente carico.

La ddp del condensatore cresce mentre le armature si caricano.



## Circuiti RC: carica di un condensatore (2)

---

La ddp del condensatore crescerà fino a raggiungere un valore eguale alla ddp prodotta dalla batteria. A questo punto sulle armature del condensatore ci sarà la carica massima e la corrente che gira nel circuito sarà zero. Per un qualsiasi istante temporale dopo la chiusura dell'interruttore possiamo scrivere

$$(1) \quad \varepsilon - \frac{q}{C} - IR = 0$$

dove  $q/C$  è la ddp ai capi del condensatore ed  $IR$  è quella ai capi della resistenza.

# Circuiti RC: carica di un condensatore (3)

---

Usando l'equazione (1) possiamo calcolare la corrente iniziale che gira nel circuito.

Al tempo  $t=0$ , quando l'interruttore viene chiuso, la carica presente sulle armature del condensatore è zero e quindi la corrente  $I_0$  che gira nel circuito è al massimo ed eguale a

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R} \quad (\text{corrente a } t = 0)$$

Al tempo  $t=0$  la ddp prodotta dalla pila è tutta ai capi della resistenza. Quando il condensatore è carico al suo valore massimo  $Q$ , la corrente è zero e la ddp della batteria è identica alla ddp ai capi del condensatore. Ponendo  $I=0$  nella (1) possiamo calcolare la carica  $Q$  massima del condensatore

$$Q = C\varepsilon \quad (\text{carica max del condensatore})$$

# Circuiti RC: carica di un condensatore (4)

Possiamo scrivere

$$C\varepsilon - q - \frac{dq}{dt}R = 0$$

da cui

$$\frac{dq}{dt} = \frac{C\varepsilon}{RC} - \frac{q}{RC} \Rightarrow \frac{dq}{dt} = -\frac{q - C\varepsilon}{RC} \Rightarrow \frac{dq}{q - C\varepsilon} = -\frac{dt}{RC}$$

integrando e ricordando che  $q(0)=0$ , avremo

$$\int_0^q \frac{dq}{q - C\varepsilon} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt \Rightarrow \ln\left(\frac{q - C\varepsilon}{-C\varepsilon}\right) = -\frac{t}{RC}$$

Per la carica in funzione del tempo avremo

$$q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = Q \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

derivando avremo la corrente

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

# Circuiti RC: carica di un condensatore (5)

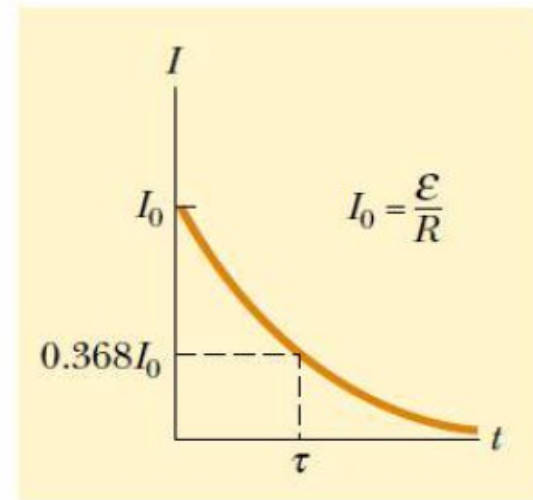
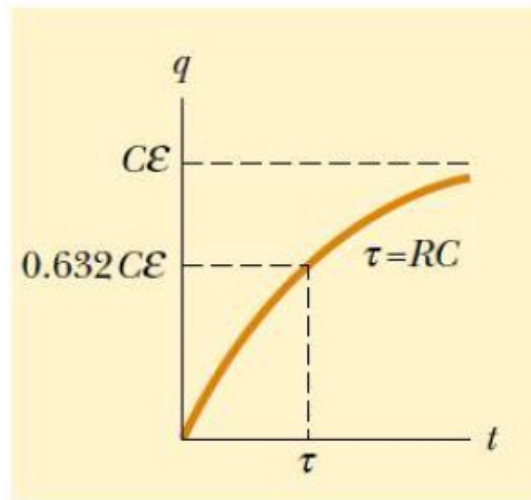
## Le soluzioni della (1)

$$(1) \quad \varepsilon - \frac{q}{C} - IR = 0$$

sono  $q(t) = C\varepsilon \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) = Q \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$

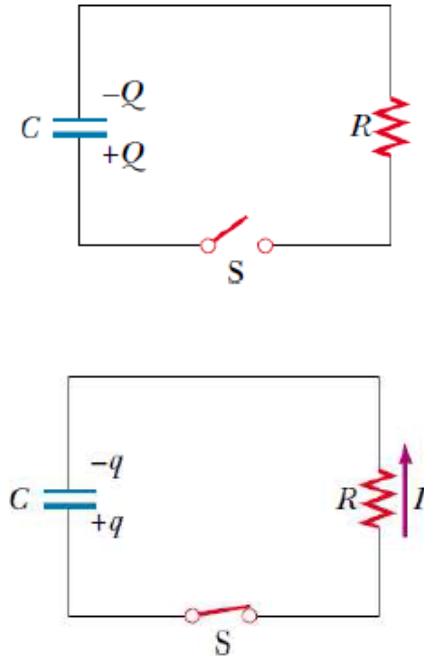
$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$[\tau] = [RC] = \left[ \frac{\Delta V}{I} \times \frac{Q}{\Delta V} \right] = \left[ \frac{Q}{Q/\Delta t} \right] = [\Delta t] = T$$



# Circuiti RC: scarica di un condensatore (1)

Assumiamo che all'inizio il condensatore  $C$  sia **carico**. Nel circuito di figura non passa corrente fin quando l'interruttore  $S$  è aperto. Se al tempo  $t=0$  viene chiuso l'interruttore, inizia a passare corrente nel circuito ed il condensatore comincia a scaricarsi.



La carica  $Q$  è la massima carica portata dal condensatore. Quando il circuito è chiuso passa corrente dalla resistenza e la carica sulle armature comincia a diminuire.

## Circuiti RC: scarica di un condensatore (2)

---

Il circuito è identico a quello della carica del condensatore a parte la presenza della batteria. Per un qualsiasi istante temporale dopo la chiusura dell'interruttore possiamo scrivere

$$(2) \quad -\frac{q}{C} - IR = 0$$

dove  $q/C$  è la ddp ai capi del condensatore ed  $IR$  è quella ai capi della resistenza.



# Circuiti RC: scarica di un condensatore (3)

Nell'equazione (2) possiamo scrivere  $dq/dt$  al posto  $I$ , ottenendo

$$-R \frac{dq}{dt} = \frac{q}{C} \quad \Rightarrow \quad \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} dt$$

integrando e ricordando che  $q(0)=Q$ , avremo

$$\int_Q^q \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{q}{Q}\right) = -\frac{t}{RC}$$

Per la carica in funzione del tempo avremo

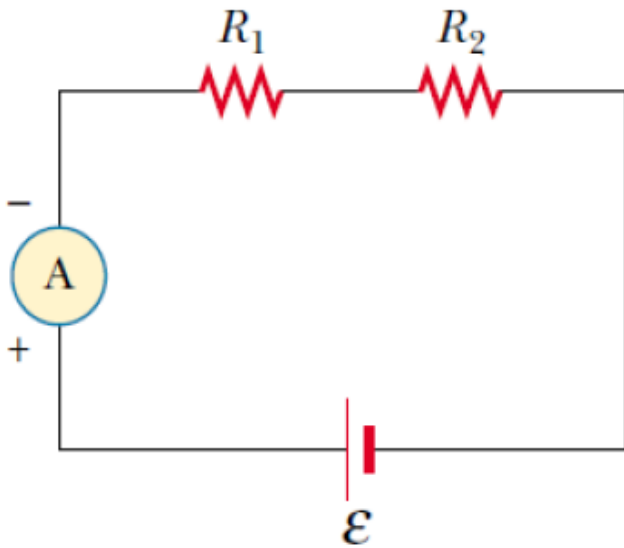
$$q(t) = Q e^{-\frac{t}{RC}}$$

derivando avremo la corrente

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} \left( Q e^{-\frac{t}{RC}} \right) = -\frac{Q}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} = -I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

# Amperometro

L'amperometro ideale è un bipolo la cui *resistenza elettrica* è nulla e che misura la corrente che passa in un ramo di un circuito. Essendo a resistenza nulla la sua inserzione in serie a qualsiasi ramo del circuito non altera in alcun modo il funzionamento del circuito medesimo.



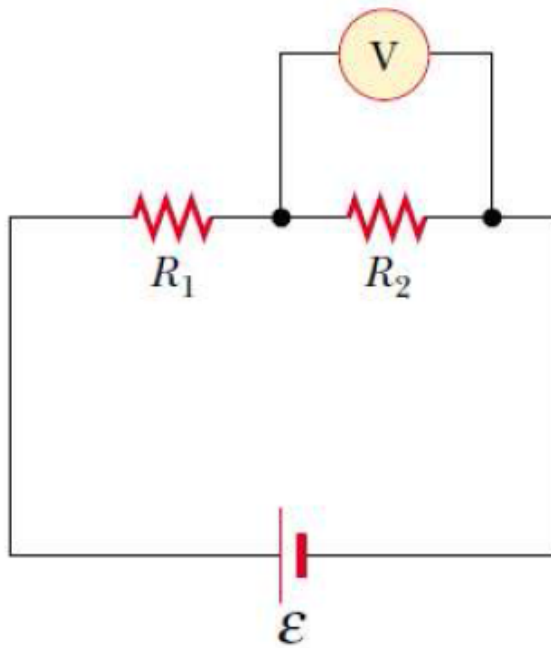
Nella realtà non esistono amperometri con resistenza interna nulla e nella configurazione di figura, la richiesta di  $R_{int}=0$  equivale a

$$R_{int} \ll (R_1 + R_2)$$



# Voltmetro

Il voltmetro ideale è un bipolo la cui *resistenza elettrica* è infinita e che misura la d.d.p. fra un punto ed un altro del circuito. Essendo a resistenza infinita la sua inserzione in parallelo a qualsiasi ramo del circuito non altera in alcun modo il funzionamento del circuito medesimo, perché attraverso il voltmetro non passa corrente.



Nella realtà non esistono amperometri con resistenza interna infinita e nella configurazione di figura, la richiesta di  $R_{int} = \infty$  equivale a

$$R_{int} \gg R_2$$

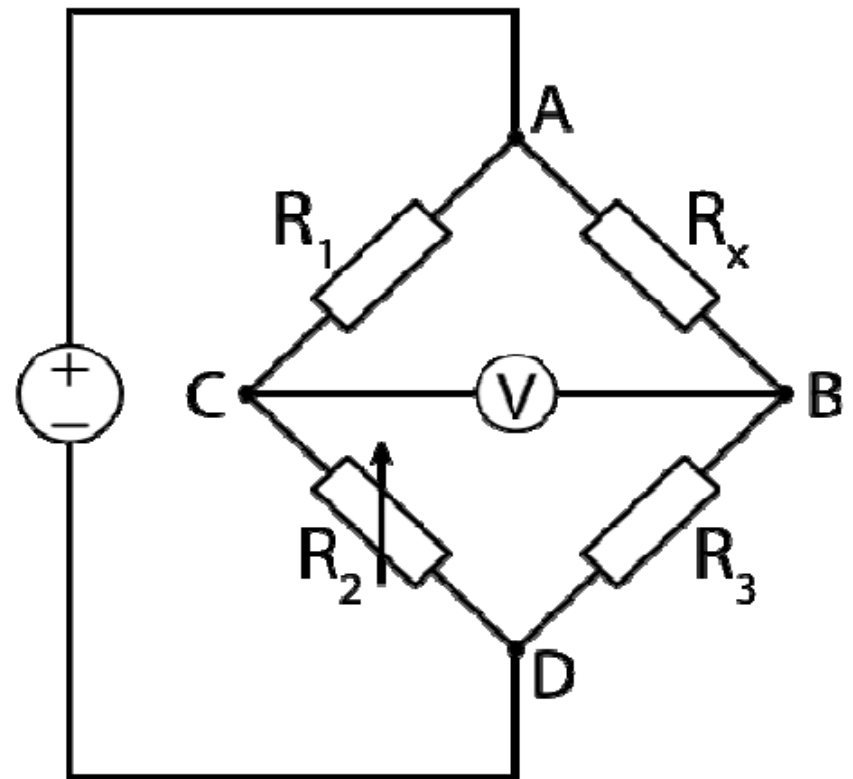
# Ponte di Wheatstone (1)

Il ponte di Wheatstone è un dispositivo elettrico che permette di misurare in modo preciso il valore di una resistenza elettrica  $R_x$ .

Si compone di un generatore di tensione che alimenta due rami resistivi posti in parallelo, composti da due resistori campione  $R_1$  ed  $R_3$  e una resistenza variabile  $R_2$  di elevata precisione. Si pone quindi un volmetro a zero centrale tra i due punti C e B.

Si varia  $R_2$  fin quando il volmetro segna una  $\Delta V_{CB}=0$ .

**PONTE  
BILANCIATO**



## Ponte di Wheatstone (2)

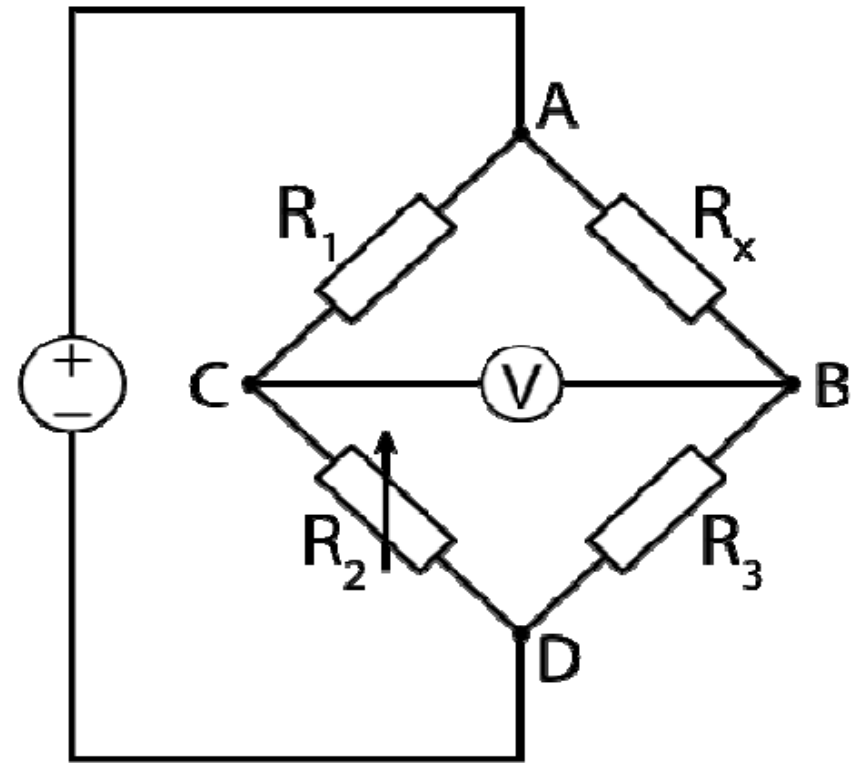
Quando il ponte è bilanciato possiamo scrivere

$$i_2 R_2 = i_3 R_3$$

$$i_2 R_1 = i_3 R_x$$

dividendo membro a membro, abbiamo

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$



## Ponte di Wheatstone (3)

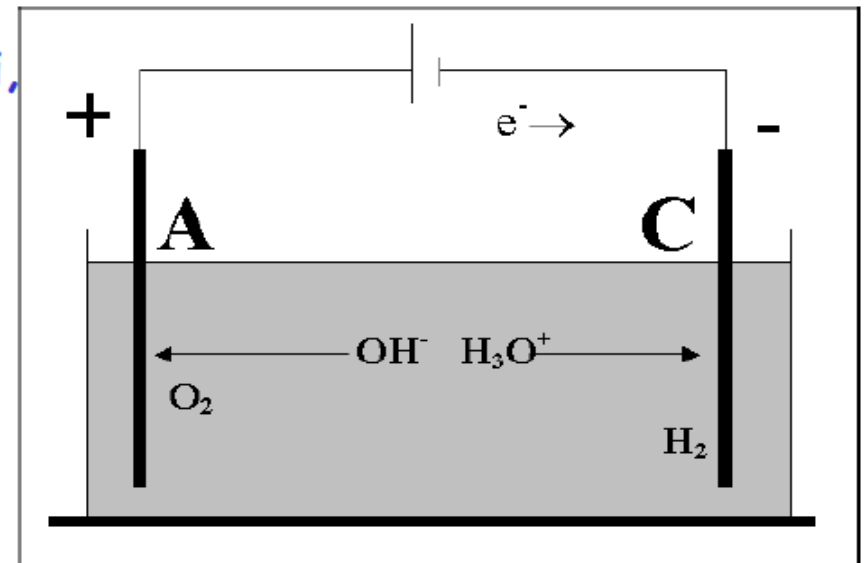
---

Il ponte di Wheatstone consente di eseguire misurazioni di resistenze di valore compreso tra circa  $10 \Omega$  e  $1 M\Omega$  con incertezze dell'ordine di alcune unità in  $10^{-4}$ .

L'incertezza ottenibile peggiora quando si misurano resistenze di piccolo valore (inferiore alla decina di ohm) o di alto valore (superiore al megaohm).

# ELETTROLISI

L'elettrolisi dell'acqua avviene in una *cella elettrolitica*. L'acqua pura, benché sia poco dissociata, pur tuttavia contiene ioni  $\text{H}_3\text{O}^+$  e  $\text{OH}^-$  in concentrazioni per ciascuna specie pari a  $10^{-7}$  moli/litro. Si ha quindi che al passaggio di corrente elettrica gli ioni  $\text{H}_3\text{O}^+$  migrano verso il catodo (C), ove avviene la semireazione di riduzione  $2\text{H}_3\text{O}^+ + 2e^- \Rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ , mentre gli  $\text{OH}^-$  si muovono verso l'anodo (A), dove ha luogo la semireazione di ossidazione  $4\text{OH}^- \Rightarrow 4e^- + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ . In definitiva, bilanciando gli elettroni nelle due semireazioni, la reazione d'ossidazione che si realizza nella cella elettrolitica in cui ha luogo l'elettrolisi dell'acqua è



# MAGNETISMO

---

Alcuni materiali (calamite o magneti) hanno la proprietà di attirare pezzetti di ferro.

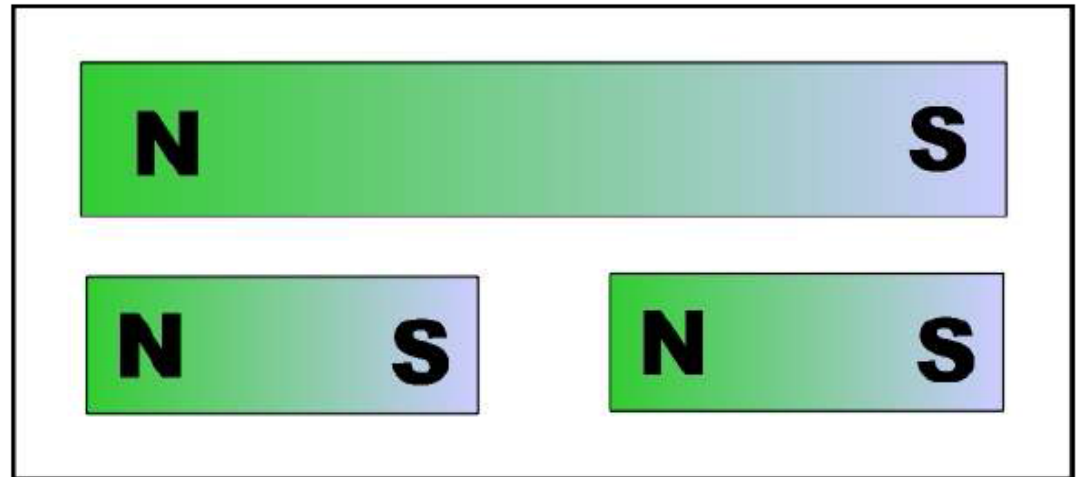
Le proprietà magnetiche si manifestano alle estremità del magnete, chiamate poli.



# MAGNETISMO

Le caratteristiche magnetiche presentano molte affinità con quelle elettriche, ma esistono anche sostanziali differenze.

Non è possibile isolare i poli magnetici.

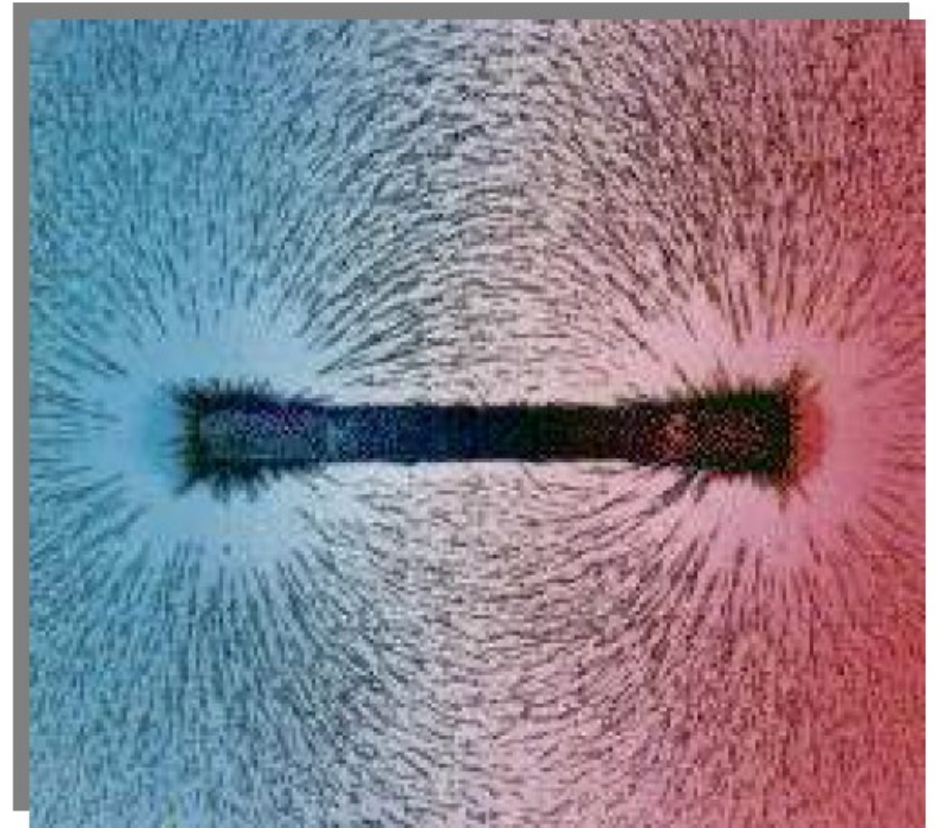




# CAMPO MAGNETICO (1)

---

Un magnete crea nello spazio circostante un campo magnetico, così come una carica elettrica crea un campo elettrico.

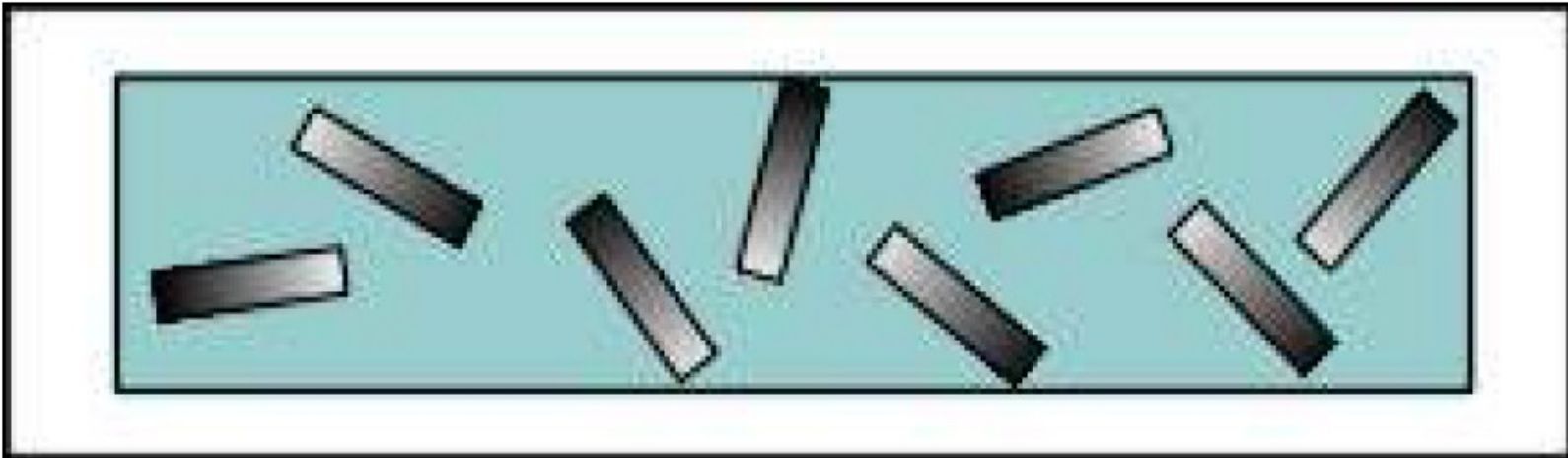




# CAMPO MAGNETICO (2)

---

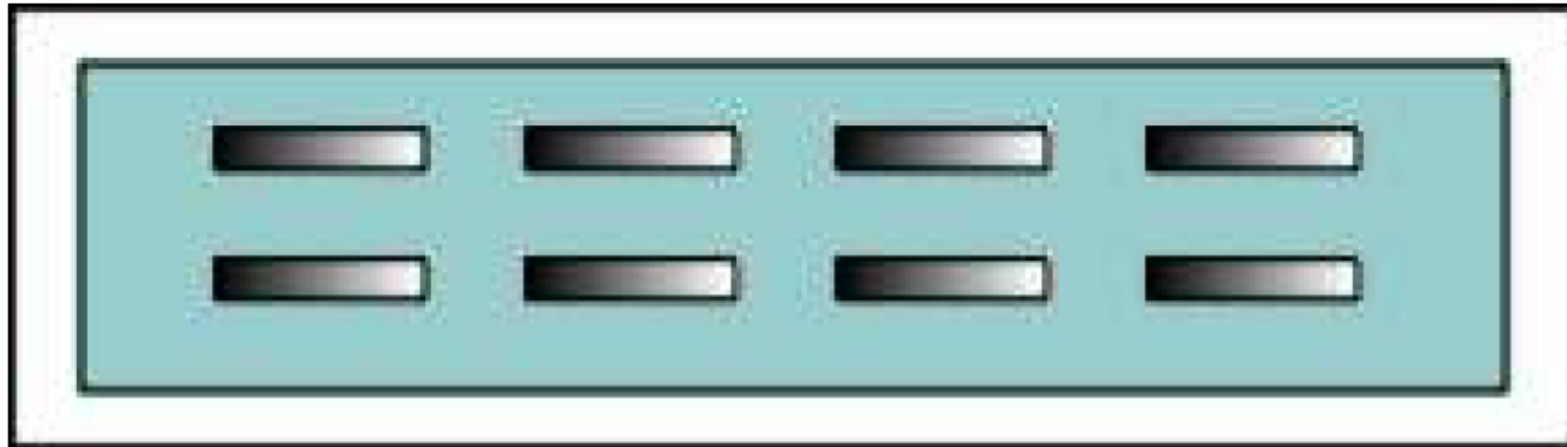
All'interno di un corpo i magneti elementari sono disposti disordinatamente per cui è nullo il campo magnetico risultante prodotto da essi.



# CAMPO MAGNETICO (3)

---

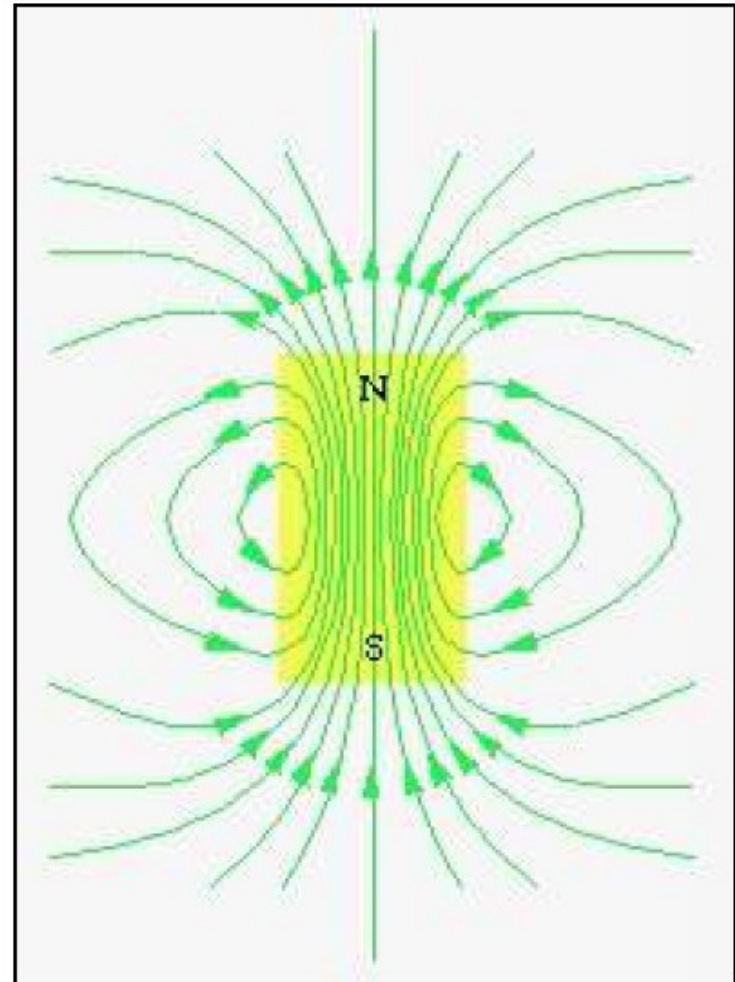
Se i magneti elementari sono anche parzialmente ordinati (temporaneamente o permanentemente), essi producono un campo magnetico risultante non nullo.



# CAMPO MAGNETICO (4)

---

Anche il campo magnetico può essere visualizzato mediante le linee di forza, come accade per il campo elettrico.



# CAMPO MAGNETICO (5)

Il campo magnetico  $\mathbf{B}$  può essere misurato dall'azione che esercita su una carica  $q$  in moto con velocità  $\mathbf{v}$ .

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

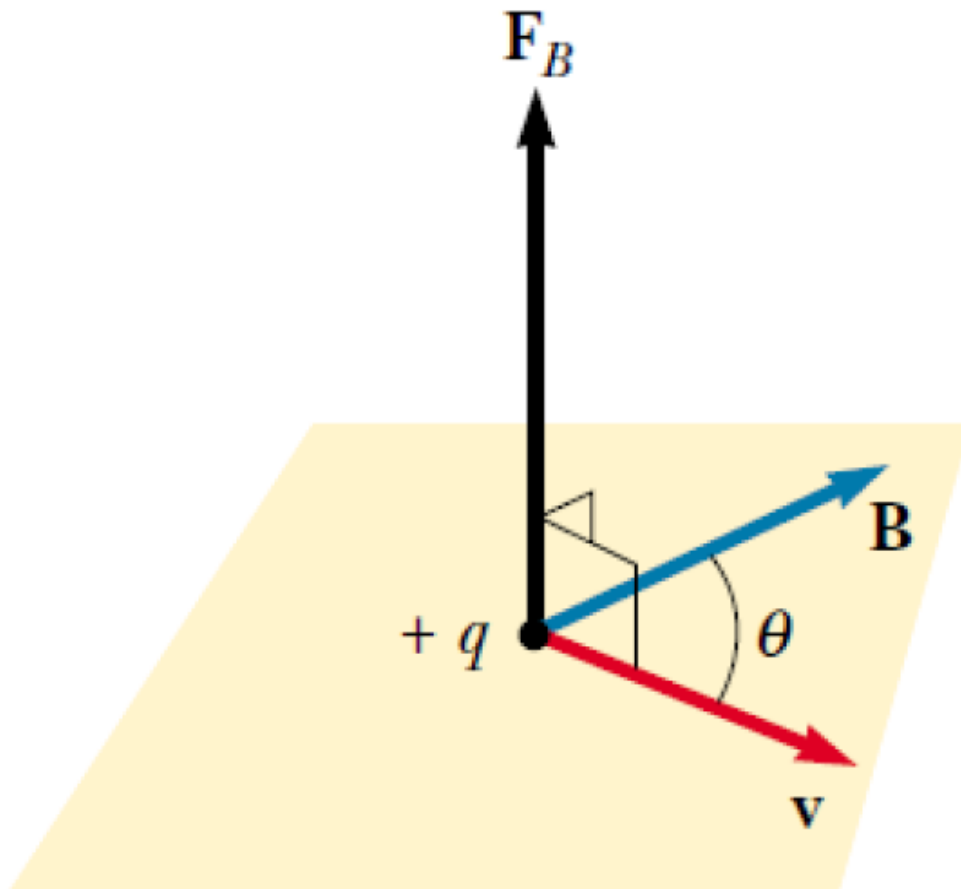
$$F = qvB \text{ sen } \alpha$$

$\alpha$  è l'angolo che il vettore velocità forma con il vettore campo magnetico.

## Legge di Lorentz

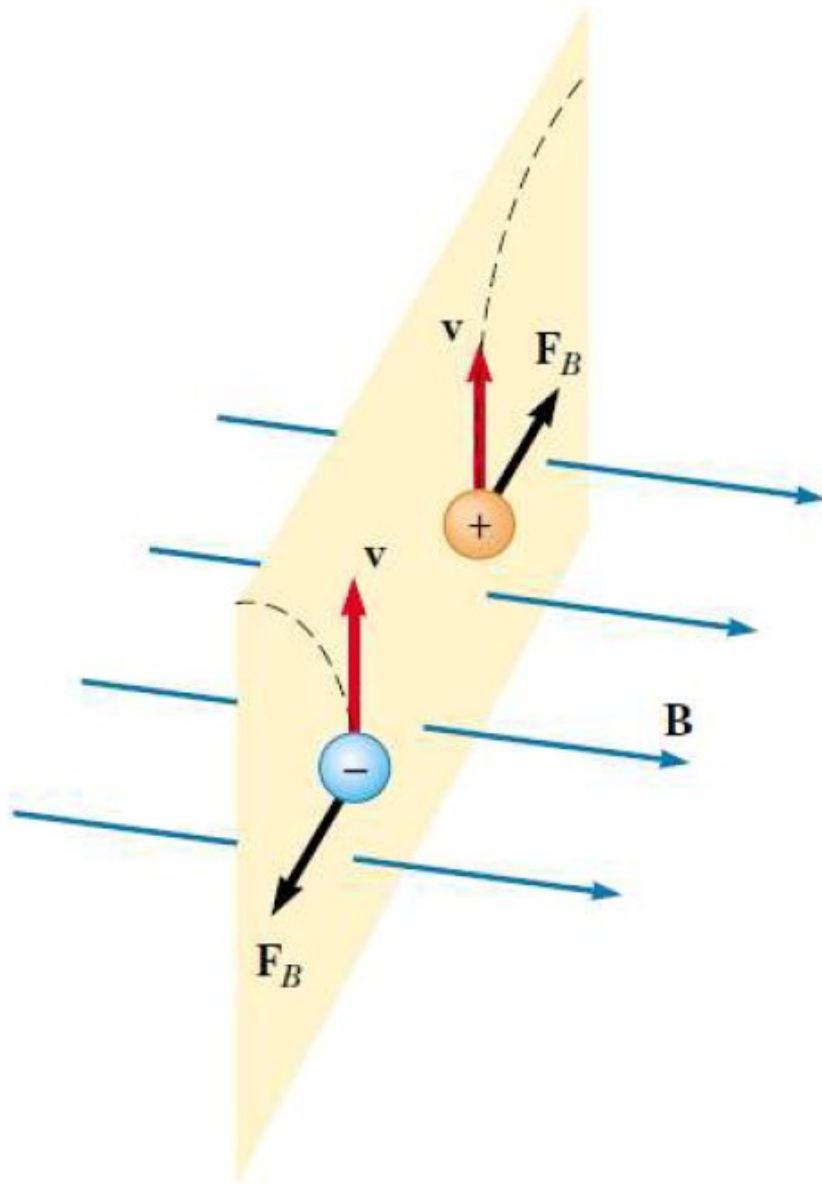
# CAMPO MAGNETICO (6)

La direzione della forza di Lorentz  $F_B$  è ortogonale al piano individuato da  $v$  e  $B$





# CAMPO MAGNETICO (7)



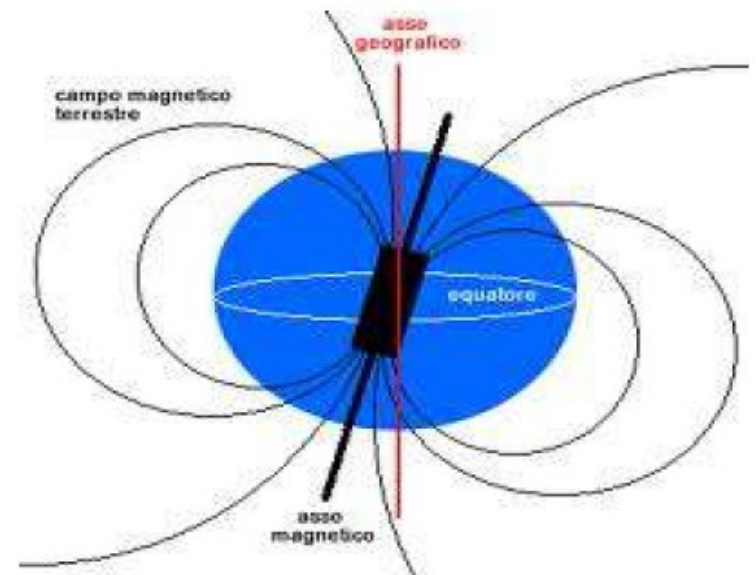
Due particelle di carica opposta che si muovono con la stessa velocità all'interno di un campo magnetico, sperimentano due forze di eguale intensità, direzione e versi opposti.

# CAMPO MAGNETICO (8)

L'unità di misura del campo magnetico nel S.I. si chiama tesla (T). Altra unità di misura il gauss (G).  $[1\text{G}=10^{-4}\text{T}]$

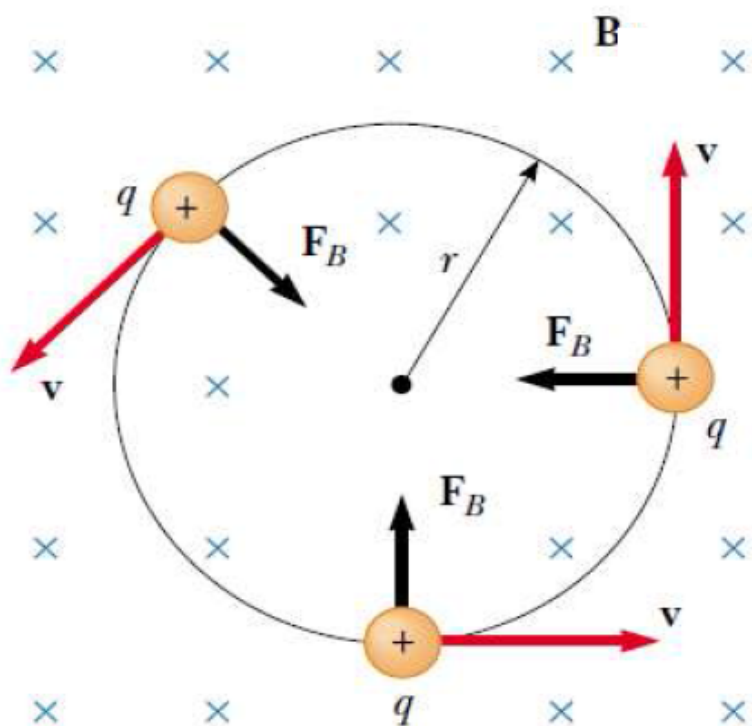
Il campo magnetico di 1 T esercita la forza di 1 N sulla carica elettrica di 1 C, che si muove con velocità di 1 m/s nella direzione del campo magnetico.

**La Terra produce un campo magnetico di  $\sim 0.5\text{ G}$**



# CAMPO MAGNETICO (9)

Una carica elettrica che si muove con una velocità perpendicolare ad un campo magnetico uniforme compie una traiettoria circolare. Supponiamo (come in figura) che il campo  $B$  sia ortogonale al foglio, allora la carica subisce l'azione di una forza  $F_B$  costante in modulo e sempre ortogonale alla velocità ed a  $B$ , cioè una forza centripeta



$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}_{centripeta}$$

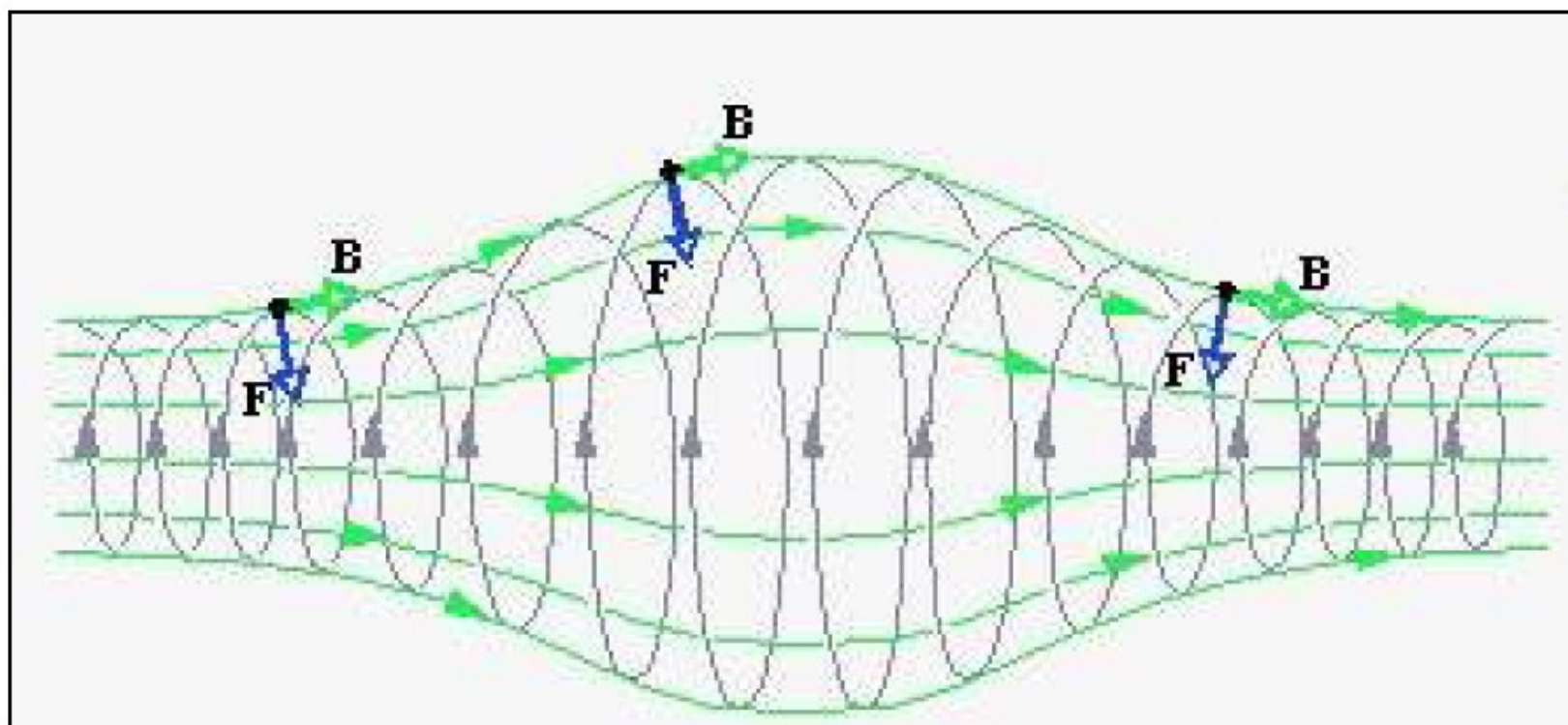
$$qvB = m\frac{v^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$



# CAMPO MAGNETICO (10)

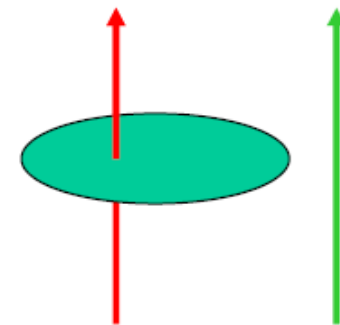
Moto di una carica elettrica in un campo magnetico.



# TEOREMA DELLA CIRCUITAZIONE (1)

Il teorema della circuitazione del campo magnetico  $B$  (detto anche *Legge di Ampère*) dice che l'integrale di linea di  $B$  lungo una qualsiasi linea chiusa  $C$  è eguale alla somma algebrica delle correnti **concatenate** con la linea chiusa moltiplicata per la costante di permeabilità magnetica del vuoto  $\mu_0$

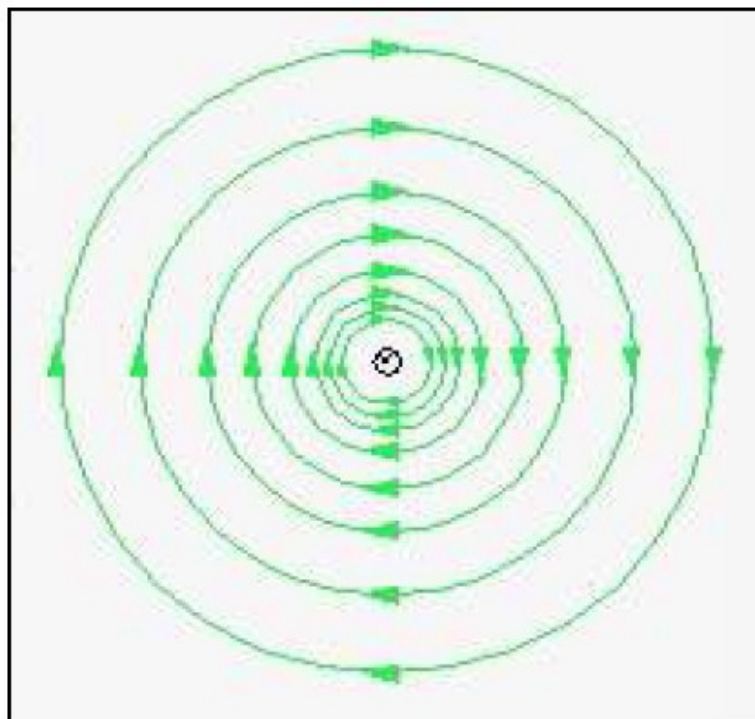
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \sum_n i_n$$



$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$$

# TEOREMA DELLA CIRCUITAZIONE (2)

Consideriamo un filo rettilineo percorso da una corrente  $i$ . Esso genera, sperimentalmente, un campo magnetico le cui linee di forza sono dei cerchi concentrici intorno al filo (in figura il filo entra nel piano del foglio).



tangente ad esse e per ragioni di simmetria costante in modulo, quindi su di un cerchio di raggio  $r$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint_C B ds = B \oint_C ds = B 2\pi r = \mu_0 i$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad \text{Legge di Biot-Savart}$$

# INDUZIONE ELETTROMAGNETICA (1)

---

Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica è descritto dalla *legge di Faraday-Neumann*. Consideriamo una spira di superficie  $S$  ed un campo magnetico  $B$ , possiamo calcolare il flusso del campo attraverso la superficie della spira, come

$$\Phi_S(\vec{B}) = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$











