

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].

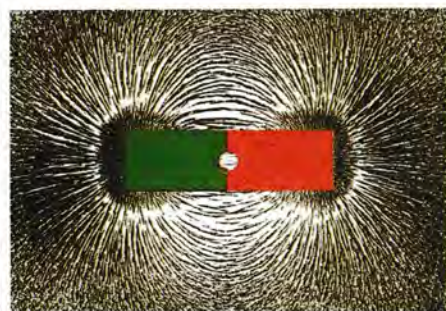
Un campo è l'insieme dei valori che una grandezza assume in una regione dello spazio. Il campo è vettoriale, se a ogni punto della regione è associato un vettore che rappresenta la direzione, il verso e l'intensità del campo in quel punto.

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.

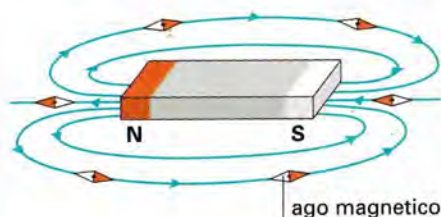
Per individuare la direzione e il verso, collochiamo in un punto del campo un ago magnetico, come quello della bussola. Osserviamo che l'ago magnetico ruota finché si dispone in una posizione di equilibrio stabile. La direzione del vettore \vec{B} in quel punto coincide con la direzione dell'asse dell'ago. 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.



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.

Le linee del campo magnetico

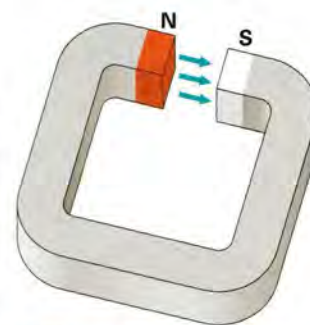
Il campo magnetico si rappresenta mediante linee magnetiche, ognuna delle quali gode della seguente proprietà: la retta tangente a una linea magnetica in un punto dà la direzione del vettore \vec{B} in quel punto. La densità delle linee è proporzionale all'intensità del campo. Dove le linee sono più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



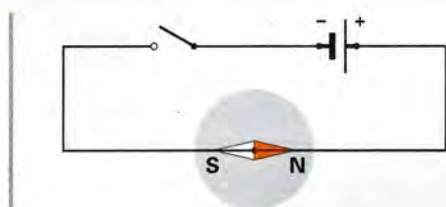
▲ Figura 3

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.

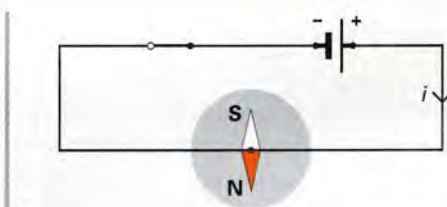
Campo magnetico creato da una corrente

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.



a Un magnete è posto sotto un filo metallico, collegato ai poli di una pila.



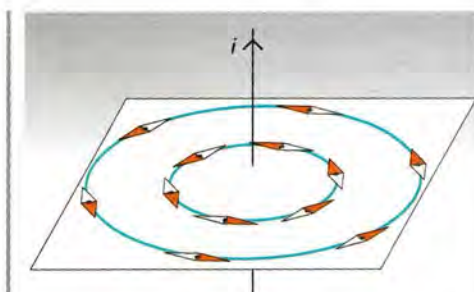
b La corrente che passa nel filo crea un campo magnetico che fa ruotare l'ago.

◀ Figura 4

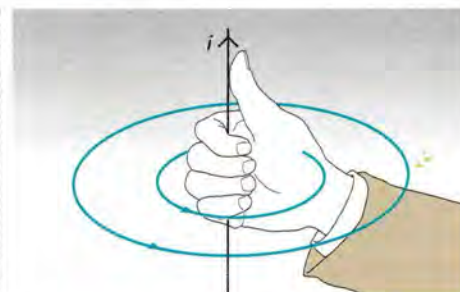
Esperienza di Oersted.

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].



a Le linee del campo sono circonferenze concentriche, disposte su piani perpendicolari al filo.



b Regola della mano destra: quando il pollice è rivolto nel verso della corrente, le dita piegate indicano il verso del campo.

◀ 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} .

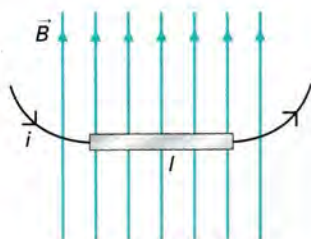
Consideriamo un conduttore rettilineo di lunghezza l , percorso da una corrente i , disposto perpendicolarmente a un campo uniforme \vec{B} [► figura 1]. Sperimentalmente si osserva che il conduttore è sottoposto a una forza \vec{F} di intensità proporzionale alla lunghezza del conduttore e all'intensità 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 $2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

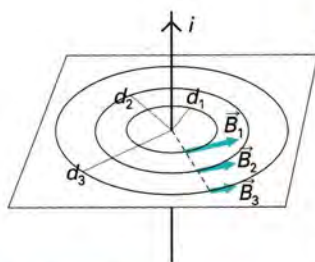
- Quando una spira circolare è percorsa da corrente, intorno al filo si crea un campo magnetico. Nel centro della spira [► figura 3a], l'intensità del campo \vec{B} si calcola con la formula:

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

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.

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:

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

RICHIAMO

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

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.

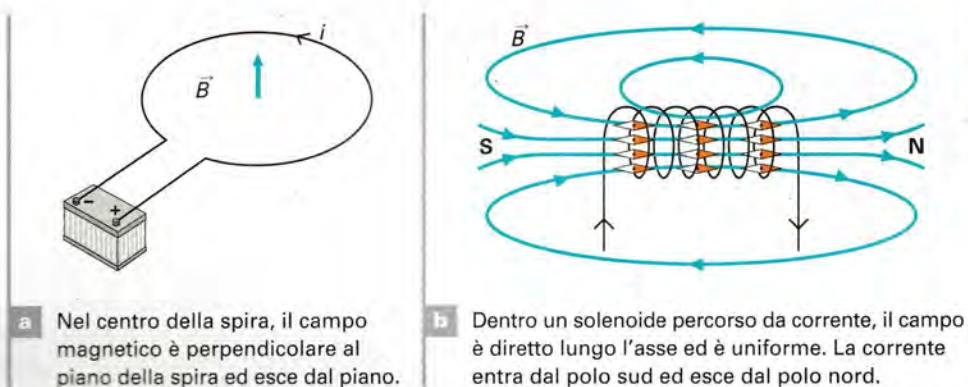


Figura 3
Campo magnetico in casi particolari.

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.

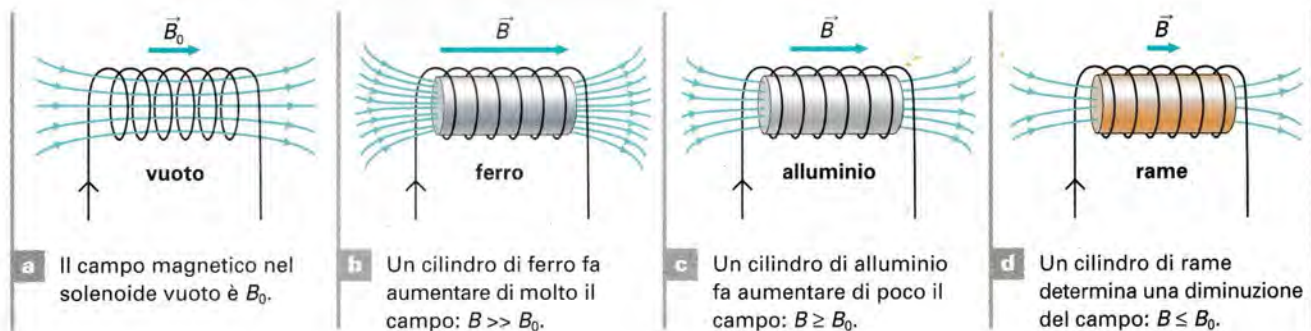


Tabella 1 Permeabilità magnetica relativa

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

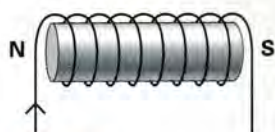
In base al valore di μ_r le sostanze si suddividono in: paramagnetiche, diamagnetiche e ferromagnetiche.

- 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.

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 ► figura 6] terrestre è dell'ordine di 10^{-5} T. Esso può essere trascurato solo se i campi da studiare sono molto più intensi.



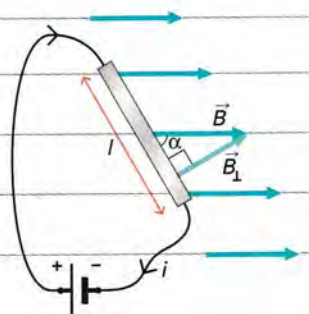
▲ **Figura 5**
Schema di un elettromagnete.



▲ **Figura 6**
Campo magnetico terrestre.

Forze su conduttori percorsi da corrente

La forza su un conduttore



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

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

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 α 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:

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

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

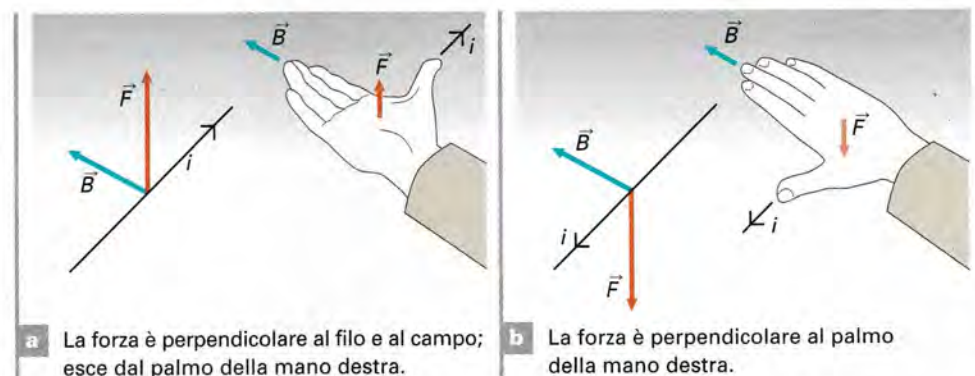
La componente perpendicolare di \vec{B} si calcola con la formula:

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

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.

► Figura 2
Regola della mano destra.



Spira rettangolare in un campo magnetico

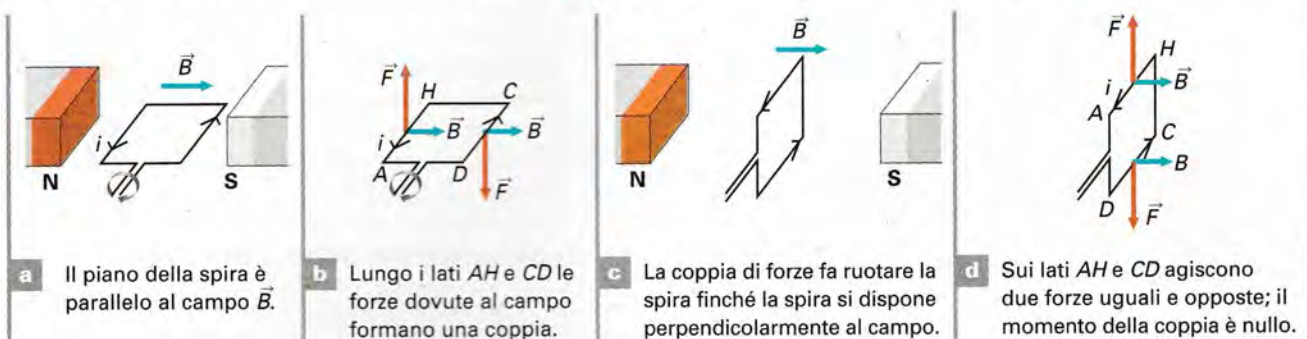
Supponiamo che una spira possa ruotare intorno a un asse perpendicolare alle linee del campo \vec{B} . Il piano della spira è inizialmente parallelo alle linee del campo [► figura 3a].

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: non

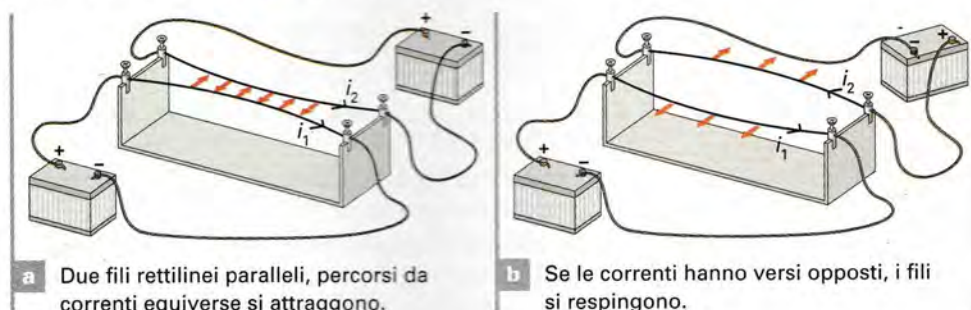
appena questo accade, nasce un momento torcente che si oppone al moto della spira e che tende a riportarla nella posizione di equilibrio. La spira comincia a oscillare intorno a questa posizione, finché l'attrito la fa fermare [► figura 3d].

▼ **Figura 3**
Spira rotante 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.

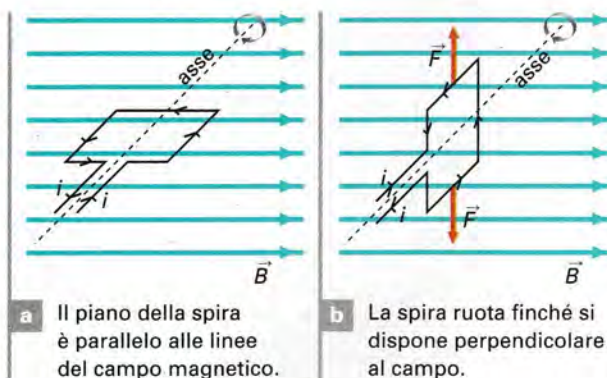
L'interazione tra fili rettilinei percorsi da corrente viene utilizzata per definire l'unità di misura della corrente elettrica nel SI.

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.

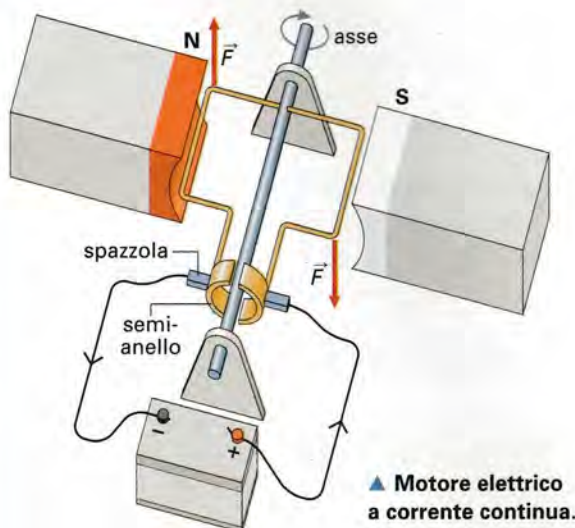


■ Il motore elettrico a corrente continua

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 tra-



sforma 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:

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

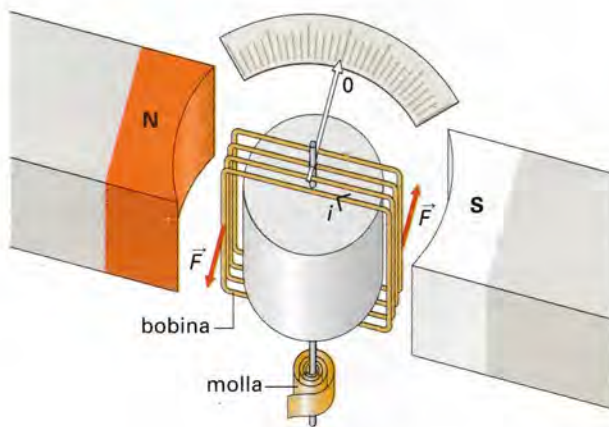
Se la bobina è composta da N spire, il momento è:

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

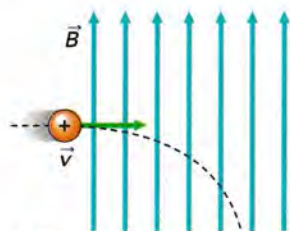
quindi è proporzionale all'intensità della corrente che circola nella bobina.

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 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 $\sin \alpha = 1$.

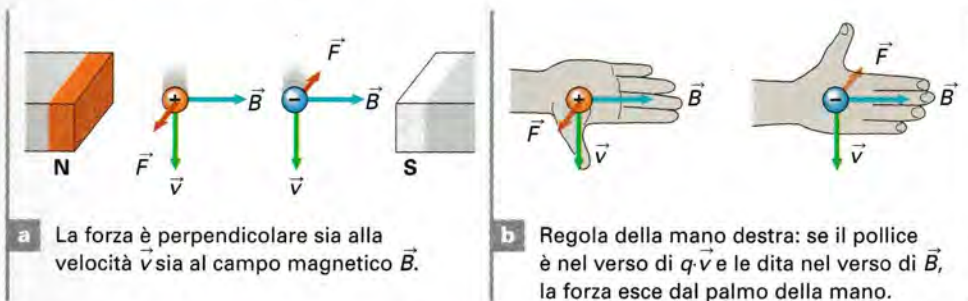
ESEMPIO 1 Un protone entra con velocità di $3,0 \times 10^4$ m/s in un campo magnetico di intensità $2,0 \times 10^{-5}$ T. La sua velocità forma con il campo magnetico un angolo di 30° . La forza sul protone è:

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

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:

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

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

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 :

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

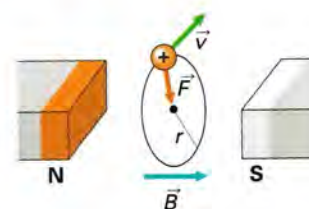
Poiché m , v , q e B sono costanti, anche r è costante e perciò la traiettoria è una circonferenza.

- **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].



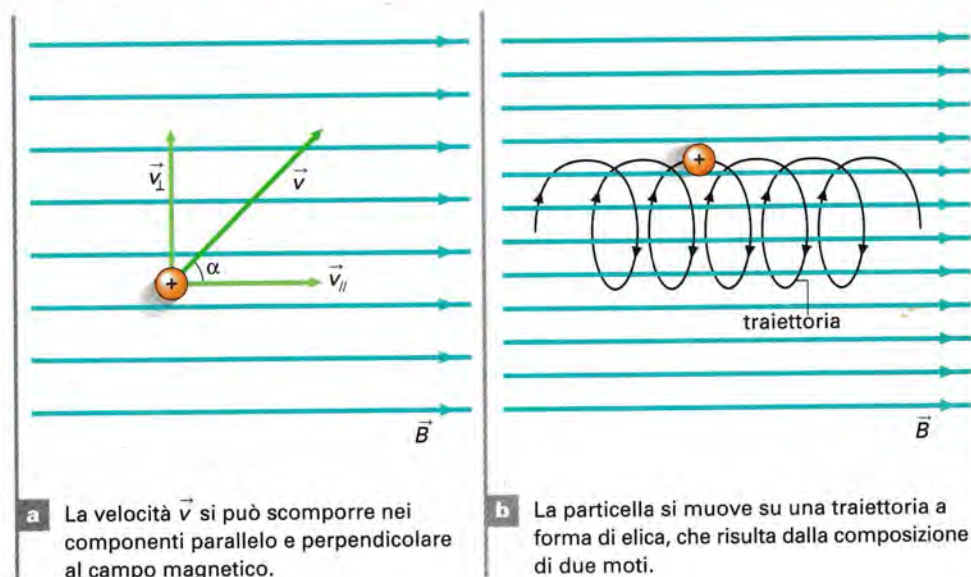
▲ Figura 3

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:

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



◀ Figura 4

Velocità non perpendicolare a \vec{B} .



Misura del campo magnetico

Scopo

- Calcolare il valore del campo magnetico, mediante la forza che il campo esercita su un conduttore percorso da corrente elettrica.

Procedimento

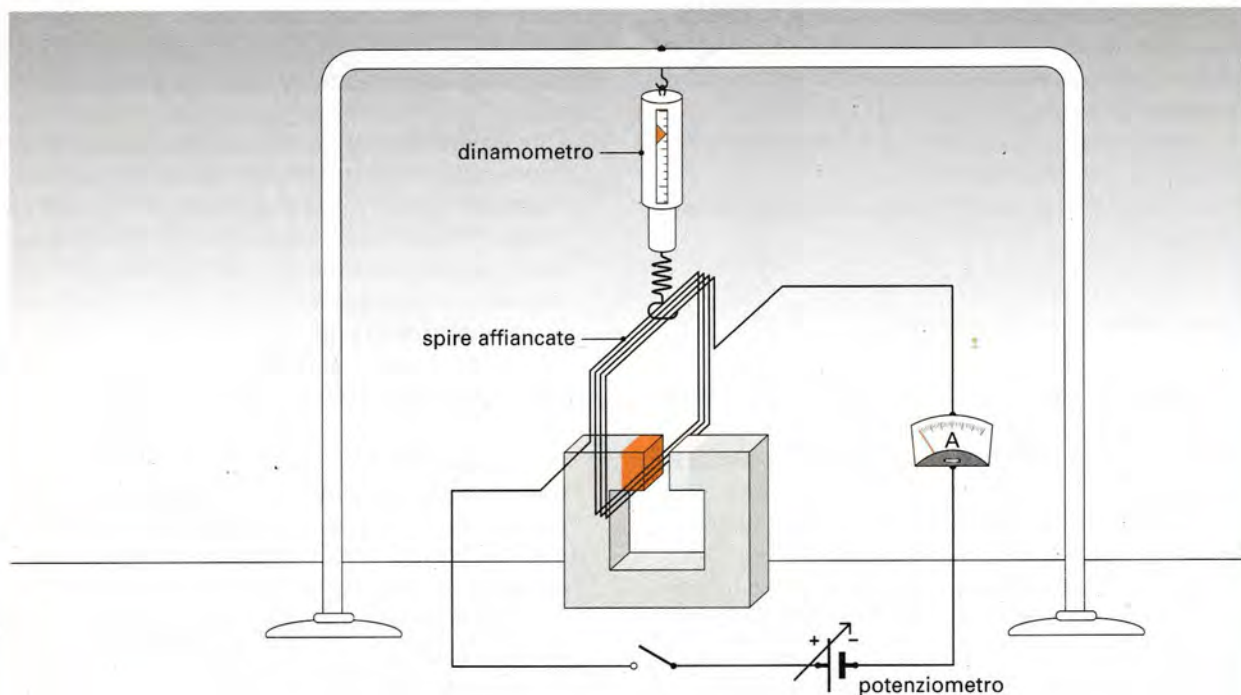
Inserisci un conduttore metallico percorso da corrente elettrica, perpendicolarmente a un campo magnetico. Note l'intensità della corrente i , la lunghezza l del conduttore e la forza F che si esercita su di esso, si può calcolare il valore del campo \vec{B} con la formula:

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

Come conduttore utilizza 4 o 5 spire rettangolari affiancate appese a un dinamometro (figura), in modo che la parte inferiore del conduttore sia confinata tra i poli del magnete.

- Misura la larghezza del magnete; la lunghezza l del conduttore immersa nel campo è uguale al prodotto tra la larghezza del magnete e il numero di spire.
- Riporta la lunghezza nella prima colonna della tabella.
- A circuito aperto, misura la forza F_0 che segna il dinamometro e riportala nella seconda colonna (F_0 è il peso del conduttore).
- Chiudi il circuito e regola la corrente in modo che passi, per esempio, 1 A. Riporta la corrente nella tabella.
- Leggi il valore F_1 segnato dal dinamometro e riportalo in tabella.
- Calcola la forza esercitata sul conduttore con la formula $F = F_1 - F_0$.
- Calcola il valore del campo magnetico \vec{B} .
- Solleva il dinamometro e riporta il conduttore nella posizione iniziale.
- Ripeti le operazioni aumentando il valore della corrente.

l	F_0	i	F_1	F	B



Il flusso del vettore \vec{B}

La corrente indotta

Il galvanometro è uno strumento che può misurare correnti molto piccole; se ha lo zero centrale permette di misurare correnti positive e correnti negative.

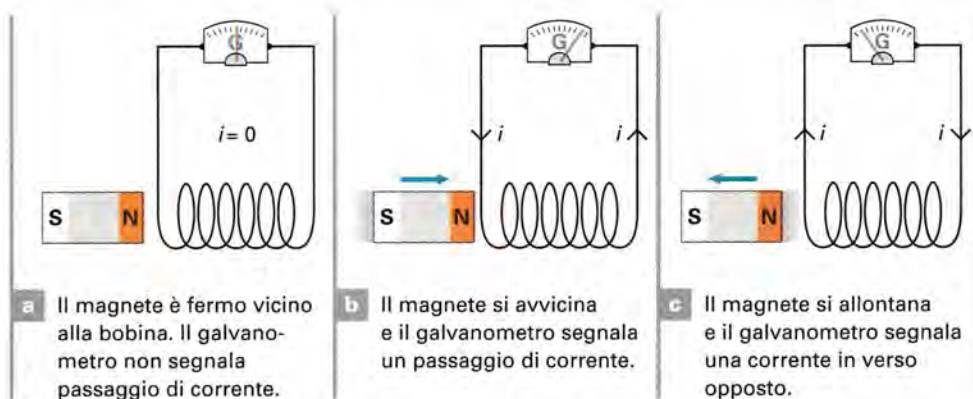
Consideriamo un circuito chiuso formato da una bobina collegata a un galvanometro a zero centrale, come nella ► figura 1a.

Se avviciniamo un magnete alla bobina, si nota che il galvanometro segna un passaggio di corrente in senso antiorario [► figura 1b].

Se il magnete sta fermo non passa più corrente; se invece viene allontanato dalla bobina, nel circuito passa di nuovo corrente ma in verso opposto [► figura 1c]. La corrente che circola nei due casi viene chiamata **corrente indotta**. Questa corrente non è creata da una pila, ma dal movimento del magnete.

Anche se il magnete sta fermo e la bobina si muove avanti e indietro, nel circuito c'è una corrente indotta.

► **Figura 1**
Corrente indotta in una bobina.



Sperimentalmente si osserva che la corrente indotta nella bobina dipende anche dalla rapidità del movimento: l'intensità della corrente è tanto più grande quanto più veloce è il movimento.

Da dove proviene la corrente indotta? Cerchiamo di capire che cosa succede quando uno dei due oggetti si muove rispetto all'altro, fissando l'attenzione sulle linee del campo prodotto dal magnete.

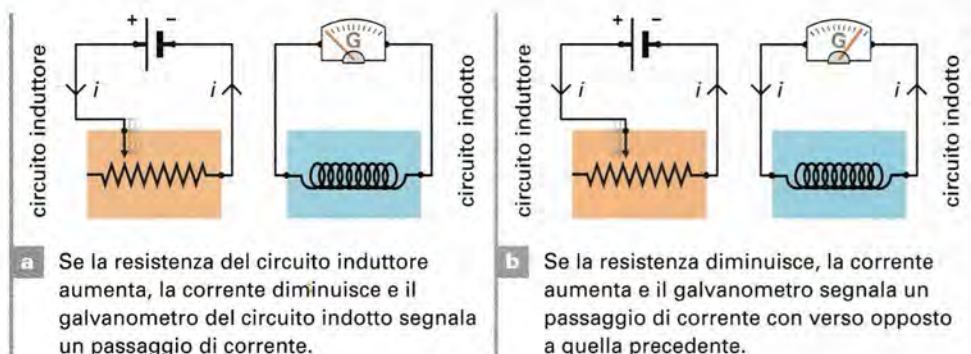
Se magnete e circuito sono fermi l'uno rispetto all'altro, il numero delle linee che attraversano la bobina rimane costante e nel galvanometro non circola corrente indotta.

Quando, invece, i due oggetti si muovono l'uno rispetto all'altro, il numero delle linee che attraversano la bobina cambia nel tempo. Per esempio, se il magnete si avvicina alla bobina ferma, il numero di linee del campo che attraversa la bobina aumenta, mentre, quando si allontana, il numero delle linee diminuisce.

Un altro esempio di corrente indotta

Nella ► figura 2a, a sinistra c'è un circuito comprendente una pila e un reostato, a destra un circuito con una bobina e un galvanometro. Chiamiamo *circuito induttore* il primo e *circuito indotto* il secondo. Aumentando la resistenza del reostato, per la prima legge di Ohm, la corrente i nel circuito induttore diminuisce; in tal caso si osserva che il galvanometro segnala una corrente indotta.

Se invece facciamo diminuire la resistenza del reostato, la corrente i aumenta; il galvanometro segnala una corrente indotta che circola in verso opposto a quella precedente [► figura 2b].



◀ **Figura 2**
Circuito induttore e circuito indotto.

Interpretiamo il fenomeno. La corrente nel circuito induttore crea un campo magnetico.

Se facciamo variare la corrente, varia anche il campo magnetico, quindi varia il numero delle linee di campo che attraversano la bobina del circuito indotto. Anche in questo caso, la corrente indotta è prodotta da una variazione del numero di linee del campo che attraversano la bobina del circuito indotto e in esso nasce una corrente indotta.

La definizione di flusso

Possiamo rendere quantitative le osservazioni precedenti introducendo una nuova grandezza fisica, che dipende dal campo \vec{B} e dalla superficie che le linee del campo attraversano. Consideriamo un campo magnetico uniforme \vec{B} e una superficie piana di area A immersa nel campo. Indichiamo con \vec{n} la normale alla superficie [► figura 3] e con B_{\perp} la componente del campo diretta lungo la normale.

Si chiama **flusso del vettore \vec{B}** attraverso la superficie il prodotto tra l'area A della superficie e la componente B_{\perp} . Indichiamo il flusso con $\Phi(B)$ (si legge «fi di B»):

$$\Phi(B) = A \cdot B_{\perp}$$

Nel SI il flusso magnetico si misura in weber (simbolo Wb):

$$1 \text{ Wb} = (1 \text{ m}^2) \times (1 \text{ T})$$

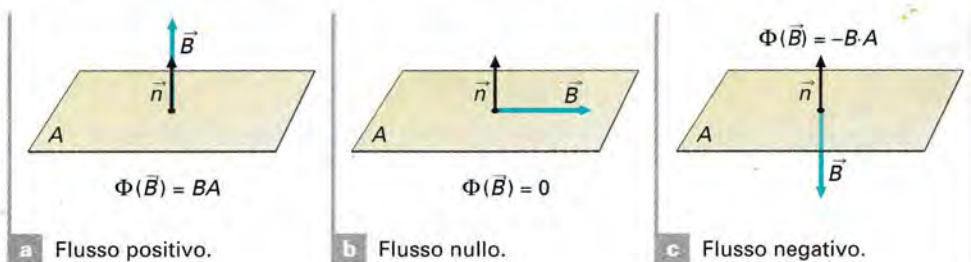
Se α è l'angolo che il vettore \vec{B} forma con la normale \vec{n} alla superficie, la componente B_{\perp} si calcola con il prodotto $B \cdot \cos \alpha$, perciò il flusso di \vec{B} è:

$$\Phi(B) = A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

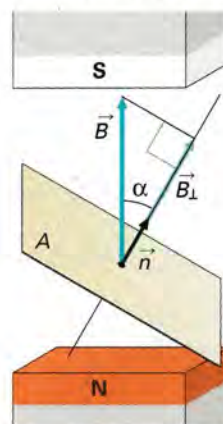
ESEMPIO 1 L'area della superficie è 20 cm^2 , il campo \vec{B} di valore $0,5 \text{ T}$ forma un angolo di 60° con la normale alla superficie. Il flusso di \vec{B} vale:

$$\Phi(B) = (20 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \times (0,5 \text{ T}) \times 0,5 = 5,0 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

Il flusso del vettore \vec{B} attraverso una superficie può essere positivo, negativo o nullo a seconda del valore dell'angolo α ; è massimo in valore assoluto quando il vettore \vec{B} è perpendicolare alla superficie, è nullo quando è parallelo [► figura 4].



▼ **Figura 3**
 \vec{n} è la normale alla superficie di area A ; B_{\perp} è diretta lungo la normale alla superficie.



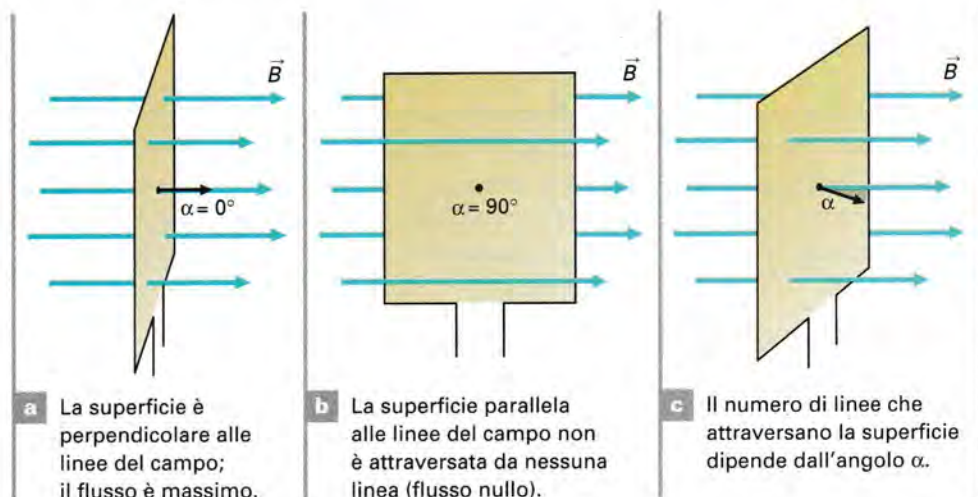
◀ **Figura 4**
Il flusso può essere positivo, negativo o nullo a seconda del valore che assume l'angolo fra il vettore \vec{B} e la normale alla superficie.

Il flusso e le linee del campo magnetico

Il flusso dipende dal numero di linee di campo che attraversano la superficie. Consideriamo, infatti, la spira rettangolare della ► figura 5; essa è immersa in un campo magnetico uniforme \vec{B} ed è libera di ruotare intorno al proprio asse.

Nella ► figura 5a il campo è perpendicolare alla superficie della spira, il numero di linee che l'attraversano è massimo, anche il flusso è massimo. Nella ► figura 5b il campo è parallelo alla superficie; nessuna linea attraversa la superficie, il flusso è nullo. In una posizione intermedia [► figura 5c], un certo numero di linee attraversa la superficie. In questo caso, il flusso assume un valore compreso fra zero e il prodotto $A \cdot B$; tale valore dipende dall'angolo α .

► **Figura 5**
Flusso attraverso una superficie.



Le variazioni di flusso

Nelle due esperienze descritte in precedenza, c'è una caratteristica comune: nel circuito indotto compare una corrente ogni volta che il numero di linee del campo cambia nel tempo. Poiché il numero di linee del campo e il flusso che attraversano una superficie sono strettamente legati, dobbiamo concludere che:

Nasce una corrente indotta ogni volta che il flusso del vettore \vec{B} attraverso il circuito indotto cambia nel tempo.

Sono importanti le variazioni nel tempo del flusso magnetico, piuttosto che il valore del flusso in un certo istante. Poiché nella definizione di flusso intervengono tre grandezze A , B e α , una variazione di flusso si manifesta ogni volta che cambia nel tempo una delle tre grandezze.

Il flusso attraverso una bobina

Ora possiamo interpretare le esperienze qualitative sulla corrente indotta in termini di flusso magnetico. Il flusso del vettore \vec{B} attraverso una spira di area A è:

$$\Phi(B) = A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

il flusso attraverso una bobina di N spire tutte di area A è N volte maggiore:

$$\Phi(B) = N \cdot A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

Perciò, per avere grandi variazioni di flusso, conviene utilizzare delle bobine con molte spire.

La legge di Faraday-Neumann-Lenz

La causa delle correnti indotte

Tutte le volte che varia il flusso magnetico attraverso un circuito chiuso, nel circuito viene generata una corrente indotta. Poiché sappiamo che una corrente è prodotta da una differenza di potenziale, dobbiamo supporre che nel circuito indotto si crei una differenza di potenziale che fa circolare la corrente indotta. Questa differenza di potenziale non è fornita da una pila o da un altro generatore di d.d.p., ma da una variazione del flusso magnetico che attraversa il circuito indotto; d'ora in poi la chiameremo **d.d.p. indotta** (o tensione indotta).

variazione di flusso magnetico \Rightarrow d.d.p. indotta \Rightarrow corrente indotta

Per accertare la presenza di una d.d.p. indotta in un circuito, basta sostituire il galvanometro, che segnala il passaggio di corrente, con un voltmetro.

La legge di Faraday-Neumann

Il legame tra la differenza di potenziale indotta, che indichiamo con ΔV_i , e la variazione di flusso magnetico $\Delta\Phi(B)$ è stabilito dalla **legge di Faraday-Neumann**:

La d.d.p. indotta in un circuito chiuso è direttamente proporzionale alla variazione di flusso magnetico e inversamente proporzionale all'intervallo di tempo in cui avviene tale variazione.

$$\Delta V_i = \frac{\Delta\Phi(B)}{\Delta t}$$

d.d.p. indotta (V)
variazione di flusso (Wb)
intervallo di tempo (s)

La d.d.p. indotta è tanto maggiore quanto più velocemente varia il flusso del campo magnetico \vec{B} che attraversa il circuito.

Se il circuito indotto ha una resistenza R , per la prima legge di Ohm vi circola una corrente indotta:

$$i_{\text{indotta}} = \frac{\Delta V_i}{R}$$

ESEMPIO 1 Se il flusso di \vec{B} attraverso una spira varia di 0,002 Wb in un centesimo di secondo, la d.d.p. indotta nella spira vale:

$$\Delta V_i = \frac{\Delta\Phi(B)}{\Delta t} = \frac{0,002 \text{ Wb}}{0,01 \text{ s}} = 0,2 \text{ V}$$

Se la spira ha una resistenza di 10 Ω , la corrente indotta che vi circola è:

$$i_{\text{indotta}} = \frac{0,2 \text{ V}}{10 \Omega} = 0,02 \text{ A}$$

La d.d.p. indotta da una variazione di flusso non è costante nel tempo e provoca una corrente indotta non continua. Infatti, si vede sperimentalmente che l'ago del galvanometro, dopo essersi spostato, torna sullo zero perché la corrente si annulla quando il flusso non varia più. Così come è scritta, la legge di Faraday-Neumann permette di calcolare una d.d.p. media e non istantanea.

La legge di Lenz

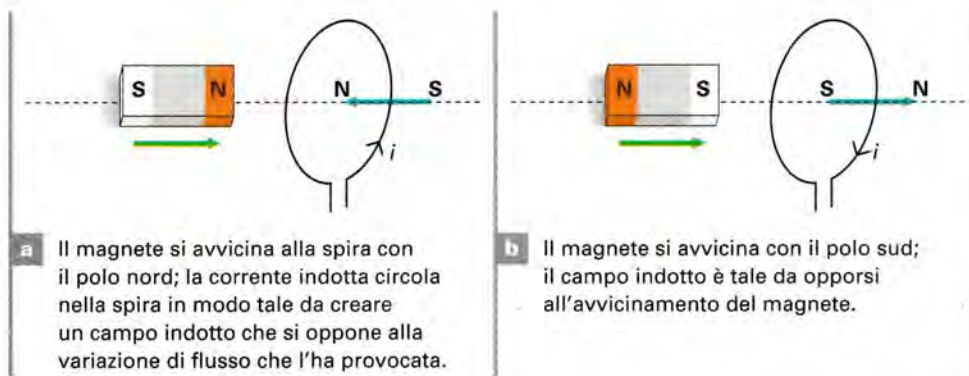
Il fisico russo Emilij C. Lenz (1804-1865) ha stabilito il verso della corrente indotta:

Una corrente indotta circola sempre in verso tale da creare un campo magnetico indotto che si oppone alla causa che l'ha generato, cioè alla variazione di flusso.

Chiariamo la legge di Lenz con l'esempio della ► figura 1, in cui un magnete viene spinto verso una spira circolare ► figura 1a]. La corrente indotta circola nella spira in modo tale che il campo che essa genera si oppone al movimento del magnete. Viceversa, se il magnete viene spinto con il polo sud verso la spira ► figura 1b], la corrente indotta circola in verso opposto e in tal modo oppone il polo sud al magnete e lo respinge.

Tenendo presente la legge di Lenz, la legge di Faraday-Neumann va riscritta ponendo un segno meno davanti alla variazione di flusso nel tempo:

$$\Delta V_i = \frac{-\Delta\Phi(B)}{\Delta t}$$



◀ **Figura 1**
Verifica della legge di Lenz.

La corrente indotta trasporta energia elettrica. Da dove proviene questa energia se nel circuito non c'è un generatore?

Per rispondere, vediamo cosa succederebbe se la legge di Lenz non fosse vera. La corrente indotta produrrebbe un campo magnetico nella spira con un polo sud che verrebbe attratto dal magnete. Quindi non sarebbe necessario compiere lavoro sul magnete per farlo avanzare, in contraddizione con il principio di conservazione dell'energia.

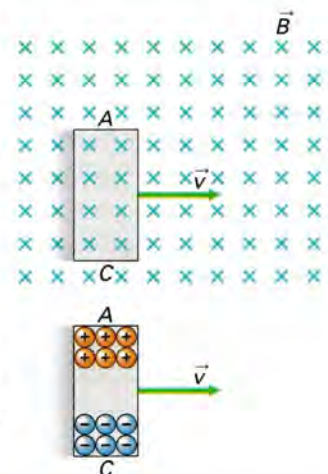
L'energia elettrica delle cariche che si muovono nella spira deriva dal lavoro che viene fatto per spingere il magnete. La legge di Lenz è coerente con il principio di conservazione dell'energia.

La forza elettromotrice indotta

Se il flusso di \vec{B} cambia attraverso un circuito aperto, in esso non può circolare corrente. Il fenomeno dell'induzione però è presente ugualmente; ai capi del circuito aperto si stabilisce una forza elettromotrice indotta che indichiamo con $f.e.m._{indotta}$. La legge di Faraday-Neumann-Lenz vale ancora nella forma:

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

Consideriamo la sbarra della ► figura 2. Nella sbarra sono presenti elettroni liberi. Mentre essa si muove in un campo magnetico che entra nel piano del foglio, gli elettroni sono trascinati con la stessa velocità nel verso del movimento e su ognuno di essi si esercita la **forza di Lorentz** che li spinge verso l'estremo C della sbarra. Il risultato è che l'estremo C si carica negativamente e l'estremo A si carica positivamente. Per effetto di questa **ridistribuzione** delle cariche, agli estremi della sbarra si crea una f.e.m. indotta.

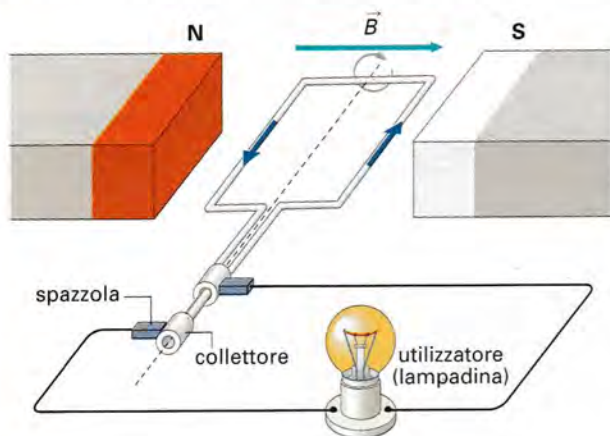


▲ **Figura 2**
Mentre la sbarra si muove, la forza di Lorentz spinge gli elettroni verso l'estremo C che si carica negativamente; nello stesso tempo l'estremo A si carica positivamente. Fra A e C si crea una differenza di potenziale.



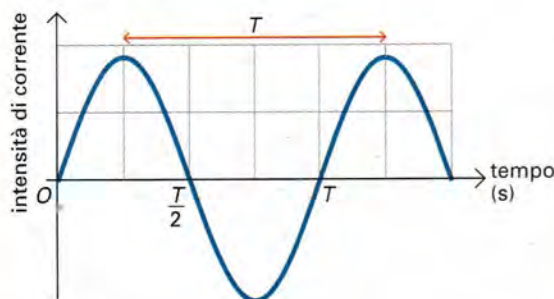
■ Come funziona un alternatore

L'**alternatore** è un dispositivo che permette di produrre energia elettrica, sfruttando il fenomeno dell'induzione magnetica. Una spira rettangolare che ruota dentro un campo magnetico uniforme, intorno a un asse perpendicolare alle linee del campo, è un semplice alternatore. Mentre la spira ruota, il flusso del campo magnetico che attraversa l'area della spira cambia. Per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, nasce una tensione indotta che, a sua volta, fa circolare una corrente nel circuito esterno.



Gli estremi della spira sono saldati a due anelli metallici (*collettori*) che ruotano insieme alla spira. Sui collettori poggiano due contatti striscianti (*spazzole*) realizzati con blocchetti di grafite, che hanno la funzione di inviare la corrente indotta nella spira verso il circuito esterno, senza impedire la rotazione della spira stessa.

Nel circuito esterno circola una corrente che cambia verso ogni mezzo periodo e varia con la stessa frequenza con cui ruota la spira.

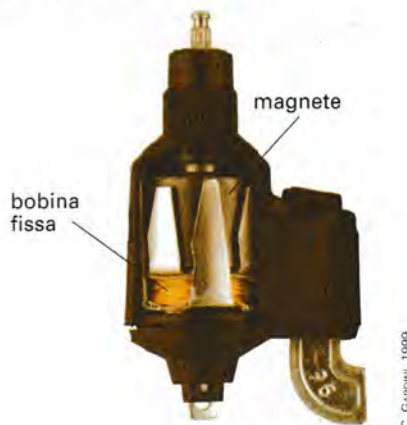


■ La dinamo della bicicletta

In un alternatore, la spira in cui si crea la corrente si chiama *indotto* e il magnete che provoca l'induzione si chiama *induttore*.

La dinamo della bicicletta è un alternatore a indotto fisso. Infatti è costituita da una bobina fissa collegata alla lampadina e da un magnete collegato alla ruota. Quando la ruota gira, anche il magnete gira e fa variare il flusso concatenato con la bobina. Finché il magnete gira, nel circuito passa una corrente elettrica.

Per mantenere la corrente elettrica nella lampadina bisogna spendere energia pedalando.



Anche l'alternatore presente in ogni automobile trasforma una parte dell'energia cinetica dell'albero motore in energia elettrica, che viene immagazzinata nella batteria.

■ Gli alternatori industriali

La maggior parte degli alternatori sono a indotto fisso (*statore*) e induttore mobile (*rotore*). Negli alternatori industriali, come quelli delle centrali elettriche, il rotore non è un magnete ma un elettromagnete, cioè un filo conduttore avvolto attorno a un nucleo di ferro e percorso da una corrente continua. L'elettromagnete è più vantaggioso del magnete perché permette di ottenere un campo magnetico inducente più intenso e quindi un flusso magnetico concatenato con l'indotto molto maggiore.



Induttanza e autoinduzione

L'induttanza di una bobina

Quando una bobina di lunghezza l , composta da N spire, viene percorsa da una corrente di intensità i , lungo l'asse della bobina si crea un campo magnetico che si calcola con la formula:

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

Il flusso di \vec{B} attraverso le N spire, ognuna di area A , è direttamente proporzionale a B :

$$\Phi(B) = N \cdot A \cdot B$$

Poiché B è direttamente proporzionale alla corrente i che attraversa la bobina, possiamo affermare che il flusso di \vec{B} è direttamente proporzionale alla corrente i e quindi il rapporto tra flusso e corrente è costante:

$$\frac{\Phi(B)}{i} = \text{costante}$$

La costante di proporzionalità si chiama **induttanza** o *coefficiente di autoinduzione* della bobina. Nel SI l'induttanza si misura in weber/ampere, cioè in henry (simbolo H);

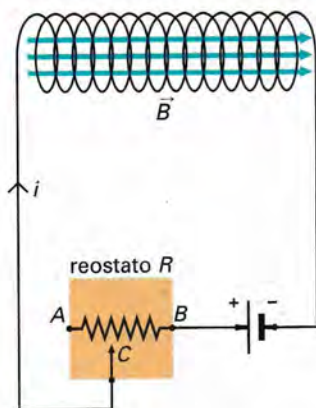
$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ Wb}}{1 \text{ A}}$$

L'induttanza, che di solito si indica con la lettera L , è una proprietà intrinseca di ogni circuito e dipende dalle caratteristiche geometriche. Nel caso di una bobina l'induttanza è:

$$L = \frac{\Phi(B)}{i} = \frac{N \cdot A \cdot B}{i} = \frac{2\pi \cdot k \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

ESEMPIO 1 Una bobina lunga 10 cm, di 400 spire, ognuna di area 20 cm^2 , ha un'induttanza:

$$L = \frac{6,28 \times (2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2) \times 400^2 \times (20 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{0,1 \text{ m}} = 0,04 \text{ H}$$



▲ Figura 1

Con il reostato si può modificare la corrente che passa nella bobina. Al variare della corrente, varia il flusso del campo che attraversa la bobina stessa.

L'autoinduzione

Nel circuito della ► figura 1, la pila fa circolare una corrente i nella bobina. La corrente crea a sua volta un campo magnetico \vec{B} che attraversa le spire della bobina. Modificando il valore della corrente, mediante il reostato, il valore di \vec{B} cambia e quindi cambia il flusso che attraversa ogni spira della bobina.

Se al tempo t_1 la corrente vale i_1 e al tempo t_2 vale i_2 , i rispettivi valori del flusso sono:

$$\Phi_1(B) = L \cdot i_1 \text{ e } \Phi_2(B) = L \cdot i_2;$$

la conseguente variazione di flusso nell'intervallo di tempo Δt è

$$\Delta\Phi(B) = \Phi_2(B) - \Phi_1(B) = L \cdot i_2 - L \cdot i_1 = L \cdot \Delta i$$

Per la legge di Faraday-Neumann, nel circuito nasce una tensione indotta. Questo fenomeno si chiama **autoinduzione** e la tensione prodotta si dice *autoindotta*.

Il valore della tensione autoindotta è:

$$\Delta V_{\text{autoindotta}} = \frac{-\Delta\Phi(B)}{\Delta t} = \frac{-L \cdot \Delta i}{\Delta t}$$

La tensione autoindotta è proporzionale all'induttanza del circuito. Il segno meno deriva dal fatto che è valida la legge di Lenz, perciò la f.e.m. autoindotta si oppone alla causa che la genera. Ciò significa che la bobina si oppone sia all'aumento sia alla diminuzione della corrente che l'attraversa.

Il trasformatore

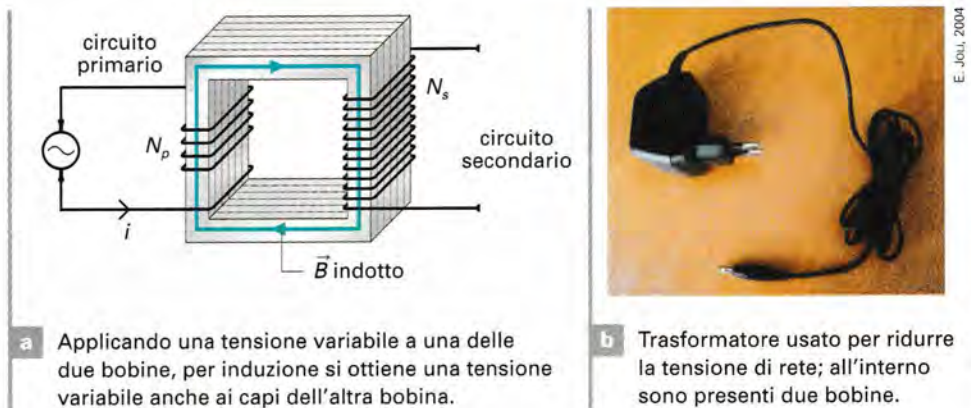
Circuito primario e circuito secondario

Nella ► figura 1a è disegnato un nucleo di ferro lamellare su cui sono avvolte due bobine con un numero differente di spire; il dispositivo si chiama **trasformatore** e permette di modificare la tensione alternata applicata a una delle due bobine.

Supponiamo che le due bobine abbiano resistenza trascurabile. In tal modo possiamo pensare che i due circuiti siano puramente induttivi.

La bobina di sinistra formata da N_p spire (il pedice p indica il *circuito primario*), è percorsa da una corrente alternata che crea un campo magnetico variabile. Le linee di flusso di questo campo, canalizzate dal ferro, attraversano le spire della bobina di destra formata da N_s spire (s indica il *circuito secondario*). Per la legge di Faraday-Neumann, nel circuito secondario nasce una f.e.m. indotta che ha la stessa frequenza di quella del primario.

► **Figura 1**
Il trasformatore.



a Applicando una tensione variabile a una delle due bobine, per induzione si ottiene una tensione variabile anche ai capi dell'altra bobina.

b Trasformatore usato per ridurre la tensione di rete; all'interno sono presenti due bobine.

Il rapporto di trasformazione

Indichiamo con V_p la tensione efficace agli estremi del circuito primario e con V_s quella agli estremi del circuito secondario. Se il circuito secondario è aperto, cioè non circola corrente, vale l'uguaglianza:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Il rapporto fra il numero di spire del secondario e quello del primario (N_s/N_p) si chiama **rapporto di trasformazione** ed è un numero caratteristico di ogni trasformatore. La tensione efficace ai capi del circuito secondario è:

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \cdot V_p$$

Pertanto, se $N_s > N_p$ allora anche $V_s > V_p$; in tal caso il trasformatore si dice **elevatore** di tensione. Il trasformatore della ► figura 1a è un elevatore.

Viceversa, se $N_s < N_p$ anche $V_s < V_p$, il trasformatore si dice **riduttore** di tensione.

MATEMATICA
• Date due uguaglianze, il rapporto fra i primi membri è uguale al rapporto fra i secondi membri.

ESEMPIO 1 Il circuito primario è costituito da 100 spire, il secondario da 1000 spire. Se applichiamo una d.d.p. di 220 V al primario, il trasformatore la fa aumentare di 10 volte; infatti la d.d.p. indotta al secondario vale:

$$V_s = \frac{V_p \cdot N_s}{N_p} = \frac{(220 \text{ V}) \times 1000}{100} = 2200 \text{ V}$$

Il rendimento del trasformatore

Se il circuito secondario è chiuso su un utilizzatore, in assenza di dispersioni di energia (trasformatore ideale), la potenza media fornita al primario (P_p) è uguale alla potenza media disponibile sul circuito secondario (P_s):

$$P_p = P_s$$

$$V_p \cdot i_p = V_s \cdot i_s$$

dove i_p e i_s sono i valori efficaci delle correnti.

Il prodotto fra la tensione efficace e la corrente efficace è identico per i due circuiti. Che cosa significa? Supponiamo che V_s sia maggiore di V_p , come nella ► figura 2. Affinché i due prodotti siano uguali, i_s deve essere minore di i_p ; questo significa che se il trasformatore è un elevatore allora riduce il valore dell'intensità di corrente.

Se il trasformatore aumenta la tensione di un certo fattore, allora diminuisce la corrente dello stesso fattore.

In un trasformatore reale, però, la potenza P_s disponibile al secondario è sempre minore della potenza P_p fornita al primario. Il rapporto fra la potenza disponibile e quella fornita è il **rendimento** del trasformatore:

$$r = \frac{P_s}{P_p}$$

Il trasformatore è un dispositivo con un alto rendimento, in genere superiore al 90%.

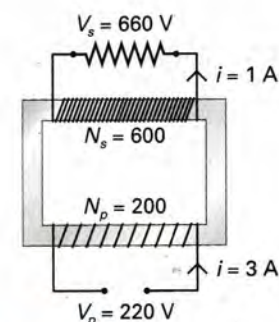
ESEMPIO 2 Un trasformatore con un rendimento del 92%, a cui viene fornita una potenza media di 10 W, fornisce al secondario una potenza media:

$$P_s = 0,92 \times (10 \text{ W}) = 9,2 \text{ W}$$

Utilizzo dei trasformatori

I trasformatori trovano largo impiego in molti dispositivi che per funzionare necessitano di tensioni diverse da quelle presenti nelle prese domestiche (220 V). Nei dispositivi elettronici, come radio, registratori, videogiochi, computer, lettori DVD ecc. [► figura 3a] sono necessari alcuni volt per il funzionamento; essi vengono collegati alla rete mediante dei trasformatori riduttori.

In altri dispositivi, come il fulmina-insetti [► figura 3b], invece, sono necessari migliaia di volt e quindi bisogna utilizzare un trasformatore elevatore.



▲ **Figura 2**
Il secondario è chiuso su una resistenza R ; il trasformatore eleva la tensione ma riduce la corrente.



a Il lettore DVD utilizza una tensione di 12 V; collegato a una presa domestica necessita di un riduttore di tensione.



b Il fulmina-insetti lavora a tensione di 3500-4000 V, per funzionare necessita di un trasformatore elevatore.

◀ **Figura 3**
Uso di trasformatori.

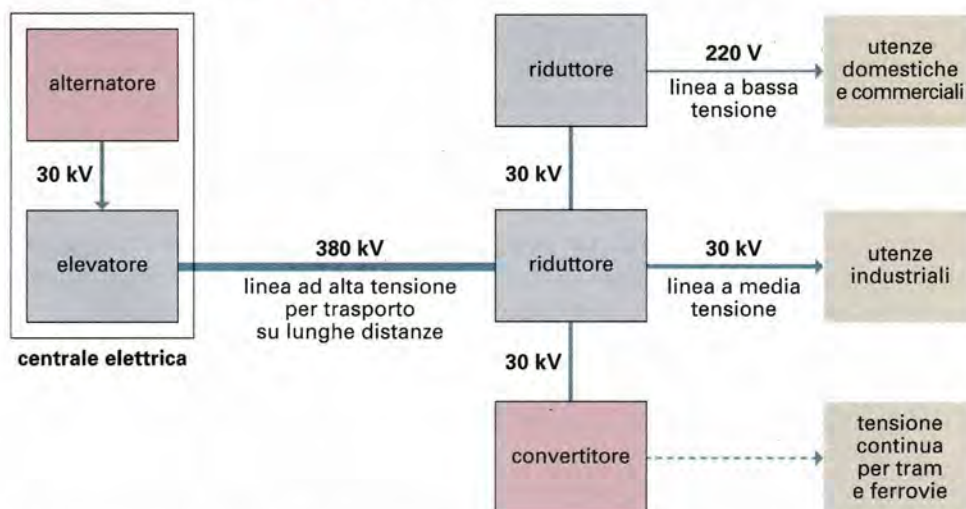
Il trasporto della corrente a distanza

Trasformatori elevatori e riduttori sono indispensabili nel trasporto dell'energia elettrica a grandi distanze.

Per esempio, se in una centrale elettrica viene prodotta corrente con tensione di circa 30 000 V, mediante un trasformatore la tensione viene elevata a 380 000 V e trasportata a distanza con una linea ad alta tensione. In prossimità del luogo di utilizzo, la tensione viene di nuovo abbassata a 30 000 V con un secondo trasformatore che funziona da riduttore di tensione. Infine un terzo trasformatore riduce di nuovo la tensione alternata a 220 V [► figura 4].

► **Figura 4**

Nel trasporto dell'energia elettrica a distanza si fa largo uso dei trasformatori sia per elevare la tensione sia per abbassarla.



Perché si usano linee ad alta tensione? Per capire perché nella trasmissione di energia elettrica si usano linee ad alta tensione, calcoliamo le perdite di potenza lungo una linea. Supponiamo che un alternatore debba trasmettere a un utente 3 kW di potenza su una linea di trasmissione che ha una resistenza complessiva di 5 Ω.

- **Primo caso:** la trasmissione avviene con una tensione di 220 V.

La corrente che passa sulla linea è:

$$i = \frac{P}{\Delta V} = \frac{3000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 13,6 \text{ A}$$

La perdita di potenza per effetto Joule è:

$$P = R \cdot i^2 = (5 \Omega)(13,6 \text{ A})^2 = 925 \text{ W}$$

La perdita di potenza è:

$$\frac{925 \text{ W}}{3000 \text{ W}} = 0,31$$

che corrisponde al 31%.

- **Secondo caso:** la trasmissione avviene con una tensione 10 volte più grande, 2200 V. In questo caso, la corrente che passa sulla linea è 10 volte più piccola, infatti:

$$i = \frac{3000 \text{ W}}{2200 \text{ V}} = 1,36 \text{ A}$$

e la perdita di potenza sulla linea è:

$$P = R i^2 = (5 \Omega)(1,36 \text{ A})^2 = 9,25 \text{ W}$$

La perdita percentuale di potenza è:

$$\frac{9,25 \text{ W}}{3000 \text{ W}} = 0,0031$$

che corrisponde a 0,31%.

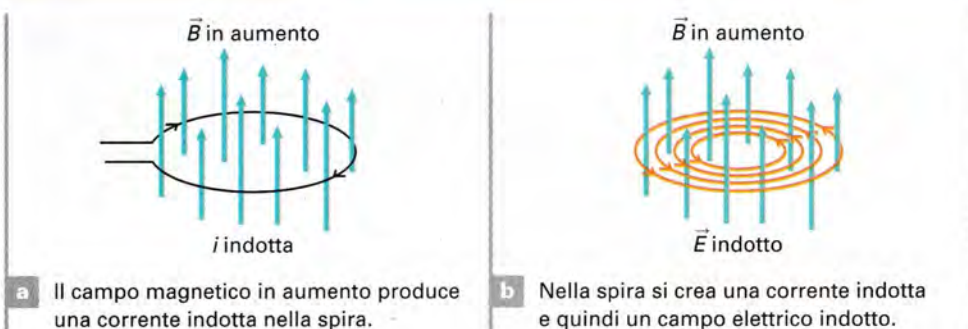
Il campo elettromagnetico

Campi variabili

Consideriamo un campo magnetico variabile (in aumento) diretto come nella ► figura 1a. Per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, la spira dentro al campo viene percorsa da una corrente indotta in senso orario; perciò è presente anche un campo elettrico indotto che fa muovere le cariche elettriche nella spira. Le linee di forza di questo campo sono perpendicolari a quelle del campo \vec{B} ► figura 1b]. Il risultato è che:

Un campo magnetico variabile crea un campo elettrico indotto le cui linee di forza sono chiuse attorno alle linee del campo magnetico che l'ha prodotto.

► Figura 1
Campo elettrico indotto.



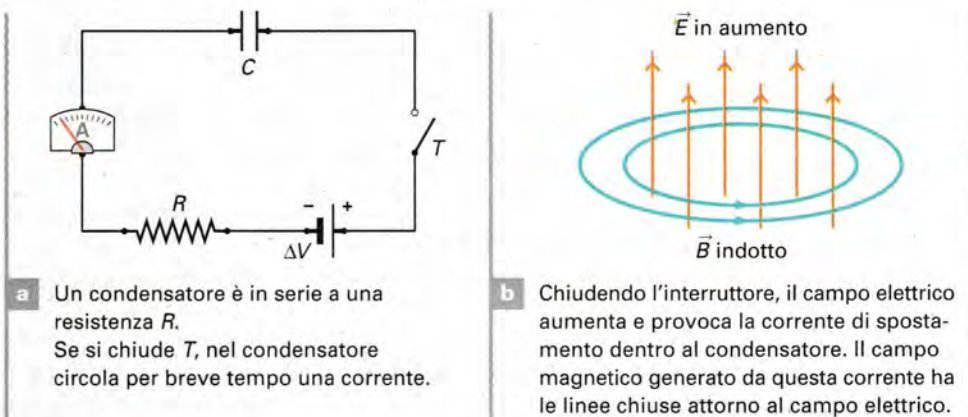
Nella ► figura 2a un condensatore è collegato a un generatore. Quando si chiude l'interruttore, l'amperometro segna un passaggio di corrente finché dura la carica del condensatore. Come può circolare la corrente dal momento che fra le armature del condensatore c'è un isolante?

Mentre il condensatore si carica, la quantità di carica sulle armature cambia nel tempo, quindi anche il campo elettrico fra le armature cambia. Questo cambiamento produce una corrente variabile che si chiama **corrente di spostamento**, che a sua volta produce un campo magnetico indotto ► figura 2b]. Ne deriva che:

Una variazione del campo elettrico produce nello spazio circostante un campo magnetico indotto, le cui linee sono chiuse attorno al campo elettrico che l'ha generato.

Se al posto del generatore di d.d.p. continua inseriamo nel circuito un alternatore, la corrente di spostamento dura nel tempo.

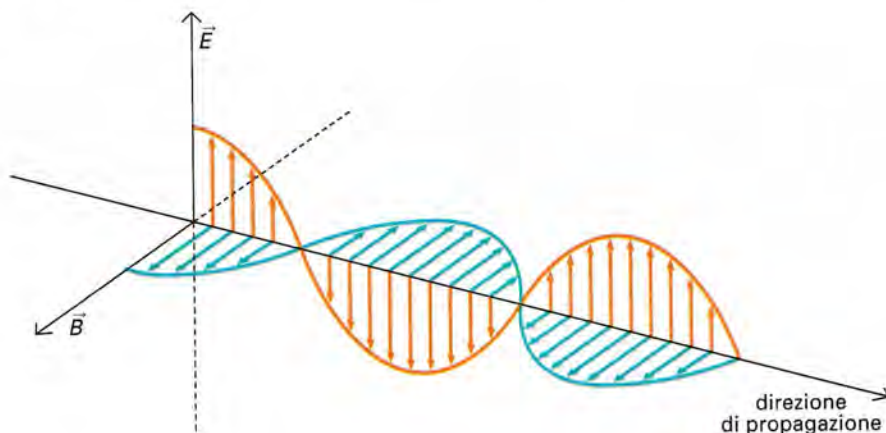
► Figura 2
Corrente di spostamento.



Il campo elettromagnetico

Riepiloghiamo i due fatti importanti descritti. La variazione del campo magnetico genera un campo elettrico, anch'esso variabile; la variazione del campo elettrico genera un campo magnetico variabile. In entrambi i casi, nella stessa regione dello spazio, sono presenti due campi variabili, uno magnetico e l'altro elettrico, cioè un **campo elettromagnetico**, che si propaga nello spazio ► figura 3].

Il campo elettromagnetico si propaga come un'onda trasversale (**onda elettromagnetica**); la direzione di propagazione è perpendicolare sia al vettore \vec{E} , sia al vettore \vec{B} .



◀ **Figura 3**

Il campo elettrico \vec{E} e il campo magnetico \vec{B} sono perpendicolari fra loro e oscillano entrambi mentre si propagano.

James Clerk Maxwell (1831-1879) dimostrò per via teorica che il campo elettromagnetico si propaga nel vuoto con una velocità di 3×10^8 m/s. La velocità prevista teoricamente da Maxwell era uguale a quella, allora già nota, della luce nel vuoto. Da questo fatto nacque l'ipotesi della natura elettromagnetica della luce.

La verifica sperimentale dell'esistenza delle onde elettromagnetiche si ebbe nel 1888, nove anni dopo la morte di Maxwell, ad opera di Heinrich Hertz che riuscì a produrre e rivelare le onde elettromagnetiche.

RICHIAMO

● Velocità della luce nel vuoto: $c = 3,0 \times 10^8$ m/s.

Le proprietà delle onde elettromagnetiche

Le grandezze che caratterizzano un'onda elettromagnetica (o campo elettromagnetico) sono quelle tipiche dei fenomeni ondulatori: lunghezza d'onda λ , frequenza f e velocità di propagazione v , legate dalla relazione:

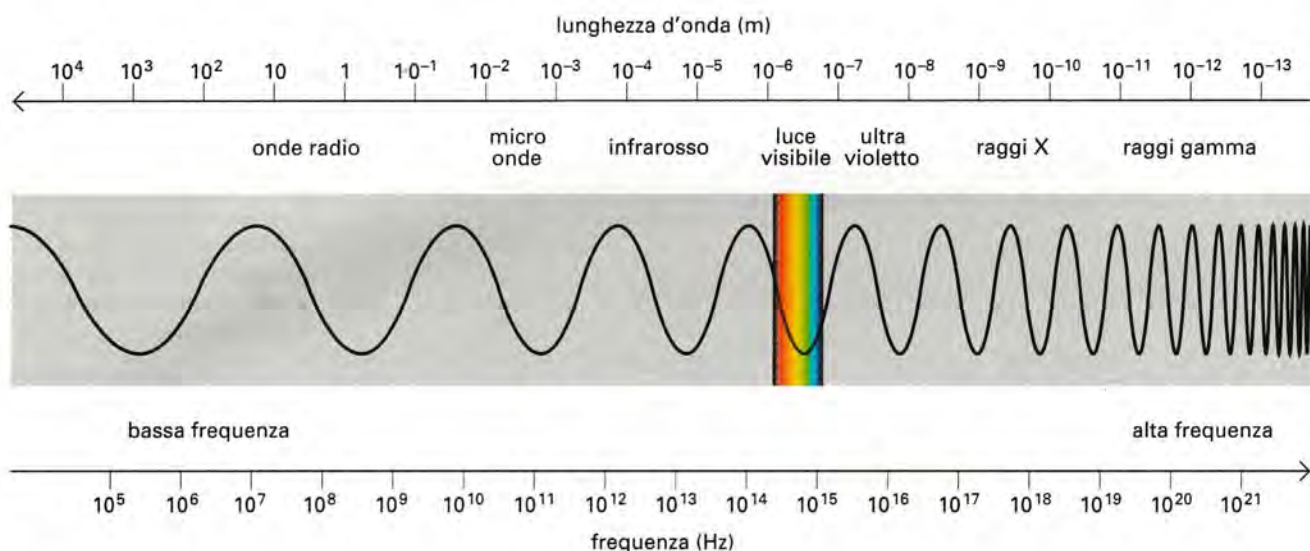
$$\lambda \cdot f = v$$

Riassumiamo le proprietà delle onde elettromagnetiche:

- ogni onda è costituita da un campo elettrico e un campo magnetico, entrambi variabili con la stessa frequenza;
- le onde elettromagnetiche sono trasversali: i vettori \vec{E} e \vec{B} sono sempre perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda;
- al contrario delle onde meccaniche, le onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto;
- in un mezzo omogeneo, le onde si propagano in linea retta e con velocità costante;
- la velocità di un'onda elettromagnetica nel vuoto è uguale a quella della luce, mentre in un mezzo è minore;
- come tutte le onde, anche quelle elettromagnetiche mentre si propagano trasportano energia;
- le onde elettromagnetiche subiscono gli stessi fenomeni delle onde luminose: riflessione, rifrazione, diffrazione e interferenza.

Lo spettro elettromagnetico

Le onde elettromagnetiche coprono una vasta gamma di frequenze, che formano lo **spettro elettromagnetico**. Lo spettro è suddiviso in regioni [► figura 4]: onde radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X, raggi gamma.



▲ **Figura 4**
Spettro delle onde elettromagnetiche.

La classificazione non è ben definita perché zone adiacenti nello spettro si sovrappongono parzialmente.

- **Onde radio** ($10^6 \text{ Hz} < f < 10^9 \text{ Hz}$). Sono prodotte in vario modo; in particolare mediante elettroni accelerati o correnti alternate che circolano in antenne metalliche. Radio e televisori utilizzano per le trasmissioni le onde elettromagnetiche che hanno le frequenze più basse, quindi le lunghezze d'onda più alte.
- **Microonde** ($10^9 \text{ Hz} < f < 10^{12} \text{ Hz}$). Sono prodotte mediante circuiti elettronici. Due applicazioni molto comuni delle microonde sono le comunicazioni a distanza e il forno a microonde.
- **Infrarosso** ($10^{12} \text{ Hz} < f < 4,2 \times 10^{14} \text{ Hz}$). Le onde infrarosse sono prodotte dalla rotazione e vibrazione delle molecole. Quando sono assorbite dai corpi, producono calore e quindi aumento di temperatura. In ambiente domestico, utilizziamo le onde infrarosse quando usiamo un telecomando.
- **Luce visibile** ($4,0 \times 10^{14} \text{ Hz} < f < 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$). I nostri occhi sono sensibili solo a una piccola parte dell'intero spettro elettromagnetico, detta regione del visibile.
- **Ultravioletto** ($7,5 \times 10^{14} \text{ Hz} < f < 10^{17} \text{ Hz}$). Le onde ultraviolette provengono dal Sole e la maggior parte è assorbita dall'ozono presente nell'atmosfera terrestre. Non sono visibili, ma possiamo notare i loro effetti sulla pelle, perché favoriscono la produzione di melatonina, un pigmento che colora la pelle e provoca abbronzatura.
- **Raggi X** ($10^{17} \text{ Hz} < f < 10^{20} \text{ Hz}$). Possono essere prodotti facendo urtare elettroni molto veloci contro una lastra metallica, per esempio di tungsteno. Questi raggi attraversano facilmente il corpo umano perché sono assorbiti poco dai tessuti molli e dalla pelle. Non sono assorbiti dai materiali densi, come le ossa e i denti perciò sono usati per fare radiografie del corpo umano.
- **Raggi gamma**. ($f > 10^{20} \text{ Hz}$). Sono prodotti nelle reazioni nucleari, nei grandi acceleratori di particelle o spontaneamente dai nuclei radioattivi. Sono raggi che trasportano molta energia e quindi hanno un forte potere penetrante. Distruggono le cellule viventi e per questo motivo sono utilizzati per bruciare le cellule tumorali. Sono anche usati per sterilizzare strumenti chirurgici.