

# Unità didattica 8

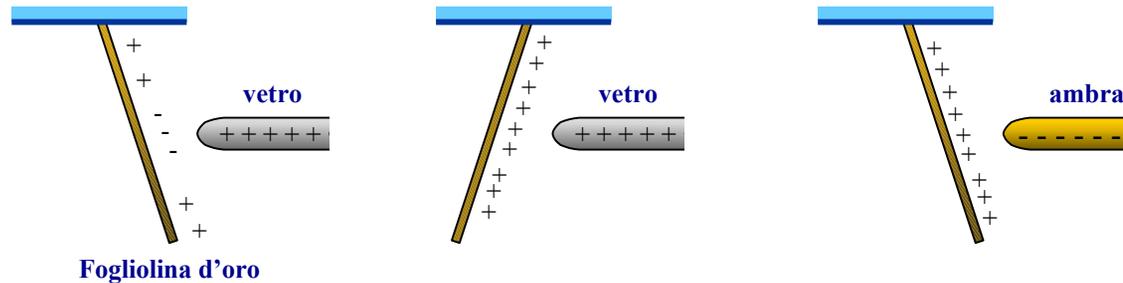
## •Elettromagnetismo

•Cariche elettriche - 1 .....	2
•Cariche elettriche - 2.....	3
•La Legge di Coulomb.....	4
<i>Esempio 1</i> .....	5
•Il campo elettrico.....	6
<i>Esempio 2</i> .....	7
•Linee di forza del campo elettrico, .....	8
•Energia potenziale e differenza di potenziale.....	9
•Condensatori e capacità.....	10
<i>Esempio 3</i> .....	11
•Capacità di un condensatore piano.....	12
•Condensatori in serie e in parallelo.....	13
•Accumulo di energia in un condensatore.....	14
•Corrente elettrica.....	15
•Generatori di corrente.....	16
•Circuiti elettrici.....	17
•La legge di Ohm.....	18
•Resistenza elettrica e resistività.....	19
<i>Esempio 4</i> .....	20
•Resistenze in serie e in parallelo.....	21
•La potenza elettrica.....	22

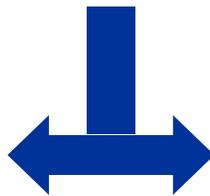
•Corrente elettrica nei liquidi.....	23
•Elettricità nei sistemi biologici: <i>potenziale di riposo</i> .....	24
<i>potenziale d'azione</i> .....	25
•Il magnetismo.....	26
•Il campo magnetico.....	27
•Campi magnetici dovuti a conduttori elettrici percorsi da corrente.....	28
•La tensione magnetica.....	29
•Forza su un filo percorso da corrente in un campo magnetico.....	30
•La forza di Lorentz.....	31
•Forza tra due fili percorsi da corrente.....	32
•L'induzione elettromagnetica.....	33
•Flusso magnetico e legge di Faraday.....	34
•Macchine elettriche: generatore di corrente alternata.....	35
•Macchine elettriche: generatore di corrente continua.....	36
•Macchine elettriche: il trasformatore.....	37
•Radriizzatore di tensione: il diodo.....	38
•Applicazioni dei diodi.....	39
•Strumenti elettrici di misura.....	40
•Amperometro e voltmetro.....	41
•Misure di resistenza.....	42
•Effetti della corrente sugli esseri viventi.....	43-44

# Cariche elettriche - 1

C. F. Du Fay descrisse un esperimento in cui una fogliolina d'oro era attratta da una bacchetta di vetro precedentemente strofinata. Quando la foglia veniva a contatto col vetro, acquistava la “virtu' elettrica” e quindi respingeva il vetro. A questo punto la fogliolina veniva attratta da una bacchetta elettrizzata di ambra.



**IN NATURA ESISTONO  
DUE TIPI DI CARICHE:  
positive + e negative -**



**LA CARICA ELETTRICA  
SI CONSERVA**

# Cariche elettriche - 2

Nel 1897 J.J. Thompson mostro' che tutte le sostanze contengono particelle che sembrano identiche in quanto hanno lo stesso rapporto massa/carica

Nel 1909 R. Millikan scopri' chje la carica elettrica si presenta sempre in quantità multiple di un'unità fondamentale. Una carica qualsiasi si puo' scrivere come  $q = Ne$  dove  $N$  è un numero intero ed  $e$  è il valore dell'unità fondamentale di carica elettrica (che vale  $1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb)



**LA CARICA ELETTRICA E' QUANTIZZATA**

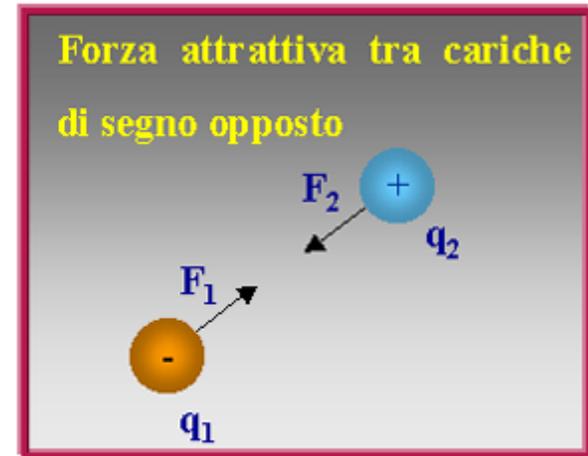
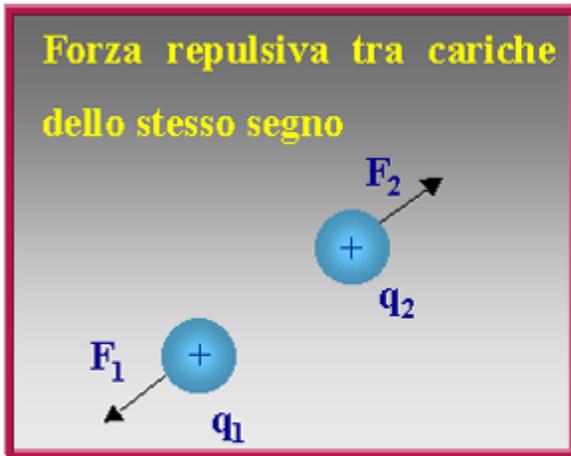
# La Legge di Coulomb

La forza esercitata tra due cariche puntiformi  $q_1$  e  $q_2$  è diretta lungo la retta che congiunge le cariche ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza  $r$  che separa le cariche e direttamente proporzionale al prodotto delle cariche

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Nel S.I la Forza si misura in Newton (N).

$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$  costante dielettrica nel vuoto



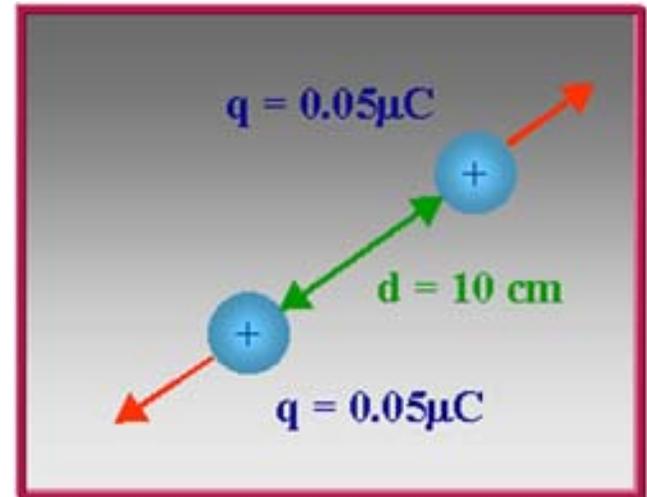
# Esempio 1 – La legge di Coulomb

Due cariche puntiformi, ciascuna di  $0,05 \mu\text{C}$ , sono distanti  $10 \text{ cm}$  l'una dall'altra. Si trovi la forza esercitata da una carica sull'altra e il numero di unità di cariche fondamentali contenute in ciascuna di esse.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = 2.25 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Il numero di elettroni che deve essere trasferito per produrre una carica di  $0.05 \mu\text{C}$  si trova con la relazione:

$$N = \frac{q}{e} = \frac{0.05 \times 10^{-6} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 3.31 \times 10^{11}$$

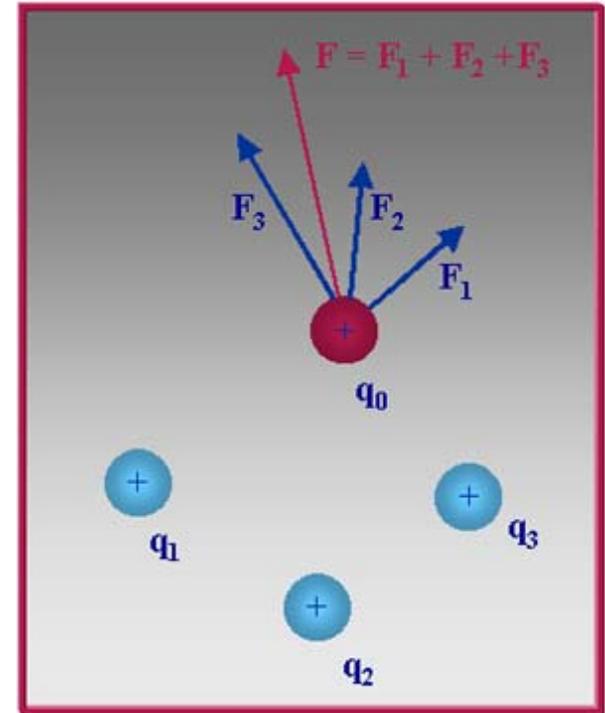


# Il campo elettrico

Consideriamo un insieme di cariche puntiformi  $q_1, q_2, q_3$  disposte arbitrariamente nello spazio. Se poniamo una piccola carica “esploratrice”  $q_0$  in qualche punto vicino a questo sistema di cariche, allora le altre cariche in accordo con la legge di Coulomb eserciteranno su di essa una forza. Definiamo l'intensità del campo elettrico  $\mathbf{e}$ , semplicemente, il campo elettrico  $\mathbf{E}$  come il rapporto tra la forza risultante  $\mathbf{F}$  che agisce sulla carica esploratrice e la carica esploratrice  $q_0$  stessa.

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

L'unità di misura nel S.I è il N/C



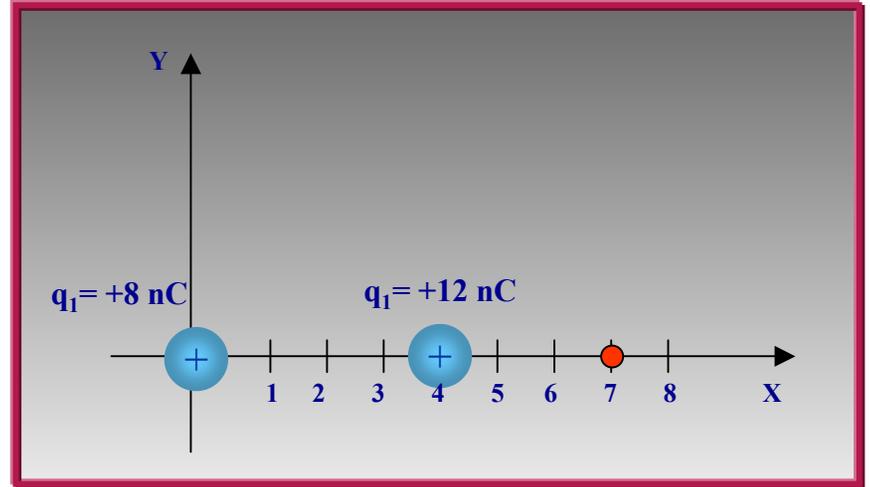
In generale il modulo del campo elettrico dovuto ad una carica  $q$  in un punto a distanza  $r$  è dato da:

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

# Esempio 2 - Il campo elettrico

Una carica positiva  $q_1 = +8 \text{ nC}$  è nell'origine e una seconda carica positiva  $q_2 = +12 \text{ nC}$  è sull'asse  $x$  nel punto  $x = 4$ . Si trovi il campo elettrico nel punto P1 sull'asse delle  $x$  in  $x = 7$ .

Il campo elettrico dovuto a ciascuna carica è nella direzione positiva dell'asse  $x$ ; quindi il campo elettrico risultante ha solo la componente  $x$



$$E_{1x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1^2} = 1.47 \text{ N/C}$$

$$E_{2x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2^2} = 12 \text{ N/C}$$



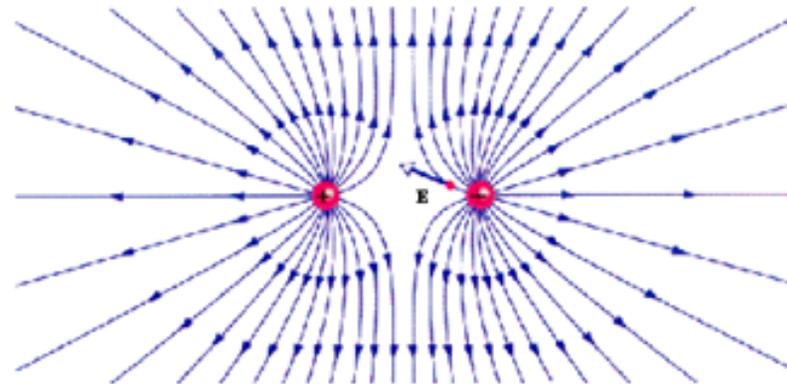
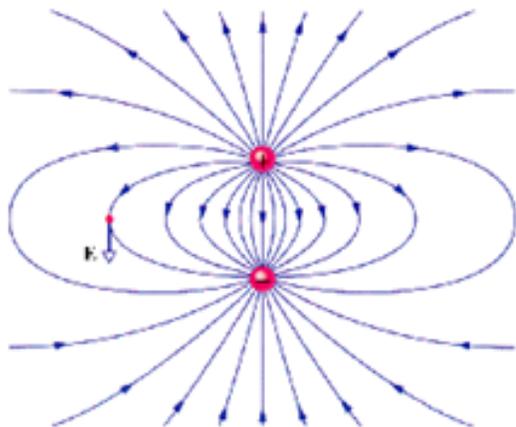
$$E_x = E_{1x} + E_{2x} = 13.47 \text{ N/C}$$

# Linee di forza del campo elettrico

Attraverso le linee di forza si puo' rappresentare in modo efficace il campo elettrico.

**Si definiscono linee di forza quelle linee la cui tangente in ogni punto rappresenta la direzione del campo elettrico in quel punto.**

- ➡ Il numero di linee che escono da una carica positiva o entrano in una carica negativa è direttamente proporzionale alla carica.
- ➡ Le linee che escono o entrano in una carica puntiforme sono tracciate simmetricamente.
- ➡ Le linee si originano da cariche positive e terminano su cariche negative.
- ➡ La densità delle linee è direttamente proporzionale all'intensità del campo elettrico



# Energia potenziale e differenza di potenziale

Se una carica esploratrice positiva viene portata da una grande distanza in prossimità di una carica positiva, bisogna compiere un lavoro contro la repulsione elettrostatica.

Il lavoro è dato dal prodotto scalare  $F \cdot s$  fra la forza e lo spostamento subito dalla carica.

Scomponendo lo spostamento in tanti piccoli tratti  $ds$ , il lavoro totale risulta dalla somma dei lavori nei singoli tratti  $W = \sum dL = \int F ds$ . In particolare se lo spostamento della carica ha inizio in un punto a distanza  $r_1$  e termina in un punto a distanza  $r_2$ .

$${}_1W_2 = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Energia potenziale relativa allo spostamento tra due punti  $r_1$  ed  $r_2$

Per essere indipendente dalla carica di prova, si considera il rapporto tra il lavoro e la carica esploratrice stessa.

$$\Delta U = \frac{{}_1W_2}{q} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{s}$$

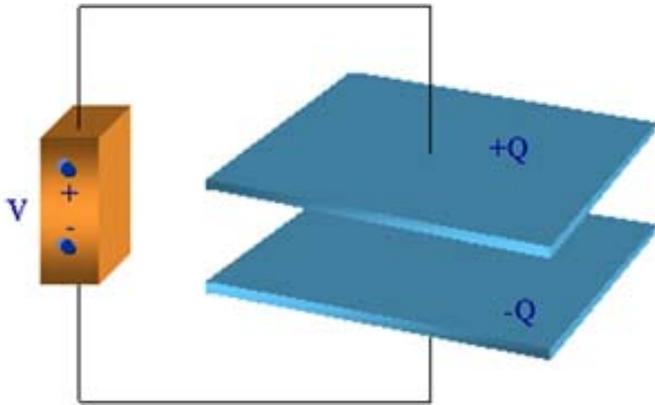
Differenza di potenziale tra I punti 1 e 2

Nel caso di campo generato da una singola carica puntiforme, si attribuisce ad una carica posta all' $\infty$ , un'energia potenziale pari a 0.

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

Potenziale di un punto a distanza  $r$  dalla carica puntiforme risulta

# Condensatori e capacità



Un condensatore tipico, chiamato condensatore piano, è costituito da due estese lamine conduttrici piane e parallele chiamate armature isolate l'una dall'altra e separate da una piccola distanza. Se si collegano le armature a un dispositivo che le carichi, ad esempio a una pila, si trasferisce carica da un'armatura all'altra finché la differenza di potenziale tra le due armature,

dovuta alle cariche uguali e opposte, non eguaglia la differenza di potenziale tra i poli della pila. Se la distanza fra le piastre è piccola rispetto alle dimensioni delle piastre, si possono trascurare le linee curve all'estremità e considerare pertanto le linee di forza tutte parallele fra loro.

La quantità di carica trasferita dipende dalla differenza di potenziale e dalla geometria del condensatore. Sia  $Q$  il valore assoluto della carica che si trova su ciascuna armatura e sia  $V$  la differenza di potenziale tra le armature. Il rapporto fra queste due grandezze è chiamata capacità e si misura in Farad.

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

**La capacità è una misura dell'attitudine a immagazzinare carica per una data differenza di potenziale**

# Esempio 3 -Capacità

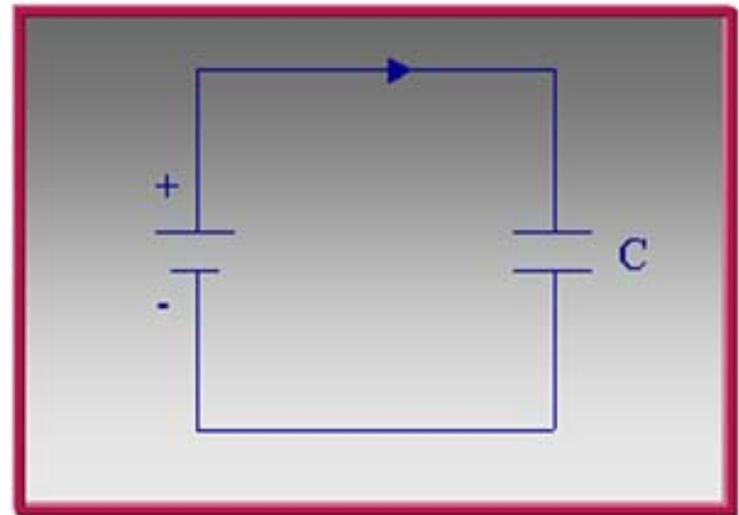
Un condensatore di 90 pF è collegato a una pila di 12 V e caricato a 12 V. Quanti elettroni vengono trasferiti da un'armatura all'altra?

Dalla definizione di capacità la carica trasferita è

$$Q = CV = 1.1 \times 10^{-9} \text{ C}$$

Questo è il valore assoluto della carica presente su ciascuna armatura. Il numero di elettroni in una carica di  $1.1 \times 10^{-9} \text{ C}$  è

$$N = \frac{Q}{e} = 6.9 \times 10^9 \text{ elettroni}$$



# Capacità di un condensatore piano

La capacità di un condensatore a piastre dipende dalle sue dimensioni. Consideriamo un condensatore in cui le piastre sono inizialmente a distanza  $d$  e portiamole a una distanza  $d' > d$ . In questo modo non si modifica l'intensità del campo elettrico (numero di linee di forza per  $m^2$ ) all'interno, ma per effetto della maggiore distanza la differenza di potenziale  $V = Ed'$  aumenta. Cio' significa che la capacità diminuisce.



La capacità è inversamente  
proporzionale alla distanza

Se d'altra parte aumentiamo la superficie dell piastre mantenendo uguale la carica  $Q$ , la densità delle linee di forza e cioè il campo elettrico  $E$  è minore .

Dalla definizione  $V=Ed$  anche la differenza di potenziale risulterà minore con conseguente aumento della capacità



La capacità è direttamente  
proporzionale alla superficie

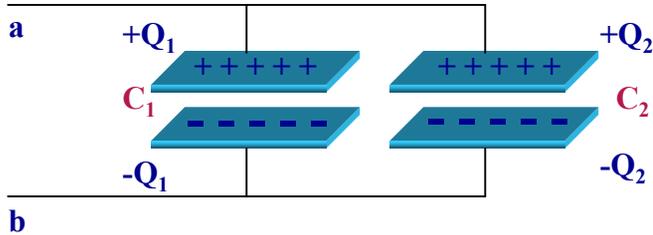
Riassumendo i risultati si puo' esprimere la capacità di un condensatore piano con:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

# Condensatori in serie e in parallelo

Capacità diverse si possono ottenere collegando più condensatori in serie o in parallelo

## Condensatori in parallelo



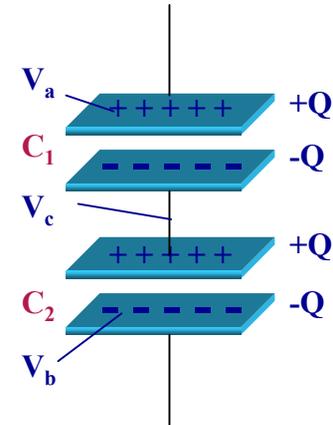
La d.d.p è la stessa per entrambi i condensatori.

$$Q_1 = C_1 V \quad \longrightarrow \quad Q = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2) V$$
$$Q_2 = C_2 V$$

La capacità equivalente si definisce come il rapporto fra la carica totale immagazzinata e la differenza di potenziale:

$$C_{eq} = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2$$

## Condensatori in serie



La carica è la stessa per entrambi i condensatori.

$$V_1 = Q/C_1$$
$$V_2 = Q/C_2 \quad \longrightarrow \quad V = V_1 + V_2 = Q(1/C_1 + 1/C_2)$$

La capacità equivalente è data da:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

# Accumulo di energia in un condensatore

Il processo di carica di un condensatore avviene sempre applicando un lavoro.

All'inizio del processo di carica nessuna delle armature è carica; non c'è campo elettrico e entrambe le armature sono allo stesso potenziale. Dopo il processo di carica, una carica  $Q$  è trasferita da un'armatura all'altra e la d.d.p è  $V = Q/C$ . Il lavoro necessario per caricare il condensatore dalla carica iniziale nulla alla carica finale  $Q$  è dato da:

$$W = \frac{1}{2} QV$$

Da cui l'energia immagazzinata in un condensatore carico è

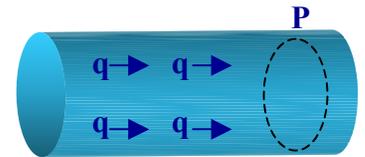
$$U = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

# Corrente elettrica

Se le piastre di un condensatore carico vengono collegate mediante un conduttore, in breve tempo si attua una compensazione di carica: i portatori di carica scorrono verso la piastra opposta, e la d.d.p diminuisce fino ad azzerarsi.

La rapidità con cui fluiscono i portatori di carica è detta intensità di corrente elettrica o , piu' semplicemente corrente elettrica.

Se consideriamo un segmento di un filo nel quale passano  $I$  portatori di carica, definiamo la corrente in un punto  $P$  come la quantità di carica che passa nell'unità di tempo. Se  $\Delta Q$  è la carica che passa nel tempo  $\Delta t$ , la corrente è



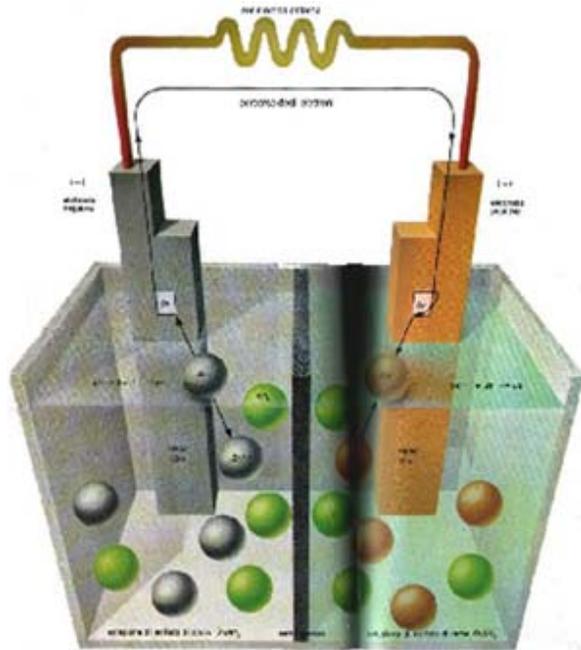
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

L'unità di corrente elettrica, il Coulomb/secondo è chiamata ampere (A)

Come verso convenzionale della corrente si prende il verso del movimento delle cariche positive. Il moto degli elettroni si svolge nel verso opposto a quello della corrente: una carica negativa che si muove verso sinistra è equivalente ad un trasporto di carica positiva verso destra.

# Generatori di corrente

Affinchè la corrente rimanga costante è necessario mantenere fra le piastre del condensatore una d.d.p costante. Un apparecchio che fornisce, indipendentemente dalla quantità di carica sottratta, una tensione costante viene chiamato generatore di tensione. Ne sono un esempio la presa elettrica, l'alimentatore e la pila.



Il funzionamento della pila puo' essere meglio chiarito osservando il disegno affianco.

Nella cella galvanica il contenitore è diviso in due parti da un setto poroso, cioè da una parete che lascia passare gli ioni da una parte all'altra, ma non permette il mescolamento delle due soluzioni: una delle due parti della celle contiene una soluzione di solfato di zinco, l'altra una soluzione di solfato di rame.

Nel solfato di zinco è immersa una barretta di solfato di zinco, in quello di rame una barretta di rame.

Queste barrette sono chiamate elettrodi: quello di zinco è l'elettrodo negativo, quello di rame è l'elettrodo positivo.

L'elettrodo di zinco tende a sciogliersi nella soluzione formando ioni di zinco e liberando elettroni; l'elettrodo di rame tende invece a catturare

gli ioni di rame in soluzione trasformandoli in atomi neutri (rame metallico).

Congiungendo l'elettrodo negativo con quello positivo, gli elettroni liberati dallo zinco migrano verso l'elettrodo di rame, costituendo una corrente elettrica continua da un elettrodo all'altro; ci si accorge di ciò inserendo nel circuito una lampadina che si accende.

# Circuiti elettrici

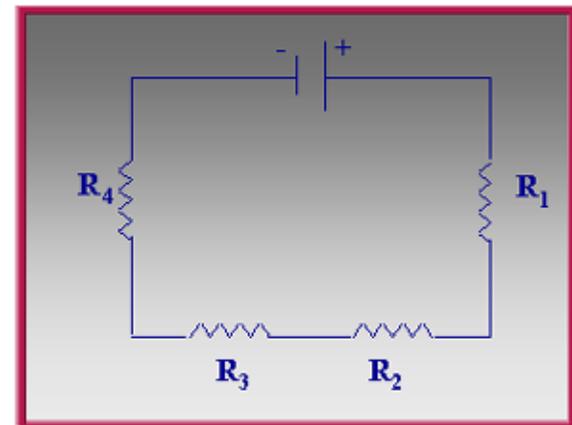
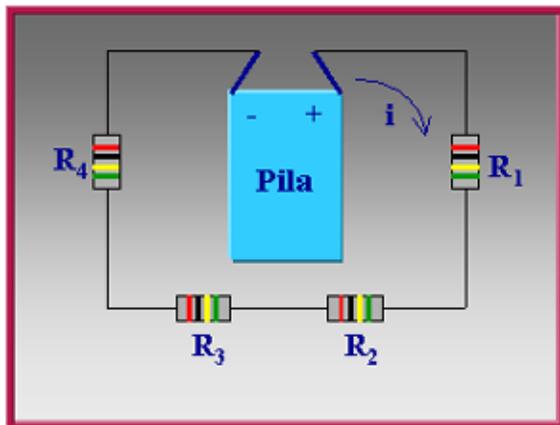
Collegando un filo metallico ai morsetti di un generatore di corrente, si ottiene un semplice esempio di circuito elettrico.

Un così' semplice circuito, come altri molto piu' complessi è caratterizzato da tre grandezze fondamentali:

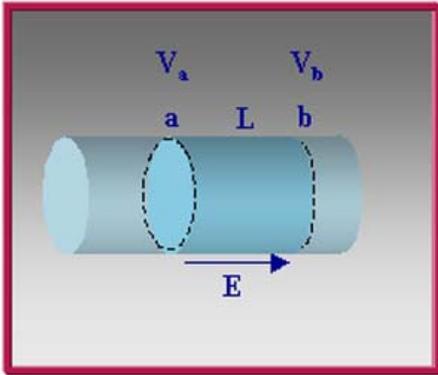
•La differenza di potenziale applicata

•L'intensità di corrente

•La resistenza elettrica



# La Legge di Ohm



Se all'interno di un conduttore c'è una corrente elettrica, allora al suo interno ci sarà un campo elettrico che la produce. Consideriamo un segmento di filo di lunghezza  $L$  e area  $A$  nel quale passa una corrente  $I$ . Poiché nel filo c'è un campo elettrico, il potenziale nel punto  $a$  è maggiore che nel punto  $b$ .

La d.d.p tra i punti  $a$  e  $b$  è:  $V = V_a - V_b = EL$ .

Per molti materiali conduttori, come i fili metallici ad esempio, la corrente è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale. La costante di proporzionalità si indica con  $1/R$  dove  $R$  è detta **resistenza**:

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

**Legge di Ohm**

L'unità di resistenza elettrica, il Volt/Ampere è chiamata ohm ( $\Omega$ )

# Resistenza elettrica e resistività

La resistenza di un filo conduttore dipende dalla lunghezza del filo, dall'area della sua sezione, dal tipo di materiale e dalla temperatura, ma per i materiali che obbediscono alla legge di Ohm non dipende dalla corrente  $I$ . Tali materiali, che includono la maggior parte dei metalli, sono chiamati materiali *ohmici*.

La resistenza tra due punti in un materiale è definita dalla relazione:

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

Sperimentalmente si trova che la resistenza di un filo conduttore è direttamente proporzionale alla lunghezza del filo e inversamente proporzionale all'area della sua sezione:

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

Dove  $\rho$  è una costante di proporzionalità chiamata resistività elettrica del materiale conduttore

# Esempio 4 - Resistenza

Un filo di nichelcromo ( $\rho = 10^{-6} \Omega\text{m}$ ) ha il raggio di 0.65 mm. Che lunghezza di filo è necessaria per realizzare la resistenza di 2.0  $\Omega$ ?

L'area della sezione di questo filo è  $A = \pi r^2 = (3.14)(6.5 \times 10^{-4}\text{m})^2 = 1.33 \times 10^{-6} \text{m}^2$ .

Invertendo la relazione precedente si ha:

$$L = \frac{RA}{\rho} = 2.66\text{m}$$

Qual'è il campo elettrico in un filo di rame di 1mm di diametro percorso da una corrente  $I = 1\text{A}$ ?

$$R = \rho \frac{L}{A} = 2.18 \times 10^{-2} \Omega$$

Resistenza di un tratto  
di 1 m di filo

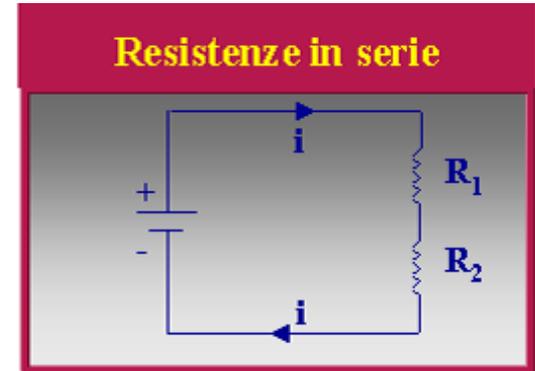
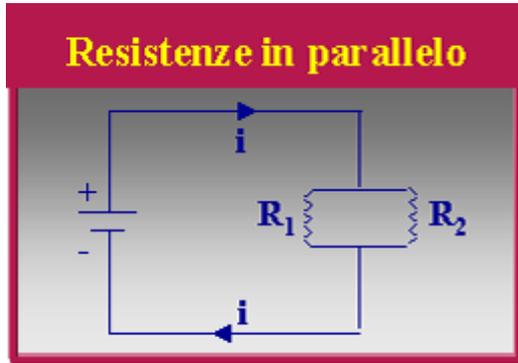
Caduta di potenziale  
ai capi del filo


$$E = \frac{V}{L} = 2.18 \times 10^{-2} \text{V/m}$$

$$V = RI = 2.18 \times 10^{-2} \text{V}$$

# Resistenze in serie e in parallelo

E' sempre possibile semplificare l'analisi di un circuito sostituendo a due o piu' resistenze una resistenza equivalente  $R_{eq}$ .



Due o piu' resistenze si dicono in serie se hanno ai capi la stessa d.d.p.

$$I_1 = V/R_1 \quad \longrightarrow \quad \text{corrente che attraversa } R_1$$
$$I_2 = V/R_2 \quad \longrightarrow \quad \text{corrente che attraversa } R_2$$

Poichè la corrente totale è:

$$I = I_1 + I_2 \quad I = V (1/R_1 + 1/R_2)$$

Da cui:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Due o piu' resistenze si dicono in serie se sono attraversate dalla stessa corrente.

$$V_1 = IR_1 \quad \text{d.d.p ai capi } R_1$$
$$V_2 = IR_2 \quad \text{d.d.p ai capi } R_2$$

Quindi la d.d.p ai capi del sistema sarà:

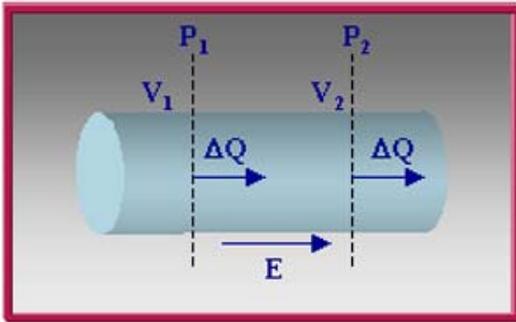
$$V = IR_1 + IR_2 = I (R_1 + R_2)$$

Da cui:

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

# La potenza elettrica

Quando una carica positiva scorre in un conduttore, essa si muove da zone a potenziale alto a potenziale basso, nella direzione orientata del campo elettrico. Quindi la carica perde energia potenziale. L'energia potenziale perduta viene trasferita al materiale conduttore mediante urti trasformandosi in energia termica del conduttore. Consideriamo la carica  $\Delta Q$  che passa attraverso



il punto  $P_1$  nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ .

$$\Delta U = \Delta Q V_1 \quad \text{Energia potenziale della carica in } P_1.$$

Durante lo stesso intervallo di tempo la stessa quantità di carica passa attraverso il punto  $P_2$

$$\Delta U = \Delta Q V_2 \quad \text{Energia potenziale della carica in } P_2.$$

La variazione di energia potenziale della carica è:  $\Delta U = \Delta Q(V_2 - V_1) = \Delta Q(-V)$ .

L'energia perduta dalla carica quando attraversa questo segmento di conduttore è quindi:

$$-\Delta U = \Delta Q V$$

e la rapidità con cui perde energia è:

$$\frac{-\Delta U}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} V$$

L'energia perduta nell'unità di tempo è la potenza dissipata nel conduttore:

$$P = IV$$

# Corrente elettrica nei liquidi

La conduttività di un materiale dipende dalla presenza o meno di cariche libere di muoversi. Molti acidi, soluzioni saline e alcaline hanno elevata conduttività.

## Elettrolita

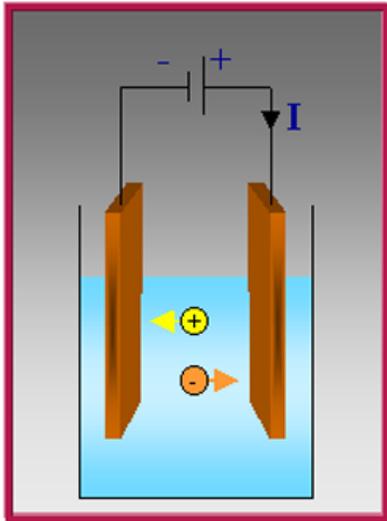
Si intende una soluzione conduttrice

## Ioni

Cariche positive e negative libere di muoversi

## Dissociazione

Nelle soluzioni elettrolitiche i composti chimici presenti in soluzione si dissociano in ioni



Se si immergono due pezzi di metallo, generalmente lamierino o filo metallico (chiamati elettrodi) in un elettrolita e li si collega ad un generatore di tensione, gli ioni positivi vanno verso il polo negativo (catodo) e gli ioni negativi verso il polo positivo (anodo). Tanto maggiore è l'intensità di corrente tanto più velocemente si muoveranno gli ioni.

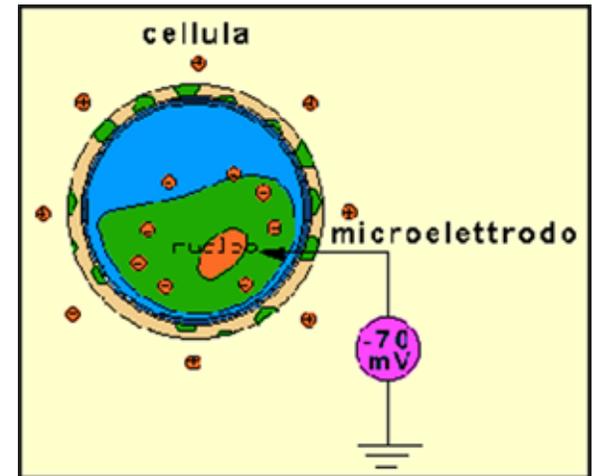
# Elettricità nei sistemi biologici:

## potenziale di riposo

La conoscenza dei fenomeni elettrici inerenti il corpo umano e degli effetti della corrente elettrica esterna introdotta su di essi, sono ampiamente studiati in una disciplina scientifica denominata *elettrofisiologia*. Le variazioni di potenziale prodotte dall'attività biologica, all'interno del corpo umano sono indicative del funzionamento normale o anormale di alcuni organi: cuore (elettrocardiogramma), cervello (elettroencefalogramma), muscoli (elettromiogramma), occhio (retinogramma).

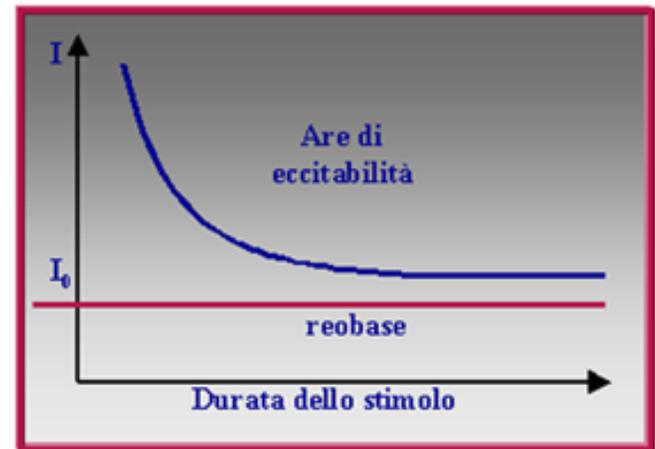
Il corpo umano, in gran parte composto di una soluzione salina conduttrice, contenente ioni  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ , ecc., che si muovono verso zone di minor concentrazione e che sono soggetti al campo elettrico generato dall'insieme degli altri ioni. Poiché la cellula ha verso gli ioni un comportamento di tipo selettivo, gli ioni non si diffondono allo stesso modo dentro e fuori la cellula. Lo ione  $K^+$  viene trasportato all'interno della cellula mentre lo ione  $Na^+$  viene espulso con la tipica azione di pompaggio biochimico a spese dell'organismo (pompa metabolica). La cellula viene quindi a possedere un potenziale negativo all'interno rispetto all'esterno (potenziale di riposo).

Nei mammiferi le cellule del sistema nervoso centrale presentano un **potenziale di riposo** di 70 mV: una differenza di potenziale notevole se si considerano le piccole dimensioni della cellula. E' possibile misurare il potenziale che presenta la cellula, negativo all'interno rispetto all'esterno, tramite un millivoltmetro



# Elettricità nei sistemi biologici: potenziale d'azione

Se si applica ad una cellula eccitabile un impulso di corrente di polarità inversa a quella della cellula stessa, il potenziale da negativo diviene positivo per ritornare di nuovo al valore iniziale. Quando lo stimolo elettrico eccita la cellula, aumenta notevolmente la permeabilità della membrana agli ioni sodio che, entrando nel citoplasma della cellula, prima la depolarizzano, annullando la differenza di potenziale tra interno ed esterno, e poi ne causano l'inversione di polarità. L'ampiezza minima dell'impulso di corrente necessario ad eccitare la cellula e a determinarne l'inversione del potenziale decresce con l'aumentare della durata per tendere ad un valore costante secondo una curva simile ad un'iperbole equilatera denominata curva di eccitabilità. Uno stimolo elettrico riesce a eccitare la cellula soltanto se produce un flusso di corrente la cui intensità e durata sono superiori ad una soglia che prende il nome di reobase. Per stimoli di intensità superiore alla reobase, l'eccitazione avviene soltanto se la durata dello stimolo e l'intensità di corrente sono al di sopra della curva mostrata in figura. Questa curva rappresenta il limite per cui uno stimolo riesce a eccitare una cellula.



# Il magnetismo

Le proprietà magnetiche di alcuni materiali erano già note agli antichi greci, ai romani e ai cinesi: presso questi popoli infatti era conosciuta la capacità dell'ossido di ferro chiamato **magnetite** di attrarre limatura di ferro. Essi inoltre osservarono che una sbarretta di ferro a contatto con frammenti di magnetite si magnetizza, cioè diventa un magnete naturale: alle estremità si producono un polo nord e un polo sud magnetici. Poli simili si respingono, mentre poli diversi si attraggono.

**IN NATURA ESISTONO dipoli magnetici:  
polo positivo positivo, polo negativo**

Nel 1600 il fisico William Gilbert, utilizzando un ago magnetico e una calamita di forma sferica, osservò che la Terra stessa si comporta come un'enorme calamita e, attraverso una serie di esperimenti condotti con metodo scientifico, riuscì a sconfessare le nozioni scorrette sul magnetismo fino ad allora ritenute valide.

**La Terra è un magnete permanente**

Nel 1750, il geologo John Michell inventò una bilancia con la quale mostrò che l'intensità della forza attrattiva o repulsiva tra due poli magnetici è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

**La forza tra 2 poli magnetici è analoga alla forza tra 2 cariche elettriche**

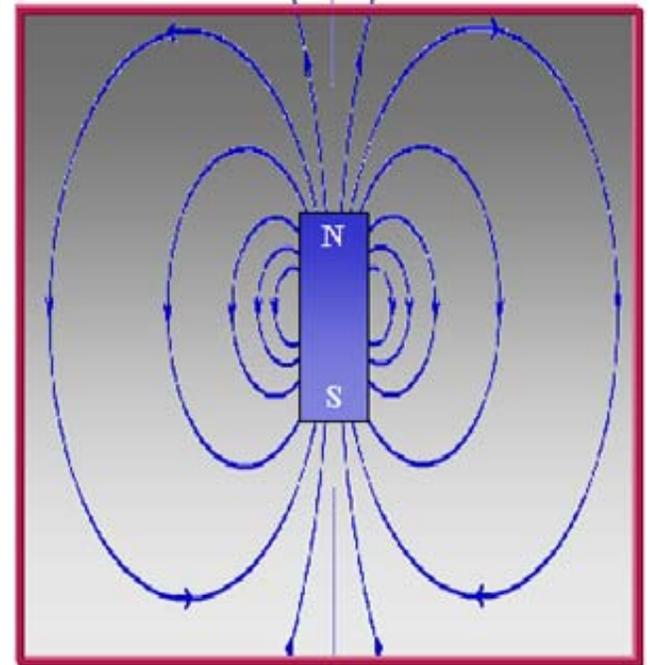
# Il campo magnetico

Oggetti magnetizzati o fili percorsi da correnti elettriche interagiscono con forze di natura magnetica. Queste forze possono essere descritte mediante il concetto di campo magnetico e rappresentate graficamente con un insieme di linee di forza. L'andamento delle linee di forza di un campo magnetico dipende dalla forma geometrica e dalle caratteristiche del magnete; nel caso di un magnete a sbarra, ad esempio, esse emergono da una delle estremità, e poi si incurvano nello spazio circostante fino a raggiungere l'altra estremità e chiudersi all'interno della barra, dove sono vicine parallele. Alle estremità del magnete le linee di forza sono più fitte, il che corrisponde a una maggiore intensità del campo; sui lati invece il campo è più debole e quindi le linee sono più distanziate.

È possibile evidenziare la direzione e il verso delle linee di forza per mezzo di un aghetto magnetico o di un po' di limatura di ferro. Infatti sparpagliando della limatura di ferro su un foglio di carta tenuto sopra un oggetto magnetizzato, questa tende a distribuirsi sul foglio in corrispondenza delle linee di forza del campo.

Il campo magnetico viene espresso attraverso:

- ➡ Intensità del campo magnetico  $\vec{H}$
- ➡ Vettore induzione magnetica  $\vec{B}$



# Campi magnetici dovuti a conduttori elettrici percorsi da corrente

Un filo rettilineo percorso da una corrente elettrica  $I$  crea un campo magnetico.

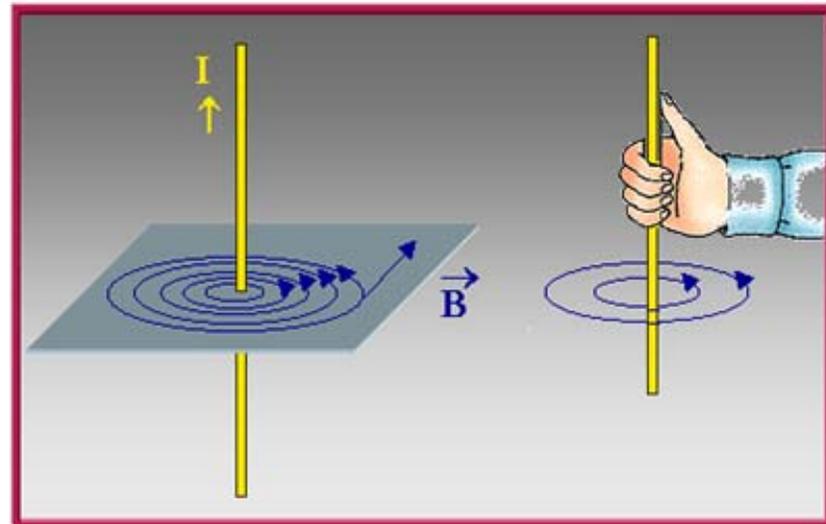
Le linee di forza sono cerchi concentrici posti su un piano perpendicolarmente al filo. Si può stabilire la **direzione** delle linee di forza con la regola della mano destra; se il pollice indica la direzione della corrente e se con le dita si afferra il conduttore, la direzione delle dita è quella del campo magnetico.

L'**intensità** del campo magnetico diminuisce con l'aumentare della distanza dal filo.

Sperimentalmente si è trovato che:

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Dove  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica del vuoto



L'induzione magnetica è direttamente proporzionale alla corrente e inversamente proporzionale alla distanza

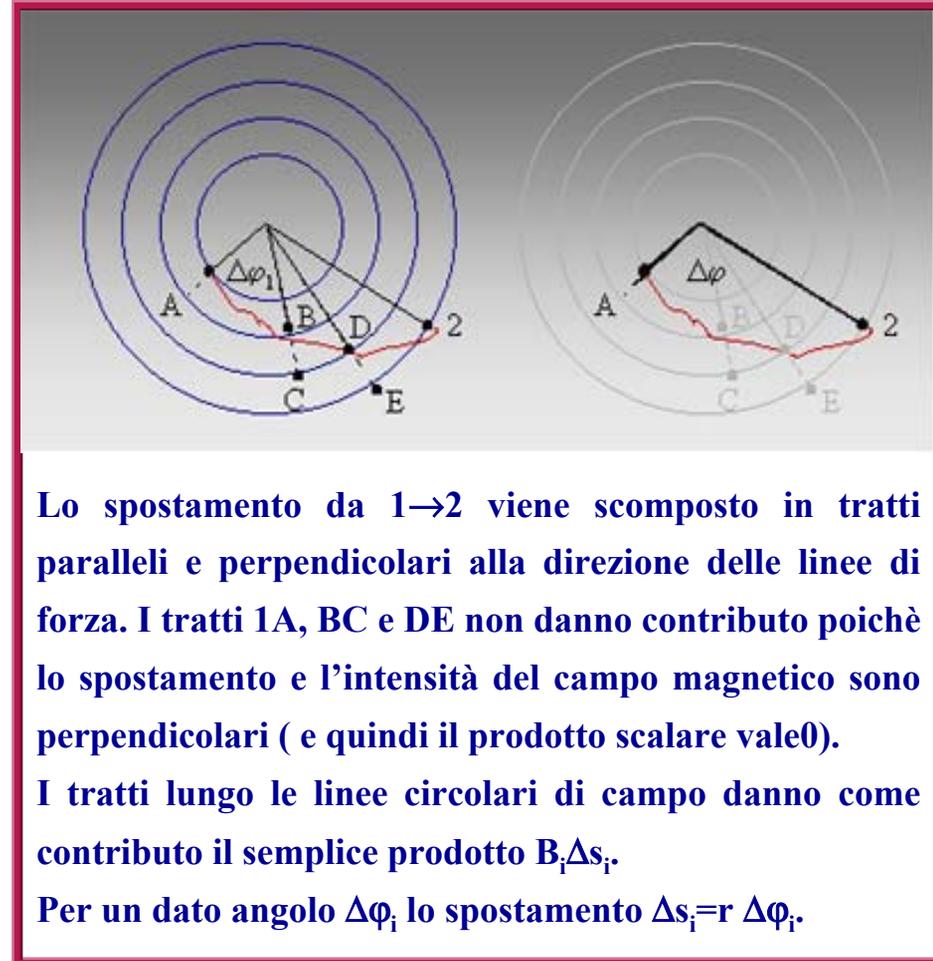
# La tensione magnetica

Analogamente all'elettrostatica si può definire nel campo magnetico una d.d.p detta **tensione magnetica** fra due punti:

$$U_m = \int_1^2 \vec{B} d\vec{s} = \sum_i \vec{B}_i \Delta \vec{s}_i$$

Nel caso di un filo rettilineo percorso da corrente sommando tutti gli i-esimi contributi:

$$U_m = \frac{\mu_0 I \Delta \varphi}{2\pi}$$



# Forza su un filo percorso da corrente in un campo magnetico

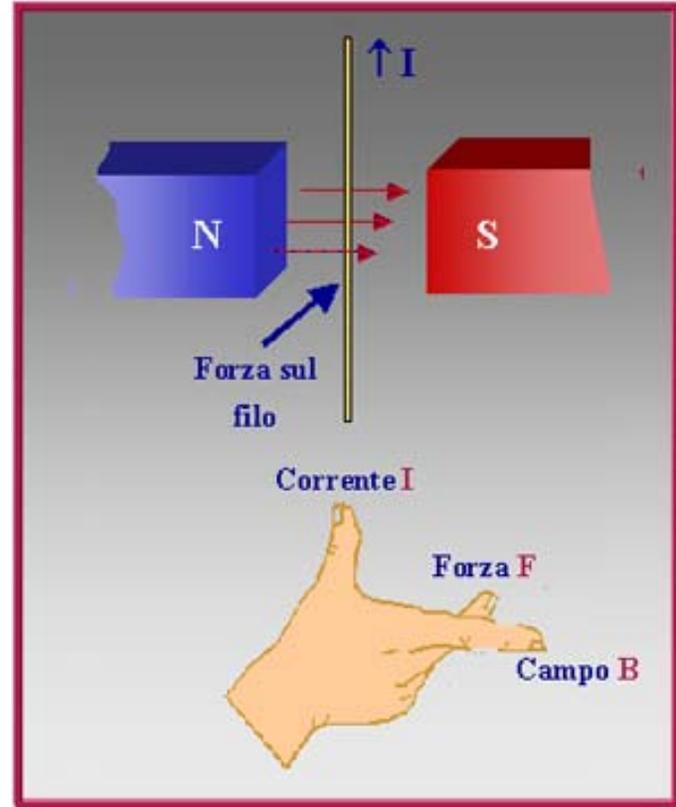
Se un filo percorso da corrente è immerso in una zona sede di un campo magnetico, esso risentirà di una forza.

Se il filo è percorso da una corrente  $I$  e ha lunghezza  $l$ , allora:

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B}l$$

La direzione è quella perpendicolare sia alla direzione della corrente, sia al vettore induzione magnetica e può essere facilmente ricavata con la regola della mano destra.

Da questa relazione si può ricavare il modulo dell'induzione magnetica  $B$ :



$$B = \frac{F}{Il}$$

L'induzione magnetica nel SI si misura in Tesla ( $1\text{T} = \text{N A}^{-1}\text{m}^{-1}$ )

# La Forza di Lorentz

Se nel filo conduttore di lunghezza  $l$  posto in un campo magnetico, si trovano  $N$  cariche che si muovono con velocità  $v$ , queste percorreranno il tratto  $l$  in un tempo  $\Delta t = l/v$ . Le  $N$  cariche avranno carica totale  $Q = Ne$  e quindi la corrente sarà

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Ne}{l/v} = \frac{Nev}{l}$$

Siccome la forza che agisce sul filo conduttore di lunghezza  $l$  è  $F = I \times Bl$ , la forza che agisce su una singola carica sarà:

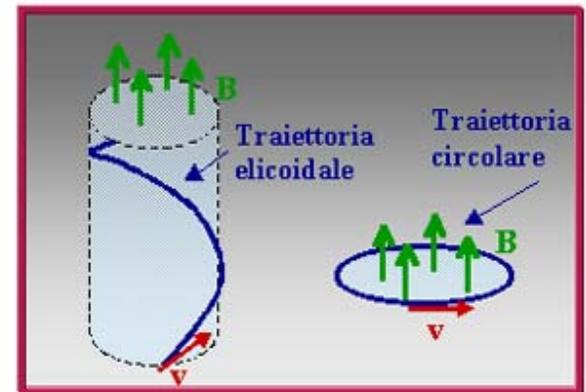
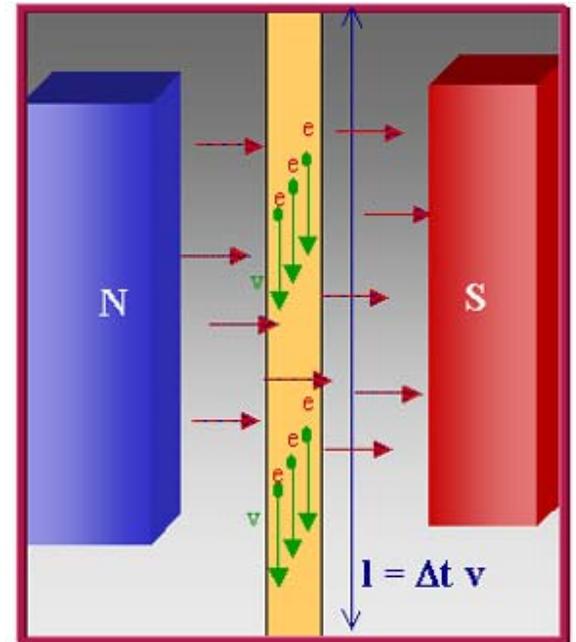
$$F = e\vec{v} \times \vec{B}$$

**FORZA DI LORENTZ: la forza che agisce su una particella è  $\perp$  al vettore velocità e al vettore induzione magnetica**

Una particella carica all'interno di un campo magnetico:

Se la velocità è perpendicolare al campo  $\Rightarrow$  traiettoria circolare

Se la velocità è obliqua rispetto al campo  $\Rightarrow$  traiettoria elicoidale



# Forza tra due fili percorsi da corrente

Consideriamo due fili paralleli percorsi dalle correnti  $I_1$  e  $I_2$  con lo stesso verso. Sia  $B_1$  il campo magnetico generato dal filo 1:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

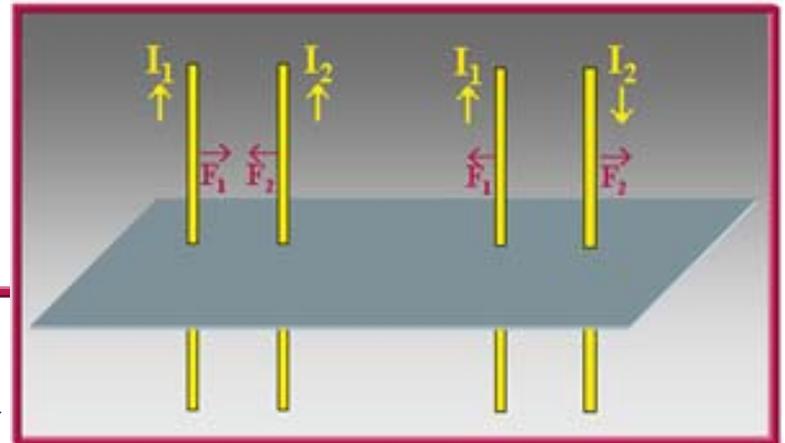
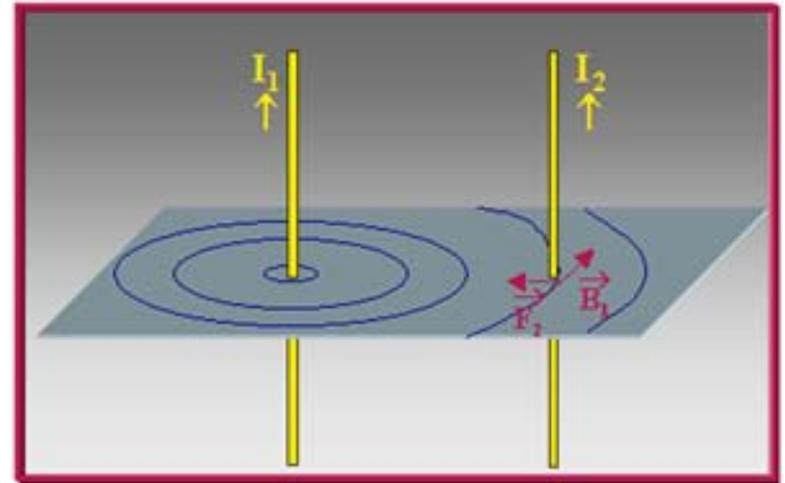
La forza che agisce su un tratto della lunghezza  $l$  del filo 2 risulta essere:

$$F = B_1 \cdot I_2 \cdot l = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$$

Analogamente si ricava la forza esercitata dal filo 2 sul filo 1 che sarà uguale e contraria.

Se le correnti hanno lo stesso verso la forza è attrattiva

Se le correnti hanno lo verso opposto la forza è repulsiva

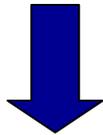


# L'induzione elettromagnetica

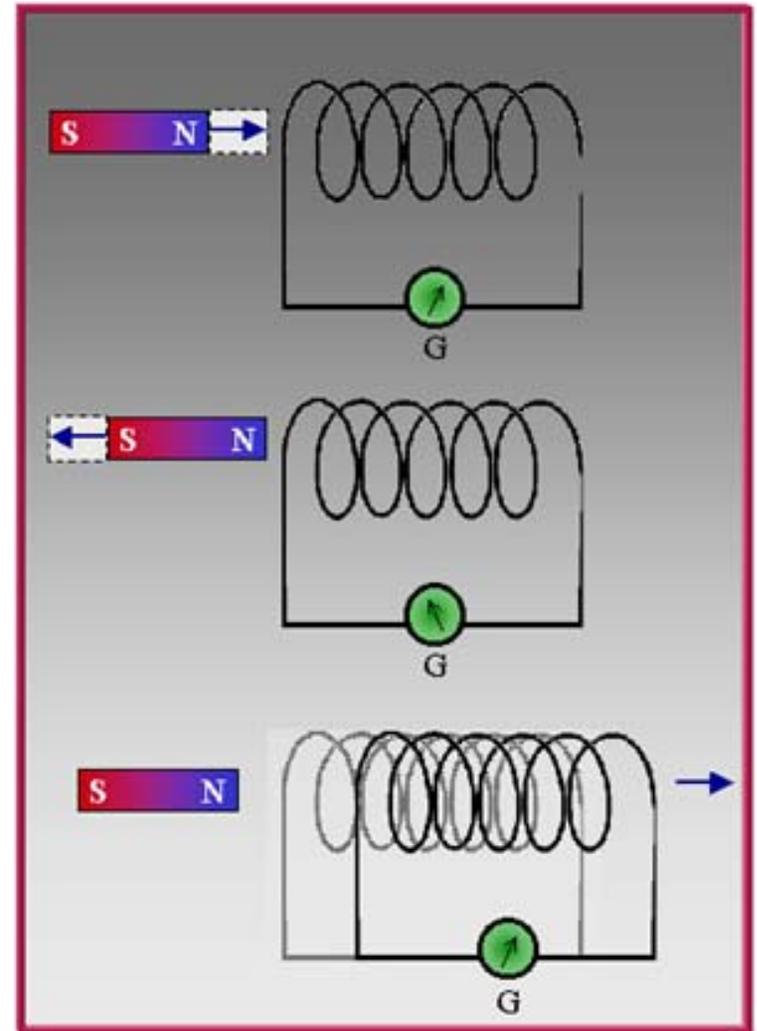
Poniamo un magnete nelle vicinanze di un circuito elettrico.

Se muoviamo il magnete il galvanometro inserito nel circuito elettrico registra un passaggio di corrente.

La stessa cosa si osserva se mantenendo fermo il magnete si muove il circuito nelle sue vicinanze.



**Ogni qualvolta sussiste un moto relativo tra circuito elettrico e magnete si genera nel circuito una CORRENTE INDOTTA**



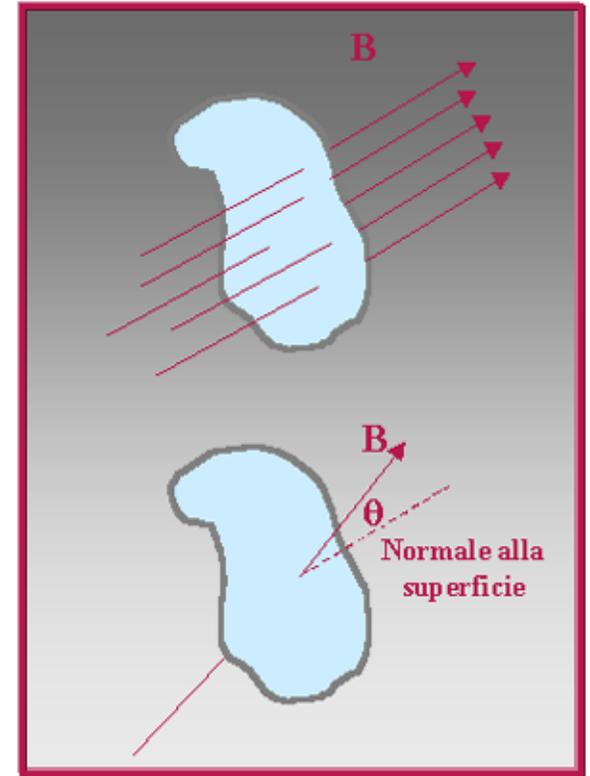
# Flusso magnetico e legge di Faraday

Il Flusso magnetico è legato al numero di linee di campo che attraversano una data area. In figura il campo magnetico è perpendicolare all'area delimitata da un semplice circuito costituito da una spira. In questo caso il flusso magnetico è definito come il prodotto del campo magnetico  $B$  per l'area  $A$  delimitata dal circuito. Nel caso più generale, quando  $B$  non è perpendicolare all'area, il flusso magnetico è definito come:

$$\Phi_m = B A \cos \vartheta$$

Gli esperimenti di Faraday hanno mostrato che:

$$U = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$



**LEGGE DI FARADAY:** ogni volta che il flusso del campo magnetico concatenato con un circuito varia nel tempo (per moto relativo o per variazione temporale del campo o ancora per entrambi i fattori) si ha la comparsa nel circuito di una tensione indotta data dall'opposto della variazione di tale flusso nel tempo

# Macchine elettriche: il generatore di corrente alternata

Consideriamo una spira di area  $A$  che ruota all'interno di un campo magnetico.

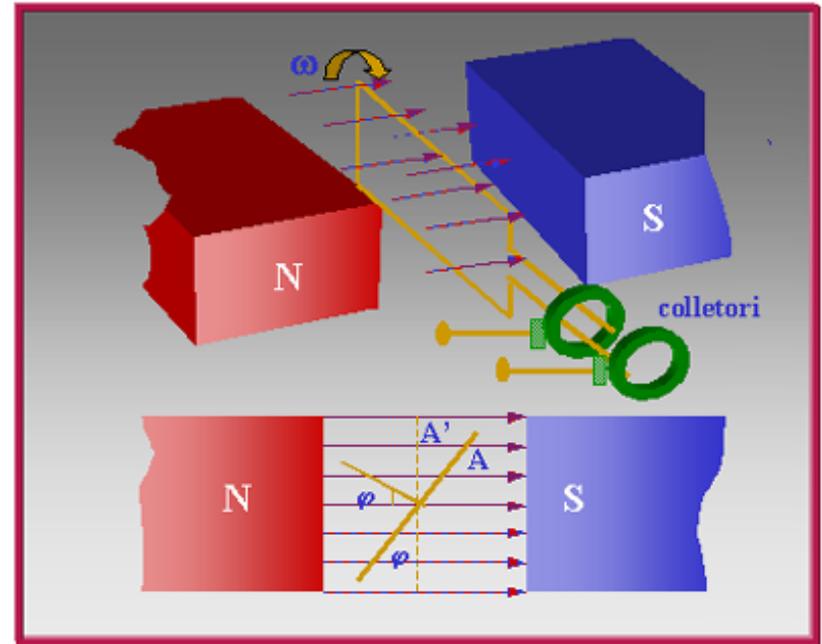
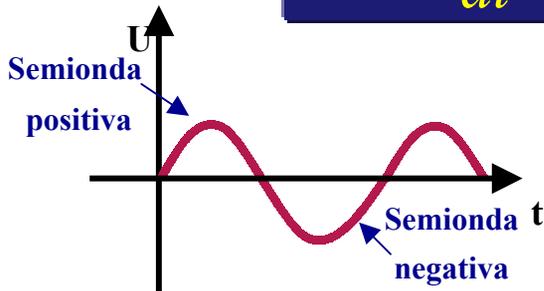
$\Phi_m = BA \cos \varphi$  Flusso di  $B$  attraverso la superficie  $A$

Ruotando la spira con velocità angolare  $\omega$ , l'angolo di rotazione sarà  $\varphi = \omega t$

$$\Phi_m(t) = BA \cos \omega t$$

La tensione indotta alle estremità della spira sarà:

$$U = \frac{d\Phi_m(t)}{dt} = BA\omega \sin \omega t$$



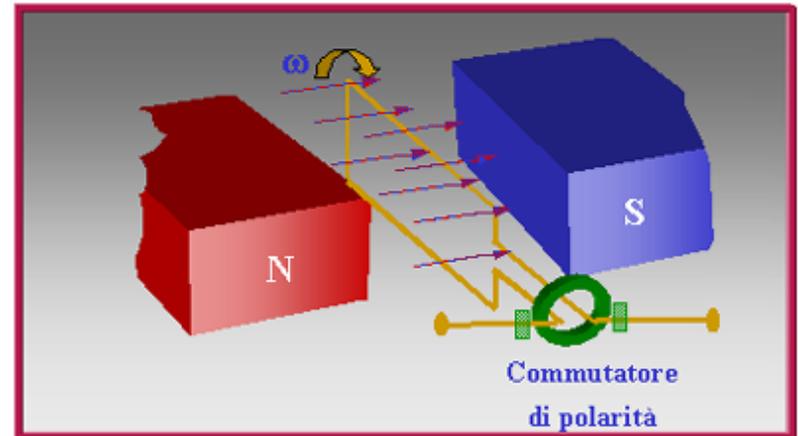
Per prelevare la tensione si utilizzano degli anelli collettori collegati ciascuno ad un'estremità della spira. Su questo anello rotante striscia una spazzola che permette un buon contatto con poco attrito sugli anelli

# Macchine elettriche: il generatore di corrente continua

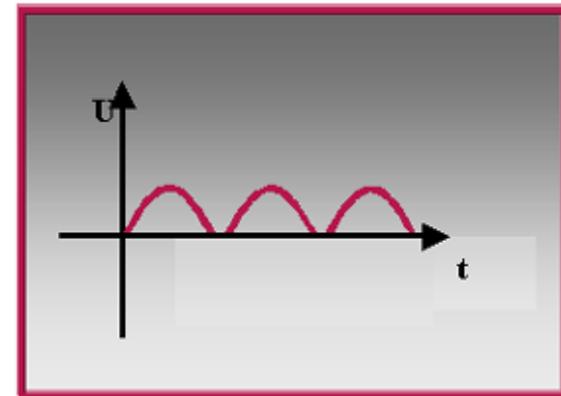
Per produrre corrente continua si utilizzano dei particolari tipi di anelli collettori detti commutatori di polarità.

Fintanto che la tensione alternata ha una semionda positiva a livello dei collegamenti con le spazzole, la tensione sarà naturalmente positiva, nel momento in cui ha inizio la semionda negativa si invertono i collegamenti dei fili delle spazzole.

E' vero che sugli anelli si ha la semionda negativa ma, poichè sono stati invertiti i collegamenti, nei fili di collegamento viene prelevata la semionda negativa invertita. Questo continuo cambiamento viene effettuato dal commutatore di polarità.



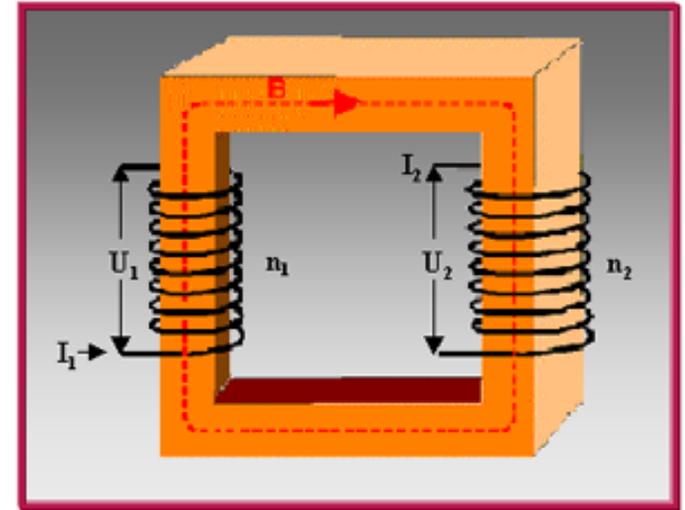
In questo modo si ottiene la cosiddetta **tensione continua pulsata**



# Macchine elettriche: il trasformatore

Il trasformatore è un dispositivo per variare la tensione e la corrente alternata senza apprezzabili perdite di potenza. Il suo funzionamento è basato sul fatto che una corrente alternata in un circuito induce una tensione indotta alternata in un circuito vicino. Esso è composto da un avvolgimento primario, un avvolgimento secondario ed un nucleo di ferro.

Il nucleo di ferro ha la funzione di aumentare il campo magnetico per una corrente data e di guidarlo, in modo che quasi tutto il flusso magnetico che passa attraverso una bobina passi anche attraverso l'altra. Il primario viene alimentato con una corrente alternata di tensione  $U_1$  e viene quindi attraversato dalla corrente  $I_1$ . Poiché è una tensione variabile nel tempo, anche la corrente e il flusso magnetico lo sono. Questo flusso variabile induce nel secondario una tensione alternata  $U_2$



$$U_2 = -n_2 \frac{\Delta \Phi_{spira}}{\Delta t}$$

Si può dimostrare che il numero di avvolgimenti dei due circuiti e le tensioni ai loro capi stanno nel rapporto

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

# Raddrizzatore di tensione: il diodo

E' possibile ottenere tensione continua raddrizzando una tensione alternata per mezzo dei diodi. I diodi sono delle valvole direzionali per la corrente elettrica, nel senso che la corrente puo' puo' passare solo in una direzione.

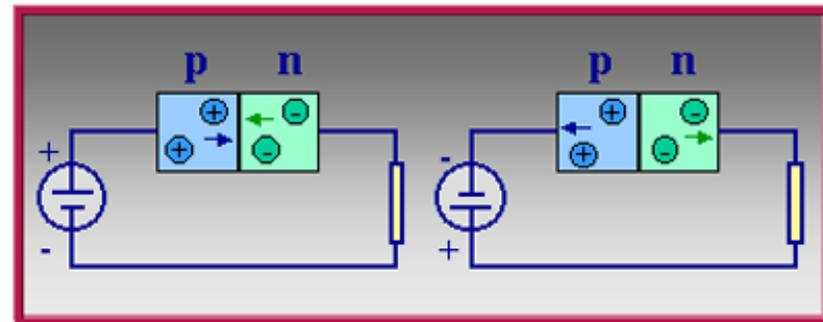
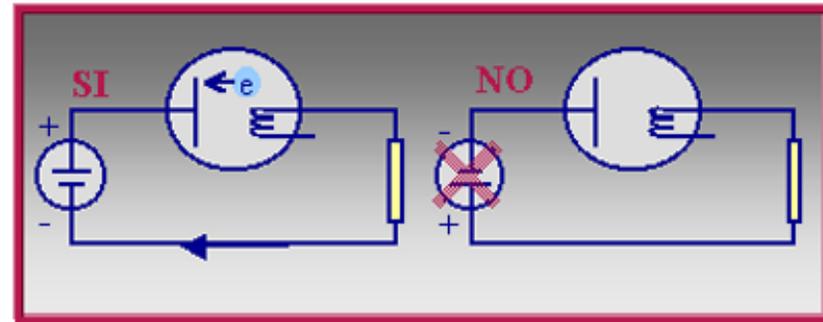
Esistono sostanzialmente due tipi di diodi:



La corrente puo' scorrere solo se gli elettroni emessi dal catodo vengono attirati dall'anodo, cioe' il catodo e' negativo e l'anodo positivo.

## DIODI SEMICONDUTTORI

E' formato da 2 semiconduttori uno di tipo  $p$  (in cui i portatori di carica sono le lacune  $+$ ) e uno di tipo  $n$  ((in cui i portatori di carica sono gli elettroni  $-$ ). Se il conduttore  $p$  e' collegato al polo positivo e il conduttore  $n$  al polo negativo, le cariche si spostano una verso l'altra e attraverso il diodo a luogo un flusso di corrente. In caso contrario non si ha passaggio di corrente

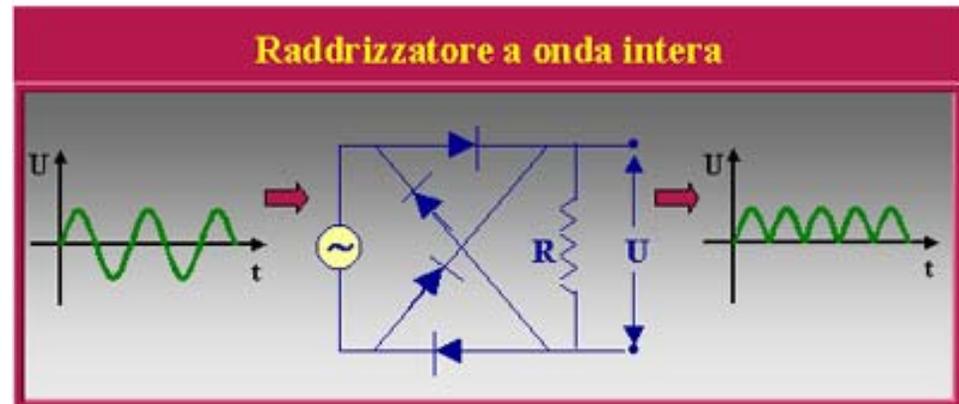
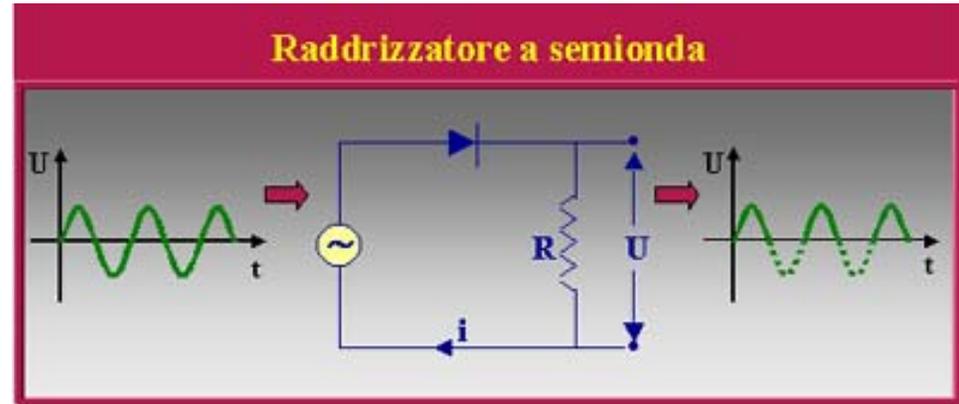


# Applicazioni dei diodi

La piu' semplice applicazione dei diodi è quella di **raddrizzatore a semionda**.

Il passaggio della corrente è permesso solo in direzione della freccia. In questo modo reso possibile solo il passaggio della semionda positiva della corrente alternata e si ottiene quindi una tensione continua pulsante. In corrispondenza della semionda negativa, nella resistenza di impiego la tensione è nulla.

Utilizzando quattro diodi è possibile pero' "invertire" la semionda negativa (**raddrizzatore di onda intera**).



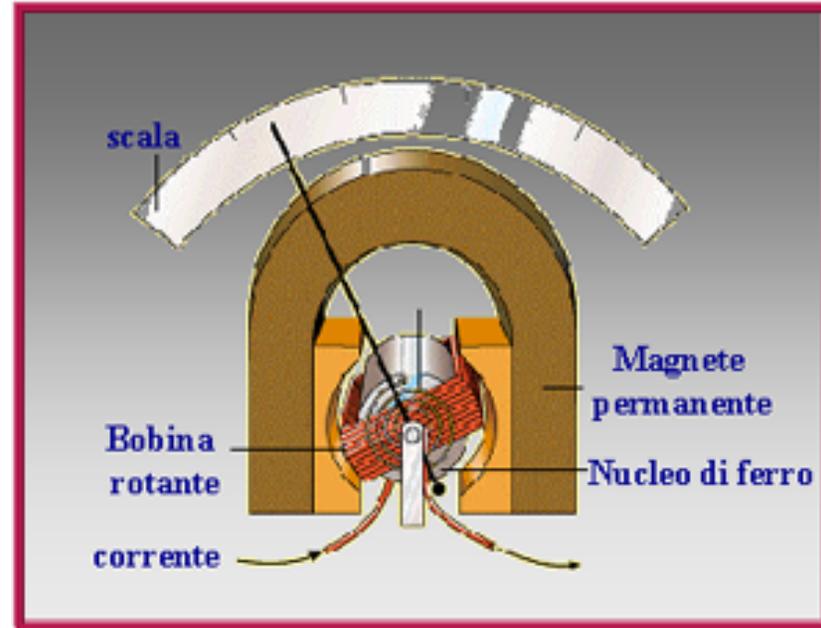
# Strumenti elettrici di misura

Questi strumenti misurano in particolare grandezze come la tensione, l'intensità di corrente e la resistenza.

Il principio di funzionamento è basato sul fatto che su un conduttore percorso da corrente e immerso in un campo magnetico agisce una forza.

Sono costituiti da una bobina di filo conduttore libera di ruotare su se stessa posta all'interno di un campo magnetico prodotto da un magnete permanente, da una molla, da un indice e da una scala.

Sul conduttore percorso da corrente per effetto del campo magnetico si formano sui fili diametralmente opposti delle forze uguali e contrarie che producono una coppia. A seconda dell'intensità della coppia di forze la molla subisce una torsione più o meno grande che porta l'indice ad indicare un dato valore sulla scala.



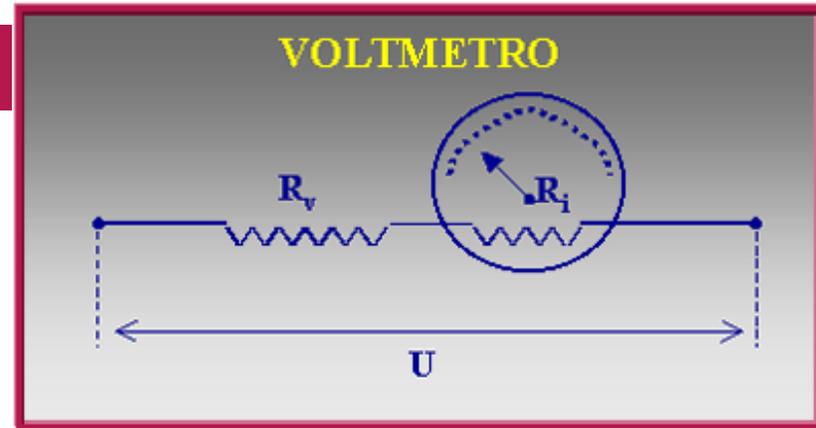
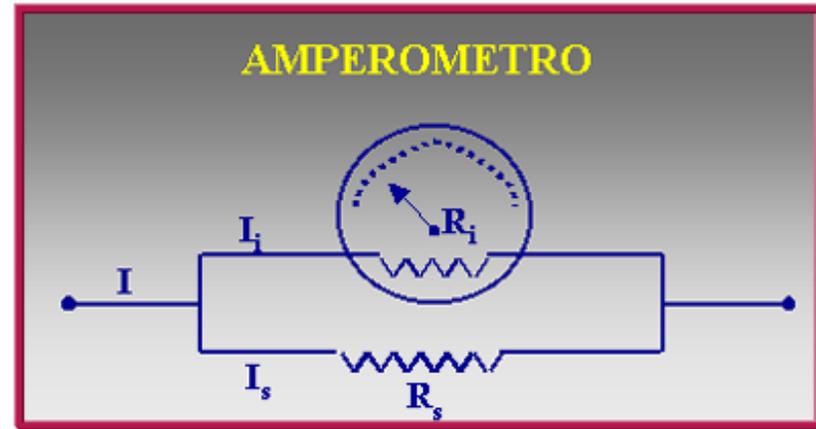
# Amperometro e voltmetro

L'apparecchio a bobina mobile a seconda della sua disposizione nel circuito elettronico può funzionare come:

Se inseriamo lo strumento a bobina mobile come riportato in figura, la torsione che subisce la molla è direttamente proporzionale alla corrente che circola nella bobina. La resistenza di shunt  $R_s$ , viene inserita per ampliare il campo di misura ad intensità via via maggiori.

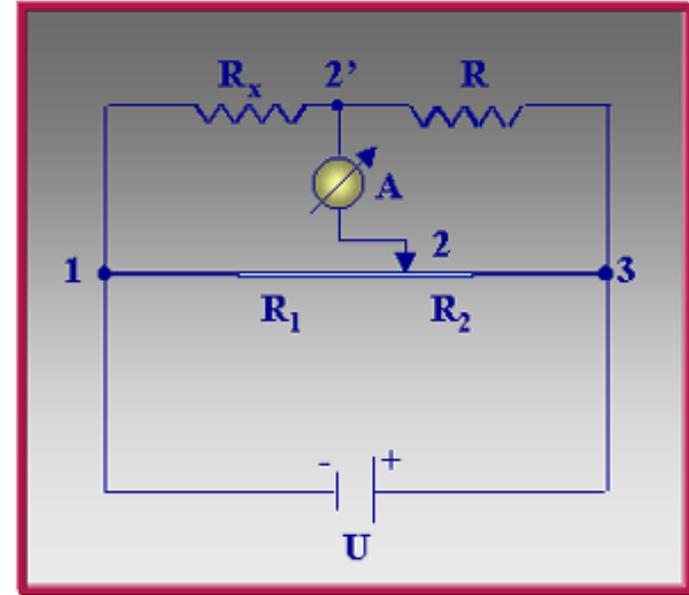
## VOLTMETRO: misura della differenza di potenziale

Se si collega lo strumento ad una tensione  $U$  attraverso una resistenza in serie  $R_v$ , la corrente che vi circola, in base alla legge di Ohm è  $I=U/(R_i + R_v)$ ; essa è proporzionale alla tensione. Tarando opportunamente lo strumento quindi è possibile misurare differenze di potenziale



# Misure di resistenza

La misura della resistenza puo' essere fatta in linea di principio avendo a disposizione un amperometro e un voltmetro. In questo modo pero' la misura risulta essere soggetta a errori ed è quindi preferibile utilizzare un **circuito a ponte**. Consideriamo un generatore di corrente continua che alimenta un circuito che comprende: una resistenza con un contatto strisciante, la resistenza incognita  $R_x$  e la resistenza  $R$  nota. Fra il collegamento di  $R_x$  ed  $R$  (punto 2')



potenziometro è inserito un amperometro. Il contatto strisciante viene regolato fino ad azzerare la corrente portando la d.d.p tra 2 e 2' a zero. In questa condizione:  $\Delta U_{1-2} = U[R_1/(R_1+R_2)]$  e  $\Delta U_{1-2'} = U[R_x/(R_x+R)]$ . Se  $\Delta U_{1-2} = \Delta U_{1-2'}$ , significa che la  $\Delta U_{2-2'} = 0$ , perciò la condizione di assenza di corrente dello strumento è data da:

$$U \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U \frac{R_x}{R_x + R}$$



$$R_x : R = R_1 : R_2$$

Conoscendo  $R$  e il rapporto tra  $R_1$  ed  $R_2$  si ricava  $R_x$

# Effetti della corrente elettrica sugli esseri viventi -1

Gli effetti negativi della corrente elettrica sul corpo umano possono riassumersi in:  
interferenza con i segnali elettrobiologici delle fibre nervose e muscolari:

**tetanizzazione**

contrazione spasmodica dei muscoli

**alterazioni della funzione respiratoria**

lesioni degli organi di senso (vertigini, etc.)

**lesioni neurologiche del midollo spinale**

paralisi temporanee, etc

**fibrillazione**

contrazione scoordinata del muscolo cardiaco

**ustioni**

sviluppo di calore per effetto Joule

**traumi per urti e cadute conseguenti all'elettrocuzione**

I parametri che determinano la gravità degli effetti sono:

**l'intensità della corrente**

**il percorso della corrente nel corpo umano**

**la frequenza della corrente**

**la durata del contatto**

# Effetti della corrente elettrica sugli esseri viventi -2

A parità di tensione applicata, l'intensità di corrente dipende dal percorso e dalla resistenza di contatto. I percorsi più pericolosi sono quelli che interessano direttamente la regione cardiaca o la regione cerebrale (ad es. da una mano al piede opposto). La durata prolungata favorisce l'effetto della fibrillazione cardiaca, con conseguente arresto circolatorio.

Gli effetti più dannosi si hanno nell'intervallo di frequenze tra 10 e 1000 Hz, per le quali la successione di impulsi elettrici provoca la contrazione prolungata dei muscoli (tetanizzazione). A parità di condizioni oggettive, gli effetti dipendono dal singolo soggetto (età, sesso, condizioni di salute, condizioni psicologiche); si può quindi riferirsi solo a valori medi.

In relazione agli effetti dell'intensità della corrente, si definiscono:

- **corrente di soglia** = valore minimo percepito
- **corrente di rilascio** = massima corrente che consente di interrompere il contatto

**Valori tipici medi delle correnti di soglia e di rilascio e della corrente che provoca fibrillazione cardiaca**

<b>c.c.</b>	<b>c.a. 50 Hz</b>
<b>Corrente di soglia (sulle mani)</b>	
<b>5.2 mA</b>	<b>1.1 mA</b>
<b>Corrente di rilascio: uomo</b>	
<b>76 mA</b>	<b>16 mA</b>
<b>Corrente di rilascio: donna</b>	
<b>51 mA</b>	<b>10 mA</b>
<b>Fibrillazione cardiaca</b>	
<b>100 - 300 mA</b>	