

Unità 23

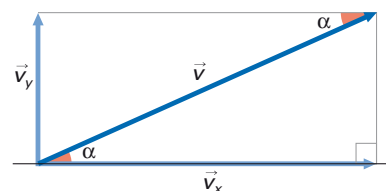
Il campo magnetico

PREREQUISITI

Componenti di un vettore

Un vettore \vec{v} che forma un angolo α con una retta, può essere scomposto in due componenti.

- ▶ Come si calcola la componente v_y ?
- ▶ In quale caso la componente v_y è massima?
- ▶ La componente v_y può essere nulla?



Coppia di forze

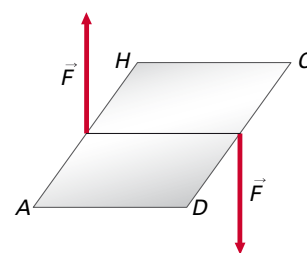
Due forze uguali e opposte, le cui rette di azione sono parallele, formano una coppia di forze.

- ▶ Che cos'è il braccio della coppia?
- ▶ Come si calcola il momento di una coppia di forze?

Rotazioni

Un corpo sottoposto a una coppia di forze non equilibrate ruota. Nella figura le due forze sono perpendicolari al piano della lastra.

- ▶ Come ruota la lastra?
- ▶ Se la lastra è rettangolare il momento vale $F \cdot AD$ oppure $F \cdot AH$?



Forza elettrica

Una carica elettrica q , positiva o negativa, posta dentro un campo elettrico uniforme, è sottoposta a una forza elettrica costante.

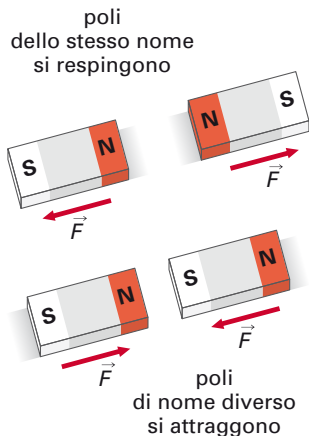
- ▶ Come si calcola l'intensità della forza?
- ▶ Quali sono la direzione e il verso della forza elettrica?

Forza centripeta

Una particella che si muove con velocità costante su una circonferenza, è sottoposta a una forza centripeta.

- ▶ Da che cosa dipende l'intensità della forza centripeta?
- ▶ La forza centripeta compie un lavoro sulla particella?

Fenomeni magnetici



▲ **Figura 1**
Interazione fra due magneti.

I magneti

Già nel VI secolo a.C. erano note le proprietà magnetiche di un minerale del ferro, la magnetite, capace di attirare piccoli pezzi di ferro. La parola «magnetismo» deriva infatti dal nome di Magnesia, una città dell'Asia Minore famosa, a quell'epoca, per l'estrazione della magnetite.

In seguito si osservò che esistono sostanze (come il ferro o l'acciaio) che possono essere magnetizzate, cioè sostanze che, messe a contatto con la magnetite, acquistano la capacità di attrarre il ferro, diventando esse stesse dei *magneti*.

In un magnete si distinguono sempre due poli, cioè due zone in cui gli effetti magnetici sono più intensi; per convenzione i due poli sono chiamati polo nord e polo sud. Fra due poli si esercitano delle forze: poli dello stesso nome si respingono, poli di nome opposto si attraggono [► figura 1].

Contrariamente alle cariche elettriche di segno opposto, i poli nord e sud di un magnete non possono essere separati; se si spezza un magnete in due parti, si ottengono due nuovi magneti, dotati ciascuno di un polo nord e un polo sud.

Campo magnetico creato da magneti

I magneti modificano lo spazio circostante, perché creano un *campo magnetico*, che possiamo visualizzare utilizzando, per esempio, della limatura di ferro [► figura 2a].

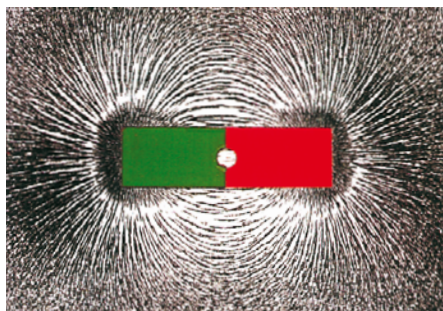
Un campo è l'insieme dei valori che una grandezza assume in una regione dello spazio. Il campo è vettoriale, se a ogni punto della regione è associato un vettore che rappresenta la direzione, il verso e l'intensità del campo in quel punto.

Il campo magnetico, che d'ora in poi indicheremo con il vettore \vec{B} , è un campo vettoriale. Esso risulta definito in un punto quando se ne conoscono l'intensità, la direzione e il verso.

Per individuare la direzione e il verso, collochiamo in un punto del campo un ago magnetico, come quello della bussola. Osserviamo che l'ago magnetico ruota finché si dispone in una posizione di equilibrio stabile. La direzione del vettore \vec{B} in quel punto coincide con la direzione dell'asse dell'ago. Per convenzione, si assume che il verso del campo è quello che va dal polo sud al polo nord dell'ago magnetico [► figura 2b].

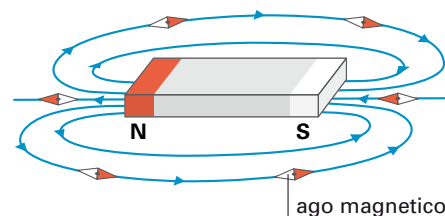
In seguito, calcoleremo l'intensità di \vec{B} sfruttando la proprietà del campo di esercitare forze sui conduttori percorsi da corrente.

► **Figura 2**
Linee del campo magnetico.

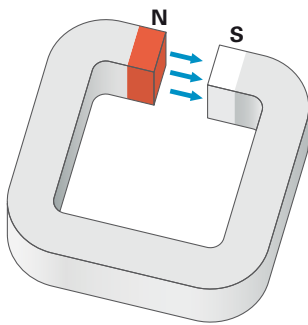


C. GARDINI, 1999

a Un magnete genera nello spazio un campo magnetico; le linee del campo possono essere visualizzate mediante la limatura di ferro.



b Un ago magnetico, posto in un campo magnetico, permette di individuarne la direzione e il verso: la direzione del campo è quella dell'asse dell'ago, il verso è indicato dal polo nord dell'ago.



▲ Figura 3
Un magnete rettilineo, piegato in modo che i due poli siano di fronte, crea un campo magnetico uniforme; le linee del campo vanno dal polo nord al polo sud, sono parallele ed equidistanti.

Le linee del campo magnetico

Il campo magnetico si rappresenta mediante linee magnetiche, ognuna delle quali gode della seguente proprietà: la retta tangente a una linea magnetica in un punto dà la direzione del vettore \vec{B} in quel punto. La densità delle linee è proporzionale all'intensità del campo. Dove le linee sono più fitte, il campo è più intenso (convenzione di Faraday).

Il campo magnetico è uniforme in una certa regione dello spazio, se il vettore \vec{B} ha la stessa intensità, la stessa direzione e lo stesso verso in ogni punto della regione.

Se il campo è uniforme, le linee magnetiche sono parallele ed equidistanti, cioè sono distribuite con densità costante.

Si può ottenere un campo magnetico uniforme in due modi diversi: piegando un magnete rettilineo, finché i due poli sono vicini e paralleli [► figura 3], oppure, come vedremo in seguito, facendo passare una corrente continua in un solenoide.

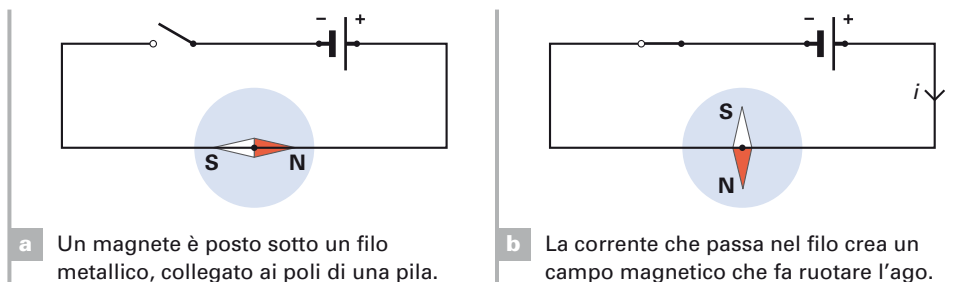
In seguito faremo riferimento a campi magnetici uniformi.

Campo magnetico creato da una corrente

Un campo magnetico può essere creato anche da una corrente elettrica, come verificò il danese Hans Christian Oersted (1777-1851). Oersted fece un'esperienza di questo genere: mise un aghetto magnetico sotto un filo rettilineo di materiale conduttore, come nella ► figura 4. Poi fece passare corrente elettrica nel filo e osservò che l'ago ruotava e si disponeva perpendicolarmente al filo. Perciò concluse che:

Intorno a un filo percorso da corrente elettrica è presente un campo magnetico.

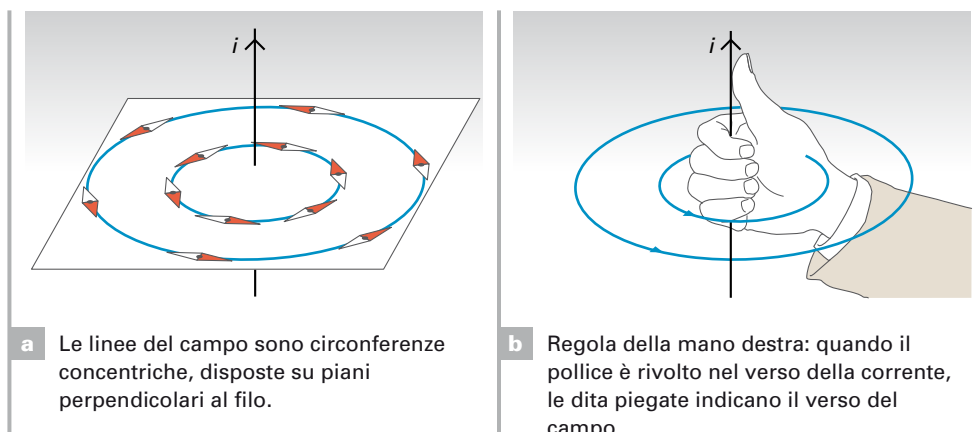
► Figura 4
Esperienza di Oersted.



Se il conduttore è rettilineo, le linee del campo sono circonferenze concentriche al filo [► figura 5a], che giacciono su piani perpendicolari al filo stesso.

La direzione del campo magnetico è tangente a ogni linea, il verso si trova con la regola della mano destra: disponendo il pollice nel verso della corrente, le dita della mano si chiudono indicando il verso del campo [► figura 5b].

► Figura 5
Campo magnetico di un filo rettilineo.



Calcolo del campo magnetico

L'intensità del campo magnetico

Nello stesso periodo in cui Oersted faceva i suoi esperimenti, Michael Faraday scoprì una proprietà fondamentale del campo magnetico:

Il campo esercita una forza su un conduttore percorso da corrente elettrica.

Tale proprietà viene utilizzata per definire l'intensità del vettore \vec{B} .

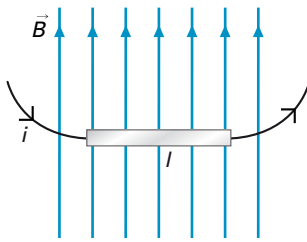
Consideriamo un conduttore rettilineo di lunghezza l , percorso da una corrente i , disposto perpendicolarmente a un campo uniforme \vec{B} [► figura 1]. Sperimentalmente si osserva che il conduttore è sottoposto a una forza \vec{F} di intensità proporzionale alla lunghezza del conduttore e all'intensità della corrente i . Possiamo riassumere questi risultati con la relazione:

$$\frac{F}{i \cdot l} = \text{costante}$$

La costante di proporzionalità viene assunta come intensità del campo magnetico e si indica con la lettera B . Perciò B si ottiene misurando il valore della forza:

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

Nel SI, B si misura in $\text{N}/(\text{A} \cdot \text{m})$. Questa unità prende il nome di *tesla* (simbolo T).



▲ Figura 1
Sul conduttore percorso da corrente, posto dentro al campo magnetico, si esercita una forza direttamente proporzionale alla lunghezza del conduttore e all'intensità della corrente.

ESEMPIO 1 In un conduttore lungo 20 cm circola una corrente di 4,0 A: la forza sul conduttore è 0,2 N. Il valore del campo magnetico è:

$$B = \frac{0,2 \text{ N}}{(4,0 \text{ A}) \times (0,2 \text{ m})} = 0,25 \text{ T}$$

Calcolo del campo in casi particolari

- In prossimità di un filo rettilineo percorso da corrente [► figura 2], il campo magnetico è direttamente proporzionale all'intensità di corrente i e inversamente proporzionale alla distanza dal filo d (**legge di Biot-Savart**):

$$B = \frac{k \cdot i}{d}$$

dove k è una costante che, in unità del SI e nel vuoto, vale $2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

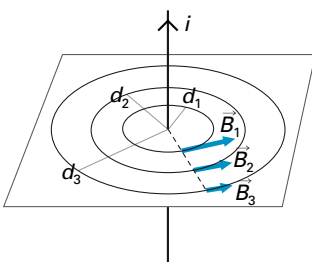
- Quando una spira circolare è percorsa da corrente, intorno al filo si crea un campo magnetico. Nel centro della spira [► figura 3a], l'intensità del campo \vec{B} si calcola con la formula:

$$B = \frac{k \cdot \pi \cdot i}{r}$$

Perciò B è direttamente proporzionale all'intensità di corrente i e inversamente proporzionale al raggio della spira r .

Il vettore \vec{B} è perpendicolare al piano su cui giace la spira; il verso è entrante nel piano, se la corrente circola in verso orario; è uscente, se la corrente circola in verso antiorario.

- Il solenoide è formato da un certo numero di spire circolari affiancate. Quando è percorso da corrente elettrica, si forma un campo magnetico sia dentro che fuori del solenoide [► figura 3b]. Se il solenoide è molto lungo rispetto al diametro delle spire, all'interno e lontano dagli estremi, il campo magnetico è uniforme.



▲ Figura 2
L'intensità del campo è inversamente proporzionale alla distanza dal filo.

RICHIAMO

Il campo magnetico B è direttamente proporzionale all'intensità di corrente i e al numero di spire per unità di lunghezza $\frac{N}{l}$.

Per un solenoide di lunghezza l formato da N spire, l'intensità del vettore \vec{B} lungo l'asse si calcola con la formula:

$$B = \frac{2\pi \cdot k \cdot i \cdot N}{l}$$

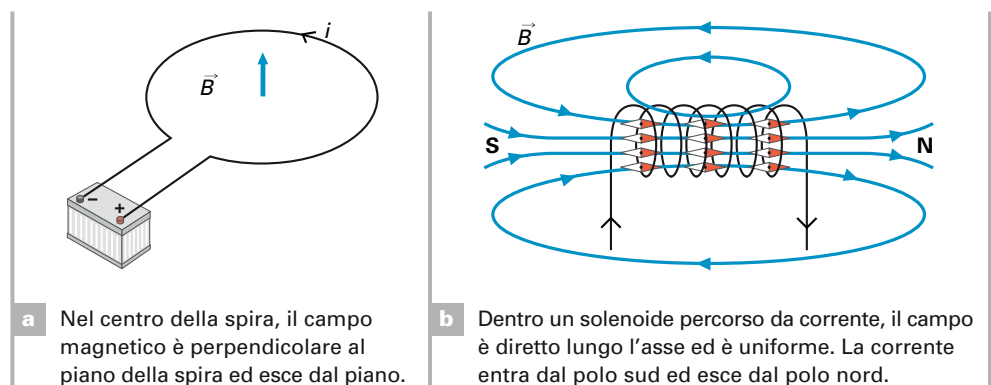
ESEMPIO 2 Se la corrente di 5,0 A circola in un solenoide lungo 20 cm e composto da 40 spire, il campo lungo l'asse del solenoide vale:

$$B = \frac{6,28 \times (2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2) \times (5,0 \text{ A}) \times 40}{0,2 \text{ m}} = 12,56 \times 10^{-4} \text{ T}$$

All'esterno del solenoide, invece, il campo è simile a quello creato da un magnete rettilineo.

La somiglianza fra un solenoide percorso da corrente e un magnete rettilineo permette di definire un nord e un sud anche per il campo creato dal solenoide. Il nord del campo è dalla parte da cui esce la corrente.

Figura 3
Campo magnetico in casi particolari.



Il campo magnetico nella materia

Nel calcolo dell'intensità del vettore \vec{B} abbiamo usato la costante $k = 2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$. In realtà questo valore è corretto quando si considera il campo nel vuoto e, con buona approssimazione, nell'aria. Le considerazioni svolte finora sono dunque valide solo per campi magnetici nel vuoto. Che cosa succede in un mezzo?

Indichiamo con B_0 l'intensità del campo in un punto di un solenoide percorso da corrente, quando in mezzo alle spire c'è il vuoto (► figura 4a). Se introduciamo nel solenoide un cilindro di ferro e misuriamo il campo magnetico nello stesso punto, troviamo un valore molto maggiore di B_0 (► figura 4b). Ciò significa che la presenza del ferro ha determinato l'aumento del valore del campo preesistente.

Se invece, nello stesso solenoide, inseriamo un cilindro di alluminio (► figura 4c) e misuriamo di nuovo il campo, troviamo un valore di poco superiore a quello del vuoto.

Se, infine, inseriamo un cilindro di rame (► figura 4d) e misuriamo il campo, troviamo un valore leggermente minore di B_0 .

Figura 4
Campo magnetico in un mezzo.

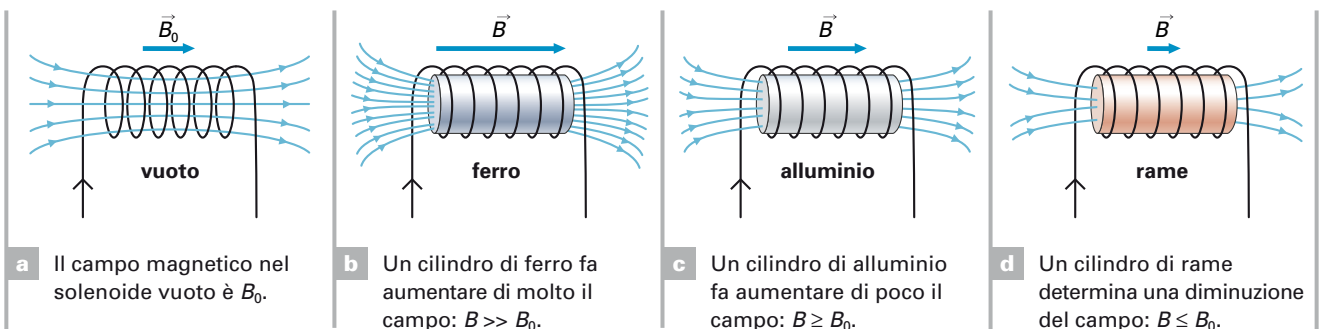


Tabella 1 Permeabilità magnetica relativa	
Sostanza	μ_r
SOSTANZE FERROMAGNETICHE	
ferro temperato	5000
leghe speciali	> 5000
SOSTANZE PARAMAGNETICHE	
aria	1,0000004
alluminio	1,000022
platino	1,0003
SOSTANZE DIAMAGNETICHE	
acqua	0,999910
argento	0,999981
rame	0,999990
vetro	0,999987

La permeabilità magnetica relativa

Il rapporto tra l'intensità del campo nel mezzo (B) e l'intensità del campo nel vuoto (B_0) si chiama **permeabilità magnetica relativa** del mezzo rispetto al vuoto. In genere, la permeabilità magnetica si indica con μ_r :

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}$$

La permeabilità magnetica relativa fornisce informazioni sul contributo che il mezzo dà al campo magnetico; infatti μ_r indica quante volte il campo nel mezzo è maggiore o minore del campo nel vuoto. Alcuni valori di μ_r sono riportati nella ► tabella 1.

ESEMPIO 3 Il campo in un solenoide vuoto misura 2×10^{-5} T. Se nello stesso solenoide inseriamo un cilindro di ferro che ha una permeabilità $\mu_r = 5000$, il campo aumenta di 5000 volte; infatti:

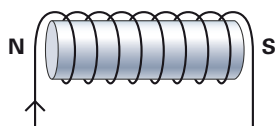
$$B = \mu_r \cdot B_0 = 5000 \times (2 \times 10^{-5} \text{ T}) = 10\,000 \times 10^{-5} \text{ T} = 0,1 \text{ T}$$

Se invece inseriamo un cilindro di rame o di alluminio, il campo varia di molto poco.

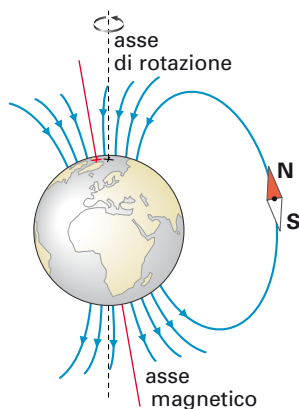
Sostanze paramagnetiche, diamagnetiche e ferromagnetiche

In base al valore di μ_r le sostanze si suddividono in: paramagnetiche, diamagnetiche e ferromagnetiche.

- Le sostanze **paramagnetiche** sono quelle che si comportano come l'alluminio: al loro interno il campo magnetico è leggermente superiore di quanto sarebbe nel vuoto; ciò significa che la permeabilità magnetica relativa è di poco superiore a 1: $\mu_r \geq 1$. Essa si mantiene costante per temperature non troppo elevate.
- Le sostanze **diamagnetiche** sono quelle che si comportano come il rame: poiché B è leggermente minore di B_0 , la permeabilità magnetica è di poco inferiore a 1: $\mu_r \leq 1$. La permeabilità magnetica non dipende dalla temperatura.
- Le sostanze **ferromagnetiche** si comportano in modo diverso. La permeabilità magnetica μ_r non è costante: le proprietà magnetiche di una certa porzione di questi materiali dipendono dal tipo di sostanza, dall'intensità del campo magnetico esterno e dal trattamento che quello specifico pezzo di materiale ha subito in precedenza. Queste sostanze, infatti, si magnetizzano, tendono, cioè, a conservare proprietà magnetiche anche in assenza di un campo magnetico esterno.



▲ **Figura 5**
Schema di un elettromagnete.



▲ **Figura 6**
Campo magnetico terrestre.

L'applicazione più nota dei materiali ferromagnetici è l'elettromagnete (elettrocalamita). Esso è formato da un cilindro di materiale ferromagnetico (in genere acciaio), intorno al quale è avvolta una bobina ► figura 5]. Quando nella bobina passa una corrente, si genera un campo magnetico, che viene intensificato grazie alla presenza del materiale ferromagnetico. Quando la corrente si interrompe, il cilindro si smagnetizza e il campo torna praticamente nullo.

Il principio di sovrapposizione

Per i campi magnetici, come per quelli elettrici, vale il principio di sovrapposizione. Infatti, se in un punto P dello spazio sono presenti due campi magnetici, il campo risultante è la somma vettoriale dei due campi. In particolare, il campo magnetico terrestre è sempre presente e si sovrappone ai campi creati da correnti o da magneti. L'intensità del campo magnetico terrestre ► figura 6) è dell'ordine di 10^{-5} T. Esso può essere trascurato solo se i campi da studiare sono molto più intensi.

L'intensità del campo magnetico

- Un conduttore rettilineo lungo 10 cm, percorso da una corrente di 0,5 A, è disposto perpendicolarmente a un campo magnetico uniforme. Sul conduttore si esercita la forza di 0,02 N.
 - Rappresenta la situazione con un disegno.
 - Quanto vale l'intensità del campo magnetico?
- Nel definire l'intensità del vettore campo magnetico abbiamo preso in considerazione un conduttore perpendicolare alle linee di un campo uniforme.
 - Se il campo non fosse uniforme, potremmo calcolare la sua intensità con il rapporto $\frac{F}{i \cdot l}$?

Calcolo del campo in casi particolari

- Un filo rettilineo molto lungo è attraversato dalla corrente di 1 A. P_1 e P_2 sono due punti che giacciono su un piano perpendicolare al filo. P_1 dista 10 cm dal filo, P_2 dista 20 cm.
 - Calcola l'intensità di \vec{B} in entrambi i punti.
 - Disegna una linea del campo passante per P_1 e un'altra per P_2 .
 - Rappresenta in scala i vettori che rappresentano il campo magnetico in P_1 e P_2 .
- In un filo rettilineo passa la corrente di 10 A. Calcola l'intensità del campo magnetico a distanze di 2, 4, 6, 8, 10 cm dal filo.
 - Rappresenta graficamente il campo in funzione della distanza.
 - A quale distanza dal filo il campo vale 0,08 T?
- Una spira circolare ha un diametro di 6,28 cm ed è percorsa dalla corrente di 4,0 A in verso orario.
 - Determina intensità, direzione e verso del campo magnetico nel centro della spira.
 - Che cosa cambia se la corrente circola in verso antiorario?
- Stai osservando una spira di raggio 5,14 cm perpendicolare al piano del tavolo. In essa circola una corrente di 2,0 A in verso antiorario.
 - Rappresenta la situazione con un disegno.
 - Quanto vale il campo magnetico nel centro della spira?
 - Il verso di \vec{B} è entrante o uscente dal piano della spira?
 - In quale modo potresti individuare il verso del campo?
- Le seguenti affermazioni si riferiscono al campo magnetico che si crea dentro un solenoide, quando è percorso da corrente. Accanto a ognuna scrivi se è vera o è falsa.
 - Il campo è direttamente proporzionale alla corrente che circola nel solenoide. V F
 - Il campo all'interno del solenoide non dipende dal diametro delle spire. V F

- Il campo è inversamente proporzionale alla lunghezza del solenoide. V F
- Il campo è uniforme dentro e fuori del solenoide. V F

- Un solenoide, formato da 50 spire, è lungo 15 cm ed è attraversato da una corrente di 4,0 A.
 - Rappresenta la situazione con un disegno, indicando anche il verso di \vec{B} .
 - Calcola il campo magnetico in un punto dell'asse.
 - Disegna le linee del campo dentro e fuori del solenoide.
- Un solenoide è percorso da una corrente di intensità i da destra verso sinistra. Supponi di sistemare tre aghetti magnetici sull'asse del solenoide, in questo modo: il primo fuori del solenoide dalla parte della corrente entrante, il secondo dentro al solenoide in un punto dell'asse, il terzo fuori del solenoide dalla parte della corrente uscente.
 - Rappresenta la situazione con un disegno.
 - Indica il verso del campo.
- In un solenoide lungo 10 cm, composto da 20 spire, passa una corrente di 2,0 A.
 - Rappresenta la situazione con un disegno.
 - Qual è il valore del campo in un punto dell'asse del solenoide?
 - Indica direzione e verso del campo B in un punto che sta sull'asse.
 - Se si inverte il verso della corrente, il valore del campo cambia?
 - E la direzione e il verso del campo cambiano?

La permeabilità magnetica relativa

- In un solenoide circola una corrente di intensità 0,5 A. È lungo 20 cm ed è formato da 100 spire.
 - Calcola l'intensità del campo magnetico in un punto dell'asse.
 - Calcola di nuovo l'intensità del campo nel caso in cui dentro al solenoide ci sia del ferro.

Il principio di sovrapposizione

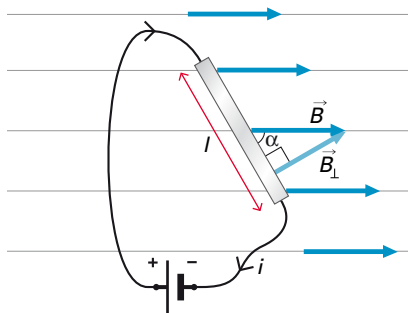
- In un punto P sono presenti due campi magnetici che hanno la stessa direzione.
 - Qual è il campo risultante?
 - E se i campi sono perpendicolari?
- Su un piano orizzontale, vi sono due fili rettilinei tra loro perpendicolari. Uno è percorso da una corrente di 2 A verso nord, l'altro da 2 A verso est. Il punto P si trova sullo stesso piano in direzione sud-est, a 10 cm da entrambi i fili.
 - Rappresenta la situazione con un disegno.
 - Calcola i campi magnetici creati dai due fili nel punto P .

Forze su conduttori percorsi da corrente

La forza su un conduttore

Nel definire l'intensità del vettore \vec{B} abbiamo considerato un caso particolare: un conduttore rettilineo di lunghezza l perpendicolare alle linee del campo. Ora trattiamo il caso generale: il conduttore percorso da corrente forma con il campo un angolo diverso da 90° [► figura 1].

L'intensità della forza non dipende soltanto dalla lunghezza del conduttore e dalla corrente, ma dipende anche dall'angolo che il conduttore forma con il vettore campo. In pratica, la forza dipende dalla componente di \vec{B} perpendicolare al conduttore:



▲ **Figura 1**
Il conduttore non è perpendicolare al vettore \vec{B} , ma forma con esso un angolo diverso da 90° .

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

forza (N) intensità di corrente (A)
componente perpendicolare del campo magnetico (T) lunghezza del conduttore (m)

La componente perpendicolare di \vec{B} si calcola con la formula:

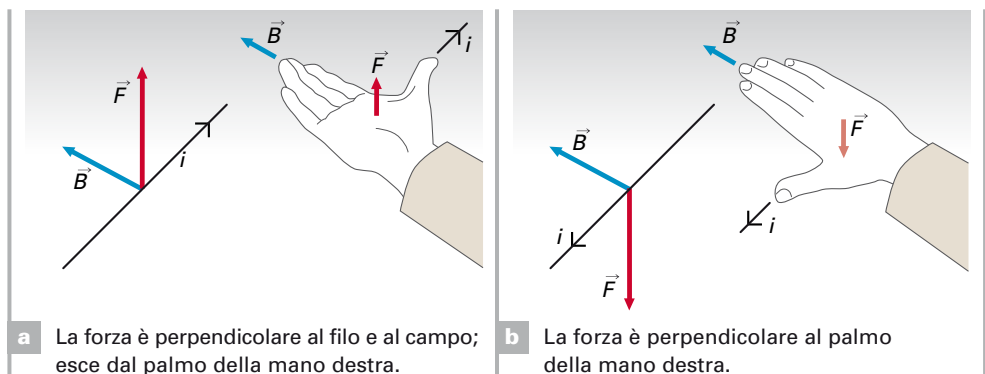
$$B_{\perp} = B \cdot \sin \alpha$$

perciò la forza è massima quando il conduttore è perpendicolare alle linee del campo, è nulla quando conduttore e campo magnetico sono paralleli.

La direzione della forza è sempre perpendicolare al piano individuato dalla direzione del campo e dalla direzione della corrente. Il verso si trova con la regola della mano destra [► figura 2]: disponendo il pollice nel verso della corrente i e le dita nel verso del campo \vec{B} , la forza esce in direzione perpendicolare al palmo della mano.

RICHIAMO
sen $0^\circ = 0$; sen $90^\circ = 1$.

► **Figura 2**
Regola della mano destra.



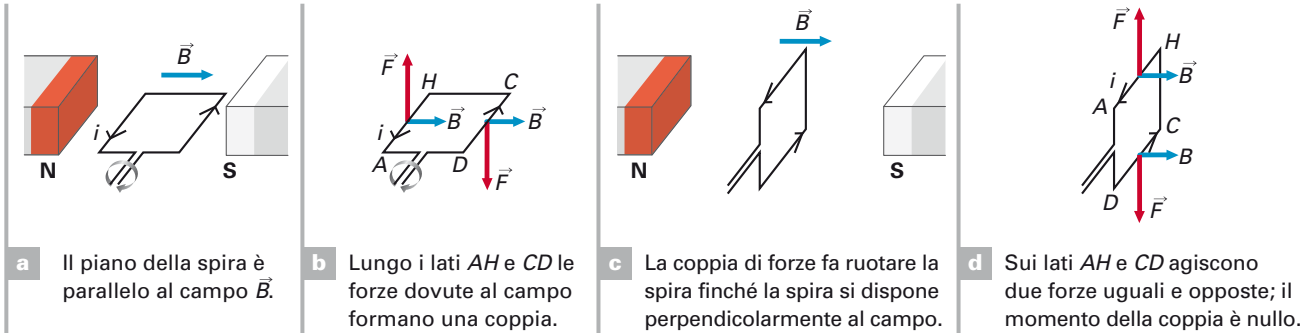
Spira rettangolare in un campo magnetico

Supponiamo che una spira possa ruotare intorno a un asse perpendicolare alle linee del campo \vec{B} . Il piano della spira è inizialmente parallelo alle linee del campo [► figura 3a].

Se nella spira passa una corrente continua, sui due lati perpendicolari alle linee del campo si esercita una coppia di forze [► figura 3b], che fa ruotare la spira in verso orario.

Sotto l'azione della coppia la spira ruota, finché raggiunge la posizione nella quale è perpendicolare alla direzione del campo [► figura 3c]. In tale posizione il momento meccanico è nullo. Per effetto dell'inerzia, la spira supera la posizione di equilibrio:

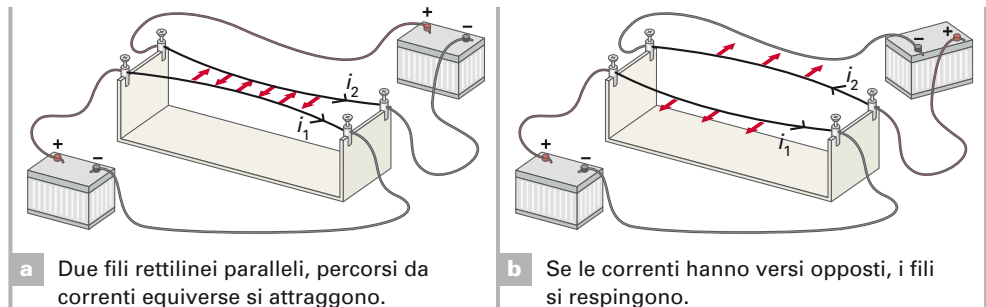
▼ **Figura 3**
Una spira in un campo magnetico.



L'interazione fra correnti

Nello stesso periodo in cui Oersted e Faraday facevano le loro scoperte, il francese André-Marie Ampère (1775-1836) verificò che due fili rettilinei e paralleli percorsi da correnti equiverse si attraggono. Se invece le correnti circolano in verso opposto, i due fili si respingono [► figura 4].

► **Figura 4**
Interazioni fra correnti.



Se i fili sono posti alla distanza d e in essi circolano le correnti i_1 e i_2 , la forza che ciascun filo esercita su un tratto lungo l dell'altro è direttamente proporzionale alle correnti e inversamente proporzionale alla distanza d tra i fili:

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

ESEMPIO 1 Se le due correnti sono 3,0 A e 5,0 A e i fili sono posti alla distanza di 10 cm, la forza per unità di lunghezza, esercitata dal filo 1 sul filo 2 e viceversa, è:

$$\frac{F}{l} = \frac{(2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2) \times (3,0 \text{ A}) \times (5,0 \text{ A})}{0,1 \text{ m}} = 3,0 \times 10^{-5} \text{ N/m}$$

Il risultato trovato da Ampère è facilmente spiegabile: il filo 1, percorso da corrente, genera un campo magnetico (esperienza di Oersted); il filo 2, che si trova dentro il campo generato dal filo 1, è sottoposto alla forza del campo (esperienza di Faraday). Un ragionamento identico si può ripetere per comprendere perché il filo 2 esercita una forza (di intensità uguale) sul filo 1.

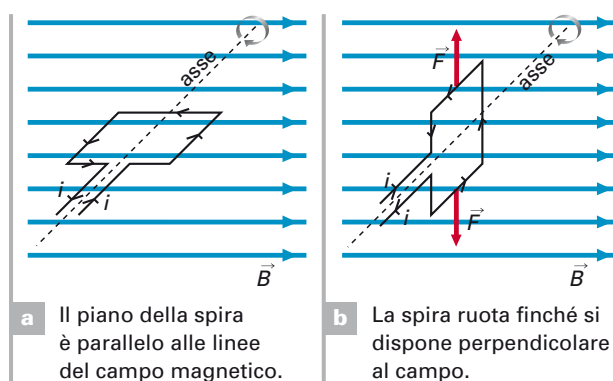
L'interazione tra fili rettilinei percorsi da corrente viene utilizzata per definire l'unità di misura della corrente elettrica nel SI.

Una corrente di intensità di 1 A, che passa in due fili rettilinei molto lunghi e paralleli posti alla distanza di 1 m, produce una forza di attrazione o di repulsione uguale a 2×10^{-7} N per ogni metro di filo.

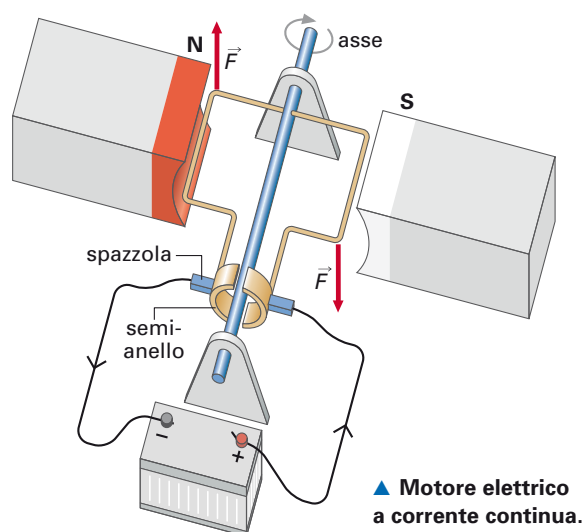


■ Il motore elettrico a corrente continua

Per capire come funziona un motore a corrente continua, riprendiamo l'esempio della spira percorsa da corrente posta in un campo magnetico (figura a). La spira è sottoposta a un momento torcente che la fa ruotare, finché la sua superficie si dispone perpendicolarmente alle linee del campo, posizione in cui il momento è nullo (figura b).



Con un semplice accorgimento si può fare in modo che la spira continui a ruotare nel campo magnetico. Basta dotarla di due semi-anelli, anch'essi rotanti, su cui strisciano i contatti (spazzole) che la collegano al generatore di corrente. Ogni volta che la spira raggiunge la posizione di equilibrio, il momento della coppia di forze è nullo, la corrente si interrompe per un istante e poi percorre la spira nel verso opposto. Ne deriva che il momento torcente agisce sempre nello stesso verso, qualunque sia la posizione della spira, e quindi la fa ruotare con continuità. In questo modo si ottiene un motore elettrico



che trasforma con continuità energia elettrica (trasportata dalla corrente) in energia meccanica.

Il motore elettrico è un dispositivo che, inserito in un circuito in cui è presente un generatore di differenza di potenziale, si mette in rotazione e compie lavoro.

■ L'amperometro a bobina mobile

Anche il funzionamento di un amperometro (e di altri strumenti elettrici) è basato sul movimento di una spira (o meglio di una bobina) percorsa da corrente in un campo magnetico. Quando nella bobina passa corrente, su di essa si esercita una coppia di forze che la fa ruotare. La bobina è situata tra le espansioni polari di un magnete, sagomato in modo tale che, qualunque sia la posizione della bobina, le forze agenti producono un momento torcente costante. Il momento torcente su una spira di area A è:

$$M = i \cdot A \cdot B$$

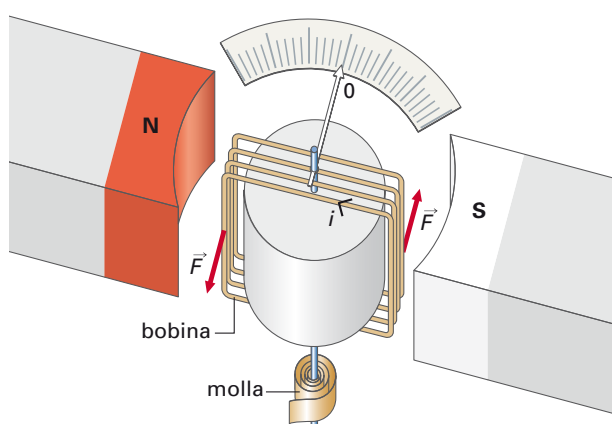
Se la bobina è composta da N spire, il momento è:

$$M = N \cdot i \cdot A \cdot B$$

quindi è proporzionale all'intensità della corrente che circola nella bobina.

La bobina è collegata a una molla che si oppone alla rotazione della bobina stessa. Quando il momento della forza elastica esercitata dalla molla è uguale al momento torcente del campo magnetico, la bobina si ferma. All'equilibrio, essa risulta ruotata di un angolo che è tanto più grande quanto maggiore è il momento torcente che, a sua volta, è direttamente proporzionale all'intensità di corrente che è passata.

Ne deriva che l'angolo di cui è ruotata la bobina è direttamente proporzionale all'intensità di corrente che l'ha attraversata.



La forza su un conduttore

- 1 Considera un filo percorso da corrente, completamente immerso in un campo magnetico uniforme generato da un magnete a ferro di cavallo. Il filo può ruotare dentro il campo.
 - ▶ Da quali grandezze dipende la forza che si esercita sul filo?
 - ▶ In quale posizione la forza sul filo è massima e in quale è minima?
 - ▶ Rappresenta con un disegno le due posizioni.
- 2 Un conduttore lungo 40 cm, percorso da una corrente di intensità 2,0 A, si trova dentro un campo magnetico di intensità 4×10^{-6} T. Il conduttore forma un angolo di 60° con la direzione del campo \vec{B} .
 - ▶ Rappresenta la situazione con un disegno.
 - ▶ Calcola la forza sul conduttore.
- 3 Su un conduttore rettilineo, posto dentro un campo magnetico uniforme, si esercita una forza di 0,02 N. Il conduttore è percorso da una corrente di 2,5 A, è lungo 20 cm e forma un angolo di 45° con le linee del campo.
 - ▶ Schematizza la situazione con un disegno.
 - ▶ Calcola il valore del campo \vec{B} .

- 4 La tabella seguente si riferisce a un conduttore lungo 1 m percorso da corrente, completamente immerso in un campo magnetico uniforme.
 - ▶ Completa la tabella.

B (T)	i (A)	α ($^\circ$)	Forza (N)
0,5	2	30	—
—	5	60	5
1	—	90	0,6
0,8	3	0	—

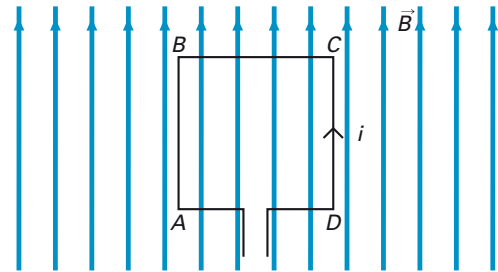
- 5 Considera un conduttore orizzontale, percorso da corrente da destra verso sinistra. Il campo magnetico è perpendicolare al conduttore e ha il verso entrante nel piano.
 - ▶ Qual è la direzione e il verso della forza?

Spira rettangolare in un campo magnetico

- 6 Le affermazioni seguenti si riferiscono al momento esercitato su una spira immersa in un campo magnetico uniforme. Accanto a ognuna scrivi se è vera o è falsa.
 - a) Il momento è nullo se nella spira non passa corrente. V F
 - b) Il momento torcente è proporzionale all'intensità del campo magnetico. V F
 - c) Il momento è direttamente proporzionale all'angolo che la superficie della spira forma con il campo. V F

d) Il momento è massimo quando la spira è parallela alle linee del campo. V F

- 7 Il piano di una spira quadrata è parallelo a un campo magnetico, come in figura. La spira è percorsa da corrente in verso antiorario.
 - ▶ Il campo esercita una forza su tutti i lati della spira?
 - ▶ Su quali lati della spira agisce una coppia di forze?

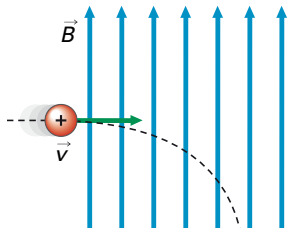


- 8 Una spira rettangolare, di lati 8,0 cm e 15 cm, è percorsa da una corrente di 1,5 A. I lati più lunghi sono perpendicolari a un campo magnetico uniforme di 2,0 T, mentre quelli più corti sono paralleli al campo.
 - ▶ Calcola il valore delle forze che agiscono sui lati lunghi e su quelli corti della spira.

L'interazione fra correnti

- 9 Due conduttori rettilinei e paralleli, posti alla distanza di 12 cm, sono attraversati rispettivamente dalle correnti $i_1 = 1,2$ A e $i_2 = 2,4$ A.
 - ▶ Calcola la forza per unità di lunghezza che ciascun conduttore esercita sull'altro.
 - ▶ Perché i conduttori interagiscono fra loro?
 - ▶ Che cosa succede se avviciniamo i due fili?
- 10 Due fili paralleli distanti 10 cm sono percorsi da correnti uguali di verso opposto. Sui fili si esercita una forza di 0,02 N per metro.
 - ▶ Calcola il valore delle correnti.
- 11 Due fili rettilinei percorsi da corrente nello stesso verso si attraggono.
 - ▶ La forza che si esercita su un filo è uguale e opposta a quella che si esercita sull'altro filo?
 - ▶ Le due forze costituiscono una coppia di forze?
- 12 Due lunghi fili rettilinei e paralleli sono percorsi da correnti di intensità $i_1 = i_2 = 8,0$ A che scorrono nello stesso verso. Un conduttore rettilineo lungo 15 cm viene posto tra i due fili alla distanza di 5,0 cm da entrambi. Il conduttore è parallelo ai due fili ed è percorso dalla corrente $i = 12$ A, che circola nello stesso verso di i_1 e i_2 .
 - ▶ Rappresenta la situazione con un disegno.
 - ▶ Calcola la forza che agisce sul conduttore.
 - ▶ Se la corrente nel conduttore avesse verso opposto a quello delle correnti nei due fili, le risposte precedenti sarebbero diverse? Spiega.

La forza di Lorentz



▲ Figura 1
La carica che entra in un campo magnetico, viene deviata dalla sua traiettoria perché su di essa si esercita una forza magnetica dovuta al campo.

La forza su una carica in moto

Una particella carica, che entra in un campo magnetico \vec{B} , viene deviata dal suo percorso rettilineo, perché il campo esercita una forza \vec{F} che modifica la traiettoria della particella [► figura 1]. Questa forza si chiama **forza di Lorentz**, dal nome del fisico olandese Hendrik Lorentz (1853-1928). L'intensità della forza di Lorentz si calcola con l'espressione:

$$F = q \cdot v \cdot B_{\perp}$$

F è direttamente proporzionale alla carica, alla velocità della carica e alla componente di \vec{B} perpendicolare al vettore velocità. Poiché $B_{\perp} = B \cdot \sin \alpha$, la forza è nulla quando $\alpha = 0$, cioè quando la velocità è parallela al campo, ed è massima quando la velocità è perpendicolare al campo. Nella ► figura 1, $\alpha = 90^\circ$ e $\sin \alpha = 1$.

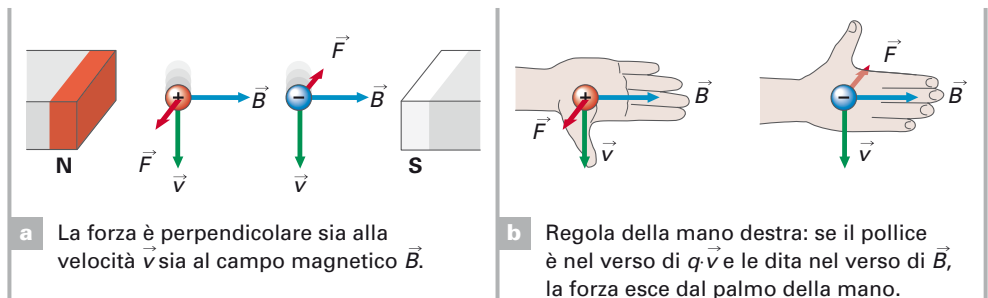
ESEMPIO 1 Un protone entra con velocità di $3,0 \times 10^4$ m/s in un campo magnetico di intensità $2,0 \times 10^{-5}$ T. La sua velocità forma con il campo magnetico un angolo di 30° . La forza sul protone è:

$$F = (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (3,0 \times 10^4 \text{ m/s}) \times (2,0 \times 10^{-5} \text{ T}) \times \sin 30^\circ = 4,8 \times 10^{-20} \text{ N}$$

La direzione della forza è perpendicolare al piano individuato dai vettori \vec{v} e \vec{B} [► figura 2a]. Il verso si trova con la regola della mano destra [► figura 2b]: quando le dita sono nel verso del campo \vec{B} e il pollice nel verso del vettore $q \cdot \vec{v}$, la forza esce dal palmo della mano.

In particolare, se la carica q è positiva il vettore $q \cdot \vec{v}$ ha lo stesso verso della velocità, se q è negativa ha verso opposto.

► Figura 2
Direzione e verso della forza di Lorentz.



Il lavoro della forza di Lorentz

Ricordiamo che, per definizione, il lavoro di una forza si calcola con la formula:

$$L = F_{\parallel} \cdot s$$

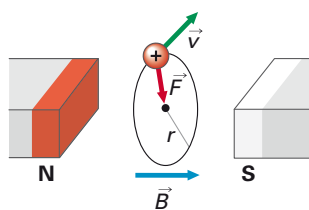
Ricordiamo, inoltre, che vale il teorema dell'energia cinetica: il lavoro fatto da una forza su un corpo è uguale alla variazione dell'energia cinetica del corpo stesso:

$$L = \Delta E_c$$

La forza di Lorentz è sempre perpendicolare alla velocità della particella carica, quindi è perpendicolare allo spostamento e non compie lavoro. Se il lavoro è nullo, l'energia cinetica non cambia. Perciò possiamo dire che la forza di Lorentz non modifica l'energia cinetica della particella carica; cambia la direzione del vettore velocità, ma non ne modifica l'intensità.

RICHIAMO
● Energia cinetica:
 $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

Il moto della carica q dentro al campo



▲ Figura 3
Se la particella carica entra con velocità perpendicolare al vettore \vec{B} , la forza di Lorentz agisce come forza centripeta e deflette la particella, facendole descrivere un arco di circonferenza.

RICHIAMO
● Forza centripeta:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Distinguiamo due casi:

- la particella carica ha una velocità iniziale perpendicolare al vettore \vec{B} ;
- la particella ha una velocità non perpendicolare al vettore \vec{B} .
- **Velocità iniziale perpendicolare a \vec{B}** . La forza di Lorentz modifica la direzione del vettore velocità. Le caratteristiche del moto sono:
 - la traiettoria giace nel piano perpendicolare al vettore \vec{B} ;
 - il moto avviene su un arco di circonferenza;
 - la velocità è costante in modulo.

Se il campo è abbastanza esteso, la particella si muove con moto circolare uniforme [► figura 3]; altrimenti esce dal campo, dopo essere stata deviata.

Per calcolare il raggio della traiettoria basta tener presente che la forza centripeta coincide con la forza di Lorentz, quindi vale l'uguaglianza:

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

Da questa uguaglianza si ricava il valore del raggio di curvatura r :

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

Poiché m , v , q e B sono costanti, anche r è costante e perciò la traiettoria è una circonferenza.

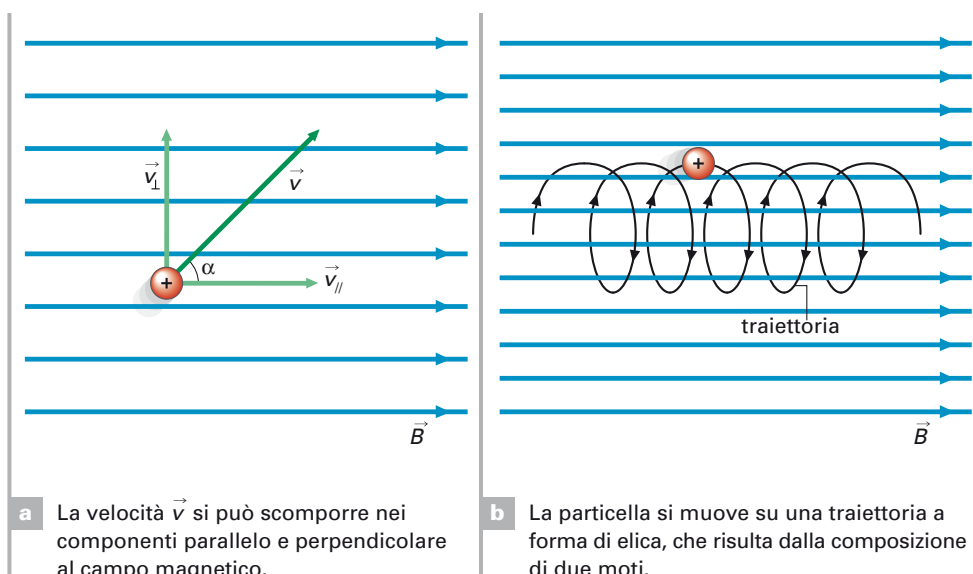
- **Velocità iniziale non perpendicolare a \vec{B}** . Se la velocità della particella forma un angolo diverso da 90° con la direzione del campo, la traiettoria non sarà circolare.

Possiamo scomporre il vettore velocità in due componenti: uno parallelo e l'altro perpendicolare al vettore \vec{B} [► figura 4a]. La particella ruoterà nel piano perpendicolare a \vec{B} per effetto della forza di Lorentz, che agisce sul componente perpendicolare della velocità. Il componente parallelo della velocità non viene influenzato dal campo magnetico.

Ne deriva che la particella è soggetta contemporaneamente a due movimenti: uno circolare dovuto alla forza di Lorentz e uno rettilineo uniforme nella direzione di \vec{B} dovuto al componente orizzontale della velocità.

La composizione dei due moti è un moto elicoidale lungo la direzione del campo magnetico [► figura 4b].

► Figura 4
Velocità non perpendicolare a \vec{B} .



a La velocità \vec{v} si può scomporre nei componenti parallelo e perpendicolare al campo magnetico.

b La particella si muove su una traiettoria a forma di elica, che risulta dalla composizione di due moti.



■ Lo spettrometro di massa

Lo spettrometro di massa è un dispositivo che permette di misurare la massa di una particella carica. Esso è formato da tre zone:

- una camera C in cui sono prodotti degli ioni;
- una camera A in cui gli ioni sono accelerati mediante una d.d.p.;
- una camera di deflessione in cui è presente un campo magnetico che modifica la traiettoria degli ioni.

Nelle varie zone c'è un vuoto molto spinto (circa 10^{-6} mbar).

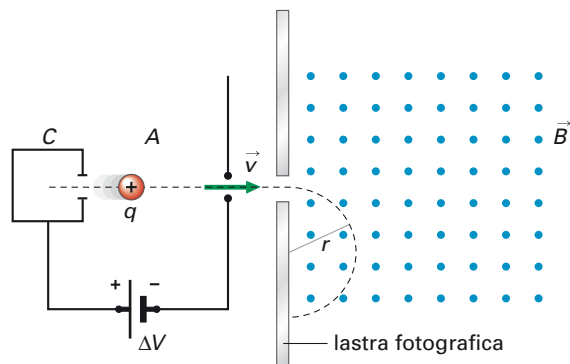
Supponiamo che gli ioni siano prodotti con velocità trascurabile. Nella zona di accelerazione il campo elettrico compie un lavoro $L = q \cdot \Delta V$ su uno ione di carica q . Pertanto, se lo ione ha massa m , la sua energia cinetica dopo l'accelerazione sarà:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = q \cdot \Delta V$$

Nella camera di deflessione gli ioni entrano con una velocità \vec{v} perpendicolare alla direzione del campo (nella figura il vettore \vec{B} esce dal piano della pagina). La forza di Lorentz, perpendicolare alla direzione del moto, li costringe a descrivere una traiettoria semicircolare prima di colpire una lastra fotografica su cui gli ioni lasciano un segno. Misurando la posizione del segno, si determina il raggio dell'orbita r e quindi si può calcolare la massa con la formula:

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

Lo spettrometro serve anche a separare gli *isotopi* di un elemento (particelle che hanno la stessa carica ma diversa massa). Infatti, a parità di carica e di velocità, due isotopi cadono in punti diversi della lastra fotografica, perché descrivono traiettorie di raggio diverso.



▲ Gli ioni, creati nella camera C , sono accelerati nella zona A da una differenza di potenziale. Nella terza zona, gli ioni vengono deflessi da un campo magnetico \vec{B} (che esce dalla pagina) e raccolti su una lastra fotografica.

■ Il selettore di velocità

Una particella carica q può essere sottoposta contemporaneamente a un campo magnetico e a un campo elettrico. In tal caso è soggetta a due forze, quella elettrica e quella di Lorentz, che si sommano vettorialmente. La forza-peso è trascurabile rispetto alle altre due forze.

Nella figura qui sotto il campo elettrico è diretto verso il basso e quello magnetico entra nel piano della pagina. Non sono visibili le sorgenti dei due campi.

La particella positiva, che entra con velocità orizzontale \vec{v} nello spazio in cui sono presenti i due campi, sarà soggetta a due forze entrambe perpendicolari alla velocità: la forza elettrica $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$, diretta verso il basso come il campo \vec{E} ; quella di Lorentz $\vec{F}_m = q \cdot v \cdot \vec{B}_\perp$, diretta verso l'alto.

Le due forze si fanno equilibrio se hanno la stessa intensità:

$$q \cdot E = q \cdot v \cdot B$$

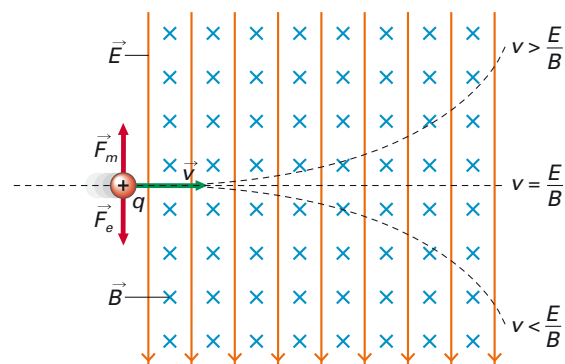
In tal caso la velocità della particella vale:

$$v = \frac{E}{B}$$

e, indipendentemente dalla massa e dalla carica, la particella attraversa indisturbata lo spazio in cui sono presenti i due campi e prosegue in linea retta.

Se la velocità è maggiore del rapporto $\frac{E}{B}$, prevale la forza magnetica e quindi la particella viene deviata verso l'alto; se la velocità è minore di $\frac{E}{B}$, prevale la forza elettrica e la particella viene deviata verso il basso.

Il dispositivo illustrato serve a selezionare le particelle in base alla loro velocità; perciò viene chiamato **selettore di velocità**.



▲ Sulla particella q si esercita una forza elettrica e una forza magnetica.

Se le due forze si fanno equilibrio, la carica passa indisturbata, altrimenti viene deviata.

La forza su una carica in moto

- Le seguenti affermazioni si riferiscono alla forza di Lorentz. Accanto a ognuna scrivi se è vera o è falsa.
 - La forza si esercita solo sui corpi carichi. V F
 - La forza è direttamente proporzionale all'angolo che la direzione della velocità forma con la direzione del campo. V F
 - La forza è tanto più grande quanto maggiore è la velocità della particella. V F
 - La forza è sempre perpendicolare sia al vettore velocità sia al vettore campo magnetico. V F
 - Il verso della forza dipende dal segno della carica. V F
- Il campo elettrico esercita forze sia sulle cariche ferme sia su quelle in movimento.
 - Il campo magnetico si comporta allo stesso modo?
- La velocità di un protone che entra in un campo magnetico uniforme forma un angolo α con le linee del campo.
 - Completa la tabella seguente.

Velocità	Campo	Angolo	Forza
5×10^4 m/s	1,0 T	30°	—
$0,5 \times 10^6$ m/s	—	45°	$2,0 \times 10^{-14}$ N
—	0,01 T	60°	$4,0 \times 10^{-15}$ N

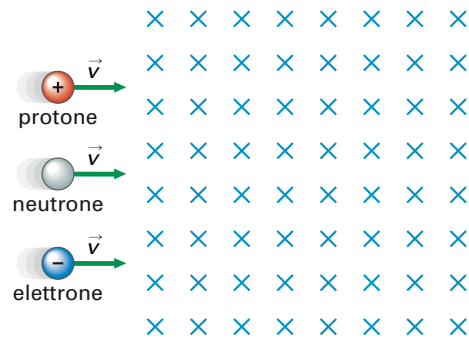
- Un elettrone entra con una velocità di 5×10^5 m/s in un campo magnetico di intensità 0,02 T. La direzione della velocità forma un angolo di $22,5^\circ$ con quella del campo.
 - Rappresenta la situazione con un disegno.
 - Calcola il valore della forza.
 - Se l'angolo fosse di 45° , il valore della forza sarebbe doppio?

Il lavoro della forza di Lorentz

- Quando una particella carica penetra in un campo magnetico, risente della forza di Lorentz.
 - Quali modifiche subisce la velocità della particella? Spiega.
 - La forza di Lorentz può compiere lavoro nullo?
- Quando una particella carica si trova dentro un campo elettrico, la forza del campo accelera o decelera la particella.
 - Il campo magnetico produce accelerazione come il campo elettrico?

Il moto della carica q dentro al campo

- Nella figura un elettrone, un protone e un neutrone entrano nel campo magnetico in direzione perpendicolare alle linee del campo. Il campo \vec{B} è entrante nel piano della pagina.
 - Che cosa succede?
 - Disegna le traiettorie delle tre particelle.



- Un nucleo di elio (carica $q = 3,2 \times 10^{-19}$ C e massa $m = 6,7 \times 10^{-27}$ kg) entra in un campo magnetico uniforme di intensità 0,01 T. Il campo magnetico e la velocità della particella sono perpendicolari. La velocità iniziale della particella è di $1,25 \times 10^6$ m/s.
 - Come cambia la velocità?
 - Se la particella descrive una traiettoria circolare, qual è il raggio della circonferenza su cui si muove?
- Quando una particella entra in direzione non perpendicolare al campo, la traiettoria non è circolare.
 - In questo caso la velocità varia in modulo?
 - La forza di Lorentz compie un lavoro?
- Due isotopi sono atomi della stessa specie, che però hanno masse leggermente diverse, perché i loro nuclei hanno un diverso numero di neutroni. Per esempio, i simboli ^{24}Mg e ^{26}Mg indicano due isotopi del magnesio: il primo ha una massa di $24 \times (1,67 \times 10^{-27}$ kg), il secondo ha una massa di $26 \times (1,67 \times 10^{-27}$ kg), perché ha due neutroni in più.
 - Perché si possono separare gli isotopi di un elemento inviandoli dentro un campo magnetico?

- In un campo magnetico di intensità B , una carica elettrica in moto, lungo una direzione non parallela alle linee del campo, è sottoposta a una forza. Anche un filo rettilineo percorso da corrente, se non è parallelo al campo, è sottoposto alla forza del campo magnetico.
 - Si tratta di forze di origini diverse oppure la forza sul filo è dovuta alla somma delle forze che il campo \vec{B} esercita su ogni singolo elettrone di conduzione del filo?

Visione d'insieme

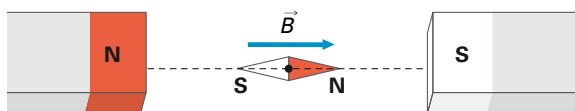
DOMANDE E RISPOSTE SULL'UNITÀ

► Quali sono le sorgenti del campo magnetico?

- Il campo magnetico può essere creato mediante un magnete oppure mediante una corrente elettrica. In entrambi i casi, la presenza del campo può essere visualizzata mediante limatura di ferro.

► Come si stabilisce il verso di un campo magnetico?

- Si può utilizzare un ago magnetico; posto dentro il campo, sull'ago si esercita una coppia di forze che lo fa ruotare, finché raggiunge una posizione di equilibrio. La direzione del campo è lungo l'asse dell'ago, il verso va dal sud al nord.



► Da che cosa dipende il campo magnetico creato da una corrente elettrica continua?

- Il valore del campo in un punto dipende dall'intensità della corrente e dalla distanza del punto dalla sorgente del campo.
- Per esempio, in vicinanza di un filo rettilineo percorso dalla corrente i , il campo magnetico alla distanza d è:

$$B = \frac{k \cdot i}{d}$$

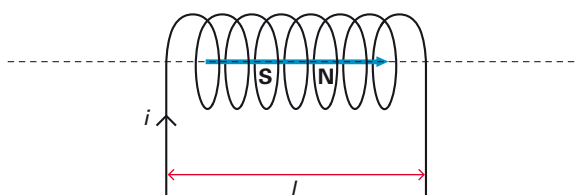
Nel centro di una spira circolare di raggio r , percorsa dalla corrente i , è:

$$B = \frac{k \pi i}{r}$$

► Come si può ottenere un campo magnetico uniforme?

- Con un magnete a forma di C: il campo è uniforme fra le espansioni polari del magnete. Anche al centro di un solenoide il campo è uniforme.
- Lungo l'asse di un solenoide di lunghezza l , formato da N spire e percorso dalla corrente di intensità i , si forma un campo magnetico uniforme:

$$B = \frac{2 \pi \cdot k \cdot i \cdot N}{l}$$



► I campi magnetici interagiscono con le correnti?

- Sì, esercitando delle forze sulle correnti. Un conduttore rettilineo di lunghezza l , percorso dalla corrente i , posto dentro un campo magnetico \vec{B} risente di una forza di intensità

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

dove B_{\perp} è la componente del campo perpendicolare al conduttore.

- La direzione e il verso della forza si trovano con la regola della mano destra: se il pollice è diretto nel verso della corrente e le dita aperte nel verso del campo, la forza esce dal palmo della mano.

► Che cosa succede a una spira rettangolare percorsa da corrente posta dentro un campo magnetico?

- La spira ruota perché è sottoposta a una coppia di forze esercitate dal campo magnetico.
- Sia il funzionamento di un motore a corrente continua che quello di un amperometro a bobina mobile sono basati sul fatto che una bobina percorsa da corrente ruota in un campo magnetico.

► Perché due correnti interagiscono fra di loro?

- Perché ognuna delle due correnti si trova nel campo magnetico creato dall'altra corrente.
- Due conduttori rettilinei e paralleli si attraggono o si respingono con una forza che dipende dalle correnti e dalla distanza tra i conduttori.

► Che cos'è 1 A?

- Un ampere (1 A) è la corrente che, circolando in due fili rettilinei molto lunghi e paralleli posti alla distanza di 1 m, produce una forza di attrazione (o di repulsione) uguale a 2×10^{-7} N per ogni metro di filo.

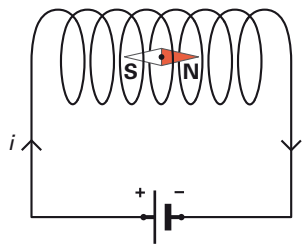
► Da che cosa dipende la forza di Lorentz?

- Quando una carica si muove all'interno di un campo magnetico è soggetta alla forza di Lorentz. Tale forza è direttamente proporzionale alla velocità della carica, al campo magnetico e dipende dall'angolo che la velocità forma con il campo.

$$F = q \cdot v \cdot B_{\perp}$$

- La forza di Lorentz è perpendicolare al piano individuato dai vettori \vec{v} e \vec{B} .

- 1 Considera le seguenti affermazioni:
«un magnete rettilineo fermo genera un campo magnetico.»
«un insieme di cariche negative genera sempre un campo magnetico.»
Qual è corretta?
A La prima.
B La seconda.
C Sono entrambe corrette.
D Nessuna delle due è corretta.
- 2 Un filo metallico rettilineo perpendicolare a un campo magnetico è sottoposto a una forza:
A solo se è percorso da una corrente elettrica molto intensa;
B solo se è percorso da una corrente positiva;
C solo se è percorso da una corrente negativa;
D se è percorso da una corrente elettrica.
- 3 Un filo rettilineo giace sul piano della pagina ed è attraversato da una corrente che va dall'alto verso il basso. Quali sono la direzione e il verso del campo magnetico in un punto P , posto alla sinistra del filo?
A Il campo è parallelo al filo e il verso coincide con quello della corrente.
B Il campo è parallelo al filo e il verso è opposto a quello della corrente.
C Il campo è perpendicolare al piano della pagina e il verso è entrante nella pagina.
D Il campo è perpendicolare al piano della pagina e il verso è uscente dalla pagina.
- 4 Un ago magnetico è posto all'interno di un solenoide, come nella figura seguente.

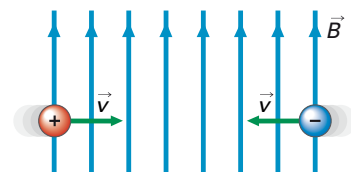


- A** L'ago viene espulso dal solenoide perché risente di una forza verso destra.
B L'ago ruota su se stesso perché è sottoposto a una coppia di forze.
C L'ago rimane in equilibrio perché il campo del solenoide è parallelo all'asse dell'ago.
D Non ci sono elementi sufficienti per rispondere.
- 5 Il momento torcente su una spira percorsa da corrente, immersa dentro un campo magnetico, dipende:
A solo dalla corrente e dal campo;
B solo dalla corrente e dall'angolo che la spira forma con la direzione del campo;
C solo dall'area della spira e dal campo;

D dalla corrente, dalla superficie della spira, dal campo e da come la spira è orientata nel campo.

- 6 Due fili rettilinei paralleli sono percorsi da correnti opposte: $i_1 = 5 \text{ A}$ e $i_2 = 10 \text{ A}$. Indichiamo con \vec{F}_1 la forza che è esercitata sul filo 1 e con \vec{F}_2 la forza che è esercitata sul filo 2. Quale delle seguenti uguaglianze è corretta?
A $F_1 = F_2$
B $2F_1 = F_2$
C $F_1 = \frac{1}{2}F_2$
D $5F_1 = 10F_2$
- 7 Considera le due affermazioni seguenti:
«il campo magnetico è dovuto a un magnete o a una corrente»;
«il campo magnetico influenza sia le correnti che i magneti permanenti». Quale è corretta?
A Solo la prima.
B Solo la seconda.
C Sono entrambe corrette.
D Nessuna delle due è corretta.
- 8 Una particella carica attraversa una regione dello spazio, senza subire alcuna deviazione. Possiamo affermare che in quella regione non è presente un campo magnetico?
A Sì, perché non agisce nessuna forza sulla carica.
B Sì, perché, se ci fosse un qualunque campo magnetico, la particella cambierebbe direzione.
C No, perché ci potrebbe essere un campo parallelo alla direzione della velocità.
D Non si può rispondere, perché non è noto il segno della carica.
- 9 Quali condizioni devono verificarsi perché una particella che penetra dentro un campo magnetico descriva una traiettoria circolare?
A Campo \vec{B} uniforme, velocità perpendicolare al campo \vec{B} .
B Campo \vec{B} uniforme, velocità perpendicolare al campo e particella carica.
C Velocità perpendicolare al campo \vec{B} e particella carica.
D Campo \vec{B} uniforme e particella carica.

- 10 Due cariche entrano in un campo magnetico come in figura. Come è diretta la forza di Lorentz?
A La forza sulla carica positiva è entrante nel piano del foglio, quella sulla carica negativa è uscente.
B La forza sulla carica positiva è uscente dal piano del foglio, quella sulla carica negativa è entrante.
C Le due forze sono entrambe uscenti
D Le due forze sono entrambe entranti.



Lezione 2 ■ Calcolo del campo magnetico

1 PROBLEMA SVOLTO In un filo rettilineo indefinito passa la corrente di 5,0 A.

► Rappresentiamo graficamente il campo magnetico attorno al filo in funzione della distanza.

Soluzione Per la legge di Biot-Savart:

$$B = \frac{k \cdot i}{d}$$

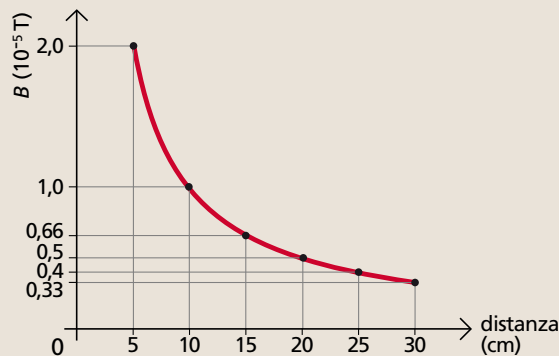
Calcoliamo l'intensità del campo per $d = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$:

$$B = \frac{(2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2) \times (5,0 \text{ A})}{0,05 \text{ m}} = 2,0 \times 10^{-5} \text{ T}$$

Poiché B è inversamente proporzionale alla distanza, quando d raddoppia, B si dimezza ecc.

d (cm)	B (T)
5	$2,0 \times 10^{-5}$
10	$1,0 \times 10^{-5}$
15	$0,66 \times 10^{-5}$
20	$0,5 \times 10^{-5}$
25	$0,4 \times 10^{-5}$
30	$0,33 \times 10^{-5}$

La rappresentazione grafica di B è un'iperbole.



2 Un filo rettilineo è attraversato dalla corrente di 1 A.

► Costruisci una tabella del valore del campo per distanze di 2, 4, 6, ..., 20 cm.

► Rappresenta graficamente il campo in funzione della distanza.

3 Due fili paralleli, posti alla distanza r , sono percorsi da correnti con la stessa intensità e lo stesso verso.

► Verifica che nel punto medio del segmento che unisce i due fili il campo magnetico è nullo.

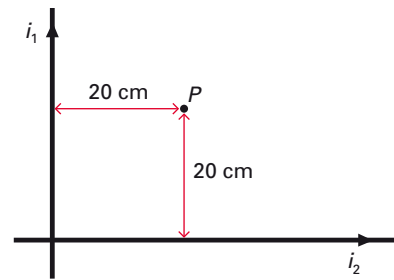
► Se le due correnti avessero verso opposto, il campo nel punto medio sarebbe ancora nullo?

4 Due fili percorsi da correnti $i_1 = 2,0 \text{ A}$ e $i_2 = 4,0 \text{ A}$ sono perpendicolari.

► Spiega perché nel punto P i campi generati dalle due correnti hanno verso opposto.

► Calcola il campo risultante nel punto P .

► Come dovrebbero circolare le correnti per avere un campo risultante di valore $6,0 \times 10^{-6} \text{ T}$?



5 Una spira circolare ha il diametro di 20 cm ed è percorsa dalla corrente di 5,0 A.

► Calcola l'intensità del campo magnetico nel centro della spira.

► Disegna il vettore \vec{B} nei due casi: corrente in verso orario e in verso antiorario.

6 Il campo magnetico creato da un solenoide in un punto del suo asse vale 0,08 T, quando è attraversato da una corrente di intensità 5,2 A.

► Quante spire contiene il solenoide per unità di lunghezza?

► Di quanto aumenta il campo, se dentro al solenoide inseriamo un cilindro di permeabilità magnetica relativa 5500?

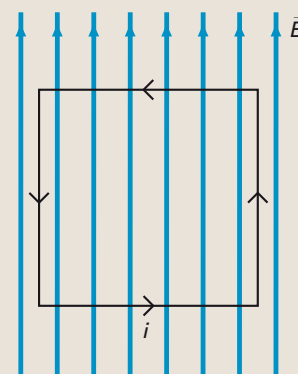
Lezione 3 ■ Forze su conduttori percorsi da corrente

7 PROBLEMA SVOLTO Una spira quadrata di lato

10 cm è percorsa da 8,0 A in verso antiorario. Come mostrato nella figura, il piano della spira è parallelo a un campo magnetico uniforme di 0,25 T.

a) Calcoliamo l'intensità delle forze che agiscono sui quattro lati della spira.

b) Qual è la direzione e il verso delle forze?



Soluzione a) Sui lati della spira paralleli al campo non agiscono forze, sui lati perpendicolari agiscono due forze uguali e opposte, di intensità:

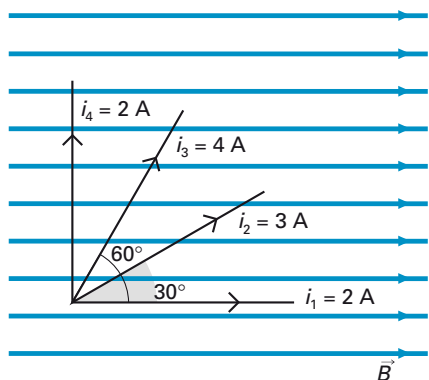
$$F = B \cdot i \cdot l$$

Sostituendo i valori dati nel testo, si trova:

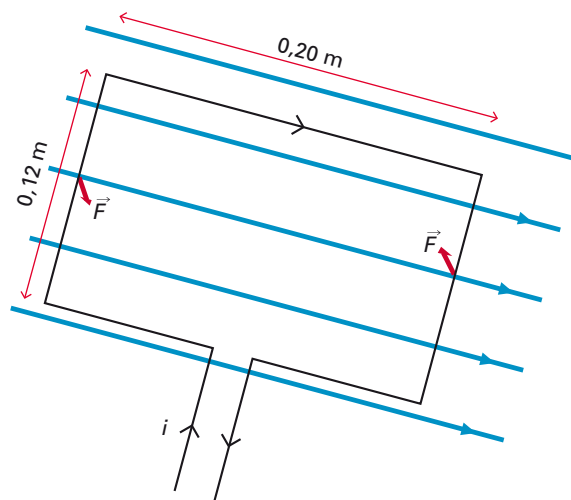
$$F_1 = F_2 = (0,25 \text{ T}) \times (8,0 \text{ A}) \times (0,1 \text{ m}) = 0,2 \text{ N}$$

b) La direzione delle forze è perpendicolare al piano del foglio: una è entrante, l'altra uscente dal foglio. La spira ruota in senso orario.

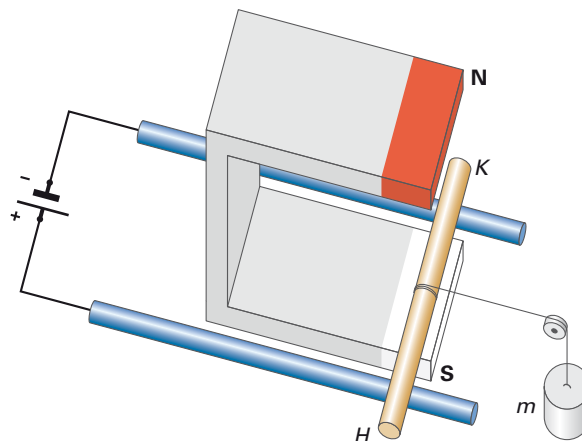
- 8** Un conduttore rettilineo lungo 40 cm e percorso da una corrente di 10 A viene posto in un campo magnetico \vec{B} (verticale, diretto verso il basso) in modo da formare un angolo di 30° con le linee del campo. Sul conduttore si esercita una forza di 0,05 N.
- ▶ Rappresenta la situazione con un disegno, evidenziando la direzione e il verso della forza.
 - ▶ Calcola il valore del campo magnetico.
 - ▶ Se l'angolo fosse di 60° , il valore della forza sarebbe doppio?
- 9** Due fili rettilinei e paralleli, posti alla distanza di 10 cm, sono percorsi da correnti di intensità uguale. I conduttori interagiscono fra di loro con una forza per unità di lunghezza uguale a 0,02 N/cm.
- ▶ Quanta corrente passa in ogni filo?
 - ▶ Con i dati disponibili si può stabilire se le correnti sono equiverse?
 - ▶ Che cosa succede se avviciniamo i due fili?
- 10** Una spira rettangolare, percorsa da corrente che circola in senso orario, ha i lati di 10 cm e 20 cm. Viene posta dentro un campo magnetico uniforme di 4,0 T. I lati più lunghi della spira sono perpendicolari alle linee del campo e su ognuno di essi si esercita una forza di 4,0 N. I lati più corti della spira sono paralleli alle linee del campo.
- ▶ Rappresenta la situazione con un disegno.
 - ▶ Calcola l'intensità della corrente che circola nella spira.
 - ▶ Qual è il momento della coppia di forze?
 - ▶ Sui lati corti della spira si esercitano forze dovute al campo?
- 11** I conduttori della figura, posti dentro un campo magnetico di valore 0,4 T, hanno tutti la stessa lunghezza (15 cm), ma sono percorsi da correnti diverse.
- ▶ Calcola la forza che si esercita su ogni conduttore.
 - ▶ Come sono dirette le forze?
 - ▶ Spiega perché le quattro forze hanno lo stesso verso.



- 12** Il campo \vec{B} in cui si trova la spira della figura seguente misura 0,6 T. La spira è percorsa da una corrente di 4 A.
- ▶ Calcola l'intensità della forza F che si esercita sui lati corti della spira.
 - ▶ Perché sugli altri lati non si esercitano forze?
 - ▶ Qual è il momento della coppia che si esercita sulla spira?
 - ▶ In quale verso ruota la spira?



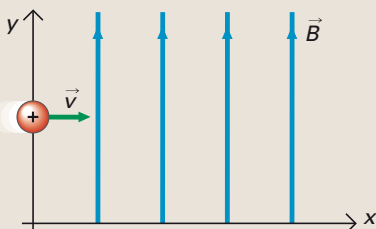
- 13** Un filo metallico rettilineo lungo 25 cm è percorso dalla corrente di 1,0 A. Il filo si trova dentro un campo magnetico uniforme e su di esso si esercita la forza di 1,0 N perpendicolare al piano e uscente dal foglio.
- ▶ Quanto vale la componente del campo magnetico perpendicolare al filo?
 - ▶ È possibile calcolare il vettore \vec{B} ?
- 14** Un conduttore mobile può scorrere su due guide metalliche collegate a un generatore (figura). Nel circuito passa la corrente di 2,0 A, il campo magnetico è 0,2 T. La parte di conduttore immersa nel campo è lunga 10 cm.
- ▶ Calcola la forza che si esercita sul conduttore mobile.
 - ▶ Spiega perché la forza è diretta verso il generatore.
 - ▶ Verifica che se la massa è $m = 4,1 \text{ g}$, il conduttore rimane in equilibrio.



Lezione 4 ■ La forza di Lorentz

15 PROBLEMA SVOLTO Un protone si muove nel verso positivo dell'asse x con velocità di $8,0 \times 10^6$ m/s. Entra in un campo magnetico uniforme di intensità 2,0 T, diretto nel verso positivo dell'asse y .

- Determiniamo intensità, direzione e verso della forza sul protone.
- Calcoliamo il raggio della traiettoria.



Soluzione a) La velocità è perpendicolare al campo, perciò la forza di Lorentz è:

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

$$F = (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (8,0 \times 10^6 \text{ m/s}) \times (2,0 \text{ T})$$

$$F = 2,6 \times 10^{-12} \text{ N}$$

La direzione della forza è perpendicolare al piano xy ; per la regola della mano destra, il verso della forza è uscente dal piano.

b) La forza è perpendicolare alla velocità e fa descrivere al protone una circonferenza di raggio r :

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

La massa del protone è $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Sostituendo i valori numerici nella formula di r si trova:

$$r = 4,17 \times 10^{-2} \text{ m}$$

16 Considera due assi cartesiani x e y . Un elettrone si muove con velocità di $6,0 \times 10^6$ m/s nel verso positivo dell'asse x , dentro un campo magnetico uniforme di intensità 0,5 T, diretto nel verso negativo dell'asse y .

- ▶ Calcola la forza di Lorentz sull'elettrone.
- ▶ Determina direzione e verso della forza.
- ▶ Calcola il periodo di rotazione dell'elettrone.

17 Una particella di carica positiva $q = 3,2 \times 10^{-19}$ C entra in un campo magnetico uniforme. Il vettore velocità forma con le linee del campo un angolo α .

▶ Completa la tabella seguente.

Campo (T)	Velocità (m/s)	Angolo ($^\circ$)	Forza (N)
0,05	—	40 $^\circ$	5×10^{-14}
2,5	$2,5 \times 10^6$	50 $^\circ$	—
—	$8,0 \times 10^6$	60 $^\circ$	$4,0 \times 10^{-15}$

18 Due ioni di massa m_1 e m_2 ($m_2 = 2m_1$) hanno la stessa carica. I due ioni si muovono nello stesso campo magnetico su orbite circolari di uguale raggio.

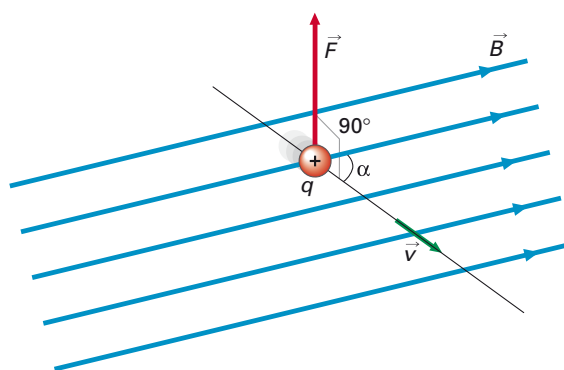
- ▶ Dimostra che le velocità dei due ioni sono una doppia dell'altra.
- ▶ Quale ione si muove con velocità maggiore?

19 Uno ione positivo attraversa una zona in cui sono presenti un campo elettrico \vec{E} e un campo magnetico \vec{B} perpendicolari fra loro. La direzione della velocità è perpendicolare a entrambi i campi.

- ▶ Quali sono le forze che agiscono sullo ione?
- ▶ Come sono dirette queste forze?
- ▶ È possibile che lo ione non venga deviato dalla sua traiettoria?

20 Nella figura un protone entra in un campo magnetico uniforme B di 0,5 T con un angolo α di 60 $^\circ$ e una velocità di 2×10^3 m/s.

- ▶ Calcola il valore della forza.
- ▶ Come cambia la traiettoria del protone?
- ▶ Ricopia sul quaderno la figura e supponi che al posto del protone ci sia un elettrone.
- ▶ La forza è più o meno intensa di quella calcolata prima?
- ▶ Com'è diretta la forza sull'elettrone?



Parte H

Soluzioni degli esercizi

UNITÀ 23

Prerequisiti [p. H 51]

Componenti di un vettore:

$v_y = v \cdot \cos(90 - \alpha)$; $\alpha = 90^\circ$; sì, se $\alpha = 0^\circ$

Coppia di forze: Distanza fra le rette di azione; $M = F \cdot b$

Rotazioni: In senso orario; $F \cdot AD$

Forza elettrica: $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$

La direzione è quella del campo, il verso è quello del campo se q è positiva, opposto se q è negativa

Forza centripeta: Da massa e velocità della particella e dal raggio della circonferenza; No

Lezione 2

Calcolo del campo magnetico [p. H 57]

- 1 0,4 T
- 3 $2 \cdot 10^{-6}$ T, 10^{-6} T
- 4 10^{-4} T, $5 \cdot 10^{-5}$ T, $3,3 \cdot 10^{-5}$ T, $2 \cdot 10^{-5}$ T, $2,5 \cdot 10^{-5}$ m
- 5 $2,0 \cdot 10^{-5}$ T
- 6 $2,44 \cdot 10^{-5}$ T; uscente
- 7 a) V, b) F, c) V, d) F
- 8 $1,7 \cdot 10^{-3}$ T
- 10 $5,0 \cdot 10^{-4}$ T
- 11 $3,14 \cdot 10^{-4}$ T; 1,57 T
- 13 $4,0 \cdot 10^{-6}$ T; $4,0 \cdot 10^{-6}$ T

Lezione 3

Forze su conduttori percorsi da corrente [p. H 61]

- 2 $2,8 \cdot 10^{-6}$ N
- 3 $5,7 \cdot 10^{-2}$ T
- 4 0,5 N; 1,15 T; 0,6 A; 0 N
- 6 a) V, b) V, c) F, d) V
- 8 0,45 N, 0 N
- 9 $4,8 \cdot 10^{-6}$ N/m
- 10 100 A
- 12 0 N

Lezione 4

La forza di Lorentz [p. H 65]

- 1 a) V, b) F, c) V, d) V, e) V
- 3 $4,0 \cdot 10^{-15}$ N; $3,54 \cdot 10^{-1}$ N; $2,9 \cdot 10^6$ m/s
- 4 $6,12 \cdot 10^{-16}$ N
- 8 Non cambia; 2,62 m

Problemi [p. H 68]

- 4 $2,0 \cdot 10^{-6}$ T 5 $3,14 \cdot 10^{-5}$ T
- 6 $1,2 \cdot 10^4$ spire/metro; 440 T
- 8 $2,5 \cdot 10^{-2}$ T; no 9 1000 A 10 5,0 A; 0,4 N·m 11 0 N; 0,09 N; 0,21 N; 0,12 N 12 0,29 N; $5,8 \cdot 10^{-2}$ N·m
- 13 4,0 T; no 14 0,04 N
- 16 $4,8 \cdot 10^{-13}$ N; $7,15 \cdot 10^{-11}$ s
- 17 $4,86 \cdot 10^6$ m/s; $1,53 \cdot 10^{-12}$ N; $1,8 \cdot 10^{-3}$ T 20 $1,38 \cdot 10^{-16}$ N