

# CENNI DI ELETTROTECNICA

Principi Generali



# COS'E' L'ELETTROTECNICA?

L'Elettrotecnica ha per oggetto l'analisi dei fenomeni di natura elettrica e magnetica e delle possibili applicazioni pratiche degli effetti prodotti da cariche elettriche ferme o in movimento.

In effetti è l'applicazione pratica dei fenomeni elettromagnetici che sono alla base di una grande quantità di attività:

- conversione elettromeccanica dell'energia
- Trasmissione dell'energia in AT/MT/BT
- comunicazione in fibra ottica
- dispositivi a micro-onde
- ricezione televisiva
- comunicazione via satellite
- radar
- oscilloscopi
- Etc

I grandi capitoli nei quali si suddivide lo studio dell'Elettrotecnica partono da quello relativo alla Produzione dell'energia elettrica, passano per quello relativo al suo Trasporto e Distribuzione, concludendosi con l'Utilizzazione dell'energia stessa nei più svariati campi d'impiego senza tralasciare tutto il campo dell'illuminotecnica e della trazione elettrica.

Equazioni di Maxwell



$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_o \left( \mathbf{J} + \varepsilon_o \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_{lib} / \varepsilon_o$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

DAI CAMPI...

...AI CIRCUITI

Fenomeni



Leggi di Maxwell



Applicazioni

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_{lib} / \epsilon_o$$

La prima equazione descrive il campo elettrico generato da cariche elettriche ferme secondo la legge di Coulomb.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

La seconda descrive il campo magnetico ; in particolare specifica che diversamente da quanto accade con le cariche elettriche non esistono cariche magnetiche isolate e pertanto il polo nord di una calamita è sempre legato al suo polo sud.

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

La terza esprime la legge dell' induzione elettromagnetica secondo cui un campo magnetico variabile nel tempo produce un corrente elettrica.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_o \left( \mathbf{J} + \epsilon_o \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

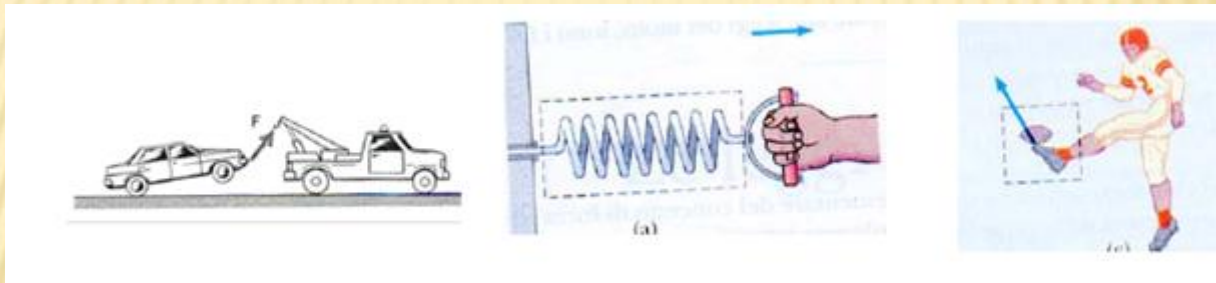
La quarta afferma che il campo magnetico viene generato sia da una corrente continua sia da un campo elettrico variabile nel tempo.

# INTRODUZIONE

Il termine o meglio il concetto di “**Forza**” riveste un ruolo basilare in fisica. Nel senso comune indica una **trazione** o una **spinta**.

Da un punto di vista matematico la forza può essere rappresentata da un vettore in quanto una trazione o una spinta ha sempre :

- una intensità ( il modulo)
- una direzione
- un verso



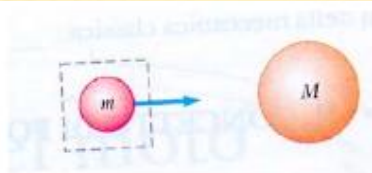
Le forze in genere agiscono tramite il contatto tra chi le esercita e chi ne subisce gli effetti cioè esprimono il risultato di un contatto fisico fra corpi; perciò sono denominate forze di contatto.

Infatti fino ai tempi di Newton si pensava che per poter originare una forza che agisse su un corpo fosse necessario un contatto.

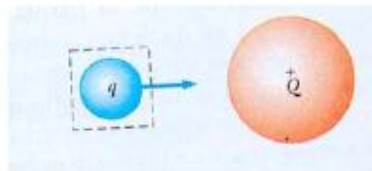
Tuttavia esistono anche forze a distanza cioè che agiscono senza contatto fisico anche attraverso lo spazio vuoto.

Ne sono esempi la forza di gravità, la forza elettrica, la forza magnetica che non si annullano neppure a grandi distanze.

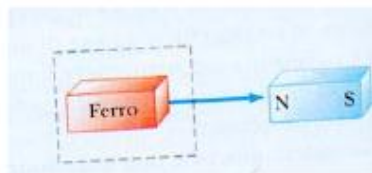
## Esempi di forze agenti a distanza



forza **gravitazionale**



forza **elettrica**



forza **magnetica**

La combinazione della forza elettrica e della forza magnetica dà luogo alla forza elettromagnetica. In effetti l'elettromagnetismo è quel complesso di fenomeni determinato dalle cariche elettriche ferme, dalle cariche elettriche in movimento e dalle calamite o magneti.

## Forze esistenti in natura

Si può dire che in natura esistono **6 forze fondamentali** con cui è possibile descrivere tutti i fenomeni naturali noti:

- La forza gravitazionale : è responsabile di tutti i fenomeni astronomici. E' la forza che percepiamo nel modo più immediato [Legge di gravitazione universale ]

- La forza elettrica: è responsabile di tutti i fenomeni elettrici dovute alle cariche ferme [ Legge di Coulomb ]

- La forza magnetica : è responsabile dei fenomeni magnetici dovuti a magneti o cariche elettriche in movimento [ Legge di Lorentz ]

- La forza elettromagnetica : é responsabile dei fenomeni elettrici e magnetici [Equazioni di Maxwell ]. E' la combinazione della forza elettrica e magnetica.

- La forza nucleare forte : lega i mattoni elementari della materia, mantiene unite le particelle impedendo ai nuclei di disintegrarsi per repulsione fra protoni [ la forma esplicita completa è ancora ignota ]

- La forza nucleare debole : assicura produzione di luce e calore per fusione nucleare ; è responsabile dei decadimenti radioattivi [ la forma esplicita non è completamente nota]

La forza elettromagnetica può essere ritenuta una combinazione della forza elettrica e di quella magnetica ; pertanto **le forze fondamentali si riducono a quattro.**

Secondo la teoria di Newton i corpi possono interagire anche senza che tra di essi sia interposto un mezzo materiale che faccia da supporto alla propagazione della forza.

Così nacque l'ipotesi della azione a distanza da intendersi come una azione istantanea che un oggetto può esercitare su un altro pur non essendo a contatto.

In contrasto con l'ipotesi di interazione istantanea a distanza nell'ottocento ha cominciato a farsi strada il concetto di campo.

Secondo la moderna teoria dei campi, l'interazione non è intesa come un'azione istantanea, ma come un effetto che si propaga nello spazio modificandolo.

Il fatto che un corpo possa influenzare a distanza lo stato di moto o di quiete di un altro corpo porta a ritenere che la regione di spazio in cui i due corpi sono ubicati **si trovi in uno stato fisico particolare che chiamiamo campo.**

**Quindi un campo è una proprietà di una regione di spazio ossia uno stato fisico o una proprietà della materia che vi è contenuta.**

**In conclusione si definisce campo fisico uno stato fisico dello spazio o della materia che vi è contenuta; è un luogo perturbato che può essere descritto in funzione di alcune grandezze.**

## Dall'azione a distanza al concetto di campo

Il concetto di *campo* è un superamento del concetto di **azione a distanza** cioè della forza attrattiva (o repulsiva) tra corpi che non sono in contatto, ma che possono essere situati anche a grande distanza nello spazio.

Il concetto di azione a distanza non convinceva del tutto neppure Newton, secondo cui la proprietà delle masse di *attirarsi a distanza* aveva in sé qualcosa di *magico* e inspiegabile.

Per poter spiegare in modo più razionale questa azione nacque l'idea dell'*etere*, una sostanza impalpabile che avrebbe riempito *tutto lo spazio dell'Universo* fungendo da *intermediario* per le azioni a distanza.

## Dall'azione a distanza al concetto di campo

Il concetto di azione a distanza implica una **azione istantanea della forza**: se la distanza tra gli oggetti aumenta, la forza tra di essi diminuisce immediatamente.

Oggi sappiamo che **nessuna informazione può trasferirsi istantaneamente**, cioè a *velocità infinita*. Se il Sole scomparisse in questo preciso istante, sulla Terra lo potremmo percepire solo tra 8 minuti circa (il tempo che impiega la luce a percorrere la distanza Sole-Terra).

Mentre un'azione a distanza è una *interazione tra corpi* che richiede la *presenza di 2 corpi*, una **grandezza di campo** (elettrico, gravitazionale, magnetico, campo di pressione o temperatura, velocità del vento...) è una grandezza che dipende dallo spazio fisico: è una *modificazione dello spazio* determinata da certe condizioni

**Per descrivere un campo fisico può essere opportuno usare una funzione scalare o vettoriale: si parla rispettivamente di *campo scalare* e di *campo vettoriale*. Questo indica che, accanto alla definizione di campo fisico, occorre dare la definizione di *campo matematico*.**

Il campo matematico si dice scalare quando nella regione di spazio, in cui ha sede il campo, ad ogni punto di questa regione si può associare un numero reale o complesso

Campo fisico

Modello  
Matematico

Campo matematico

Il campo matematico si dice vettoriale quando nella regione di spazio, in cui ha sede il campo, ad ogni punto di questa regione si può associare un vettore cioè un ente che oltre ad essere associato ad un numero è associato ad una direzione ed a un verso. Il vettore può variare in modulo direzione e verso in ogni punto

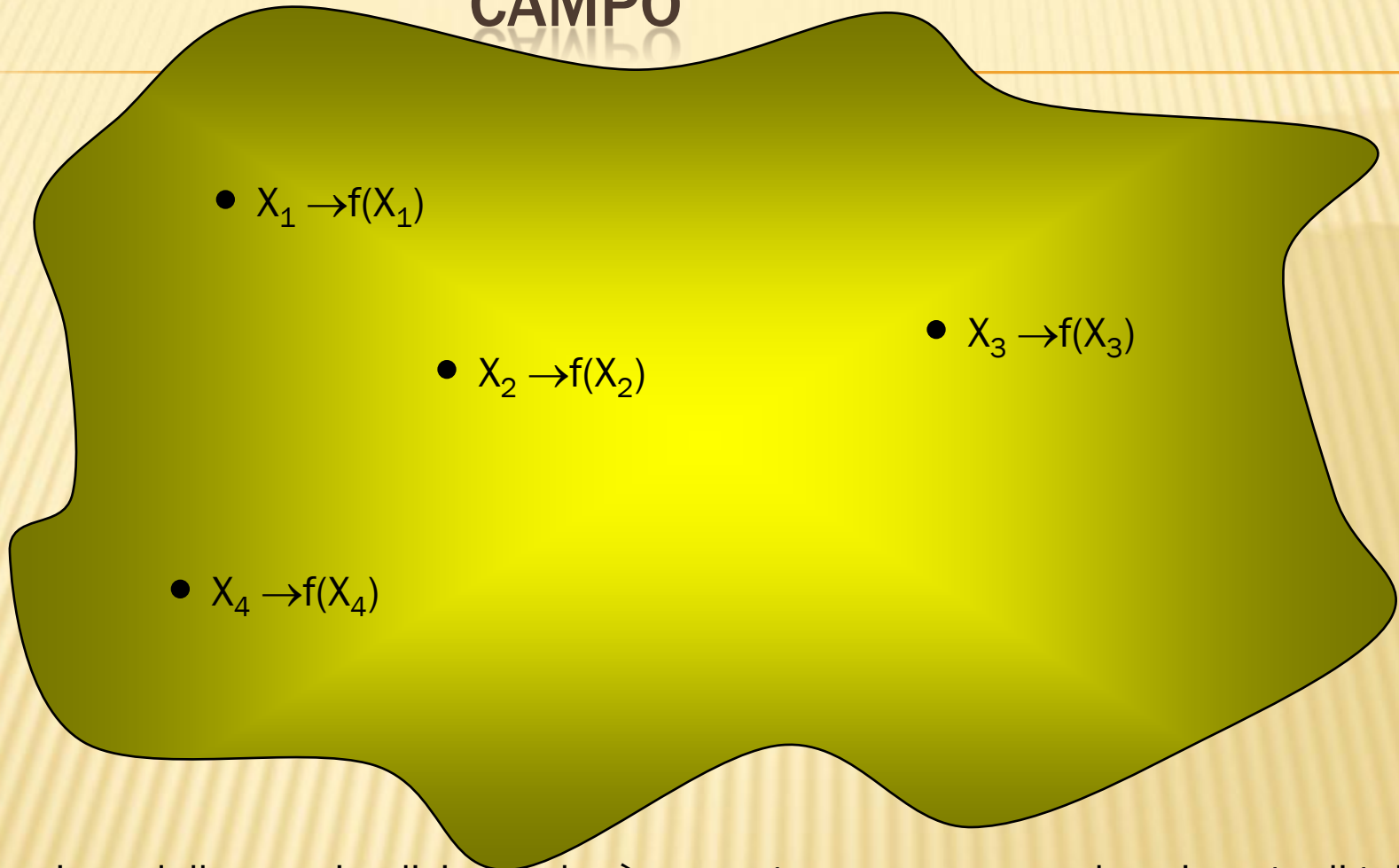
Funzione  
Scalare  
 $f = f(P,t)$

**Il campo è una realtà fisica che può essere descritta da un modello matematico. Il modello matematico può essere una funzione scalare o una funzione vettoriale**

Funzione  
Vettoriale  
 $\underline{v} = \underline{v}(P,t)$

Si chiama **campo fisico** uno stato fisico dello spazio o della materia che vi è contenuta

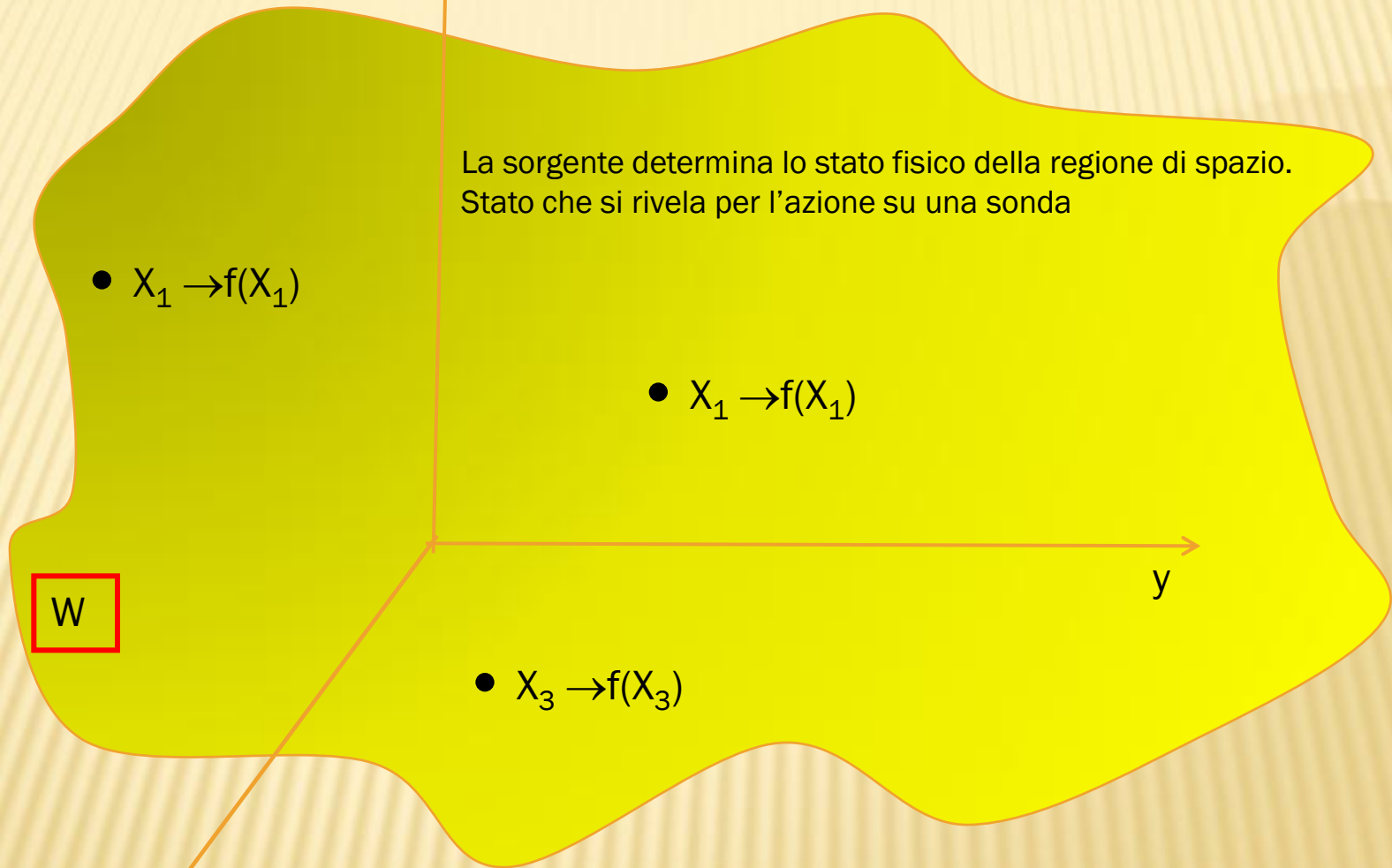
## CAMPO



In una regione dello spazio diciamo che è presente un campo se ad ogni punto di tale regione è associato il valore una grandezza fisica funzione della posizione.

Esempio: **Campo di Temperature**

z ↑ W : Regione dello spazio in cui ha sede il campo

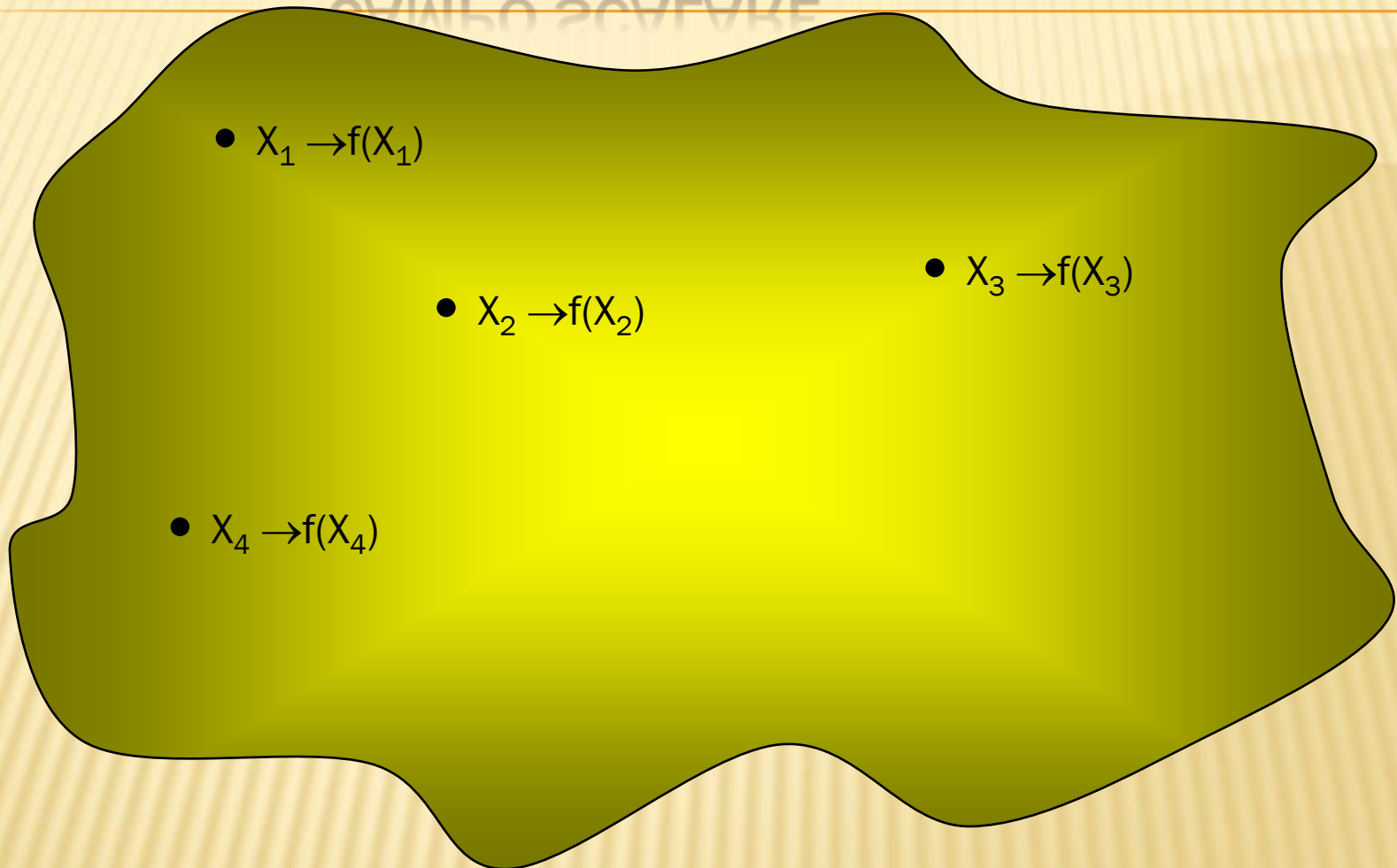


Si vede dunque <sup>X</sup> che un campo, **generato da una sorgente**, è uno stato fisico dello spazio o della materia in esso contenuta, che si rivela per l'azione **che esercita su una sonda**. A questo punto, visto che un campo ha delle sorgenti e si rivela tramite delle sonde, possiamo dare la definizione di *campo fisico*.

Si chiama **campo fisico** uno stato fisico dello spazio o della materia che vi è contenuta

Si chiama **campo fisico** uno stato fisico dello spazio o della materia che vi è contenuta

## CAMPO SCALARE



In una regione dello spazio diciamo che è presente un campo se in tale regione è definita una grandezza fisica scalare funzione della posizione.  
Esempio: **Campo di Temperature**

## Campo scalare

Ricordiamo che una grandezza fisica è definita *scalare* quando è individuata da un numero, un segno e una unità di misura.

Il termine scalare indica che i valori di una stessa grandezza possono essere messi in scala. Così la temperatura di 78°C è maggiore della temperatura di 12°C.

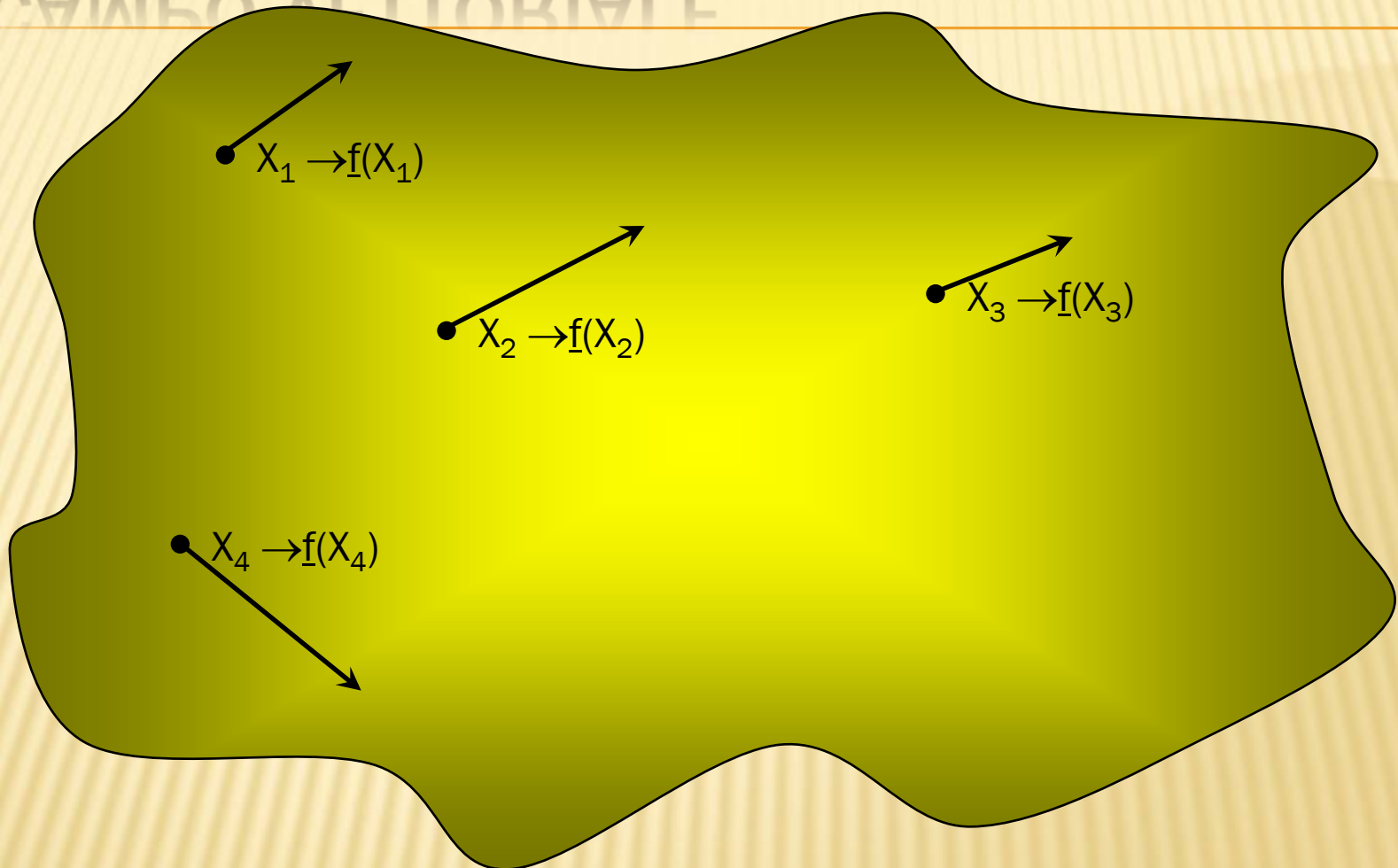
Indichiamo con  $T$  un intervallo di tempo e con  $\Omega$  una regione dello spazio fisico, con  $t$  un generico istante dell'intervallo  $T$  e con  $P$  un generico punto della regione  $W$ .

Si ha la seguente definizione :

**In un intervallo di tempo  $T$  e in una regione  $W$  dello spazio fisico è definito un campo scalare se a ogni istante  $t \in T$  e a ogni punto  $P \in \Omega$  è associata una grandezza scalare**

$$\Phi = f(t, P).$$

# CAMPO VETTORIALE



Se la grandezza fisica che definisce il campo è vettoriale, il campo è detto vettoriale.

Esempio: **Campo di Velocità**

## Campo vettoriale

Una grandezza fisica si dice *vettoriale* quando è individuata da una unità di misura, una direzione orientata e un numero. Tali sono lo spostamento, la velocità, la forza, la quantità di moto, il vettore campo elettrico, il vettore densità di flusso magnetico. Le grandezze vettoriali non possono essere messe in scala perché una forza orizzontale di 78 N può produrre un effetto minore di una forza verticale di 12 N, pur avendo modulo maggiore. Nelle grandezze vettoriali la direzione conta come e forse più del modulo.

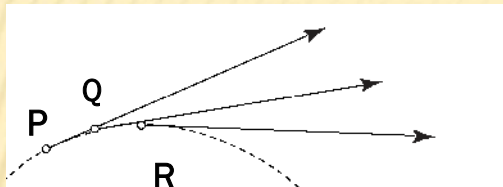
### DEFINIZIONE

In un intervallo di tempo  $T$  e in una regione  $W$  dello spazio fisico è definito un campo vettoriale se ad ogni istante  $t \in T$  e ad ogni punto  $P \in W$  è associata una grandezza vettoriale  $\underline{W} = \underline{V}(t, P)$  detta *vettore di campo*.

### Linee di campo.

Come un campo scalare bidimensionale ha le linee di livello e un campo scalare tridimensionale e ha le superfici di livello, cosa è un campo vettoriale ha **le linee di campo**, dette anche **linee di flusso**.

Consideriamo il vettore  $\underline{v}(t, P)$  a un istante  $t \in T$  e in un generico punto  $P \in W$ . Immaginando di congelare il campo all'istante  $t$ , consideriamo un altro punto  $Q$  posto sulla retta d'azione di  $\underline{v}(t, P)$  a distanza infinitesima e nel verso di  $\underline{v}(t, P)$ . Sia  $\underline{v}(t, Q)$  il vettore del campo in  $Q$ .



$\underline{v}(t,P)$   
 $\underline{v}(t,Q)$   
 $\underline{v}(t,R)$

Consideriamo successivamente un punto  $R$  sulla retta d'azione del vettore  $\underline{v}(t, Q)$  a distanza infinitesima da  $Q$ . Procedendo in questo modo la successione dei punti  $P, Q, R$ , **individua una linea.**

Essa è in ogni suo punto tangente al vettore relativo a quel punto. Tale linea è l'involuppo dei vettori del campo e **prende il nome di linea di campo.**

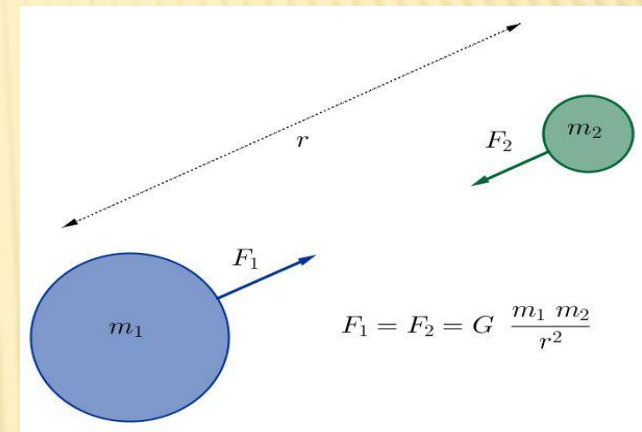
Nel caso in cui il vettore sia una forza parliamo di **linea di forza**; se il vettore è una densità corrente di carica o di massa o di energia, parliamo di **linea di forza**; se il vettore è una densità corrente di carica o di massa o di energia, parliamo di **linea di flusso**.

# Forza di gravità e campo gravitazionale

La forza di gravità è una forza nota sin dall'antichità.

La legge formulata da Newton afferma quanto segue:

**Due corpi dotati di massa si attraggono con una forza che è direttamente proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa.**



La direzione della forza risulta quindi essere la retta che congiunge i due punti materiali; il verso quello che da un corpo punta verso l'altro; il modulo è definito da

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

in cui compaiono due masse  $m_1$  e  $m_2$ , la distanza tra i due punti materiali  $r$ , e la costante di proporzionalità  $G$ .

Questa costante è estremamente importante ed è nota come **costante di gravitazione universale**.

Nel Sistema Internazionale, il suo valore è pari a circa  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

# Campo Gravitazionale

Ogni corpo dotato di *massa* genera nello spazio ad esso circostante un campo *gravitazionale*. La sua presenza viene rilevata utilizzando un corpo di prova di massa  $m$ : dopo aver posto quest'ultimo in un punto dello spazio, misuriamo intensità, direzione e verso della forza  $F$  agente su di esso.

Definiamo campo gravitazionale nel punto considerato la forza agente sull'unità di massa posta in quel punto. cioè

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

L'unità di misura (SI) del campo gravitazionale è: N/kg, ovvero:  $m/s^2$ , che è *un'accelerazione*. Osserviamo che il campo gravitazionale non dipende dal valore della massa del corpo di prova: se ad esempio, se ne usasse uno di massa doppia, raddoppierebbe anche la forza e il campo avrebbe ancora lo stesso valore. Il campo gravitazionale generato da una massa puntiforme  $M$ , in un punto a distanza  $r$  da questa, si ottiene sostituendo nella definizione precedente l'espressione della forza data dalla *legge di gravitazione universale* di Newton. L'intensità del campo è data da:

# Forza di gravità e campo gravitazionale

**Esempio:** Calcolare l'intensità della forza di gravità che agisce tra due alunni di massa 70 kg e 65 kg distanti 2,5 m l'uno dall'altro.

Sostituiamo direttamente nella formula e otteniamo:

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (70 \cdot 65) / 2,5^2 = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

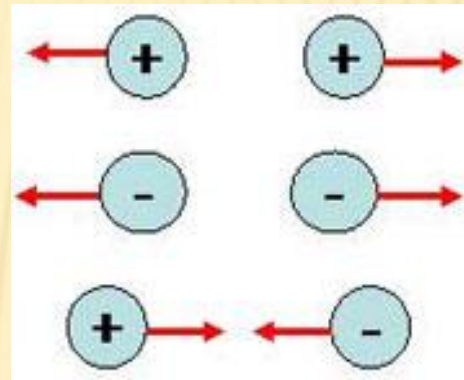
Invece il peso dei due alunni, supponendo che siano sulla superficie terrestre, è pari a  $60 \cdot 9,8 = 588 = 5,88 \cdot 10^2 \text{ N}$  e  $75 \cdot 9,8 = 735 = 7,35 \cdot 10^2 \text{ N}$  rispettivamente.

Osservando la differenza tra l'ordine di grandezza del peso e quello della forza gravitazionale (ben dieci ordini!), non ci si stupisce che i due alunni rimangano dove sono e non volino l'uno contro l'altro.

Tutt'altro discorso invece sarebbe trattare il medesimo problema ma nel vuoto: in assenza di un'accelerazione  $\vec{g}$ , i due alunni inizierebbero a muoversi lungo la retta che li congiunge, seppur molto lentamente.

# Forza elettrica e campo elettrico

Nel 1784 l'ingegnere francese Charles Augustin Coulomb (1736-1806), ispirandosi alla legge di gravitazione universale di Newton, determinò sperimentalmente la legge che regola *l'attrazione e la repulsione* tra due cariche elettriche. Tali forze osservate da Coulomb danno luogo **alla forze elettriche**.



## Legge di Coulomb

Due cariche puntiformi  $Q$  e  $q$ , poste a distanza  $d$ , si attirano o si respingono con una forza di intensità direttamente proporzionale alle cariche ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza. La forza è attrattiva se le cariche hanno segno opposto, repulsiva se le cariche hanno segno concorde.

Le forze di attrazione e di repulsione osservate da Coulomb danno luogo alle forze elettriche determinate qualitativamente e quantitativamente dalla Legge di Coulomb che trova la sua espressione matematica in una formula del tipo:

$$F = K \frac{Q_1 q_2}{d^2}$$

Il valore numerico della costante di proporzionalità K (costante di Coulomb) dipende dalle unità di misura adottate per la forza, per la distanza e per le cariche.

E' importante osservare, che in ogni caso la costante K dipende anche dalla natura del mezzo fisico che circonda e separa le due cariche elettriche.

Per quanto riguarda la misura delle quantità di elettricità Q, essendo in pratica molto scomoda esprimersi per mezzo del numero, sempre straordinariamente grande, delle cariche elementari che partecipano ai fenomeni di elettrizzazione, si preferisce adottare come unità di misura non già la carica elementare, ma una quantità multipla di essa che viene denominata coulomb (C).

## Differenze ed Analogie tra Forza gravitazionale e Forza Elettrica

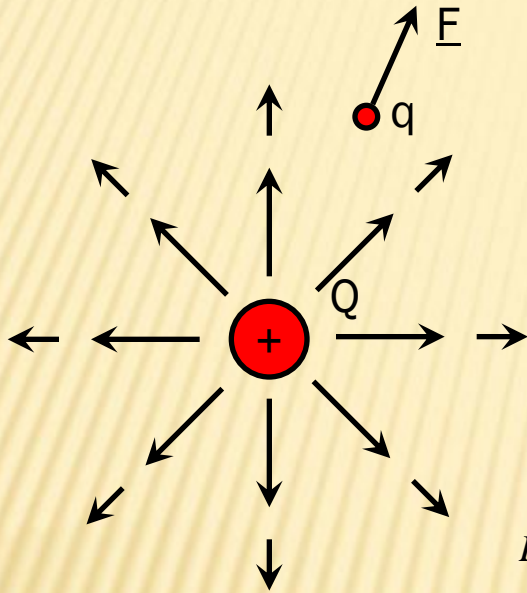
Mettiamo in relazione la legge di Coulomb con quella di Newton per individuarne analogie e differenze.

A causa della grande differenza tra gli ordini di grandezza delle costanti, la forza elettrica è *enormemente più intensa* di quella gravitazionale

Perciò nei fenomeni in cui interviene la forza elettrica, quella gravitazionale può essere spesso trascurata.

Legge di Newton	Legge di Coulomb
$F = G M m / d^2$	$F = k  Q   q  / d^2$
La forza gravitazionale è inversamente proporzionale al quadrato della distanza d	La forza elettrica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza d
La forza gravitazionale è proporzionale al prodotto M m delle masse	La forza elettrica è proporzionale al prodotto Q q delle cariche
Esiste un solo tipo di massa	Esistono due tipi di cariche: quelle positive e quelle negative
La forza gravitazionale è sempre attrattiva	La forza elettrica può essere attrattiva o repulsiva
G è una costante universale	k è una costante che dipende dal mezzo in cui si trovano le cariche. E' massima nel vuoto.
Il valore numerico di G è molto piccolo ( $6,67 \cdot 10^{-11}$ in unità SI)	Il valore numerico di k è molto grande ( $9 \cdot 10^9$ nel vuoto, in unità SI)
Se i due corpi sono <i>sferici</i> , la forza gravitazionale si determina <i>come se</i> la massa fosse concentrata nel centro di massa dei corpi.	Se i due corpi carichi sono <i>sferici</i> , la forza elettrica si determina <i>come se</i> la carica fosse concentrata nel centro di massa dei corpi.

# CAMPO ELETTRICO : GRANDEZZE FONDAMENTALI

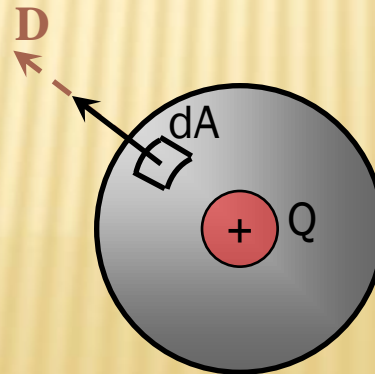
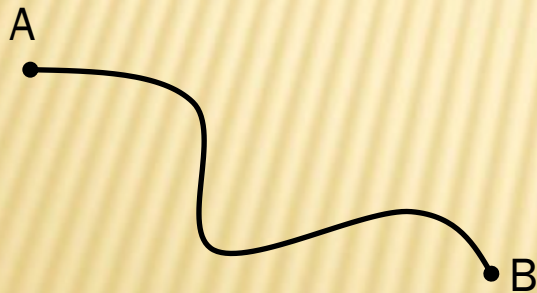


$$\mathbf{F} = k \frac{Q \cdot q}{r^2} \vec{\mathbf{r}} \quad \text{Legge di Coulomb}$$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} = k \frac{Q}{r^2} \vec{\mathbf{r}} \quad \text{Campo Elettrico}$$

$$dL = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{Lavoro Elementare}$$

$$\int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = V(B) - V(A) \quad \text{Differenza di potenziale}$$



$$Q = \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$$

$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$  = Densità di Flusso Elettrico

• Nell'elettromagnetismo la materia è caratterizzata dalla carica Elettrica che rappresenta uno stato fisico della materia.

• La carica elettrica può essere sia positiva che negativa (+ o -)

• Le cariche elettriche sono multiple delle cariche elementari:

carica del protone ( $q^+$  positiva)

carica dell'elettrone ( $q^-$  negativa)

Il Coulomb [C] è l'unità di carica elettrica considerata nel SI:

• carica elementare  $\rightarrow 1.6021 \cdot 10^{-19} C$

La condizione di carica positiva o negativa di un corpo è vincolata allo spostamento degli elettroni all'interno di un corpo o da un corpo nello spazio circostante per effetto di processi fisici materiali o artificiali.

Se in una certa regione dello spazio sono raggruppate più cariche elementari, la carica complessiva  $Q$  nel volume  $\tau$  :

$$Q_{\tau} = \sum q^{+} + \sum q^{-} = Q^{+} + Q^{-} = |Q^{+}| - |Q^{-}|$$

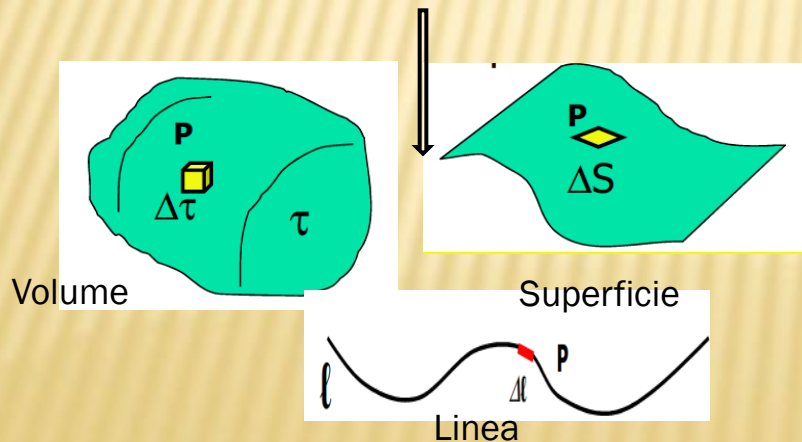
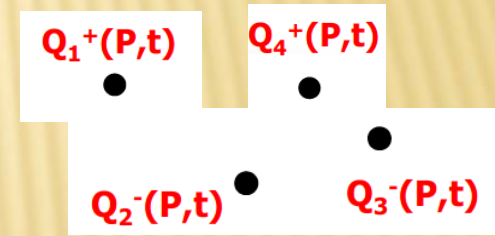
I fenomeni elettrici sono descritti da tre grandezze fisiche : la carica, la corrente e la tensione .

Queste grandezze possono avere un valore costante o variabile nel tempo. Si hanno quindi grandezze stazionarie o dinamiche ; possono essere quasi stazionarie quando la derivata rispetto al tempo assume un valore piccolo.

Soltanto la carica è una grandezza continua nel tempo ; l'intensità di corrente e la tensione possono essere funzioni discontinue.

La carica può essere considerata :

- Concentrata ( o puntiforme )
- Distribuita (in senso macroscopico )



Le cariche nella materia si possono presentare come :

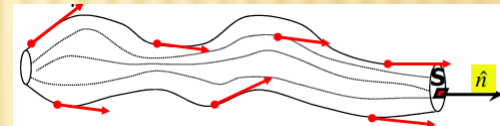
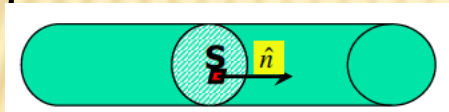
- Carica legata o di polarizzazione  $q_p$
- Carica libera  $q_l$
- Carica totale ( legata + libera )  $q_t$

Una carica  $Q$  può essere ferma o in movimento :

Elettroni in un metallo  $v_{\text{termica}} \sim 100\ 000\ \text{m/s}$

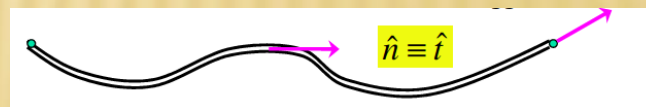
Il moto può essere :

Casuale : la carica che passa attraverso una qualsiasi superficie in qualsiasi intervallo di tempo è nulla.

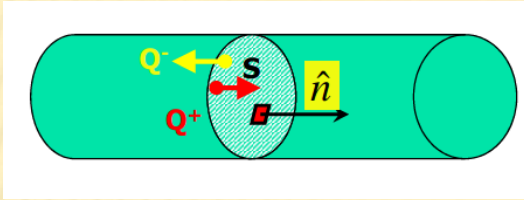


Ordinato : le cariche che passano attraverso una superficie  $S$  viene definita corrente elettrica

Per ora si fa riferimento solo a conduttori filiformi: 1 dimensione molto maggiore delle altre 2



□ Intensità della corrente elettrica I :



□  $\Delta Q$  è la carica netta che attraversa la superficie  $S$  nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  pari a  $Q^+ - |Q^-|$  nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ .

□ Per determinare il segno di  $I$  è necessario orientare la superficie  $S$

- $I > 0$ : il moto delle cariche positive è equiverso al vettore  $\underline{n}$
- $I < 0$ : le cariche positive si muovono in verso opposto ad  $\underline{n}$

□ **Metalli** : le cariche elettriche libere sono gli elettroni, la corrente risulta positiva se il vettore  $\underline{n}$  è orientato in verso opposto a quello degli elettroni.

- La velocità di deriva degli elettroni è dell'ordine di  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  m/s

## ❑ **Materiali isolanti:**

- le cariche sono vincolate tra loro da legami molecolari fintantoché la forza non supera quella di rottura del vincolo (scarica elettrica)

## ❑ **Solidi conduttori:**

- le cariche elettriche, in parte, non sono vincolate e possono muoversi, pur essendo comunque sottoposte a forze di tipo viscoso:
- Metalli: sottoposti a campo elettrico, gli elettroni nella "banda di conduzione", si muovono in verso contrario al campo:

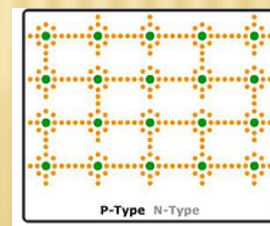
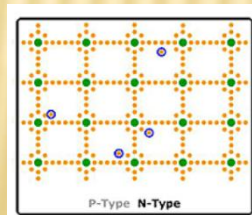
## Corrente di conduzione

- Semiconduttori: elementi tetravalenti (Si e Ge) in cui l'energia termica porta gli elettroni nella banda di conduzione, liberano i rispettivi legami atomici e quindi lasciano nella banda di valenza delle *lacune* (portatori di carica +)

## **Drogaggio del semiconduttore:**

semiconduttore di tipo N -> atomi pentavalenti (P, As, Sb) -> eccesso elettroni

semiconduttore di tipo P -> atomi trivalenti (Al, B, In) -> carenza elettroni -> eccesso lacune



❑ **Elettroliti:** nelle *soluzioni* -> dissociazione in ioni (+ e -):

Corrente di convezione

- Ioni positivi -> cationi -> i cationi si sposteranno verso il catodo (-)
- Ioni negativi -> anioni -> gli anioni si sposteranno verso l'anodo (+)

❑ **Vuoto e gas ionizzati:**

- Emissione termoelettrica
- Emissione per effetto di campo
- Emissione fotoelettrica: i sali di cesio o di potassio, colpiti da fotoni, emettono elettroni
- Gas ionizzato o plasma: in presenza di campo elettrico fra due
  - elettrodi in un gas o in un vapore, gli elettroni presenti si mettono in movimento anche ionizzando il gas presente.

❑ **Fenomeni di polarizzazione delle molecole**

- Elettrostatica

Per la definizione della tensione si deve seguire un percorso un poco più complesso

Sulla carica elettrica agiscono forze di vario tipo:

- Elettrochimico
- Inerziale
- Fotoelettrico
- Piezoelettrico
- .....
- Elettromagnetico :
  - Elettrostatico : interazione tra cariche ferme
  - Elettrodinamico: interazione tra cariche in movimento o movimento di cariche in campo magnetico

Si consideri ora una carica  $Q > 0$ , su cui agisce una forza  $\underline{F}(p,t)$ , si definisce campo elettrico il rapporto  $\underline{E} = \underline{F}/Q$ ;  $\underline{E}(P,t) = \underline{E}_e + \underline{E}_i$ .

Il campo elettrico in generale è costituito da due componenti  $\underline{E}_e$  ed  $\underline{E}_i$ , il campo elettrostatico ed il campo indotto..

- Secondo la legge di Coulomb, tra due cariche  $Q_1$  e  $Q_2$  si esercita una forza  $F$  in modulo data da :

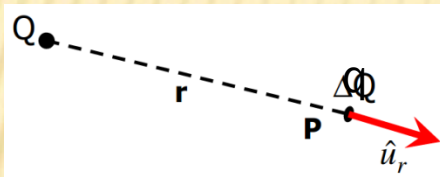
$$\mathbf{F} = \alpha \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \mathbf{u}_r$$

Con

$r$  = distanza tra le due cariche

$\alpha = 9 \times 10^9 [N \cdot m^2 / C^2]$

- Considerato lo spazio attorno ad una carica  $Q$ , la forza agente su una piccola “carica esploratrice”  $q$  positiva posta a distanza  $r$  da  $Q$  è data da:



$$\mathbf{F} = \alpha \frac{Qq}{r^2} \mathbf{u}_r$$

- Il campo elettrico corrispondente è dato da:  $\underline{\mathbf{E}} = \underline{\mathbf{F}}/q$  cioè

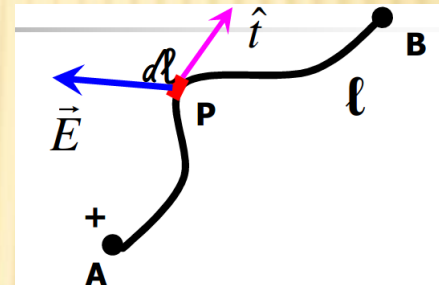
$$\mathbf{E}_e = \alpha \frac{Q}{r^2} \mathbf{u}_r$$

Tale campo  $E_e$  è denominato campo coulombiano o elettrostatico.

Si supponga che in una regione dello spazio sia presente un campo elettrico generato da una carica  $Q$ .

Se poniamo in un punto  $P$  dello spazio una carica  $q$  molto minore di  $Q$  in modo da non turbare il campo generato da  $Q$ , la carica  $q$  sarà sottoposta alla forza di Coulomb cioè alla :

$$\mathbf{F} = k \frac{Q \cdot q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$



Per effetto della forza  $\mathbf{F}$ , che può essere anche di vario tipo, la carica  $q$  si sposta dal punto  $A$  al punto  $B$ ; di conseguenza la forza  $\mathbf{F}$  e perciò il campo  $\mathbf{E} = \mathbf{F}/q$  compiono lavoro. Quindi si ha :

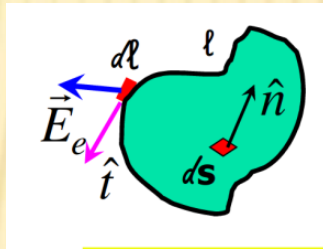
$$L = \mathbf{F} \cdot \boldsymbol{\ell}$$

Cioè il prodotto scalare tra la forza e lo spostamento o più semplicemente tra la forza e la componente dello spostamento nella direzione della forza

Si definisce “**Tensione Elettrica**” tra A e B il rapporto tra il lavoro compiuto dalla forza **F** agente sulla carica  $q$  e la carica  $q$  stessa.

$$V_{AB} = L_{AB}/q$$

Il campo elettrico è conservativo cioè il lavoro per spostare una carica da un punto all'altro non dipende dal percorso effettuato. Perciò su un percorso chiuso il lavoro è nullo.



E' quindi possibile definire punto per punto una funzione scalare  $V$  detta potenziale elettrico.

La  $V_{AB}$  è denominata anche differenza di potenziale in quanto la tensione è calcolabile come la differenza tra i due valori di una funzione detta **Potenziale del Campo**.

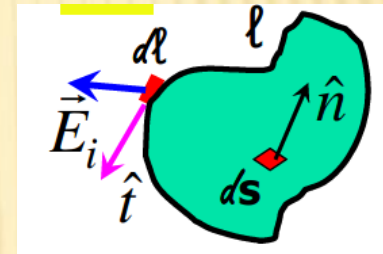
Esiste però un secondo campo elettrico, non dovuto alla presenza di carica, ma ai fenomeni elettromagnetici di natura completamente diverso chiamato

campo elettrico indotto

$$\vec{E}_i$$

per il quale, in generale, si ha:

$$\oint_l \vec{E}_i \cdot \vec{t} \, dl \neq 0$$



Applicando ancora il teorema di Stokes, se ne deduce che il campo elettrico indotto  $\vec{E}_i$  è in generale rotazionale cioè

$$\vec{E}_i$$

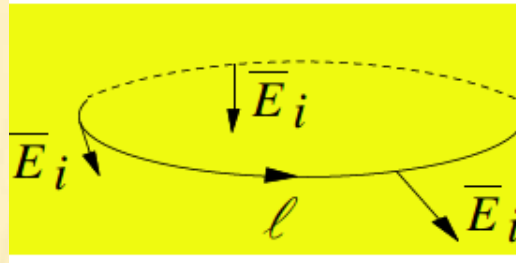
$$\int_s \text{rot} \vec{E}_i \cdot \vec{n} \, dS = \oint_l \vec{E}_i \cdot \vec{t} \, dl \neq 0$$

$$\text{rot} \vec{E}_i \neq 0$$

Tale campo elettrico è prodotto dalle variazioni del campo magnetico secondo la relazione :

$$\text{rot} \vec{E}_i = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Si definisce **forza elettromotrice (f.e.m.)**  $e$  : la circuitazione del vettore  $\mathbf{E}_i$  sulla linea chiusa  $\ell$  orientata:



$$e = \oint_{\ell} \bar{\mathbf{E}}_i \cdot \bar{\mathbf{t}} \, d\ell$$

Il campo elettrico  $\mathbf{E}_i$  è denominato campo elettrico indotto. Pertanto il campo elettrico totale è

$$\bar{\mathbf{E}} = \bar{\mathbf{E}}_e + \bar{\mathbf{E}}_i$$

$\mathbf{E}_e$  campo elettrostatico ;  $\mathbf{E}_i$  campo indotto

Poiché  $\bar{\mathbf{E}}_e$  è conservativo, la forza elettromotrice risulta anche pari alla :

$$e = \oint_{\ell} (\bar{\mathbf{E}} - \bar{\mathbf{E}}_e) \cdot \bar{\mathbf{t}} \, d\ell = \oint_{\ell} \bar{\mathbf{E}} \cdot \bar{\mathbf{t}} \, d\ell$$

con  $\underline{\mathbf{E}} = \mathbf{E}_i$  cioè

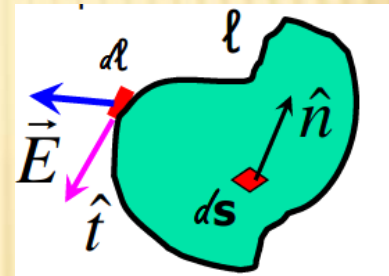
$$e = \oint_{\ell} \bar{\mathbf{E}}_i \cdot \bar{\mathbf{t}} \, d\ell$$

□ Si noti la differenza tra:

- **Forza elettromotrice – f.e.m.**

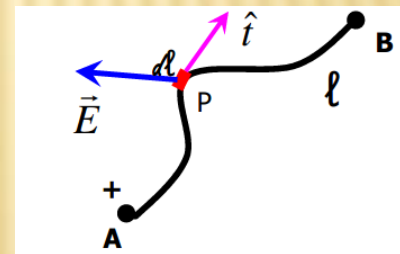
Nel caso dei generatori elettrici il concetto di f.e.m. verrà generalizzato anche al caso di integrale lungo una linea aperta

$$e = \oint_l \vec{E} \cdot \vec{t} \, dl$$



- **Tensione**

$$V_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{t} \, dl$$



## Forza Magnetica e Campo magnetico

In precedenza abbiamo visto che le cariche elettriche in quiete esercitano forze su altre cariche in quiete [forza di Coulomb].

Per separare l'effetto che una carica  $Q$  produce nello spazio circostante dall'azione che essa esercita su un'altra carica  $q$  generica posta nelle sue vicinanze, si introduce il concetto di campo elettrico, che permette di scrivere la forza elettrostatica nella forma  $\mathbf{F}_e = q \mathbf{E}$  e che l'intensità del campo elettrico viene definita come forza che agisce sull'unità di carica:  $E = F/q$

Il magnetismo è un fenomeno noto fin dall'antichità. Esso prende nome da una regione della Grecia, la Magnesia, che è ricca di depositi di magnetite, un materiale che ha la proprietà di attrarre piccoli oggetti di ferro. È esperienza comune il fatto che se si avvicinano due magneti (calamite) essi esercitano delle forze reciproche, attraendosi o respingendosi. Tali forze si manifestano, anche se i magneti non sono a contatto; quindi la forza magnetica, come la forza elettrica e quella gravitazionale, è un'interazione a distanza.

# IL CAMPO MAGNETICO



## Azioni a distanza di una corrente

Pertanto la corrente elettrica, percorrendo un conduttore, oltre a produrre un effetto termico (Effetto Joule), produce degli effetti a distanza:

I° : Un'azione **ponderomotrice** a distanza su un'altra corrente o su un ago magnetico.

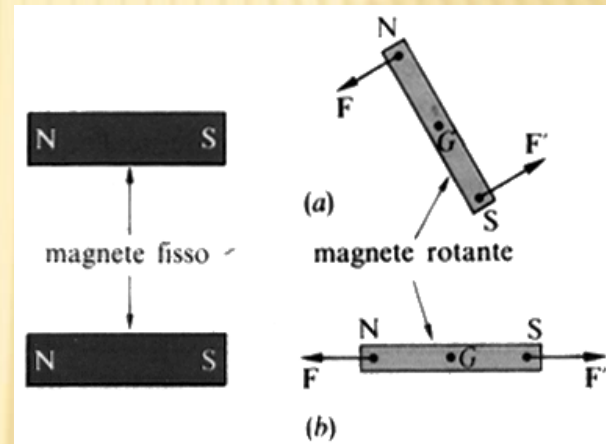
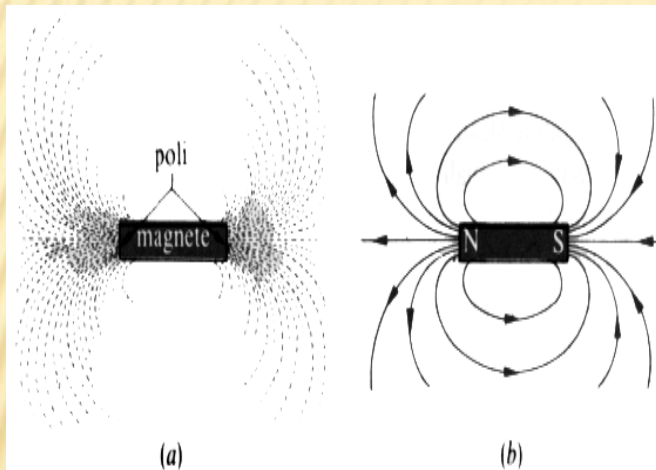
II° : Una **forza elettromotrice indotta** in un circuito separato ogni qual volta c'è una variazione di corrente nel primo circuito.

L'agente fisico attraverso il quale la corrente trasmette la sua azione a distanza sarà chiamato **Campo magnetico** e le azioni trasmesse **Azioni magnetiche** .-

Ogni qual volta si è in presenza di cariche elettriche in movimento, esiste nello spazio circostante un campo magnetico e viceversa ogni qual volta si è in presenza di un campo magnetico vi è sempre un moto di cariche elettriche che lo produce: Campo magnetico e corrente elettrica rappresentano una stessa realtà fisica inscindibile.-

## Forza Magnetica e Campo magnetico

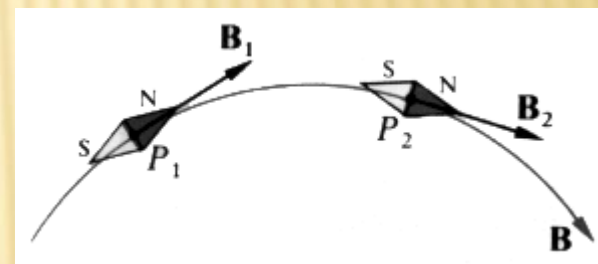
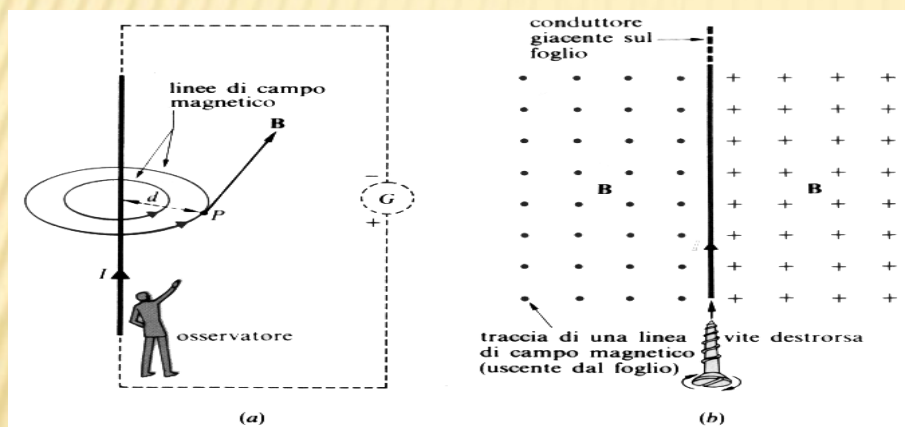
L'esperienza mostra che le calamite esercitano tra loro delle forze. In analogia con quanto detto per il campo elettrico, possiamo allora affermare che un magnete genera nello spazio un **campo magnetico**, che indicheremo con il simbolo  $\mathbf{B}$ . L'introduzione del concetto di campo magnetico permette di scrivere la forza magnetica separando l'effetto di ciò che consideriamo "sorgente" del campo — vale a dire il magnete o, come vedremo in seguito, la corrente elettrica — da ciò che è soggetto al campo, per esempio un altro magnete o un circuito elettrico o una carica in moto.



Il campo magnetico è presente in una regione dello spazio nella quale si possono esercitare forze di attrazione o di repulsione sui corpi magnetizzati. Esso è causato da magneti permanenti o da conduttori percorsi da corrente (si ricordino le scoperte di Oersted, fisico danese, 1777-1851 che dimostrò la presenza di un campo magnetico nei pressi di un conduttore percorso da corrente e di Ampère, fisico, chimico, matematico francese 1775-1836, che giustificò le analogie fra magneti e solenoide percorso da corrente).

## Forza Magnetica e Campo magnetico

Tutti questi fatti fanno pensare come lo spazio che circonda un magnete (naturale o artificiale, non importa) sia sede di un nuovo ente fisico-matematico per mezzo del quale poter spiegare le azioni di forza su certi corpi introdottivi. Per questo motivo si dice che il magnete ha creato tutt'attorno a sé un campo magnetico (termine generale) ma anche un **campo di induzione magnetica** (termine specifico).



Come per tutti i campi (gravitazionale, elettrico ecc.), l'intensità dell'effetto, magnetico in questo caso, viene misurata dall'azione della forza che il campo stesso esercita non su un piccolo ago magnetico, ma su una carica elettrica in movimento e quindi, per motivi più pratici, su un conduttore percorso da corrente, costituendo la carica elettrica in movimento una corrente elettrica.

## Forza Magnetica e Campo magnetico

Se è pure vero che le prime sorgenti del magnetismo osservate e impiegate sono state i magneti, tuttavia è risaputo che le più importanti applicazioni del magnetismo furono ottenute quando si poté impiegare le correnti elettriche.

Il magnetismo circuitale ha avuto inizio con la scoperta (1820) del fisico danese Oersted il quale aveva osservato come un ago magnetico posto in vicinanza di un conduttore deviava dalla sua posizione di riposo quando il conduttore risultava percorso da corrente elettrica.

Naturalmente per la conoscenza delle proprietà del magnetismo legato alla corrente elettrica decisamente utili furono gli studi e le esperienze di altri scienziati, tra questi il fisico francese Ampère al quale è dovuta, tra l'altro, la spiegazione assai ingegnosa per quei tempi, e del resto accettabile tutt'ora, di come un magnete generi il proprio campo magnetico.

Questa spiegazione ricorre a un modello secondo il quale le singole molecole di un materiale equivalgono dal punto di vista magnetico ad altrettanti circuiti microscopici percorsi da corrente elettrica e appunto agli effetti risultanti di queste correnti microscopiche è dovuto il comportamento magnetico della materia.

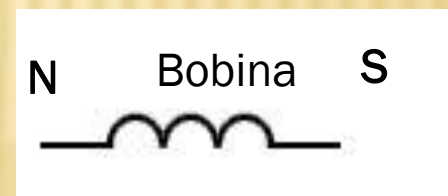
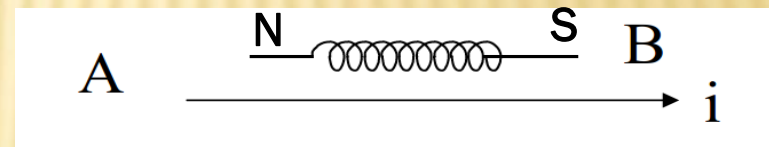
# Componenti magnetici

Magnete permanente.

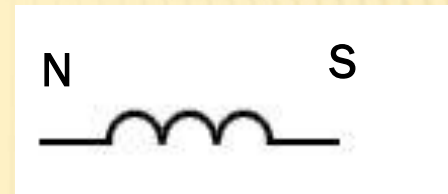
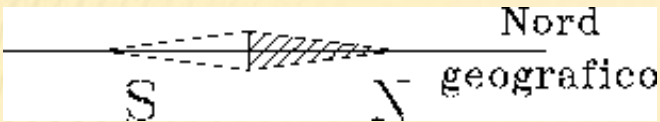


I campi magnetici esterni generati dal magnete permanente e dall' elettromagnete sono assolutamente identici.

Circuito percorso da corrente o elettromagnete.



## IL CAMPO MAGNETICO

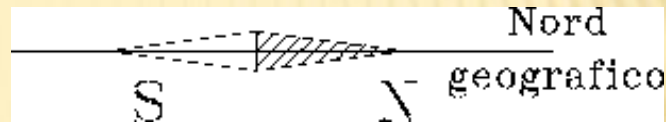


La presenza di un campo magnetico e la valutazione della sua entità può essere fatta sfruttando la azione esercitata su un un ago magnetico da parte di un magnete permanente o da parte di un circuito elettrico posti nelle vicinanze. L'ago puo essere sostituito da un tratto di circuito elettrico

Volendo seguire la prima via s'impiega un minuscolo magnete permanente, a forma di losanga allungata, libero di ruotare su un perno centrale; sotto l'azione del campo magnetico terrestre l'ago si orienta in un certo modo: l'estremità che risulta diretta verso il Nord geografico viene contrassegnata e prende il nome di **Polarità Nord**; l'altra estremità **Polarità Sud**.

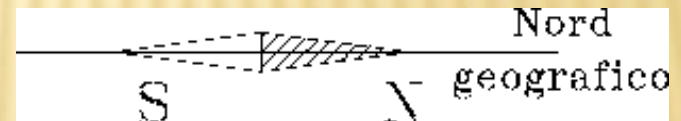
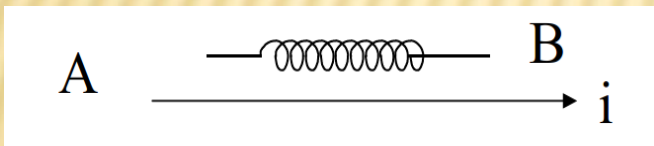
# IL CAMPO MAGNETICO

In presenza di un magnete o di una corrente  $I$  l'ago subisce un'azione ponderomotrice che lo fa ruotare, orientandolo in modo appropriato.-

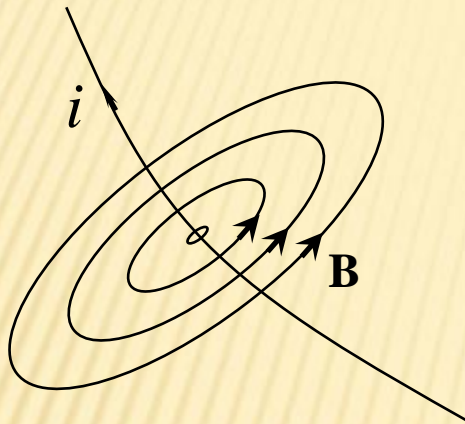


Una corrente  $I$  esercita sull'ago una azione che lo fa orientare: Si dirà che la corrente possiede una **Forza magnetomotrice (F.M.M.)**  $F$  intrinseca alla corrente stessa e s'identificherà l'intensità di  $F$  con l'intensità di  $I$ ; anzi, poiché l'azione di  $N$  conduttori tutti percorsi dalla corrente  $I$  è  $N$  volte quella di  $I$ , s'identificherà l'espressione di  $F$  con quella di  $NI$  misurandola in Amperfili o Amperspire:

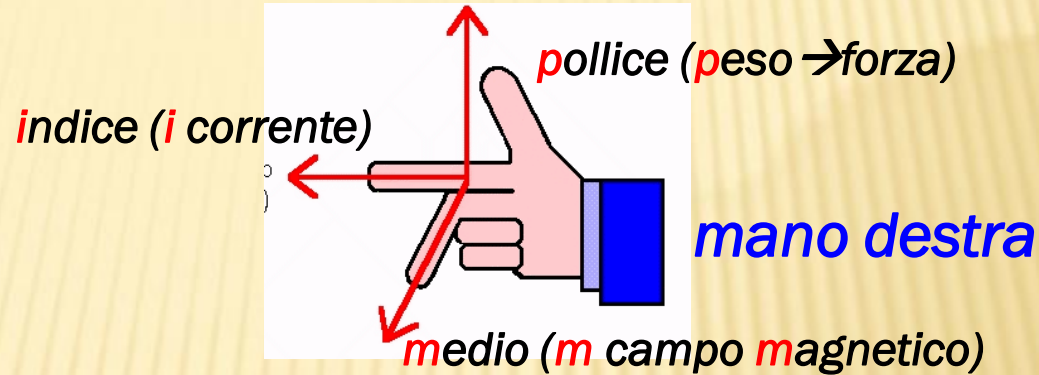
$$[F] = [I] = [\text{Amper}]$$



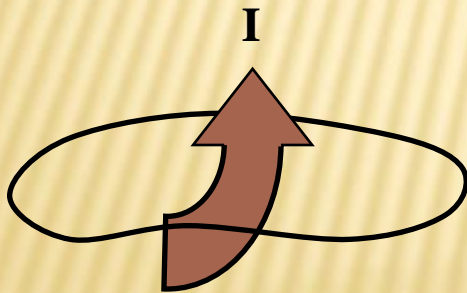
# CAMPO MAGNETICO



$$\mathbf{F} = (\mathbf{I} \times \mathbf{B}) \quad \text{forza indotta}$$



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



$$U_m = \mu_0 \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad \text{Legge di Ampère}$$

B dipende dal mezzo in cui ha sede il campo ed H dalle correnti

# RELAZIONI COSTITUTIVE DEL MEZZO

$\varepsilon_0$  è la costante di proporzionalità fra la densità di flusso elettrico  $D$  e l'intensità di campo elettrico  $E$  nel vuoto:

$$D = \varepsilon_0 \cdot E$$

$\mu_0$  è la costante di proporzionalità fra la densità di flusso magnetico  $B$  e l'intensità di campo magnetico  $H$  nel vuoto

$$H = \frac{1}{\mu_0} \cdot B$$

costanti universali	simbolo	valore	unità
velocità della luce nel vuoto	$c$	$3 \times 10^8$	<b>m/s</b>
permeabilità del vuoto	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$	<b>H/m</b>
permettività del vuoto	$\varepsilon_0$	$\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$	<b>F/m</b>

## Forza elettromagnetica e Campo elettromagnetico

Una particella carica che si trovi a passare in una zona di spazio dove sia presente un campo elettrico **E** e un campo magnetico **B** risente sia della forza elettrica, sia della forza magnetica. La forza totale è detta **forza elettromagnetica** (o *forza di Lorentz*).

$$\mathbf{F}_{\text{elettromagnetica}} = q \mathbf{E} + q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Nota che, nell'espressione della forza elettromagnetica, compare la *velocità* che è una grandezza *relativa al sistema di riferimento*.

Poiché, per il **principio di relatività**, *le leggi fisiche non dipendono dal sistema di riferimento*, questo sembra essere un *punto di crisi*: nei sistemi di riferimento in cui la carica è in moto, essa è sottoposta alla forza magnetica, in quello solidale ad essa, questa forza *dovrebbe scomparire*.

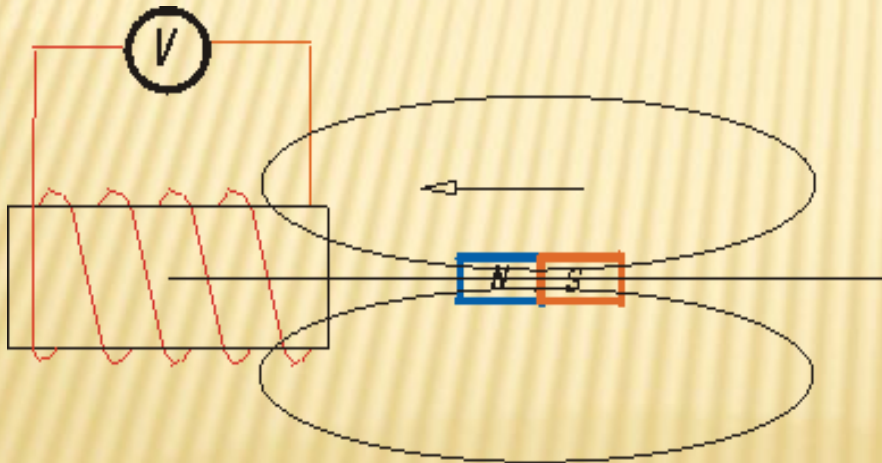
Con la relatività di Einstein si vedrà che anche i campi elettrici e magnetici possono *trasformarsi l'uno nell'altro*, a seconda del sistema di riferimento, essendo parte di un'unica realtà, il **campo elettromagnetico**.

# MAGNETISMO

## Induzione elettromagnetica

### Legge di Faraday

IN UN CIRCUITO INTERESSATO DA UNA VARIAZIONE DEL FLUSSO CONCATENATO, SI GENERA UNA F.E.M. (fem indotta) DIRETTAMENTE PROPORZIONALE ALL'ENTITA' DELLA VARIAZIONE DI FLUSSO ( $\Delta\phi$ ) ED INVERSAMENTE PROPORZIONALE AL TEMPO IN CUI TALE VARIAZIONE AVVIENE ( $\Delta t$ ) :



$$E = \left| \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \right|$$

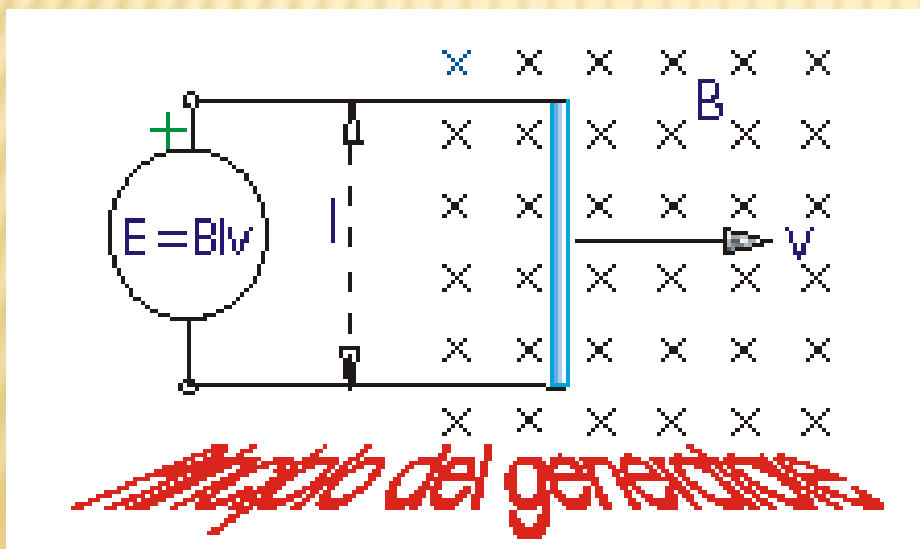
# MAGNETISMO

## Induzione elettromagnetica

### Legge di Faraday

La variazione del flusso concatenato può ottenersi in vari modi:

- MODIFICA DEL CAMPO MAGNETICO
- SPOSTAMENTI DEL CIRCUITO CHE SI CONCATENA
- ROTAZIONE DEL CIRCUITO CHE SI CONCATENA



$$E = \left| \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \right|$$

VERIFICA

# MAGNETISMO

## Induzione elettromagnetica

---

Legge di LENZ

LA F.E.M.I. FA CIRCOLARE NEL CIRCUITO (se esso è chiuso) UNA CORRENTE IL CUI EFFETTO è QUELLO DI OPPORSI ALLA CAUSA CHE L'HA GENERATA

NELLA LEGGE DI LENZ C'è IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

$$E = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

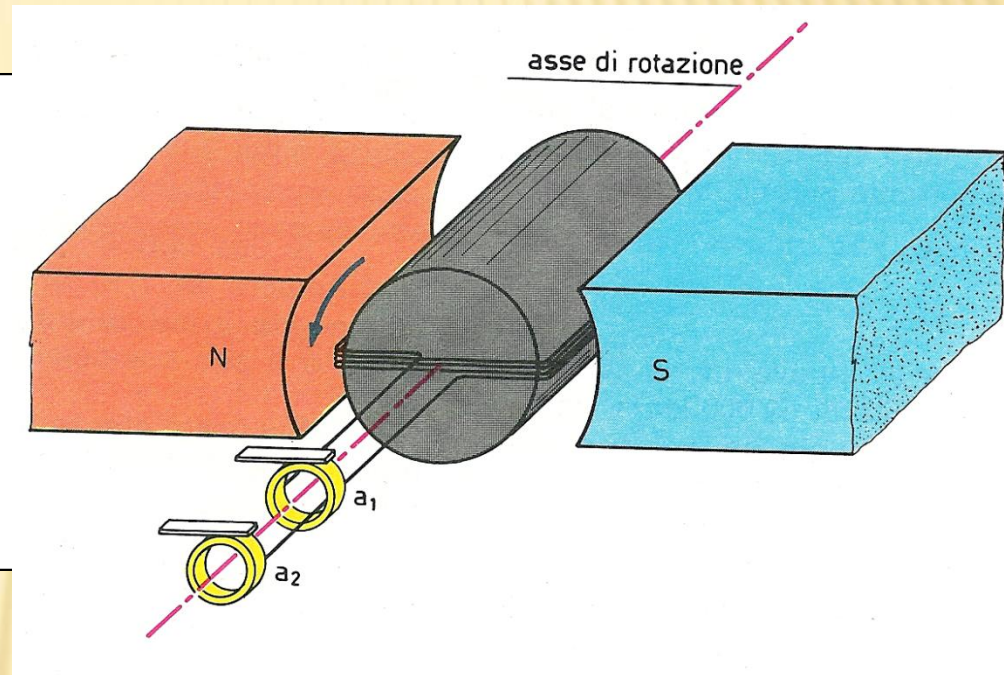
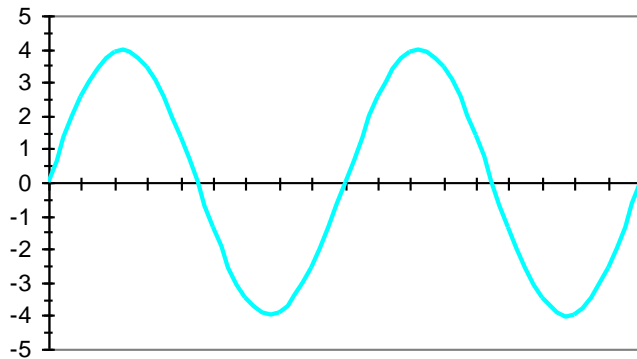
LA LEGGE DI LENZ SI ESPRIME COL SEGNO MENO NELLA FORMULA PER IL CALCOLO DELLA F.E.M.I.

# MAGNETISMO

## Induzione elettromagnetica

### GENERATORI DI CORRENTE ALTERNATA

$I \text{ sen } (\omega t)$  Corrente



Principio di funzionamento del generatore:

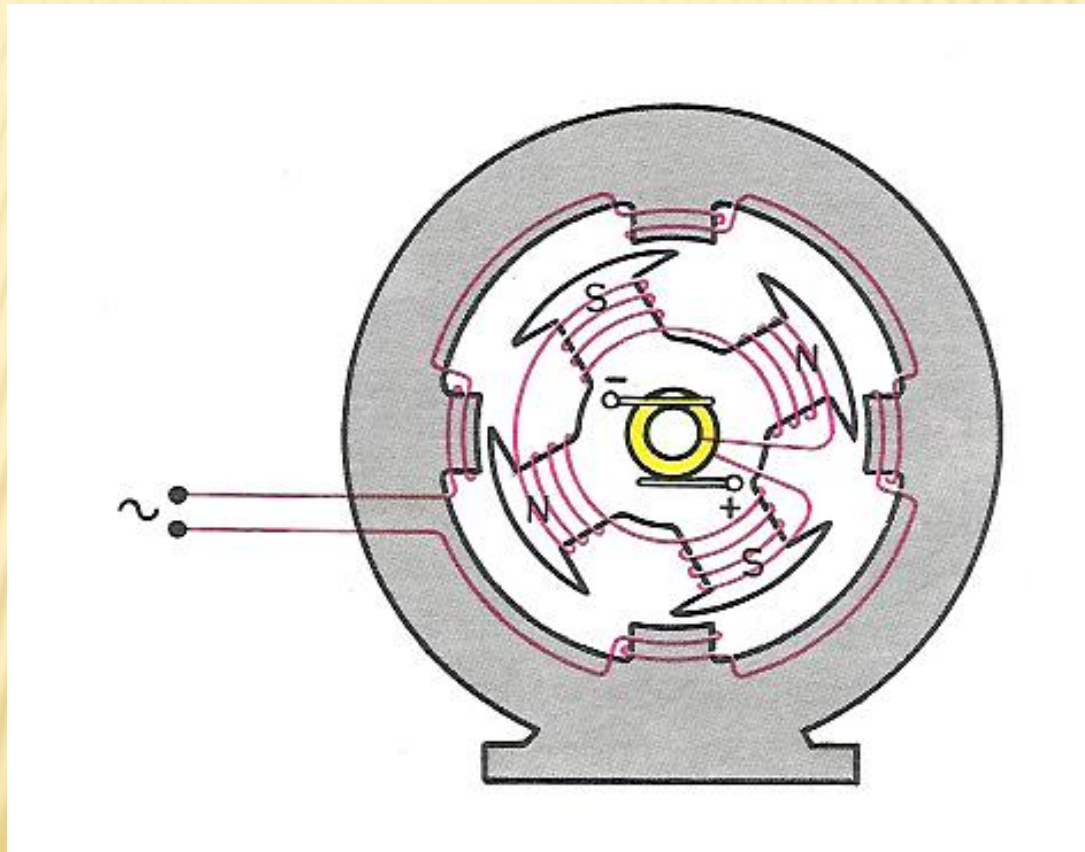
Tra gli anelli si genera una tensione alternativa sinusoidale

Nei generatori industriali viene fatto ruotare l'induttore anziché l'indotto

# MAGNETISMO

## Induzione elettromagnetica

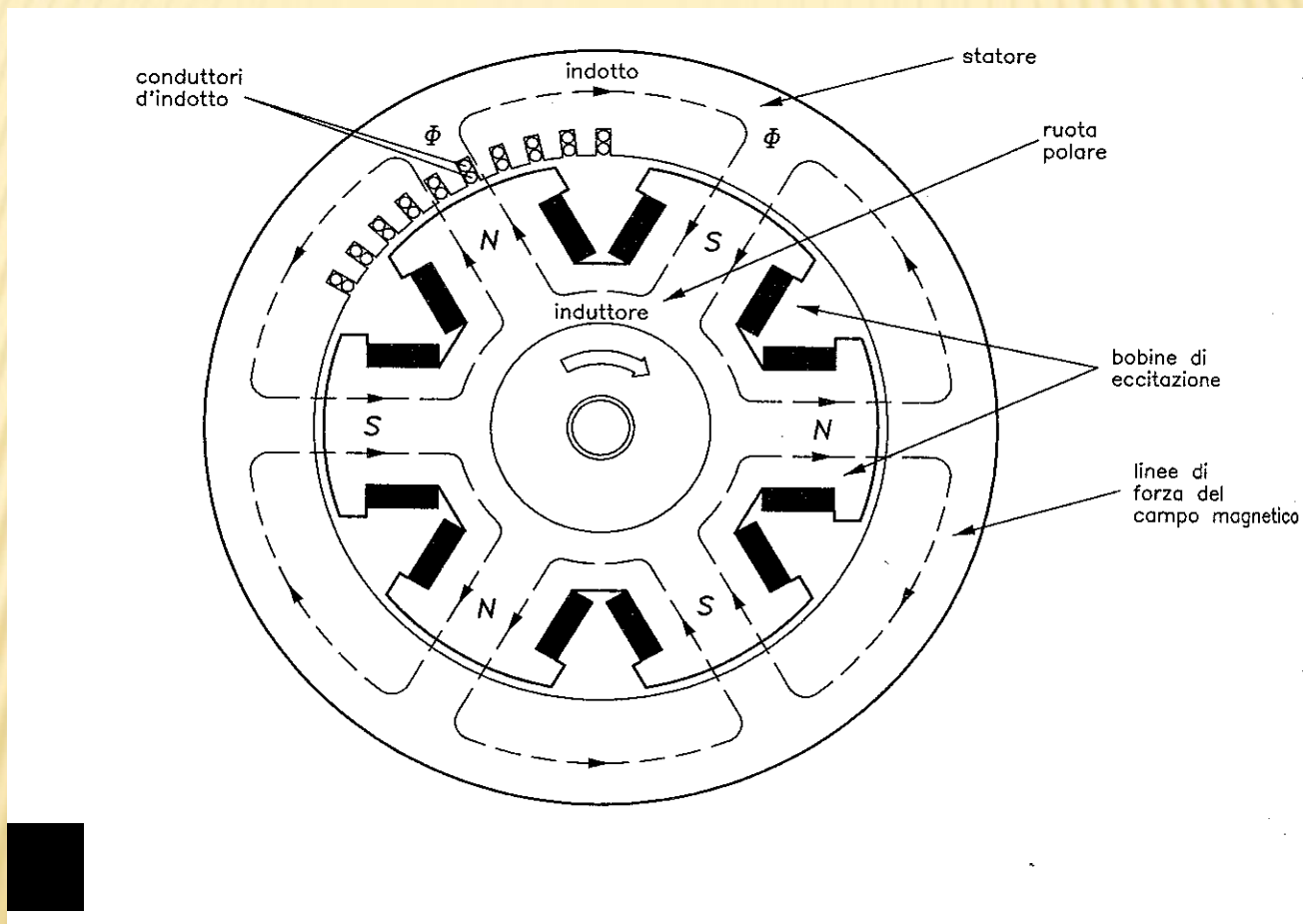
### GENERATORI DI CORRENTE ALTERNATA



# MAGNETISMO

## Induzione elettromagnetica

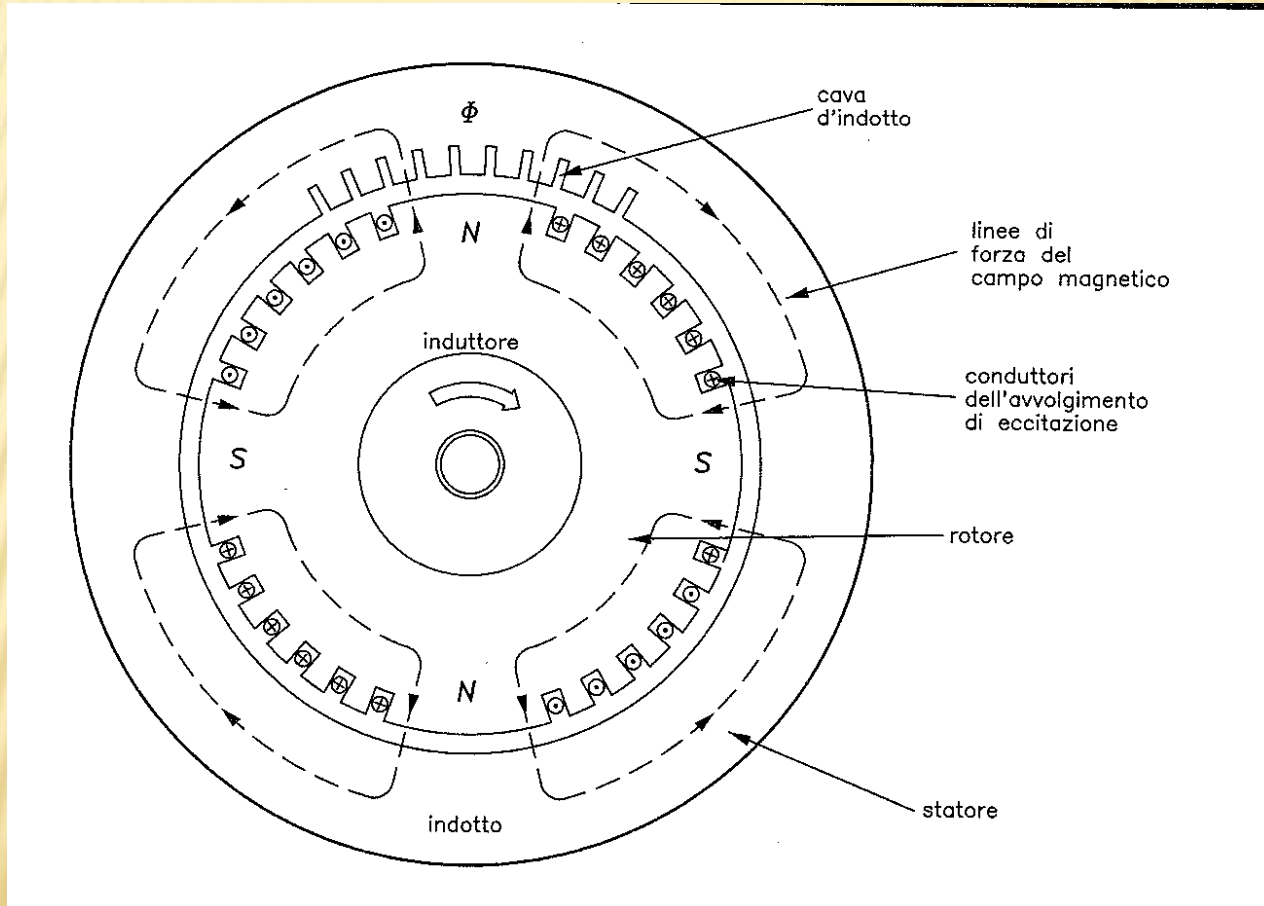
### GENERATORI DI CORRENTE ALTERNATA a POLI SALIENTI



# MAGNETISMO

## Induzione elettromagnetica

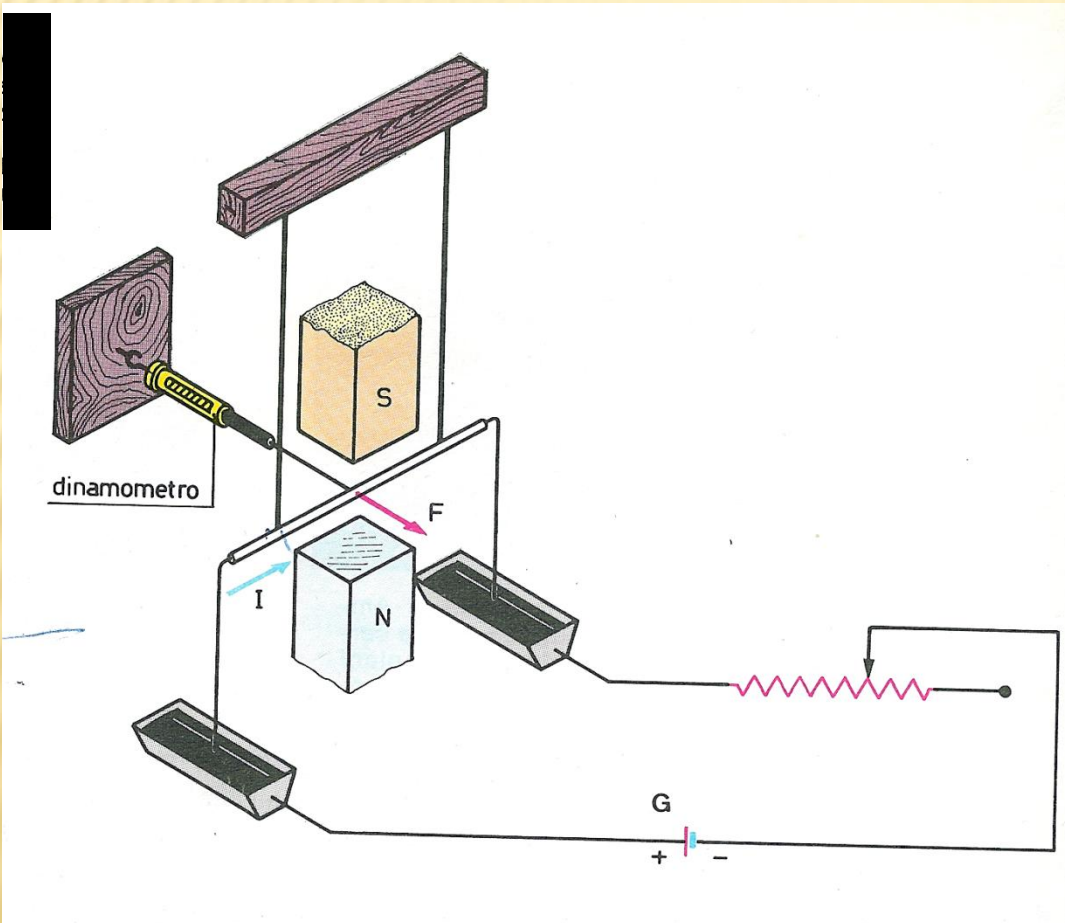
### GENERATORI DI CORRENTE ALTERNATA a POLI LISCI



# MAGNETISMO

## Motori elettrici

Forze agenti su conduttori percorsi da corrente ed immersi in campi magnetici



Un conduttore di lunghezza  $l$  percorso da corrente ( $I$ ) ed immerso in un campo magnetico ( $B$ ) è sede di una forza  $F$

Se  $B$  ed  $I$  sono ortogonali la Forza si calcola con la formula

$$F = BIl \text{ [N]}$$

$l$  è la lunghezza del conduttore interessata dal campo magnetico

La direzione della forza è quella del pollice della mano destra quando l'Indice ha il verso di  $I$  ed il medio quello di  $B$

## Motori elettrici

---

Forze agenti su conduttori percorsi da corrente ed immersi in campi magnetici

La forza elettromeccanica è alla base del principio di funzionamento dei motori elettrici ed in particolare i motori cc

Un motore cc è costituito da una parte fissa (STATORE) che crea il campo magnetico e da una parte mobile (ROTORE) sul quale sono sistemati gli avvolgimenti percorsi da corrente

L'adduzione della corrente al rotore avviene tramite il collettore (mobile) e le spazzole

# MOTORI IN CC

## DESCRIZIONE

L'adduzione della corrente al rotore avviene tramite il collettore (mobile) e le spazzole

