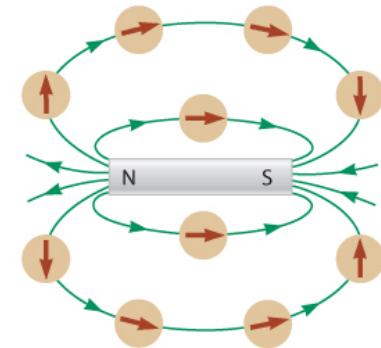




# Forze e Campi Magnetici

# Il campo magnetico

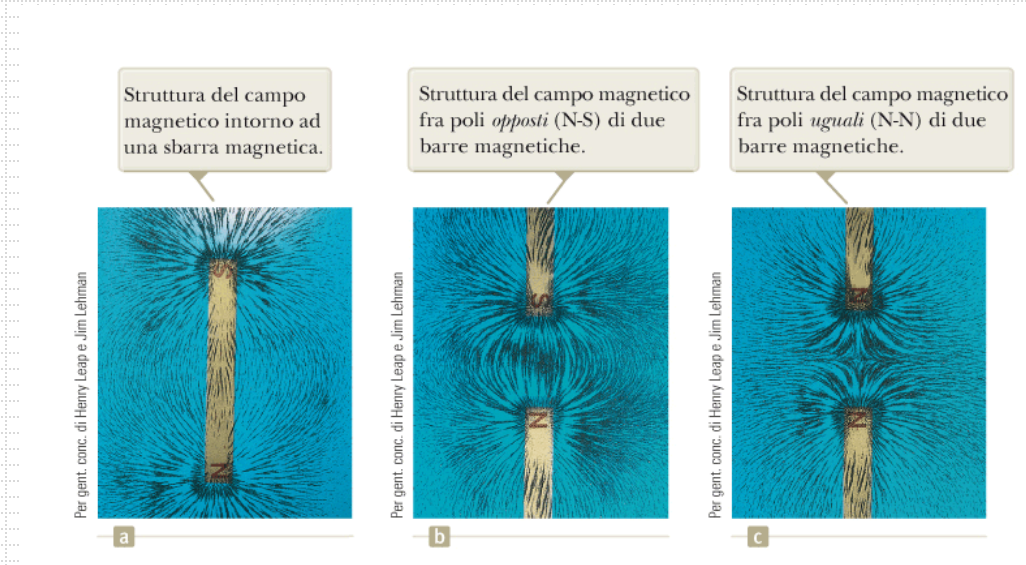
- Lo spazio che circonda una carica elettrica in moto è sede anche di un **campo magnetico**. Circonda anche un qualsiasi materiale magnetico. È un campo vettoriale  $\vec{B}$ .
- La direzione ed il verso sono quelli in cui punta il polo nord dell'ago di una bussola in quel punto
- In figura sono mostrate le linee di campo magnetico



**Figura 22.1** L'ago della bussola può essere usato per tracciare le linee di campo nella regione esterna al magnete.

# Il campo magnetico

- Gli andamenti del campo magnetico possono essere visualizzati per mezzo di limatura di ferro posta in vicinanza di un magnete (figura a fianco).
- L'esistenza di un campo magnetico in un punto dello spazio può essere determinata misurando la forza magnetica  $\vec{F}_B$  che si esercita su una appropriata particella di prova posta in quel punto. (analogamente a quanto fatto per il campo elettrico)



R.A. Serway, J. W. Jewett  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES

**Figura 22.2** La struttura del campo magnetico può essere rappresentata con limatura di ferro sparsa su un foglio vicino ai magneti.

# Il campo magnetico

- Facendo l'esperimento con la particella di prova troviamo i seguenti risultati, in analogia con il caso del campo elettrico:
  - La forza magnetica è proporzionale alla carica  $q$  della particella
  - La forza magnetica su una carica negativa ha direzione opposta alla forza su una carica positiva che si muove nella stessa direzione e verso
  - La forza magnetica è proporzionale al modulo del vettore campo magnetico  $\vec{B}$

# Il campo magnetico

- Troviamo però anche i seguenti risultati che sono completamente diversi da quelli per gli esperimenti sulle forze elettriche:
  - La forza magnetica è proporzionale alla velocità  $v$  della particella
  - Se il vettore velocità forma un angolo  $\theta$  con il campo magnetico, il modulo della forza magnetica è proporzionale a  $\sin \theta$
  - Quando una particella carica si muove parallelamente al vettore campo magnetico la forza magnetica sulla carica è zero
  - Quando una particella carica si muove in una direzione non parallela al vettore campo magnetico, la forza magnetica agisce lungo una direzione perpendicolare ad entrambi i vettori  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ .

# Il campo magnetico

- La figura 22.3 mostra i dettagli delle direzioni della forza magnetica su una particella carica

- La forza magnetica si può scrivere:

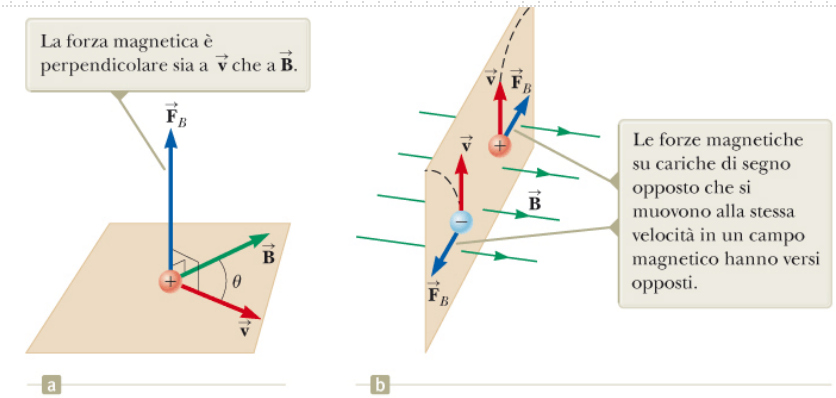
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

L'unità SI di campo magnetico è il tesla (T) dove:

$$1\text{T} = 1\text{N} \cdot \text{s}/\text{C} \cdot \text{m}$$

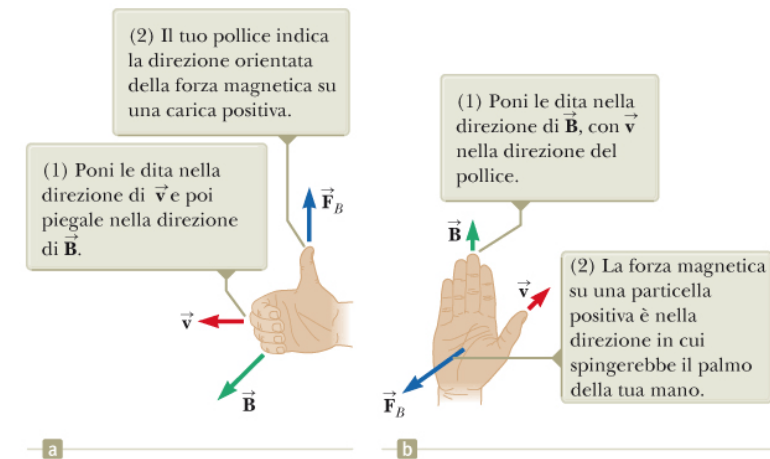
- Regole della mano destra (per determinare direzione e verso del prodotto vettoriale) in figura a fianco

**Figura 22.3** (a) La direzione della forza magnetica  $\vec{F}_B$  che agisce su una particella carica che si muove con velocità  $\vec{v}$  in presenza di un campo magnetico  $\vec{B}$ . (b) Forze magnetiche su cariche positive e negative. Le linee tratteggiate mostrano i cammini delle particelle che sono studiati nel Paragrafo 22.3.



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES

**Figura 22.4** Due regole della mano destra per determinare la direzione della forza magnetica  $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$  agente su una particella con carica positiva  $q$  che si muove con velocità  $\vec{v}$  in un campo magnetico  $\vec{B}$ . (a) Secondo questa regola, la forza magnetica è nella direzione indicata dal tuo dito pollice. (b) Secondo questa regola, la forza magnetica è nella direzione del palmo della tua mano, come se stessi spingendo la particella con la tua mano.



# Il campo magnetico

- Il modulo della forza magnetica ha il valore

$$F_B = |q|vB \sin \theta$$

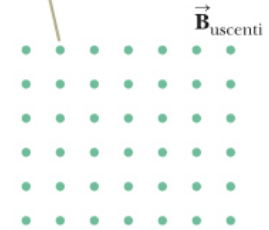
Dove  $\theta$  è l'angolo tra  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ . La forza è nulla quando  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$  sono paralleli o anti paralleli, è invece massima quando sono perpendicolari.

- Differenze importanti tra le forze elettriche e magnetiche:
  - Il vettore forza elettrica è diretto lungo la direzione del campo elettrico, mentre la forza magnetica è perpendicolare al campo magnetico
  - La forza elettrica agisce su una particella carica indipendentemente dalla sua velocità mentre la forza magnetica agisce su una particella carica solo quando la particella è in movimento
  - La forza elettrica compie lavoro spostando una particella carica, mentre la forza magnetica associata ad un campo magnetico costante non compie lavoro quando la particella viene spostata

# Il campo magnetico

- L'ultima affermazione nella slide precedente è conseguenza del fatto che la forza magnetica è sempre perpendicolare allo spostamento quindi per un piccolo spostamento  $d\vec{s}$ , il lavoro fatto dalla forza magnetica sulla particella è  $dW = \vec{F}_B \cdot d\vec{s} = (\vec{F}_B \cdot \vec{v})dt = 0$
- Quindi l'energia cinetica di una particella non può essere alterata solo da un campo magnetico costante
- Il prodotto vettoriale richiede di pensare in tre dimensioni per i problemi di magnetismo, utilizziamo le convenzioni in figura 22.5

Le linee del campo magnetico uscenti dal foglio sono indicate da punti che rappresentano le punte delle frecce uscenti.



a

Le linee del campo magnetico entranti nel foglio sono indicate da croci che rappresentano le code delle frecce entranti.



b

**Figura 22.5** Rappresentazioni delle linee del campo magnetico perpendicolari a questa pagina.

# Quiz rapido

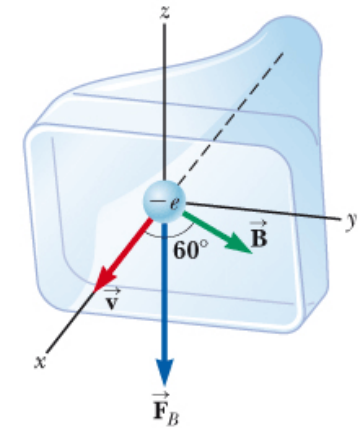
- Un elettrone si muove nel piano di questa slide verso la parte superiore. Nel piano della slide è presente anche un campo magnetico che è diretto verso destra. Quale è la direzione della forza magnetica sull'elettrone?
  - A. Verso la parte superiore della slide
  - B. Verso la parte inferiore della slide
  - C. Verso il margine sinistro della slide
  - D. Verso il margine destro della slide
  - E. Fuoriuscente dalla slide
  - F. Entrante nella slide

# Quiz rapido

- Un elettrone si muove nel piano di questa slide verso la parte superiore. Nel piano della slide è presente anche un campo magnetico che è diretto verso destra. Quale è la direzione della forza magnetica sull'elettrone?
  - A. Verso la parte superiore della slide
  - B. Verso la parte inferiore della slide
  - C. Verso il margine sinistro della slide
  - D. Verso il margine destro della slide
  - E. Fuoriuscente dalla slide
  - F. Entrante nella slide

# Esempio – Un elettrone in moto in un campo magnetico

- Un elettrone in un tubo catodico televisivo si muove verso la parte anteriore del tubo con una velocità  $8.0 \times 10^6 \text{ m/s}$  lungo la direzione dell'asse  $x$  (figura a fianco). Il collo del tubo è circondato da un avvolgimento di filo che crea un campo magnetico di modulo  $0.025 \text{ T}$ , diretto a un angolo di  $60^\circ$  con l'asse  $x$  e giacente nel piano  $xy$ . Calcolare la forza magnetica e l'accelerazione dell'elettrone.



**Figura 22.6** (Esempio 22.1) La forza magnetica  $\vec{F}_B$  agente sull'elettrone è diretta nel verso negativo dell'asse  $z$  quando  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$  giacciono nel piano  $xy$ .

# Moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme

- Consideriamo la situazione in figura: la particella si muove di moto circolare uniforme!
- Dalla seconda legge di Newton  $\sum F = F_B = ma$
- Considerando l'accelerazione centripeta (moto circolare uniforme)

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

- Quindi otteniamo per il raggio della traiettoria circolare

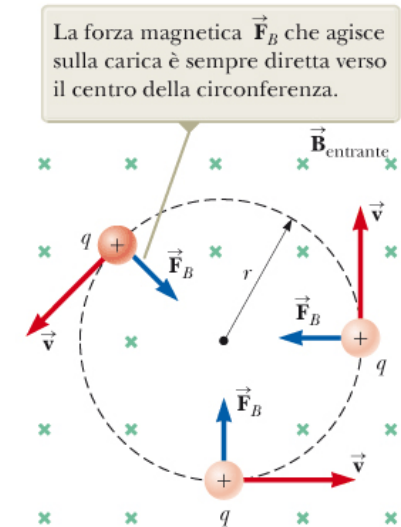
$$r = \frac{mv}{qB}$$

- La velocità angolare è

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

- Il periodo del moto è

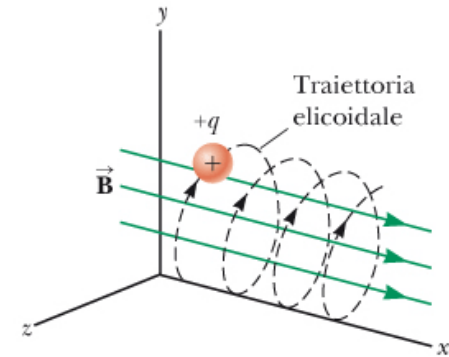
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$



**Figura 22.7** Quando la velocità di una particella carica è perpendicolare a un campo magnetico uniforme, la particella si muove lungo una circonferenza in un piano perpendicolare a  $\vec{B}$ .

# Moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme

- La velocità angolare  $\omega$  è spesso indicata come frequenza di ciclotrone, poiché particelle cariche ruotano con questa velocità angolare in un tipo di acceleratore chiamato ciclotrone
- Se la velocità della particella forma un certo angolo con  $\vec{B}$ , la sua traiettoria è un'elica, come mostrato in figura 22.8 (nel caso di prima la velocità era perpendicolare a  $\vec{B}$  cioè formava un angolo pari a  $90^\circ$ )



**Figura 22.8** Una particella carica, che ha una componente del vettore velocità parallela ad un campo magnetico uniforme, si muove lungo una traiettoria elicoidale.

# Quiz rapido

- Una particella carica si muove su una traiettoria circolare di raggio  $r$  in presenza di un campo magnetico costante perpendicolare alla velocità della particella.
- Una particella identica entra nel campo, con  $\vec{v}$  perpendicolare a  $\vec{B}$ , ma con una velocità maggiore di quella della prima particella. In confronto con il raggio della circonferenza della prima particella, il raggio della circonferenza della seconda particella risulta essere:
  - A. Minore
  - B. Maggiore
  - C. Uguale
- Il modulo del campo magnetico viene aumentato. Come risulta il raggio del nuovo cammino circolare della prima particella in questo nuovo campo magnetico in confronto al raggio del cammino iniziale della prima particella
  - A. Minore
  - B. Maggiore
  - C. Uguale

# Quiz rapido

- Una particella carica si muove su una traiettoria circolare di raggio  $r$  in presenza di un campo magnetico costante perpendicolare alla velocità della particella.
- Una particella identica entra nel campo, con  $\vec{v}$  perpendicolare a  $\vec{B}$ , ma con una velocità maggiore di quella della prima particella. In confronto con il raggio della circonferenza della prima particella, il raggio della circonferenza della seconda particella risulta essere:
  - A. Minore
  - B. Maggiore
  - C. Uguale
- Il modulo del campo magnetico viene aumentato. Come risulta il raggio del nuovo cammino circolare della prima particella in questo nuovo campo magnetico in confronto al raggio del cammino iniziale della prima particella
  - A. Minore
  - B. Maggiore
  - C. Uguale

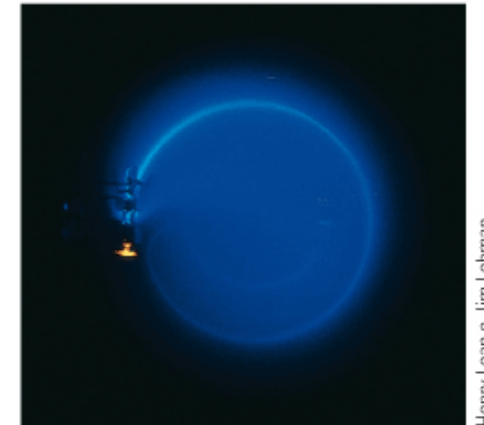
## Esempio – Un protone che si muove perpendicolarmente a un campo magnetico uniforme

- Un protone si muove lungo un'orbita circolare di raggio 14 cm in un campo magnetico uniforme di 0.35 T perpendicolare alla velocità del protone. Trovare il modulo della velocità del protone.

# Esempio – Curvare un fascio elettronico

- In un esperimento progettato per misurare l'intensità di un campo magnetico uniforme, gli elettroni vengono accelerati da fermi attraverso una differenza di potenziale di 350 V. Dopo aver lasciato la regione del campo elettrico, gli elettroni entrano in un campo magnetico uniforme e viaggiano lungo una traiettoria curva a causa della forza magnetica esercitata su di essi. Il raggio della traiettoria misura 7.5 cm. La figura mostra tale fascio elettronico curvato.
- Quale è il modulo del campo magnetico?
- Quale è la velocità angolare degli elettroni?

**Figura 22.10**  
(Esempio 22.3)  
La curvatura  
di un elettrone  
in un campo  
magnetico.



Henry Leap e Jim Lehman



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES

# Applicazioni del moto di particelle cariche in un campo magnetico

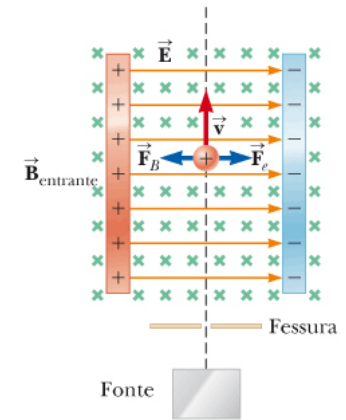
- Una carica che si muove con velocità  $\vec{v}$  in presenza sia di un campo elettrico  $\vec{E}$  che di un campo magnetico  $\vec{B}$  subisce una forza, detta **forza di Lorentz**, data da:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

- Consideriamo delle applicazioni che coinvolgono particelle che subiscono la forza di Lorentz

# Applicazioni del moto di particelle cariche in un campo magnetico – Selettore di velocità

- In numerosi esperimenti in cui si utilizzano particelle cariche è importante selezionare particelle che si muovano tutte praticamente con la stessa velocità. Ciò può essere ottenuto applicando una combinazione di campo elettrico e campo magnetico come mostrato in figura
- Quando i moduli dei due campi sono scelti in modo tale che forza elettrica e magnetica siano uguali in modulo, cioè  $qE = qvB$ , si trova che  $v = E/B$ .
- Solo le particelle che soddisfano questa condizione non vengono deflesse e passano il selettore di velocità



**Figura 22.11** Un selettore di velocità. Quando una particella carica positivamente si muove con velocità  $\vec{v}$  in presenza di un campo magnetico entrante nella pagina e di un campo elettrico rivolto verso destra, subisce una forza elettrica  $q\vec{E}$  verso destra e una forza magnetica  $q\vec{v} \times \vec{B}$  verso sinistra.

# Applicazioni del moto di particelle cariche in un campo magnetico – Spettrometro di massa

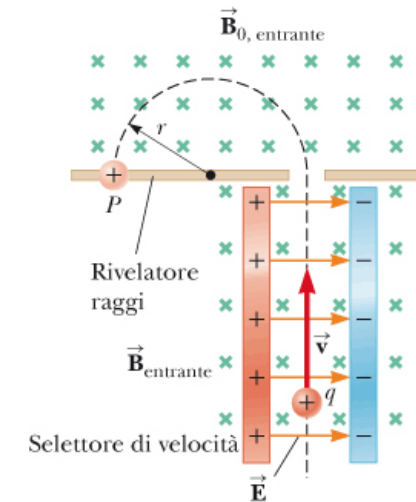
- Uno spettrometro di massa separa gli ioni di un fascio secondo il loro rapporto massa/carica
- In una versione chiamata spettrometro di massa di Bainbridge un fascio di ioni passa attraverso un selettore di velocità e poi attraverso una regione con solo un campo magnetico uniforme  $\vec{B}_0$ , come mostrato in figura
- Dall'equazione  $r = mv/qB$  possiamo esprimere il rapporto massa/carica della particella come

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

Usando poi l'equazione  $v = E/B$  del selettore di velocità troviamo che

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E}$$

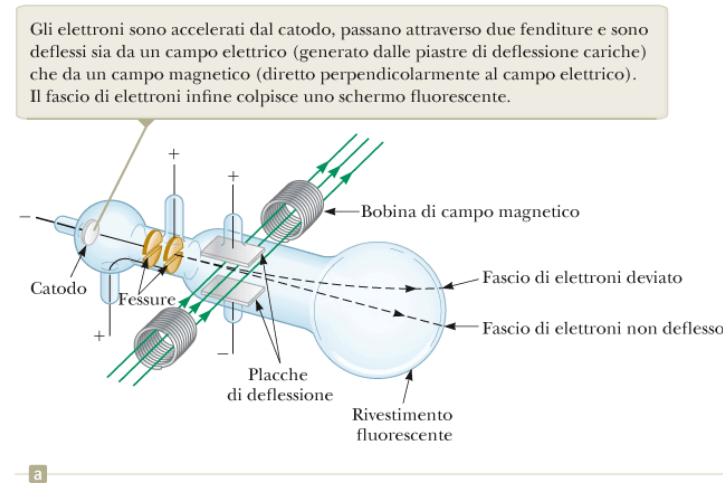
Quindi si può determinare il rapporto massa/carica misurando il raggio di curvatura (si veda la figura a fianco) e le intensità note dei campi elettrici e magnetici applicati



**Figura 22.12** Uno spettrometro di massa. Particelle cariche positivamente vengono prima spedite attraverso un selettore di velocità e poi in una regione dove il campo magnetico  $\vec{B}_0$  fa sì che le particelle si muovano lungo una traiettoria semicircolare e urtino un rivelatore in  $P$ .

# Applicazioni del moto di particelle cariche in un campo magnetico – Spettrometro di massa

- Una variante di questa tecnica fu utilizzata da J.J. Thomson nel 1897 per misurare il rapporto carica/massa degli elettroni
- I risultati di questo esperimento hanno portato alla scoperta dell'elettrone come particella fondamentale della natura

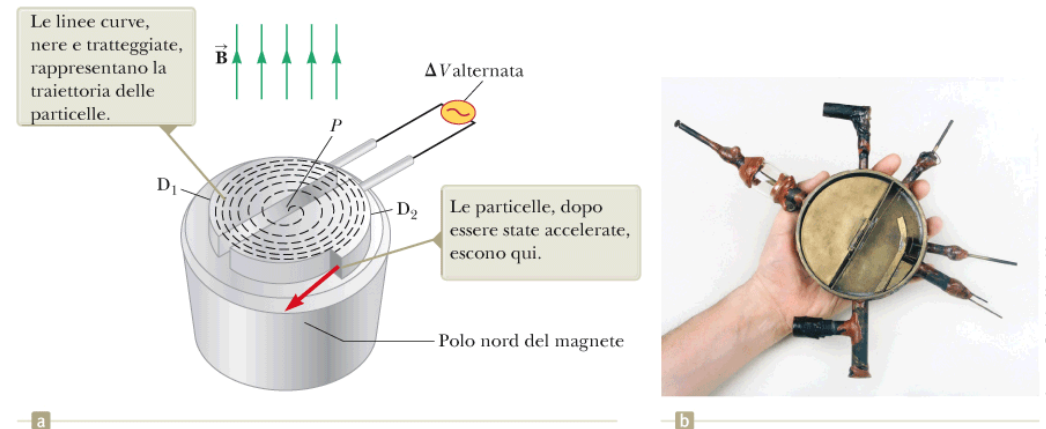


**Figura 22.13** (a) Apparato di Thomson per la misura di  $e/m_e$ . (b) J.J. Thomson (a sinistra) nel laboratorio di Cavendish all'Università di Cambridge. L'uomo a destra, Frank Baldwin Jewett, è un lontano parente di J.W. Jewett Jr., coautore di questo libro.

# Applicazioni del moto di particelle cariche in un campo magnetico – Il ciclotrone

- Un ciclotrone può accelerare particelle cariche a velocità altissime
- Possiamo ottenere l'energia cinetica dello ione quando esce dal ciclotrone, considerando  $v = qBR/m$

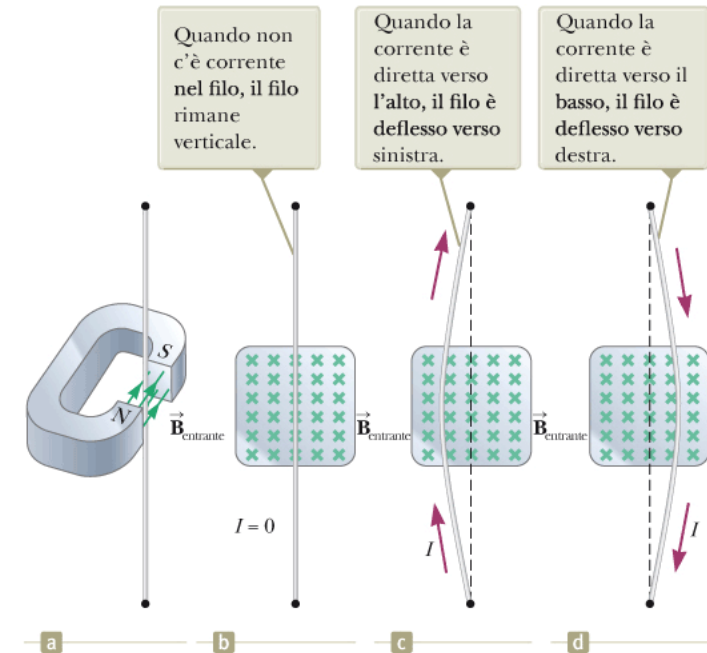
$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$$



**Figura 22.14** (a) Un ciclotrone consiste di una sorgente di ioni in  $P$ , due "D",  $D_1$  e  $D_2$  attraverso le quali viene applicata una differenza di potenziale, e di un campo magnetico. (b) Il primo ciclotrone, inventato da E.O. Lawrence e M.S. Livingston nel 1934.

# Forza magnetica su un conduttore percorso da corrente

- La forza magnetica risultante sul filo è dovuta alla somma delle singole forze sulle particelle cariche, si veda figura 22.15



**Figura 22.15** (a) Un filo sospeso verticalmente fra i poli di un magnete. Da (b) a (d) Il sistema mostrato in (a) come è visto guardando il polo sud del magnete cosicché il campo magnetico (croci verdi) è entrante nella pagina.

# Forza magnetica su un conduttore percorso da corrente

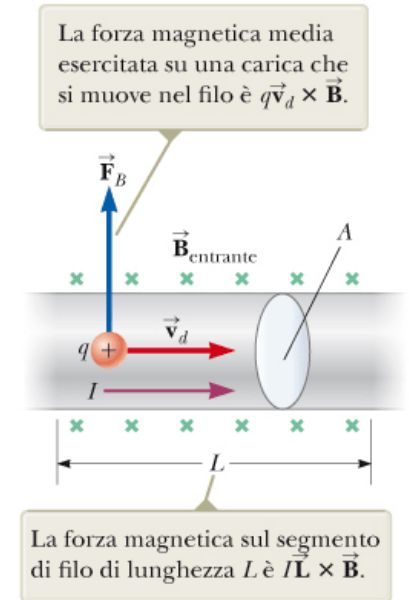
- Consideriamo un tratto rettilineo di filo di lunghezza  $L$  e di sezione  $A$ , in cui circola una corrente  $I$  in un campo magnetico esterno uniforme  $\vec{\mathbf{B}}$ . (figura a fianco)
- La forza magnetica che agisce su una carica  $q$  che si muove con una velocità di deriva  $\vec{\mathbf{v}}_d$  è data da  $q\vec{\mathbf{v}}_d \times \vec{\mathbf{B}}$ . Il numero di cariche in un tratto di lunghezza  $L$  è  $nAL$ , dove  $A$  è la sezione del filo e  $n$  è il numero di cariche per unità di volume.
- La forza magnetica totale agente sul filo è

$$\vec{\mathbf{F}}_B = (q\vec{\mathbf{v}}_d \times \vec{\mathbf{B}})nAL$$

Considerando che come abbiamo visto in precedenza la corrente nel filo può essere scritta come  $I = nqv_dA$

$$\vec{\mathbf{F}}_B = I\vec{\mathbf{L}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

Dove  $\vec{\mathbf{L}}$  è un vettore nella direzione e verso della corrente  $I$ , il modulo del vettore è uguale alla lunghezza  $L$  del filo.



**Figura 22.16** Un segmento di un filo percorso da corrente in un campo magnetico  $\vec{\mathbf{B}}$ .

# Forza magnetica su un conduttore percorso da corrente

- Consideriamo ora un filo di forma arbitraria e di sezione uniforme immerso in un campo magnetico esterno come nella figura a fianco. La forza su un elemento infinitesimo di filo di lunghezza  $ds$  è

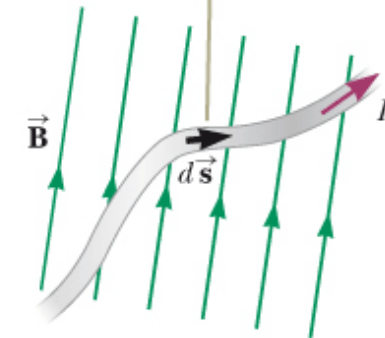
$$d\vec{F}_B = I d\vec{s} \times \vec{B}$$

Possiamo considerare questa equazione come una definizione alternativa di  $\vec{B}$ .

Per ottenere la forza magnetica totale agente sul filo, integro:

$$\vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B}$$

La forza magnetica su un qualunque segmento  $d\vec{s}$  è  $I d\vec{s} \times \vec{B}$  ed è uscente dalla pagina



**Figura 22.17** Un segmento di un filo di forma arbitraria percorso dalla corrente  $I$  in un campo magnetico  $\vec{B}$  è sottoposto ad una forza magnetica.

# Quiz rapido

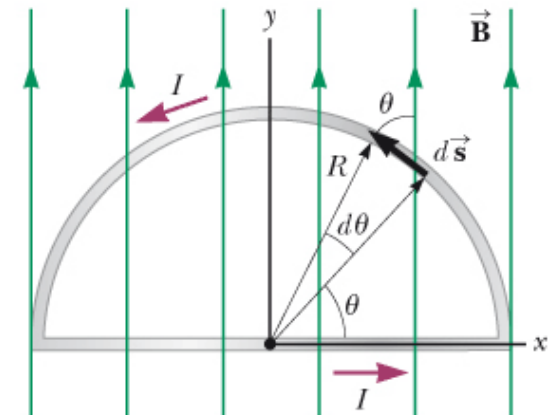
- Un filo percorso da corrente è posto nel piano del foglio (slide) verso la parte superiore della pagina (slide). Sul filo si esercita una forza magnetica diretta verso l'estremità destra della pagina (slide). Quale è la direzione del campo magnetico che causa la forza?
  - A. Nel piano della pagina (slide), verso l'estremità sinistra
  - B. Nel piano della pagina (slide), verso il bordo inferiore
  - C. Fuoriuscente dalla pagina (slide)
  - D. Entrante nella pagina (slide)

# Quiz rapido

- Un filo percorso da corrente è posto nel piano del foglio (slide) verso la parte superiore della pagina (slide). Sul filo si esercita una forza magnetica diretta verso l'estremità destra della pagina (slide). Quale è la direzione del campo magnetico che causa la forza?
  - A. Nel piano della pagina (slide), verso l'estremità sinistra
  - B. Nel piano della pagina (slide), verso il bordo inferiore
  - C. Fuoriuscente dalla pagina (slide)
  - D. Entrante nella pagina (slide)

# Esempio – Forza agente su un conduttore semicircolare

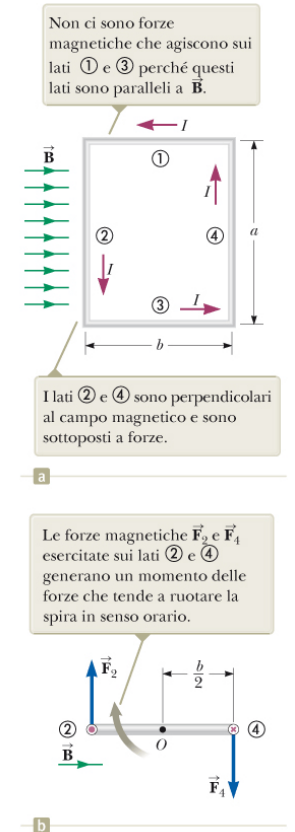
- Un filo della forma di una semicirconferenza di raggio  $R$  forma un circuito chiuso ed è attraversato da una corrente  $I$ . Il filo giace nel piano  $xy$  e un campo magnetico uniforme è diretto lungo l'asse  $y$  positivo come in figura. Trovare il modulo, la direzione e il verso della forza magnetica che agisce sulla parte rettilinea del filo e di quella che agisce sulla parte curva.



**Figura 22.18** (Esempio 22.4) La forza magnetica sulla parte rettilinea della spira è uscente dalla pagina e il campo magnetico sulla parte curva è entrante nella pagina.

# Momento delle forze agente su una spira in un campo magnetico uniforme

- Consideriamo una spira rettangolare percorsa da una corrente  $I$ , immersa in un campo magnetico uniforme che giace sul piano della spira (figura 22.19(a))
- Le forze magnetiche agenti sui lati 1 e 3 sono nulle
- Il modulo delle forze agenti sui lati 2 e 4 è  $F_2 = F_4 = I a B$ . Possiamo vedere che la forza risultante sulla spira è nulla. Tuttavia le due forze  $\vec{F}_2$  e  $\vec{F}_4$  producono un momento che fa ruotare la spira stessa in senso orario (figura 22.19b).



**Figura 22.19** (a) Vista dall'alto di una spira rettangolare percorsa da corrente in un campo magnetico uniforme. (b) Vista di lato della spira guardando dal lato ③. Il punto rosso nel cerchio a sinistra rappresenta la corrente nel filo ② che esce dalla pagina; la freccia rossa nel cerchio a destra rappresenta la corrente nel filo ④ entrante nella pagina.

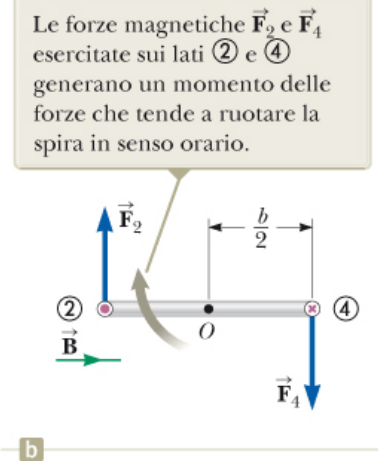
# Momento delle forze agente su una spira in un campo magnetico uniforme

- Il modulo del momento delle forze lungo l'asse perpendicolare alla pagina (slide) e passante per il punto O (figura a fianco) è

$$\tau_{max} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (IaB) \frac{b}{2} + (IaB) \frac{b}{2} = IabB$$

- Dove  $\frac{b}{2}$  è il braccio del momento di ciascuna forza lungo l'asse considerato. Poiché la superficie della spira è  $A = ab$

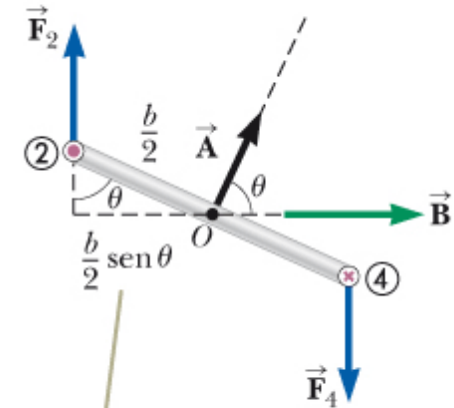
$$\tau_{max} = IAB$$



**Figura 22.19** (a) Vista dall'alto di una spira rettangolare percorsa da corrente in un campo magnetico uniforme. (b) Vista di lato della spira guardando dal lato ③. Il punto rosso rappresenta la corrente nel filo ② che esce dalla pagina; la freccia rossa nel cerchio a destra rappresenta la corrente nel filo ④ entrante nella pagina.

# Momento delle forze agente su una spira in un campo magnetico uniforme

- Supponiamo ora che la spira sia ruotata in modo tale che il campo magnetico formi un angolo  $\theta$  rispetto ad una retta perpendicolare al piano della spira (figura a fianco).
- Le forze agenti sui lati 1 e 3 si annullano reciprocamente
- Le forze che agiscono sui lati 2 e 4 ( $\vec{F}_2$  e  $\vec{F}_4$ ) producono entrambe un momento lungo l'asse passante per il centro della spira.
- Dalla figura a fianco si vede che il braccio delle due forze  $\vec{F}_2$  e  $\vec{F}_4$  è lo stesso ed è uguale a  $(\frac{b}{2}) \sin \theta$



Quando la normale alla spira forma un angolo  $\theta$  con il campo magnetico, il braccio del momento delle forze è  $(b/2) \sin \theta$ .

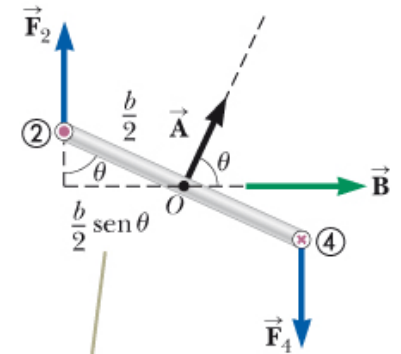
**Figura 22.20** Vista finale della spira di Figura 22.19 con la normale alla spira che forma un angolo  $\theta$  con il campo magnetico.

# Momento delle forze agente su una spira in un campo magnetico uniforme

- Il modulo del momento risultante della coppia è

$$\begin{aligned}\tau &= F_2 \frac{b}{2} \sin \theta + F_4 \frac{b}{2} \sin \theta \\ &= (IaB) \left( \frac{b}{2} \sin \theta \right) + (IaB) \left( \frac{b}{2} \sin \theta \right) = Iab \sin \theta \\ &= IAB \sin \theta\end{aligned}$$

- Quindi il momento è massimo quando il campo è parallelo ( $\theta = 90^\circ$ ) alla spira ed è zero quando è perpendicolare ( $\theta = 0^\circ$ ). Come mostrato in figura la spira tende a ruotare verso valori di  $\theta$  sempre più piccoli



Quando la normale alla spira forma un angolo  $\theta$  con il campo magnetico, il braccio del momento delle forze è  $(b/2) \sin \theta$ .

**Figura 22.20** Vista finale della spira di Figura 22.19 con la normale alla spira che forma un angolo  $\theta$  con il campo magnetico.

# Momento delle forze agente su una spira in un campo magnetico uniforme

- Una conveniente espressione vettoriale del momento delle forze è

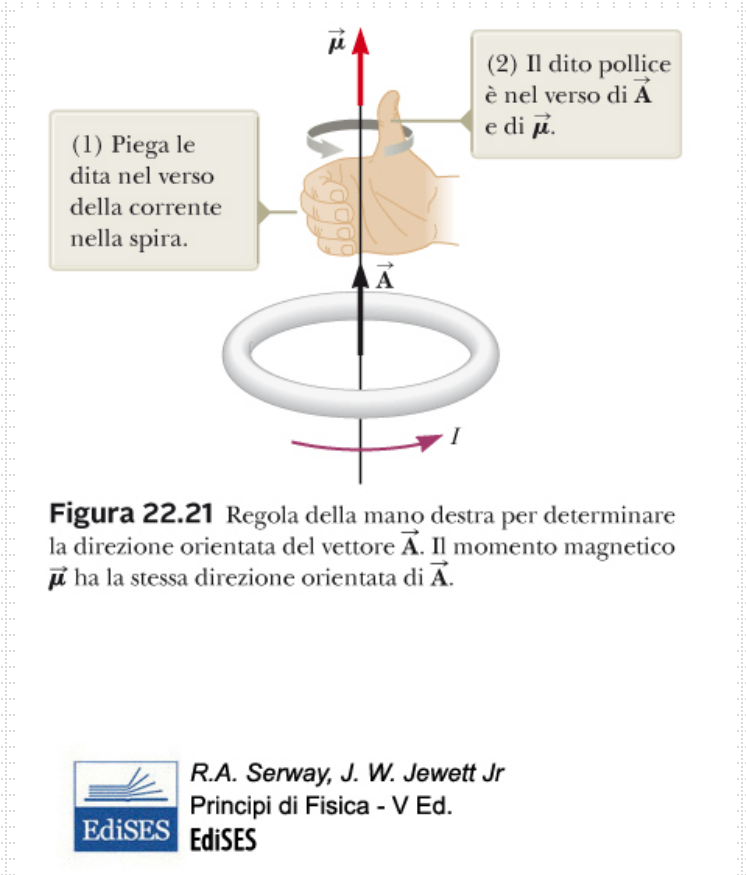
$$\vec{\tau} = I\vec{A} \times \vec{B}$$

Dove  $\vec{A}$ , un vettore perpendicolare al piano della spira, ha modulo pari all'area  $A$  della spira stessa. Il suo verso si determina come mostrato in figura.

- Il prodotto  $I\vec{A}$  è definito **momento di dipolo magnetico**  $\vec{\mu}$  della spira:

$$\vec{\mu} = I\vec{A}$$

Nel sistema SI l'unità di misura del momento di dipolo magnetico è *ampere* · *metro*<sup>2</sup> ( $A \cdot m^2$ )



# Momento delle forze agente su una spira in un campo magnetico uniforme

- Da questa definizione, il momento delle forze si può scrivere

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

- Questa espressione è indipendente dalla forma della spira
- Se una bobina è costituita da N spire

$$\vec{\mu} = NI\vec{A}$$

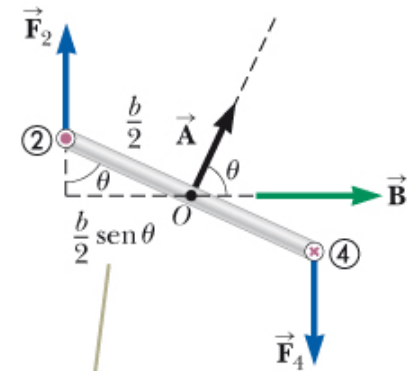
- Un comune motore elettrico è costituito da un avvolgimento di filo sistemato in modo tale che possa ruotare all'interno di un campo di un magnete permanente

# Momento delle forze agente su una spira in un campo magnetico uniforme

- Se la spira in figura viene lasciata libera da ferma, il vettore momento magnetico comincerà a ruotare per allinearsi con il campo magnetico  $\vec{B}$ .
- L'energia potenziale di un sistema composto da un dipolo magnetico in un campo magnetico è data da

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

Il sistema ha energia minima quando  $\vec{\mu}$  ha lo stesso verso di  $\vec{B}$ , ha energia massima quando  $\vec{\mu}$  ha la stessa direzione di  $\vec{B}$  ma verso opposto.



Quando la normale alla spira forma un angolo  $\theta$  con il campo magnetico, il braccio del momento delle forze è  $(b/2) \sin \theta$ .

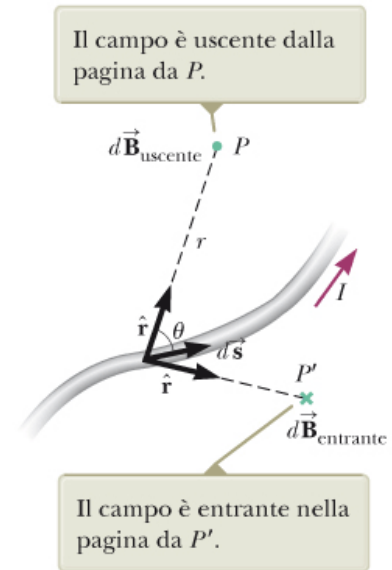
**Figura 22.20** Vista finale della spira di Figura 22.19 con la normale alla spira che forma un angolo  $\theta$  con il campo magnetico.

# Esempio – Il momento di dipolo magnetico di una bobina

- Una bobina rettangolare di dimensioni  $5.40 \text{ cm} \times 8.50 \text{ cm}$  consiste in 25 spire di filo conduttore. La bobina è percorsa da una corrente di  $15.0 \text{ mA}$ . Un campo magnetico di  $0.350 \text{ T}$  viene applicato parallelamente al piano della bobina.
- Calcolare il modulo del momento di dipolo magnetico della bobina
- Qual è il modulo del momento delle forze che agisce sulla bobina?

# Legge di Biot-Savart

- Studiamo ora la sorgente di un campo magnetico. Una corrente elettrica in un filo genera un campo magnetico
- I risultati sperimentali mostrano che il campo magnetico  $d\vec{\mathbf{B}}$  nel punto  $P$  prodotto da un elemento di corrente di lunghezza infinitesima  $d\vec{\mathbf{s}}$  del filo (si veda la figura a fianco) ha le seguenti proprietà:
  - Il vettore  $d\vec{\mathbf{B}}$  è perpendicolare sia a  $d\vec{\mathbf{s}}$  che al versore  $\hat{\mathbf{r}}$  diretto dall'elemento al punto  $P$
  - il modulo di  $d\vec{\mathbf{B}}$  è inversamente proporzionale a  $r^2$ , dove  $r$  è la distanza tra l'elemento e  $P$
  - Il modulo di  $d\vec{\mathbf{B}}$  è proporzionale alla corrente  $I$  e alla lunghezza  $ds$  dell'elemento
  - Il modulo di  $d\vec{\mathbf{B}}$  è proporzionale a  $\sin \theta$  dove  $\theta$  è l'angolo tra i vettori  $d\vec{\mathbf{s}}$  e  $\hat{\mathbf{r}}$



**Figura 22.22** Il campo magnetico  $d\vec{\mathbf{B}}$  in un punto  $P$  prodotto dalla corrente  $I$  attraverso l'elemento di lunghezza  $d\vec{\mathbf{s}}$  è dato dalla legge di Biot-Savart.

# Legge di Biot-Savart

- La legge di Biot-Savart che descrive questi risultati può essere espressa in forma compatta come

$$d\vec{B} = k_m \frac{I d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

Dove  $k_m$  è una costante che, nel sistema SI, vale esattamente  $10^{-7} T \cdot m/A$ .  $k_m$  viene comunemente scritta come  $\mu_0/4\pi$  dove  $\mu_0$  è un'altra costante chiamata permeabilità magnetica del vuoto

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = k_m = 10^{-7} T \cdot m/A$$
$$\mu_0 = 4\pi k_m = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$$

# Legge di Biot-Savart

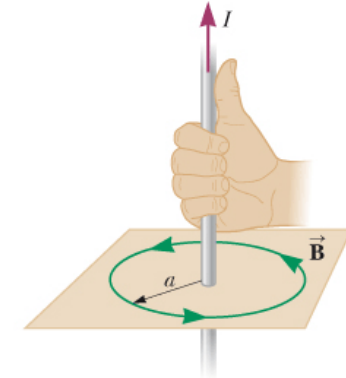
- La legge di Biot-Savart può essere quindi scritta nella forma

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

Indichiamo il prodotto  $Id\vec{s}$  come un elemento di corrente. Per calcolare in un punto il campo magnetico totale  $\vec{B}$  si deve calcolare l'integrale per l'intero conduttore.

- La figura a fianco fornisce una regola (mano destra) per determinare direzione e verso di un campo magnetico dovuto ad una corrente
- L'intensità del campo magnetico generato da un lungo filo rettilineo a distanza  $r$  dal filo è

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



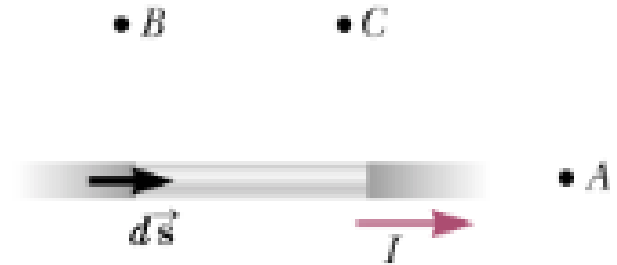
**Figura 22.23** La regola della mano destra per determinare il verso del campo magnetico generato da un lungo filo rettilineo percorso da corrente. Si noti che le linee del campo magnetico formano circonferenze intorno al filo. Il modulo del campo magnetico ad una distanza  $r$  dal filo è dato dall'Equazione 22.21.



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES

# Quiz rapido

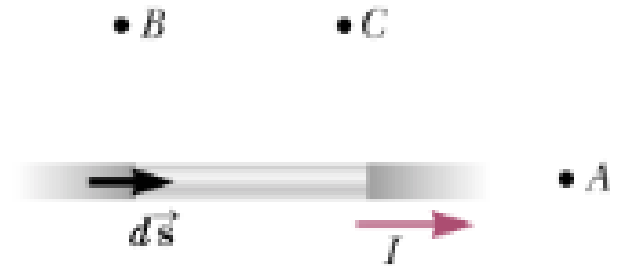
- Considera il campo magnetico dovuto alla corrente che attraversa il filo in figura. Ordina i punti A, B, C, in funzione del modulo del campo magnetico dovuto alla corrente che percorre il filo, attraverso l'elemento  $d\vec{s}$  mostrato, dal valore più grande al più piccolo.



**FIGURA 22.24** (Quiz Rapido 22.4) Dove si trova il campo magnetico più intenso?

# Quiz rapido

- Considera il campo magnetico dovuto alla corrente che attraversa il filo in figura. Ordina i punti A, B, C, in funzione del modulo del campo magnetico dovuto alla corrente che percorre il filo, attraverso l'elemento  $d\vec{s}$  mostrato, dal valore più grande al più piccolo.

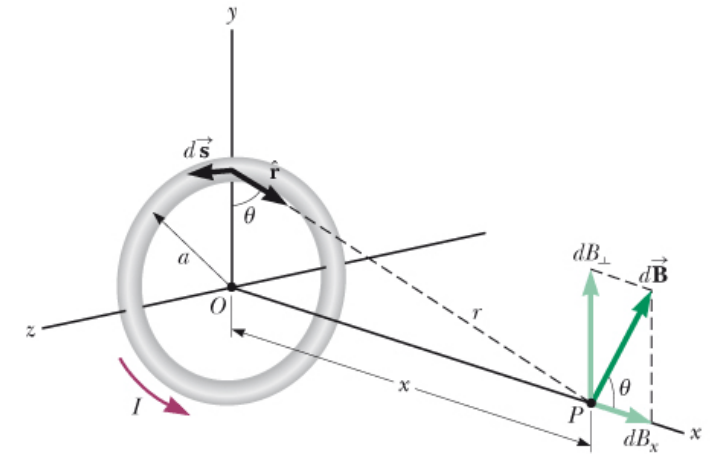


**FIGURA 22.24** (Quiz Rapido 22.4) Dove si trova il campo magnetico più intenso?

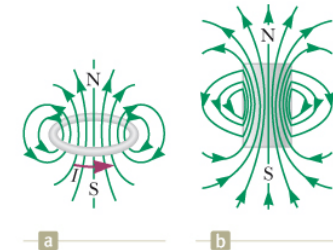
**Risposte**  
 $B > C > A$

# Esempio – Campo magnetico sull'asse di una spira circolare

- Si consideri una spira di forma circolare di raggio  $a$ , posta nel piano  $yz$  e percorsa da una corrente stazionaria  $I$ , come in figura 22.25. Calcolare il campo magnetico in un punto  $P$  posto sull'asse della spira ad una distanza  $x$  dal centro della spira.



**Figura 22.25** (Esempio 22.6) La geometria per il calcolo del campo magnetico nel punto  $P$  sull'asse di una spira percorsa da corrente. Per simmetria, il campo totale  $\vec{B}$  è diretto lungo quest'asse.

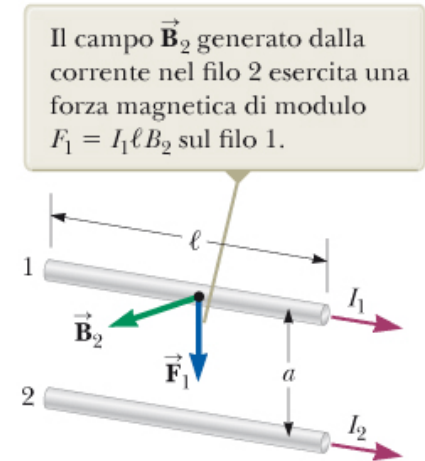


**Figura 22.26** (Esempio 22.6) (a) Le linee del campo magnetico intorno ad una spira percorsa da corrente. (b) Le linee del campo magnetico intorno ad una barretta magnetica. Si noti la somiglianza fra questa struttura delle linee del campo e quella di una spira.

*continua*

# Forza magnetica fra due conduttori paralleli

- Si considerino due fili rettilinei infinitamente lunghi ad una distanza «a» e percorsi da correnti  $I_1$  e  $I_2$ , come nella figura a fianco.
- Il filo 2 percorso dalla corrente  $I_2$  produce un campo magnetico  $\mathbf{B}_2$  nei punti in cui si trova il filo 1,  $\mathbf{B}_2$  è perpendicolare al filo come mostrato in figura 22.27
- La forza magnetica che agisce su un tratto di lunghezza  $l$  del filo 1 è  $\mathbf{F}_1 = I_1 \mathbf{l} \times \mathbf{B}_2$  (equazione ricavata in precedenza)
- Il modulo di  $\mathbf{F}_1$  è  $F_1 = I_1 l B_2$  ( $\mathbf{l}$  e  $\mathbf{B}_2$  sono perpendicolari)



**Figura 22.27** Due fili paralleli, ognuno dei quali è percorso da una corrente stazionaria, esercitano una forza uno sull'altro. La forza è attrattiva se le correnti hanno lo stesso verso (come è mostrato) e repulsiva se hanno versi contrari.

# Forza magnetica fra due conduttori paralleli

- Poiché il campo dovuto al filo 2 è dato dall'equazione  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$  scritta in precedenza

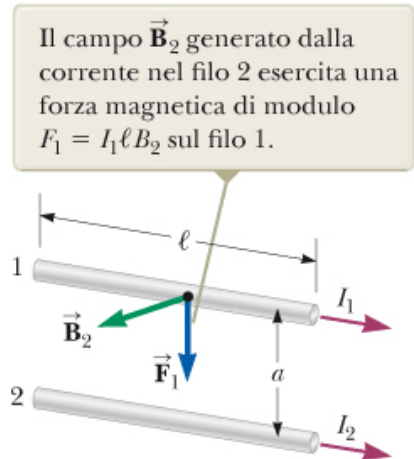
$$F_1 = I_1 l B_2 = I_1 l \left( \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} l$$

In termini di forza per unità di lunghezza

$$\frac{F_1}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

Il verso di  $\vec{F}_1$  è rivolto verso il basso poiché  $\vec{l} \times \vec{B}_2$  è rivolto verso il basso

- La forza  $\vec{F}_2$  è uguale in modulo e direzione ma opposta in verso rispetto a  $\vec{F}_1$



**Figura 22.27** Due fili paralleli, ognuno dei quali è percorso da una corrente stazionaria, esercitano una forza uno sull'altro. La forza è attrattiva se le correnti hanno lo stesso verso (come è mostrato) e repulsiva se hanno versi contrari.



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES

# Forza magnetica fra due conduttori paralleli

- Quindi la forza magnetica per unità di lunghezza esercitata da ciascun filo percorso da corrente sull'altro è

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

- Si ha quindi che due conduttori paralleli in cui scorrono correnti nello stesso verso si attraggono mentre conduttori paralleli in cui scorrono correnti in verso opposto si respingono
- La forza magnetica tra due fili conduttori paralleli percorsi da corrente è usata per definire l'ampere:
- **Se due lunghi fili paralleli distanti 1 m sono percorsi dalla stessa corrente e la forza per unità di lunghezza su ciascun filo è di  $2 \times \frac{10^{-7} N}{m}$ , allora la corrente è, per definizione, 1 A**

# Forza magnetica fra due conduttori paralleli

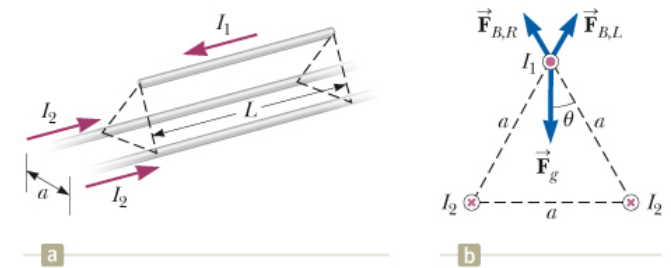
- L'unità di carica nel sistema SI, il coulomb, può essere definita usando l'ampere: se in un conduttore scorre una corrente di 1 A la quantità di carica che attraversa una qualsiasi sezione del conduttore in 1 s è 1 C.
- QUIZ RAPIDO
- Una molla a spirale di piccola costante elastica e senza corrente è appesa al soffitto. Quando viene azionato un interruttore in modo da mandare corrente nella molla, la spirale
  - A. Si comprime
  - B. Si espande
  - C. Non si muove

# Forza magnetica fra due conduttori paralleli

- L'unità di carica nel sistema SI, il coulomb, può essere definita usando l'ampere: se in un conduttore scorre una corrente di 1 A la quantità di carica che attraversa una qualsiasi sezione del conduttore in 1 s è 1 C.
- QUIZ RAPIDO
- Una molla a spirale di piccola costante elastica e senza corrente è appesa al soffitto. Quando viene azionato un interruttore in modo da mandare corrente nella molla, la spirale
  - A. Si comprime
  - B. Si espande
  - C. Non si muove

# Esempio – Sospensione di un filo

- Due fili infinitamente lunghi e paralleli, giacciono al suolo ad una mutua distanza  $a=1.00$  cm, come mostrato nella figura a fianco. Un terzo filo di lunghezza  $L=10.0$  m e massa  $400$ g, è percorso da una corrente  $I_1 = 100$  A ed è sospeso sopra i primi due fili, in una posizione orizzontale a mezza strada tra di loro. I fili infinitamente lunghi sono percorsi da correnti uguali  $I_2$  nella stessa direzione ma in verso opposto a quella che percorre il filo sospeso. Che corrente deve percorrere i fili infinitamente lunghi perché i tre fili formino un triangolo equilatero?



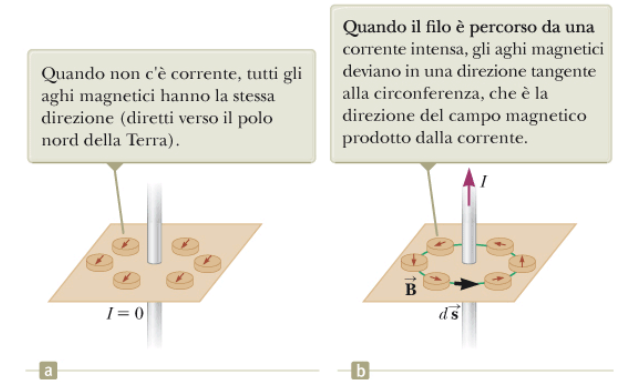
**Figura 22.28** (Esempio 22.7) (a) Due fili percorsi da corrente giacciono al suolo e tengono sospeso in aria un terzo filo per mezzo di forze magnetiche. (b) Nella situazione descritta nell'esempio i tre fili formano un triangolo equilatero. Le due forze magnetiche sul filo sospeso sono  $\vec{F}_{B,L}$ , la forza prodotta dal filo a sinistra al suolo, e  $\vec{F}_{B,R}$ , la forza prodotta dal filo a destra al suolo. È riportata anche la forza gravitazionale che agisce sul filo sospeso.



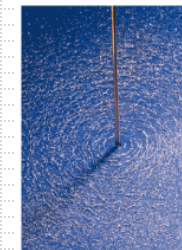
R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES

# Teorema di Ampère

- Un semplice esperimento mostra che un conduttore percorso da corrente produce un campo magnetico (figura 22.29)
- Le linee di campo di  $\vec{B}$  sono circonferenze concentriche
- Introduciamo una relazione analoga al teorema di Gauss fra una corrente ed il campo magnetico prodotto da essa



EdiSES R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES



c

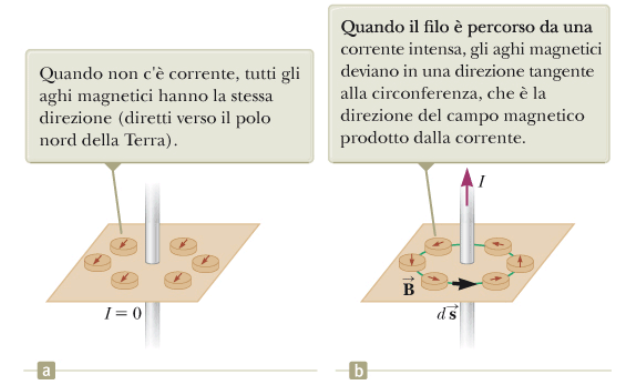
**Figura 22.29** (a) e (b) Gli aghi magnetici mostrano gli effetti della corrente che percorre un filo vicino. (c) Linee di campo magnetico circolari che circondano un conduttore percorso da corrente. Le linee sono mostrate con limatura di ferro.

# Teorema di Ampère

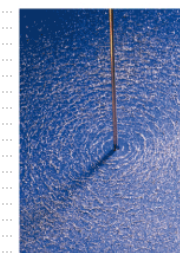
- Consideriamo il prodotto scalare  $\vec{B} \cdot d\vec{s}$  per un piccolo elemento di lunghezza  $d\vec{s}$  del percorso circolare centrato sul filo e mostrato in figura 22.29b. I due vettori sono sempre paralleli lungo il percorso quindi  $\vec{B} \cdot d\vec{s} = B ds$ . Inoltre  $\vec{B}$  è costante in modulo su questa circonferenza e il modulo è dato da  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ , posso quindi calcolare l'integrale di linea

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint ds = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (2\pi r) = \mu_0 I$$

Dove  $\oint ds = 2\pi r$  è la lunghezza della circonferenza



EdiSES R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES



© Richard Megna, Fundamental Photographs

**Figura 22.29** (a) e (b) Gli aghi magnetici mostrano gli effetti della corrente che percorre un filo vicino. (c) Linee di campo magnetico circolari che circondano un conduttore percorso da corrente. Le linee sono mostrate con limatura di ferro.

# Teorema di Ampère

- Questo risultato può essere esteso al caso generale in cui una corrente stazionaria passa attraverso l'area circondata da un qualsiasi percorso chiuso, questo risultato è detto teorema di Ampère:
- L'integrale di linea di  $\vec{B} \cdot d\vec{s}$  lungo un qualsiasi percorso chiuso è uguale a  $\mu_0 I$ , dove  $I$  è la corrente stazionaria totale che attraversa una qualunque superficie delimitata dal percorso chiuso d'integrazione:

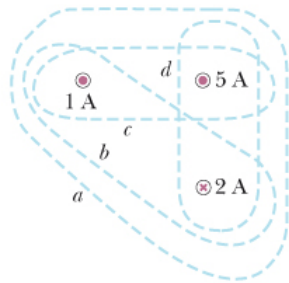
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

# Teorema di Ampère

- Per applicare l'equazione  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$  al calcolo di un campo magnetico dobbiamo determinare un cammino di integrazione tale che ogni sua porzione soddisfi una o più delle seguenti condizioni:
  1. Si può prevedere, tramite considerazioni di simmetria, che il modulo del campo magnetico è costante sulla porzione del cammino
  2. Il prodotto scalare  $\vec{B} \cdot d\vec{s}$  si può esprimere come semplice prodotto algebrico  $B ds$  poiché i due vettori sono paralleli
  3. Il prodotto scalare  $\vec{B} \cdot d\vec{s}$  è zero poiché i due vettori sono perpendicolari
  4. Si può dedurre che il campo magnetico è nullo in tutti i punti della porzione del cammino

# Quiz rapido

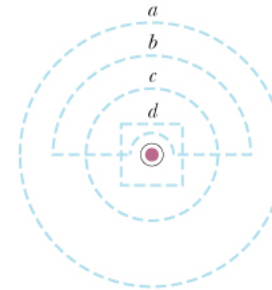
- Ordinare i valori di  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$  per i percorsi chiusi da «a» a «d» nelle figure 22.30 e 22.31 dal più grande al più piccolo.



**Figura 22.30** (Quiz Rapido 22.6) Quattro cammini chiusi intorno a tre fili percorsi da corrente.



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES



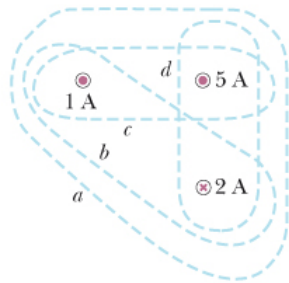
**Figura 22.31** (Quiz Rapido 22.7) Quattro cammini chiusi vicini a un filo percorso da corrente.



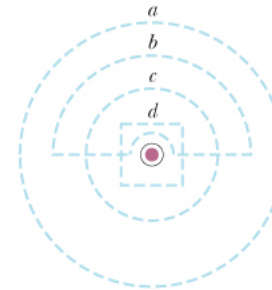
R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES

# Quiz rapido

- Ordinare i valori di  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$  per i percorsi chiusi da «a» a «d» nelle figure 22.30 e 22.31 dal più grande al più piccolo.



**Figura 22.30** (Quiz Rapido 22.6) Quattro cammini chiusi intorno a tre fili percorsi da corrente.



**Figura 22.31** (Quiz Rapido 22.7) Quattro cammini chiusi vicini a un filo percorso da corrente.

**Risposte**  
 $c > a > d > b$

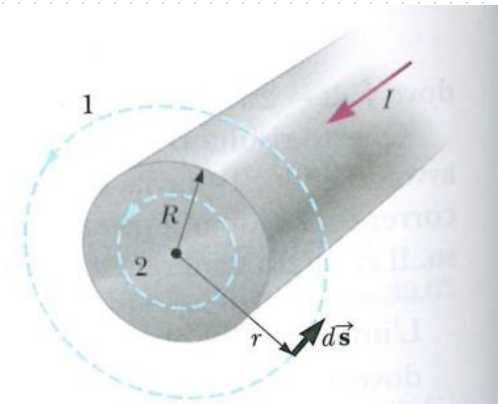


R.A. Serway, J. W. Jewett Jr  
Principi di Fisica - V Ed.  
EdiSES

$$a=c=d>b$$

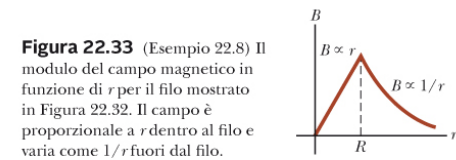
# Esempio – Il campo magnetico prodotto da un lungo filo rettilineo percorso da corrente

- Un lungo filo rettilineo di raggio  $R$  è percorso da una corrente  $I$ , distribuita uniformemente su tutta la sezione del filo (figura 22.32). Calcolare il campo magnetico a una distanza  $r$  dall'asse del filo per  $r \geq R$  e  $r < R$ .



**Figura 22.32** (Esempio 22.8) Un lungo filo rettilineo di raggio  $R$  è percorso da una corrente continua  $I$  uniformemente distribuita attraverso la sezione del filo. Il campo magnetico in qualunque punto può essere calcolato dal teorema di Ampère usando un percorso circolare di raggio  $r$  concentrico con il filo.

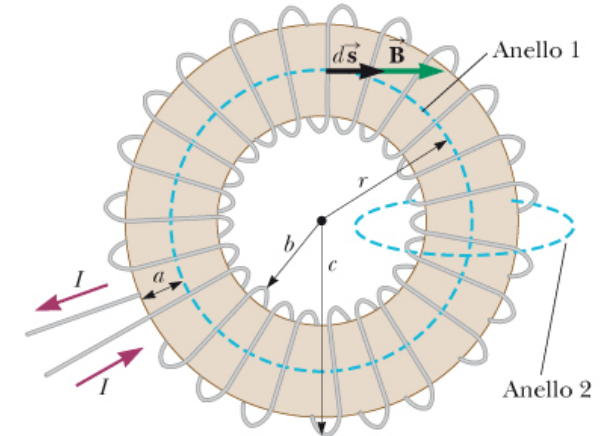
continua



**Figura 22.33** (Esempio 22.8) Il modulo del campo magnetico in funzione di  $r$  per il filo mostrato in Figura 22.32. Il campo è proporzionale a  $r$  dentro al filo e varia come  $1/r$  fuori dal filo.

# Esempio – Il campo magnetico prodotto da una bobina toroidale

- Un dispositivo chiamato toroide (figura a fianco) è spesso usato per produrre un campo magnetico quasi uniforme in una certa area chiusa. Il dispositivo è costituito da un filo conduttore avvolto attorno ad un anello (un toro) fatto di materiale isolante. Per una bobina avente  $N$  spire fittamente addossate l'una all'altra, calcolare il campo magnetico nella regione occupata dal toro ad una distanza  $r$  dal centro.

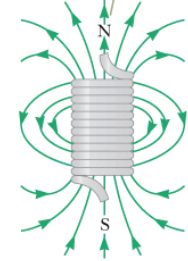


**Figura 22.34** (Esempio 22.9) Una bobina toroidale è costituita da molte spire di filo. Se le spire sono molto fitte, il campo magnetico all'interno della bobina è tangente alla circonferenza tratteggiata (cammino 1) e varia come  $1/r$ . La dimensione  $a$  è il raggio della sezione del toro. Il campo fuori dal toro è molto piccolo e può essere descritto usando il circuito di Ampère (cammino 2) sul lato destro, perpendicolare alla pagina.

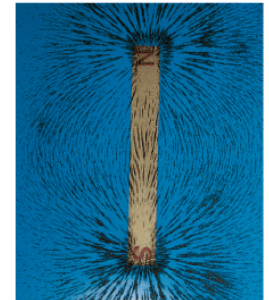
# Il campo magnetico di un solenoide

- Un solenoide è costituito da un lungo filo avvolto a forma di elica
- Se gli avvolgimenti sono molto fitti è possibile generare un campo magnetico sufficientemente uniforme al suo interno
- Le linee di campo hanno l'andamento mostrato in figura 22.35(a)
- La distribuzione del campo all'esterno del solenoide è simile a quella prodotta da una sbarretta magnetica (figura 22.35b)
- Per un solenoide ideale il campo all'esterno è trascurabile e il campo interno è uniforme

Le linee del campo magnetico ricordano quelle di una sbarretta magnetica. Si può dunque affermare che anche un solenoide ha un polo nord e un polo sud.



a



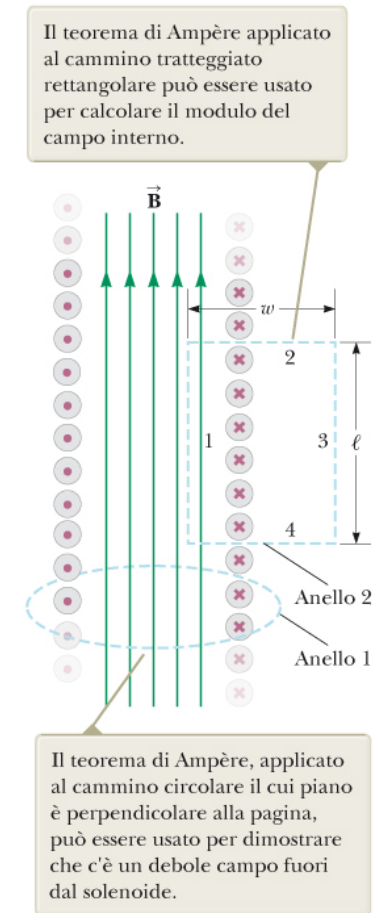
Henry Leapp e Jim Lehman

b

**Figura 22.35** (a) Le linee del campo magnetico per un solenoide di lunghezza finita, con avvolgimenti fitti, percorso da una corrente stazionaria. Il campo nello spazio interno è intenso e quasi uniforme. (b) La struttura del campo magnetico di una sbarra magnetica, mostrata con limatura di ferro su un foglio di carta.

# Il campo magnetico di un solenoide

- Se consideriamo il circuito di Ampère (circuito 1) perpendicolare alla pagina (slide) in figura 22.36 esso racchiude una piccola corrente generata dalle cariche in movimento nelle spire lungo la lunghezza del solenoide. Esiste quindi un campo magnetico diverso da zero all'esterno del solenoide. Questo campo può essere eliminato aggiungendo un secondo strato di spire esterne al primo strato (avvolto al contrario).

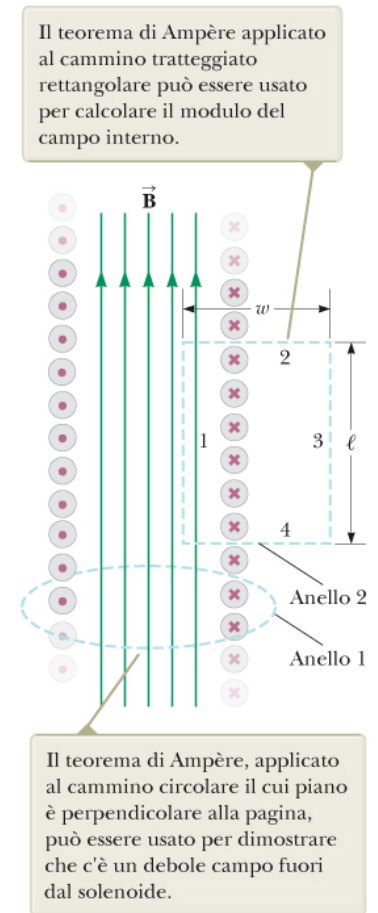


**Figura 22.36** Vista in sezione di un solenoide ideale, dove il campo magnetico interno è uniforme e il campo esterno è quasi zero.

# Il campo magnetico di un solenoide

- Il campo  $\vec{B}$  all'interno del solenoide ideale è uniforme e parallelo all'asse. Consideriamo un cammino rettangolare (anello 2 in figura) di lunghezza  $l$  e larghezza  $w$ . Calcolando l'integrale di  $\vec{B} \cdot d\vec{s}$  lungo il cammino vediamo che l'unico contributo diverso da zero è dato dal lato 1. Quindi:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_{\text{lato 1}} \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \int_{\text{lato 1}} ds = Bl$$



**Figura 22.36** Vista in sezione di un solenoide ideale, dove il campo magnetico interno è uniforme e il campo esterno è quasi zero.

# Il campo magnetico di un solenoide

- Se  $N$  è il numero di spire nel tratto di lunghezza  $l$ , allora la corrente totale attraverso il rettangolo è  $NI$ . Applicando il teorema di Ampère a questo percorso si ha quindi

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = Bl = \mu_0 NI$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I$$

Dove  $n = N/l$  è il numero di spire per unità di lunghezza.

# Quiz rapido

- Considera un solenoide di lunghezza grande rispetto al raggio. Tra le seguenti opzioni, quale è il modo più efficace per incrementare il campo magnetico nel solenoide?
  - A. Raddoppiare la lunghezza, mantenendo costante il numero di spire per unità di lunghezza
  - B. Dimezzare il raggio mantenendo costante il numero di spire per unità di lunghezza
  - C. Ricoprire l'intero solenoide con uno strato addizionale di spire percorse da corrente

# Quiz rapido

- Considera un solenoide di lunghezza grande rispetto al raggio. Tra le seguenti opzioni, quale è il modo più efficace per incrementare il campo magnetico nel solenoide?
  - A. Raddoppiare la lunghezza, mantenendo costante il numero di spire per unità di lunghezza
  - B. Dimezzare il raggio mantenendo costante il numero di spire per unità di lunghezza
  - C. Ricoprire l'intero solenoide con uno strato addizionale di spire percorse da corrente

# Sommario (1)

- La forza magnetica che agisce su una carica  $q$  che si muove con una velocità  $\vec{v}$  in un campo magnetico esterno  $\vec{B}$  è

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Questa forza ha direzione perpendicolare sia alla velocità della particella che al campo magnetico e si ottiene con la regola della mano destra. Il modulo della forza magnetica è dato da

$$F_B = |q|vB \sin \theta$$

dove  $\theta$  è l'angolo tra  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ .

## Sommario (2)

- Una particella di massa  $m$  e carica  $q$  che si muove con velocità  $\vec{v}$  perpendicolarmente a un campo magnetico uniforme  $\vec{B}$  segue una traiettoria circolare di raggio

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

## Sommario (3)

- Se un conduttore rettilineo di lunghezza  $L$  è percorso da una corrente  $I$ , la forza magnetica che agisce sul conduttore quando viene posto in un campo magnetico esterno  $\vec{B}$  è data da:

$$\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B}$$

dove  $\vec{L}$  è nella direzione della corrente e  $|\vec{L}| = L$  è la lunghezza del conduttore.

Se un filo di lunghezza arbitraria, percorso da una corrente  $I$ , viene posto in un campo magnetico esterno, la forza magnetica che agisce su un elemento infinitesimo  $d\vec{s}$  è data da:

$$d\vec{F}_B = Id\vec{s} \times \vec{B}$$

Per determinare la forza magnetica totale agente sul filo, si deve integrare questa equazione sull'intero filo.

## Sommario (4)

- Il **momento di dipolo magnetico**  $\vec{\mu}$  di una spira percorsa dalla corrente  $I$  è:  
$$\vec{\mu} = I\vec{A}$$

dove  $\vec{A}$  è perpendicolare al piano della spira e  $|\vec{A}|$  è uguale all'area della spira. Nel sistema SI l'unità di misura di  $\vec{\mu}$  è  $A \cdot m^2$ .

- Il momento delle forze  $\vec{\tau}$  che si esercita su una spira percorsa da corrente quando viene posta in un campo magnetico esterno uniforme  $\vec{B}$  è dato da:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

L'energia potenziale del sistema composto da un dipolo magnetico in un campo magnetico è

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

## Sommario (5)

- La **legge di Biot-Savart** dice che il campo magnetico  $d\vec{B}$  in un punto P, prodotto da un elemento di circuito  $d\vec{s}$  percorso da una corrente stazionaria  $I$  è dato da:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

dove  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m/A}$  è la permeabilità magnetica del vuoto ed  $r$  è la distanza tra l'elemento di corrente e il punto P. Per trovare il campo risultante nel punto P, è necessario integrare questa espressione vettoriale su tutta l'intera distribuzione.

# Sommario (6)

- Il modulo del campo magnetico ad una distanza  $r$  da un lungo filo rettilineo, percorso da una corrente  $I$ , è dato da

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

- Le linee di campo sono circonferenze concentriche con il filo.
- La forza magnetica per unità di lunghezza tra due fili paralleli (almeno uno dei quali è molto lungo), posti a una distanza  $a$ , e percorsi da correnti  $I_1$  e  $I_2$  è

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

- La forza è attrattiva quando le correnti scorrono nello stesso verso e repulsiva se le correnti scorrono in verso opposto.

# Sommario (7)

- Il **teorema di Ampère** dice che l'integrale di linea di  $\vec{B} \cdot d\vec{s}$  esteso ad un percorso chiuso è uguale a  $\mu_0 I$ , dove  $I$  è la corrente continua totale concatenata con il percorso chiuso:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

Usando il teorema di Ampère si trova che il campo magnetico all'interno di una bobina toroidale e quello di un solenoide sono dati da

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r} \quad (\text{toroide})$$
$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I \quad (\text{solenoido})$$

dove  $N$  è il numero totale di spire dell'avvolgimento, ed  $n$  il numero di spire per unità di lunghezza.