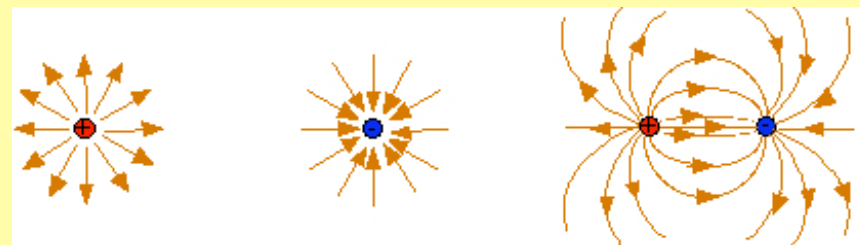


forza elettrica di Coulomb

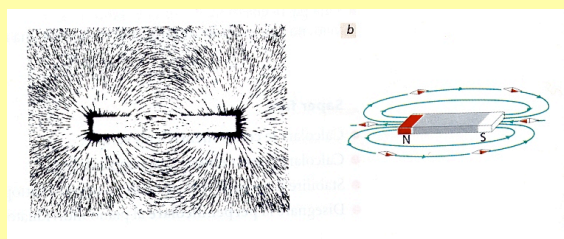


Campo elettrico

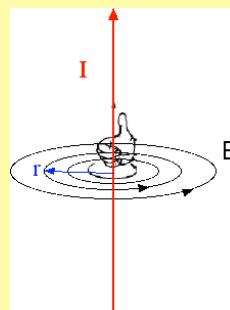
L'ELETTROMAGNETISMO

Dr. Daniele Di Gioacchino

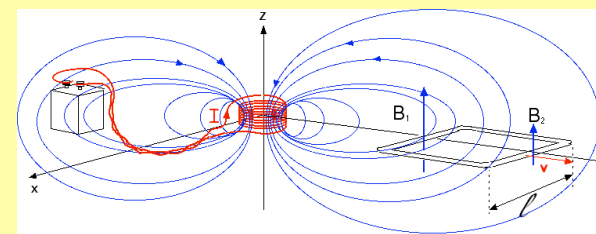
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati



Campo magnetico



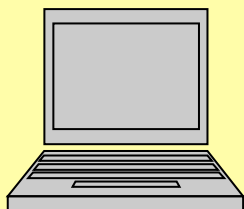
Campo magnetico di un filo
percorso da corrente elettrica



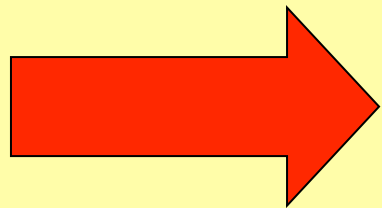
Induzione magnetica

Cenni di Eletttricità e Magnetismo

Ogni giorno incontriamo **interazioni elettromagnetiche** attraverso computer, televisione, cellulari.... basati su elettricità e magnetismo.



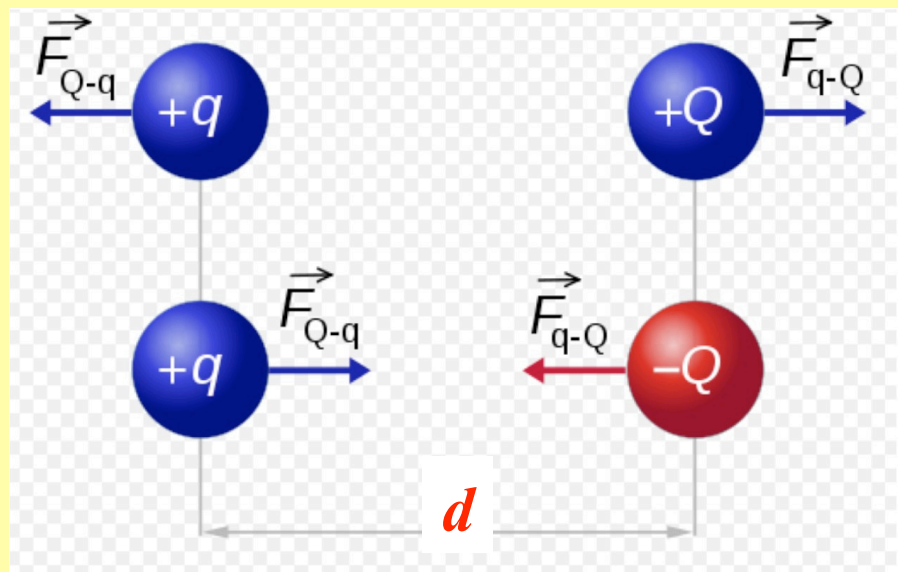
✓ Per capire questi fenomeni abbiamo bisogno di postulare un attributo importante della materia:

 **la carica elettrica**

Carica Elettrica

Coulomb sperimentalmente stabili' che:

- ✓ Due quantità elettriche **stazionarie** esercitano una forza, F , l'uno sull'altra, inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza di separazione d .



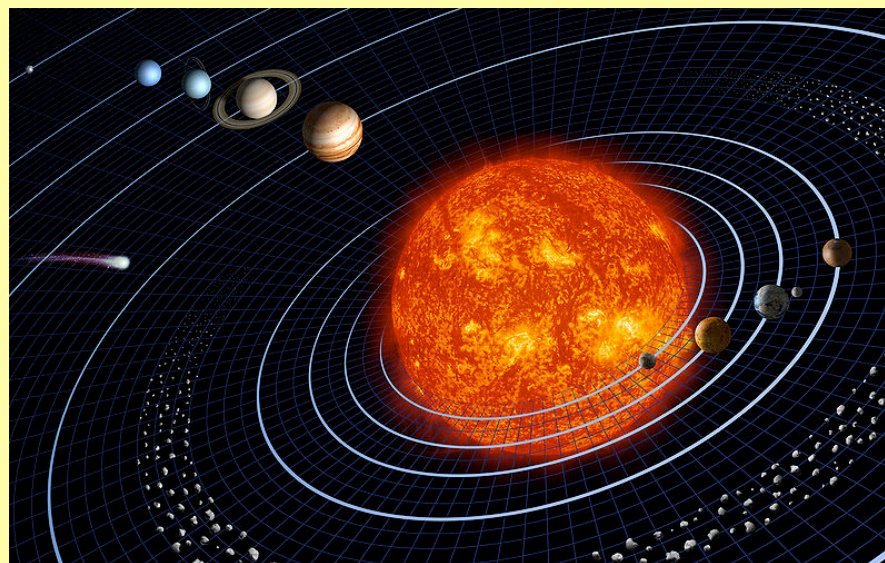
Carica Elettrica

*La legge di **Coulomb** ha una rappresentazione matematica simile (!) alla legge sulla **forza gravitazionale** dedotta da **Newton** quando considerò le leggi di Keplero*

Legge di gravitazione:

$$F_{\text{grav}}(\text{Newton}) = K(M_1 \cdot M_2) / d(\text{metri})^2$$

(dove $\cdot$ e' il simbolo del prodotto scalare, in **grassetto** il simbolo del **vettore**)



questo e' un modo tipico di analizzare i fenomeni...

Carica Elettrica

Per... analogia...

al posto della massa M viene postulata una quantità chiamata **carica elettrica**, q o (Q), misurata in **Coulomb (C)**

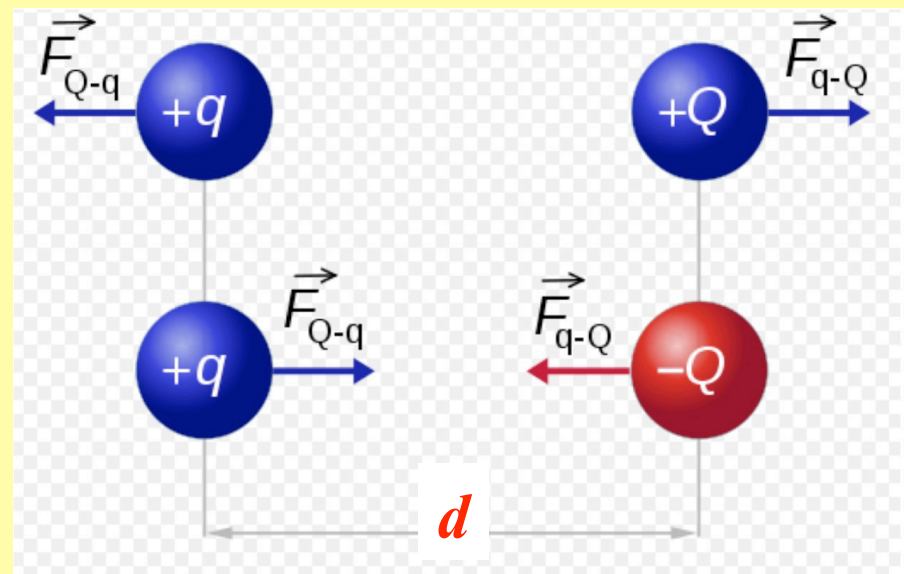
Legge di Coulomb:

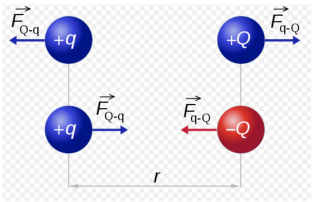
$$F_{\text{elet}}(\text{Newton}) = \gamma (q_1 \cdot q_2) / d^2$$

$$\gamma = 1 / (4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 (\text{newton} \cdot \text{metro}^2 / \text{coulomb}^2)$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} (\text{coulomb}^2 / \text{newton} \cdot \text{metro}^2)$$

costante dielettrica del vuoto





Carica Elettrica

✓ Esperimenti con diversi corpi (vetro, plastica) mostrano

due importanti differenze fra queste due leggi:

- la forza elettrica è più forte della gravitazionale di circa **ben 10^{36}** ordini di grandezza !!!! (in particolare vale **10^{43}** elettroni e **10^{26}** protoni)
- ci sono due tipi di cariche elettriche: **positive e negative**

- cariche simili si respingono
- cariche opposte si attraggono
- Due cariche opposte nella stessa posizione si neutralizzano

La legge e' usata per definire l'unità di misura, il **Coulomb**:



Due cariche elettriche di 1 Coulomb (C) poste alla distanza di 1 metro sviluppano una forza di 9×10^9 Newton!!

Campo Elettrico

continuamo analogia...

azioni a distanza

Campo Gravitazionale → Campo Elettrico

Una massa M_1 è sorgente di un
Campo Gravitazionale vettoriale:

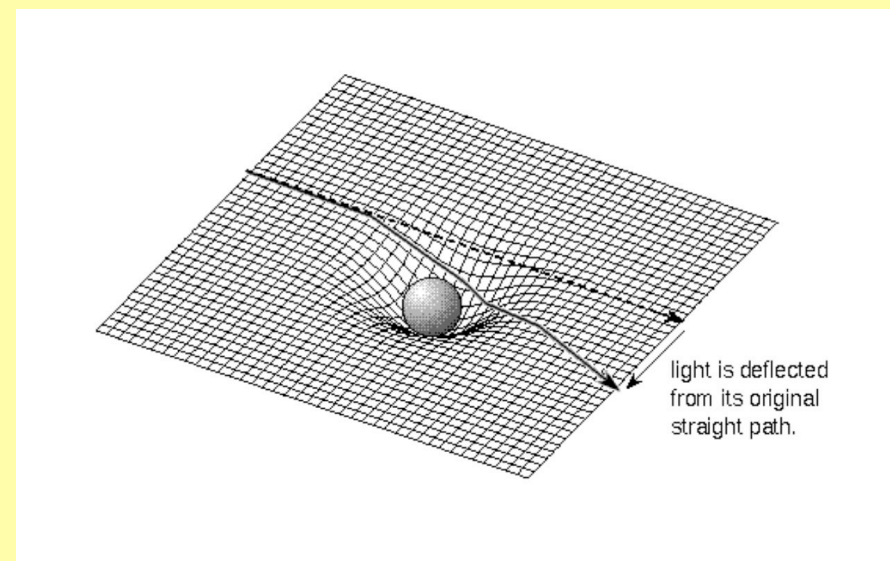
$$\mathbf{G} = KM_1 \mathbf{d}/d^2$$

$\mathbf{d}$ è il vettore unitario (versore)

✓ Il **campo gravitazionale** può essere visto come forza gravitazionale per unità di massa.

✓ Ogni massa M a una distanza d subirà una **forza** di ampiezza uguale a **G** volte la sua M :

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \cdot M$$



$$\mathbf{F} = M\mathbf{a}$$



$$\mathbf{G} = \mathbf{a} = \mathbf{g} \text{ (accelerazione di gravità)}$$

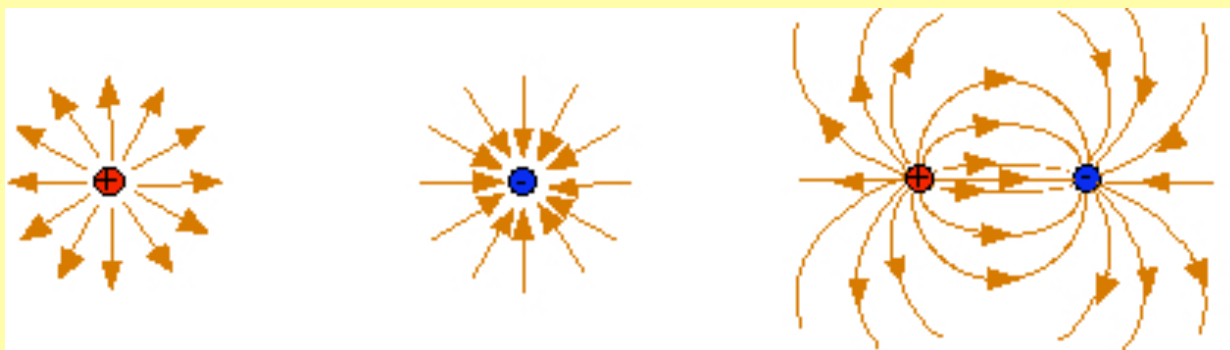
Campo Elettrico

.....così' anche per la **carica elettrica** possiamo dire che....

La forza elettrica per unità di carica si chiamerà **Campo elettrico**

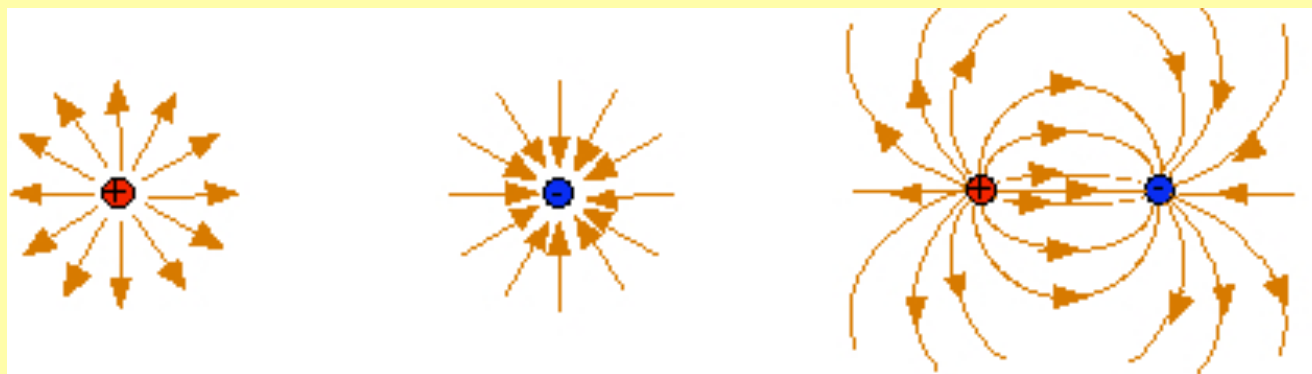
$$\mathbf{E} = \gamma q_1 \mathbf{d}/d^2 \text{ (Newton/coulomb)}$$

- ✓ $\mathbf{E}$ è un **vettore** uscente da una carica positiva (+) entrante da una negativa (-)
- ✓ La rappresentazione di $\mathbf{E}$ avviene attraverso le **linee** tangenti alla direzione del campo vettore $\mathbf{E}$ in ogni punto dello spazio



Campo Elettrico

- Intensità del campo $\mathbf{E}$ è il **numero di linee** per unità di area perpendicolare alla direzione del campo.
- Mai si rompono e mai vengono attraversate dalle altre.



Rivisitiamo la legge di Coulomb

Una carica q_2 in questo campo elettrico $\mathbf{E}$ (*generato dalla forza q_1*) subirà una **forza radiale** uguale a $\mathbf{F}=q_2\mathbf{E}$, la forza sarà attrattiva o repulsiva dipenderà dal segno delle due cariche.

Potenziale Elettrico

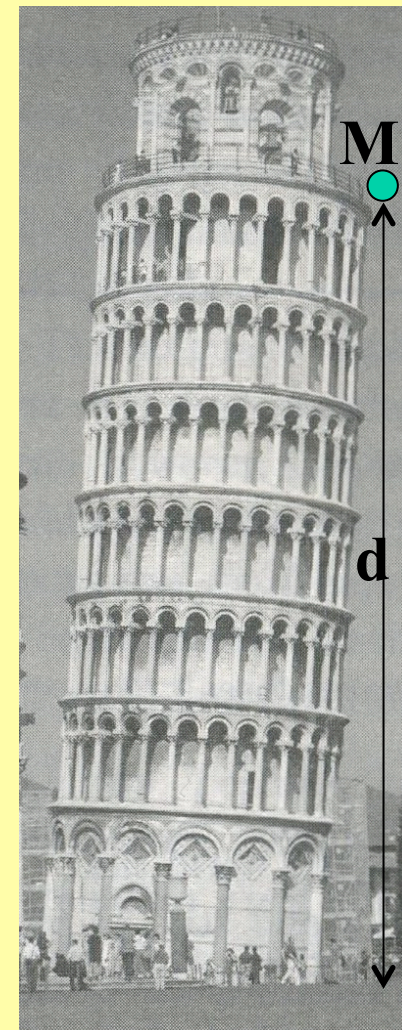
continuiamo analogia... con la **gravitazione....**

✓ Un oggetto di massa M vicino alla superficie della Terra a una distanza d sente il campo gravitazionale Terrestre di ampiezza G , coincidente con l'accelerazione g .

✓ **Definiamo** il suo potenziale gravitazionale rispetto alla Terra

$$H = Mg \cdot d \text{ (Joule)}$$

Il **lavoro** fatto per portare il corpo M a una distanza d nel campo gravitazionale



Potenziale Elettrico

continuiamo analogia... con la **gravitazione....**

✓ Una carica q_2 in un campo elettrico $\mathbf{E}$ (generato dalla carica q_1) ha un **energia potenziale elettrica**:

$$\Delta V = q_2 \mathbf{E} \cdot \mathbf{d}.$$

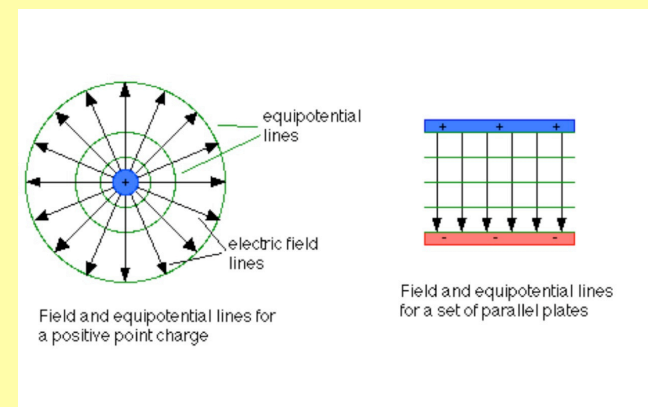
In altre parole: il lavoro fatto dal campo $\mathbf{E}$ su una carica q_2 per uno spostamento $\mathbf{d}$, e':

$$L(\text{joule}) = q_2 \mathbf{E} \cdot \mathbf{d} = q_1 q_2 / d,$$

Il **potenziale V** è l'energia potenziale per unità di carica,

$$\Phi = L(\text{Joule}) / q(\text{coulomb}) = q/d \text{ (Volt)}$$

(grandezza scalare)

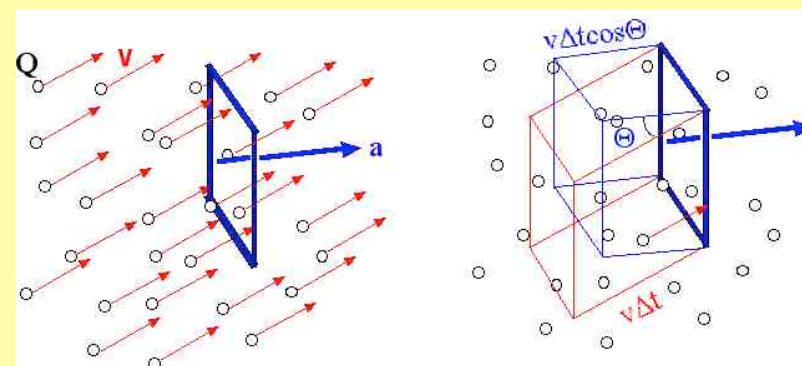


Corrente Elettrica

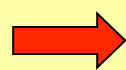
come si muoveranno le cariche q in un campo E ?

✓ Consideriamo N cariche $q_{\text{tot}} = Nq$ libere (vuoto o conduttore)

- sono sottoposte a una forza $F = qE$
 - si muovono lungo linee del campo E
- simile ad una massa di fluido che si muove lungo flusso del fluido.



analogia con un fluido



la carica elettrica si conserva, sparisce da un punto solo se si muove da esso verso un altro.

- Cariche elettriche in movimento generano una corrente elettrica I
- I , e' la quantita' di carica q nell'intervallo di tempo

$$I = q_{\text{tot}} / \Delta t \text{ [Coulomb/sec=Ampere]}$$

Corrente Elettrica

Calcolo I nel moto elettronico tridimensionale:

come si definisce l'orientazione di un'area?

❖ la carica q scorre attraverso una sezione di area A in un intervallo di tempo Δt con velocità $\mathbf{v}$ che ha una orientazione rispetto all'area

❑ la carica q_{tot} è contenuta nel volume di area A e altezza $l = \mathbf{v} \cdot \Delta t$

✓ l è la distanza che le cariche percorrono nell'intervallo di tempo Δt orientata nella direzione di $\mathbf{v}$

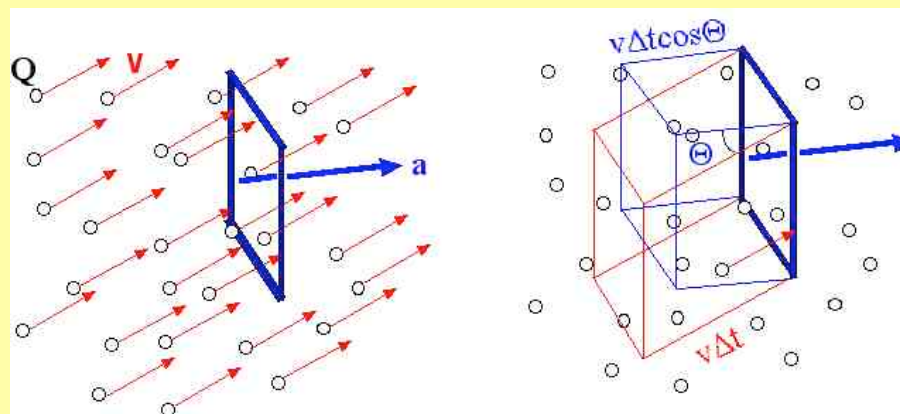
✓ considero $\mathbf{a}$ il **il versore di un'area** ($\mathbf{v}$ e $\mathbf{a}$ formano un angolo Θ)

❑ $I = q_{\text{tot}} \mathbf{A} \cdot \mathbf{a} (\mathbf{v} \cdot \Delta t) / \Delta t$

❑ $\mathbf{a} \cdot \mathbf{v} = a v \cos \Theta$

considerando una area unitaria,

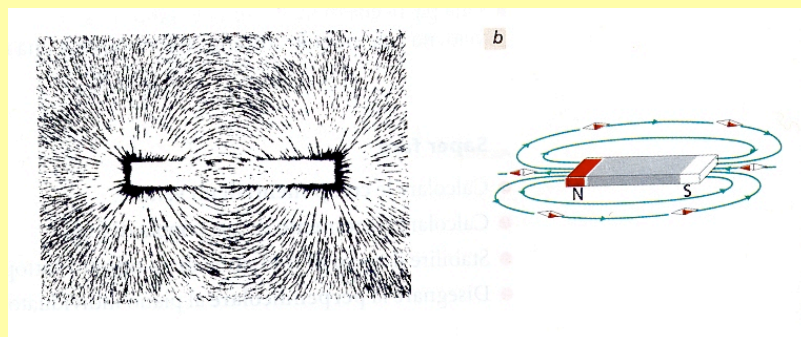
❑ $I(\text{Ampere}) = q_{\text{tot}} \cdot \mathbf{v} = q_{\text{tot}} v \cos \Theta$



Campo magnetico

un fatto sperimentale curioso...

- Il magnetismo fu scoperto osservando la tendenza delle particelle di ferro di aderire a pezzi di un minerale quando erano posti in sua vicinanza, tale minerale fu chiamato magnetite



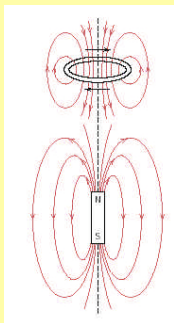
Note:

- ✓ sbarrette di magnetite hanno l'effetto concentrato sugli estremi, chiamati **poli magnetici**.
- ✓ L'attrazione o repulsione dei poli mostrano due tipi di poli magnetici: **Nord** e **Sud**
- ✓ L'interazione tra poli magnetici uguali e' repulsiva
- ✓ quella tra poli diversi e' attrattiva
- ✓ I poli sono indivisibili
- ✓ Il campo magnetico ha la forma di un **dipolo**

Campo magnetico

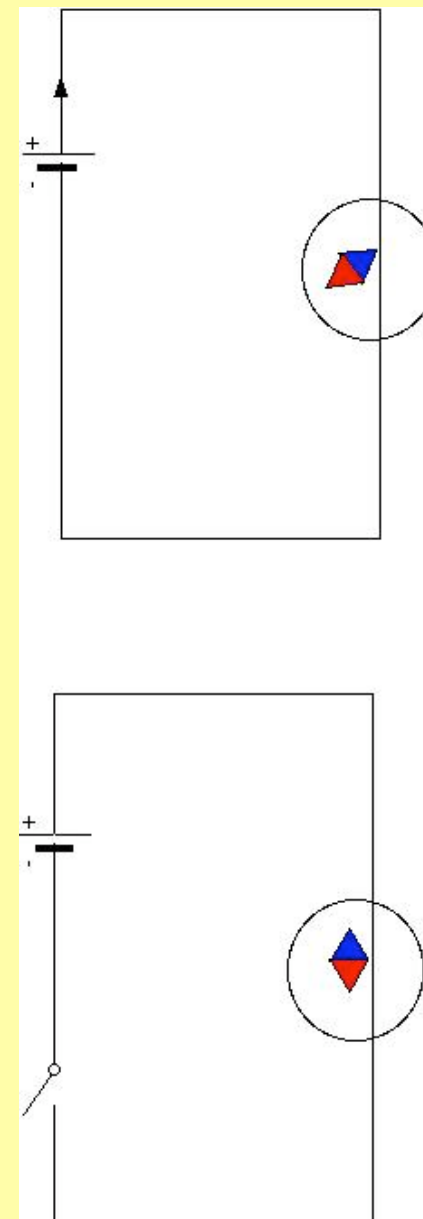
questo sì che è importante!!

- **Oersted** (1820) misuro' che una **corrente elettrica genera un campo magnetico**.
- ❑ deflessione di un ago di magnetite libero di ruotare in una bussola vicina al filo percorso da corrente:
 - ✓ invertendo verso della corrente, l'ago ruota in verso opposto
 - ✓ L'effetto di deviazione cresce con l'intensita' della corrente.



- ✓ Un **piccolo circuito elettrico (bobinetta)** percorso da corrente (piccolo rispetto alle dimensioni del circuito del filo) se sostituito all'ago magnetico e' **sottoposto a una identica forza (Laplace & Ampere)**

- ✓ La piu' semplice sorgente magnetica sara' il dipolo magnetico



Campo magnetico

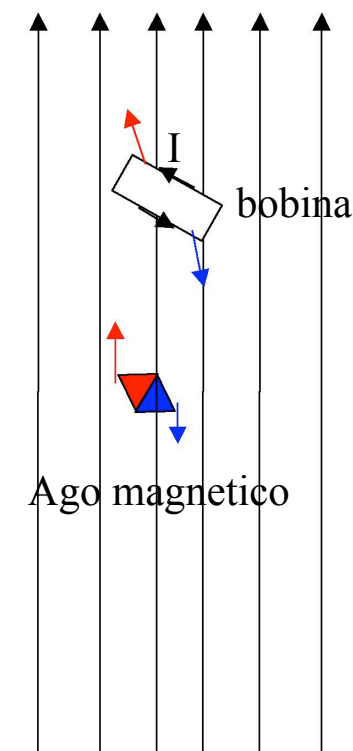
quindi la sorgente del campo magnetico sono

le cariche elettriche in moto

campo magnetico

- interazione a distanza fra corpi magnetizzati verrà descritto dal concetto di **campo magnetico vettoriale B** (analogia al campo elettrico)
- la **direzione** del **campo magnetico** e' determinata dalla retta che va dal polo S al polo N di un ago magnetico, il **verso** e' indicato dal **polo N** della sonda posta in equilibrio nel punto.
- Muovendo un ago magnetico nello spazio dove e' presente un **campo magnetico B** si disegnano le **linee di forza del campo**
- L'**intensita'** del campo **B** e' il **numero di linee per unita' di area** perpendicolare alla direzione del campo

Campo magnetico, B



Campo magnetico

sistemi di riferimento & poli indivisibili

- ❖ Una carica in **quiete** posta in un **campo magnetico** non subisce alcuna forza.



In tale sistema di riferimento l'osservatore misura un campo elettrico statico prodotto dalla carica e può sentire solo forze elettriche prodotte da campi elettrici stazionari

- ❖ Sono le **correnti elettriche microscopiche nella materia** che generano il magnetismo e i poli magnetici in un magnete lineare



Cariche NON stazionarie riflettono il fatto che i poli sono indivisibili e non esistono cariche isolate magnetiche

Il valore del campo magnetico:

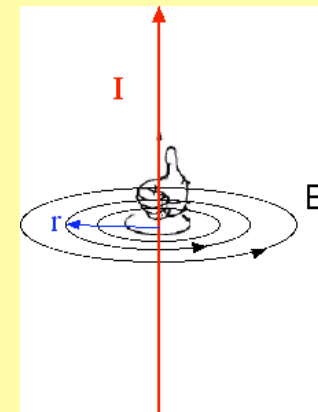
Legge di Biot-Savart e I legge di Laplace

✓ Sperimentalmente **Biot-Savart**, calcolarono il **valore**, la **direzione** e il **verso** del campo **B** per un filo rettilineo.

➤ Le **linee di forza di B** (o induzione magnetica) formano **anelli** intorno al filo con la **direzione e verso** dato dalla **regola della mano destra**:

il **pollice** indica il **verso della corrente** le altre **dita incurvate** intorno al filo mostrano il **verso del campo magnetico**

La regola della mano destra



Il valore del campo magnetico:

attenzione alle unit  di misura (MKS)

- ✓ l'intensit  **B**   proporzionale a **I**, inversamente proporzionale alla distanza **r** e dipende dal mezzo

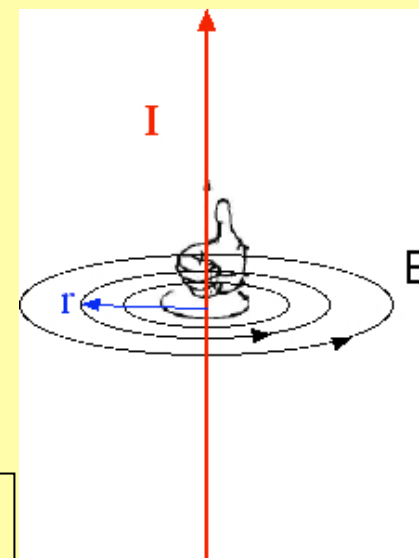
descritto dal termine chiamato permabilit  magnetica in questo caso vuoto, μ_0 :

- $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ [henry/metro] o [newton/ampere²]

Il valore di B   allora espresso:

$$|B| = (\mu_0 / 2\pi)(I/r)$$

$$[\text{henry} \cdot \text{ampere} / \text{metri}^2 = \text{newton} / (\text{ampere} \cdot \text{metri}^3) = \text{weber} / \text{m}^2 = \text{tesla}]$$



Commenti sulle unit  di misura:

- henry discende dal calcolo dell'induttanza L di una bobina.
- newton/ampere² discende dal calcolo delle forze che si producono fra due fili percorsi da corrente

Il valore del campo magnetico:

Legge di Biot-Savart e I legge di Laplace

Ora diamo una espressione vettoriale della legge della mano destra

un prodotto fra vettori che da un vettore

✓ introduciamo il **prodotto vettoriale** (simbolo $\times$) indichiamo:

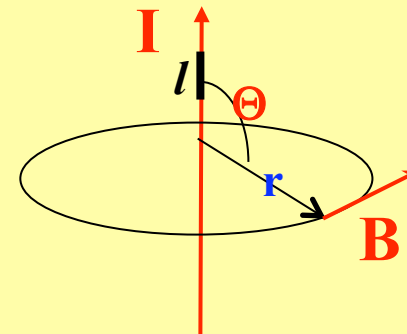
➤ $\mathbf{l}$, **vettore unitario (versore)** lungo il **filo rettilineo**: indica il verso della corrente

➤ $\mathbf{r}$, **raggio del cerchio** passante per una dato punto: indica dove calcolare il campo $\mathbf{B}$,

□ $\mathbf{B}$ ha il verso ortogonale

➤ il prodotto vettoriale $\mathbf{l} \times \mathbf{r}$, e' un **vettore** con direzione ortogonale al piano individuato da $\mathbf{l}$ e $\mathbf{r}$, con modulo, $|\mathbf{l} \times \mathbf{r}| = |\mathbf{l}| |\mathbf{r}| \sin \Theta$ (Θ angolo fra $\mathbf{l}$ e $\mathbf{r}$) e verso in modo tale che il sistema $\mathbf{l}$, $\mathbf{r}$, $\mathbf{l} \times \mathbf{r}$ formino un **sistema destro giro**.

$$\mathbf{B} = (\mu_0/2\pi) \mathbf{I} (\mathbf{l} \times \mathbf{r} / r^2)$$



Il valore del campo magnetico:

Legge di Biot-Savart e I legge di Laplace

ATTENZIONE! Nota sulle quantità misurate che definiscono il magnetismo !!!

- consideriamo solo il **magnetismo** prodotto da **circuiti elettrici macroscopici** che lo *sperimentatore* controlla (circuiti elettrici non interni alla materia) definiamo: **H intensita' del campo magnetico**

$$\mathbf{H} = \mathbf{I}/r \text{ [ampere/metro]}$$

- Dalla definizione di **B induzione magnetica o campo magnetico**

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \text{ [weber/metro}^2\text{] o [Tesla]}$$

H e B vengono chiamate nello stesso modo, questo genera confusione!!!

....MA SONO VARIABILI DIVERSE

... **ATTENZIONE ALLE DIFFERENTI UNITA' DI MISURA**

Il valore del campo magnetico

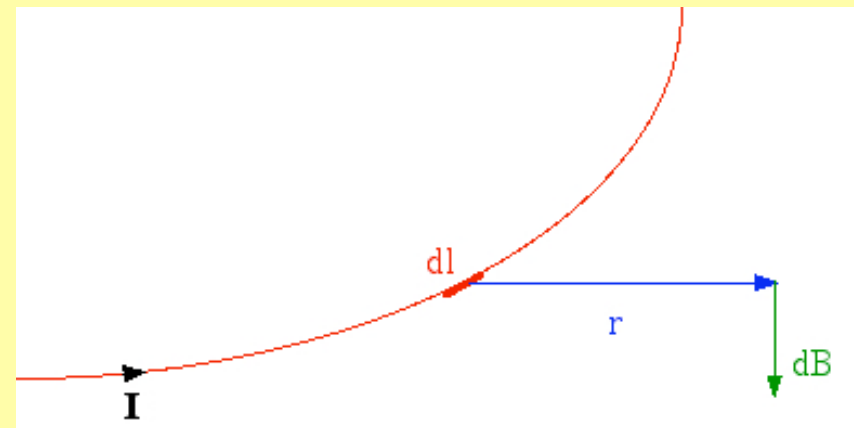
Legge di Biot-Savart e I legge di Laplace

una generalizzazione

- ✓ La I legge di Laplace, generalizza la legge di Biot-Savart per un circuito elettrico di qualsiasi forma.

Un piccolo tratto di circuito $d\mathbf{l}$ darà un valore $d\mathbf{B}$:

$$d\mathbf{B} = (\mu_0/2\pi) \mathbf{I} [(\mathbf{dl} \times \mathbf{r}) / r^3]$$



- $\mathbf{B}$ sarà la risultante della somma (sommatoria, $\sum$) dei campi $d\mathbf{B}$ generati da *tutti* i segmentini $d\mathbf{l}$ del circuito elettrico (nel limite di lunghezza infinitesima)

(integrali di linea)

$$\mathbf{B} = \lim_{dl \rightarrow 0} \sum_{\text{circuito}} d\mathbf{B} = \int_{\text{circuito}} d\mathbf{B}$$

Forza esercitata da un campo magnetico su un circuito elettrico

Il legge di Laplace

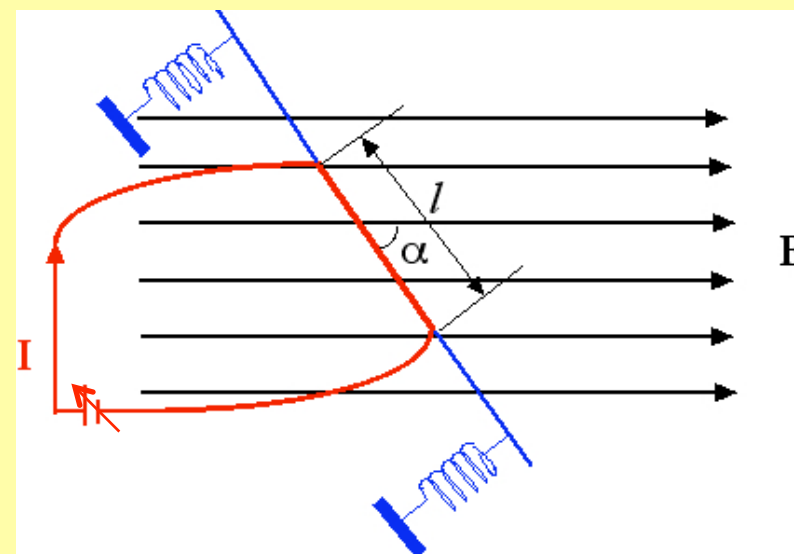
Laplace per calcolare la forza esercitata da un campo magnetico **B** considera:

- ✓ circuito esploratore [dimensioni piccole rispetto alla zona dove c'è **B**(tesla)]
- ✓ Il circuito ha il tratto rettilineo ***l***(m) con **I**(A) che possono cambiare
- ✓ **α** , angolo formato con la direzione ***l*** del circuito con **B**
- ✓ ***l*** del circuito e' posto in ogni punto dello spazio

❖ La forza **F**(newton) e' proporzionale a ***l***, **I**, **B**

❖ Dipende dall'angolo α

un circuito sperimentale interessante



Forza esercitata da un campo magnetico su un circuito elettrico

II legge di Laplace

L'intensita' della **forza** e':

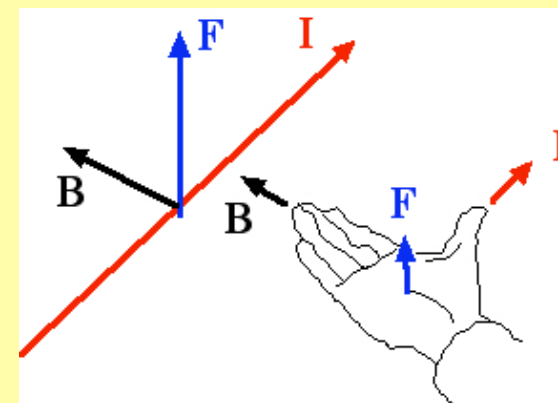
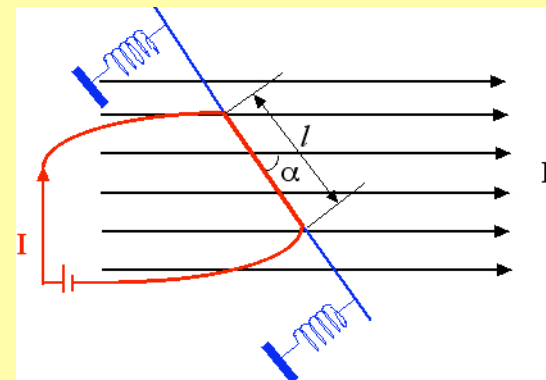
$$|\mathbf{F}| \text{ (Newton)} = \mathbf{B}I \sin \alpha$$

il prodotto vettoriale da la forma algebrica con direzione e verso

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \times \mathbf{I} = \mathbf{B} \times q\mathbf{v} = q\mathbf{B} \times \mathbf{v}, \text{ (Legge di Lorentz)}$$

✓ Questa **forza** dipende dalla **velocita'**

✓ Il verso e' visualizzato dalla **generalizzazione**
regola della mano destra



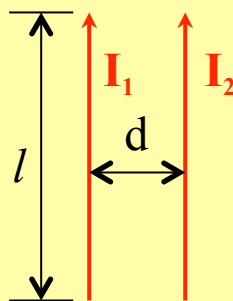
ancora la regola della mano destra... ma generalizzata

Forza esercitata da un campo magnetico su un circuito elettrico

II legge di Laplace

Considero la legge di **Biot-Savart** fra due fili (1,2) paralleli di lunghezza l a una distanza d , la forza prodotta è (scoperta da Ampere):

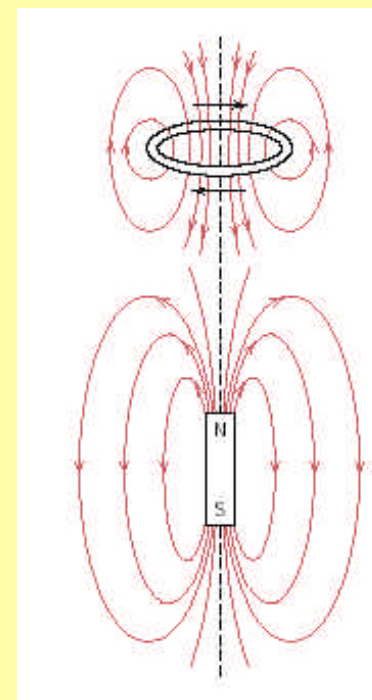
$$\mathbf{F} = (\mu_0/2\pi) \mathbf{I}_1 \mathbf{I}_2 l / d$$



in questo contesto Ampere

dimostro' che **B** generato da un *ago magnetico* **equivale** a quello di una *spira percorsa da corrente elettrica*:

- Sia nelle azioni meccaniche come momento della forza
- Sia dal campo magnetico generato (**forma dipolo**)



momento magnetico

importante per il magnetismo nella materia

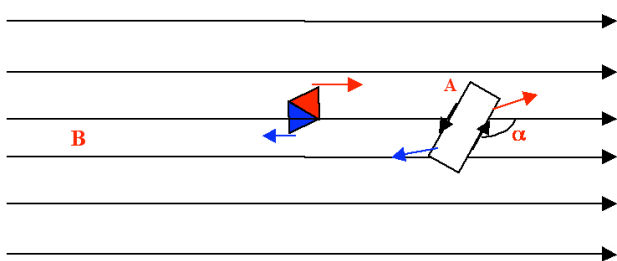
cosa succede a un ago magnetico o una spira in un campo B ?

- sono sottoposti ad un momento meccanico torcente, $\mathcal{M}$,
- $\mathcal{M}$ e' proporzionale alla corrente I , area del circuito orientata A e campo magnetico B ,

$$|\mathcal{M}|[\text{newton} \cdot \text{metro}] = I \cdot A \cdot B [\text{Tesla}] \sin \alpha$$

□ Si definisce il vettore $\mathbf{m} = \mu_0 I \mathbf{A}$, **momento magnetico**

unita' di misura di $\mathbf{m}$ e' **[Weber·metro]**



una spira di area orientata A , percorsa da I , possiede un momento magnetico intensita' $\mathbf{m} = I \cdot A$, direzione **perpendicolare** all'area della spira

Flusso magnetico

...ho circuiti elettrici e campi magnetici che si muovono...

Considero una superficie di area A piana immersa in un campo magnetico $\mathbf{B}$

➤ $\mathbf{n}$ versore perpendicolare al piano

➤ Φ flusso del campo magnetico $\mathbf{B}$ attraverso l'area orientata $\mathbf{A}$ ($\mathbf{A}=\mathbf{n}A$)

$$\Phi(\mathbf{B})(\text{Weber})=\mathbf{B}\cdot\mathbf{A}=BA\cos\alpha \quad (\alpha \text{ l'angolo fra } \mathbf{B} \text{ e la normale } \mathbf{n} \text{ alla superficie})$$

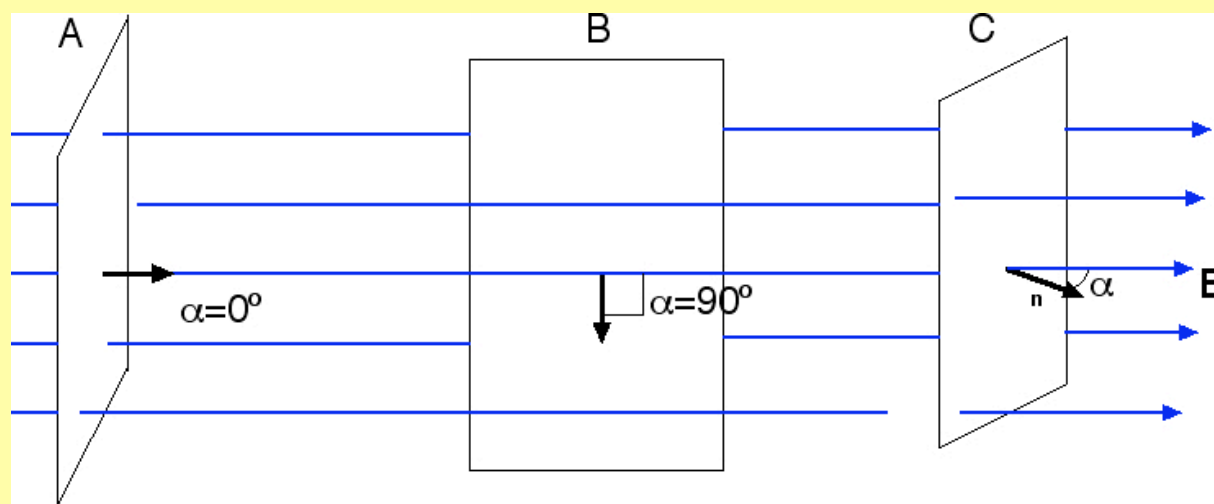
□ Il flusso, $\Phi(\mathbf{B})$ e' proporzionale
all'intensita' di $\mathbf{B}$ o numero di linee
di $\mathbf{B}$ attraverso l'area A , dipende
dall'orientazione di A rispetto a $\mathbf{B}$

I tre casi

A. $\Phi(\mathbf{B})=BA$

B. $\Phi(\mathbf{B})=0$

X. $\Phi(\mathbf{B})=\mathbf{B}\cdot\mathbf{A}=BA\cos\alpha$



Induzione magnetica

Faraday sperimentale straordinario scopre l'induzione magnetica in un circuito elettrico

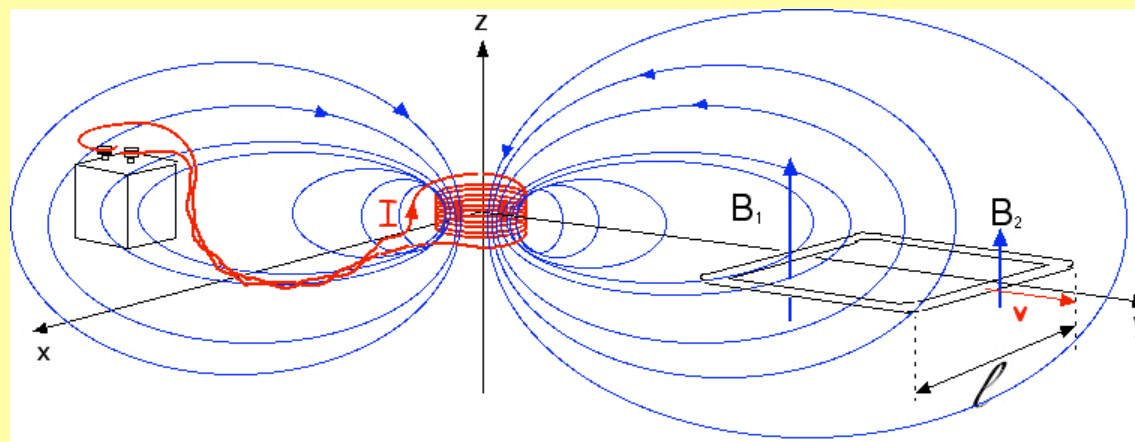
corrente I, INDOTTA :

- se un magnete/bobina si avvicina (o si allontana) al circuito
- se un circuito viene spostato rispetto ad un magnete/bobina

tensione V, INDOTTA :

- se il circuito aperto.

❑ Neumann scopre che l'INDUZIONI sono causate dalla variazione del flusso magnetico $\Phi(B)$ concatenato con il circuito elettrico nel tempo



✓ $\Delta V(\text{volt}) = - \Delta \Phi / dt$ (weber/sec)

✓ $I(\text{A}) = - (\Delta \Phi / dt) / R(\Omega)$

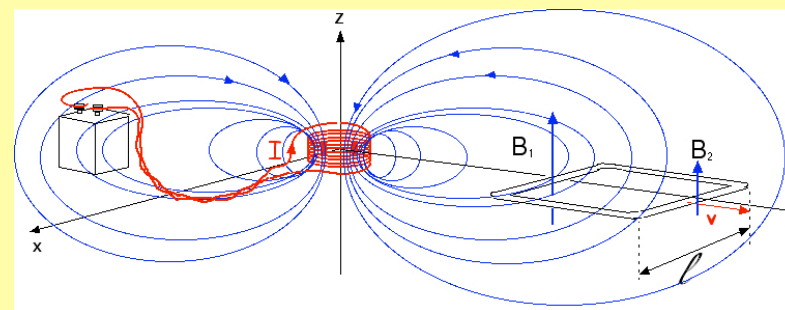
Induzione magnetica

Importante! Perché c'è il segno meno?!

✓ $\Delta V(\text{volt}) = - \Delta \Phi / dt$ (weber/sec)

✓ $I(\text{A}) = - (\Delta \Phi / dt) / R(\Omega)$

□ Legge di Lenz:



il segno negativo nasce dal fatto che la corrente scorre sempre per creare un campo magnetico indotto contrario alla variazione di flusso che la generato.

□ E' una conseguenza della **conservazione dell'energia**:

per produrre moto elettrico bisogna compiere un lavoro.

NOTA:

Se si avvicina un **polo N** del *magnete* e il **campo magnetico indotto** avesse un **polo S**, il *magnete* verrebbe attratto. Il sistema **NON compirebbe lavoro**, le cariche elettriche acquisterebbero energia senza lavoro esterno, **l'energia non sarebbe conservata**.

Riepilogo

