

Unità didattica N° 27**Il campo magnetico**

- 1) I magneti e le loro interazioni
- 2) Le interazioni tra magneti e correnti e tra correnti e correnti
- 3) Campo magnetico e vettore \vec{B}
- 4) Seconda legge di Laplace
- 5) Unità di misura del campo magnetico \vec{B}
- 6) La forza di Lorentz
- 7) Metodi pratici per l'individuazione del verso delle linee di campo
- 8) Prima legge di Laplace
- 9) Campo magnetico generato da un filo rettilineo indefinito percorso da corrente :
legge di Biot-Savart
- 10) Campo magnetico generato da una spira circolare percorsa da corrente
- 11) Teorema della circuitazione di Ampere
- 12) Campo magnetico generato da un solenoide percorso da corrente
- 13) Interazione elettrodinamica fra due circuiti rettilinei percorsi da corrente :
definizione di ampere
- 14) Il vettore eccitazione magnetica \vec{H}
- 15) Moto di una carica puntiforme q in un campo magnetico uniforme \vec{B}
- 16) Momento magnetico di una spira percorsa da corrente e di una calamita
- 17) Azione meccanica esercitata da un campo magnetico su di una spira percorsa da corrente
- 18) I teoremi di equivalenza di Ampere
- 19) Momenti magnetici atomici e molecolari
- 20) Effetti prodotti da un campo magnetico sulla materia
- 21) Intensità magnetica \vec{H} ed intensità di magnetizzazione \vec{M}
- 22) Isteresi magnetica
- 23) Elettrocalamita

I magneti e le loro interazioni

- Già ai tempi del filosofo greco **Talete di Mileto** (VI secolo A.C.) era noto che un minerale di ferro la magnetite ($\text{FeO}\cdot\text{FeO}_3$ minerale composto da ossido di ferro e ossido ferroso , detto anche **sesquiossido di ferro**) gode della proprietà di attirare la limatura di ferro specialmente lungo talune zone della sua superficie .

Si indica brevemente questa proprietà dicendo che tale minerale è magnetizzato e rappresenta una **calamita o un magnete naturale**.

Si possono costruire magneti permanenti artificiali .

Per esempio , una sbarretta di acciaio su cui viene ripetutamente strofinata , sempre nello stesso verso , una zona di maggiore attrazione di un pezzo di magnetite , diventa a sua volta un magnete .

L'attrazione della limatura di ferro è limitata ai due estremi della sbarretta (poli magnetici) ; i due poli sono separati da una zona neutra ove la limatura non è attratta .

Le calamite artificiali così ottenute , se costruite con opportuni materiali ferromagnetici e conservate con qualche cura , sono **permanenti** , cioè conservano praticamente inalterate per anni le loro proprietà magnetiche .

Tuttavia il metodo di gran lunga più comodo per magnetizzare regolarmente una sbarretta di acciaio consiste nel disporla lungo l'asse di un solenoide in cui si invia una intensa corrente elettrica continua .

- Per un lungo periodo di tempo l'elettricità ed il magnetismo sono stati considerati come **enti fisici distinti ed indipendenti** , dotati di talune analogie e di forti differenze .

Con l'estendersi delle indagini e la scoperta delle interazioni tra magneti e correnti elettriche , e più in generale tra magneti e cariche elettriche in movimento rispetto ad essi si è stabilita una relazione che riconduce i fenomeni magnetici ad azioni tra correnti elettriche .

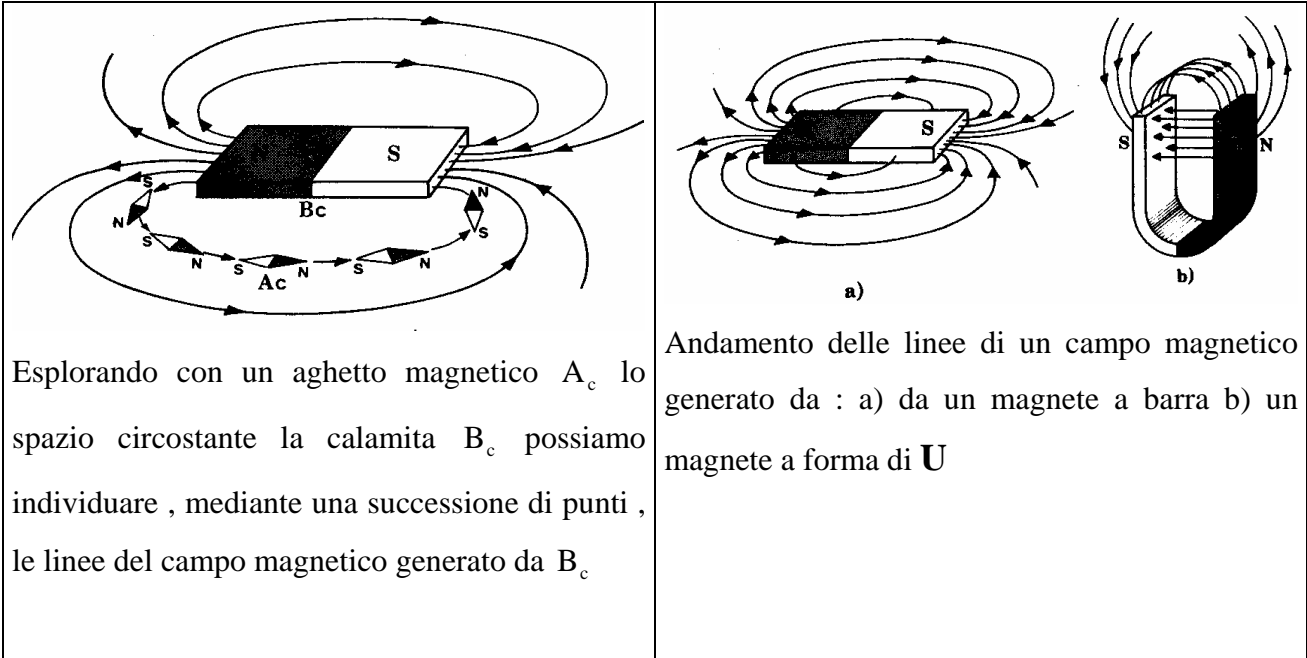
Ad Ampère (1820) spetta il grande merito di avere proposto una interpretazione dei fenomeni magnetici che riduce la magnetizzazione dei corpi ad effetti dovuti alla circolazione , all'interno del corpo magnetizzato , di correnti elettriche su scala molecolare e atomica .

- le calamite possono avere forme diverse . Le più comuni sono : a) **calamita a barra parallelepipedica** b) **calamita a barra cilindrica** c) **calamita a ferro di cavallo** o ad U d) **calamita a forma di ago** detta più comunemente **ago magnetico** . Si tratta di una laminetta d'acciaio sottilissima avente la forma di losanga molto stretta ed allungata capace di ruotare attorno ad un perno verticale passante per il suo baricentro .

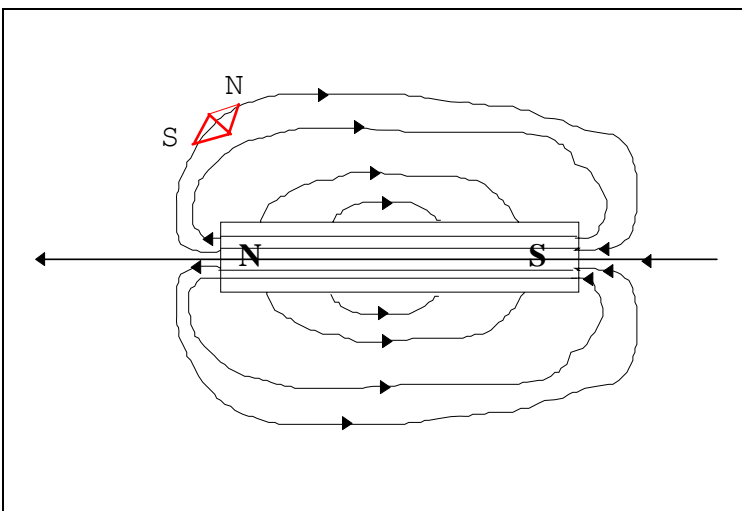
Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

- Un ago magnetico si orienta sempre disponendosi in modo che un suo estremo si volga verso il nord geografico e l'altro estremo verso il sud geografico.

Il primo estremo dicesi **polo nord** o *polo positivo* e viene indicato con uno dei due seguenti simboli N , P_N , il secondo estremo dicesi **polo sud** o *polo negativo* e viene indicato con uno dei due seguenti simboli S , P_S .



- Una calamita o un circuito percorso da corrente generano nello spazio circostante un **campo magnetico** la cui direzione ed il cui verso sono individuati dalle **linee di campo** . **Linea di campo** è una linea chiusa la cui tangente ci dà la direzione del campo ed il cui verso ci dà il verso del campo



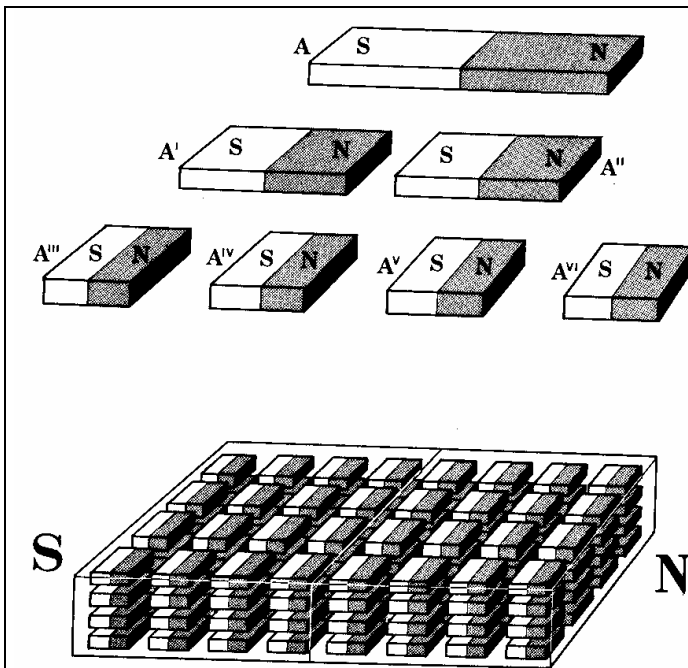
Linee di campo per un magnete a sbarra

Nel punto A la direzione del campo magnetico coincide con l'asse dell' ago magnetico di prova (in posizione di equilibrio) , il verso del campo magnetico è per convenzione quello che va dal polo **Sud** al polo **Nord** dell'ago magnetico di prova .

Quindi le linee del campo magnetico nella regione esterna al magnete a sbarra vanno dal **polo Nord** N al **polo Sud** S , e nella regione interna alla sbarra magnetizzata dal **polo sud** S al **polo nord** N .

- Poli magnetici dello stesso nome si respingono , poli magnetici di nome diverso si attirano .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico



□ L' esperienza della calamita spezzata

(ogni calamita divisa in due parti genera altre due calamite) ci dice che è impossibile realizzare poli magnetici separati .

- Suddividendo la calamita A si ottengono prima due calamite ridotte A' e A'' , ma sempre con i due poli N ed S . Infine suddividendo ulteriormente A' e A'' si ottengono quattro calamite elementari , ma ognuna delle quali con i rispettivi due poli

Ogni calamita è costituita da un numero notevole di calamite elementari orientate secondo la direzione S - N , una di seguito all'altra e disposte su diverse file parallele ed in più strati .

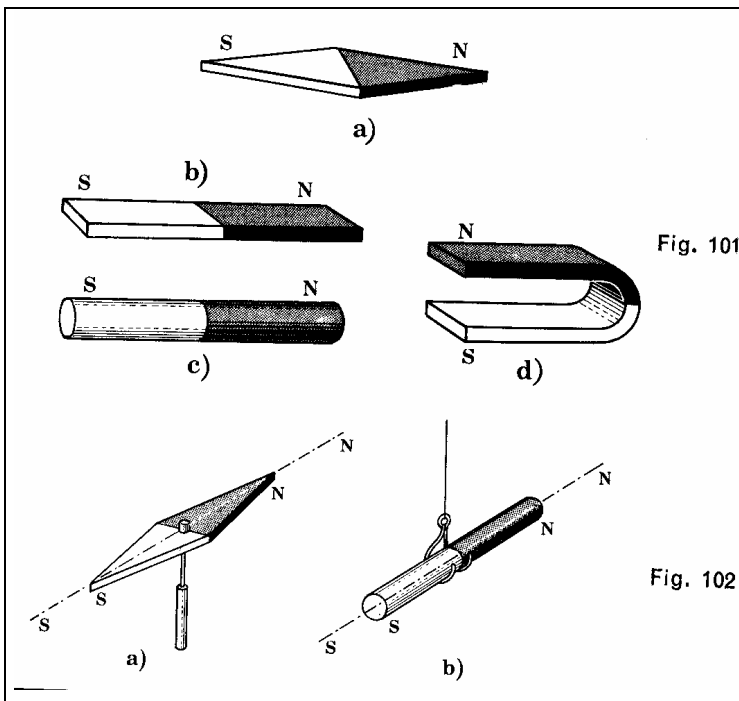


Fig. 101 : vari tipi di calamite artificiali permanenti : a) a forma di **ago**

b) a **barra** c) a **forma cilindrica**

d) a forma di **U**

Fig. 102 : Disposizione analoga di due calamite secondo l'asse N-S

a) ad **ago** b) a **forma cilindrica**

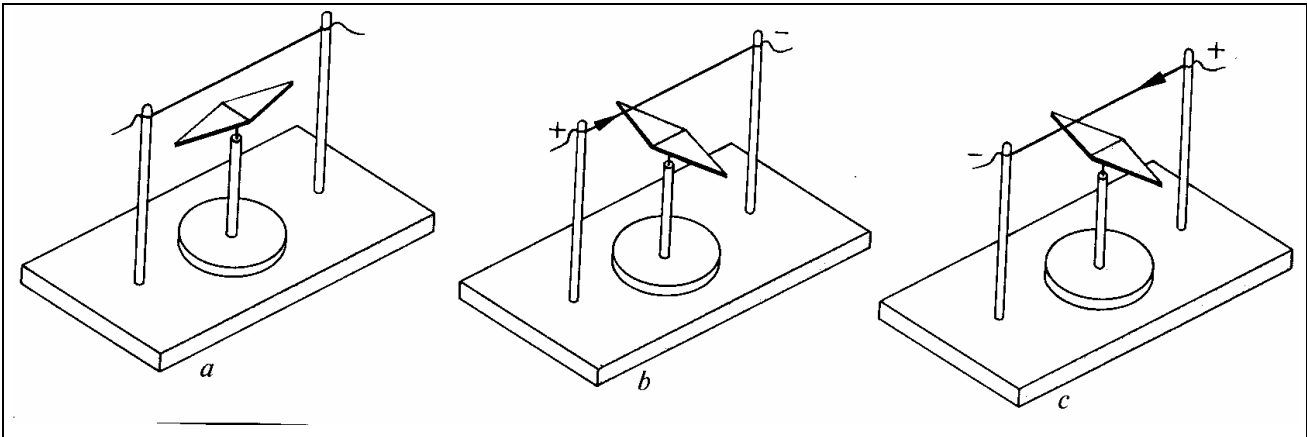
Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Le interazioni tra magneti e correnti e tra correnti e correnti

- Un ago magnetico mobile , posto nelle vicinanze e parallelamente ad un filo conduttore percorso da corrente , devia dalla sua posizione di equilibrio e si dispone ortogonalmente al filo

(Esperienza di Oersted 1820)

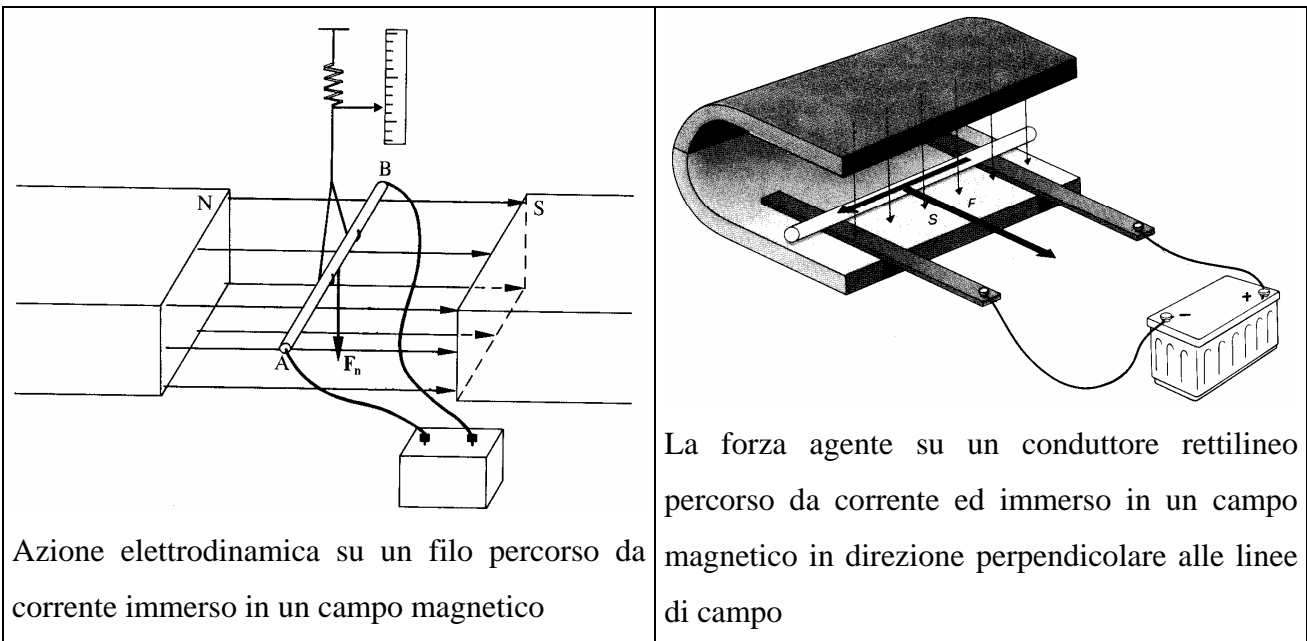
Questa esperienza dimostra che un filo conduttore percorso da corrente genera nello spazio circostante un campo magnetico .



Schema dell'esperienza di Oersted : a) nel conduttore non passa corrente b) nel conduttore passa corrente in un certo verso c) la corrente viene invertita

- Un tratto mobile percorso da corrente immerso in un campo magnetico creato da una calamita è soggetto ad una *forza* che tende a spostarlo perpendicolarmente alle linee di campo .

(Esperienza di Faraday 1821) Questa esperienza dimostra che un campo magnetico agisce mediante forze sulle cariche in movimento .

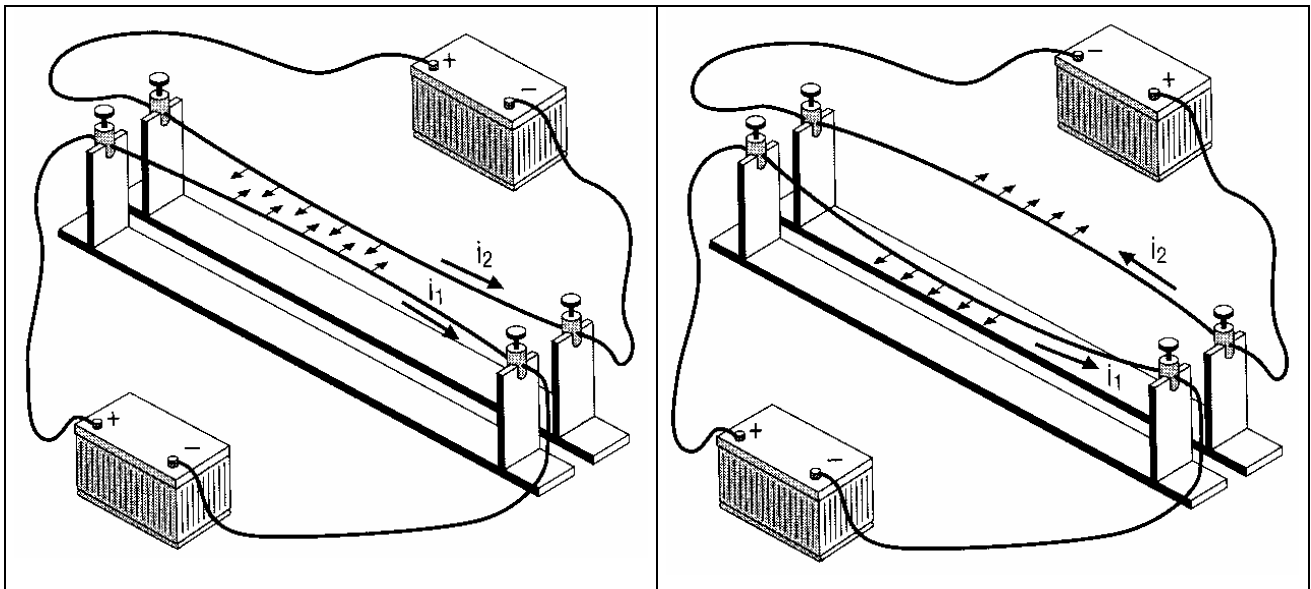


Azione elettrodinamica su un filo percorso da corrente immerso in un campo magnetico

La forza agente su un conduttore rettilineo percorso da corrente ed immerso in un campo magnetico in direzione perpendicolare alle linee di campo

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

- Tra due fili conduttori paralleli percorsi da corrente si esercita una forza attrattiva o repulsiva a seconda che le correnti sono concordi o discordi .



Due fili paralleli (a) percorsi da corrente elettrica nello stesso verso si attraggono .

Due fili paralleli (b) percorsi da corrente elettrica in versi opposti si respingono.

L'intensità della forza di attrazione è direttamente proporzionale alle correnti i_1 e i_2 nei fili ed inversamente proporzionale alla distanza d tra essi .Questo esperimento permette di definire in modo operativo l'**ampere** come unità di misura della corrente elettrica .

Questa esperienza dimostra che le correnti elettriche interagiscono tramite campi magnetici . Il primo conduttore genera nello spazio circostante un campo magnetico che esercita delle forze sul secondo conduttore . Il secondo conduttore , a sua volta , genera nello spazio circostante un campo magnetico che esercita sul primo conduttore delle forze .

Tutte queste esperienze mostrano che le correnti elettriche producono campi magnetici e risentono dell'azione di campi magnetici , cioè mettono in evidenza l'intima connessione che intercorre tra fenomeni elettrici e fenomeni magnetici .

- Le forze che si esercitano tra correnti e correnti sono dette **forze elettrodinamiche** , quelle che si esercitano fra correnti e magneti sono dette forze elettromagnetiche , quelle che si esercitano fra magneti e magneti **forze magnetiche** .

- Un **campo magnetico** è **uniforme** quando il vettore che lo rappresenta è lo stesso in ogni punto del campo . Le linee di un campo magnetico uniforme sono rette parallele ed equiverse .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

- Un ago magnetico immerso in un campo magnetico uniforme è soggetto ad una coppia di forze il cui momento meccanico diventa nullo quando l'ago magnetico si dispone lungo la stessa direzione e lo stesso verso del campo magnetico .

- *Linee di campo per un magnete a sbarra .*

Nel punto A la direzione del campo magnetico coincide con l'asse dell'ago magnetico di prova (in posizione di equilibrio) , il verso del campo magnetico è per convenzione quello che va dal polo **Sud** al polo **Nord** dell'ago magnetico di prova .

Quindi le linee del campo magnetico nella regione esterna al magnete a sbarra vanno dal **polo Nord N** al **polo Sud S** , e nella regione interna alla sbarra magnetizzata dal **polo sud S** al **polo nord N** .

Linee di campo per un magnete a sbarra . Nel punto A la direzione del campo magnetico coincide con l'asse dell'ago magnetico (in posizione di equilibrio) , il verso del campo magnetico è per convenzione quello che va dal **Polo Sud** al **Polo Nord** dell'ago magnetico . Quindi le linee del campo magnetico nella regione esterna al **magnete e sbarra** vanno dal **Polo Nord** al **Polo Sud** .

▮ Un campo magnetico è **uniforme** quando il vettore che lo rappresenta è lo stesso in ogni punto del campo . Le linee di un campo magnetico sono delle rette parallele ed equiverse (o meglio dei segmenti paralleli , equiversi ed equidistanziati) .

▮ Un ago magnetico immerso in un campo magnetico uniforme è soggetto ad una coppia di forze il cui momento meccanico diventa nullo quando l'ago magnetico si dispone lungo la stessa direzione e lo stesso verso del campo magnetico .

Campo magnetico e vettore \vec{B}

Da quanto detto precedentemente possiamo affermare che lo spazio attorno ad un magnete o ad un conduttore percorso da corrente è sede di un **campo magnetico** così come abbiamo detto che lo spazio nelle vicinanze di un conduttore elettrizzato è sede di un **campo elettrico** .

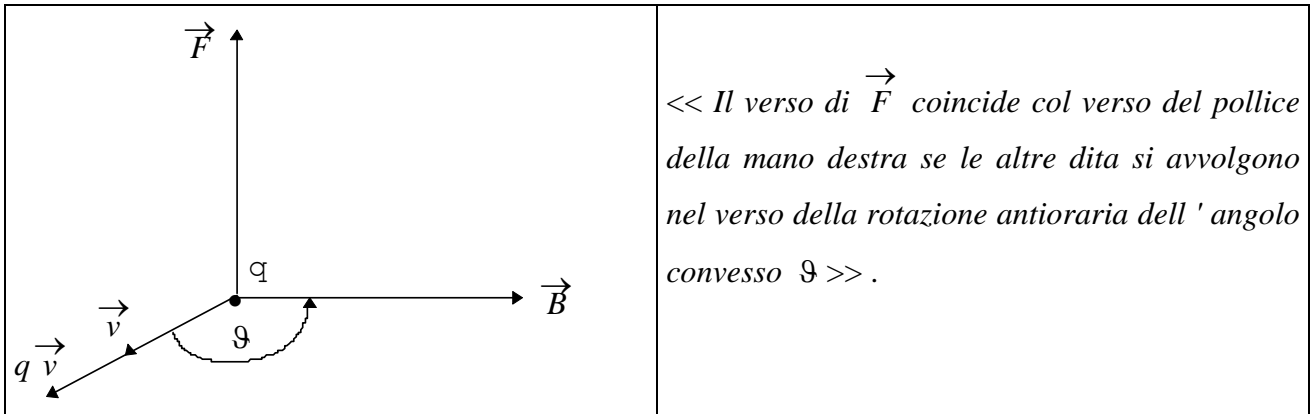
In ogni caso per **campo magnetico** dobbiamo intendere la perturbazione fisica che si genera in una regione dello spazio quando poniamo in tale regione una calamita o un reoforo percorso da corrente . La perturbazione consiste nella creazione di forze magnetiche che si manifestano quando collochiamo nella regione sede del campo magnetico un ago magnetico o una spira percorsa da corrente .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Un **campo magnetico** viene descritto dal vettore \vec{B} detto vettore campo magnetico (una volta era chiamato **induzione magnetica**) completamente individuato dalla relazione vettoriale :

$$\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

dove \vec{F} è la forza che agisce sulla carica q avente velocità vettoriale \vec{v} posta in un punto del campo magnetico \vec{B} . \vec{F} è perpendicolare ai vettori $q\vec{v}$ e \vec{B} , ha modulo $F = qvB\sin\vartheta$, ha verso che si ottiene applicando la regola della mano destra .



- Le forze di tipo magnetico sono originate ed agiscono su cariche elettriche in movimento . Esse dipendono , oltre che dalla carica , anche dalla velocità vettoriale con cui si muovono le cariche . Una buona descrizione dei fenomeni magnetici è quella di associare alle cariche elettriche in movimento (o i fili percorsi da corrente) la creazione di un campo magnetico e di fare discendere da esso le forze (magnetiche) agenti sulle cariche elettriche in movimento (o i fili percorsi da corrente elettrica) .

- Il vettore fondamentale \vec{B} del campo magnetico è chiamato **induzione magnetica** anche se **intensità del campo magnetico** sarebbe stato il nome più adatto ; ma questo nome è stato usurpato per ragioni storiche da un altro vettore , il vettore \vec{H} collegato al vettore \vec{B} dalla relazione

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

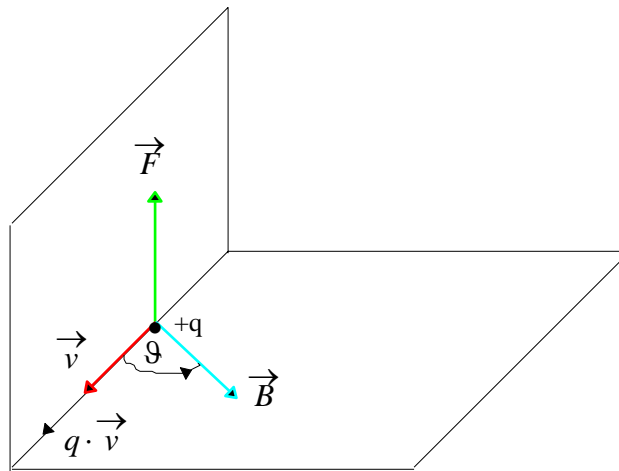
In questa fase non ci occuperemo delle cause che determinano il campo magnetico , ma ci preoccupiamo di stabilire : 1°) se in un dato punto esiste un **campo magnetico** 2°) l'azione che questo campo magnetico esercita sulle cariche elettriche che si muovono in esso .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Come per il campo elettrico useremo una carica elettrica puntiforme q (positiva o negativa) per esplorare il campo magnetico \vec{B} e , per il momento non ci interessa sapere se a creare \vec{B} sia stato un magnete o un filo percorso da corrente . Inoltre supporremo che non sia presente nessun campo elettrico e questo significa che , se trascuriamo la gravità , nessuna forza agirà sulla carica di prova se essa è posta in quiete nel punto in esame . Diremo che in un punto esiste un **campo magnetico** se in quel punto agisce una forza \vec{F} su una carica in moto . L'esperienza dimostra che , se la carica q si muove con una velocità \vec{v} in un campo magnetico \vec{B} , la forza magnetica \vec{F} che agisce sulla carica q , ci viene data dalla seguente formula :

$$\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

la quale definisce in modulo , direzione e verso il vettore \vec{B} .



Osservazione

$$F = q v B \sin \vartheta \quad B = \frac{F}{q v \sin \vartheta}$$

La forza magnetica \vec{F} , che è sempre una **forza trasversale** in quanto risulta perpendicolare al piano individuato dai vettori \vec{v} e \vec{B} , è **nulla** quando $\vec{v} = \vec{0}$ oppure quando $\vec{v} // \vec{B}$; è **massima** se $\vec{v} \perp \vec{B}$. nel primo caso abbiamo $\sin \vartheta = 0$, nel secondo caso abbiamo $\sin \vartheta = 1$.

Questa definizione di \vec{B} è più complessa rispetto ad altre ma in compenso è simile nello spirito alla definizione dell'intensità del campo elettrico \vec{E} . Poiché \vec{F} risulta sempre perpendicolare alla velocità \vec{v} posseduta dalla carica q , risulta pure perpendicolare allo spostamento $d\vec{s} = \vec{v} \cdot dt$ per cui , (per **campi magnetici stazionari**) \vec{F} non compie lavoro .

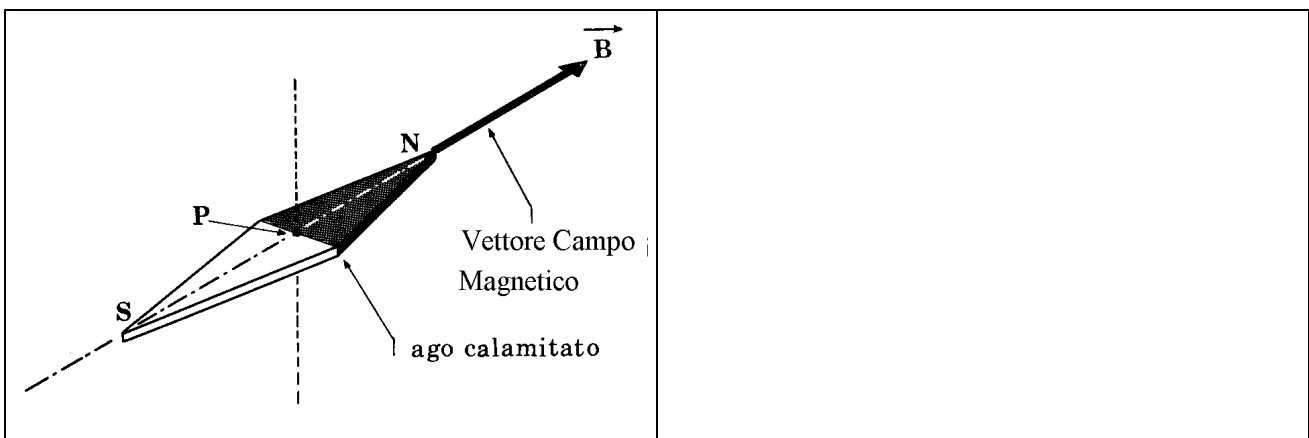
Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Quindi un campo magnetico stazionario non può cambiare l' **energia cinetica** di una particella elettrica in moto ; può soltanto mutare la direzione del vettore \vec{v} (ma non il suo modulo) .

Se poi la carica elettrica q si muove in una regione dello spazio nella quale sono presenti un campo elettrico \vec{E} ed un campo magnetico \vec{B} essa è soggetta ad una **forza elettrostatica** \vec{F} e ad una **forza magnetica** $\vec{F}_m = q \vec{v} \wedge \vec{B}$ e quindi ad una **forza elettromagnetica** \vec{F}_{em} , detta **forza di Lorentz** , data da :

$$\vec{F}_{em} = q \cdot \vec{E} + q \vec{v} \wedge \vec{B} = q \cdot \left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} \right)$$

Qualche autore chiama **forza di Lorentz** soltanto la forza magnetica $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$.



Seconda legge di Laplace

Quando un conduttore percorso da corrente è immerso in un campo magnetico \vec{B} , gli elettroni di conduzione presenti all'interno del conduttore sono soggetti a **forze magnetiche** e quindi l'intero conduttore è soggetto a **forze magnetiche** .

Consideriamo un conduttore filiforme e rettilineo lungo ℓ e percorso dalla corrente i immerso in un campo magnetico \vec{B} . Si verifica sperimentalmente e si dimostra teoricamente che il conduttore è soggetto ad una forza complessiva \vec{F} completamente definita dalla seguente relazione vettoriale :

$$\vec{F} = i \vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

dove $\vec{\ell}$ rappresenta un vettore di modulo ℓ , diretto come il conduttore ed orientato nel verso convenzionale della corrente elettrica i .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Caratteristiche della forza :

■ *intensità* : $F = i \ell B \sin \vartheta$

■ *direzione* : perpendicolare al piano individuato dai vettori \vec{B} ed $\vec{\ell}$

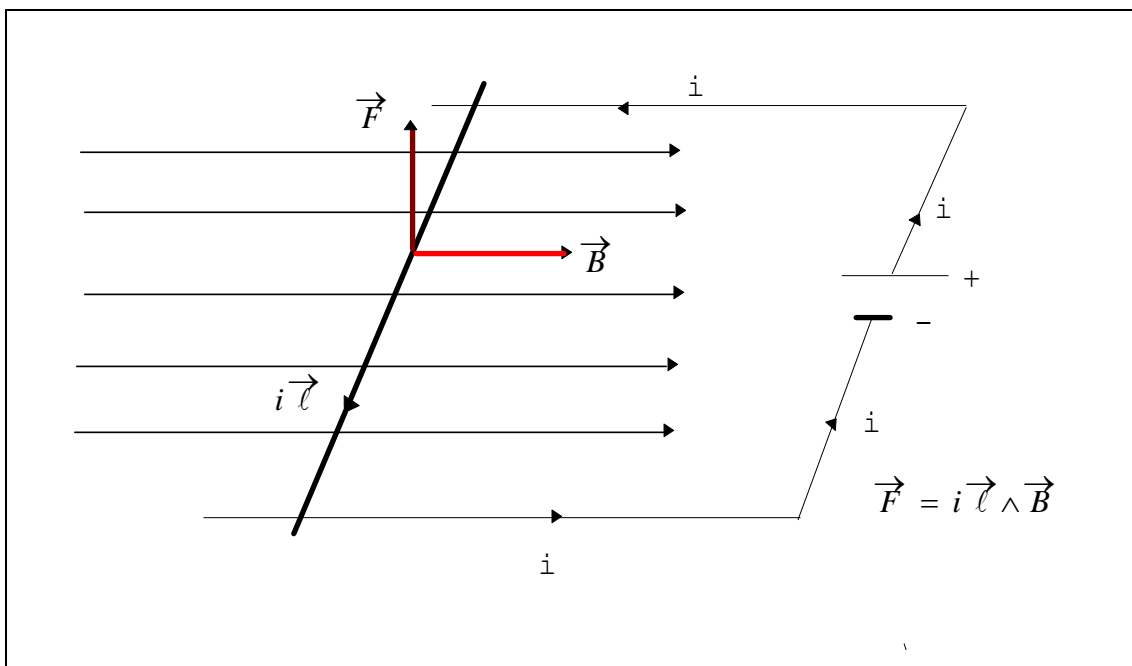
■ *verso* : si determina applicando la regola della mano destra .

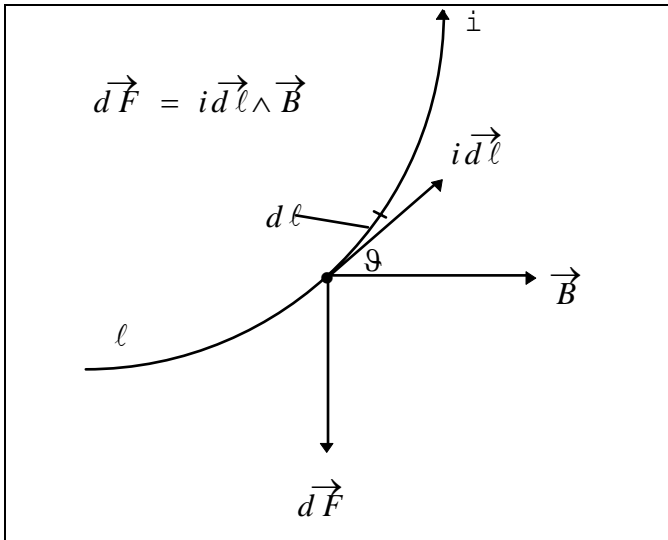
$\vec{F} = i \vec{\ell} \wedge \vec{B}$ può essere utilizzata come equazione di partenza per definire il vettore campo magnetico \vec{B} . In questo caso si dimostra che una carica q avente velocità \vec{v} immersa in un campo magnetico \vec{B} è soggetta ad una forza \vec{F} data dalla seguente relazione vettoriale : $\boxed{\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}}$

La relazione $\vec{F} = i \vec{\ell} \wedge \vec{B}$ esprime la **seconda legge di Laplace** in un caso particolare , precisamente quando il vettore campo magnetico \vec{B} è uniforme ed ℓ è un tratto di circuito rettilineo .
 .Quale forza agisce su un circuito avente forma arbitraria , attraversato dalla corrente i , immerso in un campo magnetico qualsiasi \vec{B} ?

Si decompone il circuito in tanti tratti infinitesimi $d\ell$, in modo da poterli considerare rettilinei e tale che \vec{B} sia costante in ciascuno di essi .

La forza $d\vec{F}$ che agisce su ciascuno di essi vale : $d\vec{F} = i d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$ ed esprime la **seconda legge di Laplace** .



**Seconda legge di Laplace**

Sul tratto di circuito $d\ell$ agisce la forza

$$\vec{dF} \text{ data da : } \vec{dF} = i d\ell \wedge \vec{B}$$

La forza \vec{F} che agirà sul tratto ℓ di circuito sarà data dalla somma vettoriale delle forze elementari che agiscono sui singoli elementi infinitesimi $d\ell$ del circuito.

Unità di misura e dimensioni del campo magnetico \vec{B}

$$B = \frac{F}{qv \sin \vartheta} \quad \vartheta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow B = \frac{F}{qv} \quad \boxed{[B] = \frac{[F]}{[qv]} = \frac{[M \cdot L \cdot T^{-2}]}{[I \cdot T \cdot L \cdot T^{-1}]} = [M \cdot T^{-2} \cdot I^{-1}]}$$

$$\boxed{\{B\} = \text{tesla} = T = \frac{\{F\}}{\{q\} \cdot \{v\}} = \frac{N}{C \cdot \frac{m}{s}}}$$

Il **tesla** (T) rappresenta l'intensità di un campo magnetico uniforme che esercita la forza di un newton su una carica di un coulomb quando la carica si muove con la velocità di un metro al secondo in direzione ortogonale al campo magnetico \vec{B} .

$$B = \frac{F}{i \cdot \ell \cdot \sin \vartheta} \quad \vartheta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow B = \frac{F}{i \cdot \ell} \quad \boxed{[B] = \frac{[F]}{[i \ell]} = [M \cdot T^{-2} \cdot I^{-1}]}$$

$$\boxed{\{B\} = \text{tesla} = T = \frac{\{F\}}{\{i\} \cdot \{\ell\}} = \frac{N}{A \cdot m}}$$

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Il *Tesla* rappresenta l'intensità di un campo magnetico uniforme che esercita la forza di un *newton* su un filo conduttore , normale a \vec{B} ,lungo un metro e percorso dalla corrente di un ampere .

- Un campo magnetico può essere descritto e visualizzato disegnando le sue *linee di forza* (meglio **linee di campo**) le quali , se orientate , ci danno due informazioni : la direzione di \vec{B} (*retta tangente alla linea di campo*) ed il verso di \vec{B} .

Un campo magnetico è **più intenso** dove le linee di campo sono più fitte ,è meno intenso dove le linee di campo sono più rarefatte .

- Assumiamo come **direzione** e **verso** di un campo magnetico \vec{B} in un punto **P** dello spazio la direzione ed il verso della retta orientata che va dal **polo sud** al **polo nord** di un aghetto magnetico in equilibrio e col baricentro coincidente con **P** .

- Malgrado alcuni parallelismi , campo magnetico e *campo elettrico* sono diversi .

Mentre esistono separatamente cariche elettriche positive e negative non esistono i **monopoli magnetici** , cioè non è possibile separare il polo magnetico **Sud** dal polo magnetico **Nord** .

Di conseguenza , mentre un campo elettrico agisce su una carica elettrica con una forza , un campo magnetico agisce su un ago magnetico con una coppia di forze .

- Un campo magnetico è generato sempre da cariche elettriche in movimento ed esercita forze su qualsiasi carica elettrica in movimento . Nel caso di un magnete permanente le cariche in movimento coincidono con gli elettroni degli atomi .

Una diretta conseguenza di tale differenza è che una **linea di campo magnetico** è sempre **chiusa** , mentre una linea di un qualsiasi campo elettrico è sempre aperta . Una linea del campo elettrico nasce da una carica positiva e termina su una carica negativa , oppure nasce da una carica positiva e termina all'infinito , oppure proviene dall'infinito e termina su una carica positiva .

- **Le linee del campo magnetico**

Abbiamo visto che un campo magnetico può essere rappresentato mediante linee orientate dette linee del campo magnetico . La tangente ad una linea magnetica in un punto dà la direzione del vettore \vec{B} in quel punto . Ogni linea di campo è orientata nel verso di \vec{B} . La densità delle linee del campo magnetico in un dato punto è proporzionale all'intensità del campo magnetico in quel punto . Dove le linee del campo magnetico sono più **fitte** il campo magnetico è **più intenso** (*convenzione di Faraday*) . Le linee di forza di un campo magnetico sono **linee chiuse** in quanto

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

non esistono i monopoli magnetici . Le linee di forza di un campo elettrico , invece , sono **linee aperte** .

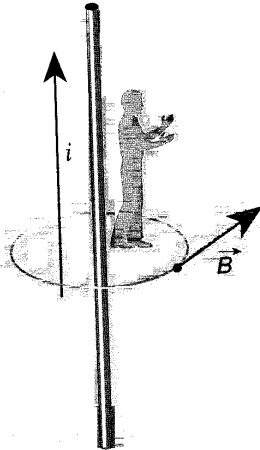
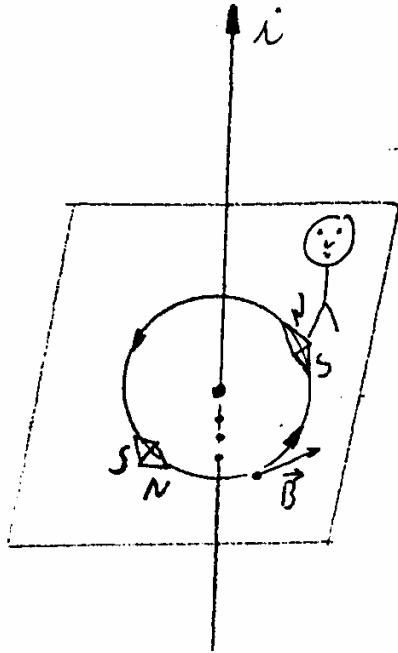
Una diretta conseguenza di tale affermazione è che una **linea di campo magnetico** è sempre chiusa, mentre una **linea del campo elettrico** è sempre aperta in quanto una linea del campo elettrico :

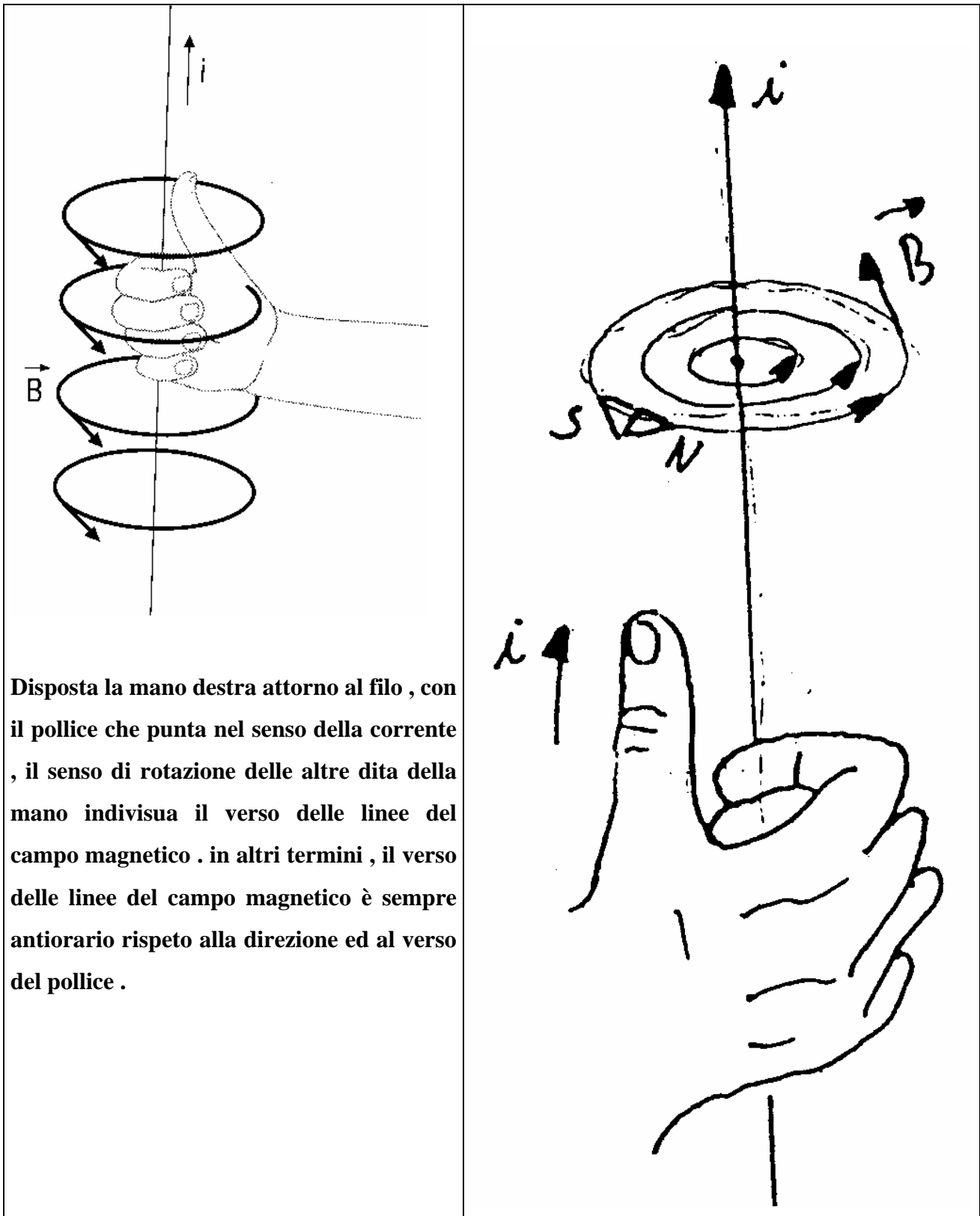
- 1) o nasce da una carica positiva e termina su una carica negativa
- 2) o nasce da una carica positive e termina all'infinito
- 3) o proviene dall'infinito e termina su una carica negativa

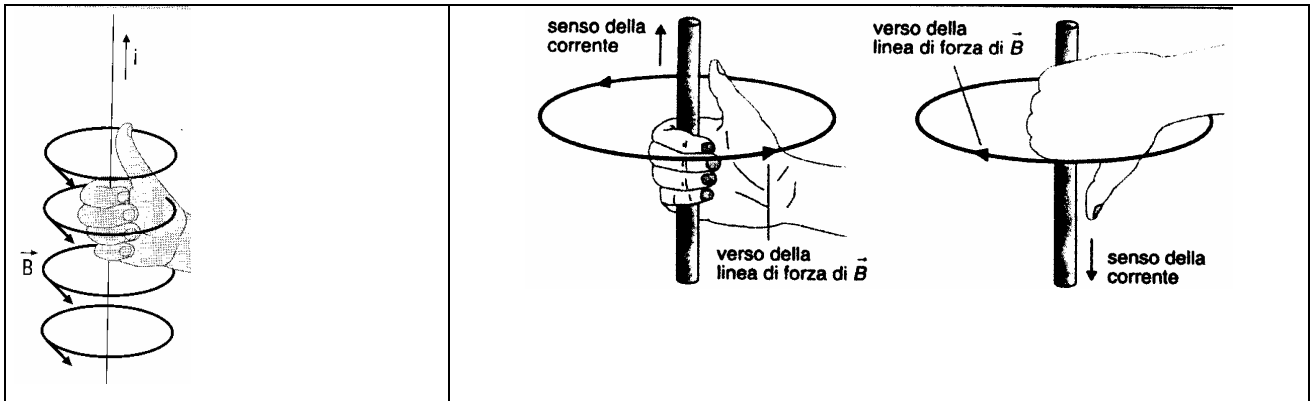
Metodi pratici per la individuazione del verso delle linee del campo magnetico

Un qualsiasi reoforo percorso da corrente genera nello spazio circostante un campo magnetico le cui linee di campo hanno verso da ricavare da una delle seguenti regole fra loro equivalenti :

Regola dell'uomo di Ampère

	
<p>La regola della corrente personificata</p>	
<p>Un osservatore disposto parallelamente al filo rettilineo percorso da corrente in modo che la corrente i entri dai suoi piedi ed esca dal suo capo, attribuisce alle linee del campo magnetico un verso antiorario e , di conseguenza , attribuisce alle linee del campo magnetico un <u>verso orario</u> se è attraversato dalla corrente i dal capo ai piedi</p>	

2) Regola della mano destra

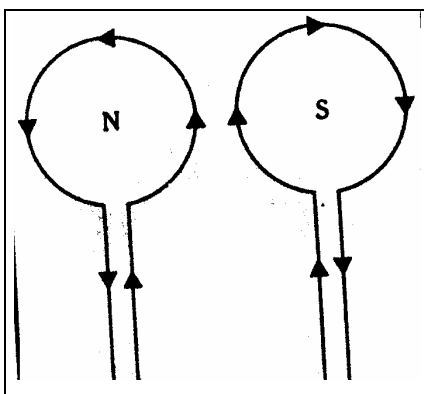
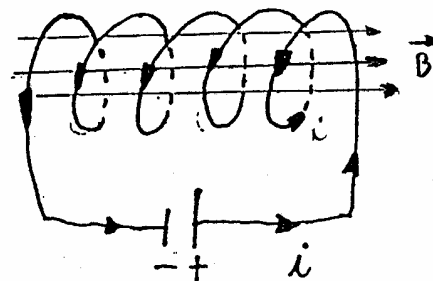
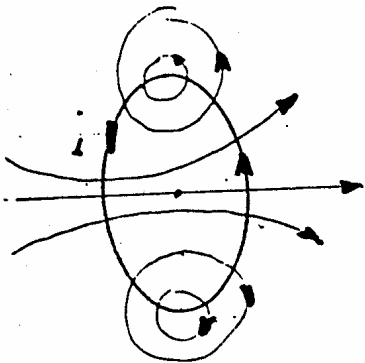


Se il pollice della mano destra è nel verso della corrente i , le dita piagate individuano il verso del campo magnetico

Se un filo rettilineo percorso da corrente è afferrato con la mano destra in modo tale che il suo pollice sia orientato secondo il verso convenzionale in cui fluisce la corrente i , allora le altre dita circondano il filo nello stesso verso delle linee del campo magnetico.

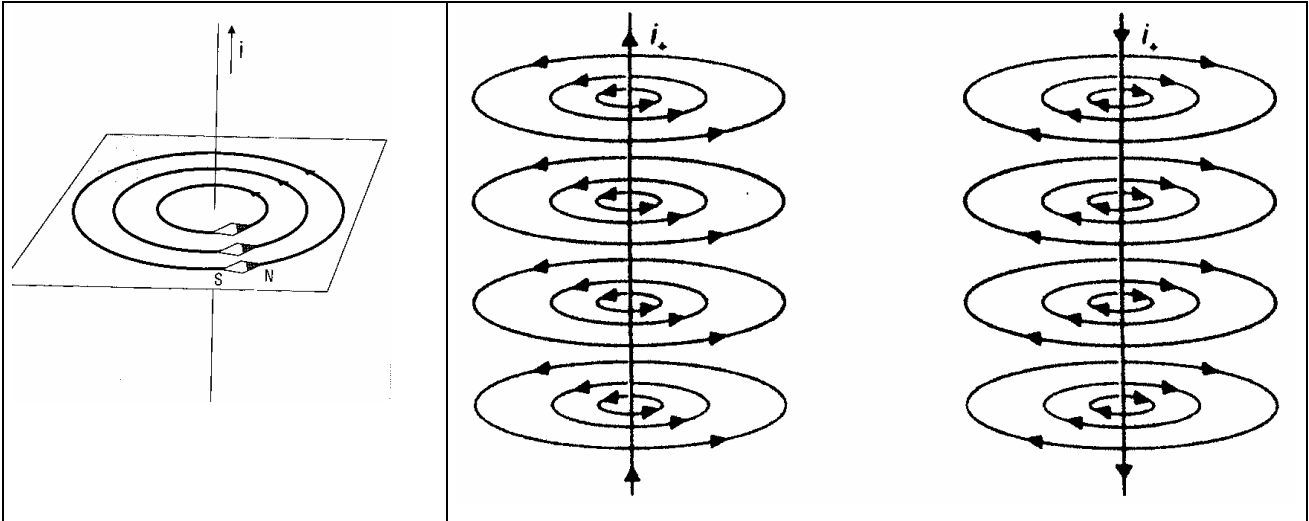
3) Regola dell'orologio

Un osservatore che guardi una spira o un solenoide percorsi dalla corrente i , e che veda circolare la corrente i in verso opposto alle lancette dell'orologio, vede uscire le linee del campo magnetico dall'interno della spira o del solenoide verso di sé.



Un osservatore che guarda una spira percorsa da corrente vede la faccia NORD o la faccia SUD secondo che egli veda circolare la corrente in verso antiorario o orario, rispettivamente.

Linee di un campo magnetico generato da un fili rettilineo indefinito percorso da corrente



Prima legge di Laplace

Ci consente di calcolare il campo magnetico \vec{B} generato da un conduttore metallico filiforme (reoforo) percorso dalla corrente i .

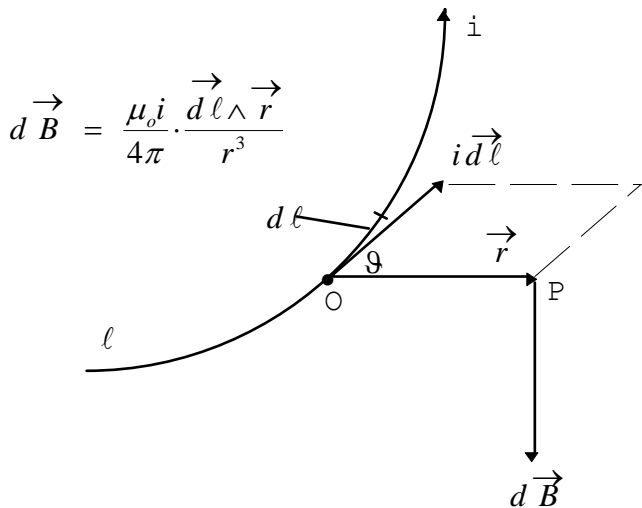
Il vettore \vec{B} in un generico punto dello spazio è da considerarsi come la somma vettoriale di infiniti contributi ciascuno derivante da un elemento di corrente facente parte del conduttore che crea il campo . Sia ℓ un reoforo percorso dalla corrente i . Indichiamo con $d\ell$ un elemento infinitesimo del reoforo , con $i d\ell$ un vettore avente come verso positivo quello della corrente i , come modulo $i d\ell$ e come direzione la retta tangente al reoforo nel punto O (origine dell'elemento infinitesimo del reoforo) , con \vec{r} il vettore $P-O$.

La **prima legge di Laplace** postula che un elemento $d\ell$ di conduttore percorso dalla corrente i , genera in un punto P alla distanza $\vec{r} = P-O$ un campo magnetico \vec{B} individuato dalla seguente relazione vettoriale :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \cdot \frac{d\ell \wedge \vec{r}}{r^3} \quad [S]$$

che, in termini scalari , diventa :

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \cdot \frac{d\ell \cdot \sin \vartheta}{r^2}$$



$\vec{i} d\vec{\ell}$ è un vettore avente la direzione di $d\vec{\ell}$, il verso della corrente convenzionale i ed il modulo $i d\ell$).

Un reoforo ℓ crea, in un punto P , un campo magnetico \vec{B} che è la somma vettoriale di tutti i campi magnetici elementari $d\vec{B}$ creati dagli

elementi $d\ell$ di cui esso è costituito.

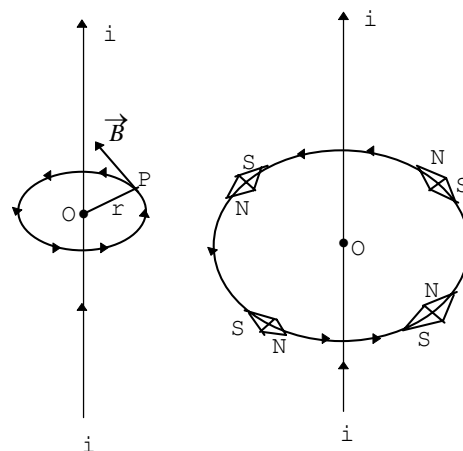
Campo magnetico generato da un filo rettilineo indefinito percorso da corrente : legge di BIOT-SAVART

Un filo rettilineo indefinito percorso dalla corrente i genera nello spazio circostante un campo magnetico \vec{B} . Le linee del campo magnetico sono circonferenze situate su piani perpendicolari al filo ed aventi i centri sul filo stesso. Il verso delle linee di campo si ottiene applicando la regola della mano destra, oppure collocando in un punto della linea di campo un piccolo aghetto magnetico mobile. Il verso della linea di campo coincide col verso $S \rightarrow N$ dell'aghetto magnetico nella sua posizione di equilibrio. Una linea del campo magnetico orientata ci fornisce, punto per punto, la direzione ed il verso di \vec{B} .

In un punto P distante r da un filo rettilineo indefinito percorso dalla corrente i il campo magnetico

vale : $B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi r}$ (Legge di **Biot-Savart**)

Una linea del campo magnetico generato da un filo rettilineo indefinito percorso dalla corrente i .



Campo magnetico generato da una spira circolare percorsa da corrente

Una spira circolare percorsa dalla corrente i genera nello spazio circostante un campo magnetico \vec{B}_o che presenta queste caratteristiche :

1) Le linee del campo magnetico sono linee chiuse concatenate col filo circolare

Una sola linea di campo è rettilinea ed è quella coincidente con l'asse della spira ; le altre invece sono curve , simmetriche rispetto all'asse stesso , che si addensano da una parte e dall'altra della spira sino ad assumere in vicinanza del filo una forma sensibilmente circolare

2) La direzione del campo magnetico \vec{B}_o è in ogni punto tangente alle linee di campo e risulta in particolare perpendicolare al piano della spira .

3) Il verso delle linee di campo può essere individuato con la *regola dell'orologio* . Un osservatore che guarda la spira circolare percorsa dalla corrente i , se vede circolare la corrente in verso opposto alle lancette dell'orologio (verso antiorario) vede uscire le linee di campo dalla spira verso di sé

4) Nei punti P Dell'asse della spira a distanza z da questa il campo magnetico B_o vale :

$$B_o = \frac{\mu_o \cdot i \cdot r^2}{2 \sqrt{(r^2 + z^2)^3}}$$

In particolare , nel centro della spira di raggio r abbiamo :

$$B_o = \frac{\mu_o \cdot i}{2 r}$$

Linee del campo magnetico di una spira circolare percorsa dalla corrente i . Il campo magnetico è simile a quello di un magnete a sbarra . Per individuare il verso di \vec{B}_o si può applicare la regola della mano destra . Se le dita della mano destra sono piegate nello stesso verso in cui fluisce la corrente i nella spira , il pollice fornisce il verso delle linee del campo magnetico che attraversano la spira .

Teorema della circuitazione di Ampere

Consideriamo una linea chiusa ℓ tracciata in un campo magnetico \vec{B} ed assumiamo su di essa , in maniera arbitraria , un **verso positivo** . Suddividiamo la linea ℓ in elementi $\Delta \ell$ piccoli a piacere (in teoria in elementi infinitesimi $d \ell$) Per ogni elemento $\Delta \ell$ ($d \ell$) della linea chiusa si considerino poi :

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

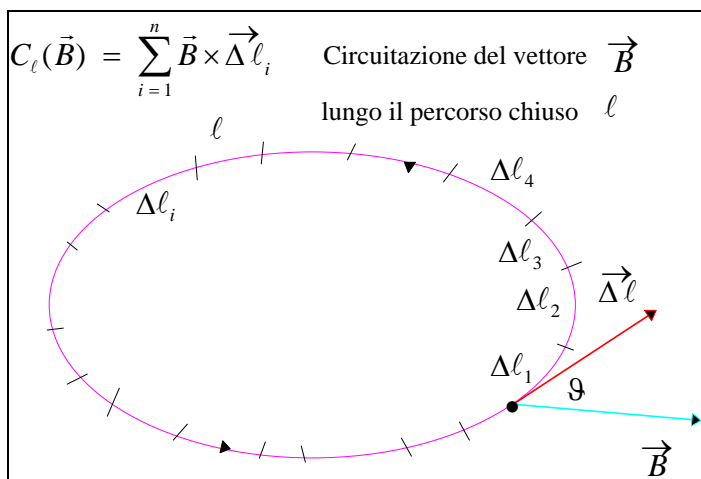
1) il vettore $\vec{\Delta l}$ ($d\vec{l}$) avente per modulo Δl (dl) e per direzione e verso quelli della tangente alla curva nel punto considerato orientato secondo il verso positivo assunto sulla curva .

2) il prodotto scalare $\vec{B} \times \vec{\Delta l} = B \cdot \Delta l \cdot \cos \vartheta$ ($\vec{B} \times d\vec{l} = B \cdot dl \cdot \cos \vartheta$), ove \vec{B} è il vettore campo magnetico nel punto in cui si considera $\vec{\Delta l}$ ($d\vec{l}$) e ϑ l'angolo formato dalle direzioni orientate di \vec{B} e $\vec{\Delta l}$ ($d\vec{l}$).

La somma delle quantità $\vec{B} \times \vec{\Delta l}$ ($\vec{B} \times d\vec{l}$) estesa a tutti gli elementi della curva chiusa ℓ prende il nome di **circuitazione del vettore \vec{B}** lungo la linea chiusa ℓ nel verso prestabilito , cioè :

$$C_\ell(\vec{B}) = \vec{B} \times \vec{\Delta l}_1 + \vec{B} \times \vec{\Delta l}_2 + \vec{B} \times \vec{\Delta l}_3 + \dots + \vec{B} \times \vec{\Delta l}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B} \times \vec{\Delta l}_i$$

In termini differenziali abbiamo : $C_\ell(\vec{B}) = \oint \vec{B} \times \vec{\Delta l}_i$



La definizione di **circuitazione del vettore \vec{B}** , precedentemente introdotta , è valida per un campo vettoriale \vec{v} qualsiasi . Se risulta $C_\ell(\vec{v}) = 0$, qualunque sia la linea chiusa ℓ , allora \vec{v} dicesi **campo conservativo** . Il campo gravitazionale \vec{g} e quello elettrostatico \vec{E} sono conservativi in quanto risulta $C_\ell(\vec{g}) = 0$, $C_\ell(\vec{E}) = 0$. Il

campo magnetico \vec{B} non è un campo conservativo in quanto , in generale , risulta : $C_\ell(\vec{B}) \neq 0$.

Dimostriamo adesso il **teorema della circuitazione di Ampere** . Sia \vec{B} il campo magnetico creato da un filo rettilineo indefinito percorso dalla corrente i e sia ℓ una circonferenza di raggio r concentrica col filo rettilineo , ad esso perpendicolare e con verso positivo (ad esempio quello antiorario) fissato ad arbitrio . La corrente i sarà considerata **positiva** (o negativa) secondo che alla corrente convenzionale del filo (quella dei protoni per intenderci) personificata (che va dai piedi al capo dell'osservatore) appaia (non appaia) **antiorario** il verso di percorrenza della linea chiusa secondo il verso positivo prefissato .

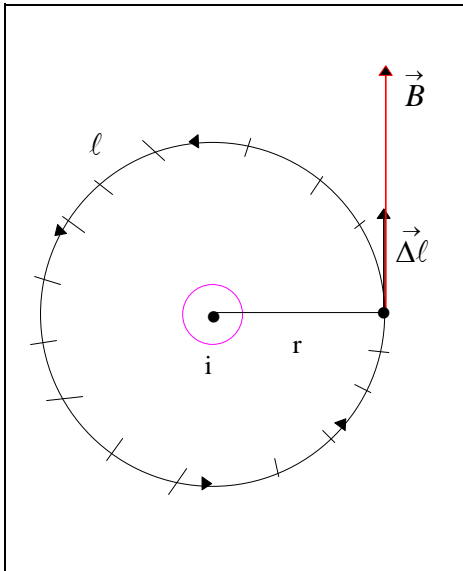
$$C_\ell(\vec{B}) = \vec{B} \times \vec{\Delta l}_1 + \vec{B} \times \vec{\Delta l}_2 + \vec{B} \times \vec{\Delta l}_3 + \dots + \vec{B} \times \vec{\Delta l}_n =$$

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

$$= B \cdot \Delta l_1 + B \cdot \Delta l_2 + B \cdot \Delta l_3 + \dots + B \cdot \Delta l_n = B(\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \dots + \Delta l_n) = 2\pi r B$$

Ma per la legge di **Biot-Savart** abbiamo : $B = \frac{\mu_o \cdot i}{2\pi r}$ per cui possiamo scrivere :

$$C_\ell(\vec{B}) = \frac{\mu_o \cdot i}{2\pi r} \cdot 2\pi r = \mu_o i \quad [§]$$



Il punto centrale indica una corrente i nel filo , diretta dalla pagina del foglio verso l'esterno . L'angolo fra \vec{B} e $\vec{\Delta l}$ è zero ,

sicché $\vec{B} \times \vec{\Delta l} = B \cdot \Delta l$

In questo caso la linea chiusa ℓ coincide con una linea del campo magnetico \vec{B} .

\vec{B} è il campo magnetico generato dalla corrente i .

La [§] è valida in generale per qualsiasi configurazione del campo magnetico , per qualsiasi distribuzione di corrente e per qualsiasi linea chiusa .

Nel caso in cui la linea ℓ si avvolga N volte attorno al circuito percorso dalla corrente i abbiamo :

$$C_\ell(\vec{B}) = \mu_o N i$$

Se il campo magnetico \vec{B} è generato da più circuiti percorsi rispettivamente dalle correnti di intensità i_1, i_2, \dots, i_n allora abbiamo :

$$C_\ell(\vec{B}) = \mu_o (i_1 + i_2 + \dots + i_n) = \sum_{s=1}^n \mu_o i_s = \mu_o i$$

dove i rappresenta la somma algebrica delle correnti concatenate con la linea chiusa ℓ .

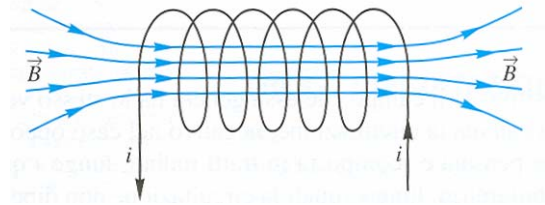
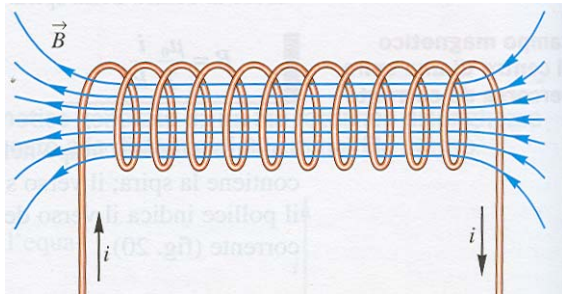
Se la linea chiusa ℓ non è concatenata col circuito in cui passa la corrente i , allora abbiamo :

$$C_\ell(\vec{B}) = 0$$

Il fatto che $C_\ell(\vec{B})$, in generale , è diversa da zero significa che il **campo magnetico non è conservativo** e quindi ad esso non è conveniente associare un **potenziale magnetico** in quanto questi verrebbe ad essere una funzione a più valori (cioè ad uno stesso punto di uno stesso campo magnetico verrebbero a corrispondere almeno due valori diversi del potenziale magnetico) .

Campo magnetico generato da un solenoide percorso da corrente

Si chiama **solenoid** un avvolgimento di filo conduttore a forma elicoidale di **passo** piccolissimo .
(**Passo** di un solenoide è la distanza che intercorre tra due spire consecutive).



Linee del campo magnetico generato da un **solenoid**: il campo magnetico è **uniforme** all'interno del solenoide e **null** all'esterno.

Le spire sono quindi molto vicine e , in prima approssimazione , possiamo considerare il solenoide come formato da un sistema di N spire uguali e coassiali . Ciascuna spira può essere considerata piana . Le spire sono percorse dalla corrente i , sono affiancate in modo da costituire una superficie cilindrica le cui generatrici sono rette tra loro parallele e perpendicolari al piano di ciascuna spira .

Se ,per esempio ,le spire sono circolari ,il solenoide ha la forma di un cilindro circolare ed il suo asse, normale al piano di ciascuna spira, è l' **asse** del solenoide . Sia $n = \frac{N}{\ell}$ il numero di spire riferite alla lunghezza ℓ del solenoide (numero di spire per unità di lunghezza)

In un solenoid *infinito* (nella pratica si considera tale un solenoide che abbia lunghezza ℓ grande rispetto al raggio r di ciascuna spira : $\ell \gg r$) il campo magnetico \vec{B} è **null** all'esterno mentre all'interno è un vettore :

- avente come **verso** quello che si ricava applicando la regola dell'orologio o la regola della mano destra
- come **direzione** l'asse del solenoide

- come **modulo** :

$$B = \mu_o \frac{N}{\ell} i = \mu_o n i \quad [*§]$$

Il campo magnetico \mathbf{B} di un solenoide è direttamente proporzionale al numero totale N delle spire ed all'intensità i della corrente che vi circola ed inversamente proporzionale alla lunghezza ℓ del solenoide .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Il campo magnetico \mathbf{B} di un solenoide è direttamente proporzionale all'intensità i della corrente che vi circola ed al numero n delle spire per unità di lunghezza .

Mediante il solenoide possiamo creare un **campo magnetico uniforme** di valore noto , così come con un condensatore a facce piane e parallele possiamo creare campi elettrici uniformi .

Per dimostrare la formula [*§] basta calcolare la **circuitazione** del vettore \vec{B} lungo il percorso rettangolare $ABCD$ avente come dimensioni $AB = h$, $BC = k$.

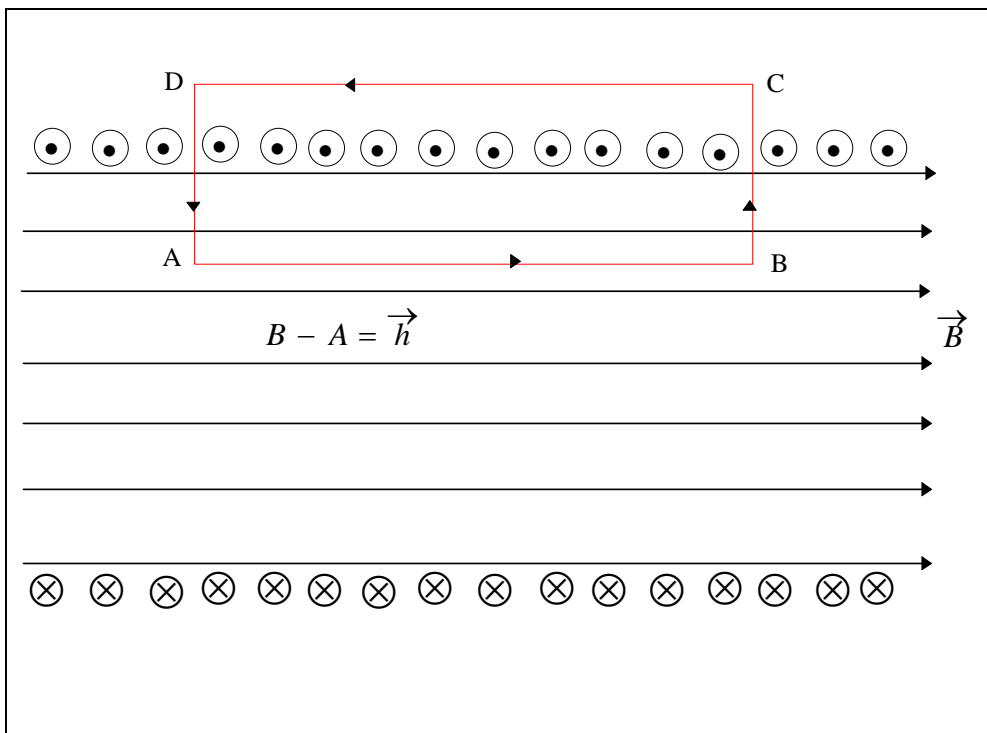
Se teniamo presente che : **1)** lungo il tratto CD è $\vec{B} = \vec{0}$ **2)** lungo i tratti AD e BC il campo \vec{B} è perpendicolare al percorso **3)** lungo il tratto AB il vettore \vec{B} è **parallelo** al percorso , possiamo

scrivere : $C_{ABCD}(\vec{B}) = C_{AB}(\vec{B}) + C_{BC}(\vec{B}) + C_{CD}(\vec{B}) + C_{DA}(\vec{B}) = \vec{B} \times \vec{h} = B \cdot h$

Per $h = \ell$ abbiamo : $C_{ABCD}(\vec{B}) = B \cdot \ell$ Applicando il teorema della circuitazione di Ampere

abbiamo : $C_{ABCD}(\vec{B}) = \mu_0 N i$ e quindi : $B \cdot \ell = \mu_0 N i$

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



□ Un solenoide percorso dalla corrente i genera al suo interno un campo magnetico uniforme

□ calcolo del campo magnetico ottenuto all'interno di un solenoide mediante il teorema della circuitazione di Ampere

Interazione elettrodinamica fra due circuiti rettilinei percorsi da corrente : definizione di ampere

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Due fili rettilinei e paralleli percorsi da corrente interagiscono fra loro esercitando l'uno sull'altro forze uguali ed opposte .

Tali forze sono **attrattive** (repulsive) se le due correnti hanno lo stesso verso (verso opposto) .

Le forze che si esercitano tra i due fili sono di tipo **magnetico**

Nel caso di due fili indefiniti (in pratica molto lunghi rispetto alla loro distanza d) percorsi da correnti elettriche rispettivamente d'intensità i_1 e i_2 , la corrente di ciascun filo agisce , su un tratto lungo ℓ dell'altro filo, con una forza che è direttamente proporzionale al prodotto delle intensità delle due correnti , inversamente proporzionale alla distanza d tra i due fili e dipende dalla natura del mezzo in cui si trovano .

Nel vuoto abbiamo :

$$F = \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{\ell}{d} \quad [A]$$

L'interazione tra fili rettilinei indefiniti percorsi da corrente viene utilizzata per definire l'unità di misura della corrente elettrica nel Sistema Internazionale (**S.I.**) .

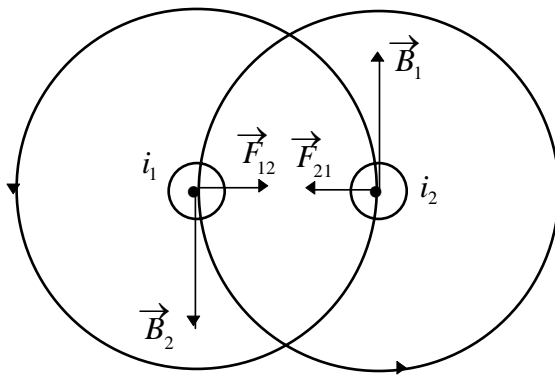
Assegnato alla **permeabilità magnetica nel vuoto** μ_o il valore arbitrario $4\pi \cdot 10^{-7}$ e ponendo nella [A] $i_1 = i_2 = 1 \text{ ampere} = 1A$, $\ell = 1m$, $d = 1m$ abbiamo : $F = 2 \cdot 10^{-7} N$ e quindi è pienamente giustificata la seguente definizione di ampere .

L ' ampere è l'intensità di una corrente costante che , passando in due conduttori paralleli , rettilinei , indefiniti , di sezione trascurabile,posti a distanza di un metro nel vuoto , determina una forza uguale a $2 \cdot 10^{-7}$ newton su ogni metro di filo .

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{newton}}{(\text{ampere})^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{W_b}{A \cdot m} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{henry}}{\text{metro}}$$

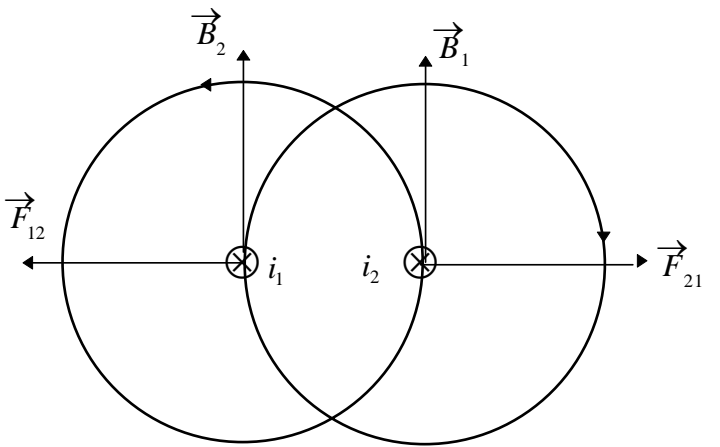
$$[\mu_o] = \left[\frac{F}{i^2} \right] = [F \cdot i^{-2}] = [L \cdot M \cdot T^{-2} \cdot I^{-2}]$$

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico



Convenzione americana :

il simbolo \bullet indica che il filo percorso dalla corrente i è ortogonale al piano del foglio ed il verso della corrente i è uscente , cioè va dal foglio al volto dell'osservatore



Convenzione americana :

il simbolo \otimes indica che il filo percorso dalla corrente i è ortogonale al piano del foglio ed il verso della corrente i è entrante , cioè va dal volto dell'osservatore al piano del foglio

Il vettore eccitazione magnetica \vec{H}

Certe formule dell'elettromagnetismo assumono una forma più semplice se , accanto al vettore campo magnetico \vec{B} , introduciamo un altro vettore \vec{H} detto **vettore eccitazione magnetica** definito nel vuoto, in maniera formale , dalla relazione :

$$\vec{B}_o = \mu_o \vec{H}_o$$

Questo nuovo vettore \vec{H}_o non è necessario per descrivere le proprietà del campo magnetico nel vuoto , il quale è adeguatamente rappresentato dal solo vettore \vec{B}_o .

Dal punto di vista didattico è però utile definire tale vettore già nel vuoto perché , come vedremo in seguito , per rappresentare le proprietà magnetiche nella materia è necessario introdurre due vettori : il vettore campo magnetico \vec{B} ed il vettore eccitazione magnetica \vec{H} i quali godono nella materia delle stesse proprietà di cui godono rispettivamente i vettori \vec{B}_o ed \vec{H}_o nel vuoto .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Nella materia \vec{B} ed \vec{H} sono legati dalla seguente relazione :

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

con $\mu = \mu_0 \mu_r$.

Le formule precedentemente ricavate , espresse mediante \vec{H} , assumono la seguente forma :

$$H_o = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{i}{r} \quad \text{legge di Biot e Savart} \quad d\vec{H}_o = \frac{i}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3} \quad \text{prima legge di Laplace}$$

$$C_\ell(\vec{H}_o) = \Sigma i \quad \text{teorema della circuitazione di Ampere}$$

$H_o = ni$ modulo del vettore eccitazione magnetica all'interno del solenoide

Nel **S.I.** l'unità di misura del vettore eccitazione magnetica è l' **ampere spira al metro** ($\frac{A \cdot sp}{m}$)

definita come il modulo del vettore H_o all'interno di un solenoide vuoto quando questi ha una spira per ogni metro di lunghezza ed è attraversato dalla corrente di un ampere .

OSSERVAZIONE

Fino a poco tempo fa impropriamente si diceva :

$$\vec{B} = \text{vettore induzione magnetica} \quad \vec{H} = \text{intensità del campo magnetico}$$

$\vec{B}_o = \mu_o \vec{H}_o$ relazione valida nel vuoto $\vec{B} = \mu \vec{H}$ relazione valida in un mezzo avente permeabilità magnetica relativa μ_r

Oggi invece diciamo : $\vec{B} = \text{vettore campo magnetico}$ $\vec{H} = \text{vettore eccitazione magnetica}$

Moto di una carica puntiforme q in un campo magnetico uniforme \vec{B}

Vogliamo dimostrare che una carica puntiforme q quando entra in un campo magnetico uniforme con velocità \vec{v} perpendicolare al vettore campo magnetico \vec{B} viene deviata lungo una traiettoria

circolare di raggio $r = \frac{mv}{qB}$ dove m rappresenta la massa della carica q .

Questo significa che la carica puntiforme q si muove su un piano perpendicolare a \vec{B} ed il suo moto è **circolare uniforme** , in quanto l'effetto della **forma magnetica** che agisce su di essa è quello di cambiare la direzione della velocità vettoriale \vec{v} senza cambiarne il modulo v .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Noi sappiamo che una carica q in moto in un campo magnetico \vec{B} subisce l'azione della forza magnetica $\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$. Essendo \vec{f} perpendicolare alla velocità \vec{v} e quindi allo spostamento \vec{s} della carica q (dalla meccanica sappiamo che la velocità vettoriale \vec{v} e lo spostamento \vec{s} hanno sempre la stessa direzione e lo stesso verso) la **forza magnetica** non può compiere lavoro e non può variare l'energia cinetica della carica q .

L'effetto della forza magnetica \vec{f} è quello di cambiare la direzione della velocità vettoriale \vec{v} senza cambiarne il modulo. Questo significa che una carica puntiforme q in moto sotto l'azione di una forza magnetica non può descrivere una traiettoria rettilinea ma una traiettoria curvilinea e se il campo magnetico è **uniforme** il moto è **circolare uniforme** in quanto l'accelerazione scalare (cioè **tangenziale**) è nulla, la **velocità scalare è costante** e l'accelerazione centripeta è diversa da zero e costante.

Consideriamo, dunque, il moto di una carica puntiforme q immersa in un campo magnetico uniforme \vec{B} (cioè avente lo stesso modulo, la stessa direzione e lo stesso verso in tutti i punti dello spazio sede del campo magnetico).

Supponiamo che la velocità \vec{v} della carica puntiforme q , quando questa penetra nella regione sede del campo magnetico, sia perpendicolare a \vec{B} .

In questo caso la carica q avente massa m si muove di moto circolare uniforme in quanto soggetta da una **forza centripeta** che è la forza magnetica:

$$f = q \cdot v \cdot B \cdot \sin 90^\circ = q \cdot v \cdot B$$

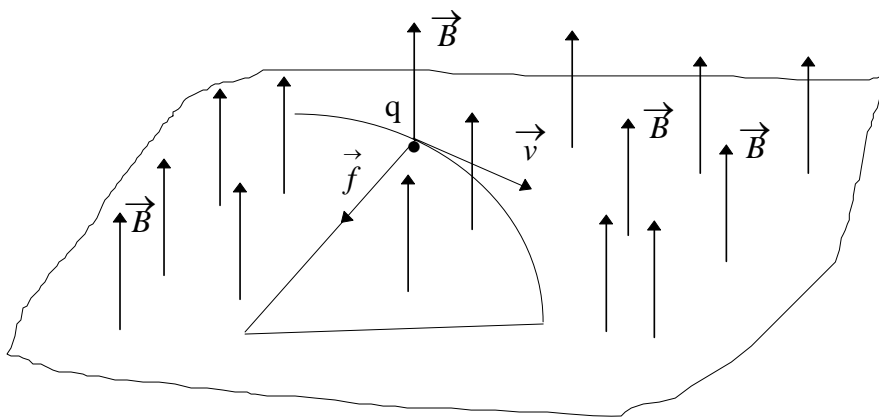
La forza magnetica f fornisce la forza centripeta necessaria per il moto circolare.

Per determinare la traiettoria di una carica q che si muove in un campo magnetico uniforme ortogonale alla sua velocità iniziale basta imporre che la forza magnetica sia uguale al prodotto della massa m della carica q per la sua accelerazione centripeta, cioè basta applicare la legge

fondamentale della dinamica: $f = m \cdot a_c = m \cdot \frac{v^2}{r}$. Ma: $f = q \cdot v \cdot B$ per cui possiamo

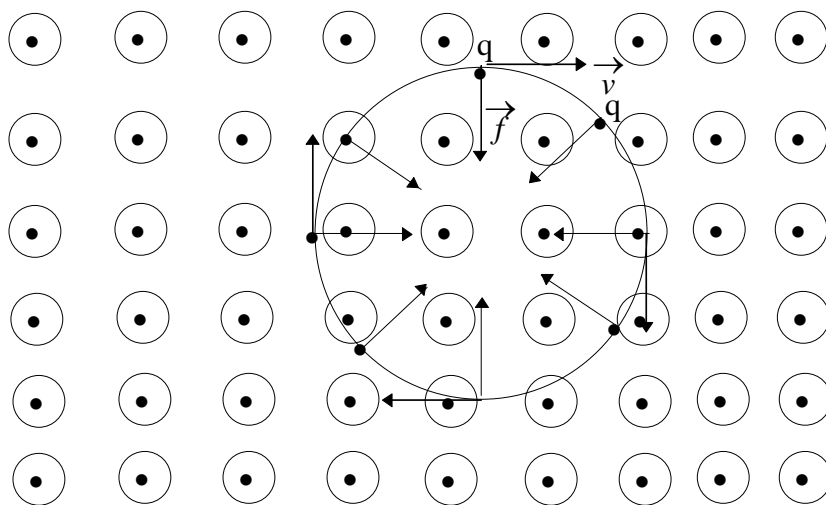
scrivere: $q v B = \frac{m v^2}{r}$

$$r = \frac{m v}{q B}$$



Una carica q in moto perpendicolarmente ad un campo magnetico \vec{B} uniforme descrive una traiettoria circolare con velocità vettoriale \vec{v} avente modulo costante .

● simbolo del campo magnetico perpendicolare al piano del foglio ed uscente da esso



Traiettoria di una carica (positiva) q che si muove parallelamente al piano della pagina in un campo magnetico \vec{B} perpendicolare a tale piano ed uscente da esso . La forza \vec{f} a cui la carica è sottoposta è costante e diretta perpendicolarmente alla velocità \vec{v} . Il moto risultante è **circolare uniforme** .

Se la carica q è l'elettrone la

formula precedente diventa :

$$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B}$$

La **velocità angolare** della carica q vale : $\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$ ed il suo periodo T è : $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2m\pi}{qB}$

Il periodo T di rivoluzione , a parità di massa m e di carica q , è **indipendente dalla velocità della particella** . Fra le particelle uguali , quelle aventi grandi velocità , si muoveranno su circonferenze di grande raggio , ma tutte indistintamente impiegheranno lo stesso tempo T a descrivere una intera circonferenza nel campo magnetico .

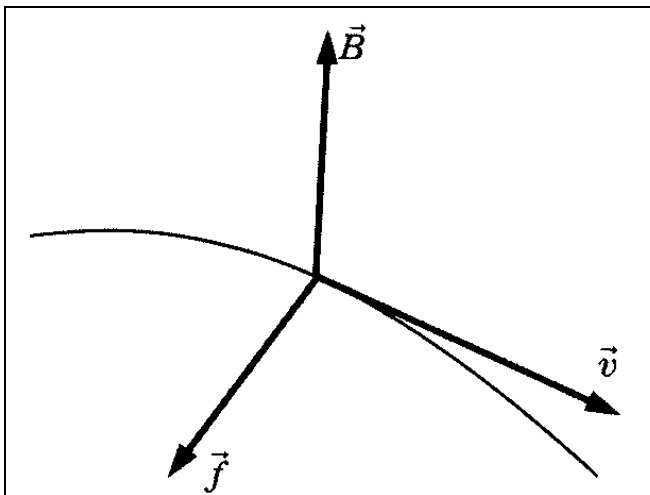


Fig. 3.8 I vettori nella Forza di Lorentz

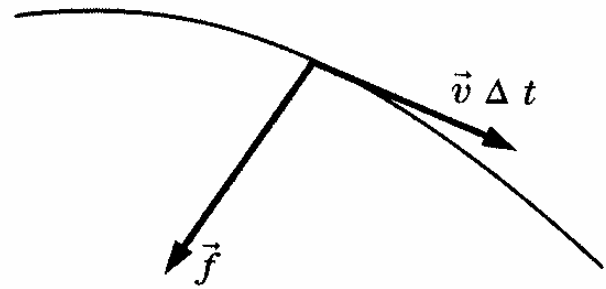
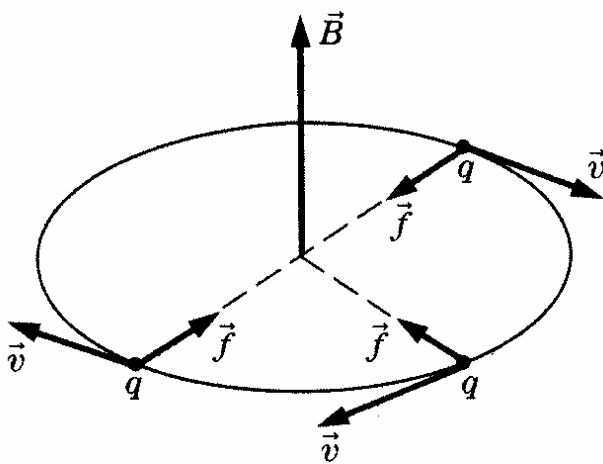
Fig. 3.9 Il lavoro della forza di Lorentz è **nullo**

Fig. 3.10 Carica in un campo costante

La traiettoria di una carica q in un campo magnetico \vec{B} costante è confinata in un piano ortogonale a \vec{B} se la velocità inizialmente è ortogonale a \vec{B}

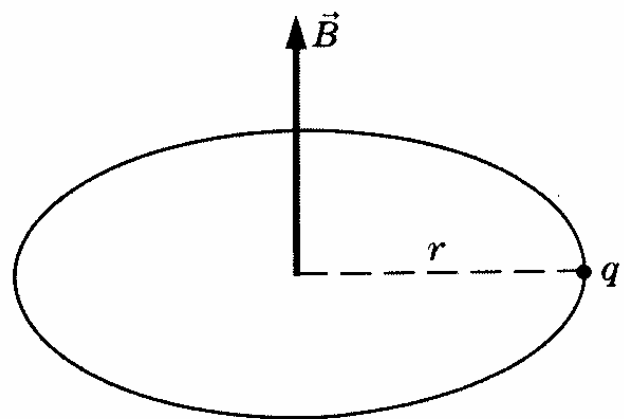


Fig. 3.11 Forza di Lorentz

La traiettoria in un campo magnetico costante è una circonferenza di raggio $r = \frac{mv}{qB}$

Momento magnetico di una spira percorsa da corrente e di una calamita

Poiché le proprietà magnetiche di una spira di area S percorsa dalla corrente i dipendono da i e da S (meglio dal prodotto iS) conviene introdurre una nuova grandezza vettoriale

$\vec{\mathcal{M}}_s$ detta **momento magnetico** della spira caratterizzata :

1) dalla **direzione** normale al piano della spira 2) dal **modulo** $\mu_o iS$ 3) dal **verso** dato dalla regola della mano destra

(Se le dita della mano destra avvolgono la spira nel verso della corrente i , il pollice dà il verso di $\vec{\mathcal{M}}_s$)

$$\vec{\mathcal{M}}_s = \mu_o iS \cdot \vec{n}$$

dove \vec{n} è un **VERSORE** ortogonale al piano della spira ed avente verso deducibile con la regola della mano destra .

Gli **aghi magnetici** sono oggetti per i quali viene spontaneo di ragionare in termini di rotazioni e di coppie piuttosto che di spostamenti e di forze .

Ogni ago magnetico è caratterizzato da una proprietà magnetica intrinseca , cioè una proprietà che esso possiede indipendentemente dall'esistenza di un campo magnetico esterno .

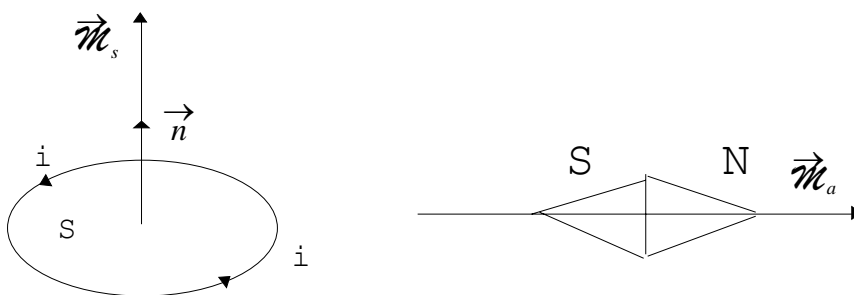
Per questo motivo all'ago magnetico possiamo associare una grandezza vettoriale $\vec{\mathcal{M}}_a$ detta **momento magnetico dell'ago** avente :

1) come **direzione** l'asse dell'ago 2) come **verso** quello che va dal polo Sud al polo Nord

3) come **modulo** un valore che dipende dalle sue dimensioni e dalla sua magnetizzazione

In realtà le proprietà magnetiche che caratterizzano gli aghi magnetici trovano la loro origine nel moto degli elettroni atomici.

Come vedremo in seguito , ad ogni atomo possiamo associare un momento magnetico . La somma vettoriale dei momenti magnetici di tutti gli atomi dell'ago è il momento magnetico $\vec{\mathcal{M}}_a$ dell'ago .



Azione meccanica esercitata da un campo magnetico su una spira percorsa da corrente

Consideriamo una spira percorsa da una corrente i immersa in un campo magnetico \vec{B}_o .

Noi sappiamo che alla spira possiamo associare un **momento magnetico** $\vec{\mathcal{M}}_s = \mu_o i S \cdot \vec{n}$

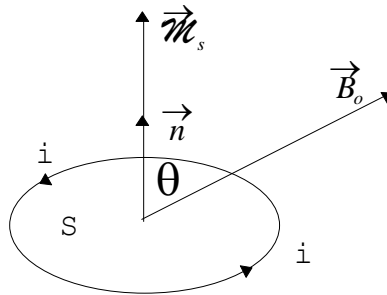
La spira è sottoposta ad una coppia di forze di momento meccanico \vec{M} definito dalla seguente

relazione vettoriale :

$$\vec{M} = \vec{\mathcal{M}}_s \wedge \frac{\vec{B}_o}{\mu_o} = \vec{\mathcal{M}}_s \wedge \vec{H}_o$$

$$M = i S B \sin \vartheta ; M = 0 \Rightarrow \vartheta = 0 \Rightarrow \vec{B}_o \text{ parallelo ed equiverso ad } \vec{\mathcal{M}}_s = \mu_o i S \cdot \vec{n}$$

L'azione meccanica cessa quando il piano della spira risulta perpendicolare al vettore \vec{B}_o ed il verso di \vec{B}_o (che non è generato dalla corrente i) ci viene dato dalla regola della mano destra .

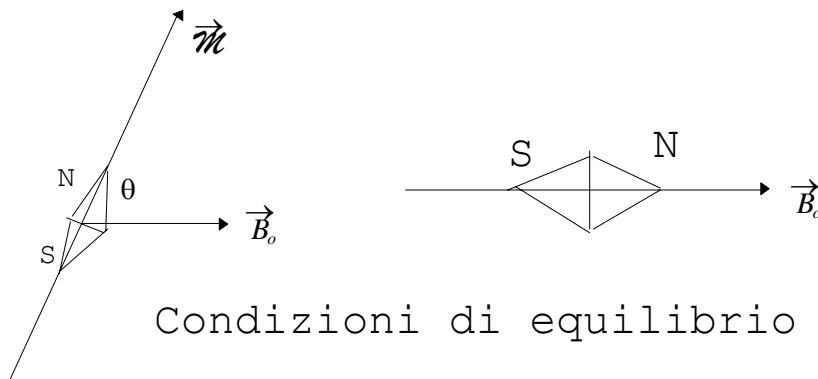


Azione meccanica esercitata da un campo magnetico su un ago magnetico

Un ago magnetico di momento magnetico $\vec{\mathcal{M}}_a$ immerso in un campo magnetico \vec{B}_o uniforme è soggetto ad una coppia di forze di momento meccanico \vec{M} dato dalla seguente relazione vettoriale :

$$\vec{M} = \vec{\mathcal{M}}_a \wedge \frac{\vec{B}_o}{\mu_o} = \vec{\mathcal{M}}_a \wedge \vec{H}_o$$

L'azione meccanica (cioè la rotazione) cessa quando $\vec{\mathcal{M}}_a$ è parallelo ed equiverso con \vec{B}_o .



I teoremi di equivalenza di Ampere

Ampere ha dimostrato l'equivalenza tra una spira percorsa da corrente ed un ago magnetico .

L'equivalenza presenta un duplice aspetto : il primo riguarda le azioni meccaniche che un campo magnetico esterno esercita sulla spira e sull'ago magnetico , il secondo riguarda il campo magnetico prodotto dalla spira e dall'ago magnetico .

Prima parte

Una spira di area S percorsa dalla corrente i ed un ago magnetico di **momento magnetico** $\vec{\mathcal{M}}_a$ immersi nello stesso campo magnetico uniforme \vec{B}_0 subiscono la stessa azione meccanica (che si

traduce in una coppia di forze di momento meccanico $\vec{M}_S = \vec{M}_S \wedge \vec{H}_O$ per la spira ed

$\vec{M}_a = \vec{M}_a \wedge \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \vec{M}_a \wedge \vec{H}_O$ per l'ago magnetico) se vale la relazione : $\vec{\mathcal{M}}_a = \vec{\mathcal{M}}_s$

cioè se : $\mathcal{M}_a = \mu_0 i S$ dove: μ_0 si misura in henry/m , i in ampere , S in m^2 , \mathcal{M}_a in *weber·m*

Seconda parte

L'equivalenza tra ago magnetico e spira percorsa da corrente non si limita alle sole azioni meccaniche che essi subiscono quando sono immersi in un campo magnetico esterno \vec{B}_0 , ma si estende anche ai campi magnetici che essi generano nello spazio circostante .

Si dimostra teoricamente e si verifica sperimentalmente che se un ago magnetico ed una spira percorsa da corrente hanno lo stesso momento magnetico ($\vec{\mathcal{M}}_s = \vec{\mathcal{M}}_a$ cioè se $\mathcal{M}_a = \mu_0 i S$) allora essi generano nello spazio circostante lo stesso campo magnetico se sono collocati nella stessa posizione .

Momento magnetico degli atomi e delle molecole

Consideriamo un atomo di idrogeno . Sia T il tempo impiegato dall'elettrone a percorrere la sua orbita circolare di raggio r .

Si può dire che l'elettrone che si muove nella sua orbita circolare nell'atomo di idrogeno equivale ad un microscopico circuito elettrico nel quale passa una corrente i avente il verso opposto a quello della velocità dell'elettrone , di area pari a quella individuata dall'orbita dell'elettrone e di valore :

$$i = \frac{e}{T} = \frac{e}{2\pi} \cdot \omega_0 \quad \text{con } \omega_0 = v/r \text{ velocità angolare dell'elettrone}$$

Ma noi sappiamo che ad ogni spira percorsa da corrente possiamo associare un momento magnetico $\vec{\mathcal{M}}$. Si può quindi dire che l'atomo di idrogeno , nello stato fondamentale , ha un momento magnetico $\vec{\mathcal{M}}^*$ dovuto al moto dell'elettrone lungo la sua orbita , il cui modulo vale :

$$\mathcal{M}^* = \mu_0 i S = \mu_0 \frac{e}{T} \pi r^2 \quad , \quad \mathcal{M}^* = 9,27 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J} \cdot \text{m}^2}{\text{weber}} \quad , \quad r = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{m} \quad [1]$$

Il momento magnetico dato dalla [1] prende il nome di **Magnetone di Bohr** o **momento magnetico elementare** .

Consideriamo adesso un elettrone di un atomo qualsiasi che ruota su un'orbita circolare di raggio r con velocità angolare ω .

Ad esso possiamo associare un momento magnetico orbitale $\vec{\mathcal{M}}_\ell$ dato da : $\vec{\mathcal{M}}_\ell = \mu_0 i S \cdot \vec{n}$ con \vec{n} versore normale al piano dell'orbita descritta dall'elettrone .

$$i = \frac{e}{T} = e \frac{\omega}{2\pi} = e \frac{v}{2\pi r} \quad , \quad S = \pi r^2 \quad , \quad \vec{\mathcal{M}}_\ell = \mu_0 e \frac{v r}{2} \cdot \vec{n}$$

Secondo la meccanica quantistica , il momento magnetico orbitale $\vec{\mathcal{M}}_\ell$ di un elettrone di un atomo non può assumere valori arbitrari , ma solo multipli interi del magnetone di Bohr \mathcal{M}^* .

In base a considerazioni di carattere quantistico ogni elettrone va considerato come una sfera che ruota attorno al proprio asse .

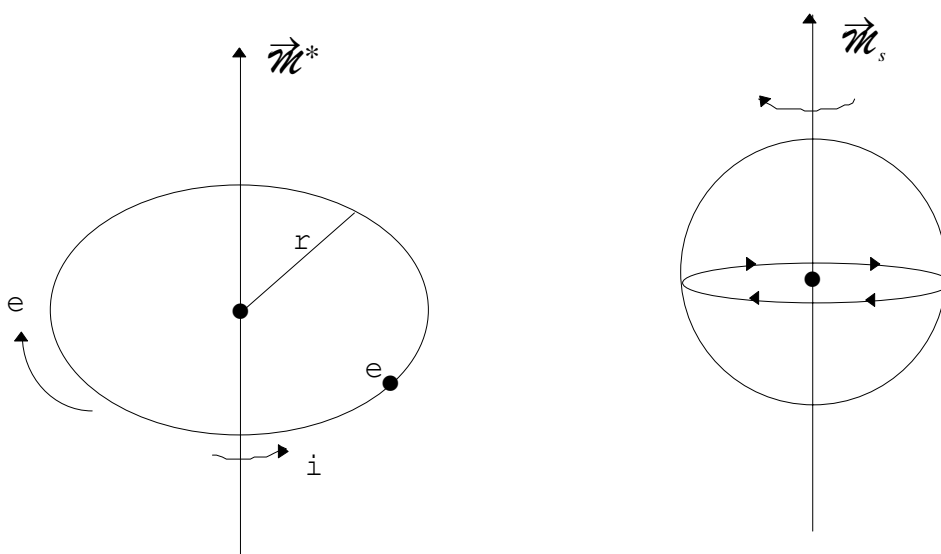
Questa circostanza ci consente , per ragioni non descrivibili nella fisica classica , di associare all'elettrone un momento magnetico di spin detto anche momento magnetico proprio il cui modulo è uguale ad un magnetone di Bohr .

La direzione di $\vec{\mathcal{M}}_s$ coincide con l'asse di rotazione , mentre il suo verso si ottiene applicando la regola della mano sinistra ; il pollice della mano sinistra dà il verso di $\vec{\mathcal{M}}_s$ se le altre dita rappresentano il verso della rotazione .

Il **momento magnetico totale** sarà :

$$\vec{\mathcal{M}} = \vec{\mathcal{M}}_\ell + \vec{\mathcal{M}}_s$$

Il **momento magnetico di un atomo** è la **somma vettoriale dei momenti magnetici di tutti i suoi elettroni** .



Precessione di Larmor

Per potere discutere le proprietà magnetiche della materia è opportuno cominciare stabilendo quali modifiche subisce il moto degli elettroni di un atomo quando questi si trova immerso in un campo magnetico esterno \vec{B}_o .

A tale scopo cominciamo col considerare un atomo di idrogeno immerso in un campo magnetico \vec{B}_o ortogonale al piano dell'orbita circolare dell'elettrone.

In assenza del campo magnetico esterno \vec{B}_o noi sappiamo che l'elettrone si muove sotto l'azione di una forza centripeta di natura elettrostatica con una velocità angolare ω_o .

Quando l'atomo di idrogeno si trova in un campo magnetico esterno \vec{B}_o alla forza coulombiana si aggiunge la forza magnetica $\vec{F}_m = e\vec{v} \wedge \vec{B}_o$ la quale determina sull'elettrone una velocità angolare aggiuntiva ω_L detta **frequenza di Larmor** o frequenza di precessione.

La forza magnetica \vec{F}_m ha un effetto su ω_o che dipende dal verso con cui l'elettrone ruota lungo la sua orbita. Tale forza può provocare sia una diminuzione di ω_o , sia un suo aumento.

Si può dimostrare che, nei due casi, le nuove velocità angolari sono date da:

$$\omega_1 = \omega_o + \omega_L, \quad \omega_2 = \omega_o - \omega_L \quad \text{con : } \omega_L = \frac{e}{2m_e} B_o$$

Così l'effetto prodotto dall'applicazione di un campo magnetico esterno \vec{B}_o è quello di aumentare o diminuire (a seconda che l'elettrone orbita in senso orario o antiorario) la velocità angolare (e quindi anche la velocità lineare).

Questo fatto determina a sua volta un aumento o una diminuzione del momento magnetico orbitale dell'elettrone.

In definitiva la presenza del campo magnetico esterno \vec{B}_o fa sì che al primitivo moto di rivoluzione si sovrapponga un secondo moto rotatorio di precessione intorno alla direzione di \vec{B}_o con velocità angolare ω_L .

Questo moto di precessione dell'elettrone costituisce di fatto una corrente i_L che fluisce in una spira di raggio r con intensità

$$i_L = \frac{-e}{T} = -e \frac{\omega_L}{2\pi}$$

A questa corrente sarà associato un momento magnetico:

$$\mathcal{M}_L = \mu_o i_L S = \mu_o i_L \pi r^2$$

Questo risultato vale in generale e costituisce il TEOREMA DI LARMOR che potremo enunciare così: << Consideriamo un atomo costituito da molti elettroni in movimento immerso in un campo magnetico uniforme \vec{B}_o . Al primitivo moto degli elettroni si sovrappone una rotazione (precessione di Larmor \mathcal{M}_L) con velocità angolare $\omega_L = \frac{e B_o}{2m_e}$ attorno alla direzione di \vec{B}_o

avente il verso dato dalla regola della mano destra >>

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Il **momento magnetico totale** dell'elettrone immerso in un campo magnetico \vec{B}_0 è la somma vettoriale del **momento magnetico orbitale** $\vec{\mathcal{M}}_\ell$ dell'elettrone, del momento **magnetico di spin** $\vec{\mathcal{M}}_s$, e del **momento magnetico di Larmor** $\vec{\mathcal{M}}_L$, cioè: $\vec{\mathcal{M}} = \vec{\mathcal{M}}_\ell + \vec{\mathcal{M}}_s + \vec{\mathcal{M}}_L$

La polarizzazione delle molecole in un campo magnetico esterno

In questo paragrafo ci proponiamo di discutere le modifiche subite da una molecola quando questa viene posta in un campo magnetico esterno \vec{B}_0 . Mostreremo che, grazie alla presenza di tale campo, il componente del momento magnetico della molecola nella direzione del campo \vec{B}_0 è diverso da zero.

Questo fenomeno, che viene indicato col nome di **polarizzazione magnetica delle molecole** è in generale dovuto alla sovrapposizione di due cause distinte, precisamente la precessione di Larmor che subiscono tutte le molecole attorno alla direzione del campo magnetico \vec{B}_0 e l'orientamento nella direzione del campo magnetico che subiscono quelle molecole dotate di un momento magnetico proprio. Cominciamo discutendo l'effetto della **precessione di Larmor** riferendosi, per semplicità di esposizione, ad un atomo di idrogeno col piano dell'orbita ortogonale alla direzione del campo magnetico \vec{B}_0 .

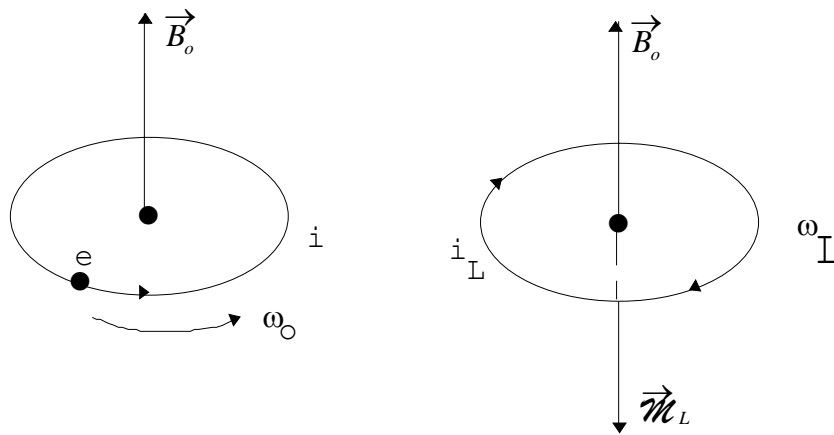
Indichiamo con \vec{B}_0 il campo magnetico agente sull'atomo in esame. Dal punto di vista delle proprietà magnetiche dell'atomo, la **precessione di Larmor** si può descrivere come se lungo l'orbita dell'elettrone circolasse, in verso opposto a quello in cui procede l'elettrone, una corrente di intensità:

$$i_L = \frac{e}{T} = e \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{e^2}{4\pi m} \cdot B_0$$

A tale corrente corrisponde il momento magnetico:

$$\vec{\mathcal{M}}_L = \mu_0 S i_L \cdot \vec{n} = -\frac{\mu_0 e^2 S}{4\pi m} \cdot \vec{B}_0$$

proporzionale a B_0 ed avente la stessa direzione ma verso opposto a \vec{B}_0 .



Potremo però dire , in generale , che quando si pone una sostanza in un campo magnetico esterno \vec{B}_o , le sue molecole si polarizzano magneticamente , ossia acquistano un momento magnetico avente la stessa direzione ma verso opposto a quello del vettore \vec{B}_o .

Il valore assoluto di tale momento magnetico dipende dall'orientamento della molecola rispetto al campo .

Nel caso delle molecole dotate di un momento magnetico proprio , si sovrappone , alla precessione di Larmor , un altro fenomeno che indicheremo come **polarizzazione per orientamento** .

Quando una molecola dotata di momento magnetico proprio \vec{M} viene posta in un campo magnetico $\vec{B}_o = \mu_o \vec{H}$, questo tende a disporlo parallelamente al campo , poiché in tale posizione il momento meccanico della coppia agente su di esso è nullo .

A questa azione orientatrice del campo magnetico esterno si oppone l'agitazione termica che tende a disordinare le molecole in modo che i loro momenti magnetici vengono ad essere uniformemente orientati in tutte le direzioni. In queste condizioni si raggiunge un equilibrio in cui le molecole aventi un momento magnetico \vec{M} parallelo al campo magnetico esterno \vec{B}_o sono un poco di più di quelle aventi direzione opposta . Ne segue che , preso un numero molto grande di molecole , il risultante di tutti i loro momenti magnetici propri $\sum \vec{M}_i$ è un vettore non nullo parallelo al campo

magnetico agente \vec{B}_o . Concludiamo il presente paragrafo osservando che ogni molecola , posta in un campo magnetico esterno $\vec{B}_o = \mu_o \vec{H}$ acquista un momento magnetico avente la direzione di \vec{B}_o . Tale momento magnetico è il risultante di due momenti magnetici parziali : uno dovuto alla **precessione di Larmor** , ha il verso opposto a \vec{B}_o , l'altro , dovuto all '**orientamento del momento magnetico proprio della molecola** , ha lo stesso verso di \vec{B}_o e dipende dal valore di B_o

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

I vettori magnetici \vec{B} , \vec{M} , \vec{H}

Si consideri un solenoide indefinito avente $n = \frac{N}{\ell}$ spire per unità di lunghezza , percorso da una corrente di intensità i .

Il modulo del campo magnetico all'interno del solenoide è dato da:

$$B_o = \mu_o \frac{N}{\ell} i = \mu_o n i$$

Se introduciamo una sostanza all'interno del solenoide , la magnetizzazione della sostanza darà un contributo \vec{B}_m aggiuntivo al campo magnetico \vec{B}_o preesistente . $\vec{B} = \vec{B}_o + \vec{B}_m$

Per semplicità possiamo supporre che la sostanza posta all'interno del solenoide abbia forma cilindrica e sia uniformemente magnetizzata parallelamente all'asse del cilindro .

Questo significa che siano uguali ed ugualmente orientati i momenti magnetici $\vec{\mathcal{M}}$ degli \bar{N} atomi (molecole) del cilindro di sostanza che si trova all'interno del solenoide .

Definiamo **intensità di magnetizzazione** (o **vettore magnetizzazione volumica** o momento magnetico riferito all'unità di volume o semplicemente **vettore MAGNETIZZAZIONE**) il vettore \vec{M} definito dalla seguente relazione vettoriale :

$$\vec{M} = \frac{\bar{N} \cdot \vec{\mathcal{M}}}{\mu_o \cdot V} = \frac{\vec{\mathcal{M}}_{tot}}{\mu_o \cdot V}$$

$\vec{\mathcal{M}}$ è il **momento magnetico di ciascun atomo** (molecola) , $\vec{\mathcal{M}}_{tot}$ è la somma vettoriale dei momenti magnetici di tutti gli atomi (molecole) del cilindro di sostanza avente volume $V = S \cdot \ell$ cioè $\vec{\mathcal{M}}_{tot}$ rappresenta la **magnetizzazione totale** della sostanza introdotta nel solenoide . Se gli atomi (le molecole) non hanno tutte lo stesso momento magnetico $\vec{\mathcal{M}}$ allora il vettore \vec{M} è definito dalla seguente relazione vettoriale :

$$\vec{M} = \frac{\sum_{i=1}^{\bar{N}} \vec{\mathcal{M}}_i}{\mu_o V}$$

Si può dimostrare che il campo magnetico \vec{B}_m dovuto alla magnetizzazione della sostanza introdotta nel solenoide risulta :

$$\vec{B}_m = \mu_o \vec{M}$$

Il campo magnetico totale \vec{B} all'interno del solenoide è la somma vettoriale di questi campi magnetici considerati separatamente .

$$\vec{B} = \vec{B}_o + \mu_o \vec{M}$$

[\vec{M} ha lo **stesso verso** (verso opposto) di \vec{B}_o nel caso di **sostanze paramagnetiche e ferromagnetiche** (diamagnetiche)] .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Conviene separare il campo magnetico \vec{B}_0 dovuto alla corrente \mathbf{i} che circola nel solenoide da quello dovuto alla magnetizzazione della sostanza .

Il vettore **eccitazione magnetica** \vec{H} è , per definizione :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{M}}{\mu_0} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

e quindi :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

Il modulo di \vec{H} all'interno del solenoide è :

$$H = \frac{N}{\ell} i = ni$$

Il vettore \vec{H} è determinato dalla corrente reale , cioè dalla corrente che circola nel solenoide , e non è influenzata dalla magnetizzazione della sostanza .

In questo caso per \vec{H} valgono il teorema della circuitazione di Ampere e la prima legge di Laplace nelle forme :

$$C(\vec{H}) = i \quad d\vec{H} = \frac{i}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3} \quad [A]$$

E' importante rendersi conto che le equazioni [A] differiscono dalle corrispondenti equazioni per il campo magnetico \vec{B} non solo per l'assenza di μ_0 ma anche perché l'intensità di corrente \mathbf{i} è l'intensità della corrente di conduzione macroscopica , mentre nelle equazioni per \vec{B} l'intensità di corrente \mathbf{i} rappresenta l'intensità di qualunque tipo di corrente , compresa la corrente di polarizzazione associata alla magnetizzazione della sostanza .

Nel caso di **sostanze paramagnetiche e diamagnetiche** , l'intensità di magnetizzazione \vec{M} è proporzionale al vettore **eccitazione magnetica** \vec{H} , cioè risulta :

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H}$$

La costante di proporzionalità χ è chiamata **suscettività magnetica** .

Poiché \vec{M} ed \vec{H} hanno le stesse dimensioni , χ è grandezza adimensionata .

$$\vec{M} \propto \vec{H} \Rightarrow \vec{B} \propto \vec{H} \quad \text{Infatti: } \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + \chi \cdot \vec{H}) = \mu_0 (1 + \chi) \cdot \vec{H}$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

con :

$\mu_r = 1 + \chi_r =$ **permeabilità magnetica relativa** al vuoto della sostanza considerata

$\chi = \mu_r - 1 =$ **suscettività magnetica**

$\mu = \mu_0 \mu_r =$ **permeabilità magnetica del mezzo considerato**

Essendo la suscettività magnetica piuttosto piccola , la permeabilità magnetica assoluta per tutte le sostanze paramagnetiche e diamagnetiche è , con ottima approssimazione , uguale alla permeabilità magnetica del vuoto μ_0 .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

L'equazione $\vec{B} = \vec{H}$ è valida anche per le sostanze ferromagnetiche, ma è difficile da interpretare in quanto l'intensità di magnetizzazione \vec{M} non è una funzione lineare di \vec{H} , non è una funzione univoca (cioè ad un solo valore) di \vec{H} .

Per le **sostanze ferromagnetiche** \vec{B} ed \vec{M} sono funzioni a più valori di \vec{H} .
(Vedere **isteresi magnetica**)

OSSERVAZIONE N° 1

A solo scopo di semplicità supponiamo che la materia, di cui vogliamo studiare le proprietà magnetiche, abbia la forma di un cilindro molto lungo sul quale è avvolto il solenoide percorso dalla corrente elettronica \mathbf{i} .

OSSERVAZIONE N° 2

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\mu_r \vec{B}_0}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \vec{H}_0$$

cioè il **vettore eccitazione magnetica** \vec{H} generato da una corrente \mathbf{i} non dipende dal mezzo nel quale è posto il circuito, purché il mezzo sia **omogeneo ed isotropo**.

OSSERVAZIONE N° 3

Per molti atomi gli effetti magnetici degli elettroni, comprendenti sia gli spin che i moti orbitali, si cancellano esattamente. In tal caso ogni atomo non possiede un momento magnetico proprio.

Per altri atomi gli effetti magnetici degli elettroni non si annullano, così che l'atomo in totale ha un momento magnetico \vec{M} .

Sostanze diamagnetiche, paramagnetiche, ferromagnetiche

Avvicinando ad una calamita campioni di materiale diverso, si osserva che è possibile catalogare tutte le sostanze in tre distinte categorie:

- 1) **SOSTANZE DIAMAGNETICHE** come il bismuto (Bi), il rame (Cu), l'acqua (H₂O), l'argento (Ag) che vengono debolmente respinte
- 2) **SOSTANZE PARAMAGNETICHE** come l'alluminio (Al), il sodio (Na), il platino (Pt), l'aria, l'ossigeno liquido che vengono debolmente attratte.
- 3) **SOSTANZE FERROMAGNETICHE** come il ferro (Fe), il cobalto (Co), il nichel (Ni), il gadolinio (Gd), il disprosio (Dy) ed un gran numero di leghe di questi elementi che sono **fortemente attratte**.

Vi è inoltre una differenza essenziale tra il comportamento delle sostanze ferromagnetiche e le altre: per le sostanze ferromagnetiche la forza è proporzionale a B, per le sostanze diamagnetiche e paramagnetiche la forza è proporzionale al quadrato di B.

SOSTANZE DIAMAGNETICHE

Sono caratterizzate dalla costanza della permeabilità magnetica μ_r e da $\mu_r < 1$, $\chi > 0$.

In queste sostanze le **correnti di polarizzazione** circolano in verso opposto a quelle che generano il campo magnetico . In assenza di campo magnetico esterno \vec{B}_o , gli atomi (molecole) di una sostanza diamagnetica non hanno un momento magnetico proprio .

L'azione del campo magnetico \vec{B}_o produce una modificazione delle rotazioni elettroniche (**precessione di Larmor**) equivalente ad una corrente indotta che è la causa della comparsa di un momento magnetico atomico (molecolare) non nullo .

Il momento magnetico così prodotto risulta proporzionale al modulo del vettore \vec{B}_o che lo ha causato , ad esso parallelo ma diretto in verso opposto a \vec{B}_o .

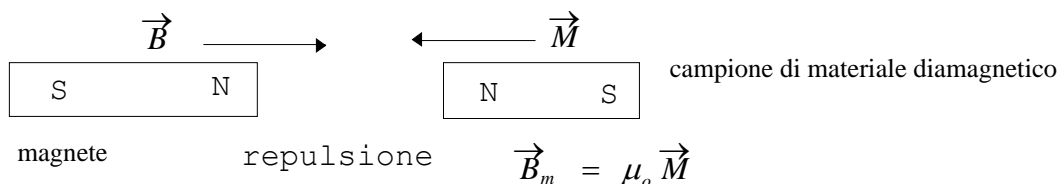
Questo significa che il vettore \vec{M} , intensità di magnetizzazione , ha la stessa direzione di \vec{B}_o , ma verso opposto .

Si potrebbe pensare che tutte le sostanze siano diamagnetiche . In effetti è così , ma l'intensità della magnetizzazione , dovuta alla precessione di Larmor , è così piccola che viene osservata solo in quelle sostanze le cui molecole non possiedono un momento magnetico proprio .

Anche le sostanze le cui molecole sono dotate di un momento magnetico proprio subiscono la precessione di Larmor , ma tale fenomeno rimane in questi casi completamente mascherato dalla **polarizzazione magnetica per orientamento** che dà luogo ad un momento magnetico molecolare medio avente la stessa direzione e lo stesso verso di \vec{B}_o .

Ora possiamo renderci conto del motivo per cui un campione di materiale diamagnetico è respinto quando viene avvicinato al polo di un magnete . Se si tratta di un **polo Nord** , vicino ad esso esiste un campo magnetico \vec{B}_o avente verso uscente dal polo .

Se ad esso si avvicina una sostanza diamagnetica (ad esempio bismuto) la magnetizzazione \vec{M} che viene indotta in essa sarà diretta verso il polo Nord N , cioè avrà verso opposto a quello di \vec{B}_o .



SOSTANZE PARAMAGNETICHE

Sono caratterizzate dalla **costanza della permeabilità magnetica** μ_r e da $\mu_r > 1$, $\chi > 0$.

In queste sostanze le correnti di polarizzazione circolano nello stesso verso delle correnti che generano il campo magnetico .

Gli atomi (o le molecole) delle sostanze paramagnetiche possiedono un **momento magnetico proprio** .

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

In assenza di un campo magnetico esterno \vec{B}_o la sostanza non presenta un **momento magnetico proprio** in quanto, a causa dell'agitazione termica, i singoli momenti magnetici sono orientati a caso e quindi è nulla la somma vettoriale dei momenti magnetici di tutti gli atomi.

L'azione del campo magnetico esterno \vec{B}_o si traduce in un orientamento dei momenti magnetici \vec{M} dei singoli atomi.

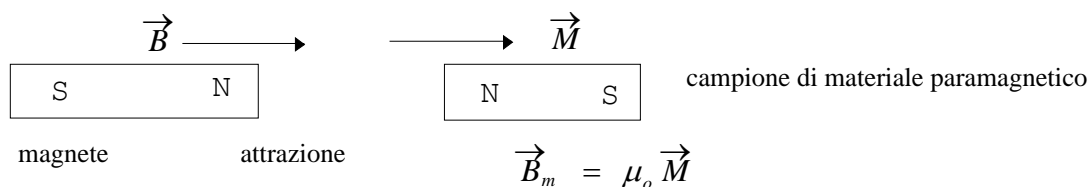
La sostanza acquista un **momento magnetico complessivo** avente la stessa direzione e lo stesso verso di \vec{B}_o .

Questo significa che i vettori \vec{B}_o e \vec{M} hanno la stessa direzione e lo stesso verso.

Tuttavia il processo di allineamento è fortemente disturbato dagli urti fra gli atomi se l'insieme considerato è un aeriforme, e dalle vibrazioni termiche se l'insieme considerato è un solido.

In queste sostanze la **polarizzazione dovuta alla precessione di Larmor è trascurabile rispetto alla polarizzazione per orientamento**.

Si spiega così l'attrazione delle sostanze paramagnetiche rispetto ad una calamita.



SOSTANZE FERROMAGNETICHE

In queste sostanze μ_r non è costante ma varia al variare della corrente i che attraversa il solenoide e che genera il campo magnetico \vec{B}_o .

Anche per le **sostanze ferromagnetiche** valgono delle relazioni formalmente uguali a quelle delle sostanze **paramagnetiche** e **diamagnetiche**, cioè: $\vec{M} = \chi \vec{H}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$, però in questo caso χ e μ non sono più delle costanti ma delle funzioni (a più valori) di \vec{H} .

ISTERESI MAGNETICA

L' **isteresi magnetica** è il fenomeno presentato dalle sostanze ferromagnetiche caratterizzate dall'aver la permeabilità magnetica variabile.

Il fenomeno consiste in un ritardo nella magnetizzazione e nella smagnetizzazione della sostanza ferromagnetica.

Circondando la sostanza ferromagnetica con un solenoide percorso dalla corrente elettrica di intensità i , si nota che μ_r varia al variare di i .

La forma del **ciclo di isteresi magnetica** dipende, oltre che dalla natura chimica del materiale, dalla sua temperatura e dai processi di magnetizzazione e smagnetizzazione.

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Si chiama **curva di magnetizzazione** una delle curve aventi equazione $B = f(H)$ oppure $M = f(H)$ relative ad un dato campione.

La più importante è la curva $M = f(H)$. Poiché risulta $H = ni$, le curve precedenti possono benissimo essere sostituite dalle curve aventi rispettivamente equazioni $B = f(i)$, $M = f(i)$ dove i è la corrente che circola nel solenoide, \vec{B} è il campo magnetico all'interno del solenoide riempito da una sostanza ferromagnetica, \vec{M} è l'intensità di magnetizzazione della sostanza ferromagnetica.

Partendo da un campione non magnetizzato la curva OP è detta **curva di prima magnetizzazione**. $M(B)$ cresce rapidamente al crescere di H (i) fino a raggiungere un valore di saturazione M_s (B_s).

Se, dopo avere ottenuto una curva di prima magnetizzazione OP, si fa diminuire progressivamente H (la corrente i) fino al valore zero, rimane nella sostanza una **magnetizzazione residua** M_r (B_r), che si può eliminare solo ponendo la sostanza ferromagnetica in un campo (corrente) avente verso opposto a quello che ha prodotto la magnetizzazione.

Il valore assoluto H_C del campo che ha prodotto la smagnetizzazione rappresenta quello che si chiama **campo coercitivo**.

Se H continua ad aumentare, con verso opposto, allora M ha segno opposto e si otterrà quello che viene detto **ciclo di isteresi magnetica**.

Per la sua importanza pratica, si considera, di solito, un ciclo di isteresi magnetica descritto fra due valori uguali ed opposti del vettore **eccitazione magnetica**, $-H_m$ e $+H_m$.

Tale ciclo ha una forma simmetrica rispetto all'origine. In generale si osserva che il valore di B non è funzione ad un solo valore di i , cioè la **permeabilità magnetica non è costante**, ma varia con i e per ogni valore di i non è univocamente determinata.

Essa dipende dalle precedenti condizioni di magnetizzazione alle quali il campione è stato sottoposto.

Ricordiamo infine che i processi interni collegati alla magnetizzazione ed alla smagnetizzazione comportano sempre un lavoro contro resistenze passive e quindi determinano uno sviluppo di calore.

L'area del ciclo di isteresi risulta proporzionale all'energia dissipata nell'unità di volume del materiale ferromagnetico per effetto dell'isteresi.

$\mu_0 =$ **permeabilità magnetica del vuoto**

$\mu_r =$ **permeabilità magnetica relativa al mezzo considerato**

$\chi = \mu_r - 1 =$ **suscettività magnetica**

χ si legge : << chi >>

Se in ascissa riportiamo i valori di H ed in ordinata i valori di B , per le sostanze diamagnetiche e paramagnetiche la curva di equazione $B = \mu H$ è una retta passante per l'origine, per le sostanze ferromagnetiche è una curva a più valori piuttosto complessa.

Unità Didattica N° 27 : Il campo magnetico

Nelle **sostanze ferromagnetiche** esistono delle regioni (dette **domini di Weiss**) piccolissime rispetto agli oggetti macroscopici ma sufficientemente grandi da contenere un numero enorme di atomi e molecole (almeno $\sim 10^{15}$).

I momenti magnetici degli atomi che si trovano in ogni dominio hanno lo stesso orientamento per cui ogni **dominio di Weiss** possiede un proprio momento magnetico anche in assenza di un campo magnetico esterno \vec{B}_o .

Tuttavia una **sostanza ferromagnetica** non presenta magnetizzazione in quanto la somma vettoriale di tutti i momenti magnetici dei singoli domini di Weiss (a causa del loro diverso orientamento) è nulla .

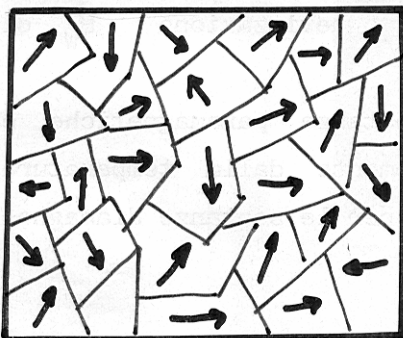
Il processo di magnetizzazione consiste nel portare l'intensità di magnetizzazione \vec{M} relativa a tutti i domini di Weiss (o almeno a molti di essi) nella stessa direzione e nello stesso verso del campo magnetico esterno \vec{B}_o , mentre non viene sensibilmente modificato il modulo dell'intensità di magnetizzazione \vec{M}_w di ogni singolo dominio .

La magnetizzazione delle sostanze paramagnetiche e ferromagnetiche dipende fortemente dalla temperatura T , al contrario di quanto accade per le sostanze diamagnetiche .

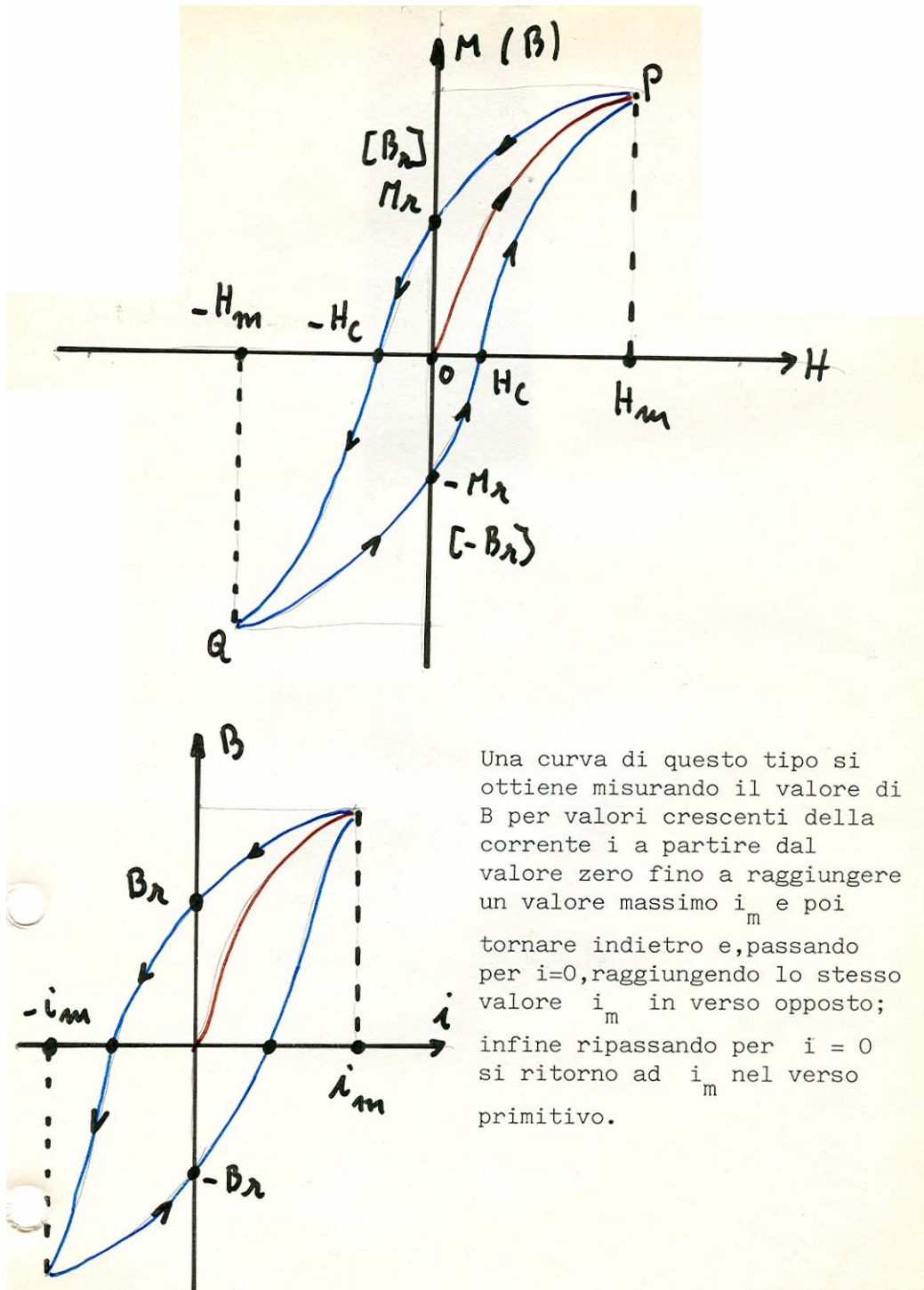
Aumentando la temperatura nelle sostanze ferromagnetiche si può raggiungere un valore della temperatura (detto **punto o temperatura di Curie** caratteristico di ogni sostanza) per cui la sostanza cambia il suo comportamento da quello tipico di una **sostanza ferromagnetica** a quello di una **sostanza paramagnetica** . In tal caso non si ha più magnetismo residuo nè **ciclo di isteresi** . Nelle sostanze ferromagnetiche ha luogo una speciale forma di interazione , chiamata **accoppiamento di scambio** , che consiste nell'accoppiamento dei momenti magnetici degli atomi adiacenti in un rigido parallelismo . L'accoppiamento di scambio , che è un effetto puramente quantistico , non può essere spiegato con i concetti della fisica classica .

Se si innalza la temperatura al di sopra di un valore critico , chiamato **temperatura di Curie** , l'accoppiamento di scambio cessa improvvisamente e i materiali diventano **paramagnetici** .

Per il ferro la temperatura di Curie è $1403 \text{ }^\circ\text{K}$. *Il ferromagnetismo è una proprietà non solo degli atomi ma anche dell'interazione di ciascun atomo con i suoi vicini nel reticolo cristallino del solido.*



I diversi domini magnetici in un materiale ferromagnetico non magnetizzato, sono orientati in modo che producano un effetto esterno trascurabile



Elettrocalamita o elettromagnete

Gli **elettromagneti** (o elettrocalamite) sono strumenti che servono a realizzare nell'aria intensi campi magnetici , oppure hanno il compito di produrre lo spostamento di armature (**ancore**) o di portare dei pesi .

Si basano sul fatto che i campi magnetici prodotti da solenoidi attraversati da corrente possono essere resi assai più intensi avvolgendo i solenoidi attorno a nuclei di materiale ferromagnetico .

Infatti il passaggio della corrente determina la magnetizzazione di tale nucleo e , quindi , un notevolissimo rafforzamento del campo di induzione magnetica prodotto .

Generalmente il nucleo di una elettrocalamita (o elettromagnete) è costituito da una sbarra di ferro dolce opportunamente sagomata . Si può costruire un'elettrocalamita (rettilinea) avvolgendo su un cilindro di ferro dolce (**nucleo dell'elettrocalamita**) un solenoide . Inviando una corrente nel solenoide si crea un campo magnetico ed il nucleo si magnetizza per orientamento .

L'intensità di magnetizzazione che così si ottiene , se la corrente è sufficientemente intensa , può essere di gran lunga superiore a quella dei magneti naturali . Si ha così nelle vicinanze dell'elettrocalamita un campo magnetico molto intenso . Interrompendo la corrente che circola nel solenoide il nucleo di ferro si smagnetizza quasi completamente per cui il campo magnetica praticamente scompare .

