FISICA

ElettroMagnetismo

Il campo magnetico

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

docente di **Matematica e Fisica**

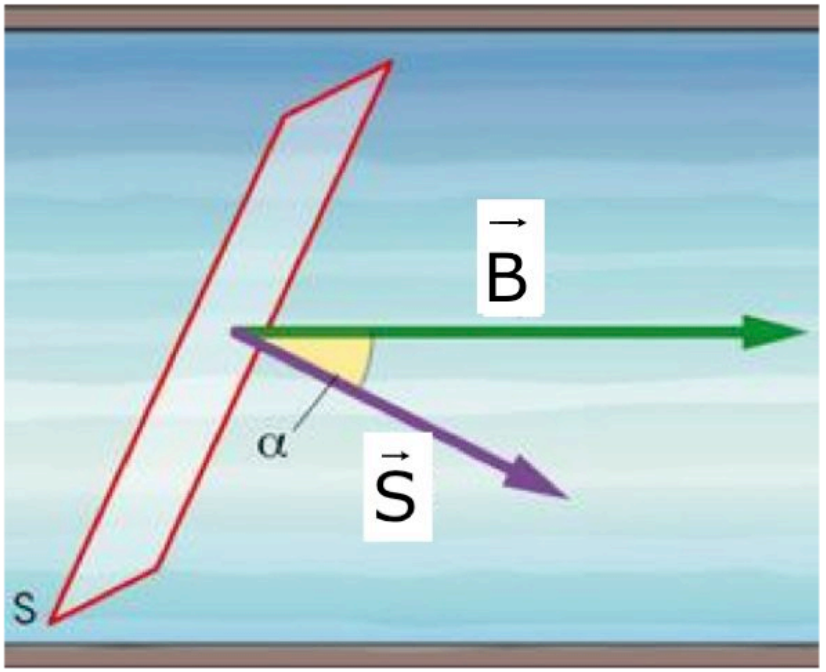
IL FLUSSO DEL CAMPO MAGNETICO

Il flusso del campo magnetico **B** attraverso una superficie, si definisce in modo analogo al flusso del campo elettrico.

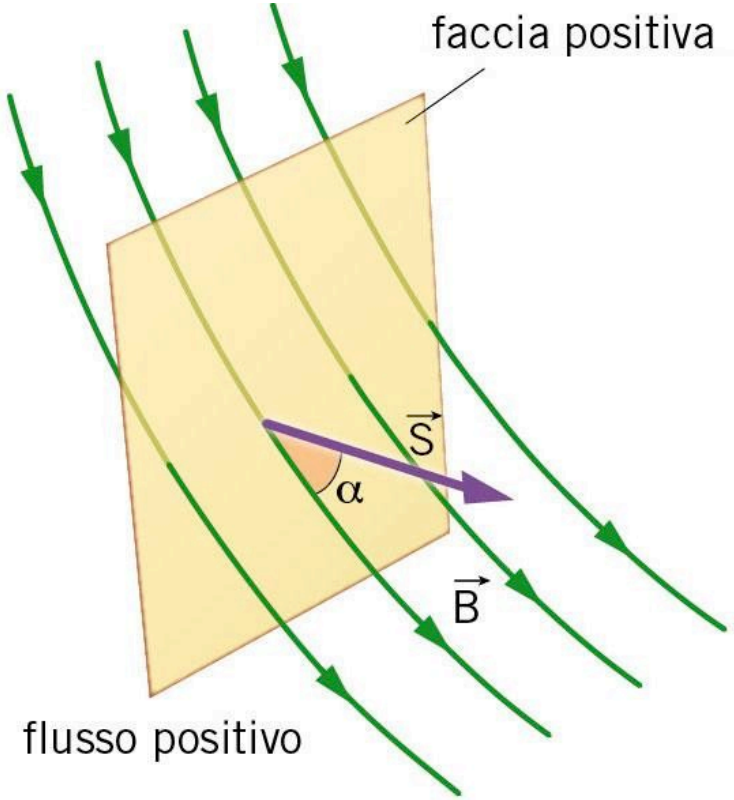
FLUSSO DEL CAMPO MAGNETICO

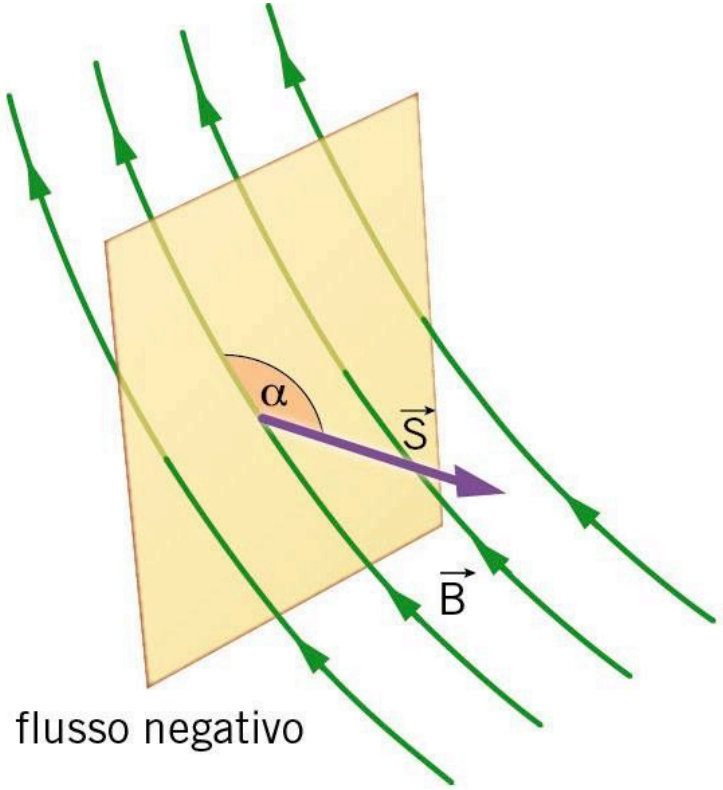
Se il campo magnetico ***B*** è uniforme su tutti i punti di una superficie piana orientata **S**, il flusso del campo magnetico attraverso la superficie è il prodotto scalare tra il vettore campo magnetico **B** ed il vettore superficie **S**:

$$\Phi_S(\vec{B}) = \vec{B} \bullet \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$



Unità di misura
weber (Wb)





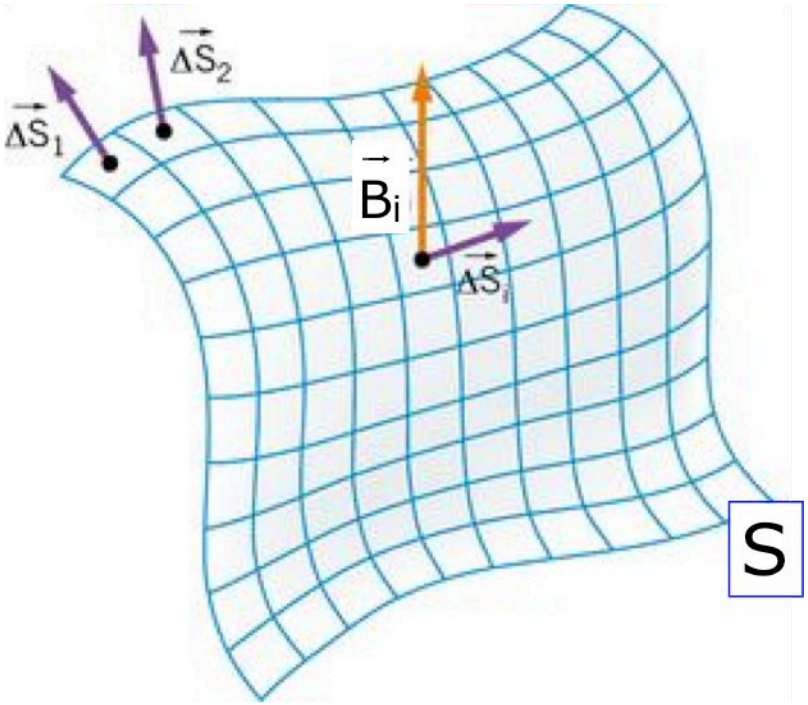
$$\alpha < 90° \Rightarrow \cos\alpha > 0$$

$$\Phi_S\left(\vec{B}\right) > 0$$

$$\alpha > 90° \Rightarrow \cos\alpha < 0$$

$$\Phi_S\left(\vec{B}\right) < 0$$

Se si vuole calcolare il flusso del campo magnetico attraverso una superficie qualunque, bisogna suddividere S in n parti ΔS_i (i = 1, ..., n) così piccole da soddisfare le condizioni della definizione (superficie piana e campo magnetico costante su di essa).



Il flusso del campo magnetico **B** attraverso la superficie S è la somma dei flussi attraverso le n superfici ΔS_i :

$$\Phi_S(\vec{B}) = \sum_{i=1}^{n} \Delta\Phi_i(\vec{B}) = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i \bullet \Delta\vec{S}_i = \sum_{i=1}^{n} B_i \Delta S_i \cos\alpha_i$$

TEOREMA DI GAUSS PER IL MAGNETISMO

TEOREMA DI GAUSS

Il flusso del campo magnetico attraverso *qualsiasi superficie chiusa S* è uguale a zero:

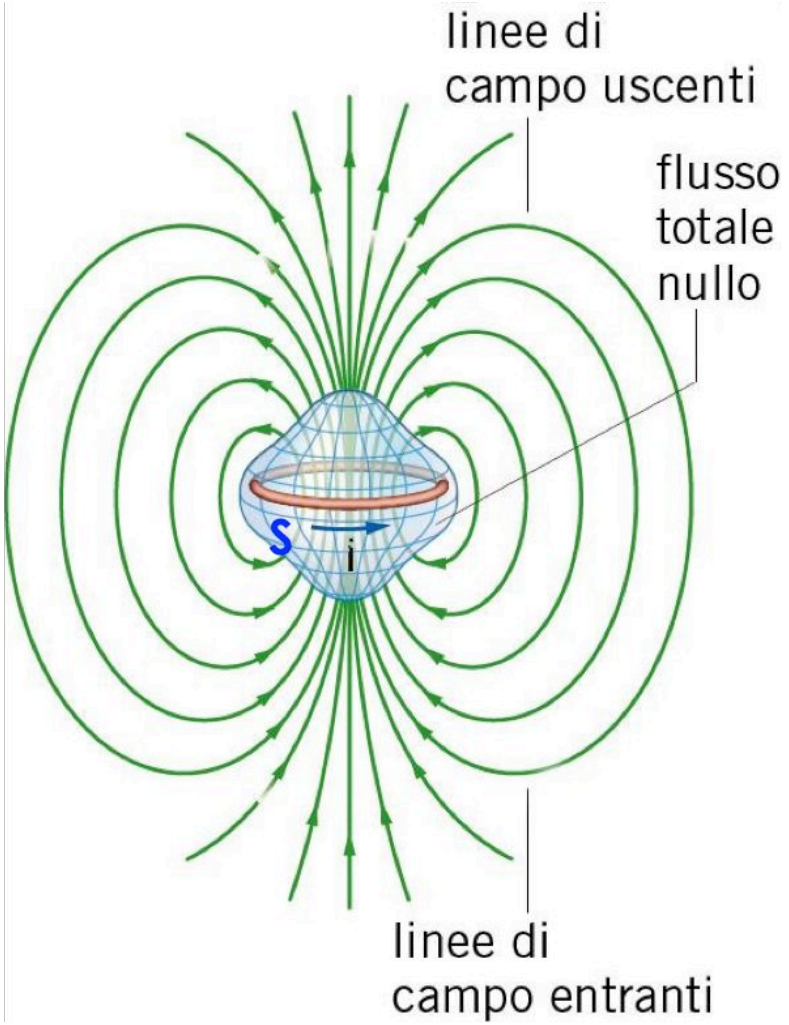
$$\Phi_S(\vec{B}) = 0$$

Interpretazione

Mentre esistono cariche elettriche isolate, non esistono monopòli magnetici (poli magnetici isolati). Per questo, il flusso è nullo: all'interno di una superficie chiusa qualunque, si ha sempre una uguale quantità di poli nord e poli sud magnetici.

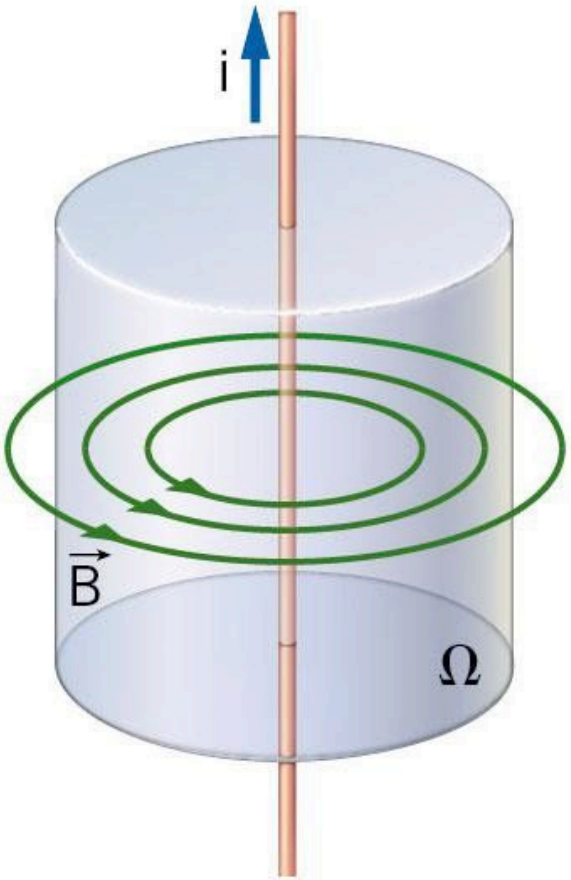
Il teorema di Gauss può essere interpretato anche in termini di linee di campo.

Le linee di campo magnetico sono linee chiuse: a ogni linea di campo entrante nella superficie gaussiana S (contributo negativo al flusso), ne corrisponde sempre una uscente (contributo positivo al flusso); di conseguenza, il flusso totale di campo magnetico attraverso S è nullo.



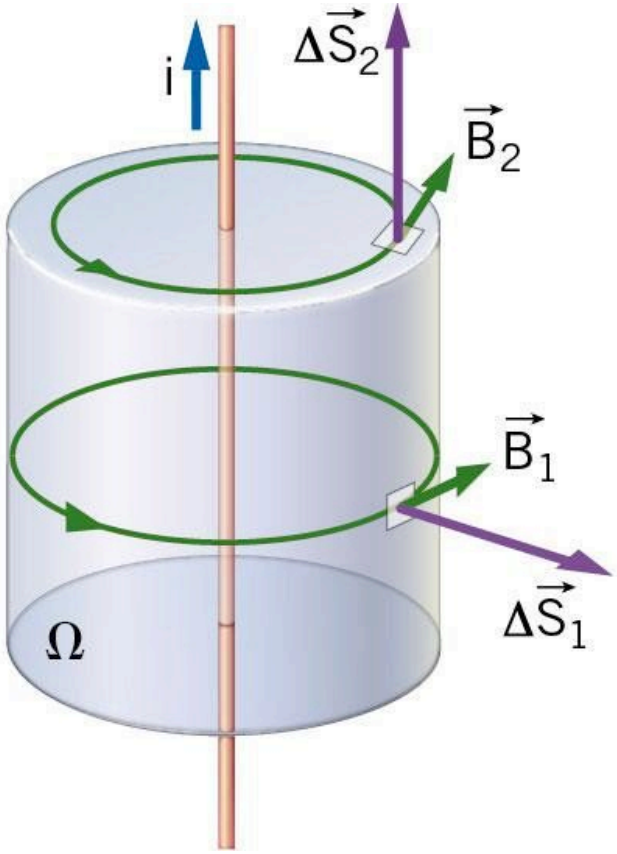
DIMOSTRAZIONE TEOREMA DI GAUSS

Dimostriamo il teorema di Gauss per il magnetismo nel caso particolare del campo magnetico generato da un filo rettilineo infinito percorso da corrente.



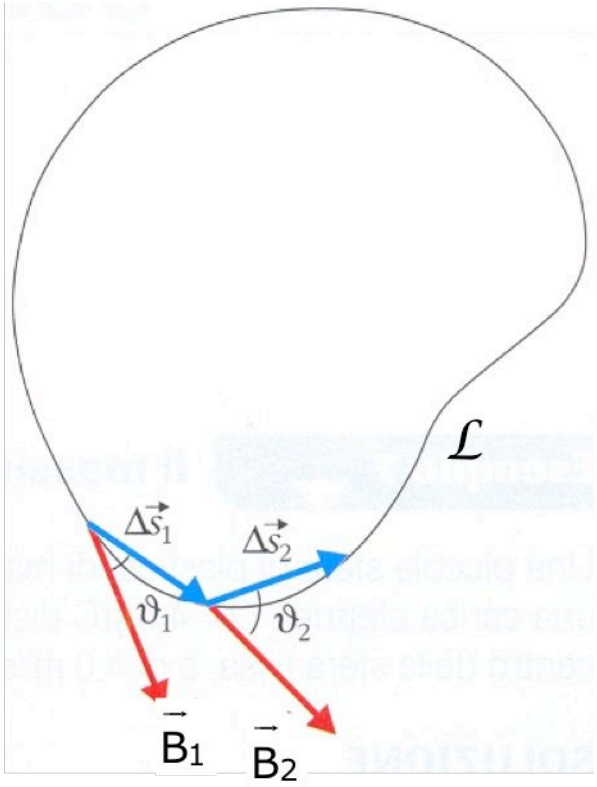
Consideriamo una superficie gaussiana cilindrica, con l'asse coincidente con il filo percorso da corrente. Le linee di campo **B** sono circonferenze concentriche al filo (regola mano destra) e parallele alle basi del cilindro.

In ogni piccola zona (come $\Delta \mathbf{S}_1$) della superficie laterale del cilindro, il campo **B** è tangente alla superficie stessa e, quindi, perpendicolare al vettore superficie: il flusso è nullo.



$$\Phi_{\Omega}(\vec{B}) = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i \bullet \Delta\vec{S}_i = \sum_{i=1}^{n} B_i \Delta S_i \cos 90° = 0$$

LA CIRCUITAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO



La circuitazione del vettore campo magnetico **B**, lungo un cammino chiuso qualsiasi, si definisce in modo analogo alla circuitazione del vettore campo elettrico **E.**

Si suddivide $\mathcal{L}$ in n parti $\Delta \mathbf{s}_i$, ciascuna così piccola da poterla considerare rettilinea e da potere considerare uniforme **B** lungo essa. La circuitazione è data da:

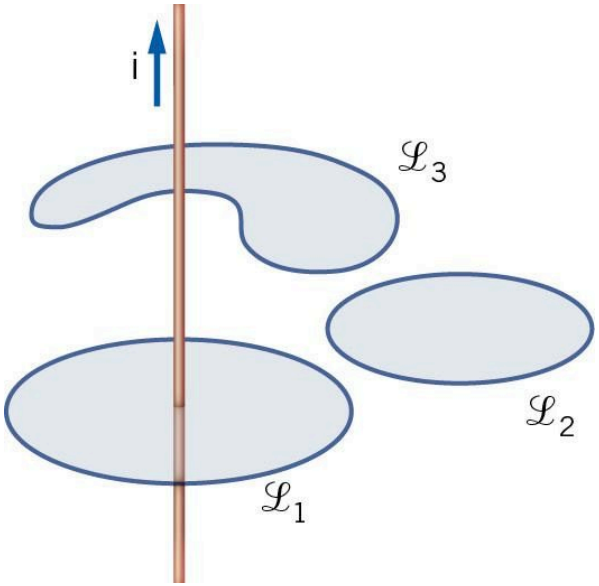
$$C_L(\vec{B}) = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i \bullet \Delta\vec{s}_i = \sum_{i=1}^{n} B_i \Delta s_i \cos\vartheta_i$$

TEOREMA DELLA CIRCUITAZIONE DI AMPÈRE

La circuitazione del campo magnetico **B**, calcolata lungo un percorso chiuso qualsiasi $\mathscr{L}$, è data da:

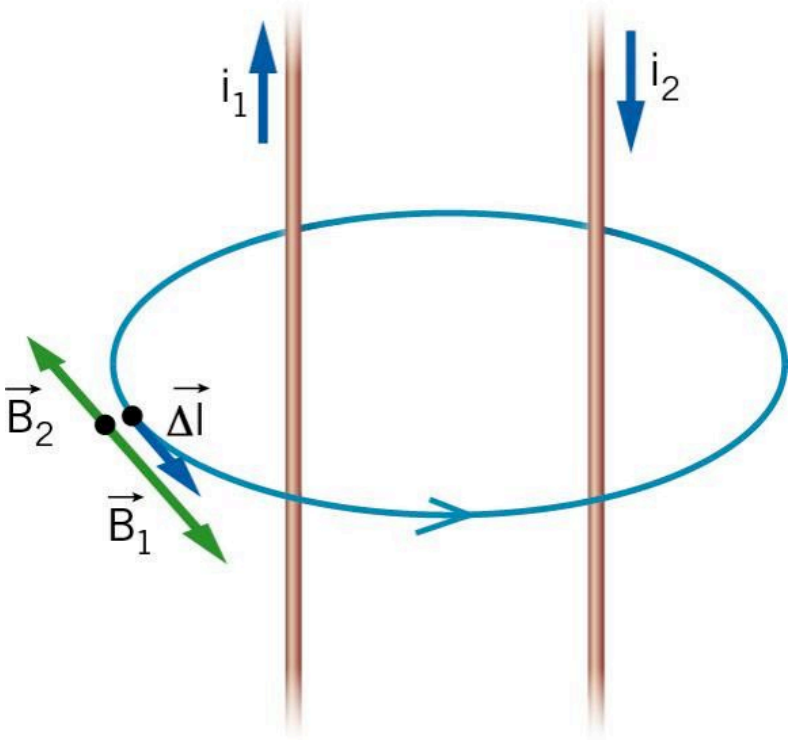
$$C_L(\vec{B}) = \mu_0 \sum_{k=1}^{n} i_k$$

i_k=correnti concatenate con la linea chiusa $\mathscr{L}$.



Una corrente si dice concatenata al cammino $\mathscr{L}$ se attraversa una superficie che ha come contorno la linea $\mathscr{L}$. La corrente è concatenata al cammino $\mathscr{L}_1$, ma non ai cammini $\mathscr{L}_2$ e $\mathscr{L}_3$.

Poiché la circuitazione di un campo vettoriale lungo un certo cammino chiuso è una quantità scalare il cui segno dipende dal verso di percorrenza del cammino, per generalizzare la relazione trovata occorre attribuire un segno alla corrente concatenata i.



Fissato un verso positivo di percorrenza della linea chiusa, la corrente è positiva se il campo magnetico che essa genera ha lo stesso verso di $\mathcal{L}$ (come i_1 che genera $\mathbf{B}_1$) e segno negativo in caso contrario (come i_2 che genera $\mathbf{B}_2$).

Abbiamo stabilito che un campo vettoriale è conservativo (come il campo elettrico **E**), se e solo se la sua circuitazione lungo qualsiasi cammino chiuso è nulla.

Invece il teorema di Ampère ci ha mostrato che la circuitazione del campo magnetico **B** è diversa da zero. Questo fatto ha un significato fisico molto importante, perché indica che:

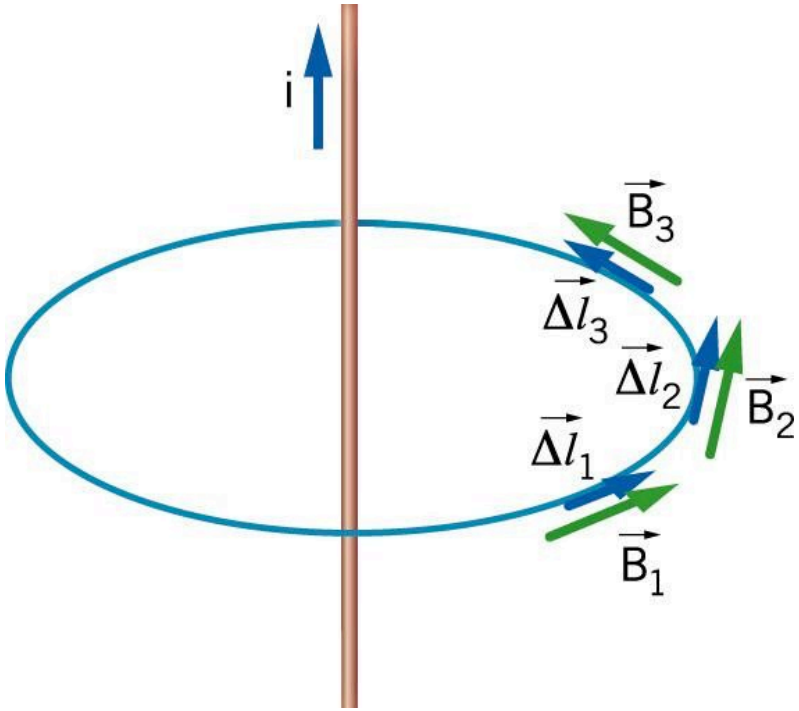
Il campo magnetico è un campo non conservativo.

Conseguenze: La forza magnetica è una forza non conservativa; per una carica che si muove in un campo magnetico non vale il principio di conservazione dell'energia meccanica; non è possibile definire una funzione energia potenziale magnetica.

DIMOSTRAZIONE TEOREMA DI AMPERE

Dimostriamo il teorema nel caso particolare del campo magnetico generato da un filo infinito percorso da una corrente i.

Per sfruttare la simmetria del campo **B**, calcoliamo la circuitazione lungo un cammino circolare, di raggio r, coincidente con una delle linee di forza del campo magnetico.



In questo modo, in ogni tratto del cammino lo spostamento infinitesimo $\Delta \mathbf{l}_j$ è parallelo al vettore $\mathbf{B}_j$ presente in quella zona.

Applichiamo la definizione di circuitazione del campo **B**:

$$C_L(\vec{B}) = \sum_{j=1}^{n} B_j \Delta l_j \cos\vartheta_j = \sum_{j=1}^{n} B_j \Delta l_j \cos 0° = \sum_{i=1}^{n} B_j \Delta l_j$$

I campi magnetici $\mathbf{B}_j$ hanno direzioni diverse (essendo tangenti alla linea di campo) ma lo stesso modulo:

$$B_j = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i}{r}$$

Quindi:

$$C_L(\vec{B}) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i}{r}\Delta l_j = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i}{r}\sum_{i=1}^{n}\Delta l_j = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i}{r}2\pi r = \mu_0 i \quad \text{cvd}$$

dove: $\Sigma\Delta l_j = 2\pi r$ = lunghezza cammino circolare

APPLICAZIONI TEOREMA DI AMPERE

Per il campo elettrico, il teorema di Gauss è risultato utile per determinare il valore di campi elettrostatici generati da distribuzioni di carica con particolari simmetrie.

Per il campo magnetico lo stesso ruolo è svolto dal teorema di Ampère.

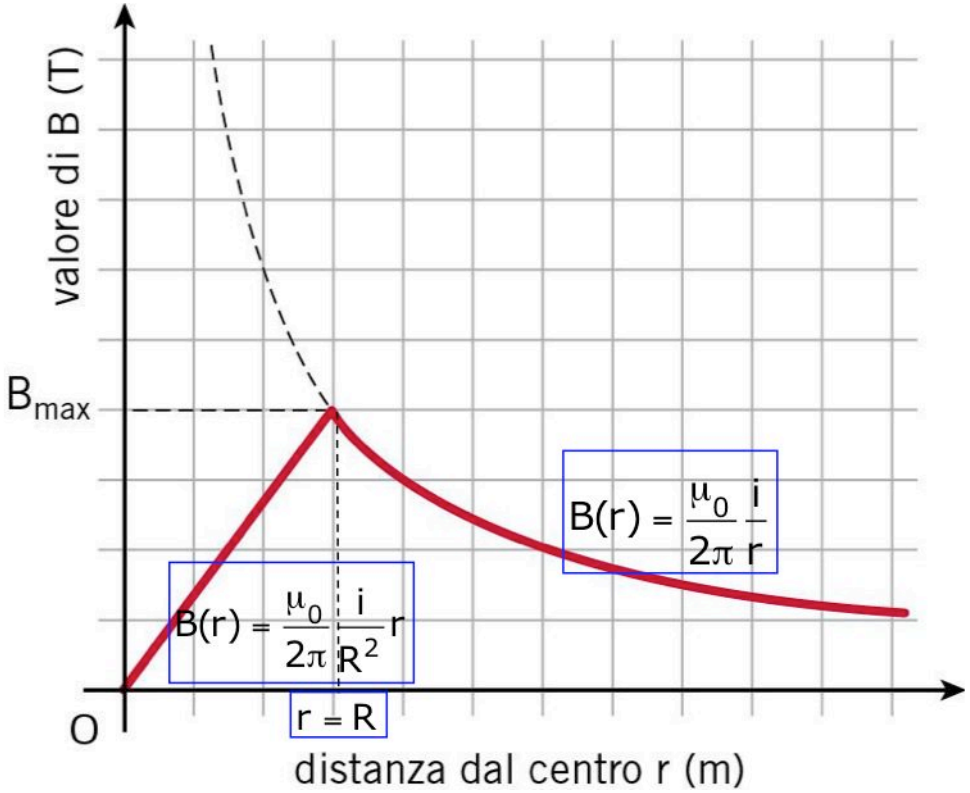
Vediamo due esempi.

Il campo magnetico all'interno di un filo percorso da corrente

Grazie al teorema di Ampère si dimostra che il modulo del campo magnetico B(r) a distanza r dall'asse di simmetria di un filo rettilineo indefinito di raggio R, con $0 \leq r \leq R$ (all'interno del filo), è dato da:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i}{R^2} r$$

Come per il campo elettrico all'interno di una distribuzione sferica omogenea di carica, il campo risulta direttamente proporzionale alla distanza dal centro di simmetria del sistema.

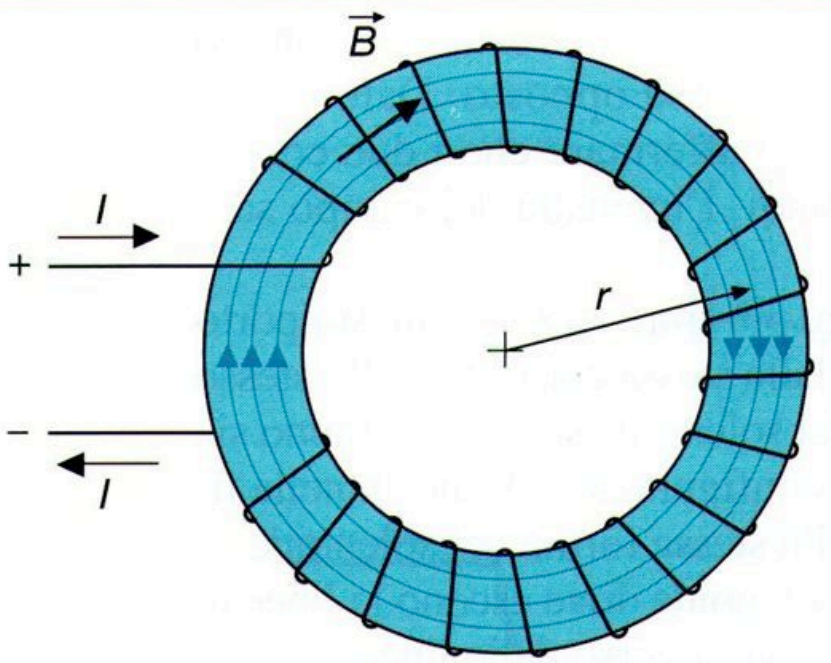


Per $0 \le r \le R$ il valore del campo magnetico cresce linearmente fino al valore massimo $B_{max} = \mu_0 i/(2\pi R)$ che si ottiene per r=R;

Al di fuori del filo il valore di B diminuisce in maniera inversamente proporzionale a r (arco di iperbole equilatera) come è previsto dalla legge di Biot e Savart.

Il campo magnetico generato da un toroide

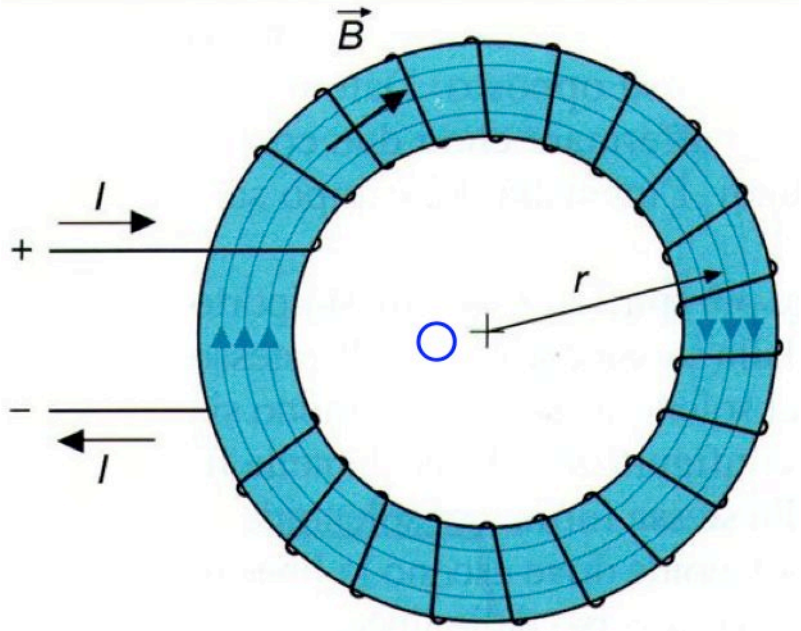
Il «toro» è un solido geometrico, simile a una ciambella.



Avvolgendo una bobina di N spire in modo che segua la superficie del toro si ottiene un solenoide toroidale, o toroide.

Si dimostra, sempre grazie al teorema di Ampère, che il campo magnetico all'interno del toroide è dato da:

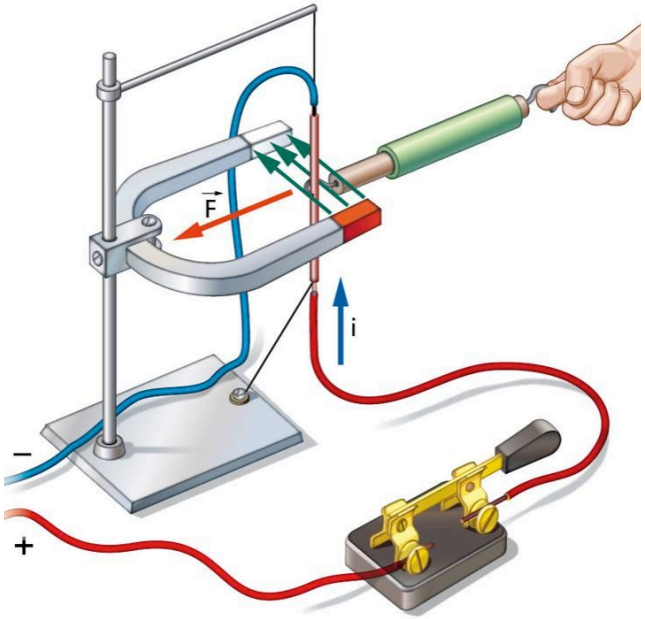
$$B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{Ni}{r}$$

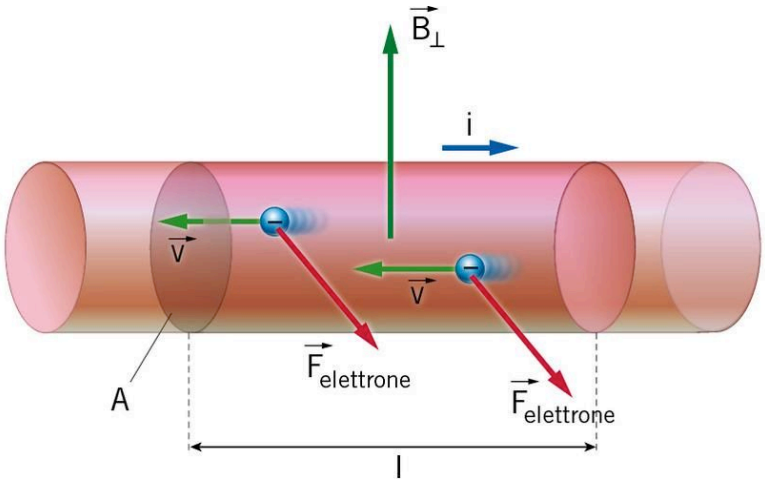


All'interno del toroide il modulo del campo magnetico non è uniforme, ma è inversamente proporzionale alla distanza r dal centro di simmetria O.

ACCELERATORI DI PARTICELLE

Forza di Lorentz

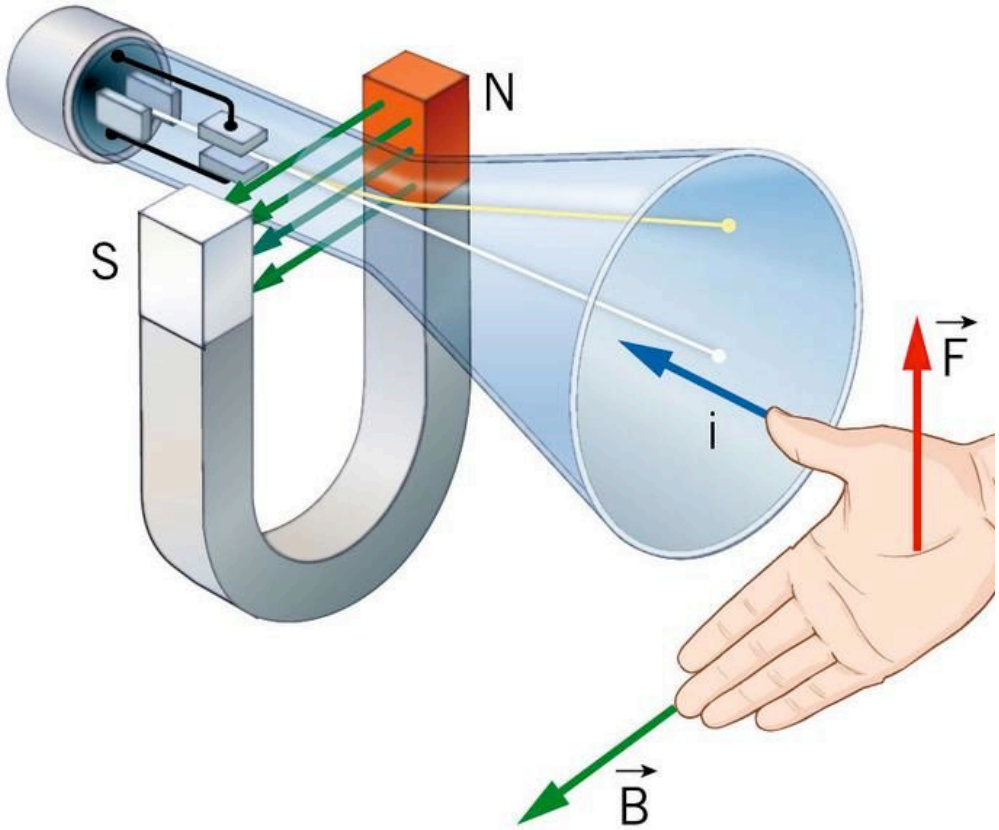




Abbiamo visto che un campo magnetico agisce con una forza su un filo conduttore percorso da corrente.

Poiché la corrente è costituita da elettroni in movimento, sembra logico pensare che anche un singolo elettrone (o una generica carica) in movimento in un campo magnetico risenta di una forza.

Gli esperimenti confermano questa nostra riflessione. Infatti:



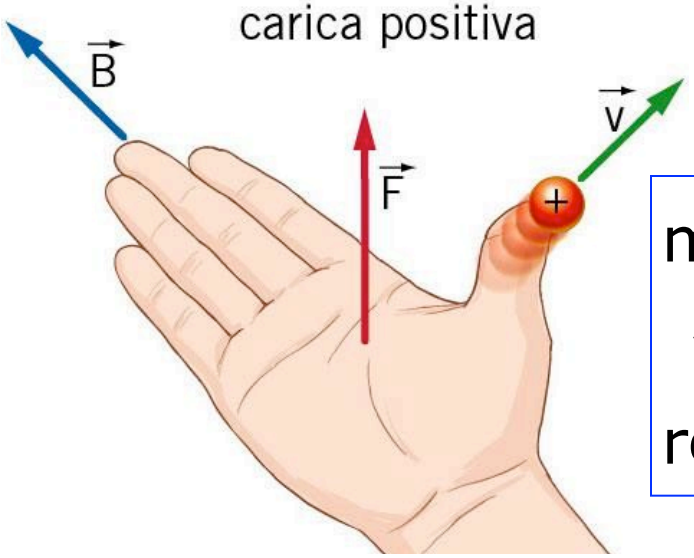
Si osserva che il fascio catodico (fatto di elettroni) è deviato da un campo magnetico **B** con la stessa regola della mano destra che vale per un filo.

Conclusione:

Forza di Lorentz

Su una qualsiasi particella di carica *q* in moto con velocità **v** in un campo magnetico **B** agisce una forza data dal prodotto vettoriale:

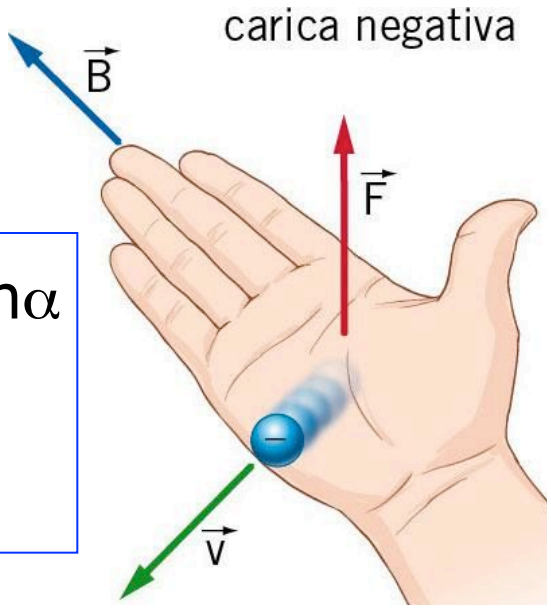
$$\vec{F}_L = q\vec{v} \otimes \vec{B}$$



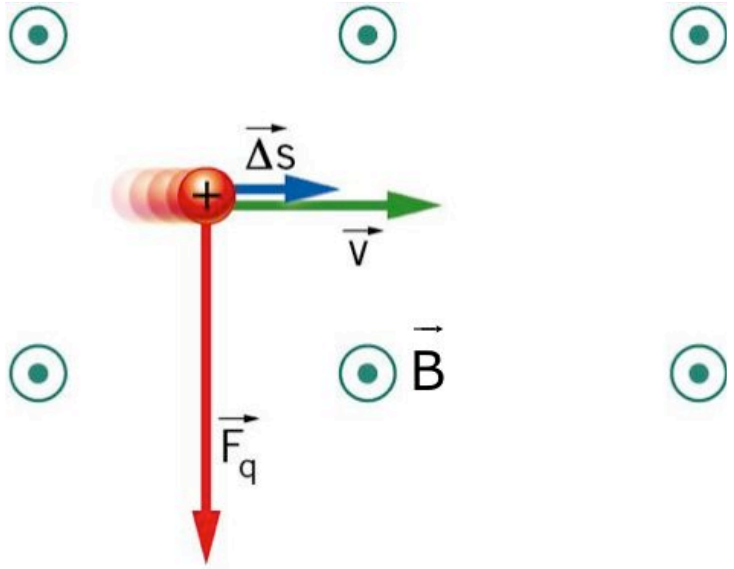
modulo: $F_L = qvB\text{sen}\alpha$

verso e direzione:

regola mano destra



La forza di Lorentz, essendo in ogni istante perpendicolare alla velocità e quindi anche allo spostamento della particella, non compie alcun lavoro W=0.

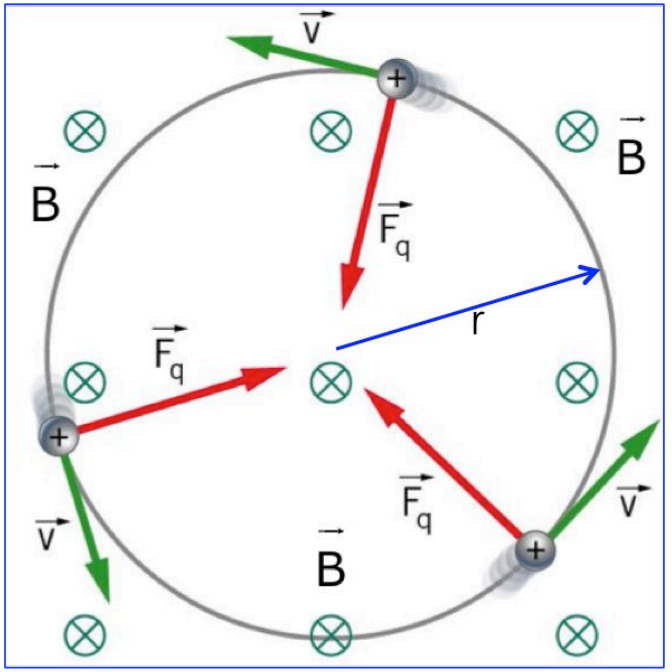


Per il teorema dell'energia cinetica $W = \Delta K = 0$, quindi:

L'energia cinetica di una particella dotata di carica elettrica in moto in un campo magnetico è costante, per cui è costante anche il modulo della velocità.

La forza di Lorentz non modifica il modulo del vettore velocità, ma modifica direzione e verso.

Sotto le condizioni dette, la carica puntiforme q si muove di moto circolare uniforme: istante per istante la forza di Lorentz (che svolge il ruolo della forza centripeta) è diretta vero il centro della traiettoria circolare (regola mano destra).



Calcoliamo il raggio della traiettoria circolare.

Poiché la forza di Lorentz è perpendicolare alla velocità (α=90°) e svolge il ruolo di forza centripeta, per il 2° principio della dinamica otteniamo:

$$F_L = qvB = ma_c \xrightarrow{a_c = v^2/r} r = \frac{mv}{qB}$$

Una carica elettrica, immessa in un campo magnetico uniforme perpendicolarmente alle linee di forza, si muove di moto circolare uniforme nel piano perpendicolare al campo. Il raggio della traiettoria, essendo m,v,B,q grandezze costanti, non varia:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Per un moto circolare uniforme si ha che:

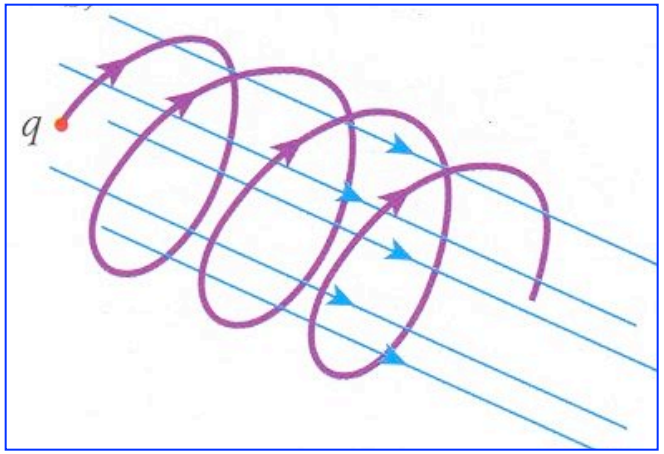
$$v = \frac{2\pi r}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi r}{v}$$

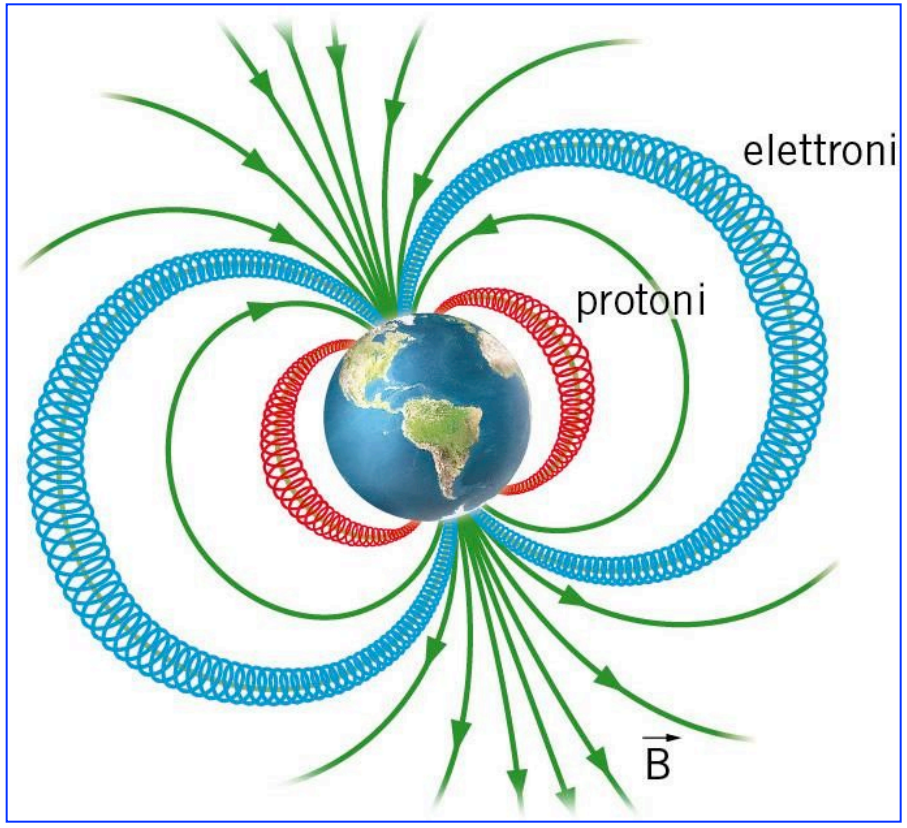
Quindi, nota l'espressione di r, il moto della carica si svolge con periodo e frequenza:

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \xrightarrow{f=1/T} f = \frac{qB}{2\pi m}$$

T ed f non dipendono da r.

Se il campo magnetico non è uniforme, la traiettoria delle particelle cariche è un'elica.





Esempio: le particelle cariche, provenienti dal Sole, rimangono intrappolate nel campo magnetico terrestre e contribuiscono a formare le fasce di van Allen.

Quando queste particelle, che sono molto energetiche, colpiscono le molecole dell'atmosfera, possono provocare il fenomeno delle aurore boreali.

Il fenomeno si osserva alle alte latitudini, dove le linee di forza sono più dense (aurora boreale all'emisfero nord e l'aurora australe nell'emisfero Sud). L'emissione di luce è dovuta al fatto che le particelle cariche ionizzano ed eccitano le molecole dell'aria. Nelle aurore prevale il colore verde della luce emessa dagli atomi di ossigeno e il rosso emesso dall'azoto.

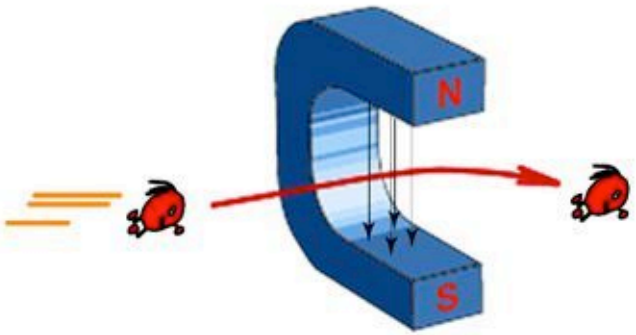
Acceleratore di particelle

E’ una macchina il cui scopo è quello di produrre fasci di ioni o particelle subatomiche (elettroni, positroni, protoni, antiprotoni etc.) con "elevata" energia cinetica.

Tali macchine vengono usate per: scopi industriali (strerilizzazioni); medici (produzione di isotopi radioattivi per la cura di tumori); studio della struttura dei materiali; fisica delle particelle (studiare le particelle elementari).

I metodi per accelerare particelle sono basati sull'uso di campi elettrici e magnetici: i campi elettrici accelerano le particelle; i campi magnetici curvano le particelle.

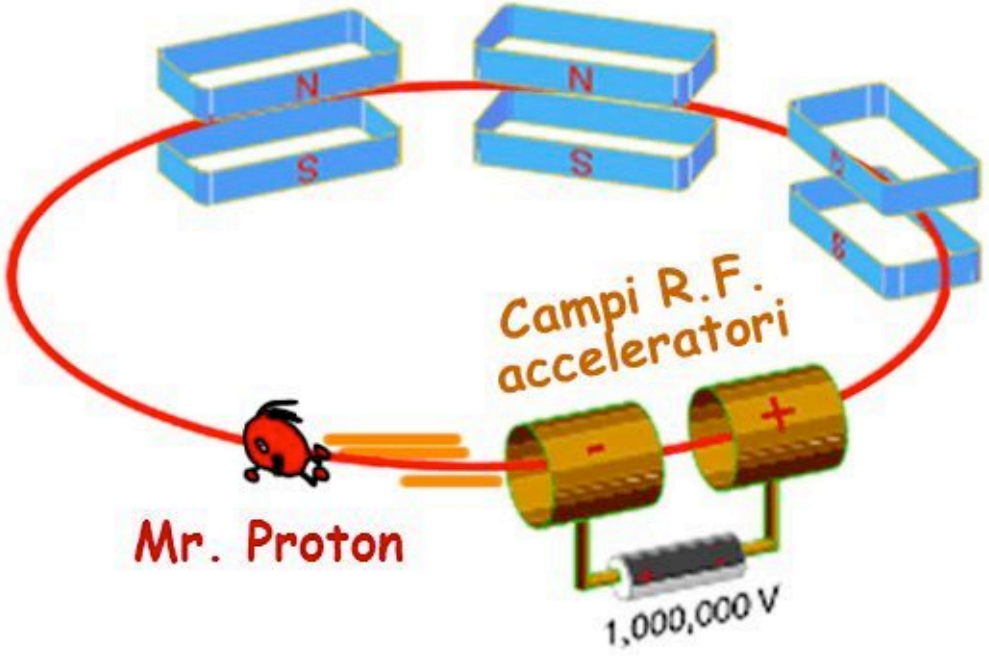
Deflessione
(campi magnetici)

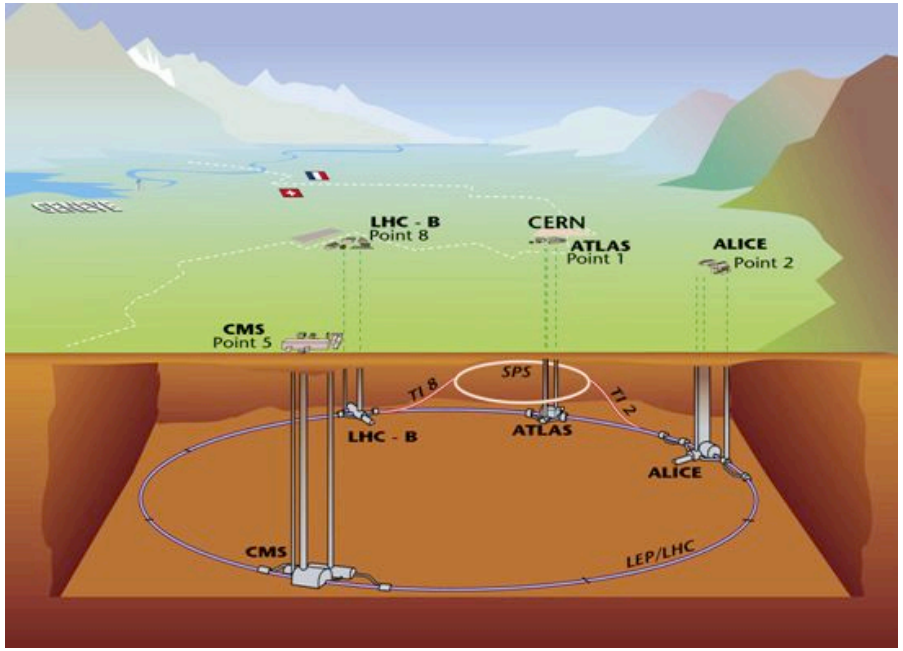


+

Accelerazione
(campi elettrici)

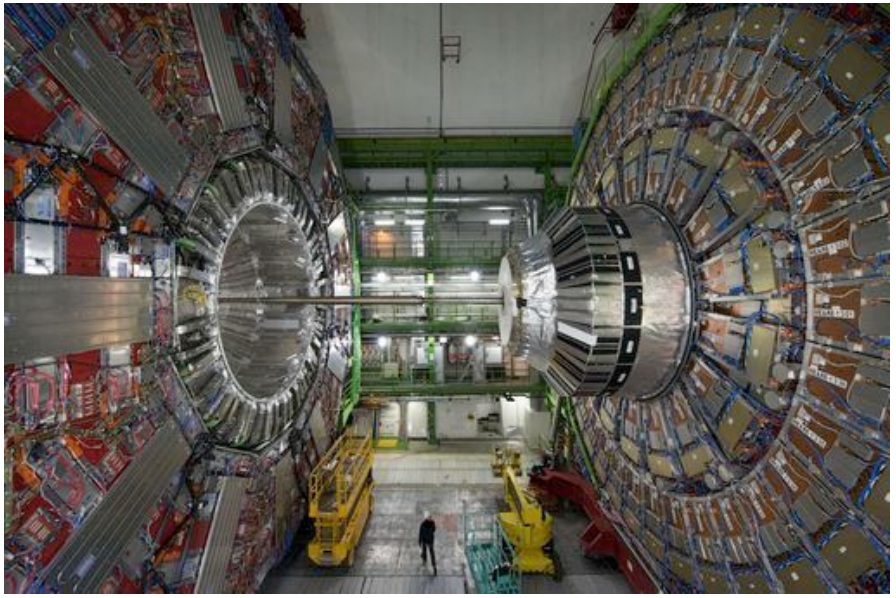
magneti




GENEVE
LHC - B
Point 8
CERN
ATLAS
Point 1
ALICE
Point 2
CMS
Point 5
TI 8
SPS
TI 2
LHC - B
ATLAS
ALICE
CMS
LEP/LHC

LHCb
ATLAS
CERN
SUISSE
FRANCE
CMS
ALICE
LHC - 27 km

CERN



CONFRONTO TRA CAMPO MAGNETICO E CAMPO ELETTRICO

Campo elettrico e campo magnetico hanno le seguenti proprietà simili:

- Entrambi sono campi vettoriali e, in quanto tali, possono essere rappresentati da linee di campo. Per tracciare le linee del campo elettrico si usa una carica positiva di prova, mentre per disegnare quelle del campo magnetico si usa un ago magnetico di prova.

- Esistono due tipi di poli magnetici (si attraggono poli diversi e si respingono poli omonimi) e due tipi di carica elettrica (si attraggono cariche di segno opposto e si respingono cariche dello stesso segno).

- Un conduttore scarico può essere elettrizzato da un corpo carico, come una sbarretta di acciaio può essere magnetizzata da una calamita.

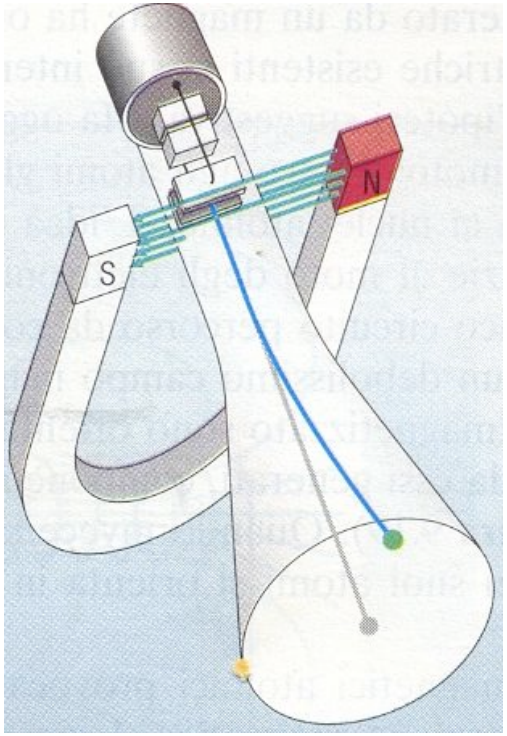
Campo elettrico e campo magnetico differiscono per i seguenti aspetti molto importanti

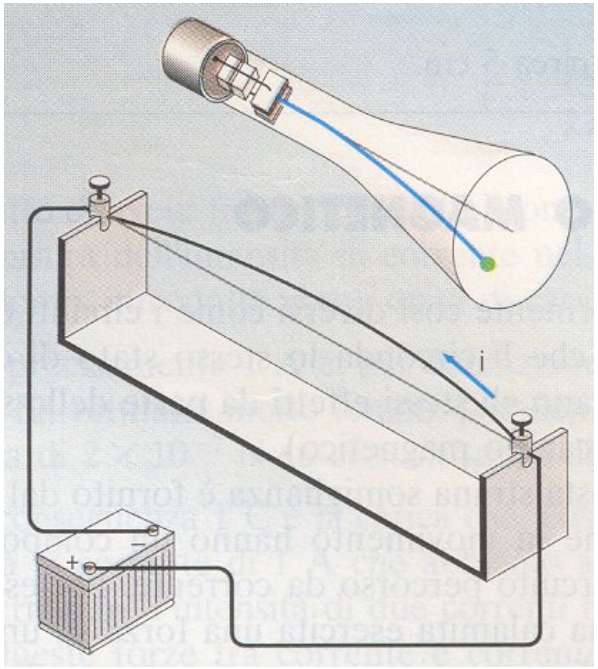
- Le cariche elettriche possono essere separate, mentre è impossibile isolare i poli magnetici.
- Nel processo di elettrizzazione per contatto, la carica elettrica passa da un corpo all'altro; nel processo di magnetizzazione non si ha nessun passaggio di carica magnetica (poli sud o nord) da un corpo all'altro.
- Il campo elettrico è un campo conservativo; il campo magnetico non è un campo conservativo.

L'ORIGINE DEL CAMPO MAGNETICO

Attraverso i seguenti fatti sperimentali vogliamo mettere in evidenza che: oggetti apparentemente diversi come i circuiti elettrici e i magneti generino nello spazio che li circonda lo stesso stato di cose, ossia un campo magnetico, e che subiscano gli stessi effetti da parte dello stesso campo magnetico.

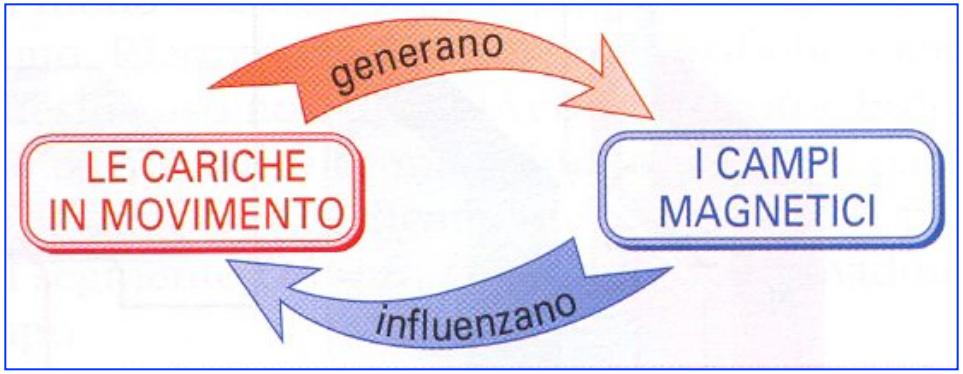
Il campo magnetico generato da una calamita esercita una forza su un fascio di elettroni in un tubo a raggi catodici, proprio come se si trattasse di una corrente.





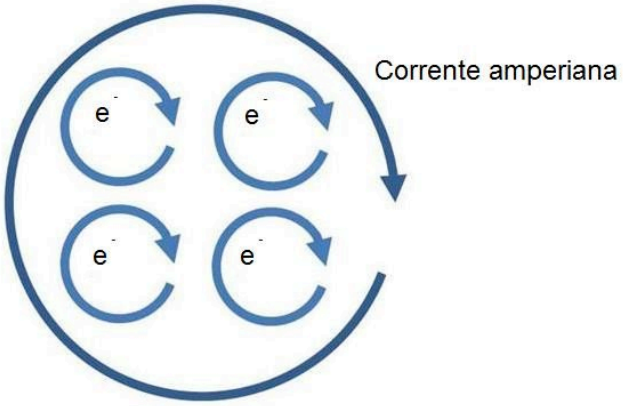
Quando nel filo viene fatta scorrere una corrente elettrica con il verso indicato in figura, nasce una forza di attrazione tra il fascio di elettroni e il filo percorso da corrente.

Queste esperienze dimostrano che un campo magnetico è generato da cariche elettriche *in moto* e che le cariche elettriche *in moto* sono soggette a forze dovute al campo magnetico.



Ma che cosa ha a che fare un magnete con le cariche elettriche in moto?

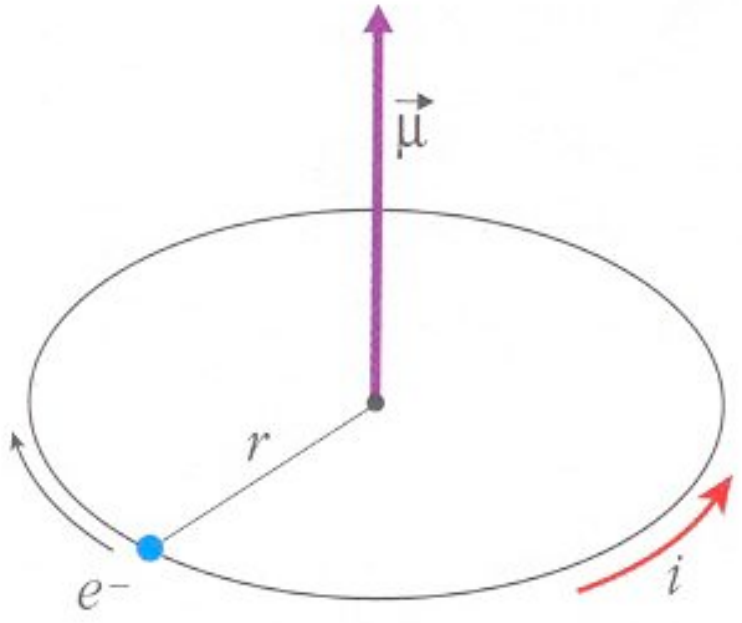
Fin da quando fu scoperto che le correnti elettriche producono effetti magnetici, Ampère suggerì che il campo magnetico generato da un magnete ha origine da una moltitudine di piccolissime correnti elettriche esistenti al suo interno.



Ai tempi di Ampère si trattava solo di un'ipotesi suggestiva. Ma oggi sappiamo che la materia è costituita da cariche in moto: dentro agli atomi gli elettroni sono in continua rapida rotazione intorno ai nuclei atomici. L'idea suggerita da Ampère si è rivelata corretta.

Analizziamo la situazione più da vicino.

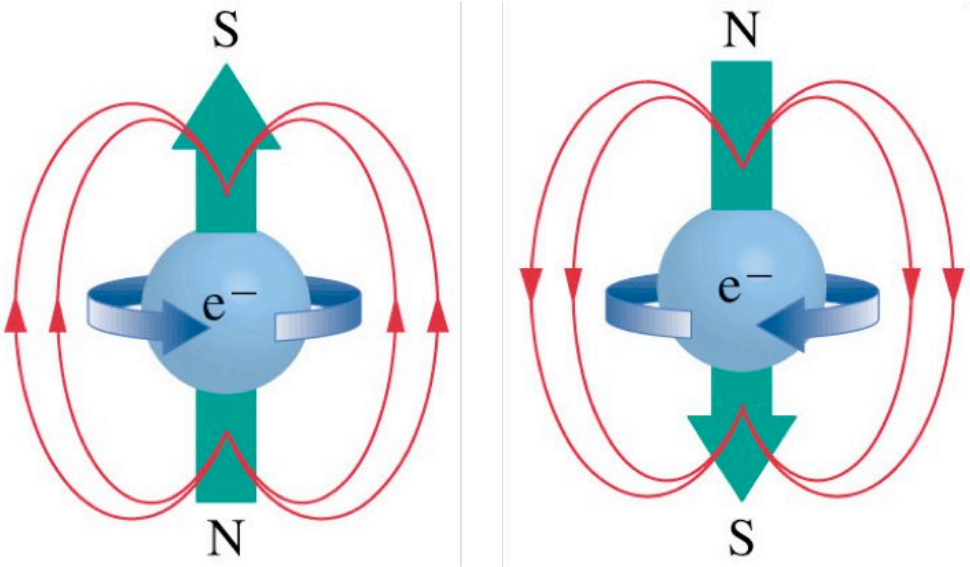
Secondo un modello classico non corrispondente alla realtà fisica ma comunque efficace, un elettrone che ruota intorno al nucleo di un atomo si comporta come una microscopica spira percorsa da corrente.



Quando la spira percorsa da corrente (l'atomo) è immersa in un campo magnetico esterno **B** allinea il proprio momento magnetico **μ** al campo **B.**

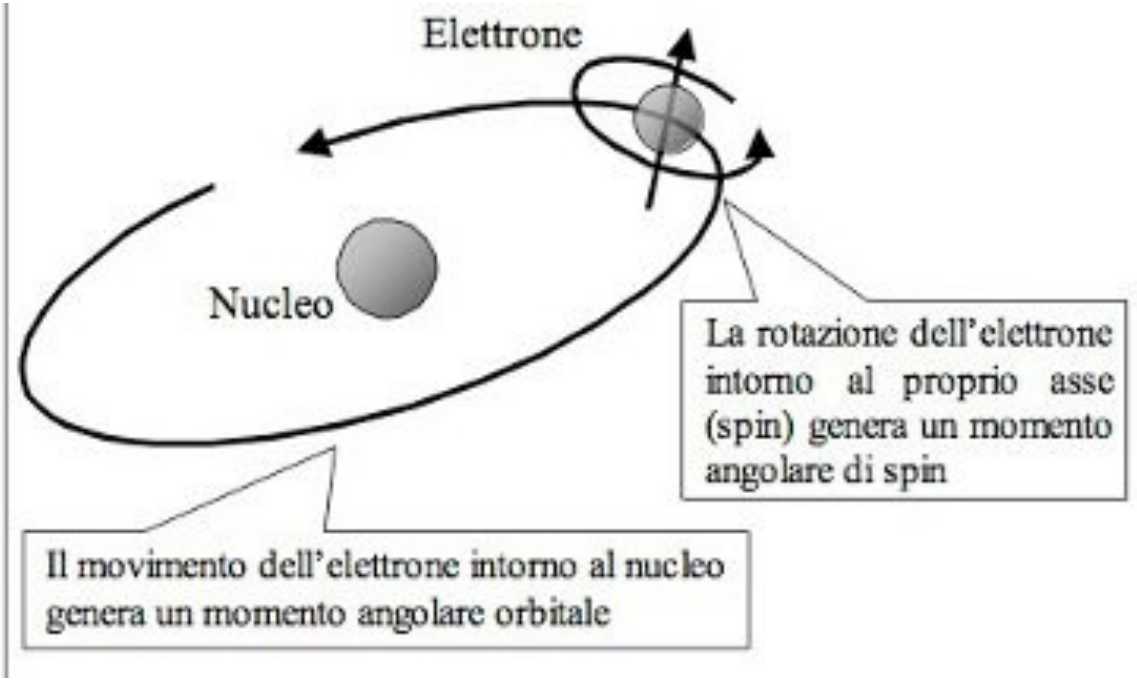
In realtà l'elettrone, ma anche altre particelle elementari, oltre al momento magnetico **μ** legato al moto orbitale, hanno anche un momento magnetico intrinseco $\boldsymbol{\mu}_{spin}$, chiamato **spin**.

L'esistenza dello spin è legata al moto dell'elettrone su se stesso intorno a un asse passante per il suo centro di massa.



La giustificazione rigorosa dell'esistenza dello spin la si trova solo nell'ambito della teoria quantistica relativistica

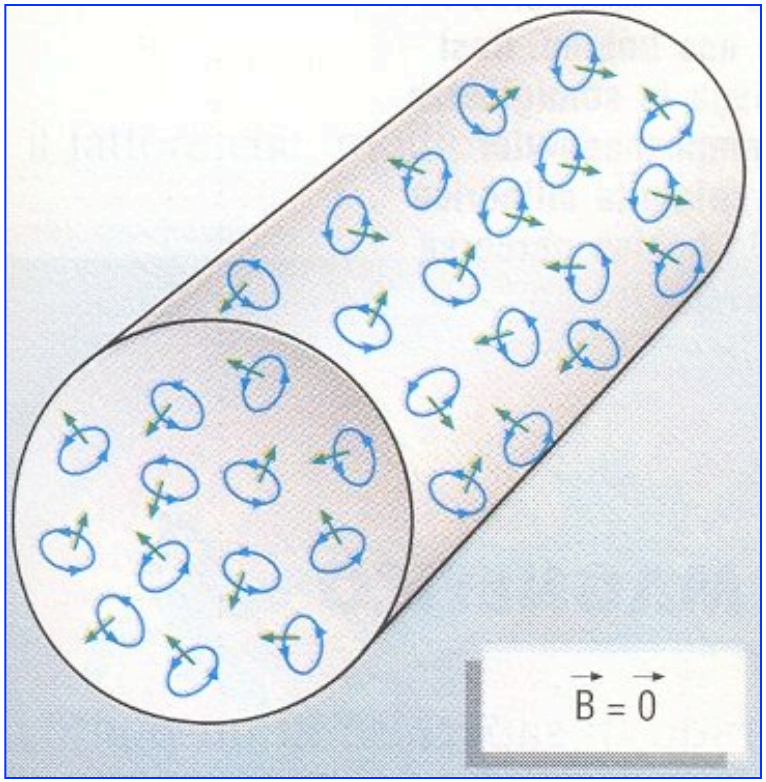
In definitiva:



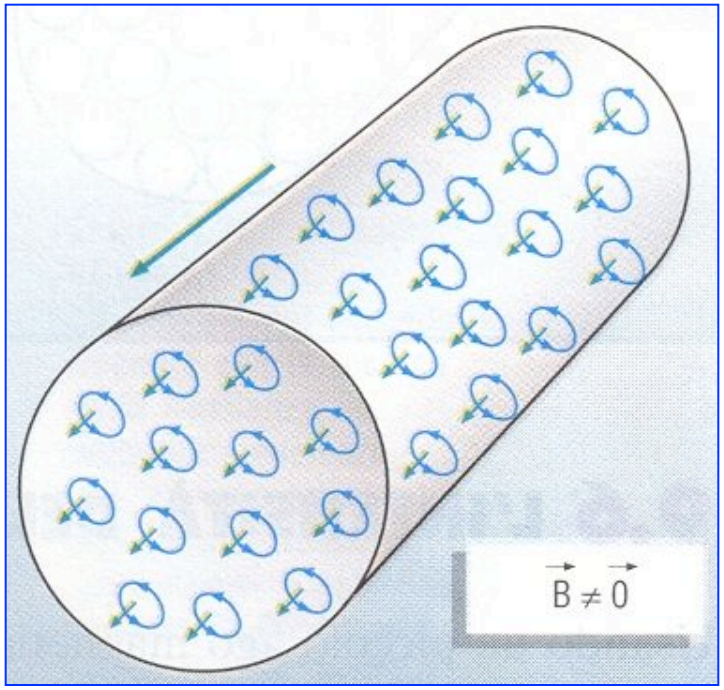
Il momento magnetico di un atomo si ottiene sommando vettorialmente i momenti magnetici orbitali e quelli di spin corrispondenti a tutti i suoi elettroni (i momenti magnetici del protone e del neutrone sono molto piccoli rispetto a quello dell'elettrone e vengono in genere trascurati).

Quindi:

Grazie al moto degli elettroni, un atomo può essere descritto come un microscopico circuito percorso da corrente, il quale può generare nello spazio circostante un debolissimo campo magnetico.



Poiché gli atomi di un pezzo di ferro non magnetizzato sono orientati in tutti i modi possibili, la somma vettoriale dei piccoli campi magnetici da essi generati è nulla.



Quando invece si magnetizza un pezzo di ferro, la maggior parte dei suoi atomi si orienta in una ben determinata direzione, dando origine a un campo magnetico macroscopico (polarizzazione magnetica).

Conclusione:

Un campo magnetico è sempre generato da cariche elettriche in movimento ed esercita forze su qualsiasi carica in movimento. Quindi le forze magnetiche sono forze che si esercitano tra cariche e cariche, entrambe in movimento rispetto all'osservatore.

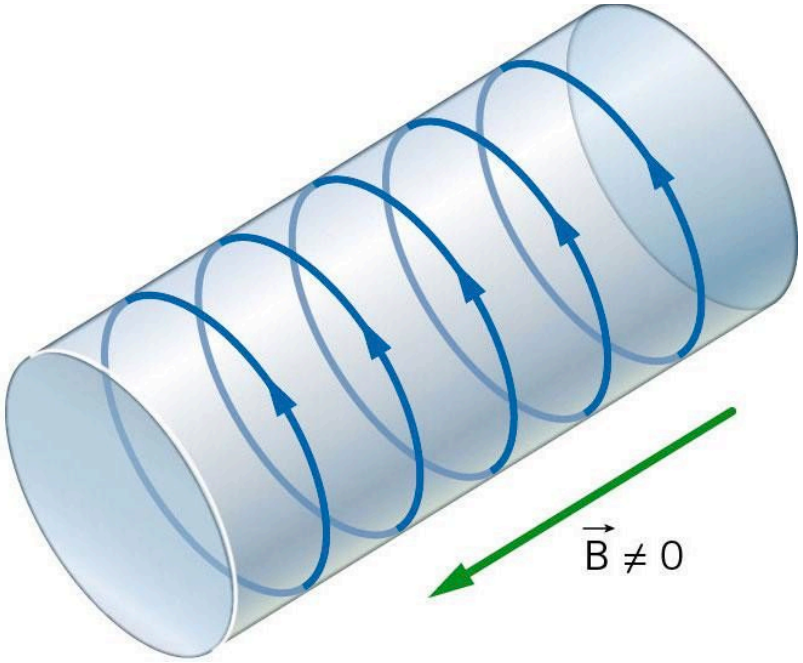
IL MAGNETISMO NELLA MATERIA

Esistono sostanze, chiamate **ferromagnetiche** come il ferro e il nichel, che sono attratte in maniera piuttosto intensa da un magnete.

Esistono altre sostanze per le quali possiamo osservare diversi tipi di comportamenti: per esempio l'acqua, l'argento e il rame sono sostanze (chiamate **diamagnetiche**) che vengono debolmente respinte da un campo magnetico. Invece l'aria e l'alluminio sono sostanze (chiamate **paramagnetiche**) che vengono debolmente attratte.

Abbiamo visto che un campo magnetico esterno $\mathbf{B}_0$ orienta nella propria direzione i momenti magnetici elementari presenti nella materia.

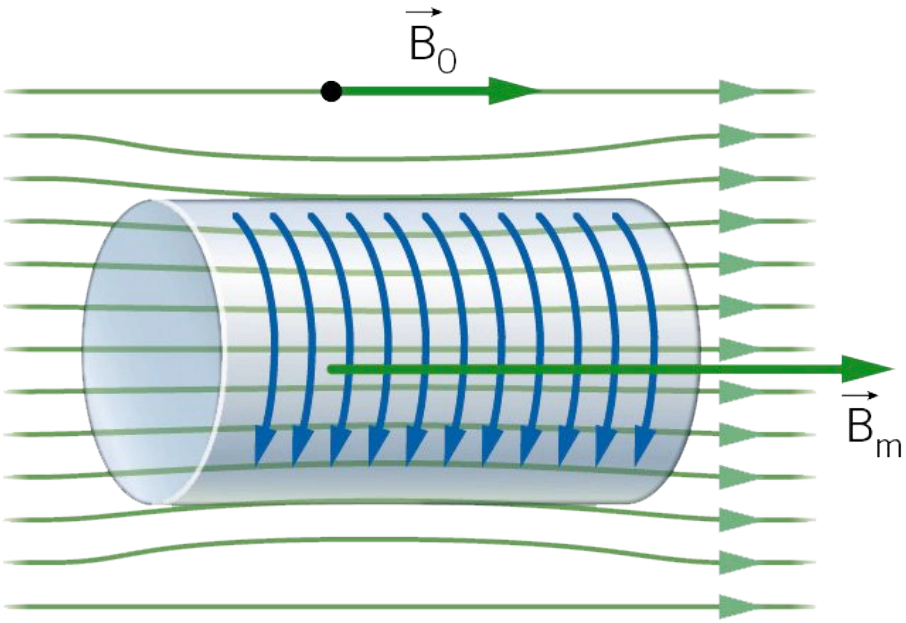
L'effetto complessivo di questo allineamento è equivalente al fluire di una corrente sulla superficie del blocco di materia.



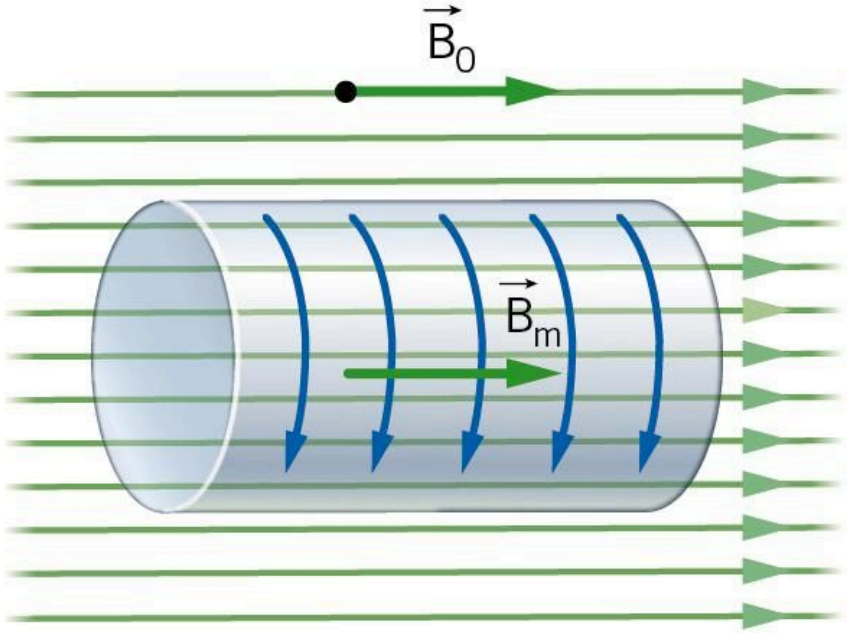
Questa corrente genera, a sua volta, un campo magnetico $\mathbf{B}_m$.

In definitiva, in tutto lo spazio si ha il seguente campo magnetico totale:

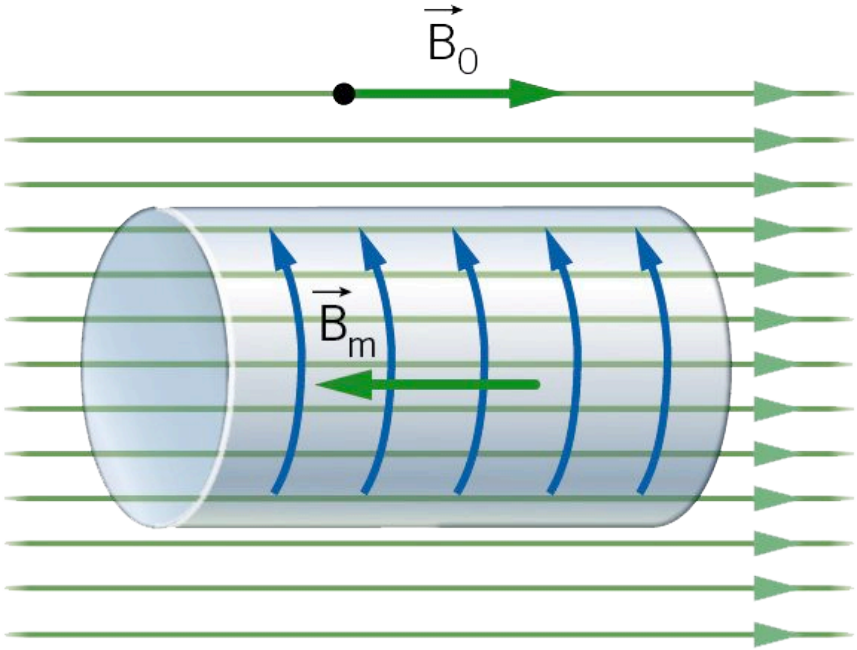
$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$$



Poiché $\mathbf{B}_0$ e $\mathbf{B}_m$ hanno lo stesso verso, all'interno di una **sostanza ferromagnetica** immersa in un campo magnetico esterno $\mathbf{B}_0$, si ha un campo magnetico totale $\mathbf{B} > \mathbf{B}_0$.



All'interno di una **sostanza paramagnetica** immersa in un campo magnetico esterno $\mathbf{B}_0$, si ha un campo magnetico totale $\mathbf{B}>\mathbf{B}_0$, ma meno intenso di quello delle sostanze ferromagnetiche.



Poiché $\mathbf{B}_0$ e $\mathbf{B}_m$ hanno verso opposto, all'interno di una **sostanza diamagnetica** immersa in un campo magnetico esterno $\mathbf{B}_0$, si ha un campo magnetico totale $\mathbf{B}<\mathbf{B}_0$.

Per descrivere la risposta di un materiale all'azione di un campo magnetico esterno si introduce una nuova grandezza fisica, chiamata **permeabilità magnetica relativa** μ_r della sostanza in esame.

La permeabilità magnetica relativa μ_r è definita nel seguente modo:

$$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$$

Sostanze diamagnetiche	μ_r
Bismuto	0,99983
Rame	0,99999
Argento	0,999981
Acqua	0,999991
Sostanze paramagnetiche	
Platino	1,000360
Aria	1,000004
Alluminio	1,000022

Sostanze diamagnetiche

$$\vec{B} < \vec{B}_0 \Rightarrow \mu_r < 1$$

Sostanze paramagnetiche

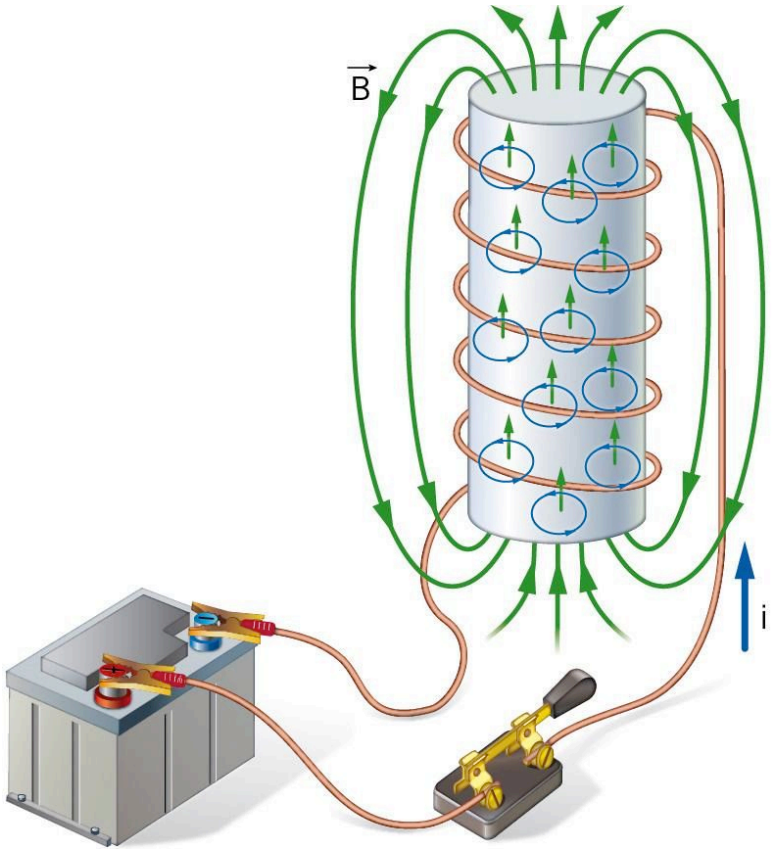
$$\vec{B} > \vec{B}_0 \Rightarrow \mu_r > 1$$

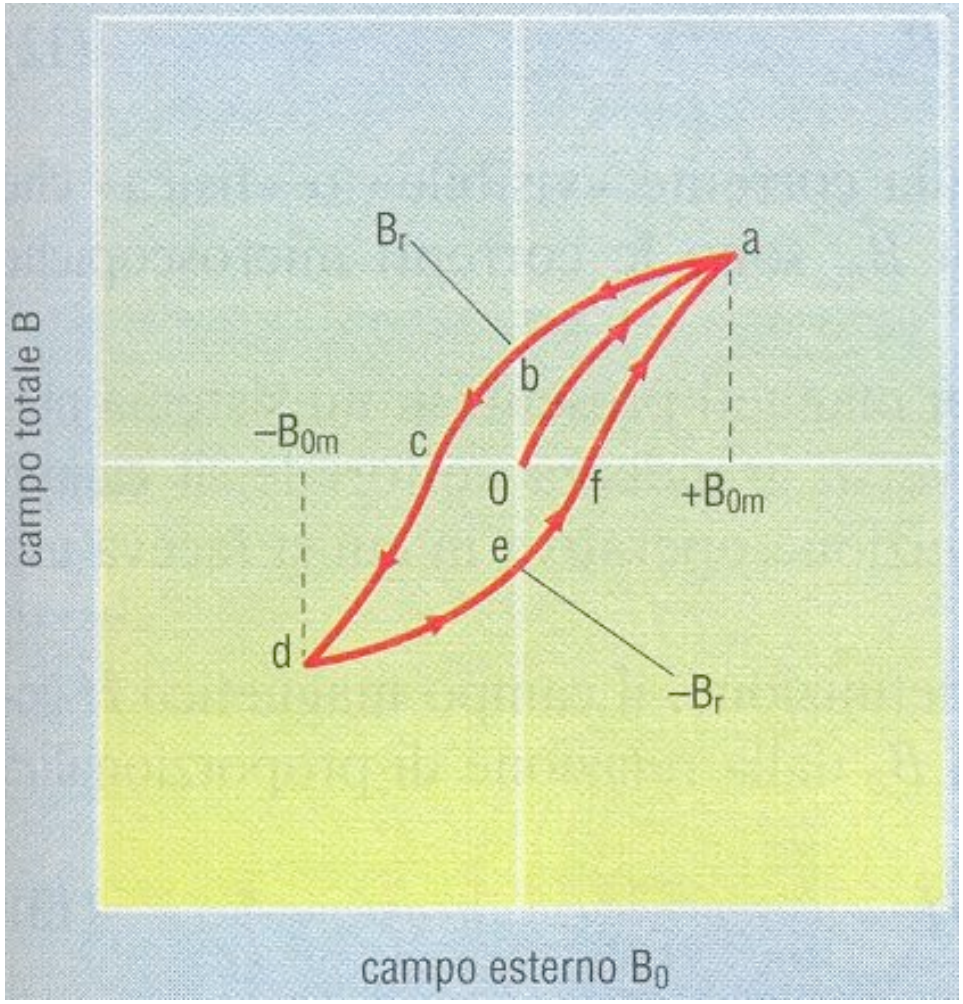
Sostanze ferromagnetiche: μ_r è dell'ordine di 10^3-10^5.

IL CICLO D' ISTERESI MAGNETICA

Per i materiali ferromagnetici la relazione tra **B** e $\mathbf{B}_0$ è molto più complessa di quella vista in precedenza per i materiali paramagnetici e diamagnetici: per studiarla, avvolgiamo un solenoide attorno a un cilindro fatto di una sostanza ferromagnetica.

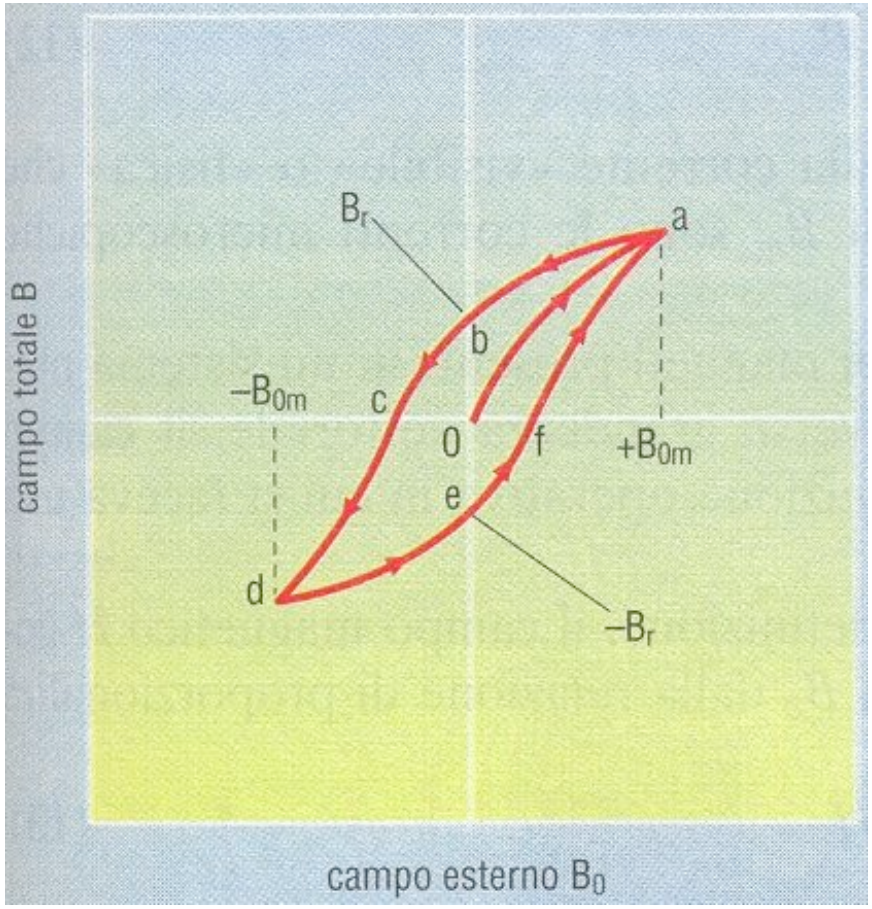
Questo solenoide fornisce il campo magnetico esterno $\mathbf{B}_0$, la cui intensità può essere variata a piacere cambiando l'intensità della corrente *i* che fluisce nel solenoide stesso.





In figura sono riportati i valori assunti dal campo magnetico totale **B** al variare del campo magnetico esterno $\mathbf{B}_0$.

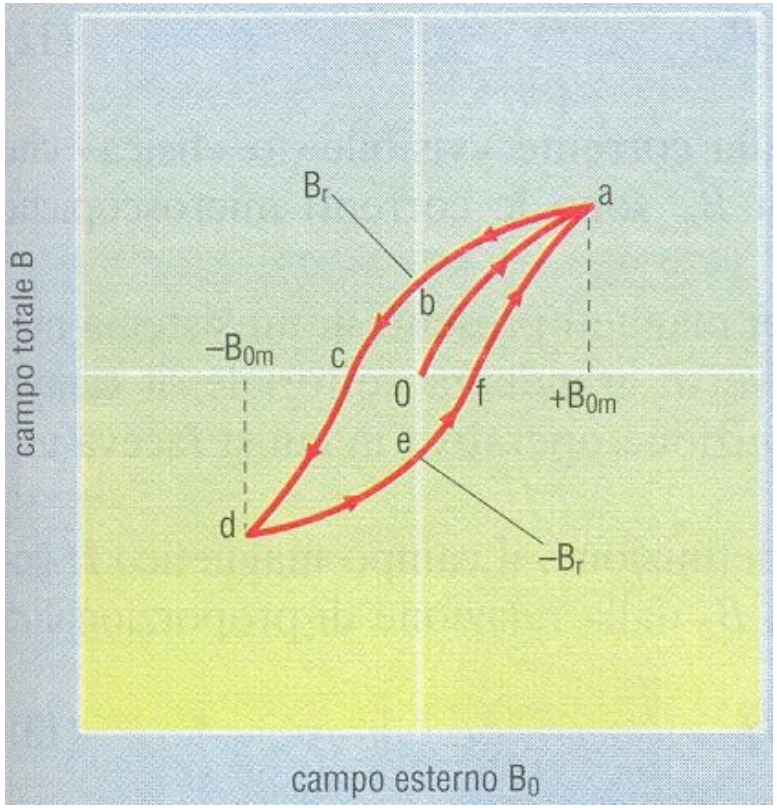
Prima di fare fluire corrente nel solenoide sia **B** che $\mathbf{B}_0$ sono nulli: lo stato del magnete è rappresentato dal punto 0.



Al crescere di $\mathbf{B}_0$ aumenta anche **B**, ma la curva che descrive la relazione tra di essi non è una retta (come nel caso delle sostanze diamagnetiche e paramagnetiche):

B e $\mathbf{B}_0$ non sono direttamente proporzionali.

Ciò significa che per le sostanze ferromagnetiche la permeabilità magnetica μ_r non è una costante, ma varia al variare di $\mathbf{B}_0$.



In principio, all'aumentare di $\mathbf{B}_0$ il campo magnetico **B** cresce molto rapidamente. Poi il ritmo di tale crescita diminuisce e si giunge a una condizione (punto a) in cui il valore di *B* tende a rimanere costante (valore di *saturazione)*.

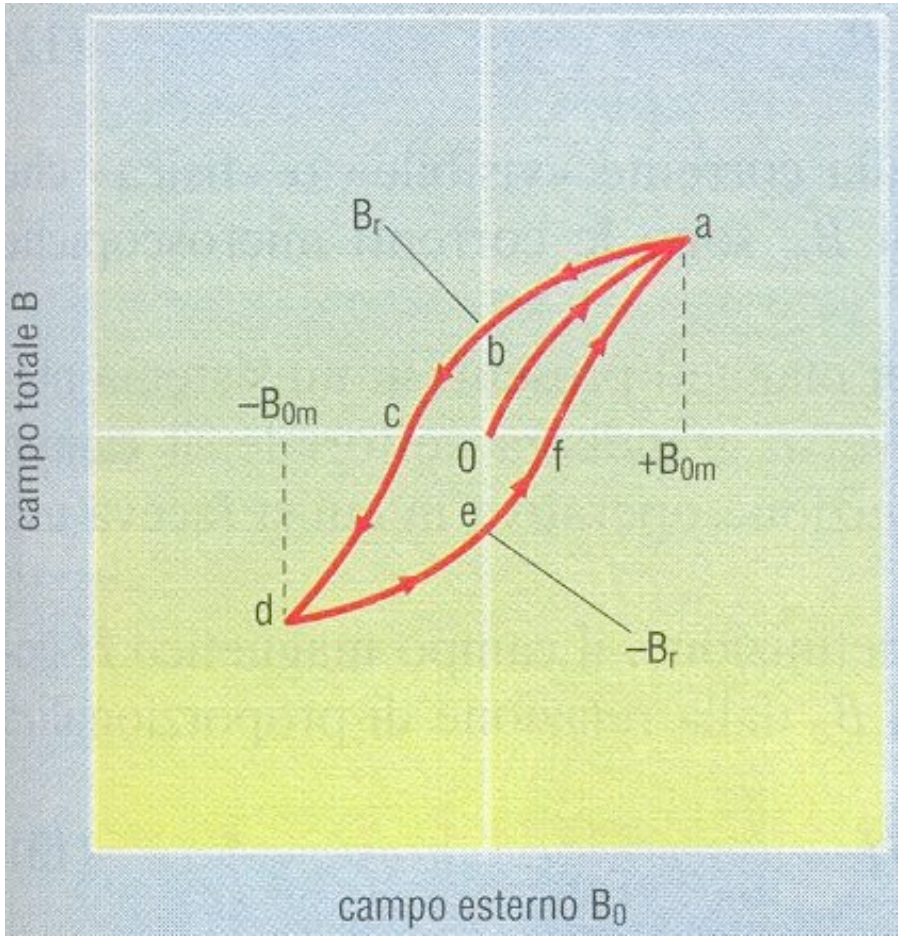
Se riduciamo la corrente *i* nel solenoide ($\mathbf{B}_0$ diminuisce), il sistema magnetico non ripercorre a ritroso il comportamento precedente, ma il tratto da *a* a *b*. *E* quando $\mathbf{B}_0$ si annulla, nel cilindro ferromagnetico rimane un campo magnetico residuo $\mathbf{B}_r$ (punto *b*).

Questo significa che il cilindro ha acquistato una *magnetizzazione permanente*: abbiamo costruito un magnete artificiale.

Ciò è possibile perché:

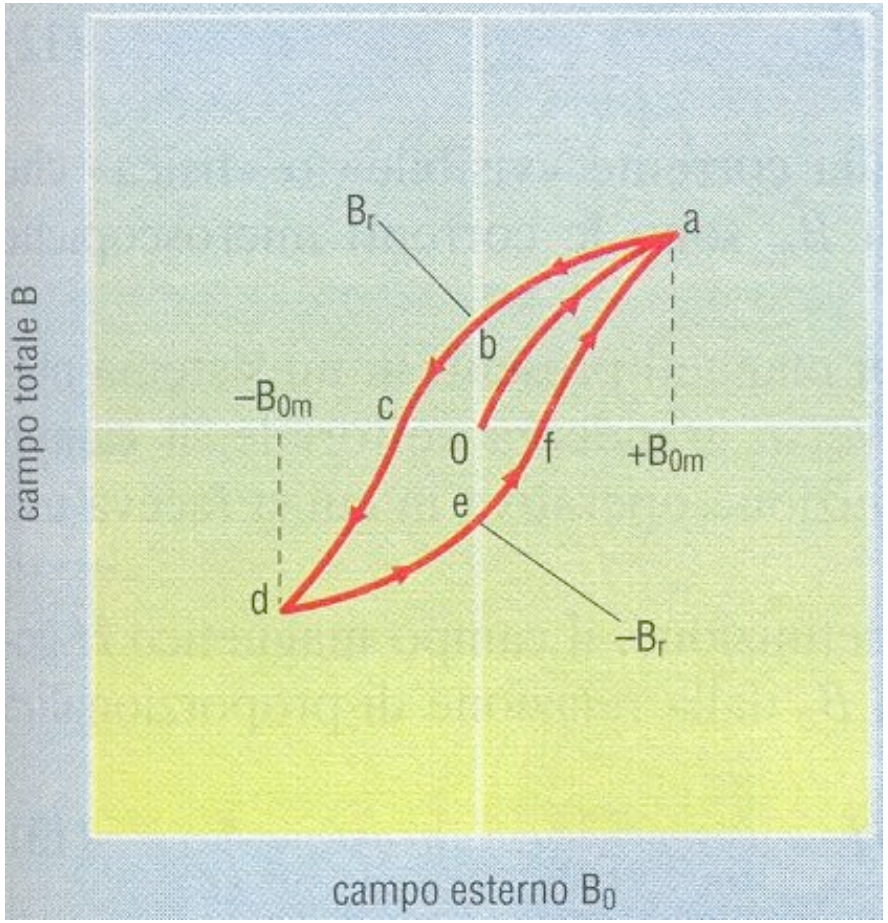
in un materiale ferromagnetico i momenti magnetici microscopici della materia, che sono stati ordinati dal campo magnetico esterno, sono abbastanza intensi da risentire gli effetti della loro interazione reciproca, rimanendo parzialmente allineati.

Questo ordinamento si mantiene nel tempo senza che sia più necessario l'effetto di un campo magnetico esterno.



Per eliminare questa magnetizzazione residua è necessario invertire il segno del campo esterno $\mathbf{B}_0$ (cioè invertire il verso della corrente nel solenoide). In questo modo si giunge al punto c, in cui **B** è zero, ma $\mathbf{B}_0$ ha un valore negativo.

Facendo in modo che B_0 diminuisca ancora e poi torni a crescere si ottiene la **curva di isterèsi magnetica**.



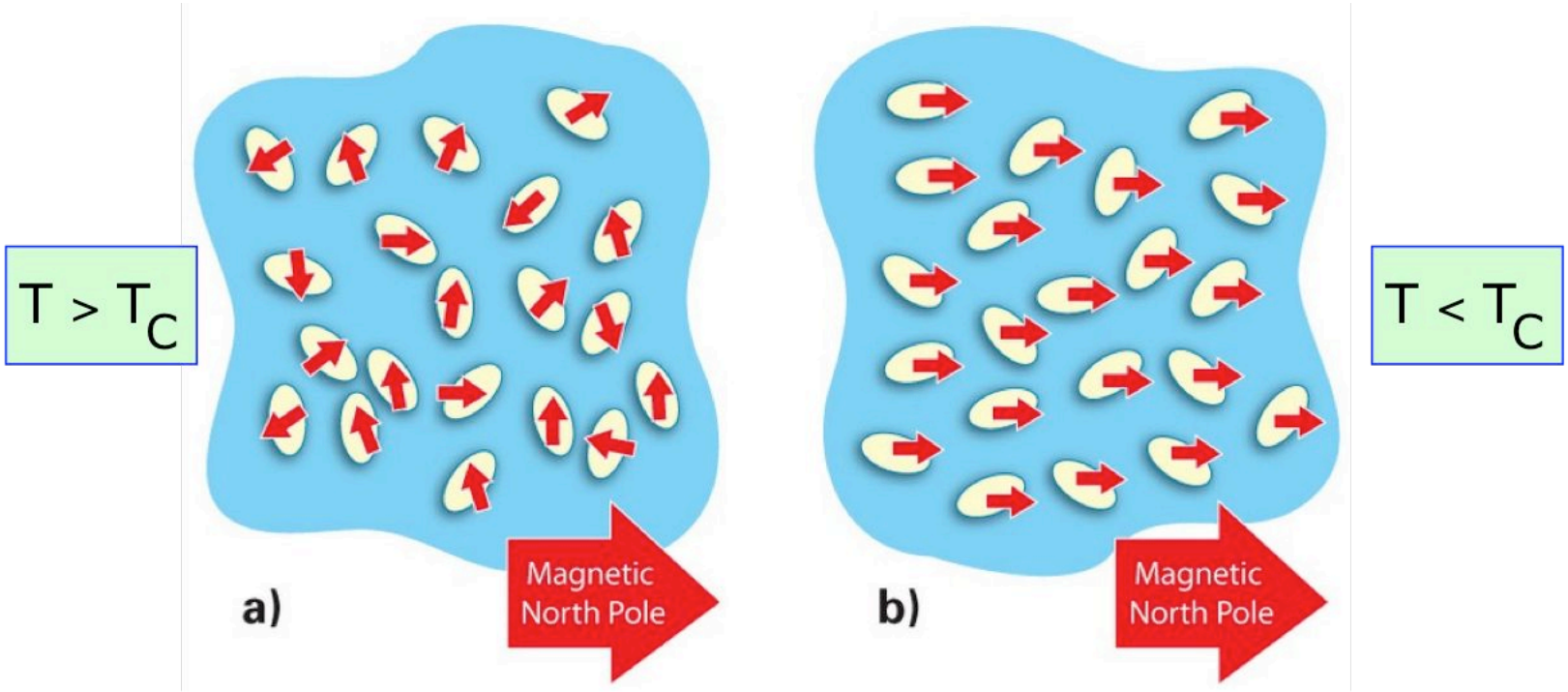
Questa curva non passa più dall'origine (che corrisponde allo stato in cui sia $\mathbf{B}_0$ sia $\mathbf{B}$ sono zero). Per riportare il materiale ferromagnetico in questa condizione, ossia smagnetizzarlo, è necessario riscaldarlo al di sopra di una certa temperatura caratteristica della sostanza (***temperatura di Curie***).

Al di sopra della temperatura di Curie ogni materiale ferromagnetico diviene paramagnetico e perde la propria magnetizzazione residua.

Magnetizzazione residua

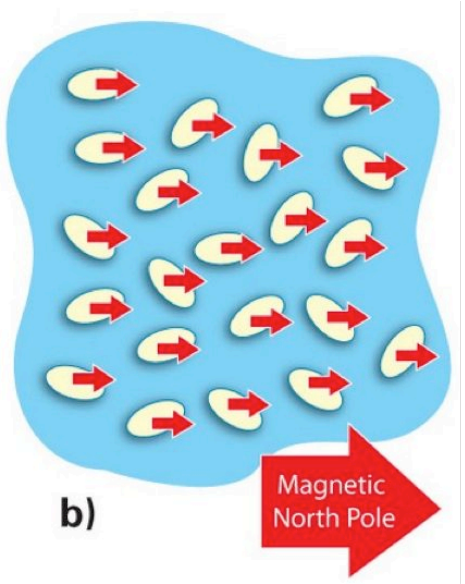
Abbiamo visto che:

al di sopra della *temperatura di Curie* T_c ogni materiale ferromagnetico diviene paramagnetico e perde la propria magnetizzazione residua.

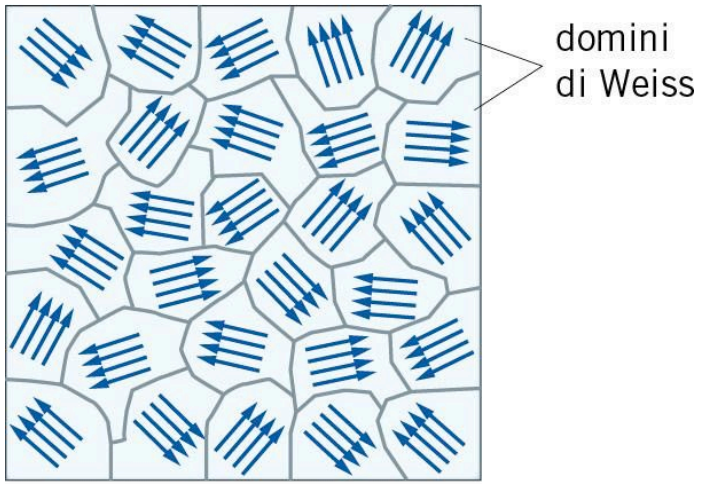


Ma che succede in presenza di magnetizzazione residua?

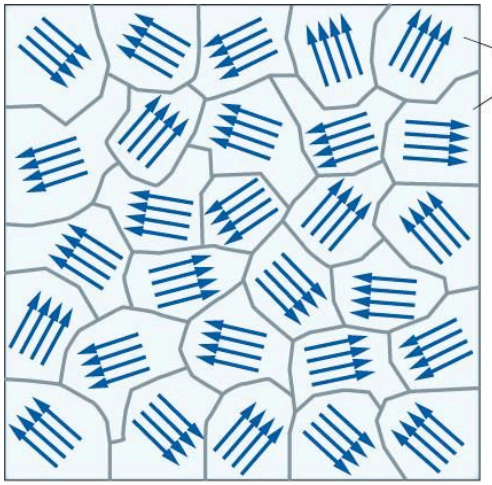
Il fenomeno della magnetizzazione residua mostra che, in una sostanza ferromagnetica, i momenti magnetici possono mantenersi allineati senza la necessità di un campo magnetico esterno.

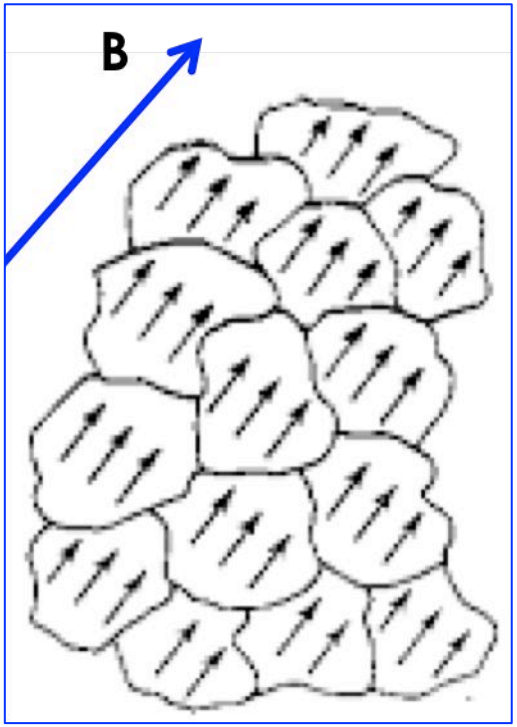


Però, all'interno di un blocco di ferro non magnetizzato, i momenti magnetici non sono completamente disordinati. A temperatura ambiente è suddiviso in un grande numero di zone magnetizzate (**domini di Wiess**).



Ogni dominio genera un proprio campo magnetico, ma nel complesso il blocco di ferro risulta smagnetizzato perché i singoli domini hanno orientazioni casuali.





Un campo magnetico esterno provoca la crescita dei domini che si trovano orientati lungo di esso, oppure fa ruotare l'orientazione dei domini non allineati. Entrambi questi meccanismi generano la magnetizzazione macroscopica del materiale.

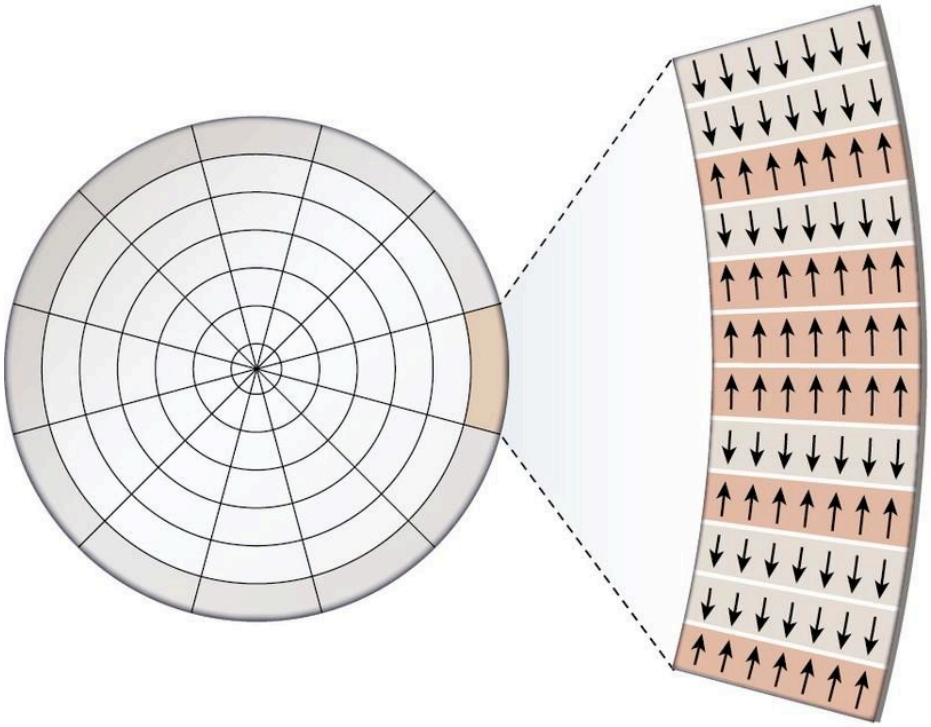
Memorie magnetiche digitali

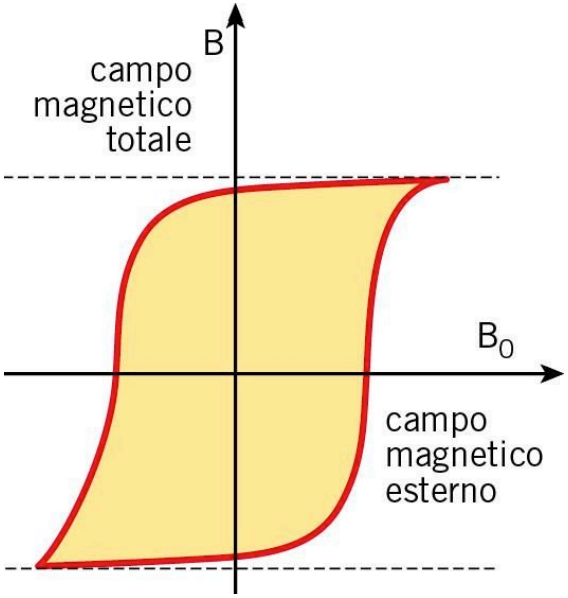
Il fenomeno della magnetizzazione residua è utilizzato nella realizzazione di memorie magnetiche digitali.

In un computer tutte le informazioni sono rappresentate da una sequenza di 0 e 1, chiamati bit (l'«alfabeto» del computer è composto da due soli caratteri).

Nel disco rigido, queste informazioni sono conservate come orientazione di campi magnetici.

Cioè, sono immagazzinate sotto forma di zone in cui la magnetizzazione ha un certo verso oppure quello opposto. Lo stesso accade nelle chiavette USB, nei nastri digitali e in altri tipi di memorie magnetiche.

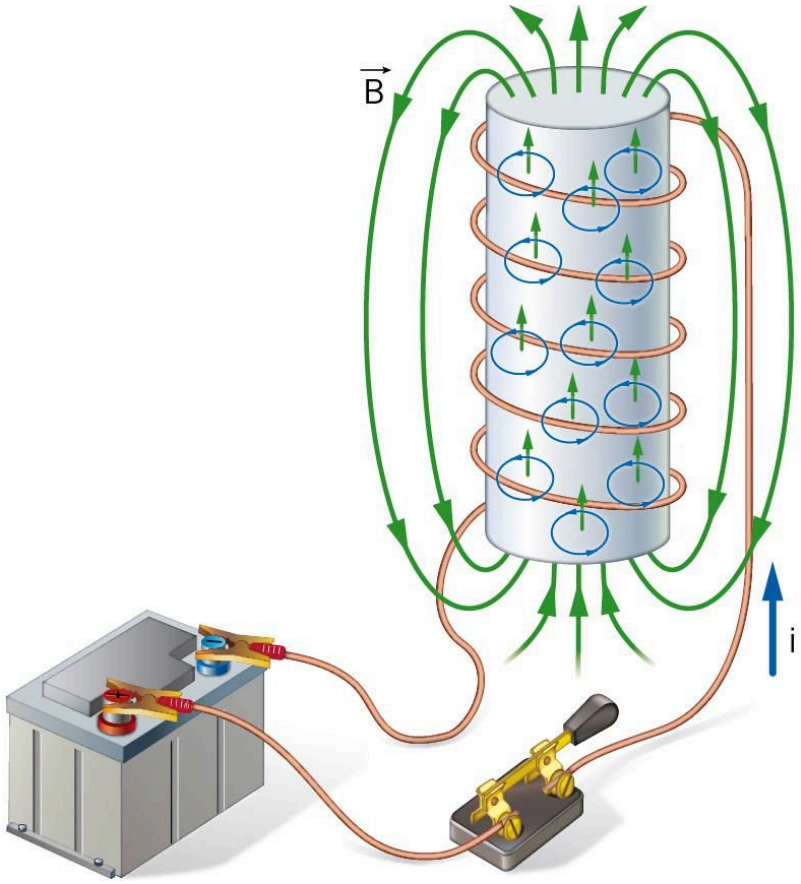




Affinché il segnale memorizzato non si cancelli spontaneamente, occorre utilizzare materiali con una curva di isteresi con una grande magnetizzazione residua.

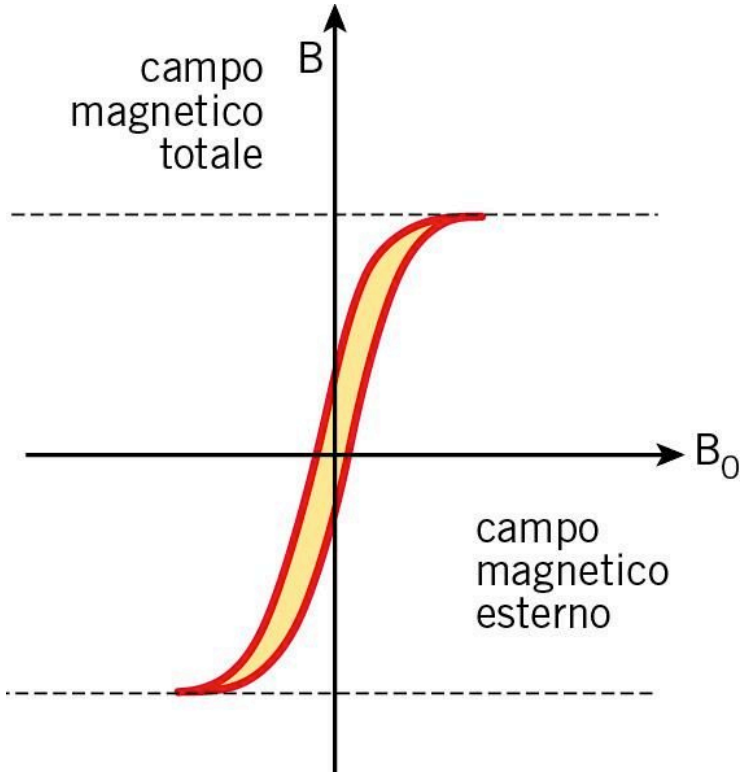
L'elettromagnete

Un **elettromagnete** (nucleo di ferro su cui è avvolto un solenoide) si comporta come una calamita che è messa in funzione a comando, azionando un interruttore.



Quando nel solenoide circola corrente, il nucleo di ferro genera un campo magnetico (si magnetizza). Non appena però la corrente si interrompe, il nucleo si smagnetizza quasi completamente.

Per ottenere questo risultato, per i nuclei degli elettromagneti si utilizzano materiali, come il ferro dolce, che hanno una curva di isteresi con una magnetizzazione residua particolarmente bassa.



Nella fisica delle particelle, potentissimi elettromagneti sono impiegati per guidare il moto di fasci di particelle che circolano negli acceleratori.

VERSO LE EQUAZIONI DI MAXWELL

PROPRIETA' MATEMATICHE DEL CAMPO ELETTRICO

Il campo elettrico è un campo vettoriale conservativo, completamente determinato quando se ne conoscono il flusso e la circuitazione:

Teorema di Gauss

$$\Phi_S\left(\vec{E}\right) = \frac{Q_{tot}}{\varepsilon}$$

Teorema della circuitazione

$$C(\vec{E}) = 0$$

PROPRIETA' MATEMATICHE DEL CAMPO MAGNETICO

Il campo magnetico è un campo vettoriale non conservativo, completamente determinato quando se ne conoscono il flusso e la circuitazione:

Teorema di Gauss

$$\Phi_S\left(\vec{B}\right) = 0$$

Teorema di Ampere

$$C\left(\vec{B}\right) = \mu_0 \sum i_k$$