FISICA

ElettroMagnetismo

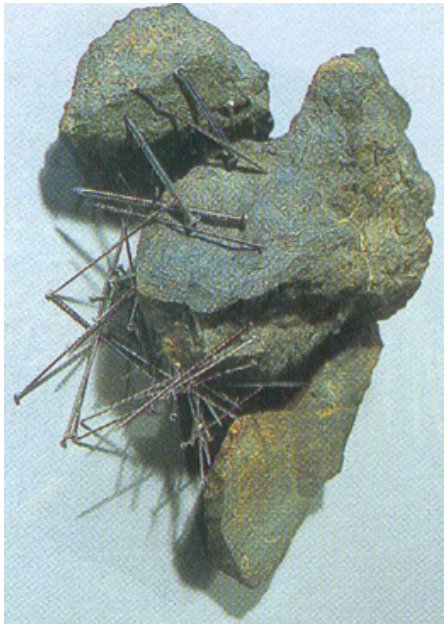
Fenomeni magnetici

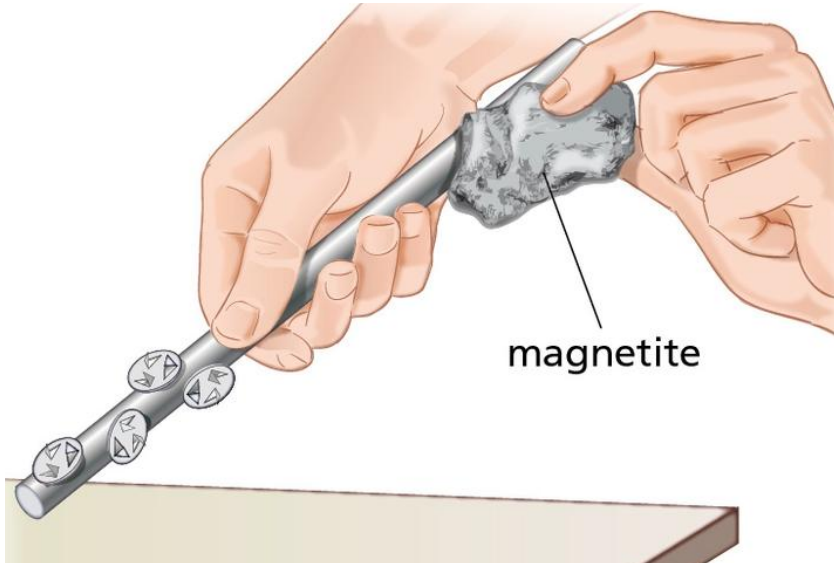
Autore: prof. ***Pappalardo Vincenzo***

docente di **Matematica e Fisica**

LA FORZA MAGNETICA E IL CAMPO MAGNETICO

La proprietà della magnetite (minerale di ferro) di attirare la limatura di ferro era già nota a **Talete di Mileto** nel 600 a.c. Pezzi di questo minerale di ferro trovati a Magnesia, nell'Asia Minore, furono chiamati magneti. La magnetite è un magnete naturale.





Si possono costruire anche calamite artificiali. Per esempio, una sbarretta di acciaio può essere magnetizzata avvicinandola a un pezzo di magnetite.

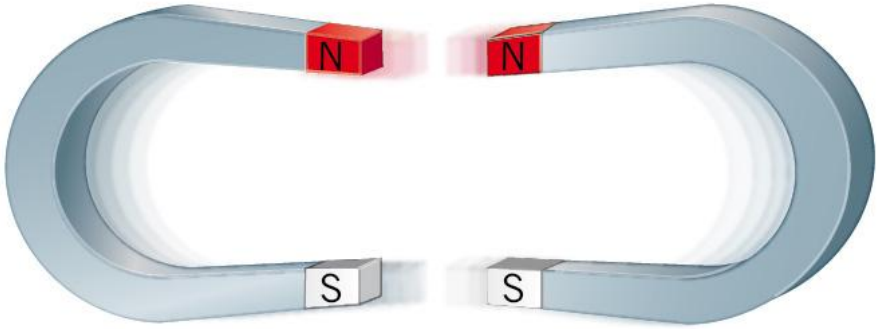
Si chiamano **sostanze ferromagnetiche** (ferro, acciaio, nichel, loro leghe) i materiali che possono essere magnetizzati.

Il **magnetismo** è una caratteristica dei magneti, grazie alla quale essi esercitano una forza a distanza su sostanze come il ferro, attirandole.

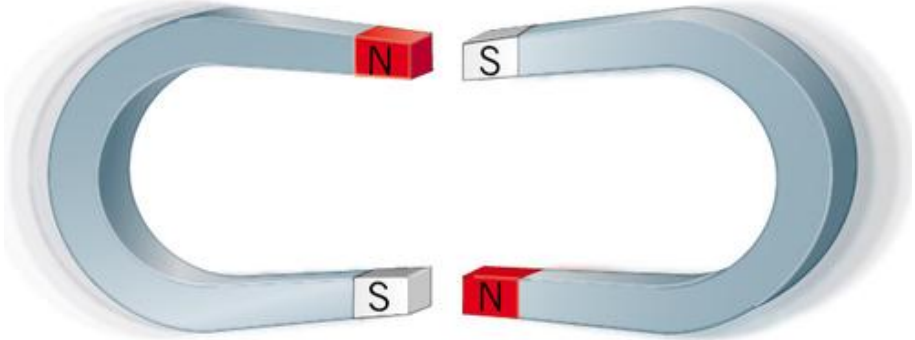
L'ago magnetico è una calamita che si dispone in modo che una delle due estremità (**polo Nord N**) si orienti verso il Nord terrestre e l'altra (**polo Sud S)** verso il Sud.

Gli esperimenti mostrano che:

Le calamite interagiscono fra loro con forze attrattive e repulsive: poli di nome diverso (N-S) si attraggono, come le cariche elettriche di segno opposto, mentre poli dello stesso nome (N-N e S-S) si respingono, come le cariche dello stesso segno.

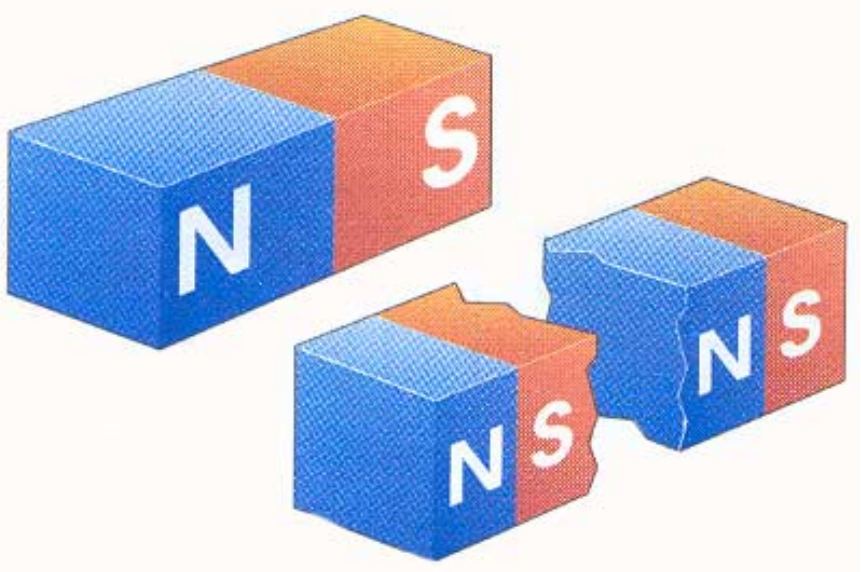


repulsione



attrazione

C'è però una notevole differenza fra i poli magnetici e le cariche elettriche: le cariche elettriche si possono separare, ossia la carica elettrica può agire da sola; non si può fare altrettanto con i poli magnetici. Infatti, se tagliamo in due una calamita, si ottengono due calamite. Continuando la suddivisione si ottengono sempre, da ogni singolo magnete, due nuovi magneti.



Teorie fisiche prevedono l'esistenza di poli magnetici separati, ma la ricerca sperimentale dei cosiddetti *monopoli magnetici* non ha ancora dato risultati positivi.

Il campo magnetico

In analogia con la forza gravitazionale e la forza elettrica, l'interazione fra due magneti si interpreta come l'azione che il campo magnetico generato da un magnete esercita sull'altro magnete.

Ogni magnete genera nello spazio che lo circonda un campo magnetico

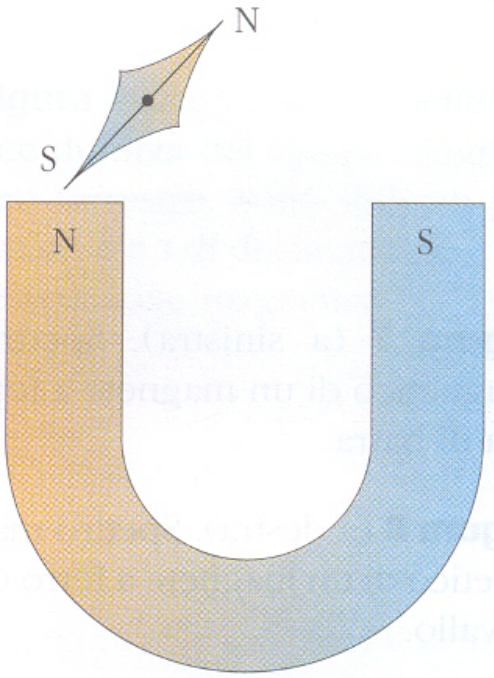
Il campo magnetico, indicato con **B**, è un campo vettoriale, cioè è caratterizzato da una direzione, un verso ed un modulo.

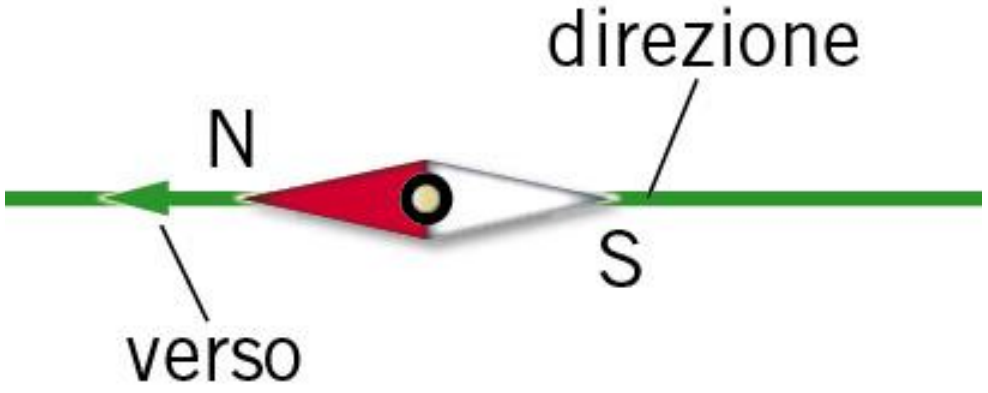
Determiniamo tali caratteristiche.

Per definire il campo elettrico e determinare le sue proprietà ci siamo serviti della carica di prova; per esplorare il campo generato da un magnete dobbiamo utilizzare un piccolo ago magnetico (**magnete di prova**).

Il magnete di prova deve generare un campo magnetico molto debole tale da non disturbare quello generato dal sistema che intendiamo esaminare.

Se poniamo il magnete di prova in un punto di un campo magnetico, osserviamo che l'ago ruota attorno al proprio centro fino a fermarsi, dopo qualche oscillazione, in una posizione di equilibrio.

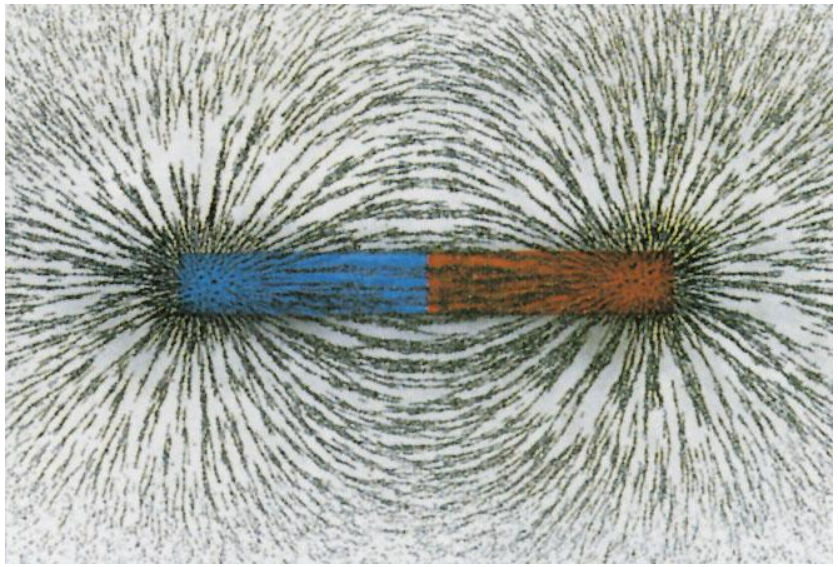




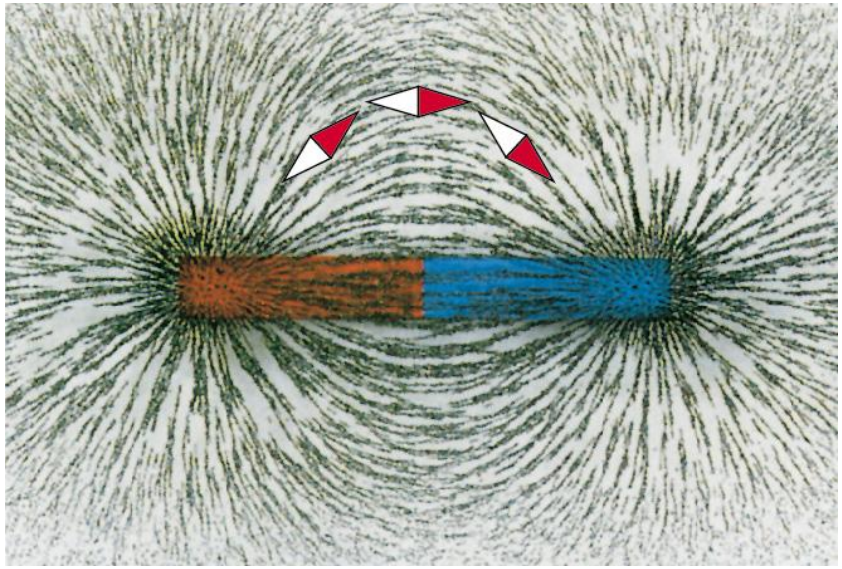
- **la direzione** è data dalla retta che unisce i poli nord e sud del magnete di prova;
- **il verso** va dal polo sud al polo nord del magnete di prova;
- **il modulo** sarà definito in seguito.

Come qualsiasi campo vettoriale, anche il campo magnetico può essere visualizzato mediante ***linee di forza***.

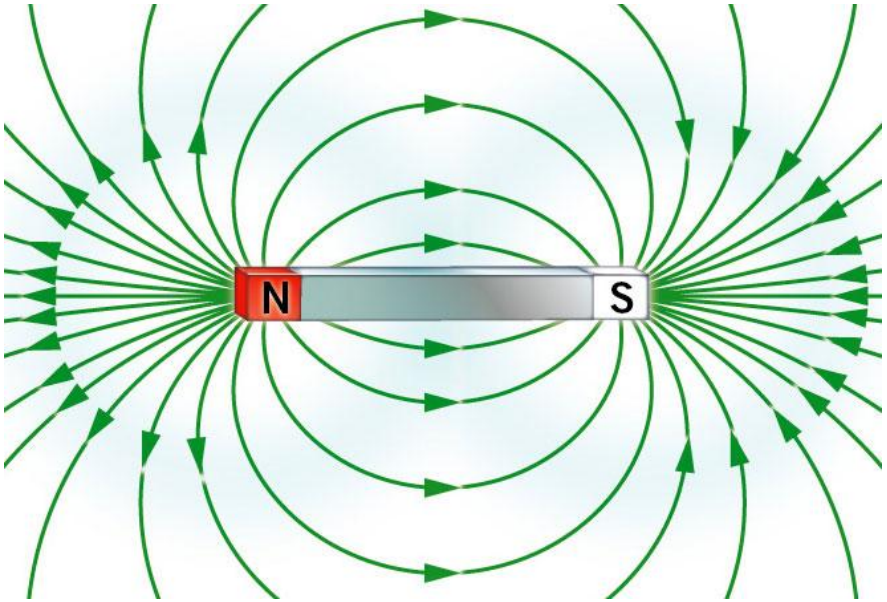
Visualizziamo il campo magnetico mettendo della limatura di ferro vicino a una calamita.



La limatura di ferro disegna delle linee che si accumulano sui poli della calamita.



Questo accade perché ogni frammento di ferro si magnetizza e si dispone lungo il campo.



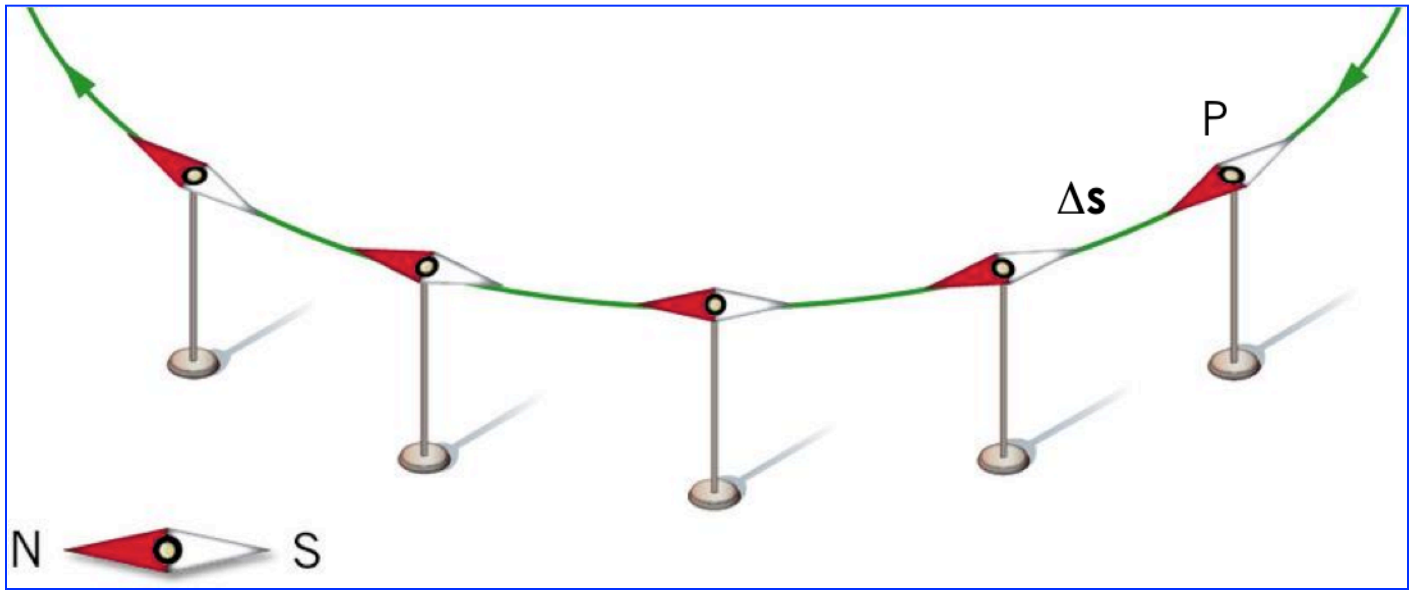
Il campo magnetico si schematizza tracciando alcune linee che seguono i disegni della limatura.

All'esterno le linee di forza escono dal polo N ed entrano nel polo S, assumendo un andamento analogo a quello delle linee di forza di un dipolo elettrico (uscenti dalla carica positiva ed entranti nella carica negativa).

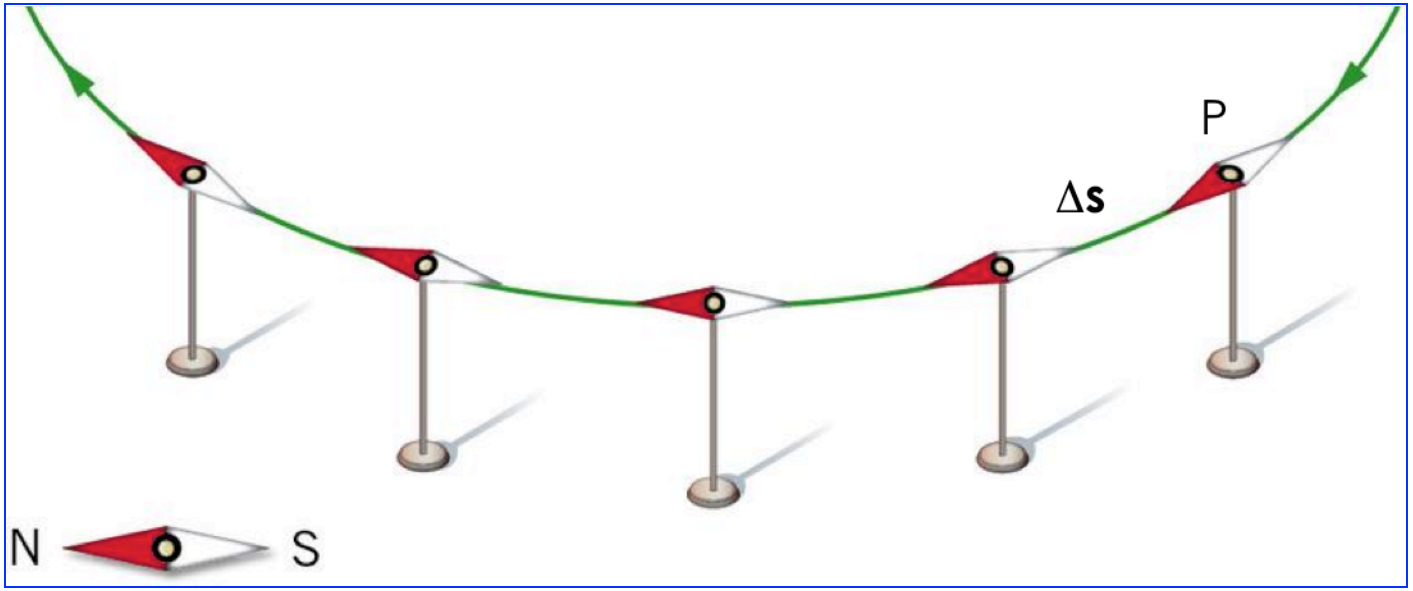
Tali linee proseguono all'interno del magnete, cioè sono delle linee chiuse.

Dal punto di vista matematico, le linee di campo magnetico si disegnano con lo stesso procedimento già visto per le linee di campo elettrico. La differenza è che, ora, al posto della carica di prova si usa un magnete di prova

Procedura: partendo da un punto P, osserviamo la direzione e il verso del campo magnetico in tale punto.

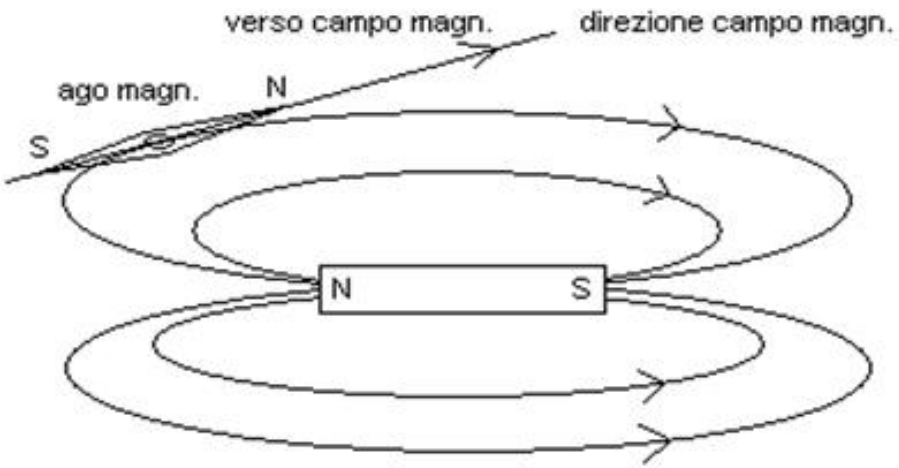


Spostiamo in tal senso l'ago di un tratto $\Delta \mathbf{s}$ molto piccolo, e determiniamo ancora il campo magnetico. Ripetiamo molte volte questa operazione (matematicamente parlando significa fare tendere a zero la lunghezza di $\Delta \mathbf{s}$, ossia fare l'operazione di limite), otteniamo la seguente linea:



Le linee del campo magnetico, così costruite, hanno le seguenti proprietà:

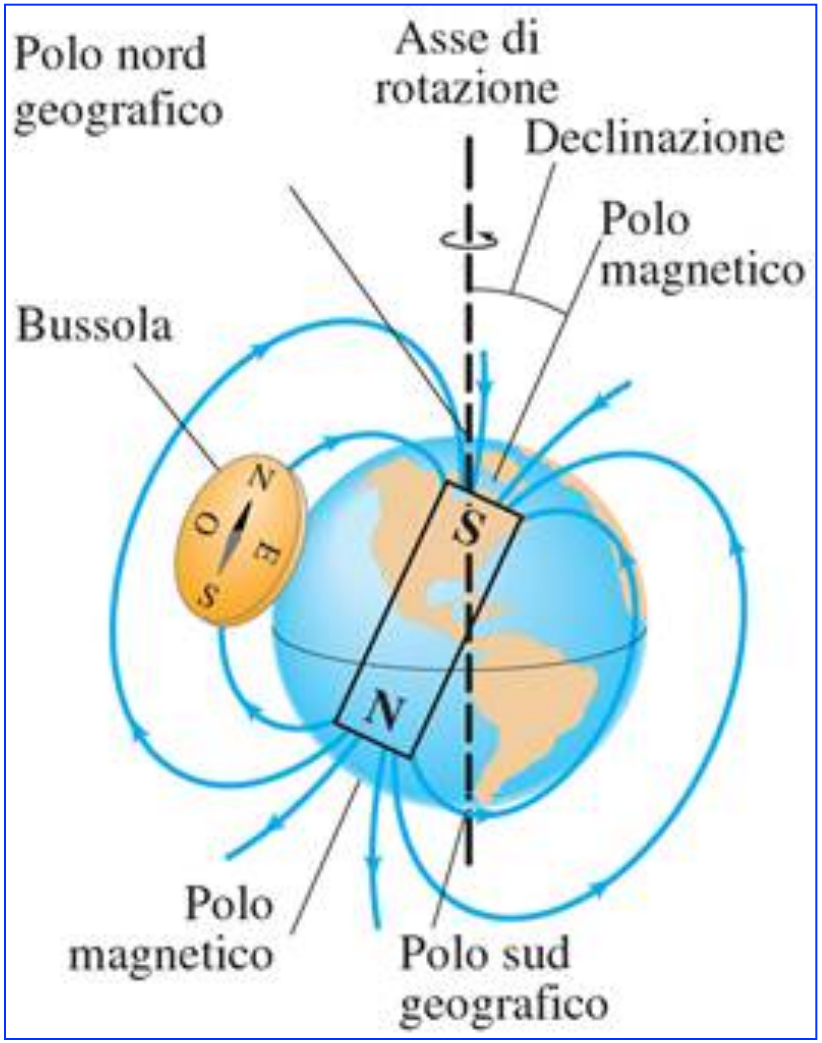
- in ogni punto sono tangenti alla direzione del campo magnetico;
- escono dai poli nord dei magneti ed entrano nei poli sud;
- la loro densità è direttamente proporzionale all'intensità del campo magnetico.



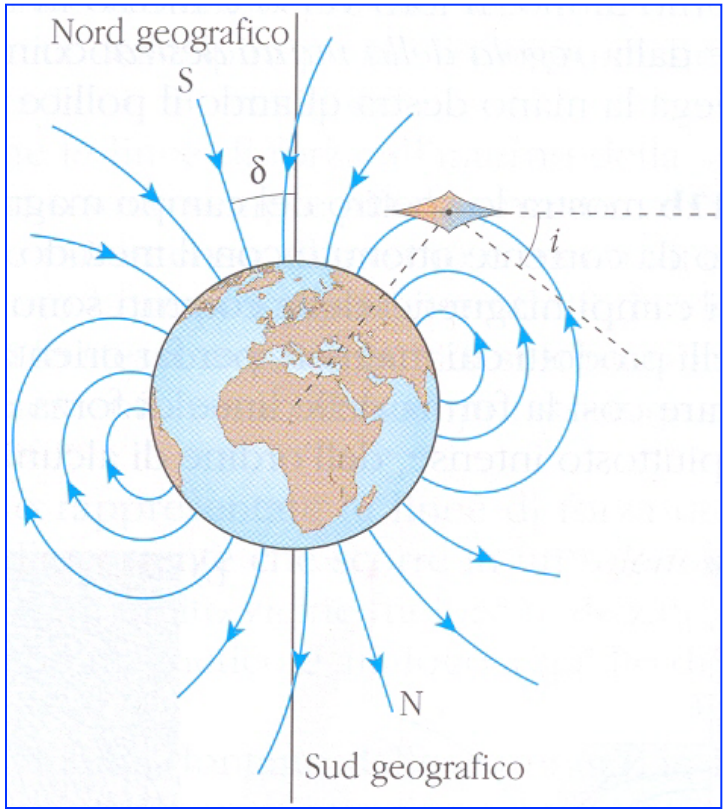
Il campo magnetico terrestre

Il fatto che il polo Nord di un ago magnetico sia rivolto verso il Nord terrestre dimostra che la Terra stessa è assimilabile a un magnete.

Fu **Gilbert (1544-1603)** a scoprire che la Terra si comporta come un grosso magnete.



Il magnete Terra ha il polo S nella zona del polo N magnetico (e quindi geografico) e il polo N nella zona del polo S magnetico (e quindi geografico).



Come ogni magnete, la Terra genera nello spazio circostante un campo magnetico (**campo magnetico terrestre**. Si può osservare che i poli magnetici sono spostati rispetto ai poli geografici.

La deviazione angolare δ fra il polo magnetico N indicato da una bussola (il Sud del magnete terrestre) e il Nord geografico si chiama ***declinazione magnetica***, mentre ***l'angolo i*** che il campo magnetico terrestre forma con l'orizzontale in ciascun punto si chiama ***inclinazione magnetica***.

Gli angoli di declinazione e d'inclinazione magnetica variano sia con il tempo sia con la posizione sulla superficie della Terra. Nel corso dei millenni i poli magnetici hanno subìto dei ribaltamenti, l'ultimo dei quali è avvenuto 780000 anni fa.

Fra le varie ipotesi, si pensa che il campo magnetico della Terra sia dovuto al moto rispetto alla crosta terrestre di materiali fusi dotati di elevata densità di carica elettrica. Come vedremo qui di seguito, infatti, al pari dei magneti, le correnti elettriche danno origine a campi magnetici.

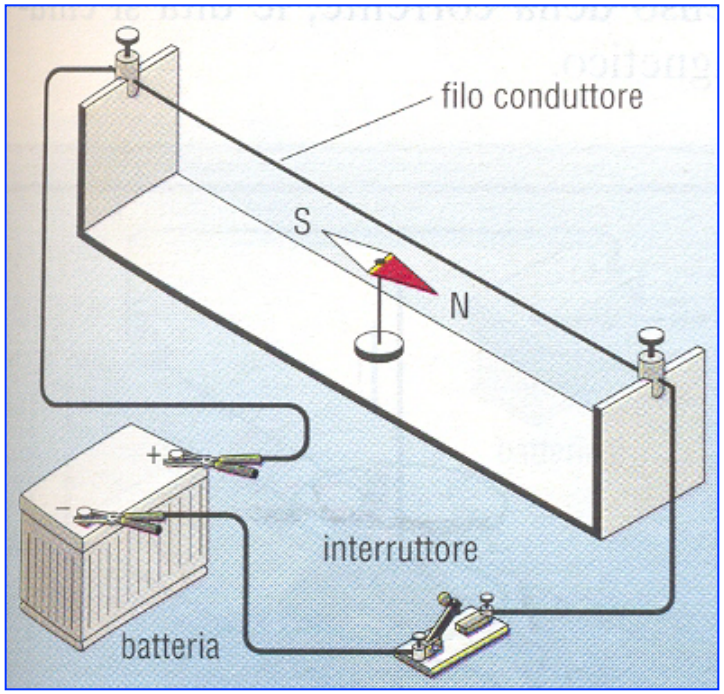
CAMPO MAGNETICO DELLE CORERENTI

Esperienza di Oersted

Oersted (1777-1851), il 21 luglio 1820, annunciò la straordinaria e inaspettata scoperta di un legame tra fenomeni elettrici e fenomeni magnetici:

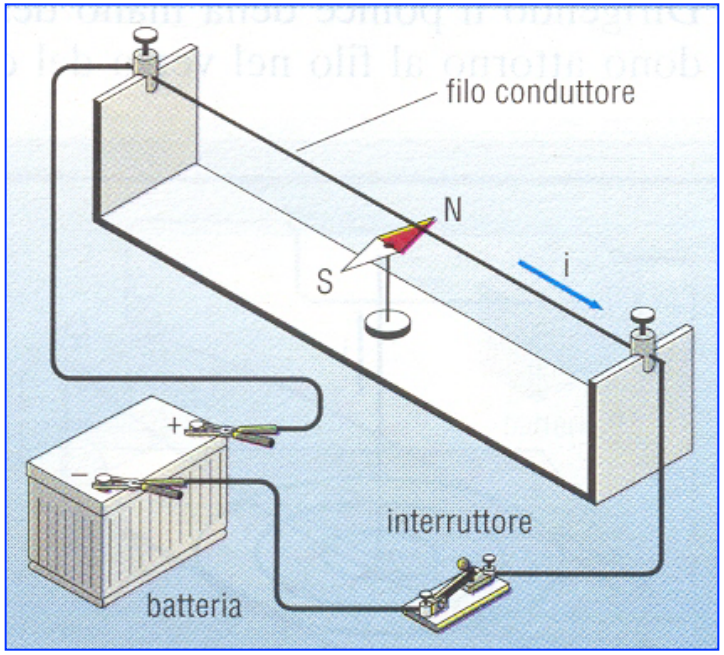
Un filo percorso da corrente genera un campo magnetico.

Analizziamo l'esperimento da vicino.



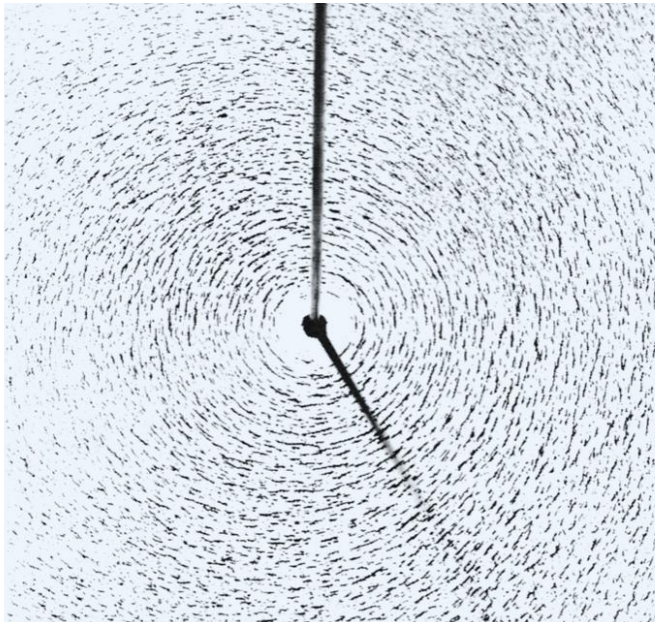
Dispose un filo elettrico, collegato a una batteria, nella direzione N-S, sopra un ago magnetico.

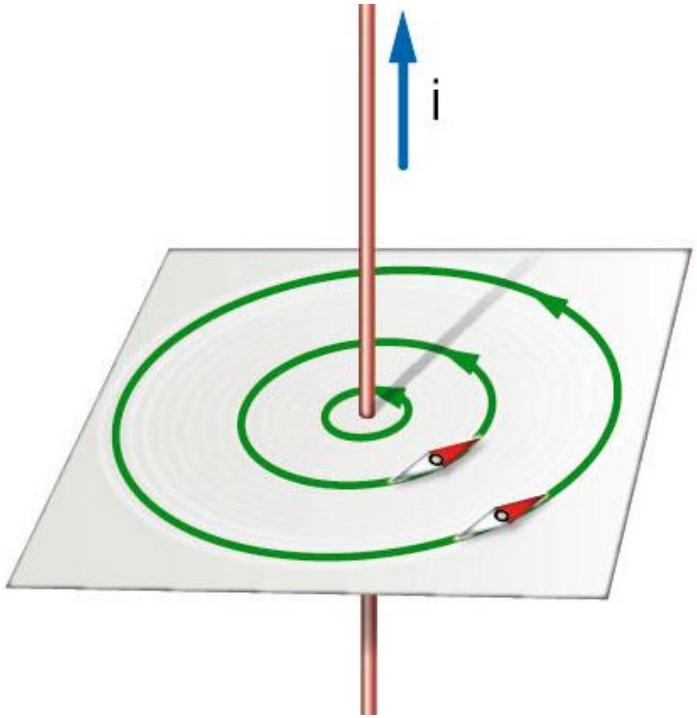
Quando faceva passare la corrente nel filo, l'ago ruotava, tendendo a disporsi perpendicolarmente al filo.



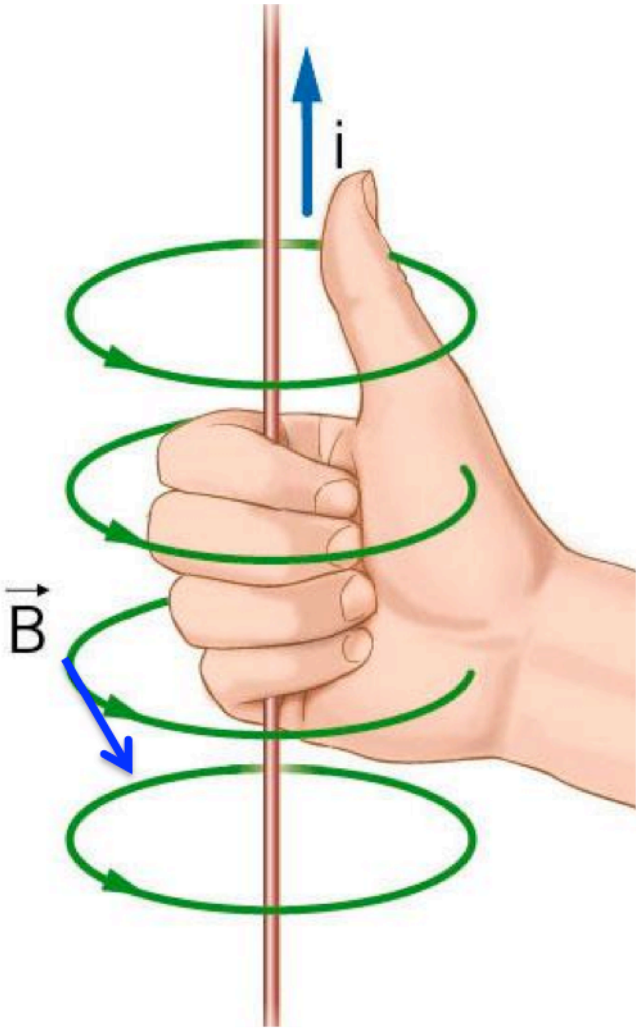
Risultato: la corrente elettrica genera un campo magnetico che interagisce con l'ago magnetico facendolo spostare in una nuova posizione di equilibrio.

Vediamo come sono fatte le linee di forza del campo magnetico generato dal filo percorso da corrente.





Utilizzando della limatura di ferro si osserva che, in un piano perpendicolare al filo percorso dalla corrente, le linee del campo magnetico sono circonferenze concentriche al filo.



Verso delle linee di campo magnetico: ***regola della mano destra*** (verso in cui si piega la mano destra quando il pollice punta nel verso della corrente).

Naturalmente, il vettore campo magnetico **B** è diretto tangenzialmente alle linee di campo.

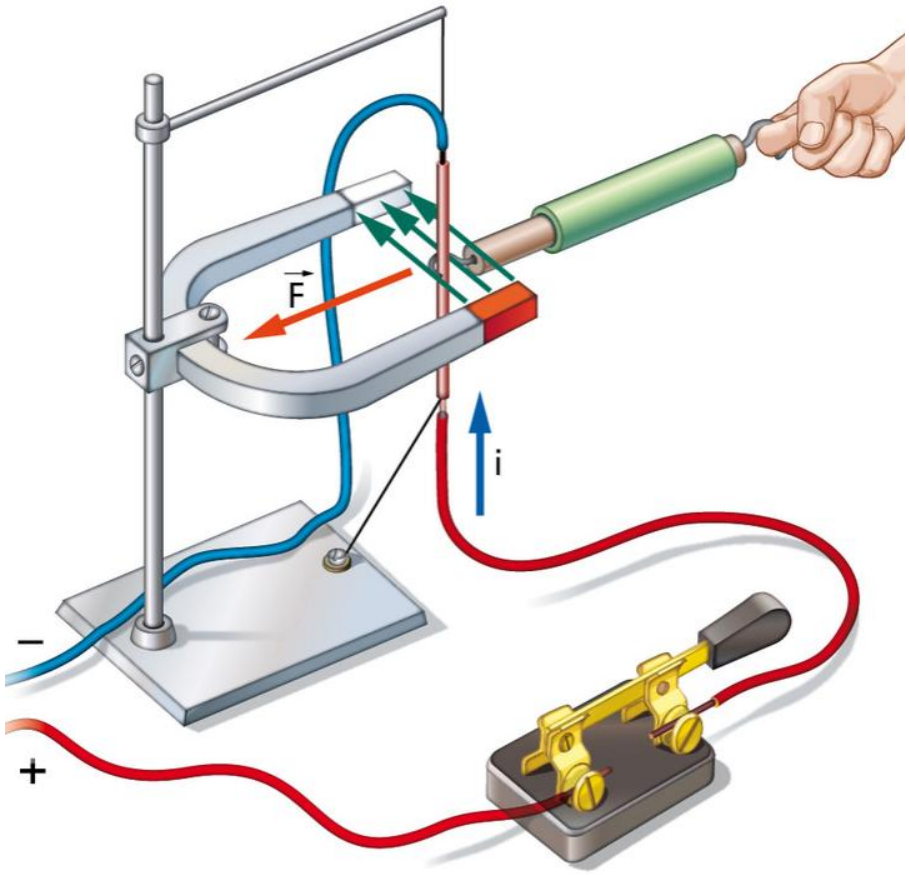
Esperienza di Faraday

Poiché un circuito percorso da corrente esercita un'azione meccanica su un ago magnetico (esperienza di Oersted), per il terzo principio della dinamica un magnete deve esercitare una forza su un circuito percorso da corrente.

Nel 1821 il fisico inglese **Faraday (1791-1867)** scoprì che:

Un filo percorso da corrente, immerso in un campo magnetico, subisce una forza.

Analizziamo l'esperimento da vicino.

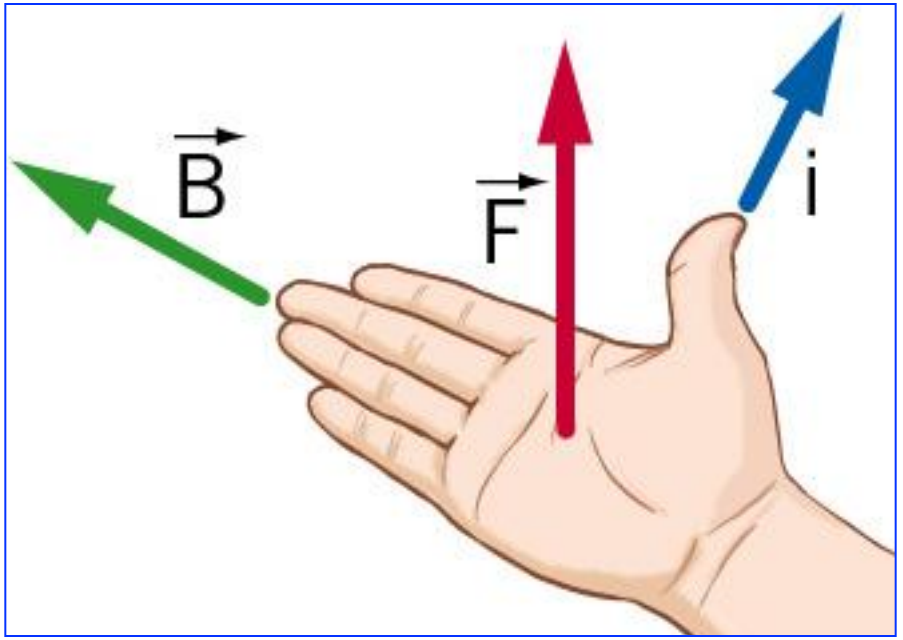


Inseriamo un filo metallico in un campo magnetico, in direzione perpendicolare alle linee di campo.

Risultato: Se il filo viene percorso da una corrente, su di esso agisce una forza perpendicolare sia al filo stesso sia alle linee di campo magnetico.

Il verso della forza magnetica **F** che si esercita sul filo rettilineo percorso dalla corrente i è dato dalla **regola della mano destra**:

- il pollice indica il verso della corrente i;
- le altre dita indicano il verso del campo magnetico **B**;
- il verso della forza **F** è quello che esce dal palmo della mano.



Esperienza di Ampère

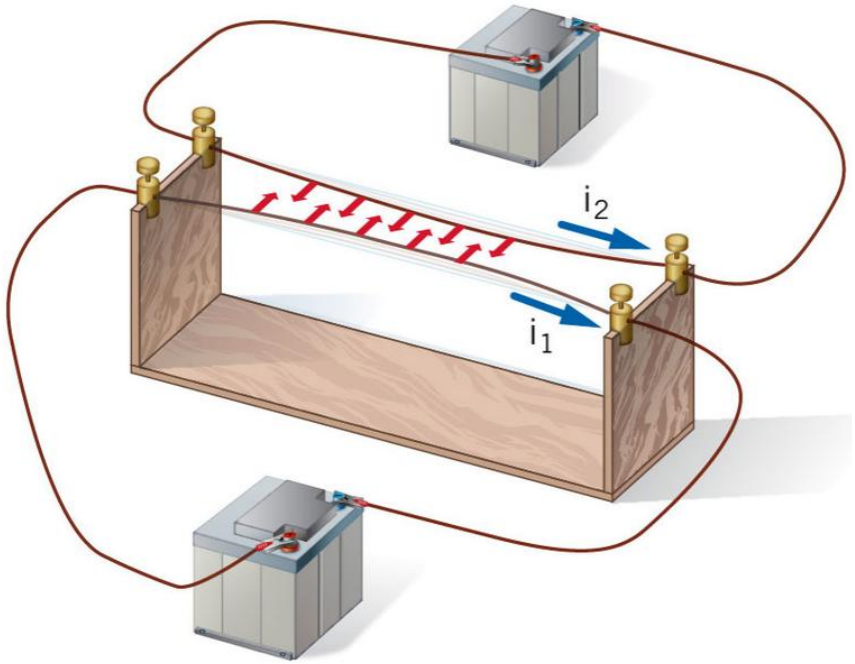
Le esperienze di Oersted e di Faraday ci hanno mostrato che esiste una relazione tra corrente elettrica e campo magnetico, perché una corrente elettrica:

- ✓ genera un campo magnetico
- ✓ subisce una forza magnetica.

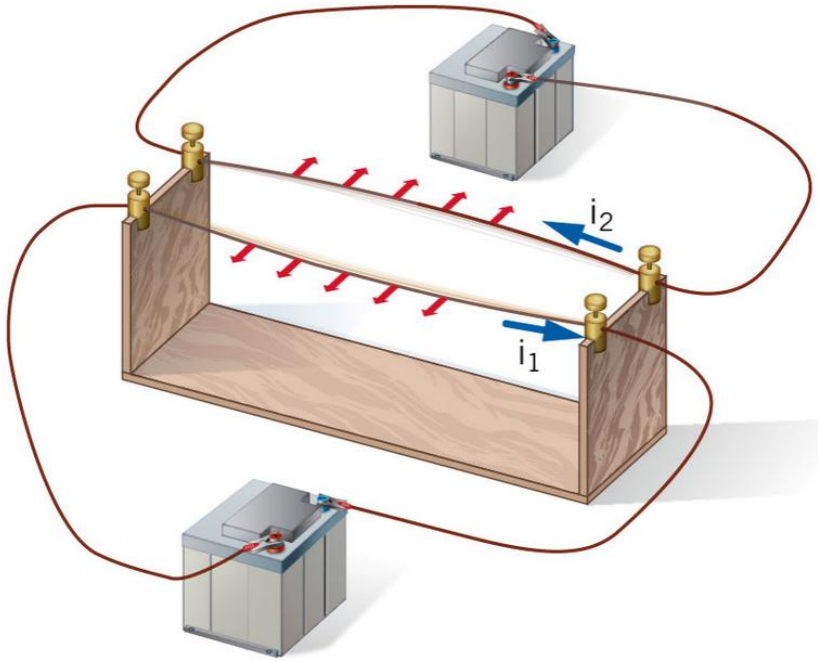
Logica conseguenza di questi fatti sperimentali è che:

deve esistere una forza magnetica tra due fili percorsi da corrente, perché ciascuno di essi genera un campo magnetico e subisce la forza del campo creato dall'altro.

La verifica sperimentale di questo fenomeno fu fatta dal fisico francese **Ampère (1775-1936)** una settimana dopo essere venuto a conoscenza dell'esperimento di Oersted.

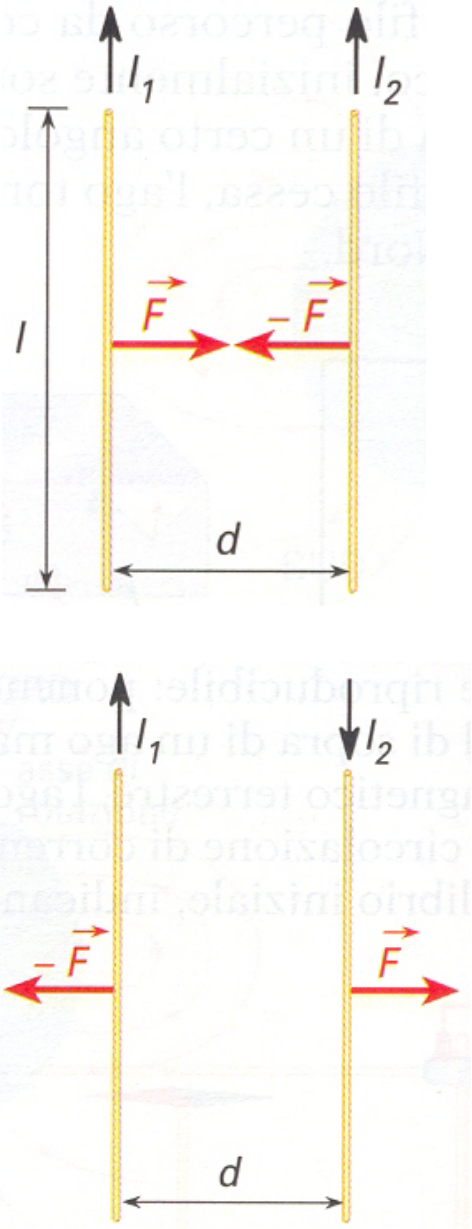


Due fili rettilinei e paralleli si attraggono se sono percorsi da correnti nello stesso verso.



Due fili rettilinei e paralleli si respingono se sono percorsi da correnti in versi opposti.

Con i suoi esperimenti Ampère dimostrò che:



L'intensità *F* della forza d'interazione è direttamente proporzionale a ciascuna delle due intensità di corrente e alla lunghezza dei conduttori, mentre è inversamente proporzionale alla loro distanza:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i_1 i_2}{d}L$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2 permeabilità magnetica del vuoto

Questa relazione è utilizzata per definire l'unità di misura dell'intensità di corrente, chiamata **ampere** (A) (unità di misura fondamentale nel SI), e dall'ampere si deriva l'unità di misura della carica elettrica, il **coulomb** (C):

Unità di misura di corrente

L'ampere è definita come l'intensità di corrente costante che, mantenuta in due conduttori rettilinei paralleli di lunghezza molto grande e sezione trascurabile, alla distanza di un metro l'uno dall'altro nel vuoto, produce fra i conduttori una forza uguale a $2 \cdot 10^{-7}$ N per ogni metro di lunghezza.

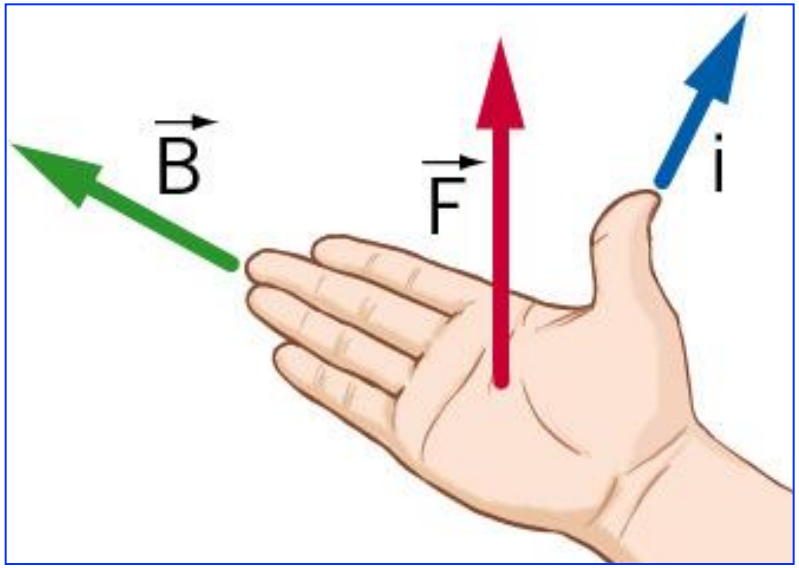
Unità di misura della carica elettrica

Il coulomb è la carica elettrica che passa in un secondo attraverso la sezione di un conduttore percorso dalla corrente di 1 A.

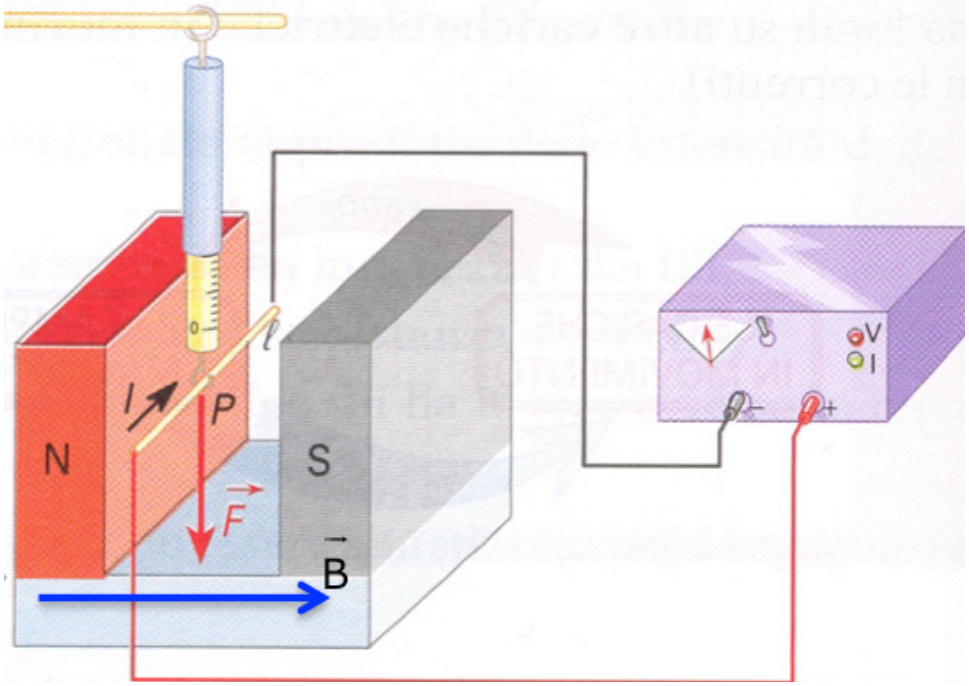
INTENSITA' DEL CAMPO MAGNETICO

Abbiamo definito operativamente, con l'uso di un ago magnetico, la direzione e il verso del vettore campo magnetico **B**. Ora vogliamo definire la sua intensità.

Abbiamo già osservato che un conduttore rettilineo percorso da corrente e immerso in un campo magnetico è soggetto a una forza **F** perpendicolare sia al conduttore sia al campo: regola della mano destra.



Applicando la regola della mano destra alla figura, otteniamo che la forza **F** che agisce sul filo è diretta verso il basso.



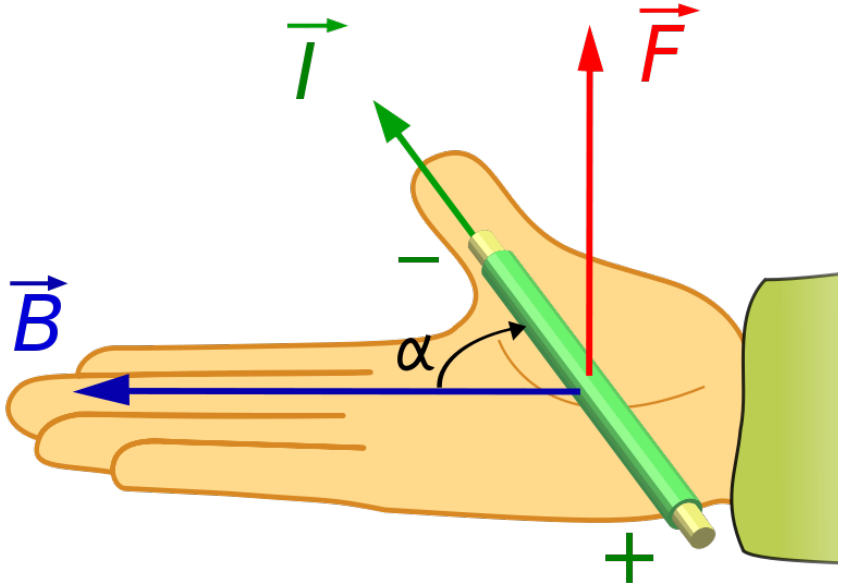
L'intensità di **F** la misuriamo tramite il dinamometro.

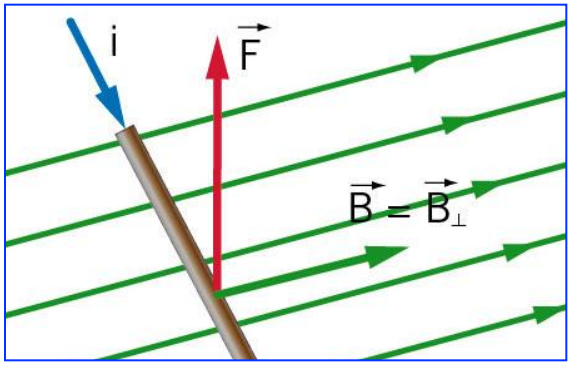
Sperimentalmente si trova che il modulo di ***F*** è direttamente proporzionale alla lunghezza *L* del filo e all'intensità *i* della corrente e dipende dall'angolo α tra la direzione della corrente e quella del campo magnetico:

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

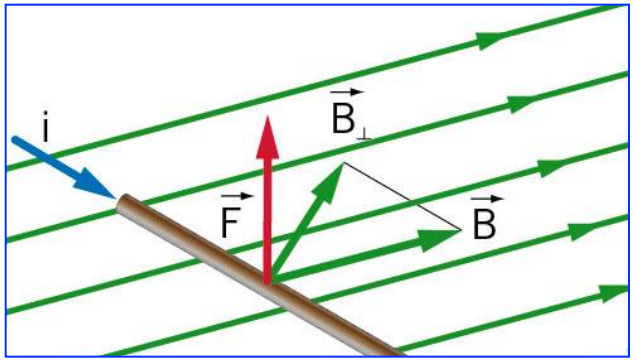
Ossia:

$$\vec{F} = iL \otimes \vec{B}$$

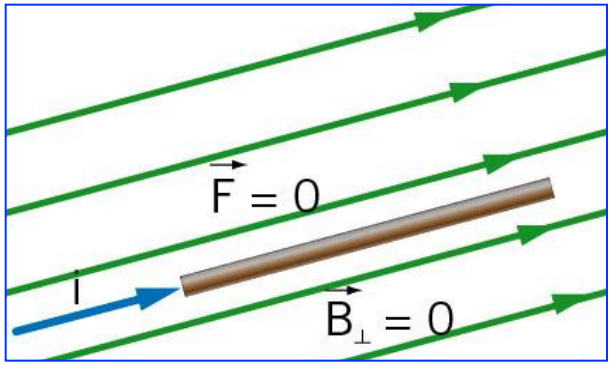




F = valore massimo

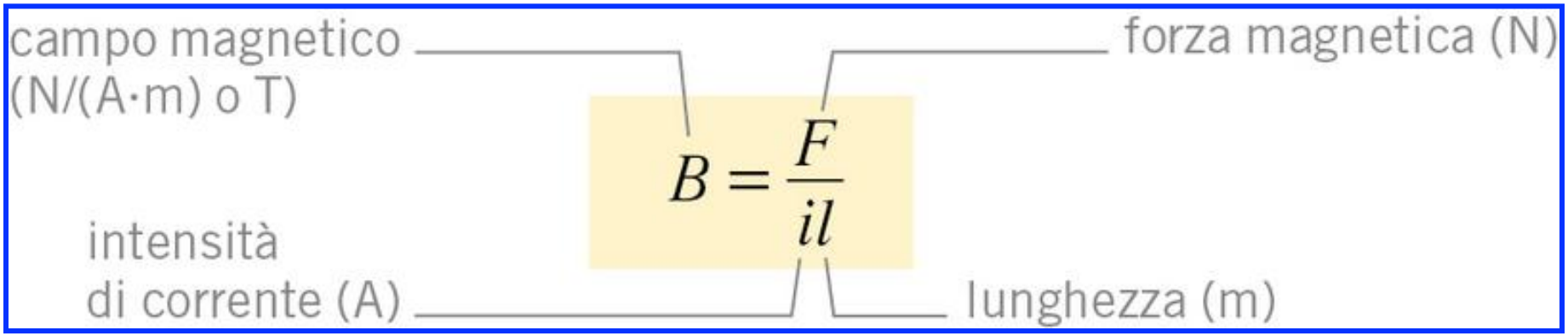


F = valore minimo



F = valore nullo

Utilizziamo la relazione precedente (con α=90°, quindi senα=1) per definire l'intensità del campo magnetico **B** nel caso in cui **B** sia uniforme sull'intera lunghezza del filo:



L'unità di misura di **B** è il **tesla** (T):

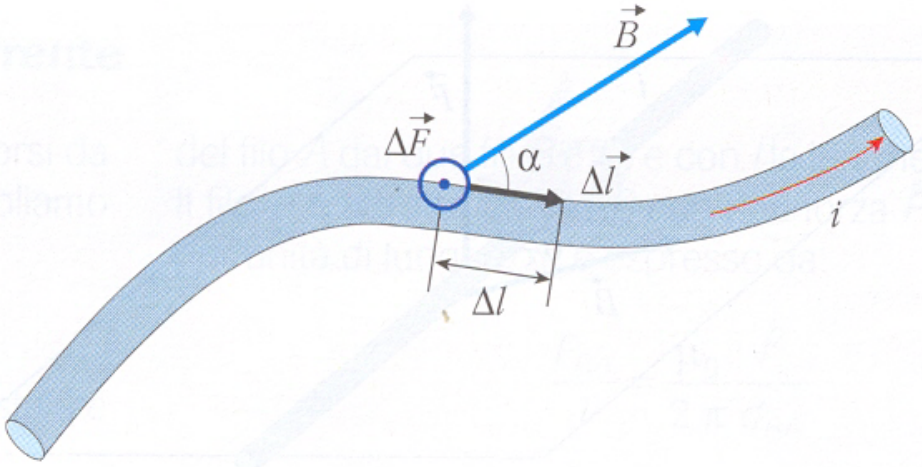
Un campo magnetico **B** uniforme ha il modulo di 1T se un conduttore rettilineo di lunghezza 1m, percorso dalla corrente di 1A, è soggetto alla forza di 1N quando è disposto perpendicolarmente alla direzione del campo.

Il tesla è una unità di misura piuttosto grande. Basti pensare che il campo magnetico di una piccola calamita è dell'ordine del centesimo di tesla, mentre vale due tesla quello di un elettromagnete per sollevare un'auto.

Per questa ragione, spesso viene usata un'altra unità di misura per il campo magnetico **B**, il **gauss** (simbolo G), così definita:

$$1G = 10^{-4}\ T$$

La relazione precedente definisce il modulo di **B** nel caso in cui **B** sia uniforme**.** In generale, però, **B** varia in modulo e in direzione da un punto all'altro del filo, il quale può essere anche non rettilineo. Vediamo come si procede in questo caso.



Suddividiamo il filo in tratti rettilinei di lunghezza infinitesima ΔL.

Su ciascun tratto agisce una forza **ΔF** la cui direzione e verso sono date dalla regola della mano destra e la cui intensità è:

$$\Delta F = Bi\Delta L\,sen\alpha$$

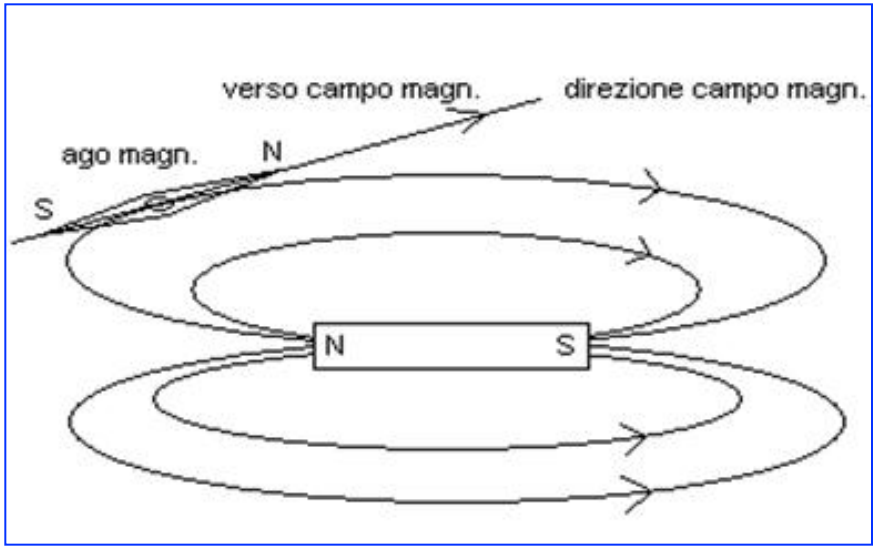
La forza risultante sull'intero filo è la somma vettoriale delle forze agenti sui singoli tratti.

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

Riassumendo, il vettore campo magnetico **B** è così definito:

DEFINIZIONE CAMPO MAGNETICO

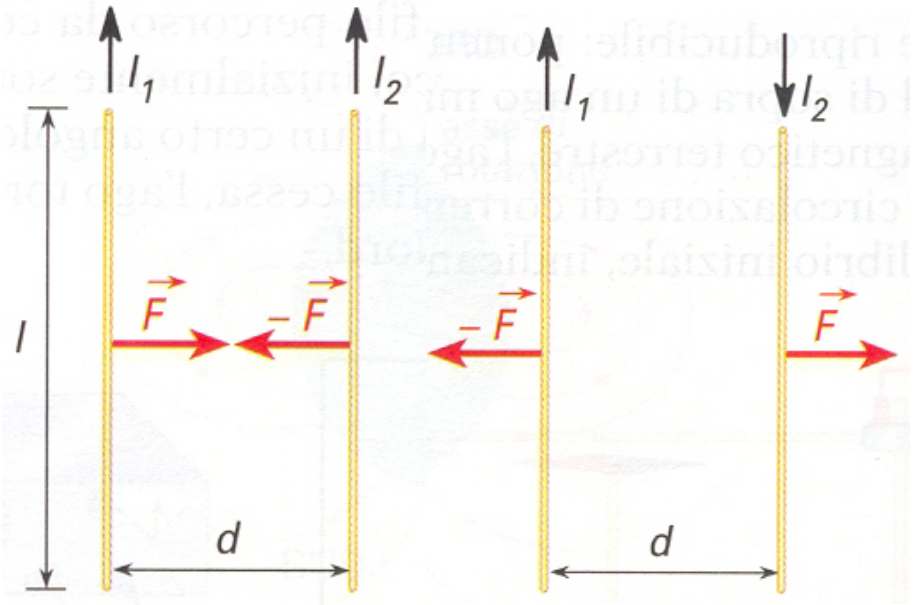
Il campo magnetico **B** ha, in ogni punto *P* dello spazio, la direzione e il verso indicati dall'asse S-N di un ago magnetico posto in *P*. Il modulo del campo si ottiene dal modulo **F** della forza agente su un tratto di filo L, ortogonale al campo nel punto *P* e percorso da una corrente *i*, mediante la relazione:

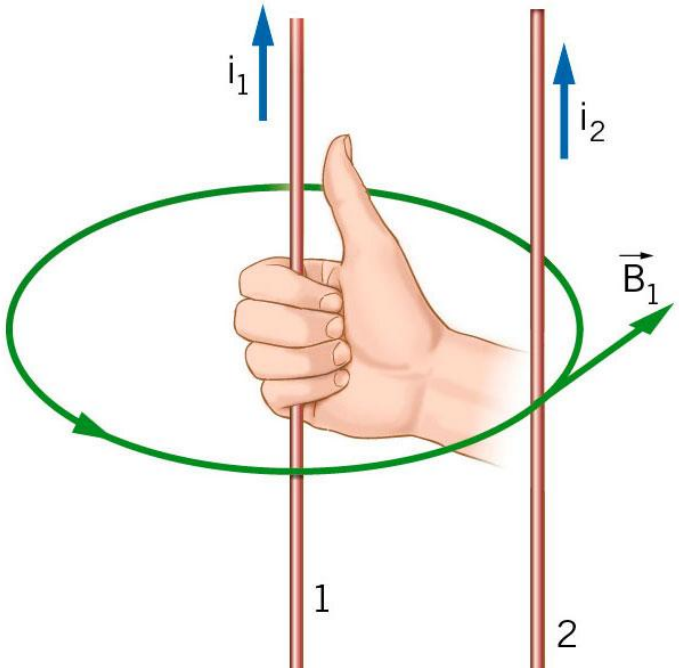


$$B = \frac{F}{iL}$$

CAMPO MAGNETICO DI UN FILO PERCORSO DA CORRENTE

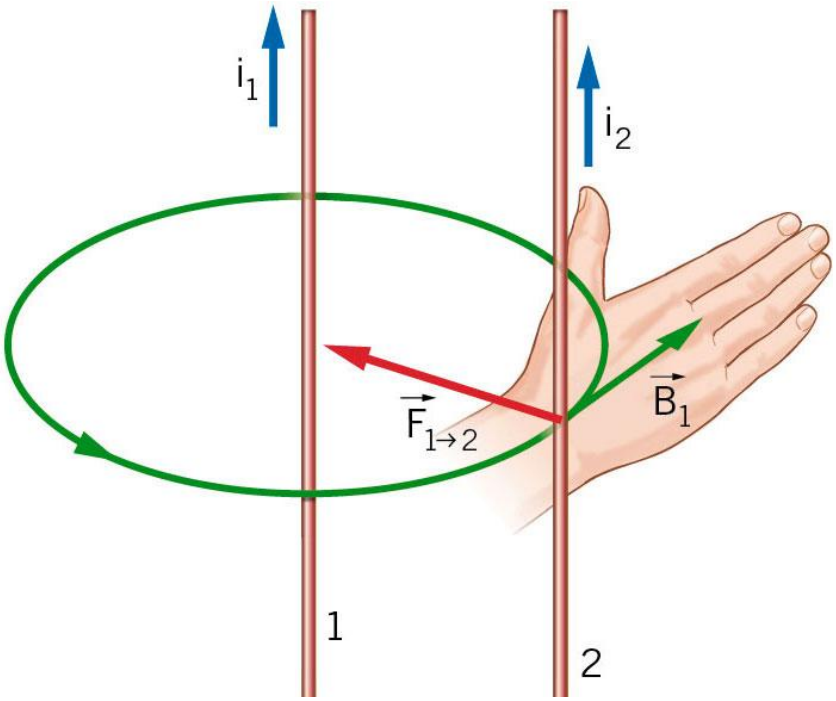
Conoscendo la forza magnetica che agisce su un filo percorso da corrente, siamo in grado di capire perché due fili rettilinei e paralleli si attraggono quando sono attraversati da correnti che circolano nello stesso verso e si respingono quando le correnti hanno versi opposti.





Le linee di campo magnetico prodotte dalla corrente 1 sono linee concentriche al filo e nella zona in cui si trova il filo 2, il campo magnetico $\mathbf{B}_1$ generato dal filo 1, è tangente alla linea di campo.

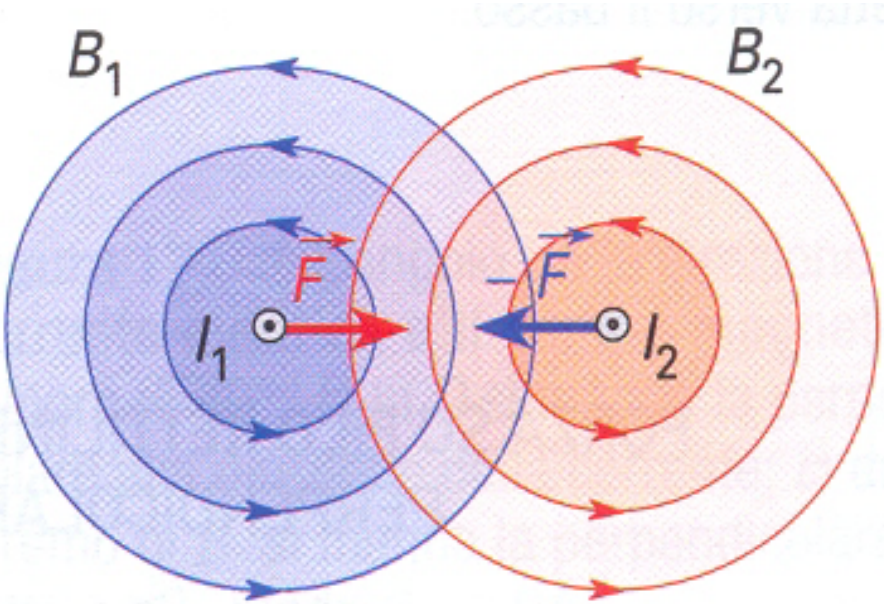
La forza magnetica $\mathbf{F}_{1\rightarrow 2}$ che il filo 1 esercita sul filo 2 è diretta verso il filo 1 (regola mano destra)



In modo analogo, la forza magnetica $\mathbf{F}_{2\rightarrow 1}$ agente sul filo percorso dalla corrente i_1 come l'azione del campo magnetico $\mathbf{B}_2$ generato dalla corrente i_2, è diretta verso 2. Per il terzo principio della dinamica le due forze sono uguali e opposte:

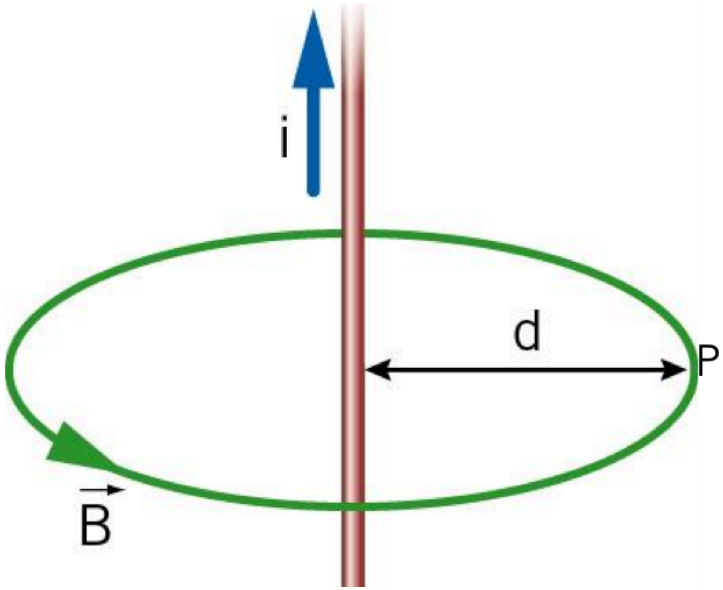
$$\mathbf{F}_{1\rightarrow 2} = -\mathbf{F}_{2\rightarrow 1}$$

Conclusione: i due fili percorsi da corrente equiverse si attraggono.



Se il verso di una delle due correnti viene invertito, entrambe le forze cambiano verso e i fili si respingono.

L'analisi precedente ci consente di ricavare una relazione per determinare l'intensità del campo magnetico in un punto P distante d dal filo percorso da una corrente i:

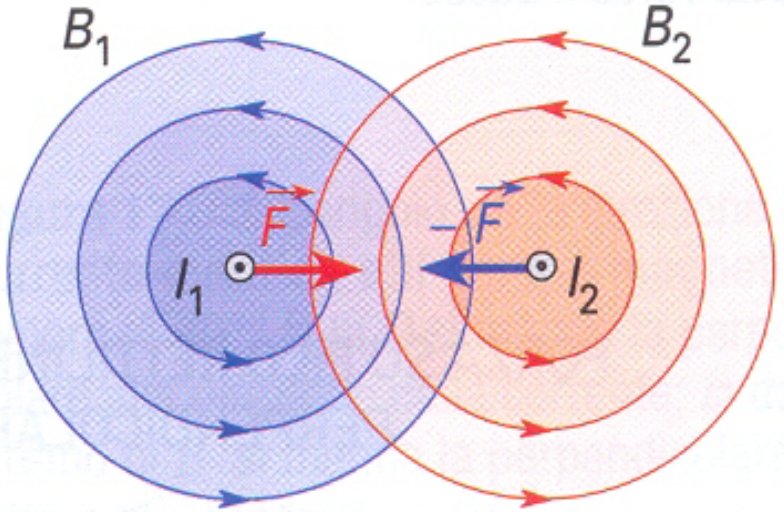


LEGGE DI BIOT-SAVART

Il modulo B del campo magnetico generato da un filo rettilineo molto lungo percorso da una corrente i in un punto P a distanza d dal filo è direttamente proporzionale all'intensità di corrente e inversamente proporzionale alla distanza:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i}{d}$$

Dimostrazione legge Biot-Savart



Le forze con cui i due fili si attraggono (o si respingono) sono uguali e opposte. Indicando con **F** tale forza, il suo modulo è dato da:

$$F = B_1 i_2 L$$

Per la legge di Ampère, F è anche uguale a:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i_1 i_2}{d} L$$

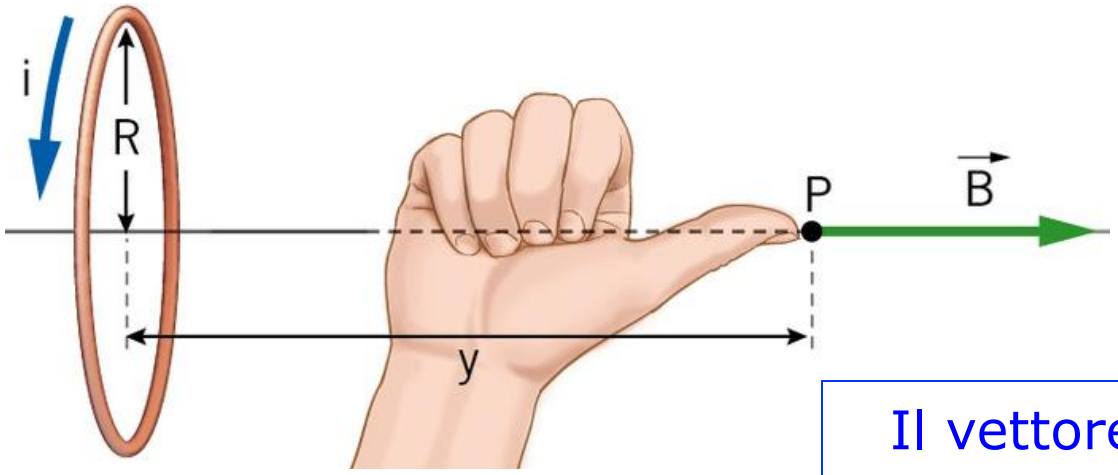
Dal confronto fra queste due relazioni ricaviamo il modulo di $\mathbf{B_1}$, ossia la legge di Biot-Savart :

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i_1}{d}$$

CAMPO MAGNETICO DI UNA SPIRA E DI UN SOLENOIDE

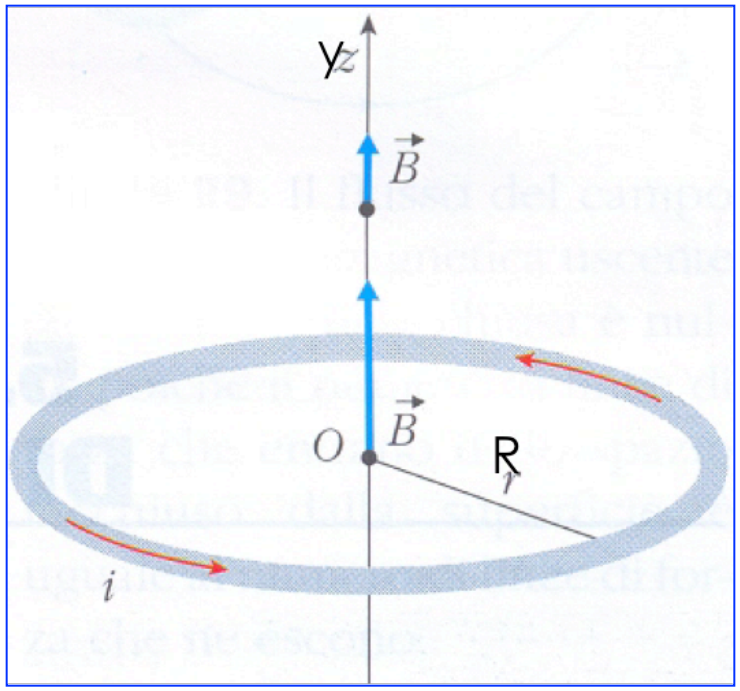
Il calcolo del campo magnetico prodotto da una ***spira circolare*** percorsa da corrente è piuttosto complesso.

Ci limitiamo a riportare l'espressione che si ottiene, nel caso di una spira circolare di raggio *R*, per il modulo di B in un punto P sull'asse della spira a distanza *y* dal centro:



$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{iR^2}{\sqrt{\left(R^2 + y^2\right)^3}}$$

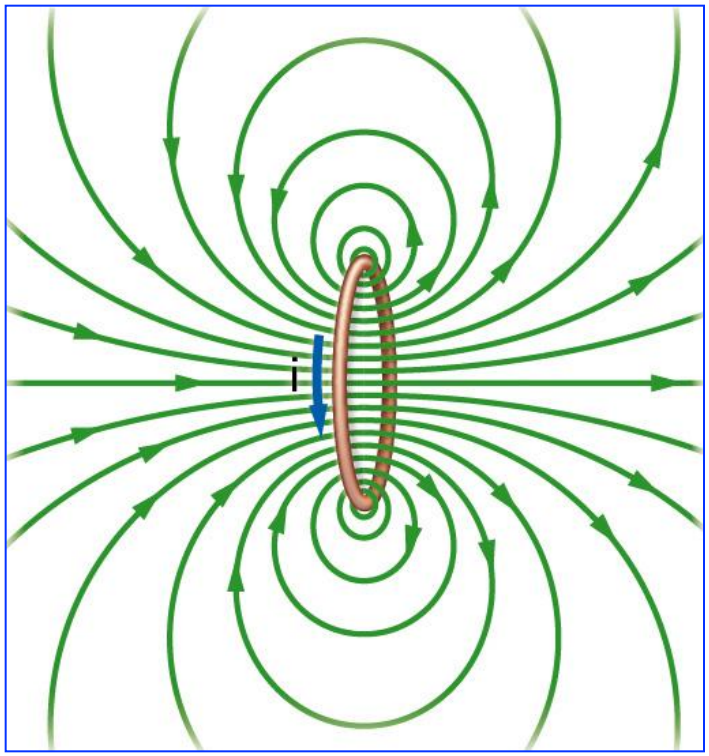
Il vettore **B** sull'asse della spira è perpendicolare al piano della spira e il suo verso dipende dal verso della corrente (regola mano destra).

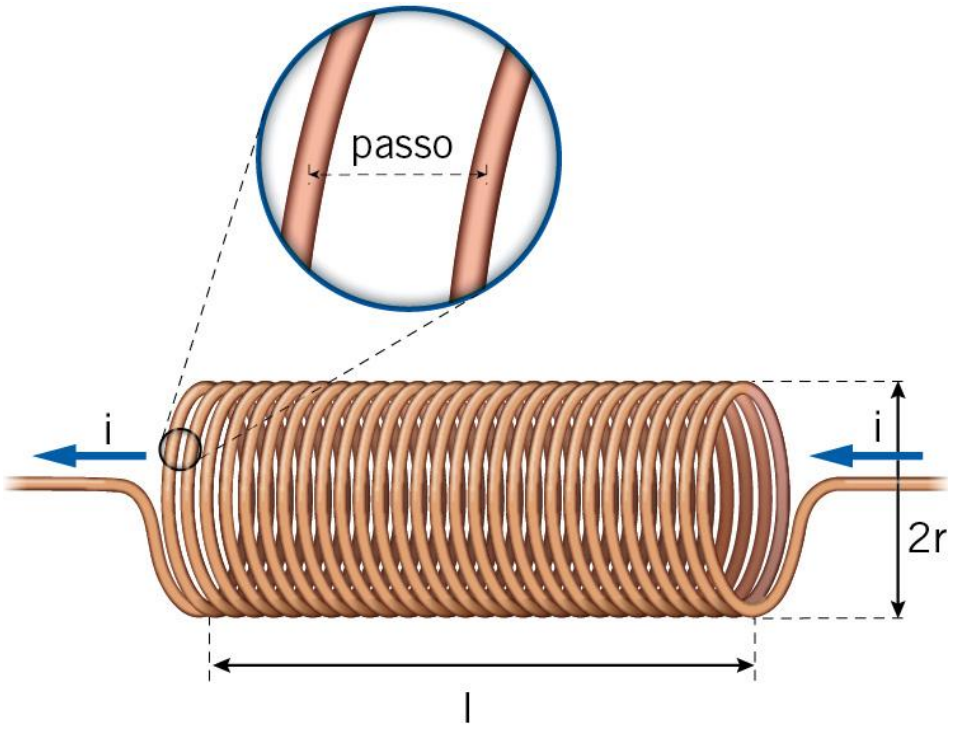


Nel centro della spira (y=0), la precedente relazione diventa:

$$B = \frac{\mu_0}{2}\frac{i}{r}$$

Linee di campo magnetico dovute a una spira circolare percorsa da corrente.

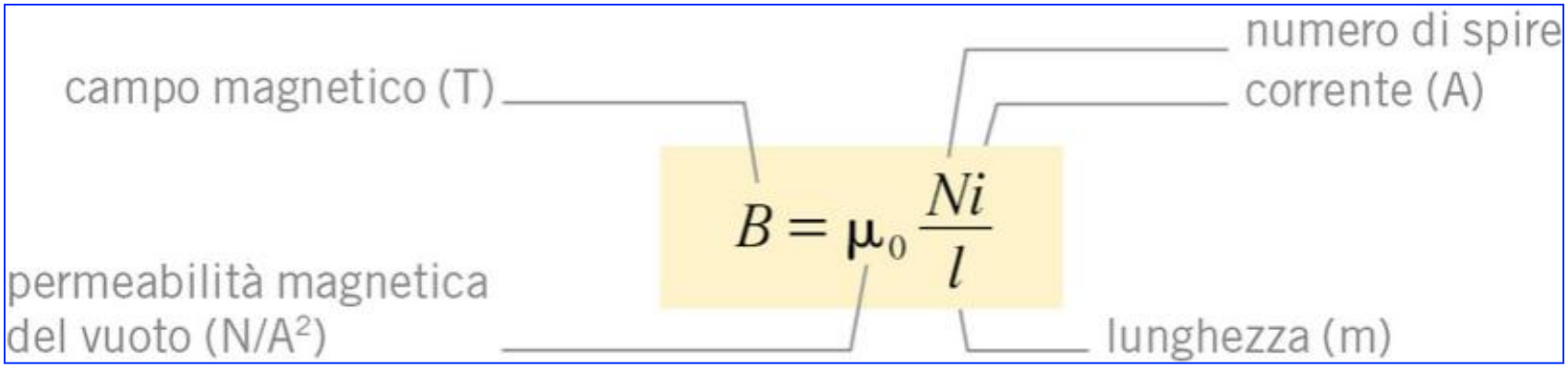


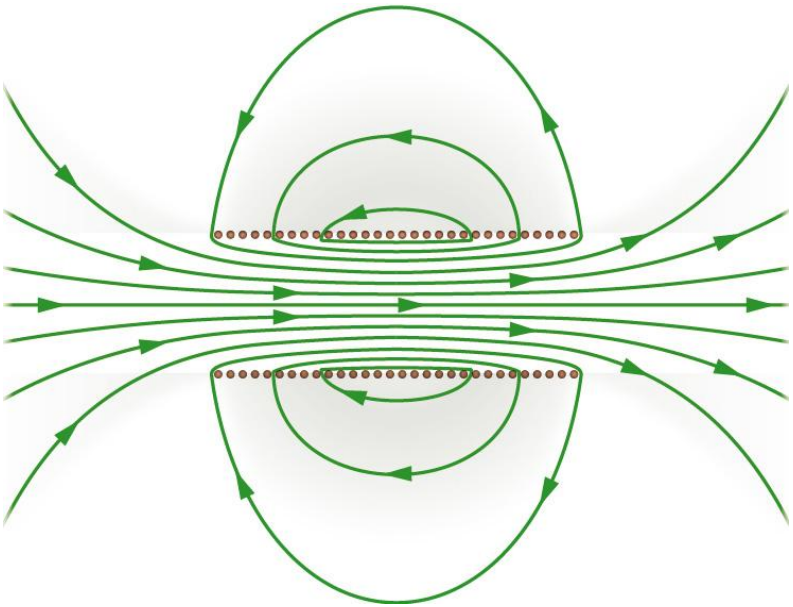


Una bobina il cui filo è avvolto a elica è detta **solenoide**. Questo sistema fisico può essere schematizzato come se fosse formato da un grande numero di spire circolari tutte uguali.

Se il solenoide è infinitamente esteso, le proprietà del campo magnetico sono particolarmente semplici.

Il campo magnetico esterno a un solenoide infinito è nullo, mentre quello interno è uniforme e parallelo all'asse del solenoide, e ha modulo:



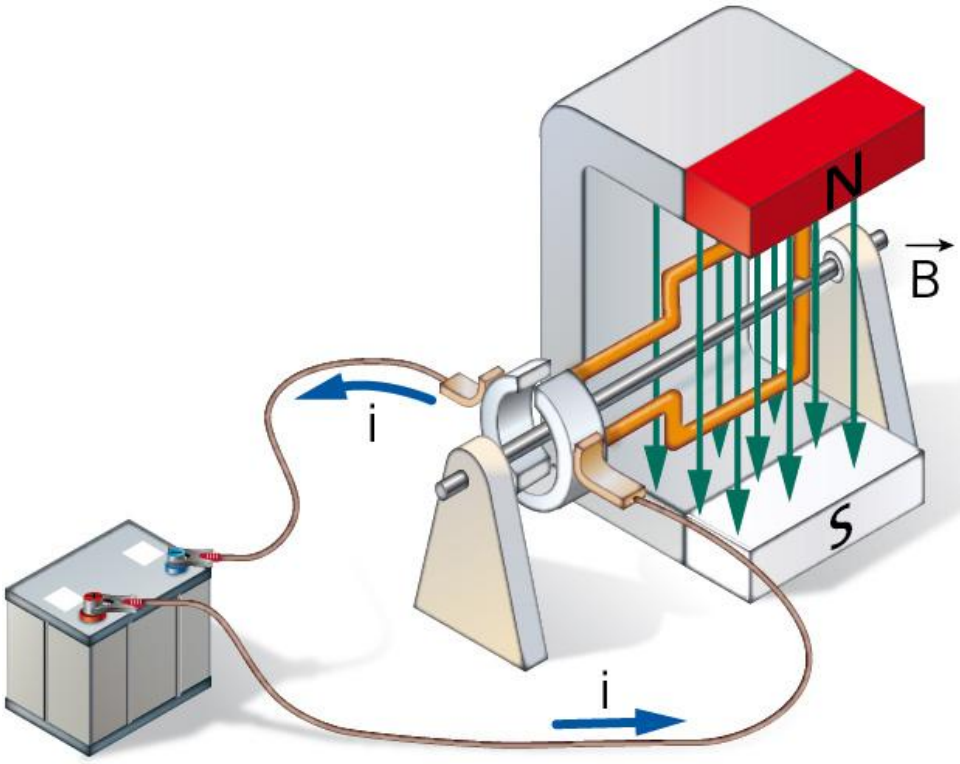


Un **solenoide reale** approssima bene il comportamento appena descritto se la sua lunghezza è molto maggiore del raggio delle spire.

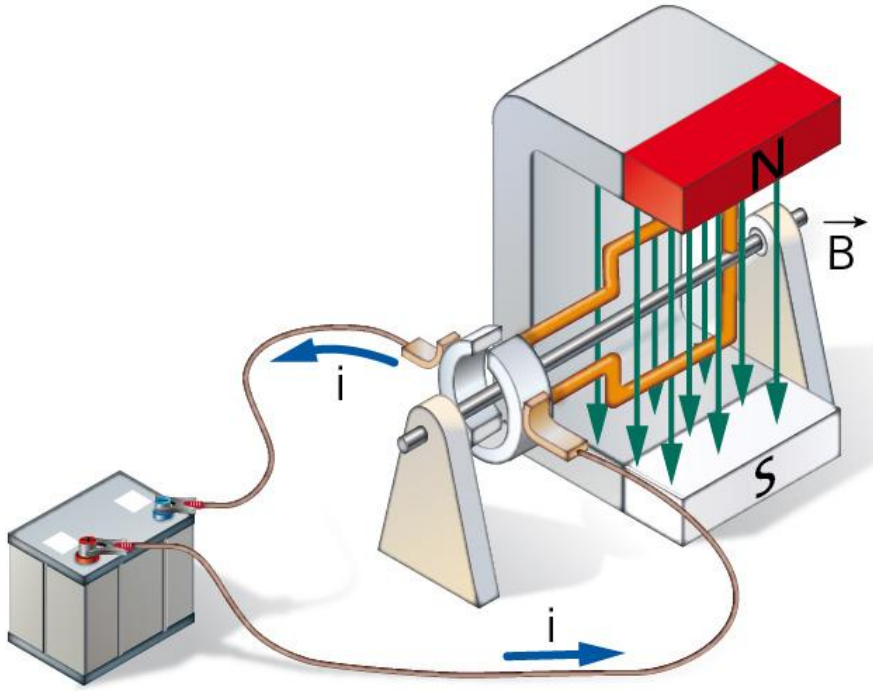
IL MOTORE ELETTRICO

Un **motore elettrico** è un dispositivo che trasforma energia elettrica in energia meccanica.

Esaminiamo un semplice modello di motore elettrico a corrente continua: è costituito da una spira rettangolare, vincolata a ruotare intorno a un asse perpendicolare alle linee del campo magnetico.

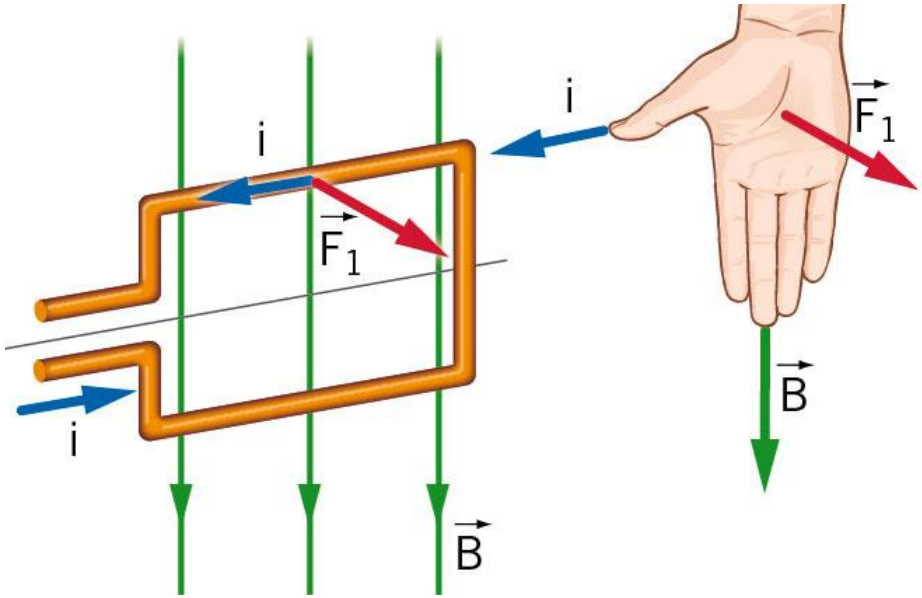


Immettendo una corrente continua nella spira, essa subisce delle forze magnetiche che la fanno ruotare su se stessa.



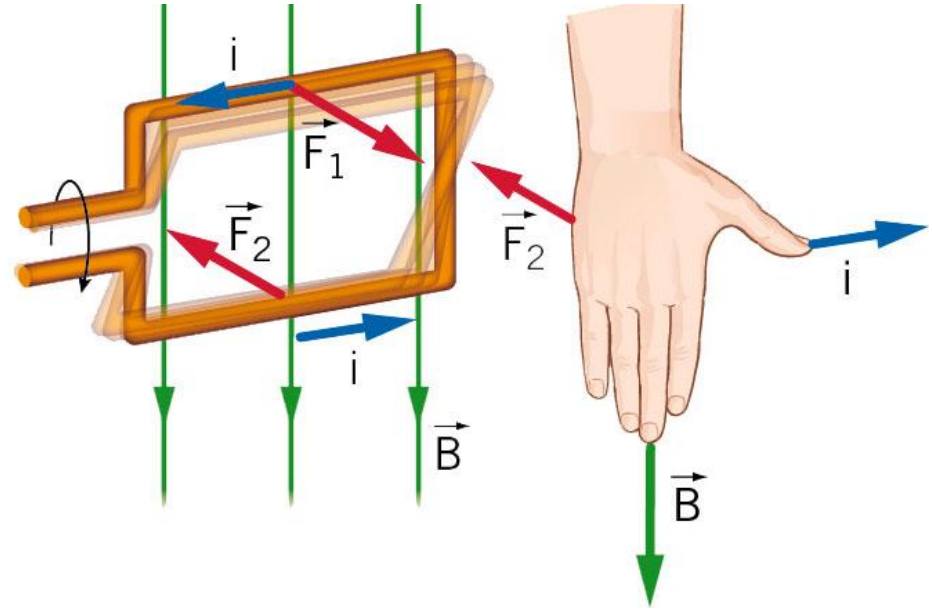
Supponiamo che all'inizio la spira si trovi sul piano parallelo alle linee del campo. Ciascuno dei due lati orizzontali, lunghi L, è perpendicolare alle linee del campo e subisce una forza:

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



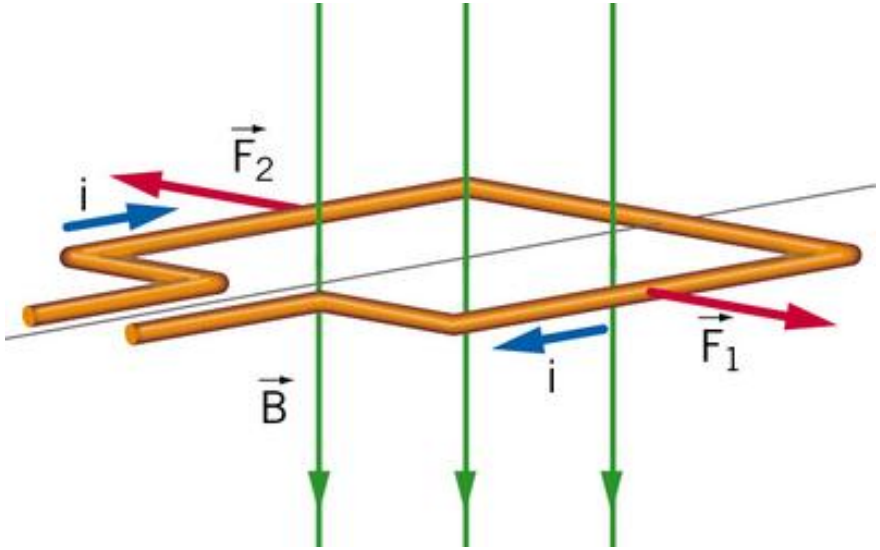
La forza magnetica $\mathbf{F}_1$, sul lato in alto, esce dalla pagina (regola mano destra).

La forza magnetica $\mathbf{F}_1$, sul lato in basso, entra nella pagina (regola mano destra).

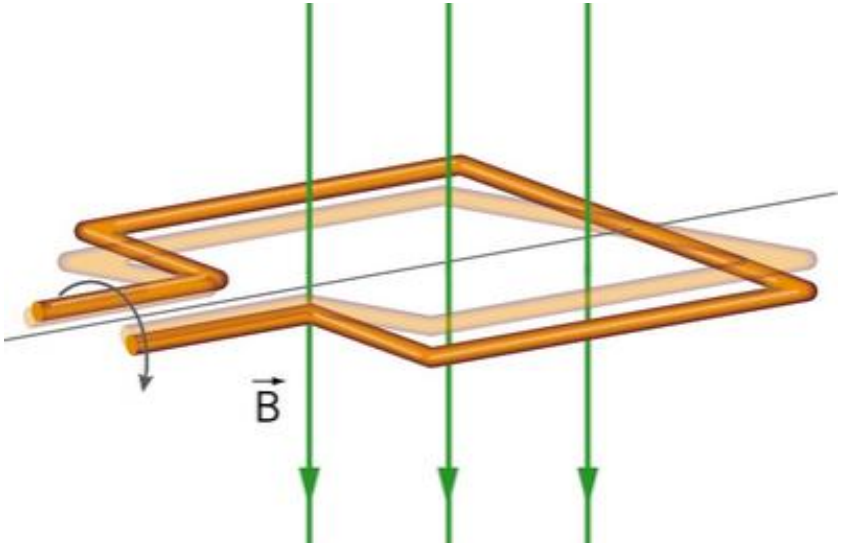


Le due forze, che hanno la stessa direzione e versi opposti, formano una coppia di forze che costringe la spira a ruotare.

Il movimento continua fino a quando il piano della spira diventa perpendicolare al campo magnetico. In questa posizione le due forze sono sulla stessa retta e tendono a deformare la spira, senza farla ruotare.

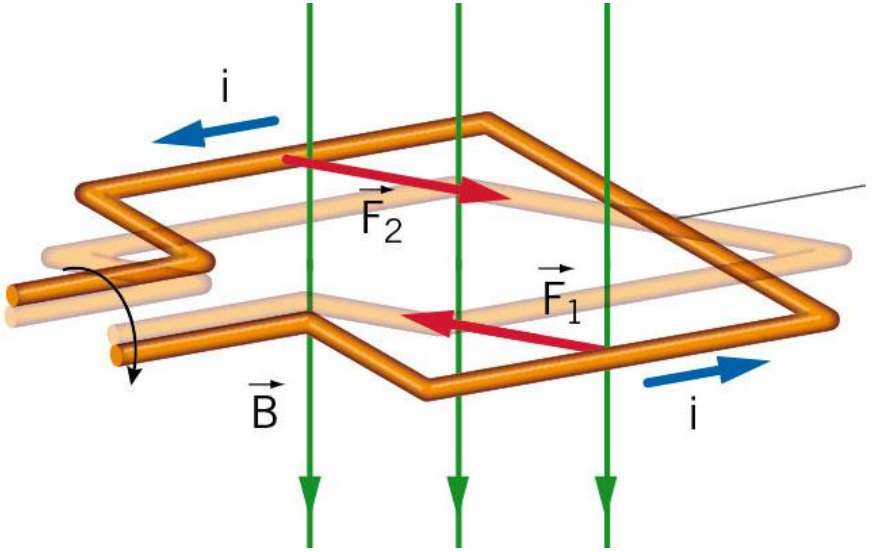


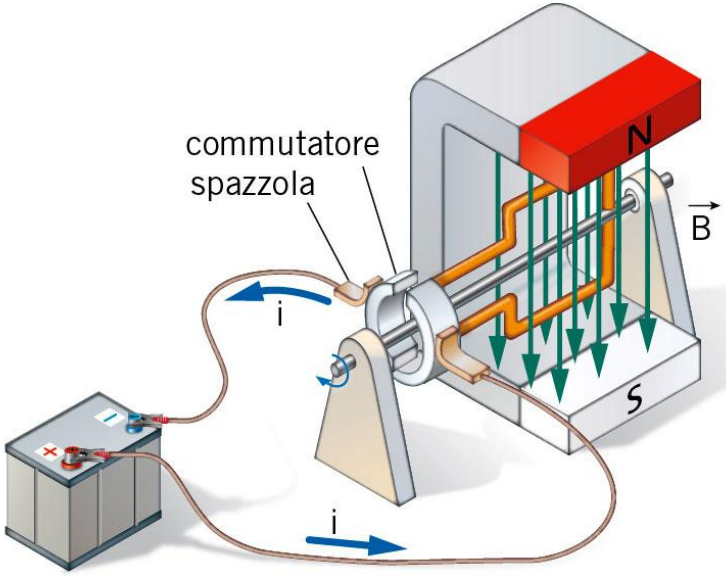
La spira non si ferma di colpo, ma prosegue la rotazione per inerzia e oltrepassa di poco la posizione orizzontale.



Affinché la spira continui a ruotare, bisogna invertire il senso della corrente non appena essa oltrepassa la posizione orizzontale.

Con la corrente che circola in senso opposto, le forze cambiano verso e la coppia continua a favorire la rotazione.





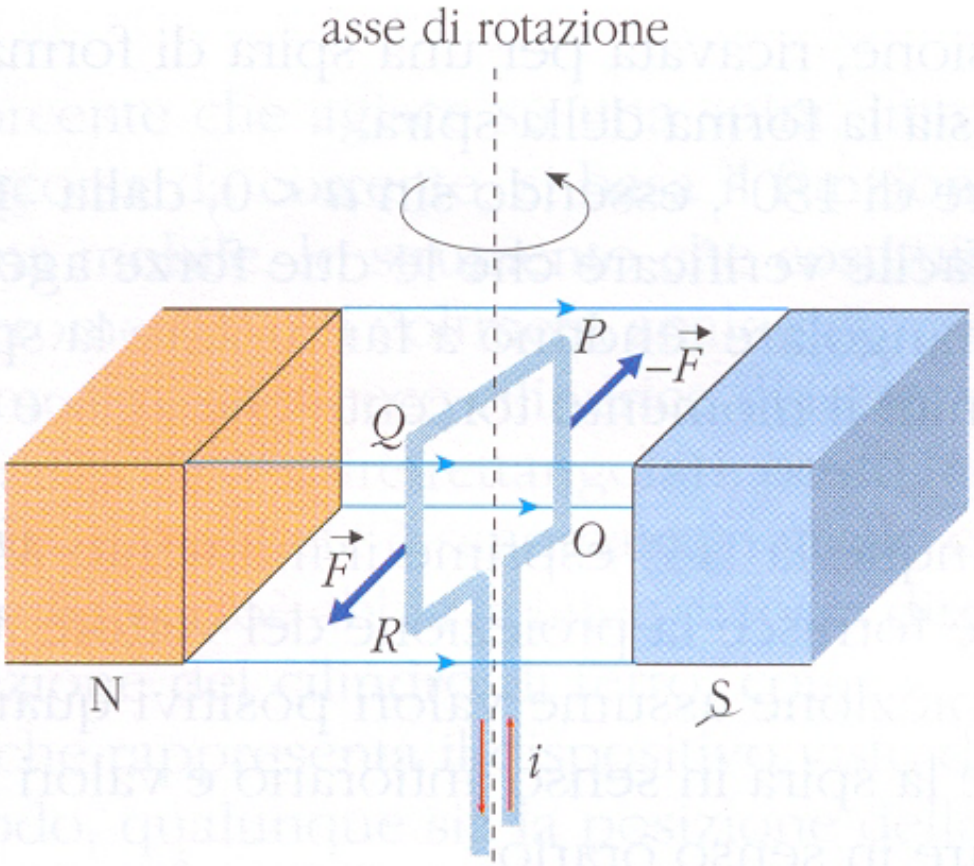
Ciò che inverte il senso della corrente ogni mezzo giro sono i contatti striscianti tra il commutatore che ruota e le spazzole fisse.

In conclusione:

cambiando il senso della corrente ogni mezzo giro, la coppia di forze magnetiche mantiene la spira in rotazione.

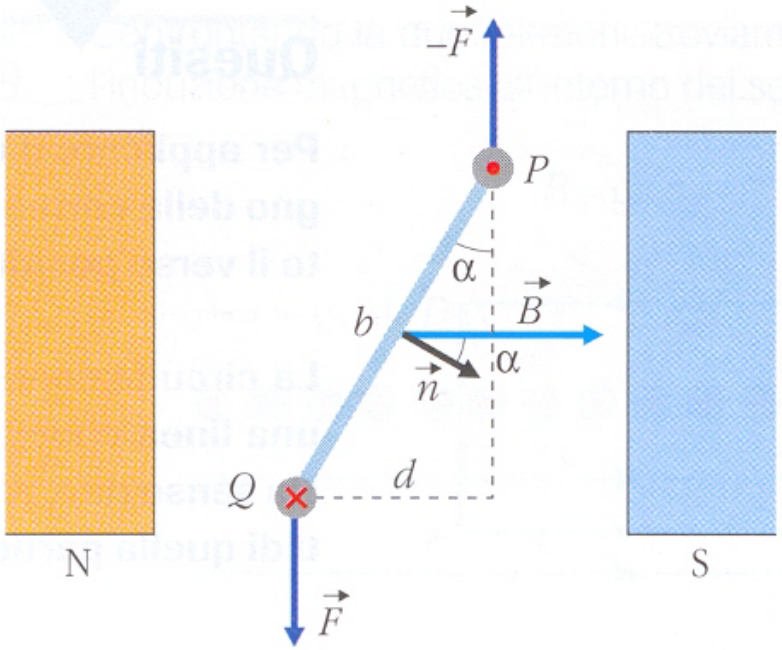
I motori elettrici reali, per funzionare a dovere, non hanno una sola spira, ma contengono diverse bobine, ciascuna costituita da numerose spire.

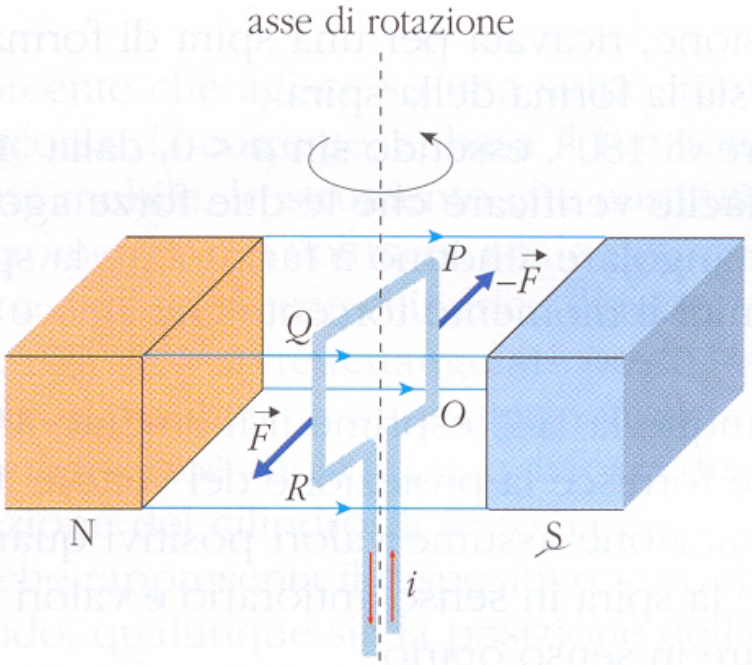
MOMENTO TORCENTE FORZA MAGNETICA SU UNA SPIRA



La spira rettangolare, percorsa dalla corrente i, è immersa in un campo magnetico uniforme di modulo B. Chiamiamo *OP=QR=a* e *PQ=RO=b*.

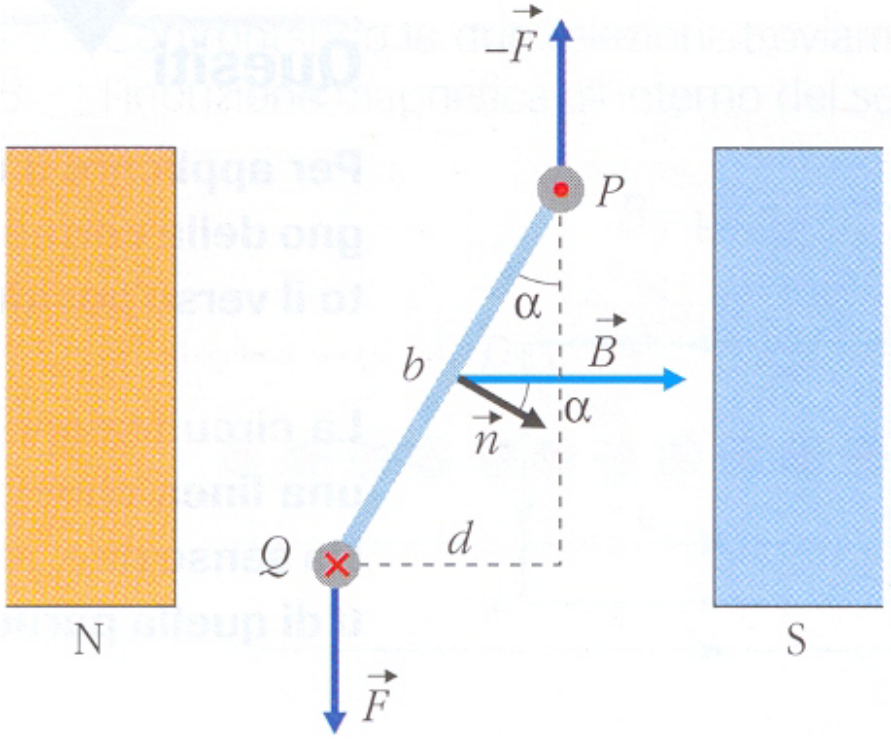
La spira è libera di ruotare intorno a un asse verticale passante per il suo centro di massa.





Sui lati *OP* e *QR* il campo magnetico esercita due forze aventi uguale intensità ***F=iaB*** e dirette in versi opposti (regola mano destra). Poiché le due forze agiscono lungo due rette parallele distinte, esse costituiscono una coppia, esercitano cioè un momento torcente sulla spira.

Le forze sui lati *PQ* e *RO* sono due vettori opposti che giacciono nel piano della spira e non producono effetto.

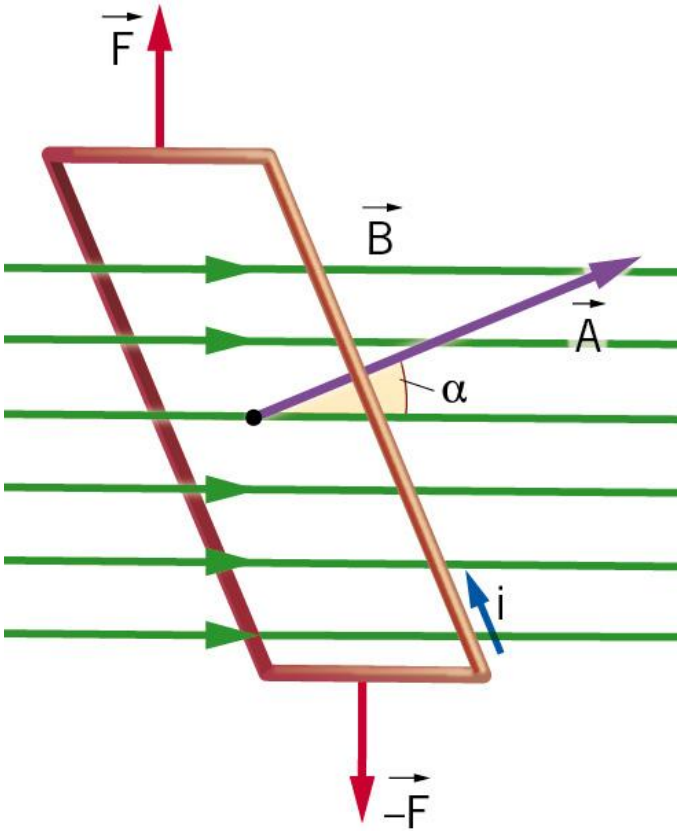


Spira e magnete visti dall'alto dove la corrente, perpendicolare al piano del foglio, esce da *P* ed entra in Q.

Il braccio della coppia di forze è: $d = b\,\text{sen}\alpha$

Il modulo del momento torcente è perciò:

$$M = F \cdot d \xrightarrow[A=ab]{F=iab \quad d=b\,\text{sen}\alpha} M = iAB\,\text{sen}\alpha$$



$M = iAB\text{sen}\alpha$

i=intensità di corrente

A=area della spira

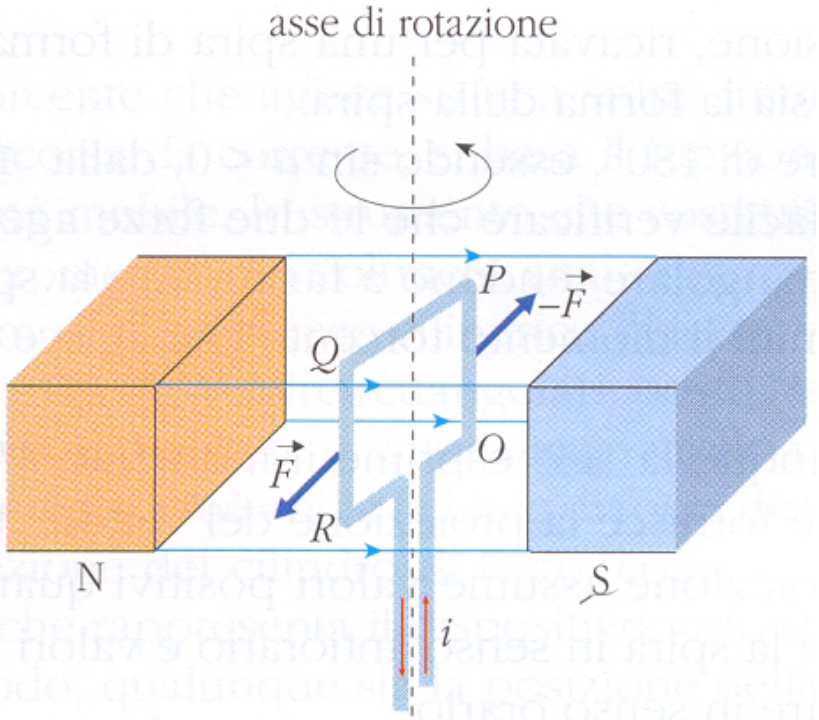
B=campo magnetico

α =angolo tra il vettore campo magnetico **B** e il vettore **A** perpendicolare alla spira

Una spira percorsa da corrente, posta in un campo magnetico, ruota fino a quando il vettore superficie della spira non è parallelo al vettore.

Questa espressione, ricavata per una spira di forma rettangolare, è valida qualunque sia la forma della spira.

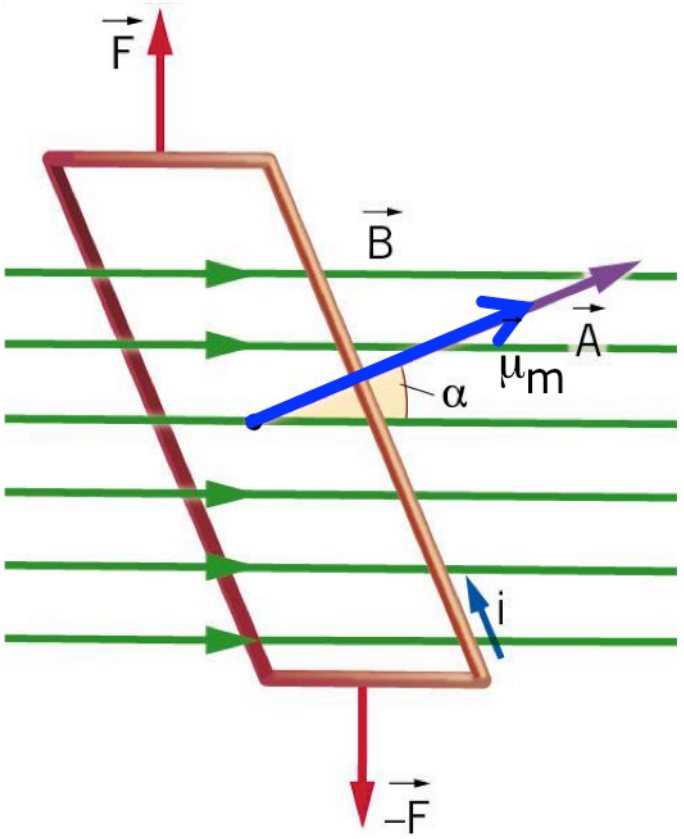
Il momento torcente **M** è un vettore, ma la relazione trovata è espressa in forma scalare, ossia esprime la proiezione del vettore **M** lungo l'asse di rotazione.



Questa considerazione suggerisce l'opportunità di introdurre un vettore chiamato **momento magnetico della spira**:

$$\vec{\mu}_m = i\vec{A}$$

Il momento magnetico ha modulo $\mu_m = iA$, direzione perpendicolare al piano della spira e verso coincidente con quello del versore **A**.

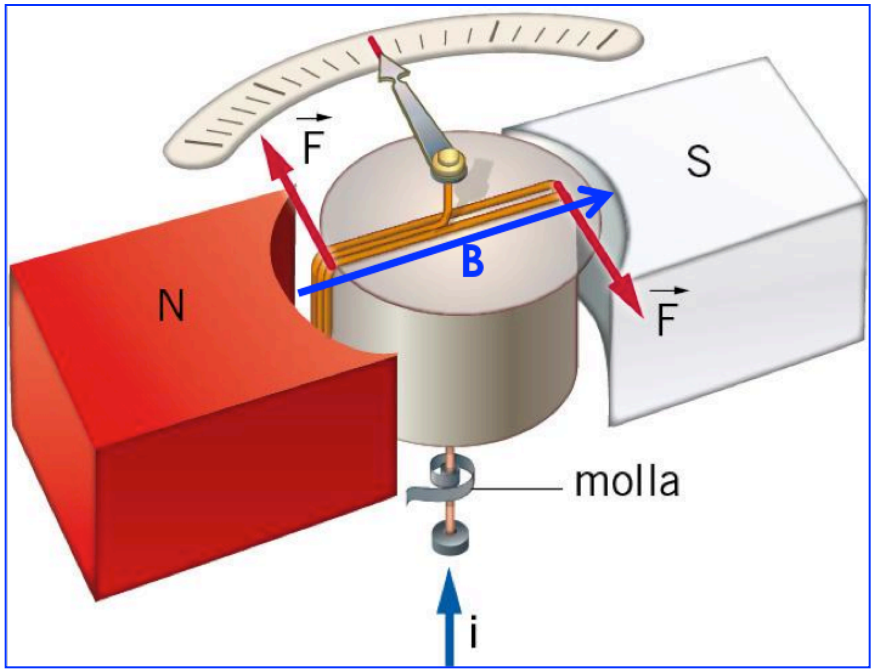


Il vettore **M** può quindi essere espresso come prodotto vettoriale fra μ e **B**:

$$\vec{M} = \vec{\mu}_m \otimes \vec{B}$$

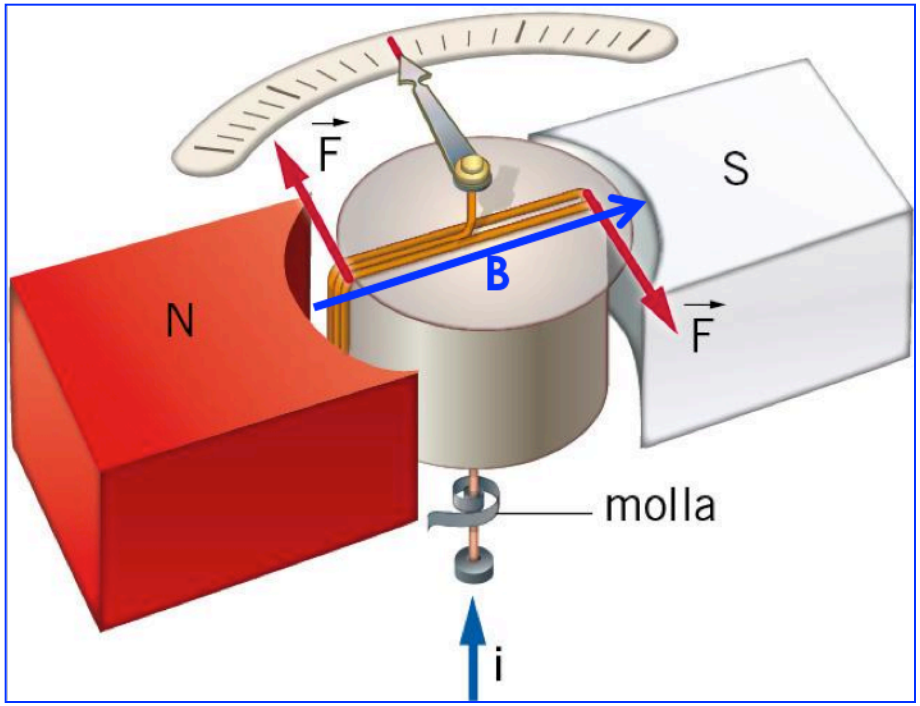
AMPEROMETRO E VOLTMETRO

Lo stesso momento della forza che fa girare il motore elettrico permette anche di misurare le correnti (amperometro) e le differenze di potenziale (voltmetro).



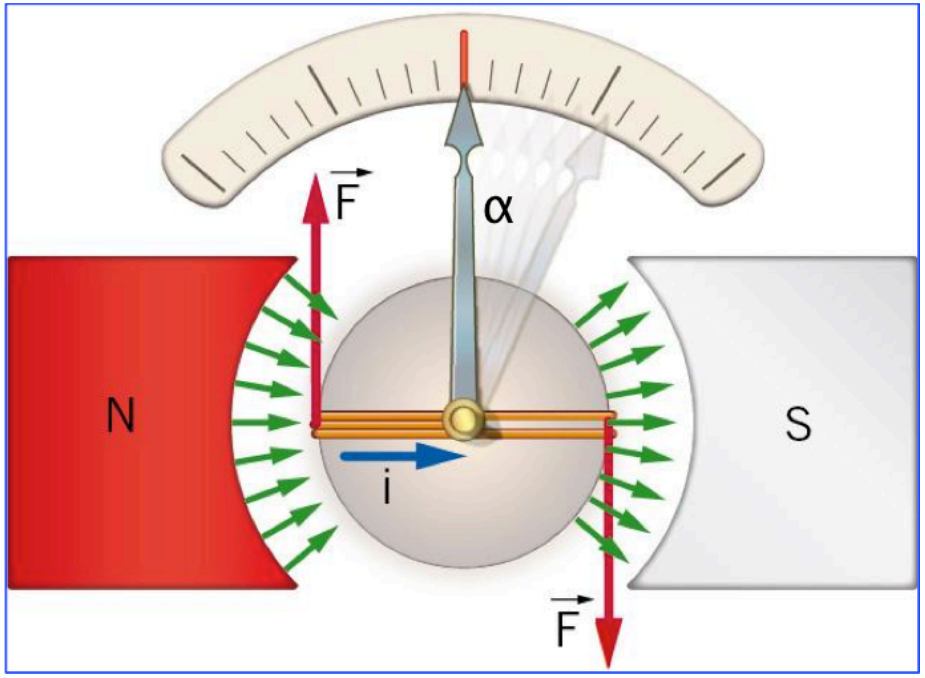
L'amperometro analogico è costituito da una bobina disposta tra le espansioni polari di un magnete e vincolata a ruotare intorno a un asse perpendicolare alle linee di campo.

La bobina è avvolta attorno a un cilindro di ferro che serve a concentrare il più possibile il campo magnetico all'interno della bobina stessa.



Facendo circolare nell'amperometro la corrente continua di cui si vuole misurare l'intensità, la bobina subisce una coppia di forze che tende a farla ruotare (ricordiamo che il momento torcente M è direttamente proporzionale alla corrente i.

La rotazione della bobina è contrastata da una molla.



All'equilibrio, quando il momento motore della forza magnetica e quello resistente della molla si compensano, l'indice fissato sulla bobina si ferma in corrispondenza a un angolo di rotazione.

Questo angolo di rotazione α è direttamente proporzionale al momento M applicato e, quindi, alla corrente che circola nella bobina.

Questo dispositivo può essere utilizzato anche per misurare le differenze di potenziale.