Centro Studi Colombo

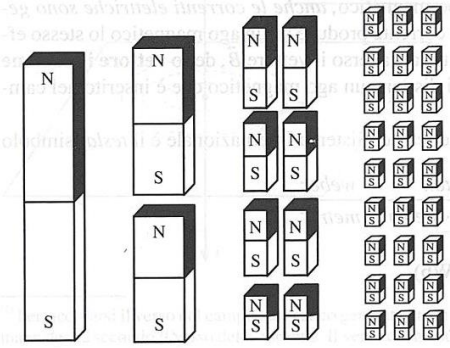
# *Magnetismo*

# 9 MAGNETISMO

## 9.1 Magnete

Alcune sostanze naturali, come ad esempio un materiale ferroso detto magnetite, hanno la proprietà di attirare pezzetti di ferro e per questo vengono dette sostanze magnetiche naturali. Se si avvicinano fra loro due o più magneti, si possono osservare effetti di tipo attrattivo o repulsivo. Ogni **magnete** possiede due polarità dette Nord e Sud, ed i poli con lo stesso nome si respingono, mentre quelli di diverso nome si attraggono, così come avviene per le cariche elettriche in considerazione del segno della carica.

Bisogna notare che se una barretta magnetica viene spezzata in due parti, ognuna di queste parti è un magnete che presenta in sé i due **poli magnetici** (Figura 9.1). Al contrario di quanto avviene con le cariche elettriche, i poli magnetici non possono essere isolati. *Non esistono i mono-poli magnetici isolati*. La magnetizzazione è dovuta all'orientamento dei dipoli magnetici degli elettroni che orbitano attorno ai nuclei degli atomi. Nei materiali ferromagnetici si definiscono piccoli volumi, detti domini, che si comportano come piccoli magneti e all'interno dei quali i dipoli si presentano allineati. Se il materiale ferroso non è magnetizzato i domini sono orientati in modo casuale e quindi si annullano l'un l'altro, mentre in un magnete i domini sono allineati e quindi si sommano e creano un campo magnetico. Se il ferro non magnetizzato si trova in vicinanza di un magnete i suoi domini tendono ad orientarsi con il campo magnetico prodotto dal magnete. In questo modo il ferro si magnetizza e rimane magnetizzato anche quando viene rimosso il campo magnetico esterno. In base al diverso comportamento rispetto alle azioni magnetiche si distinguono le sostanze diamagnetiche, paramagnetiche e ferromagnetiche (vedi Paragrafo 9.7).

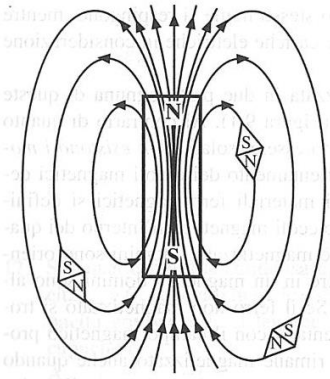



❒ ***Figura 9.1*** *I poli magnetici non possono essere isolati.*

## 9.2 Campo magnetico

Si dice che un magnete produce intorno a sé un **campo magnetico** che interagisce con i campi magnetici prodotti da altri magneti. Ad esempio, l'ago di una bussola (sottile magnete sospeso al suo baricentro in modo che possa ruotare sul piano orizzontale) si orienta nella direzione Nord-Sud geografica e l'estremo che punta verso il polo Nord geografico della Terra è detto polo Nord del magnete. Il magnetismo della Terra però può essere trascurabile in presenza di magneti posti nelle vicinanze dell'ago magnetico.

Se si pone un ago magnetico, libero di ruotare attorno al suo baricentro, in un punto di un campo magnetico, si osserva che esso si orienta in una direzione ben precisa. Si può quindi definire come direzione e verso del campo magnetico, nel punto considerato, quelli della retta orientata che va dal polo Sud al polo Nord dell'ago magnetico. L'ago magnetico può così essere usato per la costruzione delle linee di forza del campo magnetico (Fig. 9.2). *A differenza delle linee di forza del campo elettrico* (vedi §8.9), *quelle del campo magnetico sono sempre linee chiuse. Questo comporta che il campo magnetico non è mai conservativo.*




❒ ***Figura 9.2*** *Le linee di forza di un campo magnetico sono sempre linee chiuse.*

## 9.3 CAMPI MAGNETICI GENERATI DA CORRENTI ELETTRICHE

Non sono soltanto i magneti a generare un campo magnetico, *anche le correnti elettriche sono generatrici di campi magnetici*. Un filo percorso da corrente produce su un ago magnetico lo stesso effetto di un magnete. Il campo magnetico è descritto attraverso il vettore $\vec{B}$, detto **vettore induzione magnetica**. $\vec{B}$ è orientato nella direzione in cui si dispone un ago magnetico che è inserito nel campo e diretto dal polo Sud al polo Nord dell'ago.

L'unità di misura del vettore induzione magnetica nel Sistema Internazionale è il *tesla* (simbolo T):

$$tesla = \frac{newton}{ampere \cdot metro} = \frac{weber}{metro^2}$$

Avendo definito *weber* = *volt secondo* (simbolo Wb).

Le sue dimensioni sono: $[B] = [M \cdot i^{-1} \cdot T^{-2}]$.

Le proprietà del campo magnetico prodotto da una corrente elettrica (modulo, direzione e verso del vettore induzione magnetica) dipendono dall'intensità di corrente che circola nel circuito e dalla geometria del circuito stesso. Di seguito sono discussi tre casi semplici in cui è possibile ricavare le proprietà del campo magnetico generato da correnti elettriche.

**Esempio**

Un filo rettilineo percorso da corrente genera un campo magnetico le cui linee di forza sono delle circonferenze concentriche al filo (Fig. 9.3). Il vettore induzione magnetica $\vec{B}$ è tangente a queste circonferenze ed il suo verso dipende dal verso in cui circola la corrente elettrica [1].

Il modulo di $\vec{B}$ nel vuoto è dato dalla **legge di Biot e Savart**:

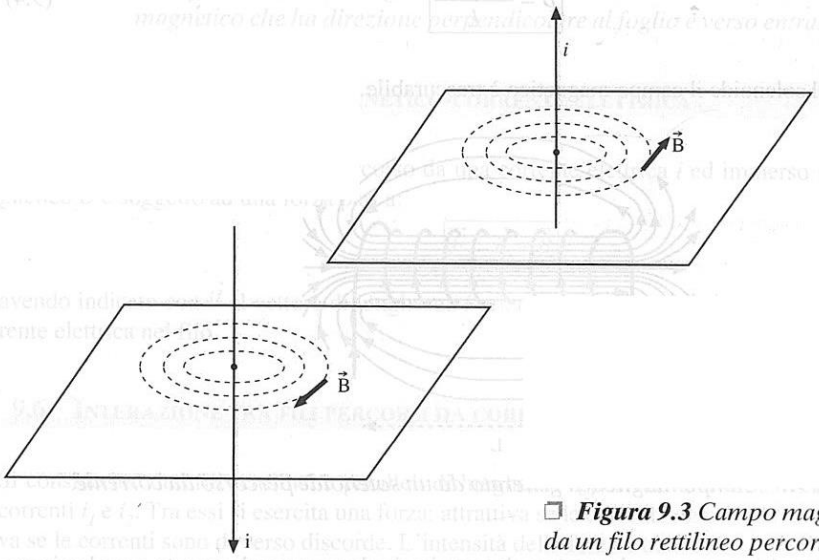
$$\boxed{B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}} \qquad (9.1)$$

dove $i$ è l'intensità di corrente che circola nel filo ed $r$ è la distanza dal filo stesso. $\mu_0$ è la **permeabilità magnetica** del vuoto. Il valore di $\mu_0$ è pari a $4\pi \cdot 10^{-7}$ e le sue unità di misura sono: $\frac{newton}{ampere^2}$. Le sue dimensioni: $[\mu_0] = [M \cdot L \cdot T^{-2} \cdot i^{-2}]$.

Se il filo non è posto nel vuoto ma immerso in un mezzo, l'espressione del modulo del vettore induzione magnetica diventa:

$$\boxed{B = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}} \qquad (9.2)$$

dove $\mu$ è la permeabilità magnetica del mezzo, che può essere scritta come: $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, essendo $\mu_r$ la permeabilità magnetica relativa del mezzo rispetto al vuoto.




❒ ***Figura 9.3*** *Campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso da corrente.*

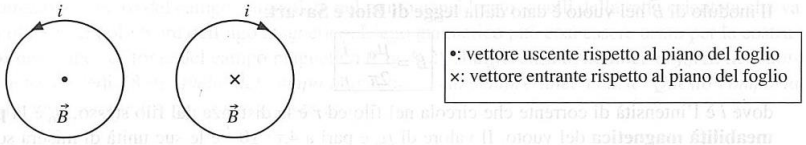
[1] Per ricordarsi il verso del campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso da corrente, disporre il pollice della mano destra secondo il verso della corrente. Il verso di chiusura della mano rappresenta il verso del campo magnetico.

**Esempio**

Una spira circolare di raggio $R$ percorsa da una corrente continua $i$ genera un campo magnetico (Fig. 9.4), il cui vettore induzione magnetica $\vec{B}$ sull'asse della spira è ortogonale alla spira stessa ed il suo verso dipende dal verso in cui circola la corrente elettrica [2].

Il modulo di $\vec{B}$ nel centro della spira è pari a:

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2R}} \tag{9.3}$$



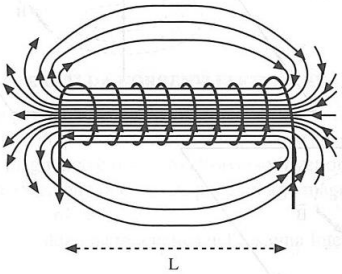

❒ ***Figura 9.4*** *Campo magnetico generato da una spira circolare percorsa da corrente: il verso del campo magnetico dipende dal verso di percorrenza della corrente.*

**Esempio**

Un solenoide di lunghezza $L$, costituito da un insieme di $n$ spire percorse da una corrente continua $i$, *genera al suo interno un campo magnetico uniforme* (Fig. 9.5). Il modulo di $\vec{B}$ all'interno del solenoide è pari a:

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot i}{L}} \tag{9.4}$$

All'esterno del solenoide il campo magnetico è trascurabile.




❒ ***Figura 9.5*** *Campo magnetico generato da un solenoide percorso da corrente.*

[2] Per ricordarsi il verso del campo magnetico generato da una spira circolare percorsa da corrente, procedere in maniera simmetrica a quanto visto per il campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso da corrente: chiudendo la mano destra secondo il verso della corrente della spira, il pollice risulta orientato come il campo magnetico generato dalla spira stessa.

## 9.4 Forza di Lorentz

La **forza di Lorentz** è la forza a cui è soggetta una carica elettrica $q$ in moto in un campo magnetico. Detta $\vec{v}$ la velocità della carica e $\vec{B}$ il vettore induzione magnetica, la forza di Lorentz è data dalla relazione:

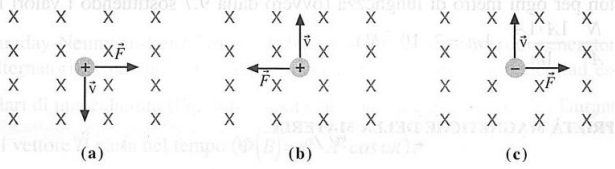
$$\boxed{\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}} \tag{9.5}$$

dove $\wedge$ indica il prodotto vettoriale.

Il vettore $\vec{F}$ è quindi diretto perpendicolarmente al piano individuato dai due vettori $\vec{v}$ e $\vec{B}$. La forza di Lorentz è nulla se la carica elettrica si muove lungo la direzione del campo magnetico, è invece massima se la carica si muove perpendicolarmente a $\vec{B}$.

*Essendo $\vec{F}$ perpendicolare a $\vec{v}$ e quindi anche allo spostamento, il lavoro compiuto dalla forza di Lorentz è sempre nullo.*

In Figura 9.6 è rappresentata la forza di Lorentz agente sulla carica $q$ che si muove in un campo $\vec{B}$ perpendicolare al piano del foglio e con verso entrante nel foglio.




❒ ***Figura 9.6*** *Carica elettrica in moto in un campo magnetico: la forza di Lorentz* $\vec{F}$ *per una carica positiva (a, b) o negativa (c) che si muove con una velocità* $\vec{v}$ *in un campo magnetico che ha direzione perpendicolare al foglio e verso entrante.*

## 9.5 INTERAZIONE CAMPO MAGNETICO-CORRENTE ELETTRICA

Un filo rettilineo di lunghezza $l$ percorso da una corrente elettrica $i$ ed immerso in un campo magnetico $\vec{B}$ è soggetto ad una forza pari a:

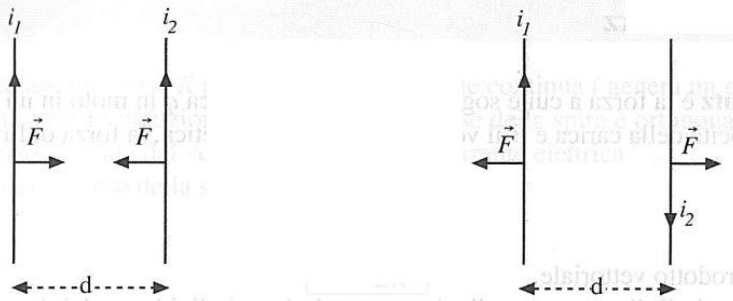
$$\boxed{\vec{F} = i\vec{l} \wedge \vec{B}} \tag{9.6}$$

avendo indicato con $i\vec{l}$ il vettore di lunghezza $l$ orientato secondo il verso di percorrenza della corrente elettrica nel filo.

## 9.6 INTERAZIONE TRA FILI PERCORSI DA CORRENTE

Si considerino due fili rettilinei e paralleli di lunghezza $l$, posti ad una distanza $d$ e percorsi dalle correnti $i_1$ e $i_2$. Tra essi si esercita una forza: attrattiva se le correnti sono di verso concorde, repulsiva se le correnti sono di verso discorde. L'intensità della forza è data da:

$$\boxed{F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 i_2}{d} \cdot l} \tag{9.7}$$




❒ ***Figura 9.7*** *Forza di interazione tra fili percorsi da corrente.*

La relazione della **forza tra due fili percorsi da corrente** consente di definire l'ampere che è l'unità di misura nel Sistema Internazionale della grandezza fondamentale intensità di corrente. Un ampere è l'intensità di corrente che, percorrendo due conduttori paralleli filiformi, di lunghezza infinita, posti alla distanza di 1 metro l'uno dall'altro, nel vuoto, produce fra di essi una forza di $2 \cdot 10^{-7}$ newton per ogni metro di lunghezza (ovvero dalla 9.7 sostituendo i valori indicati si ha: $F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{N}{A^2} \cdot \frac{1A \cdot 1A}{1m} \cdot 1m = 2 \cdot 10^{-7} N$).

## 9.7 PROPRIETÀ MAGNETICHE DELLA MATERIA

Il campo magnetico in presenza di un mezzo varia in maniera differente a seconda delle proprietà magnetiche del mezzo. Si possono classificare le sostanze in tre diverse categorie:

- **sostanze diamagnetiche:** sono le sostanze che provocano una lieve diminuzione del campo magnetico. Hanno $\mu_r$ costante e poco inferiore a 1 e gli atomi che compongono tali sostanze non possiedono un campo magnetico proprio;
- **sostanze paramagnetiche:** sono le sostanze che provocano un lieve aumento del campo magnetico. Hanno $\mu_r$ poco maggiore di 1 e gli atomi che compongono tali sostanze possiedono un campo magnetico proprio;
- **sostanze ferromagnetiche:** sono le sostanze che provocano un forte aumento del campo magnetico. Hanno $\mu_r$ molto maggiore di 1.

## 9.8 ELETTROMAGNETISMO

Elettricità e magnetismo sono fenomeni distinti l'uno dall'altro solo in caso di regimi stazionari, ossia quando tutte le grandezze elettriche e magnetiche non variano nel tempo. In caso di fenomeni variabili nel tempo, campo elettrico e magnetico non possono essere più studiati separatamente e si parla quindi di **elettromagnetismo** (vedi anche §10.12). Le leggi che governano l'elettromagnetismo sono le quattro **equazioni di Maxwell**.

Un fenomeno che mostra il legame tra campo elettrico e magnetico è l'**induzione elettromagnetica**: se varia il flusso del vettore induzione magnetica concatenato ad una spira chiusa, si ha induzione di corrente elettrica nel circuito. La forza elettromotrice indotta, responsabile della corrente, è data dalla **legge di Faraday-Neumann-Lenz**:

$$\boxed{f.e.m._{indotta} = -\frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t}} \tag{9.8}$$

dove $\Phi(\vec{B})$, il flusso del vettore $\vec{B}$ attraverso la superficie $A$ della spira, è dato dal prodotto scalare:

$$\Phi(\vec{B}) = B \cdot A \cdot \cos\vartheta \tag{9.9}$$

con $\vartheta$ angolo tra la direzione di $\vec{B}$ e la direzione perpendicolare alla superficie della spira.

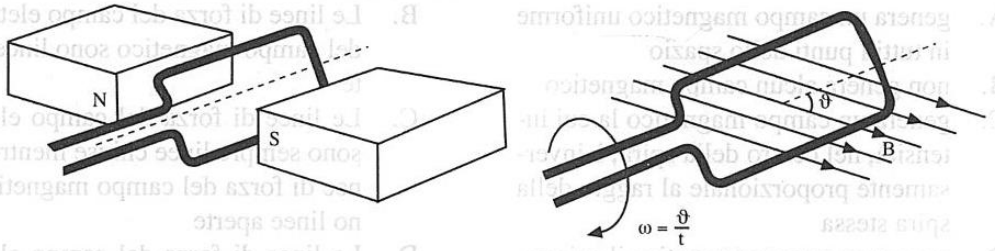
Il segno meno nella relazione 9.8 sta ad indicare che la corrente indotta che si genera nel circuito tende a compensare la variazione di flusso di campo magnetico che l'ha generata.

Una variazione nel tempo del campo elettrico $\vec{E}$ produce un campo magnetico $\vec{B}$ anch'esso variabile nel tempo e viceversa.

## 9.9 GENERATORE DI CORRENTE ALTERNATA

La legge di Faraday-Neumann-Lenz fornisce le basi per il funzionamento dei generatori di corrente alternata (o alternatori). Una spira di area $A$, immersa in un campo magnetico, ad esempio fra le espansioni polari di una calamita (Fig. 9.8), ruota con velocità angolare $\omega = \frac{\vartheta}{t}$. Durante la rotazione il flusso del vettore $\vec{B}$ varia nel tempo ($\Phi(\vec{B}) = B \cdot A \cdot \cos\omega t$).

Si può ricavare che la forza elettromotrice indotta varia nel tempo con andamento sinusoidale ($fem_{indotta} = \omega BA \cdot sen\ \omega t = fem_{max} \cdot sen\ \omega t$) e che anche la corrente elettrica oscilla con andamento sinusoidale: **corrente alternata**.




❒ ***Figura 9.8*** *Principio di funzionamento di un generatore di corrente alternata.*

# ***Verifica*** *Magnetismo*

**1) Un campo magnetico può essere generato:**

A. da una carica elettrica ferma in un punto dello spazio
B. soltanto da magneti naturali
C. soltanto da correnti elettriche
D. sia da magneti che da correnti elettriche
E. da un condensatore caricato con una differenza di potenziale costante

**2) Il campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso da corrente continua:**

A. non dipende dall'intensità di corrente che circola nel filo
B. ha intensità inversamente proporzionale all'intensità di corrente che circola nel filo
C. è descritto dalla legge di Biot e Savart
D. non dipende dal mezzo nel quale è immerso il filo
E. è uniforme in tutti i punti dello spazio

**3) Una spira circolare percorsa da corrente continua:**

A. genera un campo magnetico uniforme in tutti i punti dello spazio
B. non genera alcun campo magnetico
C. genera un campo magnetico la cui intensità, nel centro della spira, è inversamente proporzionale al raggio della spira stessa
D. genera un campo magnetico il cui verso, lungo l'asse della spira, non dipende dal verso in cui circola la corrente
E. genera un campo elettrico

**4) Un solenoide percorso da corrente continua:**

A. non genera un campo magnetico
B. genera un campo magnetico uniforme all'interno del solenoide
C. genera un campo magnetico uniforme all'esterno del solenoide
D. genera un campo magnetico la cui intensità non dipende dal numero totale di spire
E. genera un campo magnetico la cui intensità non dipende dalla lunghezza del solenoide

**5) Due fili rettilinei percorsi da correnti di verso concorde, posti ad una distanza *d*:**

A. si respingono con una forza che non dipende dalla distanza *d*
B. si respingono con una forza che cresce al crescere di *d*
C. si respingono con una forza che cresce al diminuire di *d*
D. si attraggono con una forza che non dipende dalla distanza *d*
E. si attraggono con una forza che cresce al diminuire di *d*

**6) Indicare quale tra le seguenti affermazioni è esatta.**

A. Le linee di forza del campo elettrico e del campo magnetico sono sempre linee chiuse
B. Le linee di forza del campo elettrico e del campo magnetico sono linee aperte
C. Le linee di forza del campo elettrico sono sempre linee chiuse mentre le linee di forza del campo magnetico sono linee aperte
D. Le linee di forza del campo elettrico possono essere linee aperte mentre le linee di forza del campo magnetico sono sempre linee chiuse
E. Le linee di forza del campo elettrico possono essere chiuse o aperte a seconda del segno della carica elettrica che genera il campo, mentre le linee di forza del campo magnetico sono sempre aperte

**7) La forza di cui risente una carica in moto in un campo magnetico:**

A. è nulla se la velocità della carica è perpendicolare alla direzione del campo
B. è massima se la velocità della carica è parallela alla direzione del campo
C. è massima se la velocità della carica è perpendicolare alla direzione del campo
D. è massima quando la carica in moto è positiva indipendentemente dalla direzione della velocità rispetto al campo
E. è nulla se il lavoro compiuto dalla forza di Lorentz è nullo

8) **Una carica in moto in un campo magnetico risente della forza di Lorentz. Il lavoro compiuto da tale forza:**

A. è sempre nullo
B. è positivo se il segno della carica è positivo
C. è tanto maggiore quanto maggiore è la velocità della carica
D. è massimo se la carica si muove con velocità perpendicolare alla direzione del campo
E. è massimo se la carica si muove con velocità parallela alla direzione del campo

9) **La permeabilità magnetica relativa $\mu_r$ di un mezzo rispetto al vuoto:**

A. è sempre > 1 indipendentemente dal mezzo
B. è sempre < 1 indipendentemente dal mezzo
C. è sempre = 1 indipendentemente dal mezzo
D. è < 1 per le sostanze diamagnetiche
E. è < 1 per le sostanze ferromagnetiche

10) **Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica:**

A. avviene se si avvicina un corpo elettrizzato ad un conduttore scarico
B. avviene se varia il flusso del vettore induzione magnetica concatenato a un circuito
C. si ha soltanto se le grandezze elettriche e magnetiche restano costanti nel tempo
D. è descritto dalla legge di Biot e Savart
E. riguarda esclusivamente le sostanze ferromagnetiche