

Magnetismo

- 1. Correnti elettriche*
- 2. Legge di Ampere*
- 3. Legge di Biot-Savart*
- 4. Campi magnetici nei materiali*
- 5. Induzione magnetica*

Moto di cariche in un conduttore

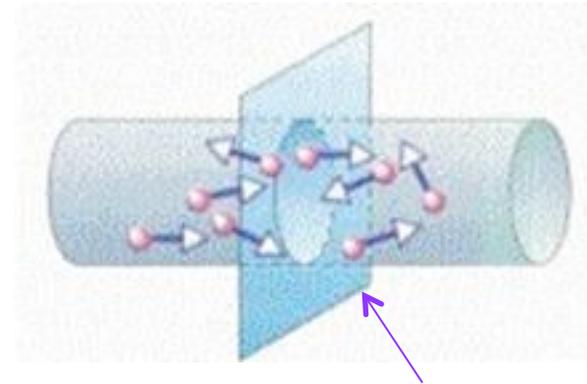
Fino ad ora abbiamo considerato problemi in cui, salvo che in un breve intervallo di tempo iniziale (transitorio), le forze elettriche erano in equilibrio e le cariche quindi rimanevano a riposo (elettrostatici)

Esistono invece problemi comuni nella vita di tutti i giorni in cui le forze elettriche sono squilibrate e si ha un moto di cariche elettriche (elettrodinamici)

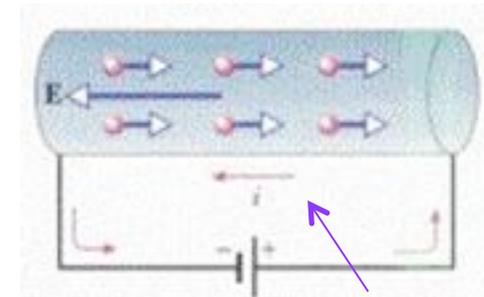
In un conduttore in condizione di equilibrio elettrostatico il moto degli elettroni è completamente disordinato per cui la velocità media di essi è nulla e non è presente corrente.

Per ottenere un moto ordinato è necessario sottoporre gli elettroni ad un campo elettrico e per fare ciò bisogna applicare una differenza di potenziale ai capi del conduttore. Questo spiega lo stretto legame che sussiste fra tensione e corrente elettrica.

Convenzionalmente il verso della corrente è quello delle cariche positive (anche se i portatori sono negativi)



agitazione termica: $v=10^6$ m/s
 $E=0$: flusso medio nullo



le cariche hanno un moto netto all'interno del conduttore
la condizione non è più (elettro)statica

Pila elettrica

*Il moto delle cariche si dice **corrente elettrica**. Una corrente scorre in un conduttore quando il **campo elettrico al suo interno non è nullo** (come in elettrostatica)*

*Il mezzo per produrre correnti elettriche è il **generatore***

*Il primo generatore (la **pila**) fu inventato da Alessandro Volta agli inizi del 1800. Da quel momento fu possibile eseguire esperimenti di elettrodinamica e realizzare dispositivi che sfruttassero le correnti elettriche*

*Le pile di Volta erano costituite da **coppie di metalli diversi immersi in un mezzo conduttore umido***



Generatori elettrici

Una pila elettrica si può realizzare immergendo due sbarrette (dette **elettrodi**) di metalli diversi (es. rame e zinco) oppure una di carbone e una metallica in una soluzione acquosa **acida** (detta **elettrolita**).

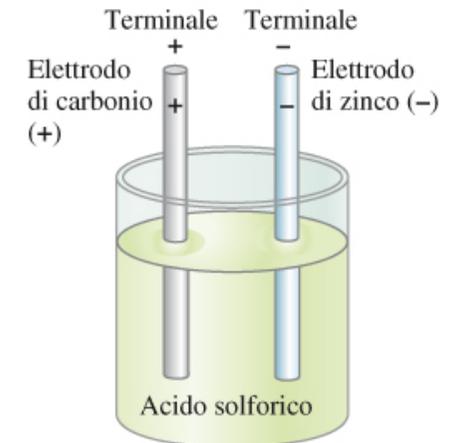
Tale sistema è detto appunto: **cella elettrolitica**.

Collegando più celle in serie (elettrodo negativo di una cella con positivo dell'altra) si ottiene una **batteria** di celle (da cui il nome dato ad es. a quella dell'auto)

Nella **pila zinco-carbone**, l'acido tende a corrodere lo zinco che passa in soluzione come **ione positivo** lasciando due elettroni di valenza all'elettrodo che quindi si carica **negativamente**

Corrispondentemente, anche a causa di altre reazioni chimiche, l'elettrodo di carbone **perde elettroni e si carica positivamente**

Se non passa corrente esternamente, il processo si arresta quando la concentrazione di ioni di zinco arriva ad un certo livello



Generatori elettrici

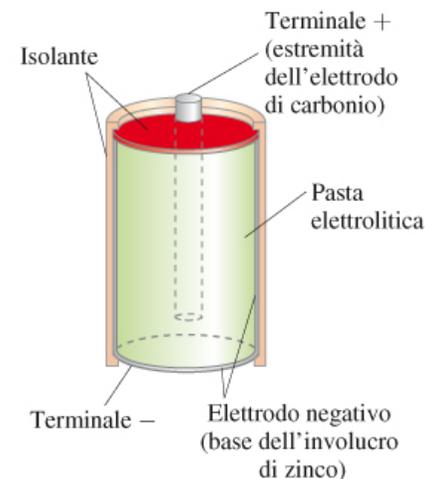
Se invece si collega con un conduttore l'elettrodo di carbone con quello di zinco, passa corrente e il processo si riattiva fino a quando la barretta di zinco non è completamente consumata.

Fino a quel momento la pila mantiene una differenza di potenziale quasi costante tra i due elettrodi

Nelle comuni pile zinco-carbone, la soluzione acquosa è sostituita da una pasta acida contenuta in un involucro cilindrico di zinco (polo -), al centro del quale è posto l'elettrodo di carbone (polo +)

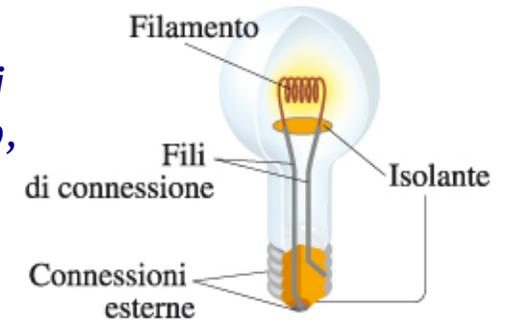
Ogni elemento di questo tipo mantiene una tensione di circa 1.5 V tra i due elettrodi

Nel caso si voglia una differenza di potenziale (o tensione) maggiore si possono collegare in serie più pile da 1.5 V e la tensione totale viene moltiplicata per il numero di elementi



Circuiti elettrici

La tensione di una batteria può essere collegata a vari dispositivi elettrici come ad es. una lampadina, costituita da un sottile filo di tungsteno, posto in un'ampolla di vetro in cui è realizzato il vuoto, che quando è percorso da corrente diventa **incandescente** producendo così **luce e calore**.



Nel circuito scorre una **corrente elettrica** che è definita come la **quantità di carica** che passa dal polo positivo a quello negativo nell'unità di tempo

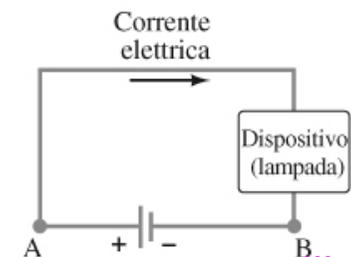
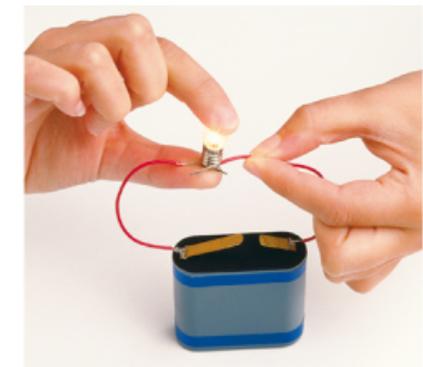
Quindi si può definire la **corrente media** come

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

Facendo tendere a zero l'intervallo di tempo si definisce la **corrente istantanea** come

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

In entrambi i casi la corrente si misura in **Coulomb/secondo** che prende il nome di **Ampere [A]**



Circuiti elettrici

Perchè scorra la corrente occorre che il circuito sia chiuso e che includa i due poli della batteria.

Nel caso a) non scorre corrente (il circuito è aperto e non include il polo negativo)

Nel caso b) non scorre corrente (il circuito è chiuso ma non include il polo negativo)

Nel caso c) scorre corrente (il circuito è chiuso e include entrambi i poli)

Come detto il verso positivo della corrente è convenzionalmente dal polo positivo a quello negativo anche se in realtà il flusso reale di cariche (gli elettroni negativi) è in direzione opposta.

A volte il circuito si può chiudere collegando solo un polo a un terminale del dispositivo ma collegando a terra (o "a massa") l'altro polo e l'altro terminale del dispositivo

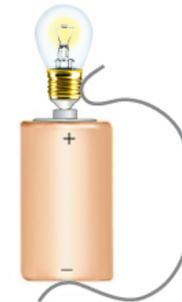
In un'auto il telaio funziona come terra o massa



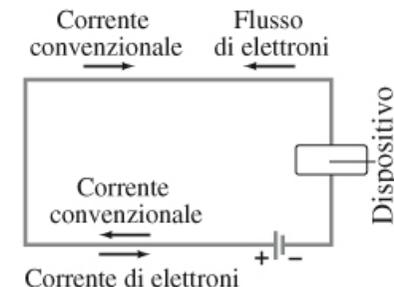
(a)



(b)



(c)



Legge di Ampere

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$$

Campo di induzione magnetica

Corrente totale che attraversa una qualsiasi superficie delimitata da C

Integrale sul percorso chiuso C

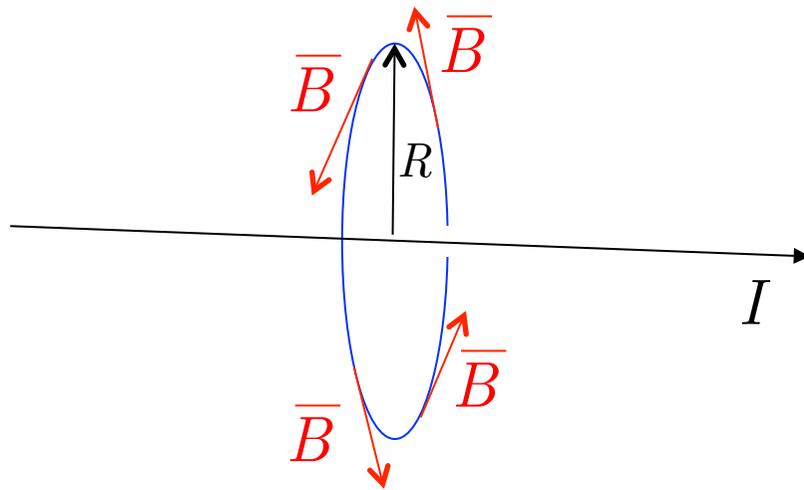
Elemento infinitesimo di percorso

Permeabilità magnetica del vuoto

Il campo di induzione magnetica è generato da una corrente elettrica. Le linee di forza del campo sono chiuse su se stesse e circondano la corrente.

Legge di Ampere - filo percorso da corrente

Se il percorso chiuso è una circonferenza che circonda il filo percorso da corrente, per simmetria il campo di induzione magnetica deve avere lo stesso modulo in qualsiasi punto della circonferenza a distanza R dal filo, e, sempre per simmetria, deve essere tangente alla circonferenza in qualsiasi punto di questa

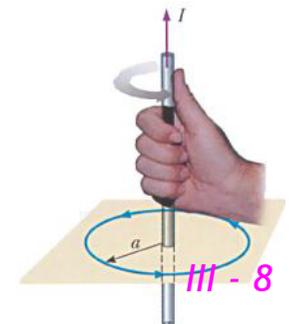


$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \oint_C B dl =$$

$$B \oint_C dl = B 2\pi R = \mu_0 I$$

$$\Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

NOTA: la direzione di B segue la regola della mano destra



Solenoidi

Si chiama solenoide un filo percorso da corrente elettrica costituito da una serie di spire arrotolate a elica come in figura

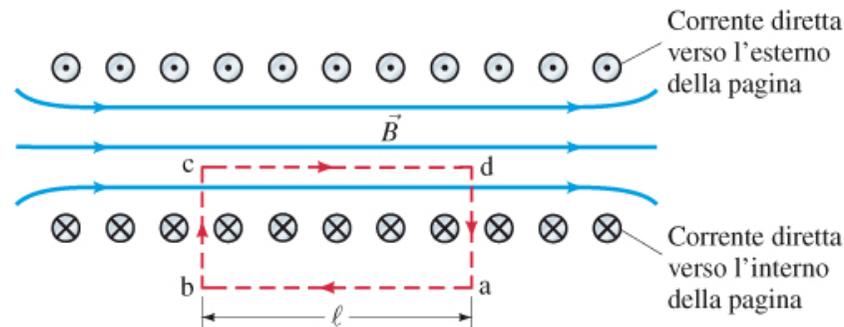
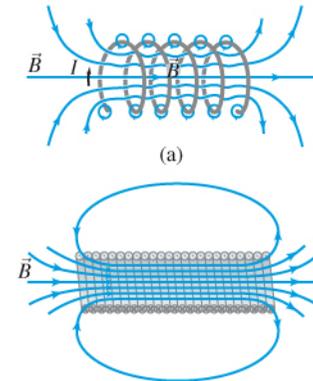
Sebbene in prossimità di ogni singolo filo le linee di forza del campo siano circolari, man mano che ci si allontana dai fili, nella parte interna esse tendono ad assumere una forma rettilinea, uniforme e parallela all'asse del solenoide

Nella parte esterna invece il campo è molto debole (eccetto che in prossimità degli estremi)

L'integrale lungo curva tratteggiata rossa vale

$$\mu_0 I = \oint_{abcd} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = B\ell$$

poiché lungo il percorso esterno il campo è trascurabile e lungo i percorsi laterali è perpendicolare al percorso



Solenoidi

Per la legge di Ampere

$$\oint_{abcd} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = Bl = \mu_0 NI$$

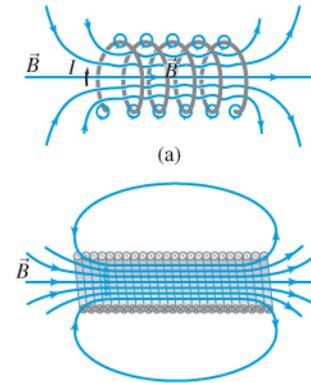
Dove N è il numero di spire che intercettano il percorso chiuso e I è la corrente nel filo

Si deduce quindi che internamente al solenoide il campo vale

$$B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I = \mu_0 n I$$

Dove n è il numero di spire per unità di lunghezza

Si può anche notare come il campo esterno al solenoide sia molto simile a quello di un magnete permanente con il polo N a destra e il S a sinistra



Legge di Biot-Savart

La legge di Ampere è molto generale ma si riesce ad utilizzare praticamente solo in condizioni particolari (campo simmetrico o uniforme)

Negli altri casi è preferibile utilizzare la legge ricavata da Biot e Savart

Essa afferma che il contributo al campo magnetico fornito da un elemento di conduttore percorso dalla corrente I in un punto posto ad una distanza r dall'elemento stesso è dato da

$$\overline{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\overline{d\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$

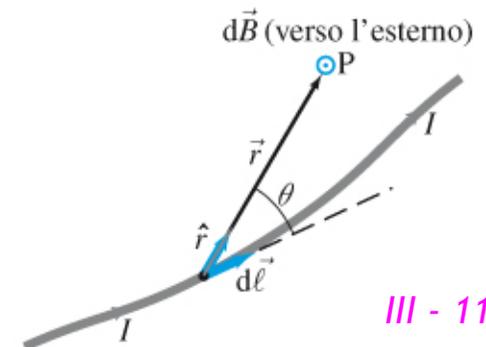
Il modulo del contributo vale quindi

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\ell}{r^2} \sin \theta$$

Dove θ è l'angolo formato dalle direzioni dell'elemento conduttore e del raggio vettore

Il campo totale si ottiene integrando su tutta la lunghezza del filo

$$\overline{B} = \int \overline{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{\overline{d\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$



Forza tra fili percorsi da correnti

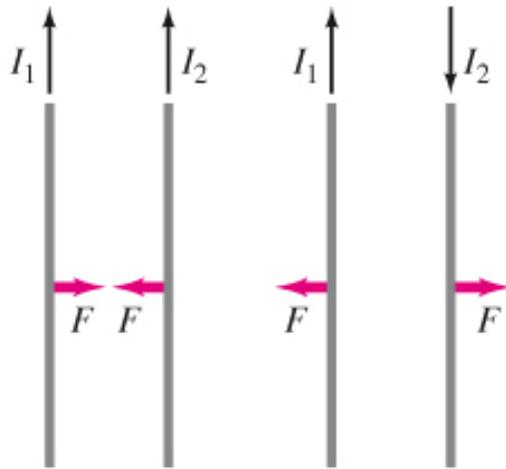
Se i fili percorsi da corrente sono due, entrambi produrranno un campo magnetico e quindi eserciteranno una forza l'uno sull'altro

Il modulo del campo (anulare) generato dal filo 1 vale

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

Il filo 2 è perpendicolare in ogni punto a tale campo quindi subisce una forza

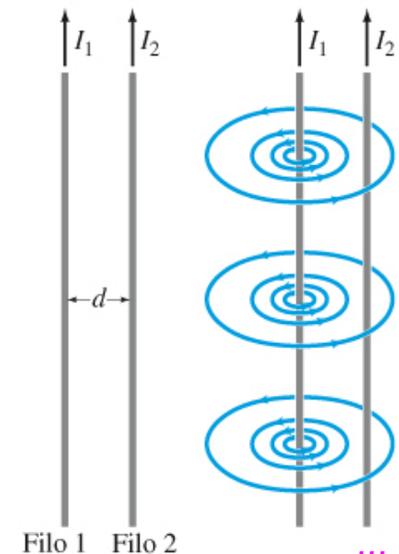
$$F_2 = I_2 \ell_2 B_1 = \frac{\mu_0 I_2 I_1}{2\pi d} \ell_2$$



Con la regola della mano destra si può dedurre che

se le due correnti sono **concordi** la forza è **attrattiva**

mentre se sono **discordi** la forza è **repulsiva**



Unità di misura

Il valore della permeabilità magnetica del vuoto ($\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$) non è il risultato di una misura sperimentale (come ad es. ϵ_0) ma un valore imposto

Esso infatti deriva dalla scelta dell'unità di misura della corrente elettrica (Ampere) in relazione a quella delle unità della massa del tempo e dello spazio.

L'Ampere è definito proprio attraverso la misura della forza di attrazione tra due fili paralleli percorsi da corrente, imponendo che la permeabilità magnetica sia $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$

Se la distanza d tra i fili è di 1 m, e la corrente I che passa in ognuno è di 1 A la forza magnetica per unità di lunghezza del filo vale

$$\frac{F}{\ell} = \frac{1}{\ell} \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_2 I_1}{d} \ell = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_2 I_1}{d} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \frac{1 \cdot 1}{1} = 2 \times 10^{-7} \text{ Nm}^{-1}$$

Cioè l'Ampere è per definizione quella corrente che produce una forza di 2×10^{-7} N tra due fili paralleli lunghi 1 m e posti a 1 m di distanza

Tale procedura è stata preferita a una definizione del Coulomb, attraverso la misura della forza elettrostatica tra due cariche, perchè più facile da realizzare

Unità di misura

Da $F = I\ell B$:

$$[B] = \left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} \right] = [\text{T}] = \text{Tesla}$$

Ancora usato: $[G] = \text{Gauss} = 10^{-4} T$

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \text{N}^{-1} \text{A}^2 \cong 8.8541878 \times 10^{-12} \text{N}^{-1} \text{m}^{-2} \text{C}^2$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{NA}^{-2} \cong 1.2566371 \times 10^{-6} \text{NA}^{-2}$$

Legge di Biot-Savart - campo di una spira

Nel tratto più in alto della spira, il contributo al campo di induzione magnetica in un punto posto sull'asse della spira è perpendicolare a \vec{r} e per la legge di Biot-Savart ha intensità (modulo)

$$dB = \frac{\mu_0 I d\ell}{4\pi r^2}$$

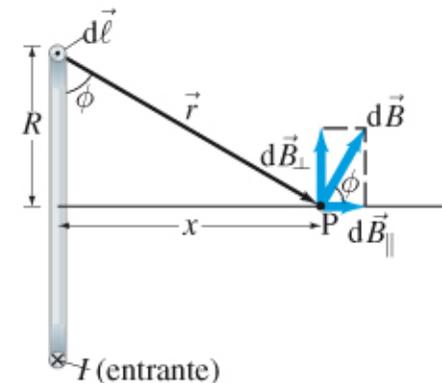
Possiamo scomporlo nelle sue componenti perpendicolari e parallele all'asse della spira

Sommando su tutti gli elementi della spira, le condizioni di simmetria implicano che le componenti perpendicolari all'asse si annullano mentre le componenti parallele valgono

$$B_{\parallel} = \int dB \cos \phi = \int \frac{\mu_0 I d\ell}{4\pi r^2} \frac{R}{r}$$

poiché tutti i segmenti si trovano alla stessa distanza r dal centro della spira

$$\begin{aligned} B &= B_{\parallel} = \frac{\mu_0 I R}{4\pi (R^2 + x^2)^{3/2}} \int d\ell = \\ &= \frac{2\pi R \mu_0 I R}{4\pi (R^2 + x^2)^{3/2}} \int d\ell = \frac{\mu_0 I R^2}{2 (R^2 + x^2)^{3/2}} \end{aligned}$$



Prodotto vettoriale

La relazione **vettoriale** esistente tra elemento di filo e congiungente filo-punto di misura corrisponde ad una forma di prodotto tra i due vettori detta **prodotto vettoriale**

Il prodotto vettoriale tra due vettori \vec{A} e \vec{B} è un vettore \vec{C} che viene indicato con

$$\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B}$$

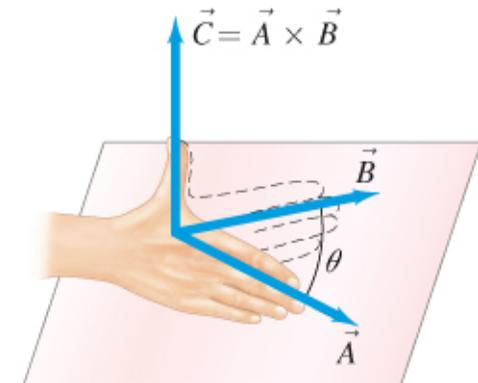
Il cui **modulo** è pari appunto a

$$C = |\vec{A} \times \vec{B}| = AB \sin \theta$$

essendo θ l'angolo formato dai due vettori

La **direzione** è **perpendicolare** ad entrambi i vettori di partenza e il **verso** si stabilisce con la regola della **mano destra**:

si orienta la **mano tesa** in direzione del primo vettore (\vec{A}) se piegando la mano **le dita** si orientano nella **direzione** del **secondo vettore** (\vec{B}) allora la direzione di \vec{C} è quella indicata dal pollice



Prodotto vettoriale

In termini di componenti cartesiane il prodotto vettoriale di due vettori definiti come

$$\vec{A} = A_x \hat{i} + A_y \hat{j} + A_z \hat{k}$$

$$\vec{B} = B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k}$$

si calcola come il **determinante** di una matrice in cui nella prima riga sono messi i versori degli assi e nella seconda e terza le componenti cartesiane dei due vettori da moltiplicare

$$\begin{aligned} \vec{A} \times \vec{B} &= \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = \hat{i} \begin{vmatrix} A_y & A_z \\ B_y & B_z \end{vmatrix} - \hat{j} \begin{vmatrix} A_x & A_z \\ B_x & B_z \end{vmatrix} + \hat{k} \begin{vmatrix} A_x & A_y \\ B_x & B_z \end{vmatrix} = \\ &= \hat{i} (A_y B_z - A_z B_y) - \hat{j} (A_x B_z - A_z B_x) + \hat{k} (A_x B_y - A_y B_x) \end{aligned}$$

ovvero, cambiando il segno della seconda parentesi:

$$\boxed{\vec{A} \times \vec{B} = (A_y B_z - A_z B_y) \hat{i} + (A_z B_x - A_x B_z) \hat{j} + (A_x B_y - A_y B_x) \hat{k}}$$

Proprietà del prodotto vettoriale

Per il prodotto vettoriale valgono alcune proprietà che utilizzeremo in seguito:

il prodotto di un vettore per se stesso (e più in generale di due vettori che hanno la stessa direzione) è nullo

$$\vec{A} \times \vec{A} = 0$$

in quanto l'angolo compreso θ è nullo e quindi il modulo del prodotto è nullo

Per il prodotto vettoriale non vale la proprietà commutativa infatti scambiando l'ordine dei fattori si ottiene il vettore opposto

$$\vec{A} \times \vec{B} = -\vec{B} \times \vec{A}$$

Campi magnetici nei materiali

Il campo magnetico di un solenoide che abbiamo calcolato in precedenza

$$B_0 = \mu_0 n I$$

Vale solo se all'interno del solenoide c'è il vuoto o l'aria

In presenza di un materiale diverso, si produce un campo aggiuntivo di magnetizzazione (dovuto alla polarizzazione magnetica degli atomi del materiale) che va a sommarsi o a sottrarsi a quello a vuoto nella stessa direzione

$$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}_M$$

Tale campo di magnetizzazione è proporzionale al campo iniziale nel vuoto e

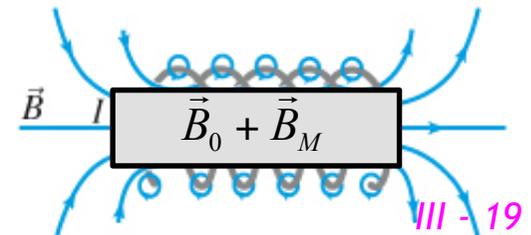
$$B_M = \chi_m B_0 = \chi_m \mu_0 n I$$

dove χ_m (a volte indicata con il simbolo K_m) è una quantità, positiva o negativa, detta suscettività magnetica che dipende dal materiale

Il campo totale vale quindi

$$B = B_0 + B_M = B_0 + \chi_m B_0 = (1 + \chi_m) \mu_0 n I = \mu n I$$

dove μ è detta permeabilità magnetica assoluta del materiale



Campi magnetici nei materiali

Si definisce invece *permeabilità magnetica relativa* il rapporto

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi_m = 1 + K_m$$

I materiali la cui permeabilità relativa è leggermente **maggiore di 1** sono detti **paramagnetici**, quelli per cui è leggermente **inferiore a 1** sono detti **diamagnetici**. Il **ferro ed alcuni altri metalli** possiedono permeabilità molto maggiori di 1 e sono detti **ferromagnetici**

Quindi i materiali **paramagnetici e ferromagnetici** hanno **suscettività positiva** mentre quelli **diamagnetici** hanno **suscettività negativa**

Sostanza paramagnetica	χ_m	Sostanza diamagnetica	χ_m
Alluminio	2.3×10^{-5}	Rame	-9.8×10^{-6}
Calcio	1.9×10^{-5}	Diamante	-2.2×10^{-5}
Magnesio	1.2×10^{-5}	Oro	-3.6×10^{-5}
Ossigeno (STP)*	2.1×10^{-6}	Piombo	-1.7×10^{-5}
Platino	2.9×10^{-4}	Azoto (STP)	-5.0×10^{-9}
Tungsteno	6.8×10^{-5}	Silicio	-4.2×10^{-6}

* STP: *Standard Temperature and Pressure*, condizioni standard di temperatura e di pressione.

Magneti

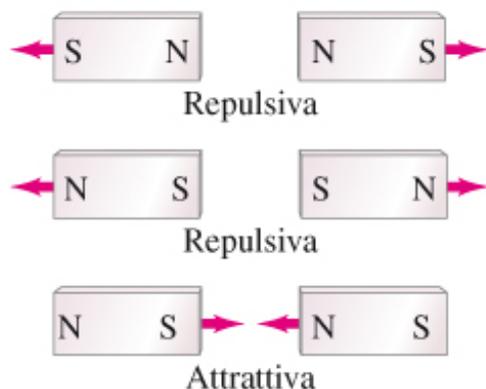
Chiunque ha avuto l'esperienza di un magnete che attrae chiodi e piccoli oggetti di ferro

Qualunque forma abbia, esso possiede comunque due poli in cui gli effetti sono più intensi

Se una barretta magnetizzata è appesa a un sostegno che le permette di ruotare, essa si orienta sempre in direzione Nord-Sud e come tale è stata usata, dal Medio Evo almeno, come bussola per guidare la navigazione.

Il polo che punta verso il nord è detto polo Nord, quello che punta verso sud polo Sud

Due magneti esercitano l'uno rispetto all'altro una forza a distanza che è repulsiva se i poli vicini sono uguali (sud-sud o nord-nord) e attrattiva se sono diversi (nord-sud)



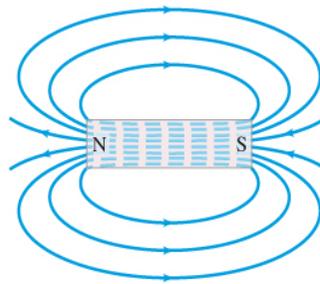
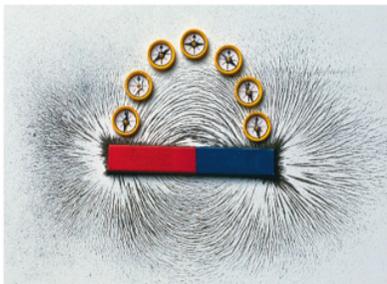
Magneti

I poli magnetici non appaiono mai isolati. Se si spezza in due un magnete i due pezzi presentano ancora un polo N e un S

*Solo il ferro e pochi altri materiali come il cobalto e il nichel mostrano **effetti magnetici intensi**. Essi vengono detti materiali **ferromagnetici**. Altri materiali presentano effetti magnetici più deboli*

*Così come è stato introdotto il campo elettrico, si può ipotizzare che attorno al magnete sia presente un **campo magnetico** che può agire su magneti che sono posti all'interno di tale campo*

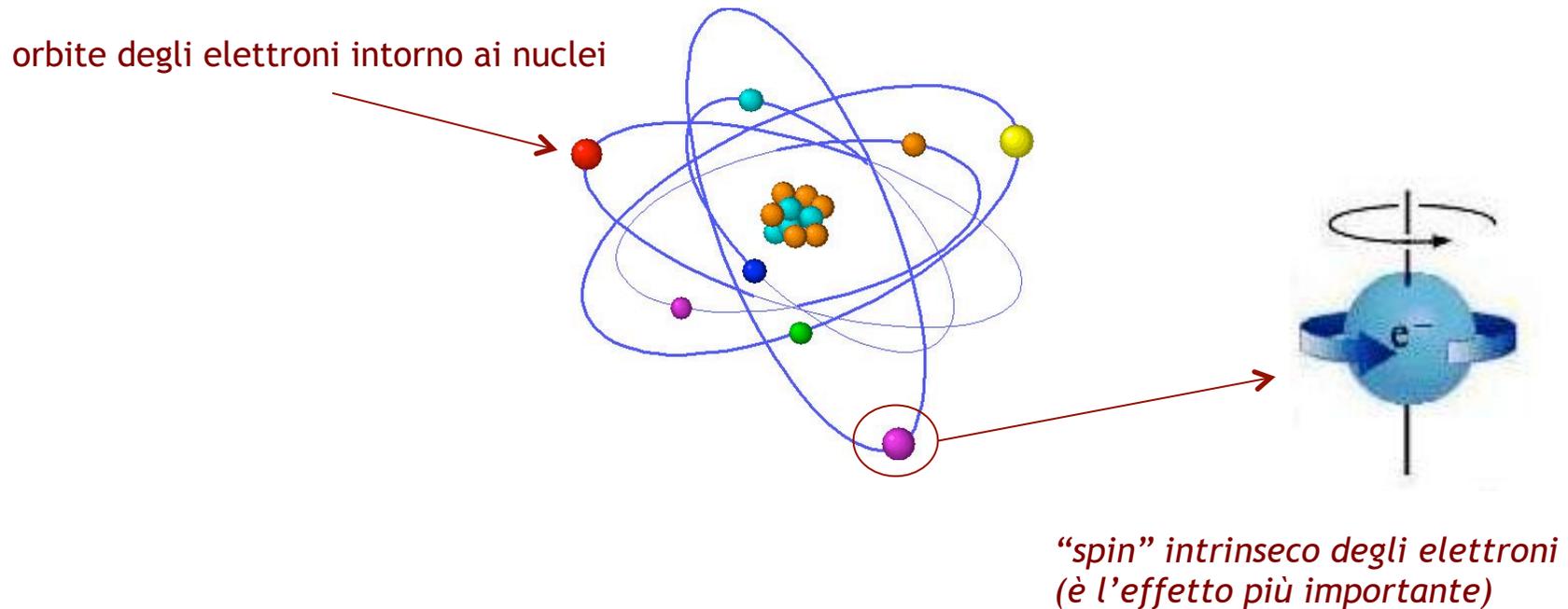
*Come per il campo elettrico, è possibile tracciare le **linee di forza magnetiche** che escono dai poli positivi (N) ed entrano in quelli negativi (S)*



Origine del magnetismo nei materiali

La corrente in un filo che è avvolto in forma cilindrica (solenoido) produce un campo molto simile a quello generato da una barra magnetica permanente.

Pertanto, la comprensione dell'origine del campo generato da un magnete risiede nella conoscenza delle "correnti" a livello atomico presenti nella materia.



Non esiste una "carica magnetica"

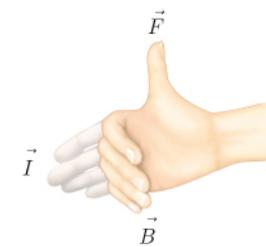
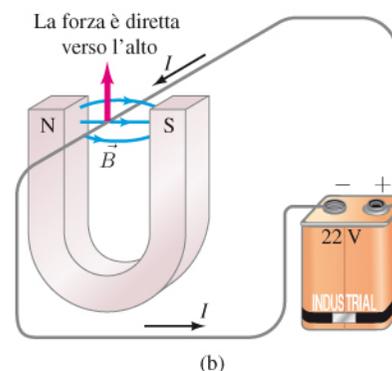
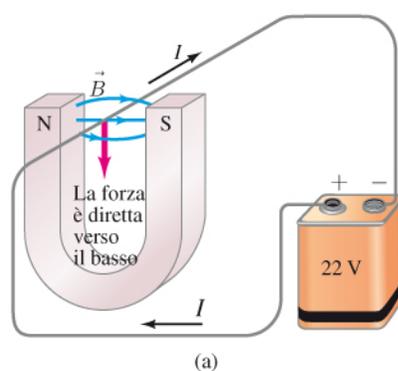
Magneti e correnti

Un filo percorso da corrente **esercita una forza magnetica**, orientando le bussole lungo circonferenze centrate sul filo.

Sulla base del III principio di Newton è ragionevole supporre che un magnete **induca una forza sulla corrente elettrica** e in effetti ciò è stato verificato sperimentalmente da Oersted

Un filo percorso da corrente ed immerso nel campo prodotto da un magnete è soggetto ad una **forza diretta perpendicolarmente** sia alle linee di forza magnetiche che alla direzione della corrente

Il verso si stabilisce con la **regola della mano destra**: se le dita dirette nel verso positivo della corrente, piegandosi a 90° , indicano il verso positivo del campo magnetico, allora il pollice indica il verso della forza magnetica



(c) Regola della mano destra

Forza magnetica

poiché la corrente elettrica subisce una forza da parte di un campo magnetico, la stessa cosa deve accadere anche a cariche libere prese singolarmente

Una **particella carica libera** q che si muove con velocità v lungo un tratto ℓ corrisponde allo scorrere lungo tale tratto di una corrente

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q \ell}{\ell t} = \frac{q}{\ell} v$$

Di conseguenza la forza agente sulla particella vale

$$\vec{F} = I \vec{\ell} \times \vec{B} = \frac{q}{\ell} v \vec{\ell} \times \vec{B} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

dove \vec{v} è la velocità (vettoriale) della particella carica

La forza prende il nome di “**forza di Lorentz**”, il suo modulo è

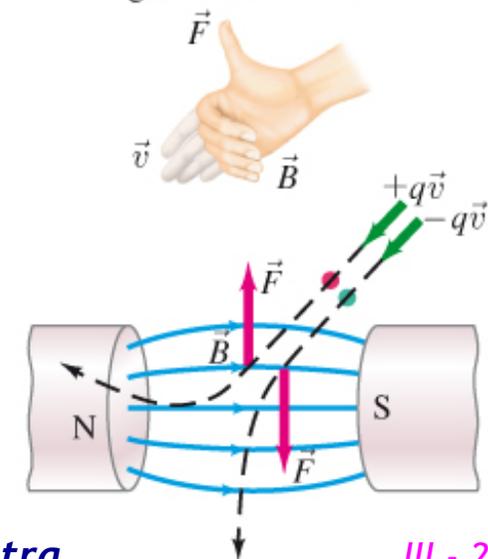
$$F = qvB \sin \theta$$

Tale forza è massima se $\theta=90^\circ$ (velocità perpendicolare al campo) nel qual caso vale

$$F = qvB$$

Il verso della forza si calcola ancora con la **regola della mano destra**

Regola della mano destra



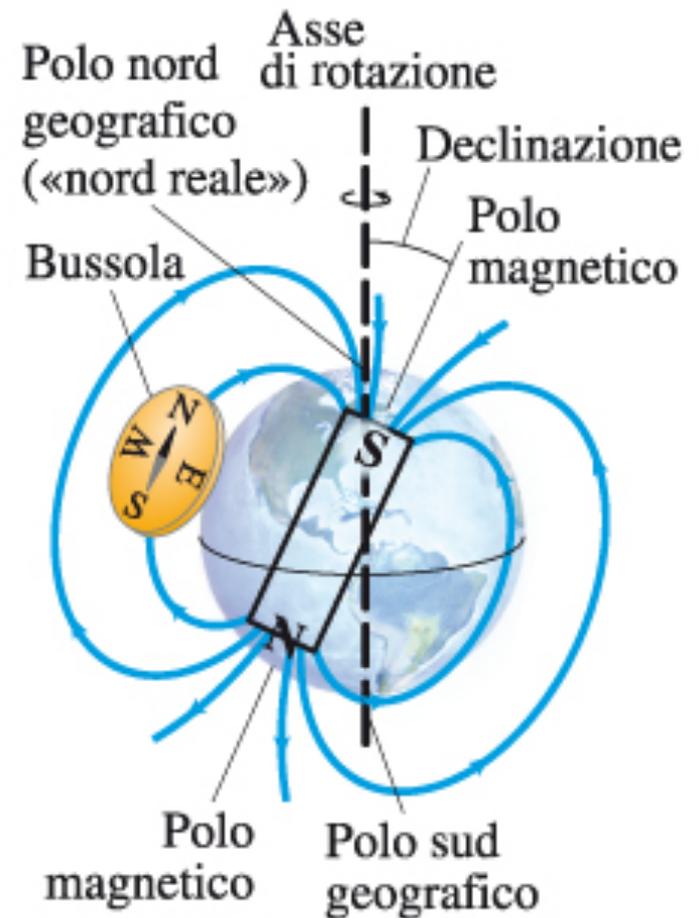
Campo magnetico terrestre

La Terra presenta linee di forza magnetiche come se esistesse un enorme magnete al suo interno. poiché i poli nord dei magneti sono attratti verso il polo nord geografico, il polo magnetico che si trova in prossimità di questo è, in realtà, un un polo sud magnetico (negativo)

Campo magnetico terrestre: da 20,000 nT all'equatore a circa 70,000 nT ai poli



Aurora boreale: luce emessa da particelle cosmiche che spiralizzano nel campo magnetico terrestre vicino alla superficie della Terra



Flusso magnetico

Si definisce **flusso del campo magnetico** attraverso una superficie (piana) di area A

$$\Phi_B = B_{\perp} A = BA \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

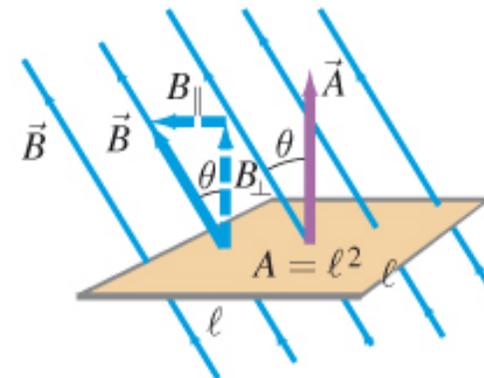
se B è uniforme su tutta la superficie, e dove il vettore area ha come direzione la normale alla superficie

Nel caso in cui il campo non sia uniforme e l'area non sia piana il flusso si definisce

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Se le linee di forza sono tracciate in numero proporzionale al campo, il flusso è proporzionale al numero di linee di forza che attraversano la superficie

Il flusso magnetico si misura in **Weber [Wb]** che equivale a $[Tm^2]$

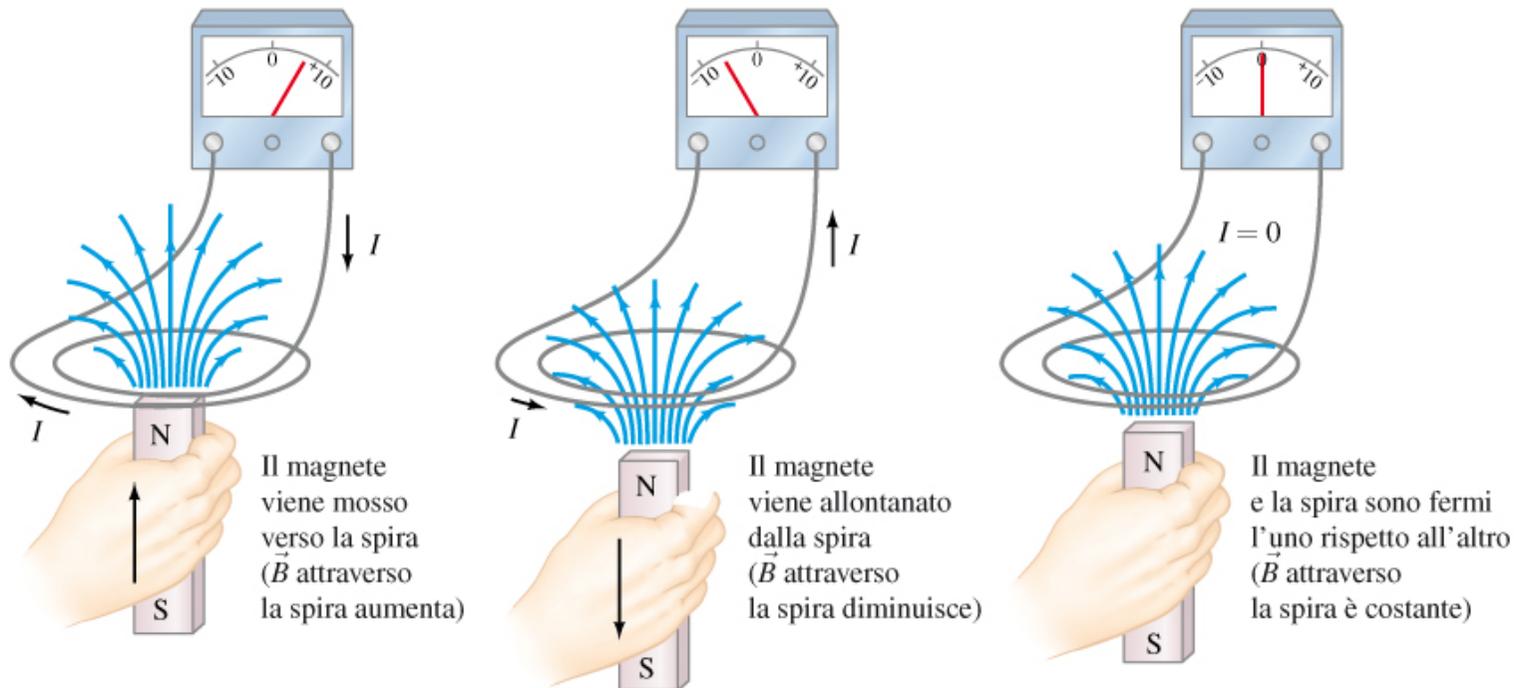


Variazione di flusso

Faraday (anni 1830-1840) ha dimostrato che una **variazione del campo di induzione magnetica** (prodotto ad es dall'avvicinamento o allontanamento del magnete) induce una **differenza di potenziale all'interno nella spira pari a**

$$V = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

cioè pari alla velocità di variazione del flusso magnetico

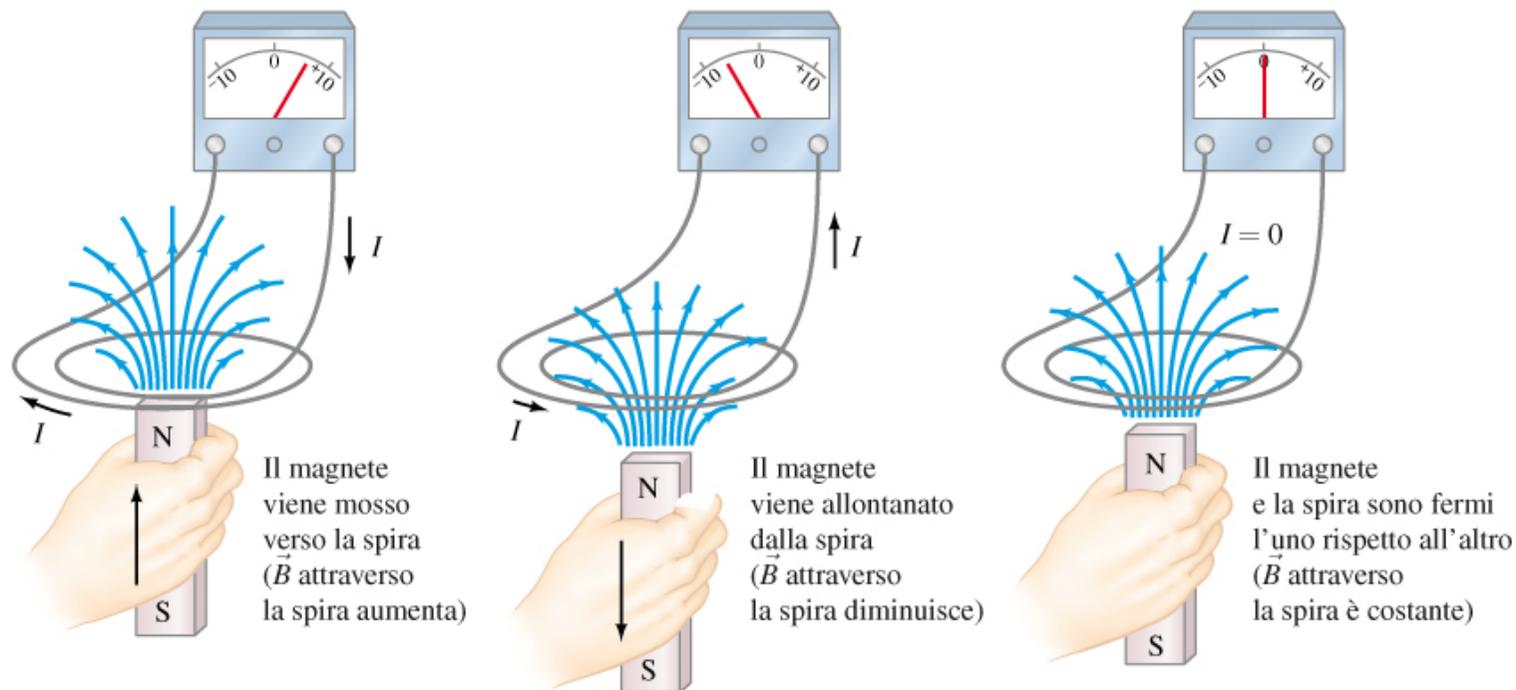


Variazione di flusso

I segni meno nelle equazioni indicano che la corrente prodotta dalla variazione di campo magnetico è tale da generare un campo magnetico che si oppone alla variazione di flusso del campo originario

Questa ultima affermazione è detta anche legge di Lenz

Se il magnete si avvicina alla spira e quindi il flusso aumenta, la corrente genera un campo verso il basso. Se il magnete si allontana e quindi il flusso diminuisce la corrente genera un campo verso l'alto



Legge di Faraday

Se nella spira si genera una differenza di potenziale V allora si genera anche un campo elettrico E

Quindi un campo magnetico variabile produce un campo elettrico

La relazione tra differenza di potenziale e campo elettrico è data da

$$V_b - V_a = - \int_a^b \overline{E} \cdot \overline{d\ell}$$

Nel caso di una spira si tratta di un percorso chiuso quindi

$$V = \oint \overline{E} \cdot \overline{d\ell}$$

Combinandola con la legge di Faraday si ha

$$\oint \overline{E} \cdot \overline{d\ell} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Tale relazione vale in generale per ogni **circuito chiuso** che racchiude l'area attraverso la quale sta variando il flusso magnetico

Legge di Faraday

Occorre notare che in presenza di **sole forze elettrostatiche** l'integrale chiuso sarebbe sempre nullo (poichè il punto di arrivo è uguale a quello di partenza)

$$V = \oint \overline{E} \cdot \overline{d\ell} = 0$$

Questo è anche un modo per dire che **le forze elettrostatiche sono conservative** (la differenza di energia potenziale tra due punti non dipende dal percorso)

In presenza di forze magnetiche invece questo non avviene perchè possiamo avere una **V diversa da 0 anche su un circuito chiuso per effetto della variazione di flusso magnetico che attraversa il circuito**

$$\oint \overline{E} \cdot \overline{d\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Questo indica che **le forze sulle cariche elettriche dovute ad un campo magnetico variabile non sono conservative**

Interruttore salvavita

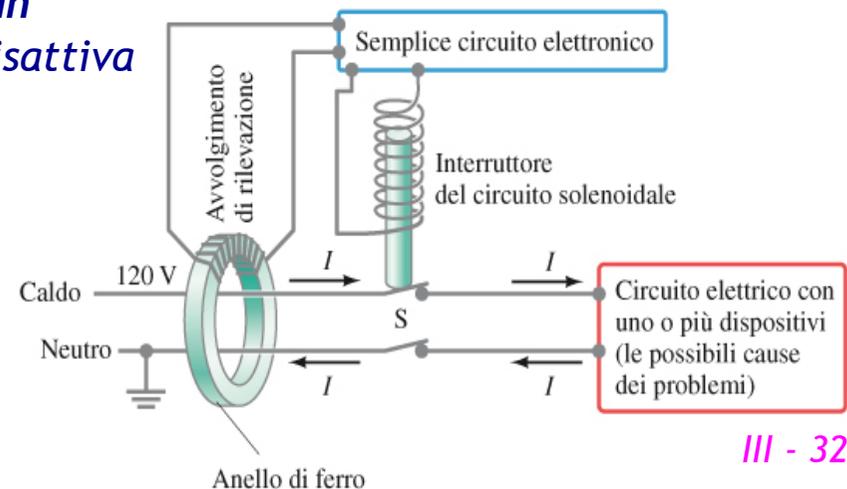
Gli impianti domestici ed industriali sono dotati di interruttori che tolgono l'alimentazione elettrica quando si verifica una perdita di corrente verso massa.

Si chiamano salvavita in quanto impediscono che scorrano attraverso il corpo di una persona che tocca accidentalmente fili scoperti, correnti superiori a 100-200 mA che ne potrebbero provocare la morte

Essi sono basati sul principio dell'induzione magnetica

In condizioni normali le correnti (alternate) in entrata ed in uscita sono uguali ed opposte, quindi non inducono campi magnetici nell'anello di ferro

Se si verifica un corto circuito verso massa in un punto dell'impianto la corrente di ritorno diventa minore di quella in entrata quindi lo squilibrio induce un campo magnetico che fa scattare il relais che disattiva la linea



Legge di Faraday

$$\mathcal{E} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Diagram illustrating the Faraday Law equation with labels for its components:

- \mathcal{E} : Potenziale elettrico (tradizionalmente chiamata "forza elettromotrice indotta")
- \oint_C : Integrale lungo la curva chiusa C
- \vec{E} : Campo elettrico
- $d\vec{l}$: Elemento di percorso
- $\frac{\partial}{\partial t}$: Integrale sulla superficie A delimitata da C
- \int_A : Integrale sulla superficie A delimitata da C
- \vec{B} : Campo di induzione magnetica
- $d\vec{A}$: Elemento di superficie
- $d\Phi$: Flusso del campo di induzione magnetica attraverso la superficie A

La variazione nel tempo del flusso del campo di induzione magnetica attraverso una superficie genera un campo elettrico le cui linee di forza sono chiuse su se stesse e circondano la variazione del campo di induzione magnetica.