

Le basi del magnetismo

1. Fenomeni magnetici elementari

Così come l'ambra per i fenomeni elettrici, un'altra sostanza naturale, la magnetite, è all'origine delle prime investigazioni dell'uomo sui fenomeni magnetici. Giacimenti di magnetite o ferro magnetizzato furono scoperti dai Greci antichi in una zona dell'Asia Minore chiamata per l'appunto Magnesia.



Questo materiale appariva naturalmente "attivo" nel senso che non aveva bisogno di essere caricato per strofinio per manifestare la sua proprietà di attirare pezzetti di ferro.

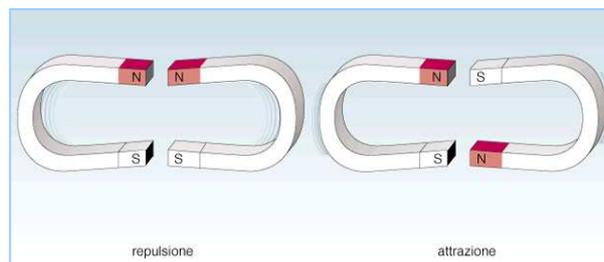


Un'altra proprietà della magnetite, ben nota già da molti secoli, è quella di orientarsi, se lasciata libera di ruotare, secondo, la direzione nord-sud dei meridiani terrestri; l'utilizzo della bussola fu infatti la prima applicazione pratica di questo genere di forze.

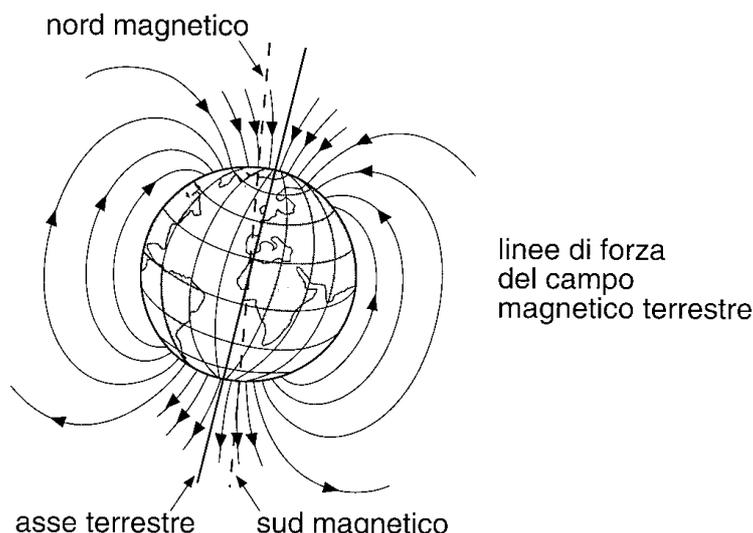


L'estremità del magnete che si rivolge verso nord fu chiamata **polo nord**, l'estremità opposta **polo sud**.

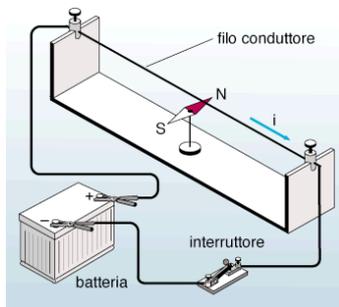
Le proprietà magnetiche risultano essere localizzate sui poli e avvicinando due magneti si manifestano intense forze di attrazione (poli opposti) o di repulsione (poli uguali).



La prima trattazione scientifica sul magnetismo risale all'anno 1600 con la pubblicazione dell'opera *Physiologia nova de magnete* del medico inglese William, Gilbert (1544-1603). In essa viene affrontato soprattutto il problema del magnetismo terrestre e descritta la Terra come una enorme calamita capace di orientare l'ago delle bussole.



Poiché le forze elettriche e quelle magnetiche, sembravano aver origine da cause differenti, si continuò per secoli a studiare separatamente e a considerare distinte queste forze, fino a quando nel 1820 il fisico danese Hans Christian Oersted (1777-1851) scoprì che la zona circostante un filo elettrico percorso da corrente è sede di un campo magnetico.



Quando in un filo elettrico passa corrente, un ago magnetico posto al di sotto si orienta non più secondo i meridiani terrestri, ma perpendicolarmente al filo.

Oggi sappiamo che i campi magnetici sono generati dalle correnti elettriche, cioè dalle cariche elettriche in moto.

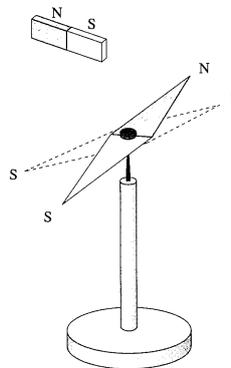
Elettricità e magnetismo sono quindi ambedue fenomeni legati all'esistenza delle cariche elettriche e vengono unificati nell'*elettromagnetismo*.

Se una carica è in quiete nel nostro sistema di riferimento, noi vediamo attorno ad essa un campo elettrico, ma se essa si muove, ad essa si associa, oltre al campo elettrico, anche un campo magnetico.

Campo magnetico

Anche le azioni tra magneti possono essere descritte in termini di campo, intendendo che la presenza di una calamita o di una corrente elettrica modifica lo spazio intorno a sé e che tale modificazione si manifesta con forze di origine magnetica che agiscono su altri magneti o su cariche in moto.

Quindi *ogni magnete genera nello spazio che lo circonda un campo magnetico*.



Il vettore campo magnetico \vec{B}

La definizione operativa del vettore che rappresenta il campo magnetico \vec{B} (per ragioni storiche esso viene chiamato con il nome di **vettore induzione magnetica**) potrà essere data in seguito, solo dopo aver studiato la forza che il campo magnetico esercita su di un filo percorso da corrente.

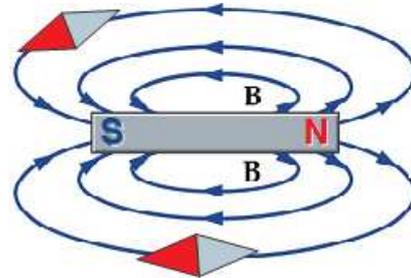
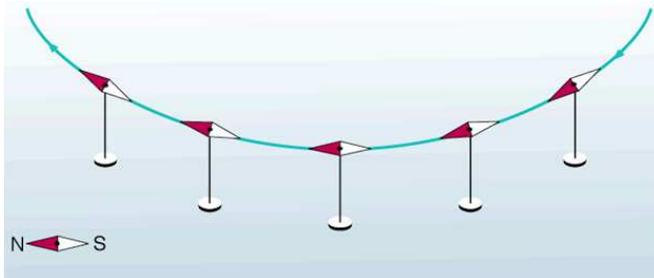
Per ora possiamo definire semiquantitativamente (solo in direzione e verso) il campo magnetico \vec{B} osservando le forze che agiscono su un ago di bussola in prossimità di un magnete.

Direzione e verso di \vec{B}

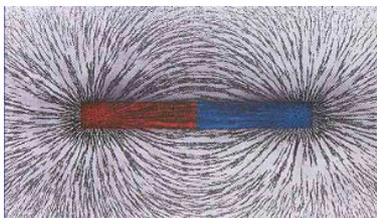
Ponendo un ago di bussola, che equivale alla carica esploratrice del campo elettrico, in vari punti dello spazio attorno al magnete che genera il campo, si osserva che esso assume una particolare direzione ed orientazione in ogni punto. Assumiamo come **direzione** del campo magnetico la direzione dell'ago di bussola e come **verso** quello che va dal **Sud** al **Nord** dello stesso.

Le linee di campo

Spostando l'ago di bussola in posizioni abbastanza vicine, è così possibile avere un'idea dell'andamento delle **linee di forza** del campo magnetico.



Per determinare sperimentalmente l'andamento delle linee di forza del campo generato da un magnete, chiamato *spettro magnetico*, si può spargere della limatura di ferro su un foglio di cartone collocato sul magnete.



Limatura di ferro nelle vicinanze di un magnete.

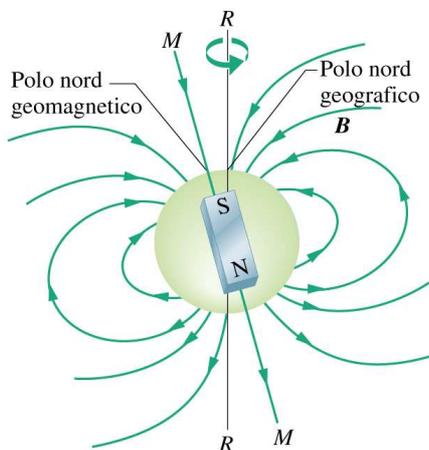
Le particelle di ferro si magnetizzano, diventando tanti piccoli aghi magnetici che si orientano nella direzione del campo magnetico, analogamente ai granelli di semolino (o di altro dielettrico) che si polarizzano e si dispongono lungo le linee di forza del campo elettrico.

Proprietà delle linee di campo

- In ogni punto sono tangenti alla direzione de campo magnetico.
- Sono linee chiuse.
- Escono dai poli nord ed entrano nei poli sud.
- Si addensano in prossimità dei poli del magnete e si diradano allontanandosene.
- 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, i cui poli Nord e Sud sono in prossimità rispettivamente del Sud e del Nord geografici.



Come ogni magnete, la Terra genera nello spazio circostante un campo magnetico, detto **campo magnetico terrestre**.

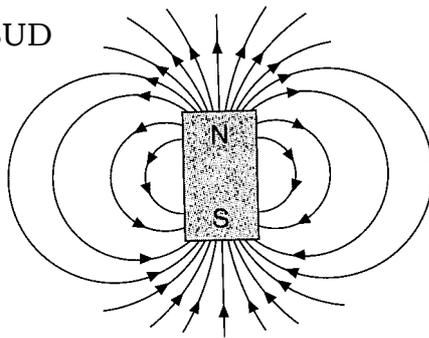
Si può osservare che i poli magnetici sono spostati rispetto ai poli geografici. La deviazione angolare δ fra il polo magnetico indicato da una bussola (il Sud del magnete terrestre) e il Nord geografico prende il nome di **declinazione magnetica**, mentre l'angolo i che la direzione del campo magnetico 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.

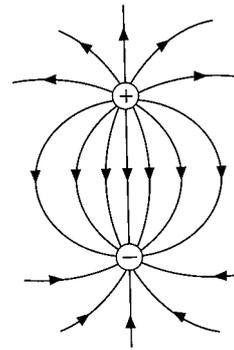
DIPOLO MAGNETICO

Come già detto, non è possibile isolare un singolo polo magnetico, per cui si deve trattare il caso del dipolo magnetico, cioè del campo creato da una coppia polo nord e polo sud posti ad una certa distanza. Le linee di forza del campo intorno ad un dipolo magnetico, per convenzione, hanno un verso che, fuori dal magnete, va dal polo nord al polo sud.

NORD → SUD



DIPOLO MAGNETICO



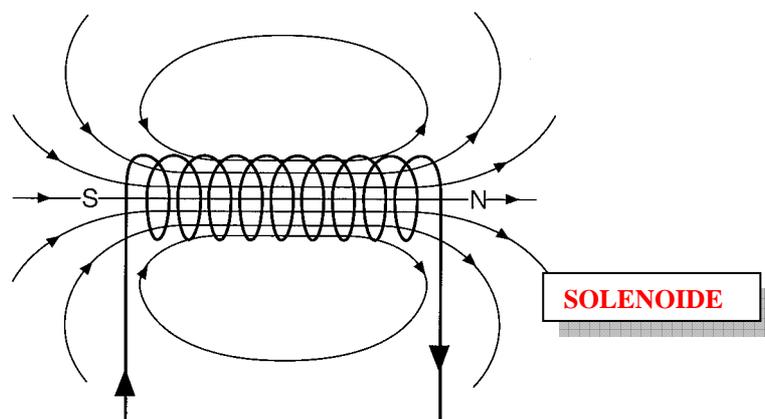
$Q_+ \rightarrow Q_-$

DIPOLO ELETTRICO

E' evidente la somiglianza di questo campo con quello generato da un dipolo elettrico, ma vi è una sostanziale differenza.

- Nel **dipolo elettrico** le linee di forza "**nascono**" dalla carica positiva e "**muoiono**" in quella negativa, in modo tale che possiamo pensare alla prima come una **sorgente** e la seconda come un **pozzo** del campo elettrico.
- Questo non avviene per il **campo magnetico**, ove non vi sono **né sorgenti né pozzi** del campo.

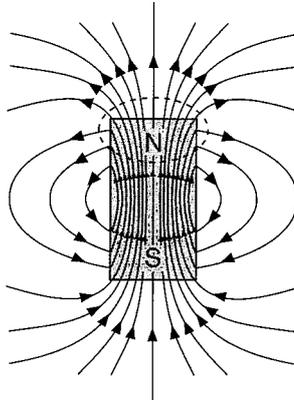
La situazione può essere messa bene in evidenza osservando il **campo magnetico generato da un filo percorso da corrente**, avvolto in modo da formare una serie di avvolgimenti molto ravvicinati (*solenoidi*).



SOLENOIDE

Come si vede, il campo magnetico generato nello spazio attorno al solenoide è del tutto simile a quello originato da un magnete a barra e le linee di forza non hanno

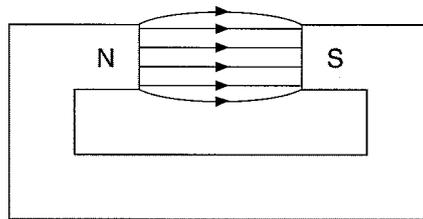
origine o fine sui poli, ma continuano all'interno del solenoide (dove il campo è pressoché uniforme), in modo da formare linee chiuse. Possiamo pensare, per analogia, che la stessa cosa avvenga all'interno del magnete a barra.



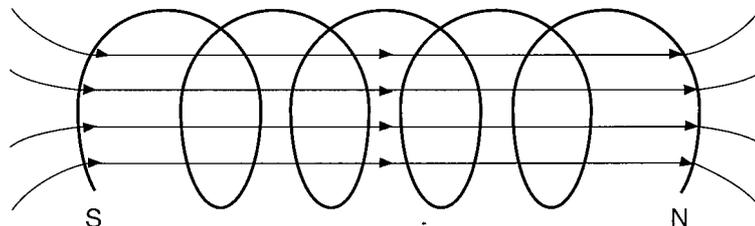
Si noti che all'esterno del magnete le linee di forza vanno dal **nord** al **sud**, ma all'interno, essendo linee chiuse, varino dal **sud** al **nord**.

CAMPO MAGNETICO UNIFORME

La zona di spazio compresa tra le espansioni polari contrapposte di un magnete permanente è sede di un campo magnetico uniforme.



Le linee di forza sono parallele ed equidistanti, escono dal polo nord ed entrano nel polo sud. Un campo magnetico pressoché uniforme si può ottenere all'interno di un solenoide percorso da corrente. Infatti, all'interno di esso il campo magnetico ha le linee di forza equidistanti e parallele all'asse longitudinale.



All'interno del solenoide le linee di forza vanno dal sud al nord.

CAMPI ELETTRICI E CAMPI MAGNETICI: ANALOGIE E DIFFERENZE

ANALOGIE	
CAMPO ELETTRICO	CAMPO MAGNETICO
<ul style="list-style-type: none"> • Esistono due cariche elettriche diverse, la positiva e la negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Esistono due poli magnetici, polo nord polo sud.
<ul style="list-style-type: none"> • Cariche uguali si respingono e cariche opposte si attirano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Poli uguali si respingono e poli opposti si attirano.
<ul style="list-style-type: none"> • Campo elettrico è un campo di forza 	<ul style="list-style-type: none"> • Campo magnetico è un campo di forza.
<ul style="list-style-type: none"> • Può essere descritto da linee di campo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Può essere descritto da linee di campo.
<ul style="list-style-type: none"> • Per tracciare le linee del campo elettrico si usa una carica positiva di prova. 	<ul style="list-style-type: none"> • Per tracciare le linee del campo elettrico si usa una un aghetto magnetico di prova.
<ul style="list-style-type: none"> • E' possibile elettrizzare un conduttore scarico mediante un corpo carico. 	<ul style="list-style-type: none"> • E' possibile magnetizzare un corpo ferromagnetico con un magnete.

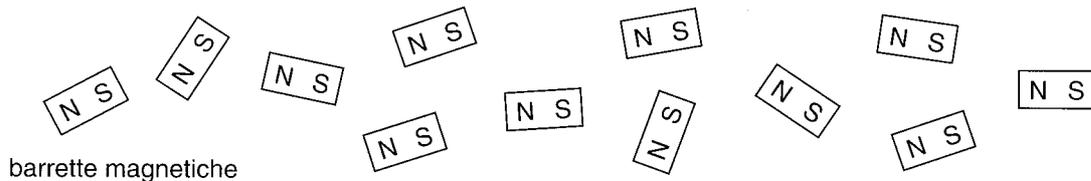
DIFFERENZE	
CAMPO ELETTRICO	CAMPO MAGNETICO
<ul style="list-style-type: none"> • Nell'elettrizzazione per contatto vi è un passaggio di cariche elettriche da un corpo all'altro. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nella magnetizzazione di un corpo ferromagnetico non vi è alcun passaggio di poli magnetici.
<ul style="list-style-type: none"> • Un corpo può essere elettrizzato in modo da avere un eccesso di carica positiva o negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Non esiste un corpo magnetizzato che abbia un eccesso di magnetismo «nord» oppure «sud».
<ul style="list-style-type: none"> • È possibile separare due cariche elettriche di segno contrario ed osservare il campo intorno ad una carica singola. 	<ul style="list-style-type: none"> • È impossibile separare il polo nord di una calamita dal polo sud. (<i>esperienza della calamita spezzata</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • Nel dipolo elettrico le linee di forza "nascono" dalla carica positiva e "muoiono" in quella negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nel dipolo magnetico non vi sono né sorgenti né pozzi del campo
<ul style="list-style-type: none"> • Nel campo elettrico le linee di forza sono linee aperte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nel campo magnetico le linee di forza sono linee chiuse.
<ul style="list-style-type: none"> • Il campo elettrico è conservativo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Il campo di induzione magnetica non è un campo conservativo.

ESPERIENZA DELLA CALAMITA SPEZZATA

Spezzando a metà una calamita, ai suoi nuovi estremi si riformano i due poli opposti e questo avviene per quante volte si riesca a spezzare la calamita.

Il magnete naturale dunque può essere considerato come un insieme ordinato di magnetini elementari.

L'ordine è fondamentale: se consideriamo una serie di piccole barrette magnetiche e le raggruppiamo ordinatamente otteniamo una crossa barra magnetizzata, ma se esse sono raggruppate casualmente la barra risulterà smagnetizzata.



N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S

raggruppamento ordinato
(magnetizzazione)

S	N	S	N	S	N	N	S
N	S	N	S	N	N	S	N
N	S	S	N	S	S	N	S

raggruppamento disordinato
(assenza di magnetizzazione)

Se quindi da un lato è possibile parlare di cariche elettriche isolate, per quanto riguarda il magnetismo ha senso parlare solo di coppie di poli (dipoli) magnetici. Questa differenza è fondamentale perché si riflette in una differenza tra campo elettrico e campo magnetico.

FORZE TRA MAGNETI E CORRENTI

• Esperimento di Oersted

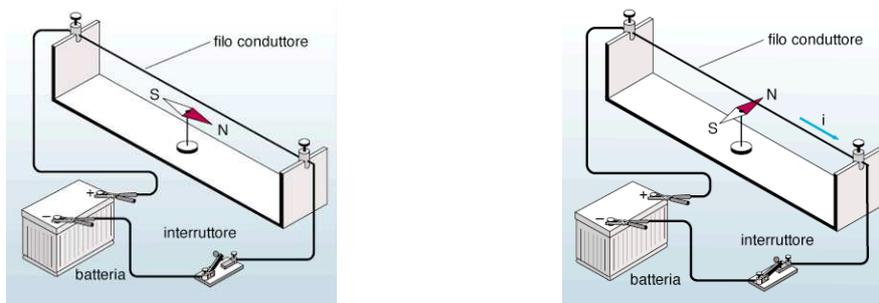
Nel 1820 il fisico danese Oersted scoprì che esisteva un legame tra fenomeni elettrici e fenomeni magnetici.

Nel presentare ai suoi studenti dell'Università di Copenaghen la pila di Volta, notò casualmente che, nel circuito che aveva preparato, un ago magnetico montato su un supporto e posto nelle vicinanze del circuito ruotava vertiginosamente non appena il circuito veniva chiuso.

Oersted concluse che tale rotazione fosse dovuta al campo magnetico generato dal circuito percorso da corrente.

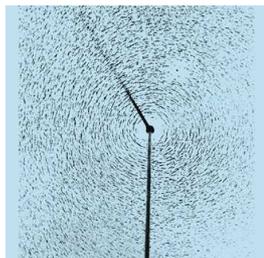
Quindi:

Una corrente elettrica genera nello spazio circostante un campo magnetico.



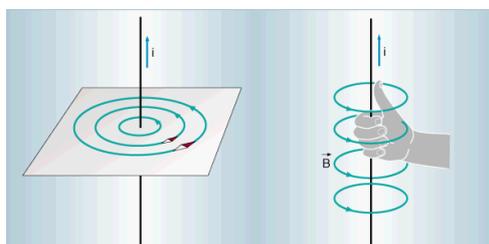
• Campo magnetico generato da un filo percorso da corrente

Le linee del campo magnetico generato da un filo percorso da corrente sono circonferenze concentriche che hanno per centro il filo.



Spettro del campo magnetico di un filo rettilineo percorso da corrente ottenuto con il metodo della limatura di ferro

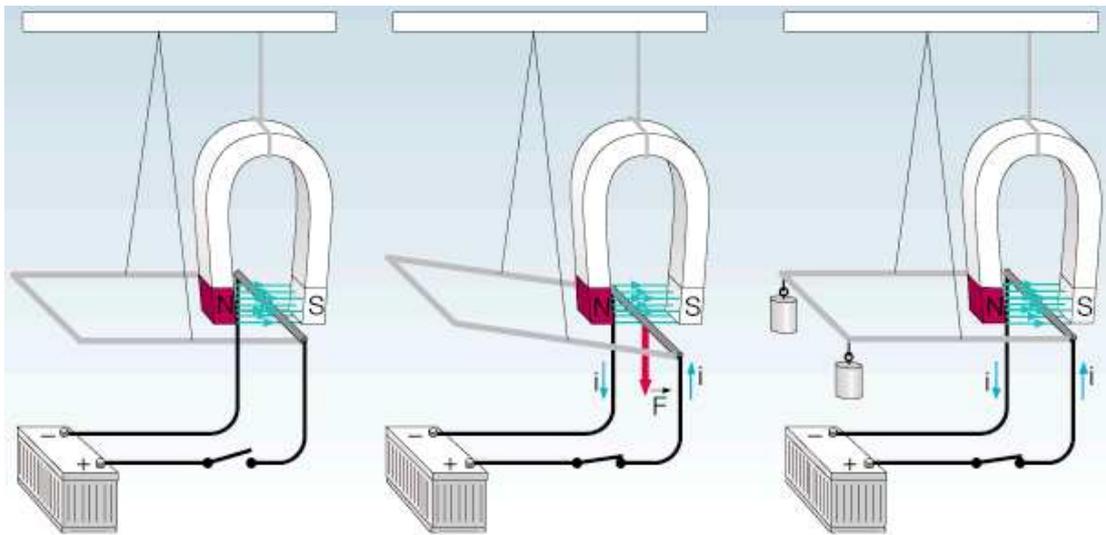
Il verso di tali linee può essere individuato disponendo la mano destra aperta con il pollice diretto nel senso della corrente. Le dita si chiudono attorno al filo nel verso del campo magnetico.



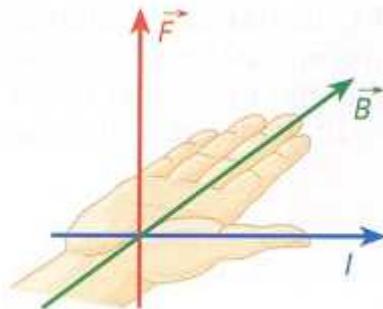
• Esperimento di Faraday

Nel 1821 il fisico inglese Faraday notò che un conduttore percorso da corrente subisce una forza quando si trova in un campo magnetico.

Infatti si può notare che facendo passare tra i poli di un magnete un filo rigido (sospeso mediante una intelaiatura isolante per equilibrarne il peso e permettergli di muoversi in verticale) collegato ad una batteria ed a un interruttore, se si chiude il circuito il filo subisce una forza che lo spinge verso il basso.



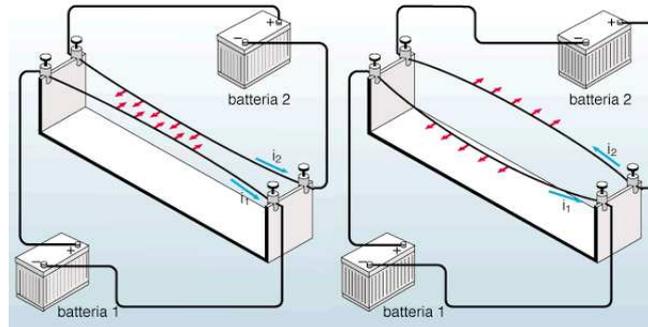
Quindi, se inseriamo un filo metallico in un campo magnetico, in direzione perpendicolare alle linee del campo, al passaggio della corrente nel filo, su di esso agisce una forza (magnetica) perpendicolare al filo e alle linee di campo magnetico. Il verso della forza magnetica è dato dalla regola della mano destra.



Il campo magnetico esercita delle forze non soltanto sui magneti ma anche sui conduttori percorsi da correnti elettriche.

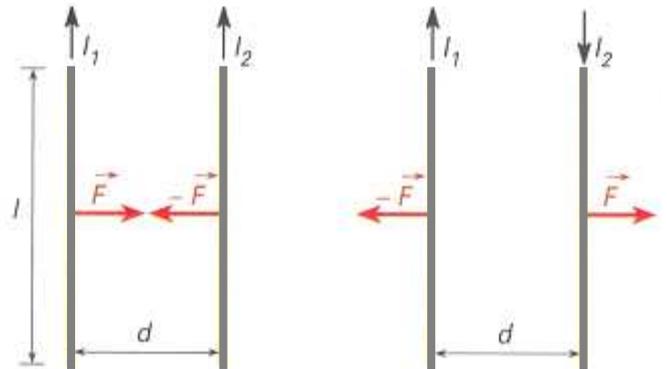
FORZE TRA CORRENTI

Appena giunta a Parigi la notizia degli esperimenti di Oersted sulle azioni magnetiche prodotte da correnti elettriche stazionarie, Ampère notò sperimentalmente che due fili paralleli rettilinei percorsi da corrente si attraggono se le correnti hanno verso concorde e si respingono se le correnti hanno versi contrari.



Se i due fili, posti a distanza d , sono percorsi dalle correnti i_1 e i_2 , misurando la forza che ciascun filo esercita su un tratto lungo l dell'altro, si verifica che essa dipende dalla distanza d tra i due fili e dalle correnti che li attraversano:

$$F = k \frac{i_1 \cdot i_2 \cdot l}{d}$$



La costante k , nel S.I. è: $k = \frac{\mu_0}{2\pi}$ dove $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ è una costante detta **permeabilità magnetica del vuoto**.

Quindi, nel S.I., si ha:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2 \cdot l}{d} \quad \text{legge elettrodinamica di Ampère}$$

- **Definizione dell'ampère**

L'attrazione fra i fili paralleli è sfruttata per definire l'unità di intensità di corrente nel sistema SI: l'**ampère**.

Precisamente:

1 ampere (1 A) è quella corrente di intensità costante che, percorrendo nello stesso verso due conduttori rettilinei indefinitamente lunghi, paralleli, di sezione circolare trascurabile, posti nel vuoto a distanza di 1 m, fa esercitare tra essi una forza attrattiva di $2 \cdot 10^{-7}$ N per ogni metro di conduttore.

Infatti

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2 \cdot l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{N}{A^2} \cdot \frac{1A \cdot 1A}{1m} l = 2 \cdot 10^{-7} N$$

- **Definizione del coulomb**

Dall'unità di misura dell'intensità di corrente (A), si deriva l'unità di misura della carica elettrica, il coulomb (C):

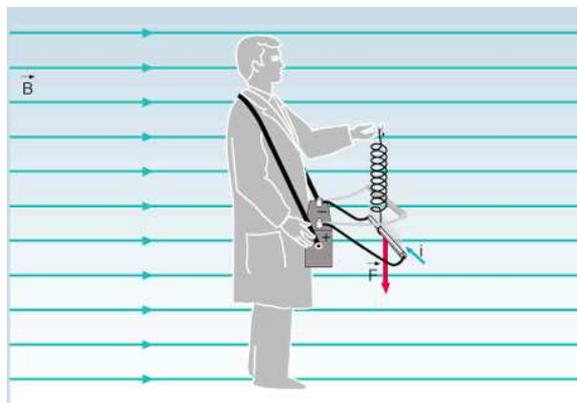
Il coulomb è la carica elettrica che passa in un secondo attraverso la sezione di un conduttore percorso dalla corrente di un ampere.

$$1C = 1Ax1s$$

INTENSITA' DEL CAMPO MAGNETICO

Per esplorare un campo magnetico e determinarne la direzione e il verso, è possibile usare un aghetto magnetico.

Per conoscerne l'intensità possiamo usare un filo percorso da corrente perché questo subisce una forza in presenza di un campo magnetico.

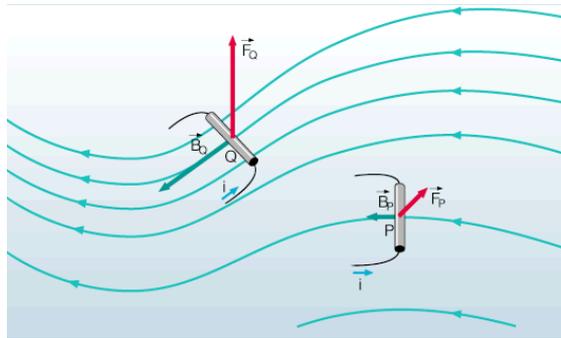


Tale filo sarà chiamato “*filo di prova*”.

Posizionato il filo di prova in diversi punti, possiamo misurare la forza che il campo magnetico esercita su di lui.

La forza che il c. m. esercita sul filo **dipende dalla sua orientazione:**

- se il **filo** è **perpendicolare** alle linee del c. m. l'intensità è **max**,
- se il filo è **obliquo** la forza è **minore**,
- se il filo è **parallelo** alle linee del c.m. diventa **uguale a zero**.



Per evitare ambiguità disponiamo il filo perpendicolare alle linee del c. m. e allora si trova che la forza è direttamente proporzionale alla lunghezza del filo e alla corrente i che lo attraversa:

$$F = B \cdot i \cdot l \quad (1)$$

Il valore di B cambia da punto a punto e dipende dalle caratteristiche del c. m. Dalla (1) si ha:

$$B = \frac{F}{i \cdot l}$$

Quindi B è numericamente uguale alla forza che subirebbe un filo di lunghezza 1m attraversato da una corrente di 1A collocato in un punto dello spazio perpendicolarmente alle linee del c. m.

B è l'**intensità del campo magnetico** in un punto dello spazio

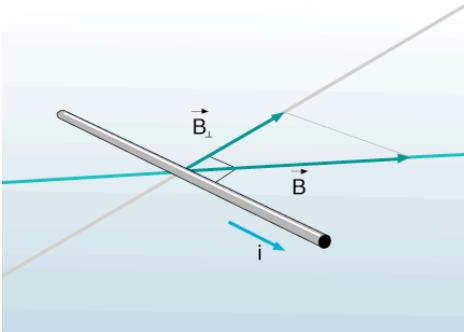
$$\overset{\text{def}}{B} = \frac{F}{i \cdot l}$$

F è la forza che subisce il filo di prova lungo l attraversato dalla corrente i disposto perpendicolarmente alle linee del c. m.

Nel S.I. B si misura in **tesla** (T) $\Leftrightarrow 1T = \frac{1N}{1A \cdot 1m}$

FORZA ESERCITATA DA UN CAMPO MAGNETICO SU UN FILO PERCORSO DA CORRENTE

Per determinare la forza F che agisce su un conduttore lungo l , percorso dalla corrente i , disposto obliquamente alle linee del c. m., disponiamo il conduttore perpendicolarmente alle linee del campo e lo facciamo ruotare. Sappiamo che la forza diventa sempre più piccola e si annulla quando il conduttore diventa tangente alle linee del campo.



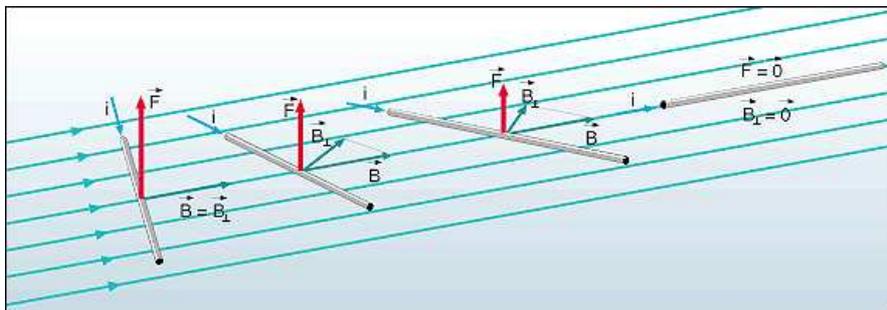
Quindi la forza non è determinata da \vec{B} ma dalla sua proiezione \vec{B}_\perp nella direzione perpendicolare al filo.

Più \vec{B} è inclinato rispetto alla direzione di i più \vec{B}_\perp diminuisce e minore è la forza F .

Sostituendo la \vec{B}_\perp nella formula $F = B \cdot i \cdot l$ al posto di B , si ottiene la formula più generale valevole per un conduttore percorso da corrente che ha una direzione qualsiasi rispetto alle linee del campo.

$$F = B_\perp \cdot i \cdot l$$

Conclusione:



- F è **max** se il filo è perpendicolare alle linee del campo (in tal caso $\vec{B}_\perp = \vec{B}$)
- F è **nulla** se il filo è parallelo alle linee del campo (in tal caso $\vec{B}_\perp = 0$)

La direzione di F è sempre perpendicolare al vettore \vec{B} e alla direzione di i . Il verso di F è dato dalla regola della mano destra (pollice nel verso di i , le altre dita nella direzione di \vec{B}) e risulta uscende dal palmo della mano.

L'intensità di F è data da : $F = B \cdot i \cdot l \cdot \sin\alpha$ dove α è l'angolo formato da l e \vec{B} .

CAMPO MAGNETICO GENERATO DA UN FILO PERCORSO DA CORRENTE

Consideriamo due fili rettilinei percorsi da correnti.

▪ Correnti concordi

Il filo 1 è immerso nel campo \vec{B}_2 , generato dal filo 2, le cui linee di campo sono perpendicolari alla corrente $i_1 \Rightarrow$ la forza che subisce ogni tratto lungo l del filo 1 da parte del campo \vec{B}_2 è data da:

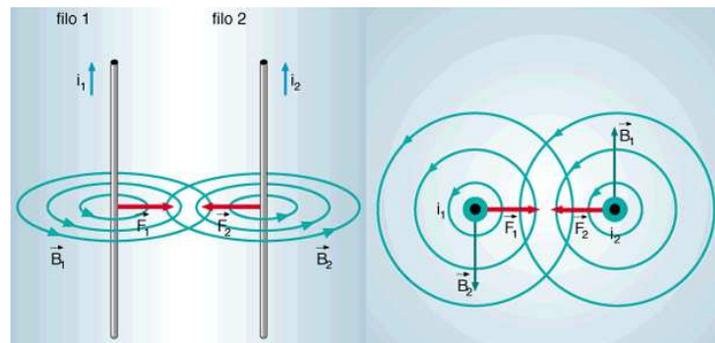
$$F_1 = B_2 \cdot i_1 \cdot l \quad (1)$$

La direzione di F_1 va verso il filo 2.

Allo stesso modo il filo 2 è immerso nel campo \vec{B}_1 generato dal filo 1 \Rightarrow la forza che subisce ogni tratto lungo l del filo 2 da parte del campo \vec{B}_1 è data da:

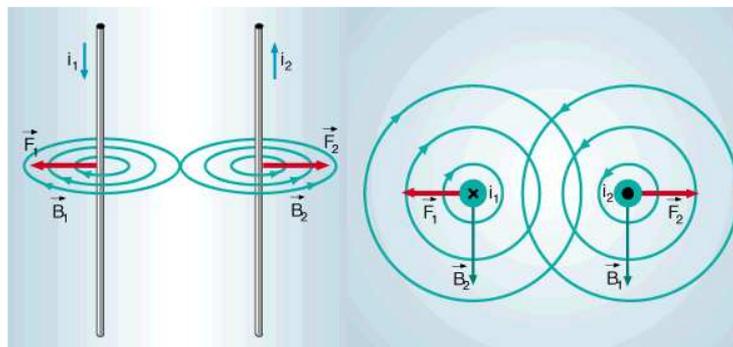
$$F_2 = B_1 \cdot i_2 \cdot l$$

Quindi i **due fili si attraggono**.



▪ Correnti discordi

La forza F_2 è diretta verso l'esterno e la forza F_1 è diretta verso l'esterno, quindi i **due fili si respingono**.



Dalla formula

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

sappiamo che la forza tra due fili paralleli dipende dalla distanza d , quindi la forza sul filo 1 è:

$$F_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2 \cdot l}{d} \quad (2)$$

Poiché la (1) e la (2) sono espressioni della stessa forza, si ha:

$$B_2 \cdot i_1 \cdot l = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2 \cdot l}{d}$$

Dividendo per $i_1 \cdot l$, si ottiene:

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_2}{d}$$

Quindi:

Il campo m. di un conduttore rettilineo è direttamente proporzionale alla corrente che lo attraversa e diminuisce in modo inversamente proporzionale alla distanza dal filo.

In generale

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{d} \quad \text{legge di Biot e Savart (1820)}$$

Tale formula ci permette di calcolare il valore del c. m. generato dal filo.

AZIONE DI UN CAMPO MAGNETICO SU UNA PARTICELLA CARICA IN MOTO – FORZA DI LORENTZ –

La forza agente su un filo percorso da corrente (cioè la risultante delle forze magnetiche che agiscono sui singoli elettroni di conduzione in moto nel filo) è data da

$$F = i \cdot l \cdot B$$

ma, poiché la corrente è continua sarà $i = \frac{q}{t} \Rightarrow F = \frac{q}{t} \cdot l \cdot B = \frac{N \cdot e}{t} \cdot l \cdot B$ dove $q = N \cdot e$ è la quantità di carica che attraversa una sezione del filo nel tempo t .

Quindi

$$F = \frac{N \cdot e}{t} \cdot l \cdot B \text{ ma } \frac{l}{t} = v_e \Rightarrow F = \frac{N \cdot e}{t} \cdot l \cdot B = N \cdot e \cdot v_e \cdot B$$

Posto $N=1 \Rightarrow F_e = e \cdot v_e \cdot B$ che fornisce la forza agente su un singolo elettrone in moto nel filo.

In generale,

- una particella con carica q in moto con velocità **v perpendicolarmente** ad un campo magnetico costante B è soggetta ad una forza magnetica di intensità:

$$F = q \cdot v \cdot B$$

La direzione e il verso di F sono dati dalla regola della mano destra (con il pollice orientato come \vec{v}).

- Se la particella entra nel campo magnetico con velocità **v obliqua** rispetto al campo, la forza diventa:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha = q \cdot v \cdot B_n$$

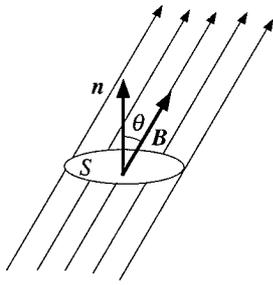
dove α è l'angolo formato da \vec{v} e \vec{B} ; $B \sin\alpha$ è il modulo del componente di \vec{B} perpendicolare a \vec{v} .

- Se la particella entra nel campo magnetico con velocità **v parallela** alle linee del campo, la forza diventa: $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha = q \cdot v \cdot B \cdot \sin 0^\circ = 0$, quindi non subisce alcuna forza.

Se una particella carica si muove in una regione in cui sono presenti sia un campo magnetico sia un campo elettrico, la forza risultante è la somma vettoriale della forza elettrica e di quella magnetica $\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m$, cioè:

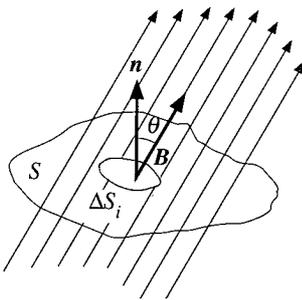
$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad \text{forza di Lorentz}$$

IL FLUSSO MAGNETICO



- In un **campo magnetico uniforme**, si definisce flusso Φ del campo magnetico B , attraverso una superficie piana di area S , lo scalare $\Phi = B S \cos\theta$, dove θ è l'angolo tra B e la perpendicolare orientata alla superficie S .
Se B ha direzione **perpendicolare** a S , il flusso è

$$\Phi = B S.$$



- Nel caso di un **campo magnetico non uniforme** e di una superficie S comunque estesa, anche non piana, per determinare il flusso si suddivide la superficie S in N areole ΔS_i .
Gli elementi di superficie ΔS_i si possono supporre piani e tanto piccoli da poter considerare, in ognuno di essi, il campo B uniforme.

Sotto queste ipotesi il flusso sarà:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N B_i \Delta S_i \cos \theta_i$$

Nel S.I. l'unità di misura di Φ è il **Weber** (Wb)

LEGGE DI GAUSS PER IL MAGNETISMO

Se consideriamo una superficie chiusa in un campo magnetico, il numero delle linee di forza che entrano nella superficie è esattamente uguale al numero di quelle che escono; poiché non esistono sorgenti isolate di campo magnetico, il flusso totale di B attraverso qualsiasi superficie chiusa è nullo.

La **legge di Gauss** per il campo magnetico afferma che:

“In un campo magnetico, il flusso attraverso una qualunque superficie chiusa è sempre nullo”.

Quindi:

$$\Phi_S(B) = 0$$

Conseguenze del teorema di Gauss:

➤ il flusso entrante nella superficie chiusa S è uguale al flusso da essa uscente ;

le linee di induzione si chiudono sempre su se stesse, oppure partono e terminano all'infinito.