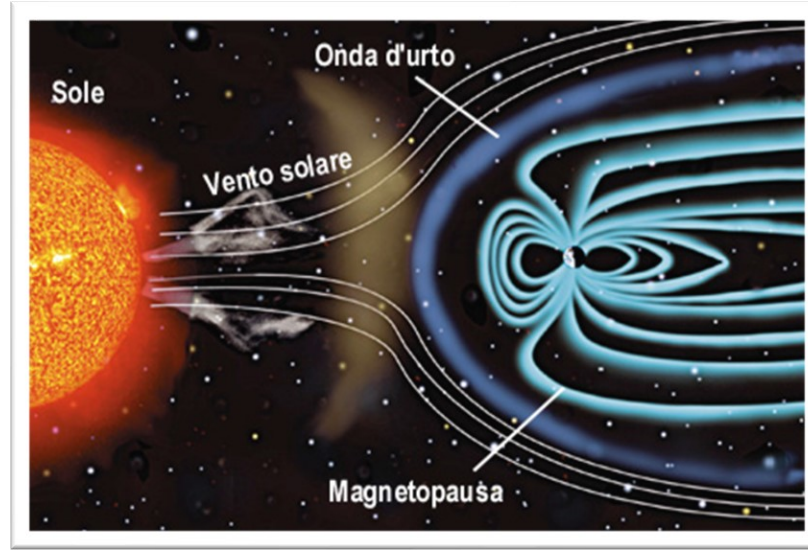


Hendrik Antoon Lorentz
Nobel per la Fisica 1902



Scudo magnetico terrestre



magnetite

Il magnetismo

TRATTO DA:

I PROBLEMI DELLA FISICA- Cutnell, Johnson, Young, Standler – Zanichelli editore

L'AMALDI PER I LICEI SCIENTIFICI – Ugo Amaldi - Zanichelli editore

Integrazioni e LO a cura del docente

Il magnete naturale

Un minerale di ferro, **la magnetite**, ha la proprietà di attirare oggetti di ferro.



In condizioni normali un chiodo non attira altri oggetti di ferro o di acciaio, ma acquista questa proprietà se è messo a contatto con un pezzo di magnetite.

Così magnetizzato, il chiodo attira, per esempio, delle graffette di acciaio; a contatto del chiodo le graffette a loro volta si magnetizzano e ne attirano altre.



Il chiodo è divenuto un magnete artificiale, o calamita.

Uguualmente, sono divenute magneti artificiali le graffette.

Ferromagnetismo

La magnetite è un magnete naturale, ma esistono anche delle sostanze, come il **ferro** e le sue leghe (**acciai**), il **cobalto** e il **nichel**, che, messe a contatto o nelle vicinanze di un magnete, ne acquistano le proprietà attrattive caratteristiche: si dice che vengono magnetizzati.

Si chiamano **sostanze ferromagnetiche** i materiali che possono essere magnetizzati.

Magnetizzazione temporanea e permanente

La magnetizzazione di una sostanza ferromagnetica può essere permanente o temporanea.

La magnetizzazione permanente si verifica per esempio **nell'acciaio** che, in presenza di un magnete, acquista una magnetizzazione che permane, il materiale diventa a sua volta un magnete.

La magnetizzazione temporanea, riscontrata per esempio nel **ferro dolce**, permane invece fintanto che è presente il magnete che l'ha provocata.

Precisazione: il ferro dolce inteso come ferro puro non è presente sul mercato in quanto troppo malleabile. Si tende a distinguere il ferro dall'acciaio in base alla percentuale di carbonio presente nel ferro e dalla conseguente durezza che ne deriva.

$C < 0,10\%$	Ferro
$0,10\% \leq C < 2\%$	Acciaio
$C > 2\%$	Ghisa

La bussola

L'ago di una bussola è un magnete che può ruotare liberamente su un piano. Se la bussola è posta su una superficie orizzontale, l'ago si orienta nella direzione nord-sud.

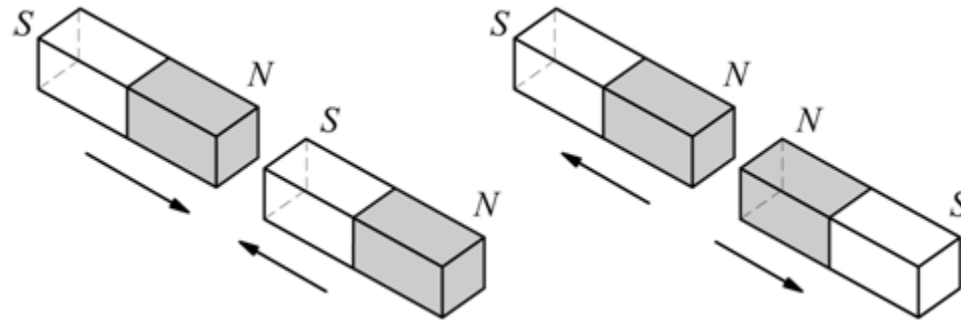
L'estremità dell'ago che punta verso nord è detta **polo nord magnetico**, mentre quella opposta è il **polo sud magnetico**.



Interazione tra due magneti

I magneti esercitano forze gli uni sugli altri. La figura mostra che le forze magnetiche tra i poli **nord** e **sud** hanno la seguente proprietà:

poli simili si respingono, poli opposti si attraggono.

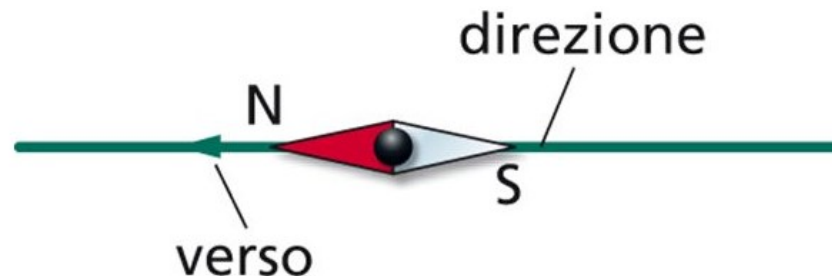


Il campo magnetico

Attorno a un magnete esiste un campo magnetico. Come il campo elettrico, il campo magnetico è un campo vettoriale: in ogni punto dello spazio attorno a un magnete è definito un vettore campo magnetico caratterizzato da intensità, direzione e verso.

Direzione e verso di un campo magnetico

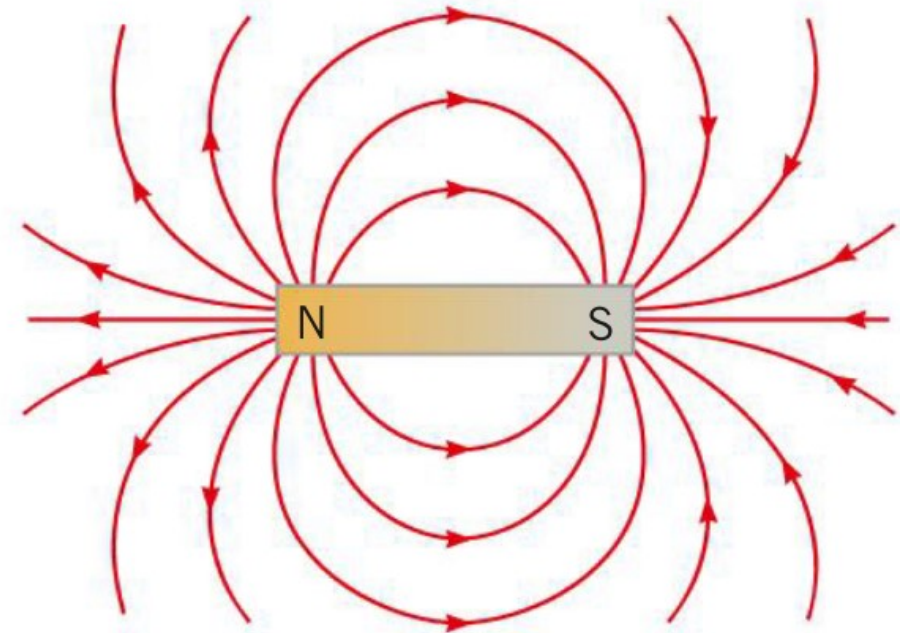
La direzione e il verso di un campo magnetico in ogni punto dello spazio sono quelli indicati dal polo nord di un piccolo ago magnetico posto in quel punto.



Le linee di campo magnetico

- Le linee sono uscenti nel polo nord ed entranti nel polo sud di un magnete, esse non nascono e non terminano in altri punti dello spazio;
- in modo analogo al campo elettrico, il campo magnetico in ogni punto è tangente alla linea di forza magnetica che passa in quel punto;
- Il campo magnetico è più intenso nelle regioni in cui le linee di forza sono più vicine fra loro ed è più debole quando le linee sono più lontane fra loro. Per esempio, nella figura le linee sono più addensate vicino ai poli, perché in quelle zone il campo magnetico è più intenso.

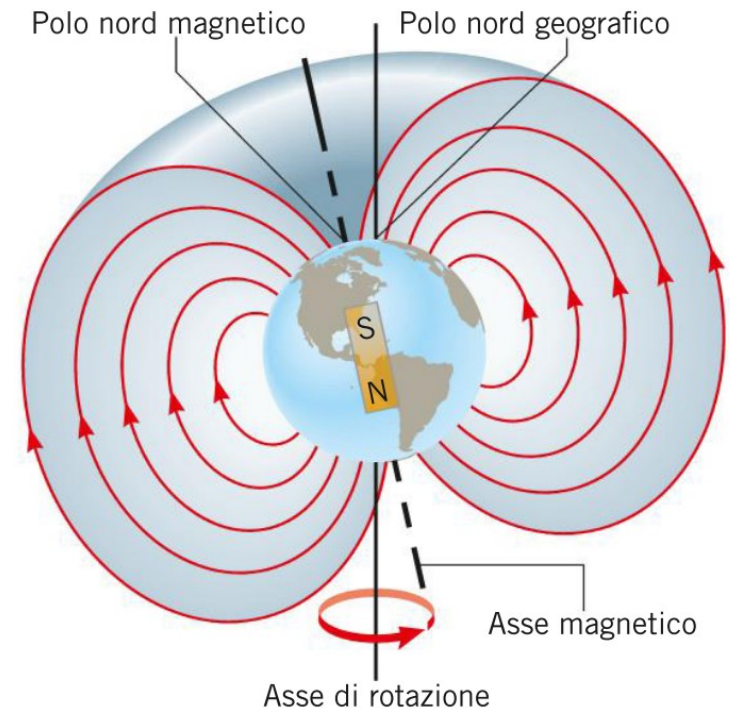
Linee del campo magnetico



Campo magnetico terrestre

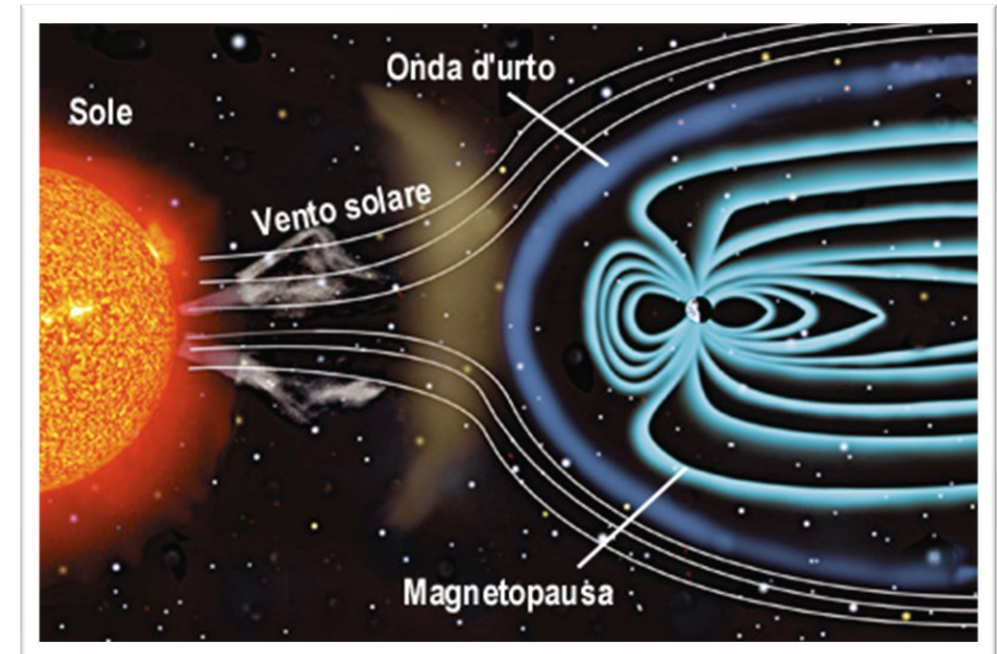
Il nostro pianeta si comporta come se fosse un magnete a barra. L'orientazione di questo ipotetico magnete individua l'asse magnetico della Terra.

Il punto in cui l'asse magnetico interseca la superficie dell'emisfero nord è noto come polo nord magnetico. Esso deve questo nome al fatto che è il punto verso cui si orienta l'ago della bussola.



Lo scudo magnetico della Terra

La Terra ha uno scudo naturale prodotto probabilmente dal nucleo ferroso bollente. Ovviamente il pianeta si sta raffreddando, ma molto lentamente. È come una grande centrale elettrica in via di spegnimento da miliardi di anni: produce calore, come sappiamo, ma anche delle potenti fasce elettromagnetiche che formano la cosiddetta magnetosfera. Il vento solare (flusso di elettroni e protoni) la investe, la schiaccia, ma di fatto devia sua direzione.



Aurore polari

Il campo magnetico terrestre convoglia verso i poli le particelle cariche provenienti dal Sole. L'interazione di queste particelle con le molecole presenti nell'alta atmosfera produce nel cielo notturno una luminosità diffusa nota come aurora polare.

L'**aurora polare**, spesso denominata **aurora boreale** o **australe** a seconda che si verifichi rispettivamente nell'emisfero nord o sud.



Nord magnetico e geografico

Il polo nord magnetico non coincide con il polo nord geografico

Inoltre è interessante notare che la posizione del polo nord magnetico non è fissa ma si sposta negli anni.

Perciò, puntando verso il nord magnetico, l'ago di una bussola non indica in realtà il polo nord geografico.

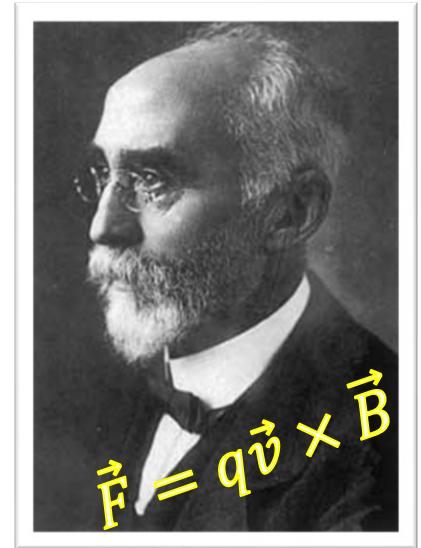
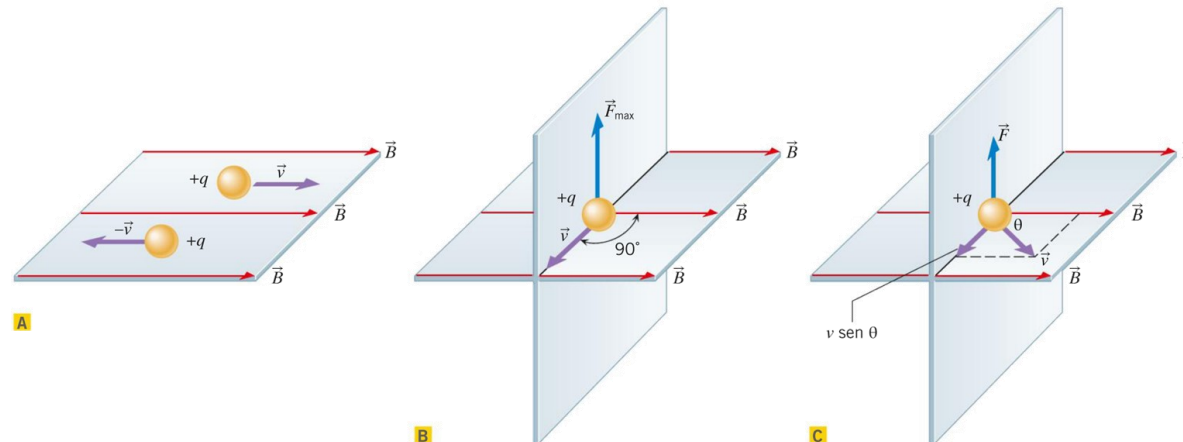
Si dice **declinazione magnetica** l'angolo formato dalla direzione dell'ago magnetico e da quella del nord geografico. A Roma l'attuale declinazione magnetica è circa 4° est: ciò significa che l'ago di una bussola punta a 4° est rispetto al nord geografico.

La forza di Lorentz

Una carica elettrica in un campo magnetico risente di una **forza** di origine magnetica quando si presentano entrambe le seguenti condizioni:

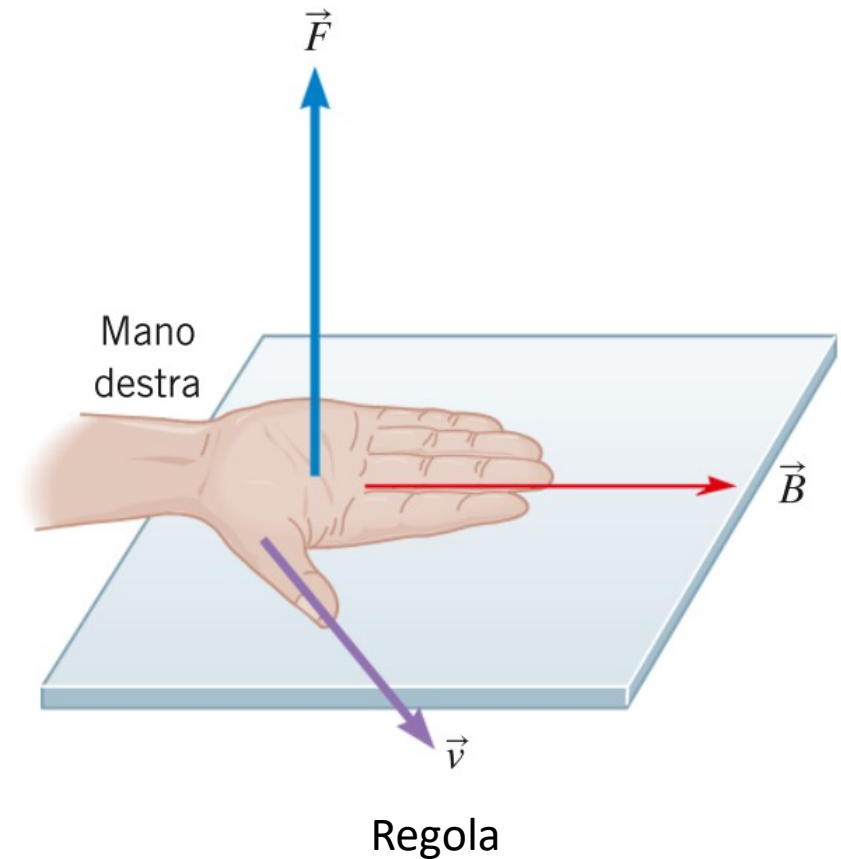
- *la carica è in moto;*
- *la velocità della carica ha una componente perpendicolare alla direzione del campo magnetico.*

Campo magnetico uniforme per direzione e intensità



La Forza

- Agisce in direzione perpendicolare al piano di v e B
- Ha modulo massimo quando la carica si muove in direzione perpendicolare alla direzione di B
- È nulla quando la carica si muove in direzione parallela alla direzione del campo B (qualunque sia il verso).



Enunciato della forza di Lorentz

In definitiva, su una carica elettrica positiva q in moto con velocità \vec{v} in un campo magnetico \vec{B} agisce una forza \vec{F} tale che

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

Questa forza è detta **forza di Lorentz**, dal nome del fisico olandese Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928).

Il modulo della forza di Lorentz è

$$F = qvB \sin \theta$$

Definizione di campo magnetico

il campo elettrico \vec{E} in ogni punto dello spazio è la forza \vec{F} per unità di carica che agisce su una carica di prova positiva q posta in quel punto:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Nel caso del magnetismo però la forza dipende non solo dalla carica q ma anche dalla componente $v \cdot \sin(\theta)$, della velocità che è perpendicolare al campo magnetico.

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{q \cdot v \cdot \sin(\theta)}$$

Definizione di campo magnetico

L'intensità B del campo magnetico in ogni punto dello spazio è

$$B = \frac{F}{qv \sin \theta}$$

dove F è l'intensità della forza che agisce sulla carica q in quel punto, v è il modulo della velocità della carica e θ ($0 \leq \theta \leq 180^\circ$) è l'angolo formato dalla velocità e dal campo magnetico.

Il campo magnetico \vec{B} è un vettore; la sua direzione e il suo verso possono essere determinati mediante un piccolo ago magnetico.

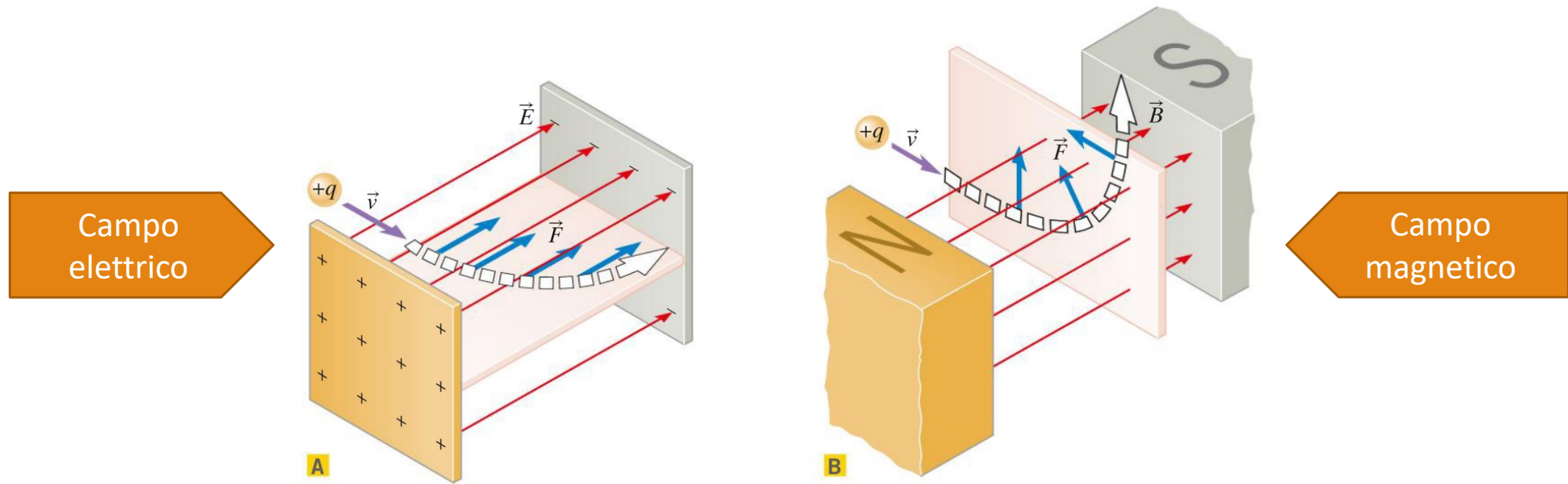
Unità di misura: newton · secondi / (coulomb · metri) = 1 tesla (T).

Il Gauss

In parecchie situazioni il campo magnetico ha un valore che è molto minore di un tesla. Per esempio, l'intensità del campo magnetico vicino alla superficie terrestre è circa $10^{-4} T$.

In questi casi si utilizza ancora un'unità di misura (che non appartiene al SI) dell'intensità del campo magnetico detta gauss (G): $1 G = 1 \cdot 10^{-4} T$.

Il moto di una carica in un campo magnetico



La forza elettrica \vec{F} che agisce su una carica positiva è parallela al campo elettrico \vec{E} e incurva la traiettoria della particella nel piano orizzontale.

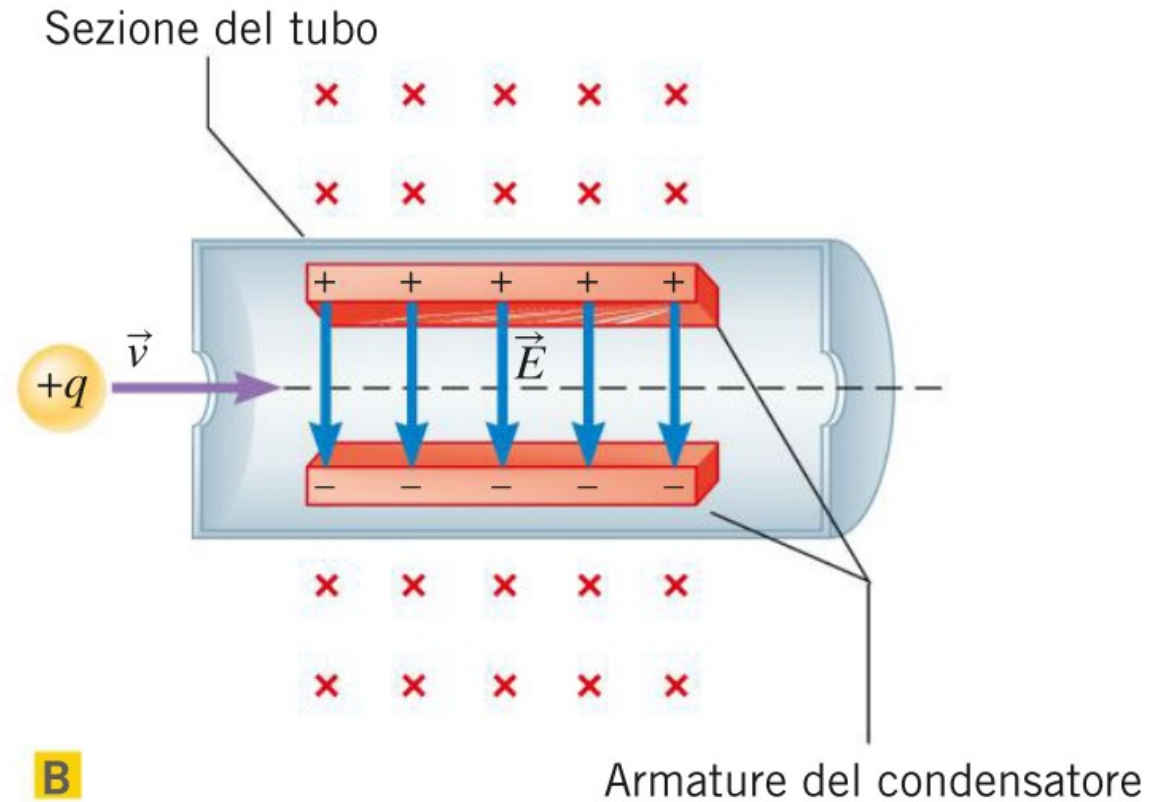
La forza di Lorentz \vec{F} è perpendicolare sia al campo magnetico \vec{B} sia alla velocità \vec{v} e incurva la traiettoria della particella in un piano verticale.

Il selettore di velocità

Nel selettore la forza elettrica e la forza magnetica hanno direzione parallela e verso opposto: quindi si annullano reciprocamente quando i loro moduli sono uguali.

In questo caso, per il primo principio della dinamica, la particella si muove in linea retta con velocità costante ed esce dal lato destro del selettore. Ciò accade quando

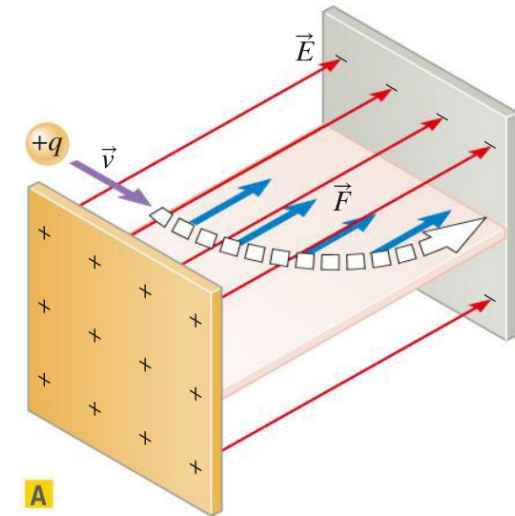
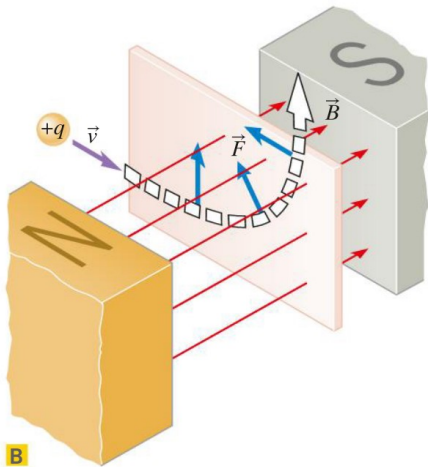
$$qE = qvB\sin(90^\circ) \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$



Particelle con velocità diverse da quella selezionata vengono deflesse e quindi non escono dal dispositivo.

Il lavoro su una carica in moto, in E e in B

Nella figura A il campo elettrico esercita una forza sulla carica positiva e di conseguenza la traiettoria della particella curva nella direzione della forza. Poiché **lo spostamento della particella ha una componente nella direzione della forza elettrica, questa forza compie un lavoro sulla particella**. Tale lavoro aumenta l'energia cinetica della particella e quindi la sua velocità in accordo con il teorema dell'energia cinetica visto in Meccanica.



Al contrario, la forza di Lorentz di figura B agisce sempre in direzione perpendicolare allo spostamento istantaneo della carica. Quindi **la forza di Lorentz non ha mai una componente nella direzione dello spostamento della carica**. Come risultato **non compie alcun lavoro sulla particella carica** e quindi non ne cambia l'energia cinetica.

Esercizio

1 In un certo punto, la componente orizzontale del campo magnetico terrestre è $2,5 \cdot 10^{-5}$ T diretta verso il nord. Un protone si muove verso est con una velocità tale che la forza magnetica bilancia il suo peso.

► Calcola la velocità del protone.

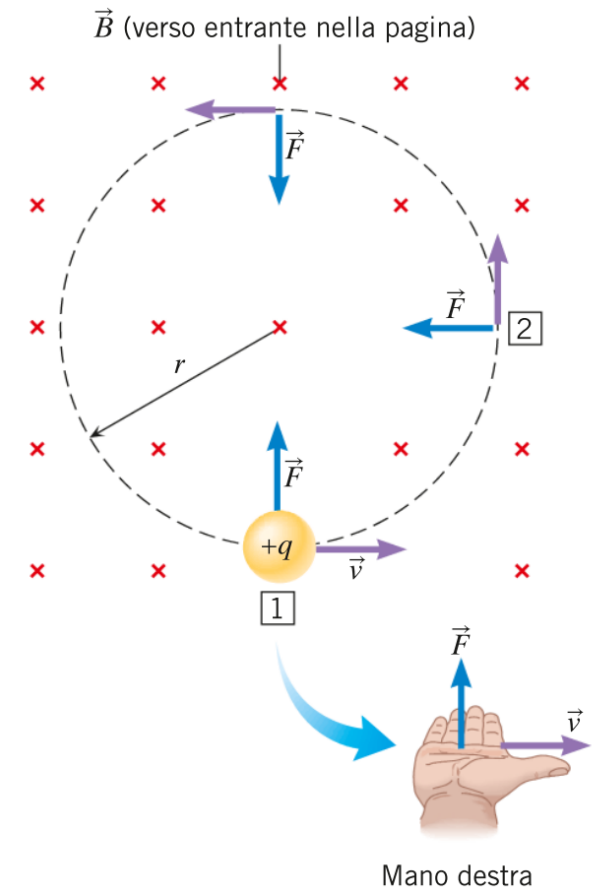
✓ $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg};$

✓ $q_p = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C};$

Traiettorie circolari

Consideriamo una carica positiva che si muove in un campo magnetico uniforme \vec{B} con una velocità \vec{v} perpendicolare alle linee del campo.

La forza di Lorentz induce la particella a percorrere una traiettoria circolare ed essendo perpendicolare al moto della particella agisce da forza centripeta.



Forza centripeta

Ricordiamo che la forza centripeta in Meccanica è una forza diretta verso il centro di curvatura della traiettoria descritta dalla particella.

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

Dato che al primo membro F_c rappresenta la forza di Lorentz, si può ricavare facilmente il raggio della circonferenza descritta dalla carica soggetta a B:

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

Da cui

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

Inversa proporzionalità tra r e B

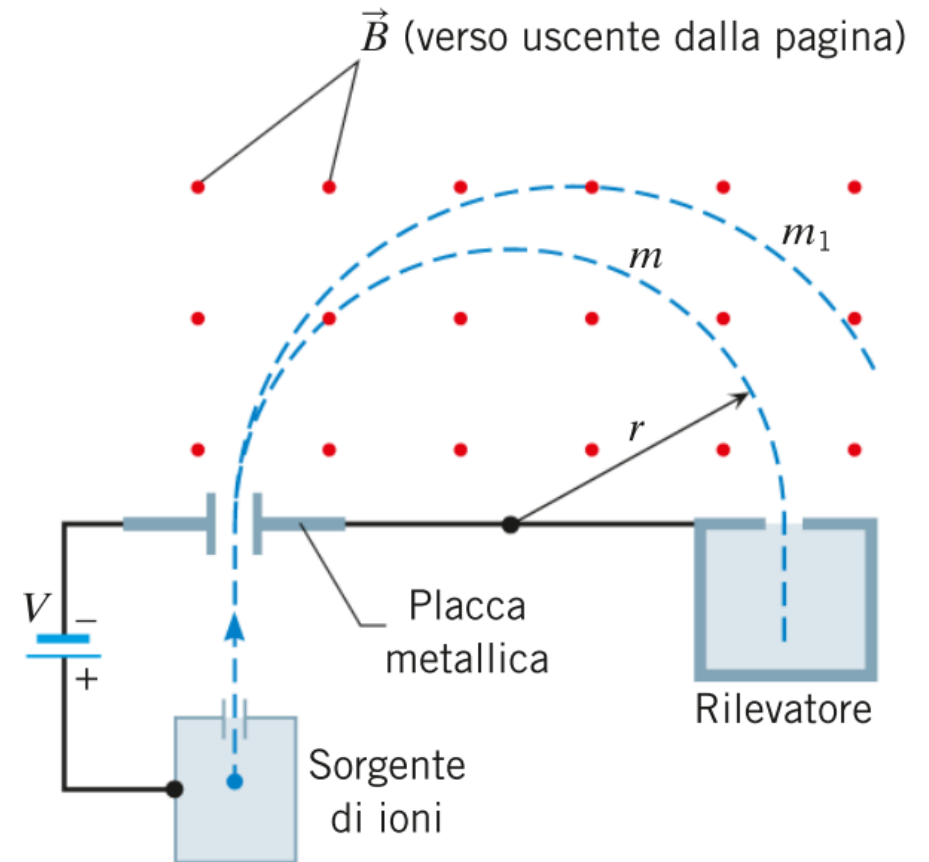
$$r = \frac{mv}{qB}$$

Questo risultato dimostra che il raggio della traiettoria è inversamente proporzionale all'intensità del campo magnetico, per cui campi intensi danno luogo a traiettorie circolari con raggi piccoli.

Applicazione: Lo spettrometro di massa

I fisici utilizzano gli spettrometri di massa per determinare la massa e l'abbondanza relativa degli isotopi. I chimici usano questi strumenti per identificare le molecole prodotte nelle reazioni chimiche.

1. Gli atomi o le molecole vengono ionizzati
2. Il processo di ionizzazione rimuove un elettrone dalla particella lasciandola con una carica positiva totale $+e$
3. Gli ioni positivi sono poi accelerati attraverso una differenza di potenziale V
4. Con una velocità v gli ioni passano attraverso un foro nella placca ed entrano in una regione in cui è presente un campo magnetico uniforme B
5. Gli ioni sono deflessi dal campo B in una traiettoria semicircolare.
6. Solo gli ioni che seguono una traiettoria di raggio r raggiungono il rivelatore, che registra il numero di ioni che arrivano ogni secondo.



Applicazione: Lo spettrometro di massa

La massa m dello ione rilevato può essere espressa in termini di r , B e v ricordando che il raggio della traiettoria seguita da una particella di carica $+e$ è

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

La velocità v dello ione può essere espressa in termini di differenza di potenziale V come

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Sostituendo v nella prima relazione si ha

$$m = \frac{er^2}{2V} \cdot B^2$$

Da cui si evince che variando l'intensità del campo si possono rilevare particella di massa diversa.

Esercizio

8

In un televisore con tubo a raggi catodici, gli elettroni sono accelerati da fermi attraverso una differenza di potenziale di 19 kV. Gli elettroni passano poi attraverso un campo magnetico di 0,28 T che li deflette nel punto appropriato dello schermo.

- ▶ Calcola la massima intensità della forza magnetica su un elettrone.

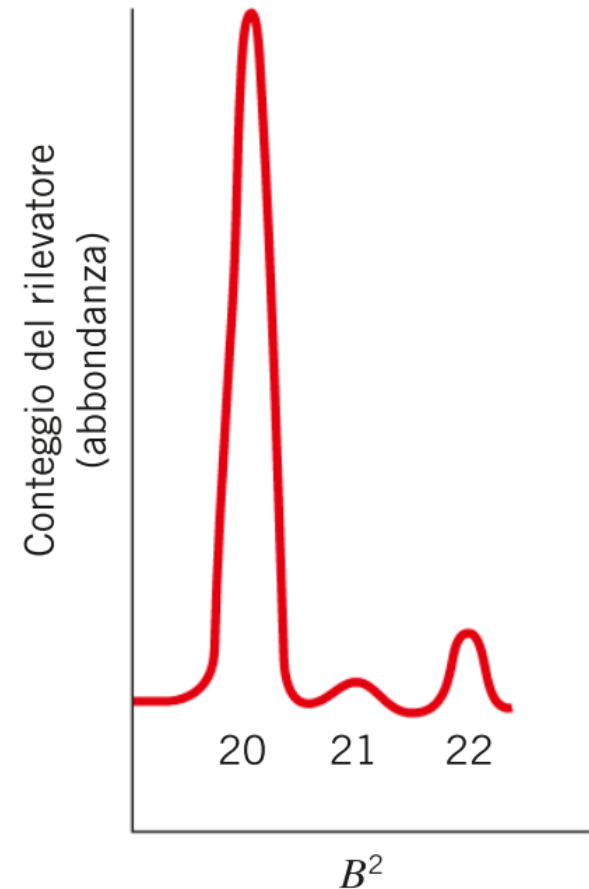
$$\checkmark m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg};$$

$$\checkmark q_e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C};$$

Gli isotopi del neon

Il grafico evidenzia che l'elemento neon ha tre isotopi di masse atomiche rispettivamente 20, 21 e 22, e che quindi i nuclei di neon possono avere un diverso numero di neutroni. Notiamo che gli isotopi del neon hanno differenti abbondanze: il più abbondante è il neon 20.

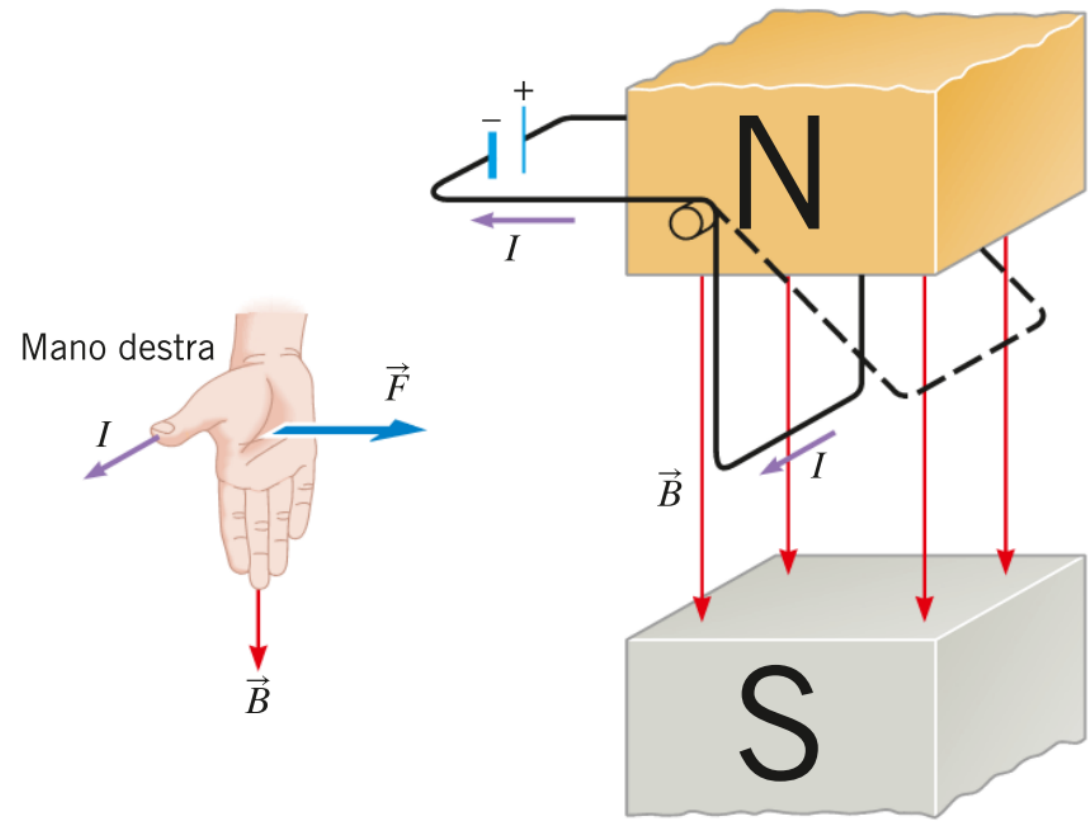
Lo spettro di massa (non in scala) del neon presente in natura mostra tre isotopi con numeri di massa rispettivamente 20, 21 e 22. L'altezza del picco indica l'abbondanza dell'isotopo.



La forza magnetica su un filo percorso da corrente

Un filo percorso da corrente prevede un flusso di cariche in movimento sulle quali agisce una forza magnetica.

Il filo è percorso da una corrente I . La parte inferiore del filo è orientata in direzione perpendicolare al campo magnetico \vec{B} . Una forza magnetica spinge il filo verso destra.



La forza magnetica su un filo percorso da corrente

Il filo attraversato da corrente è soggetto ad una forza di intensità

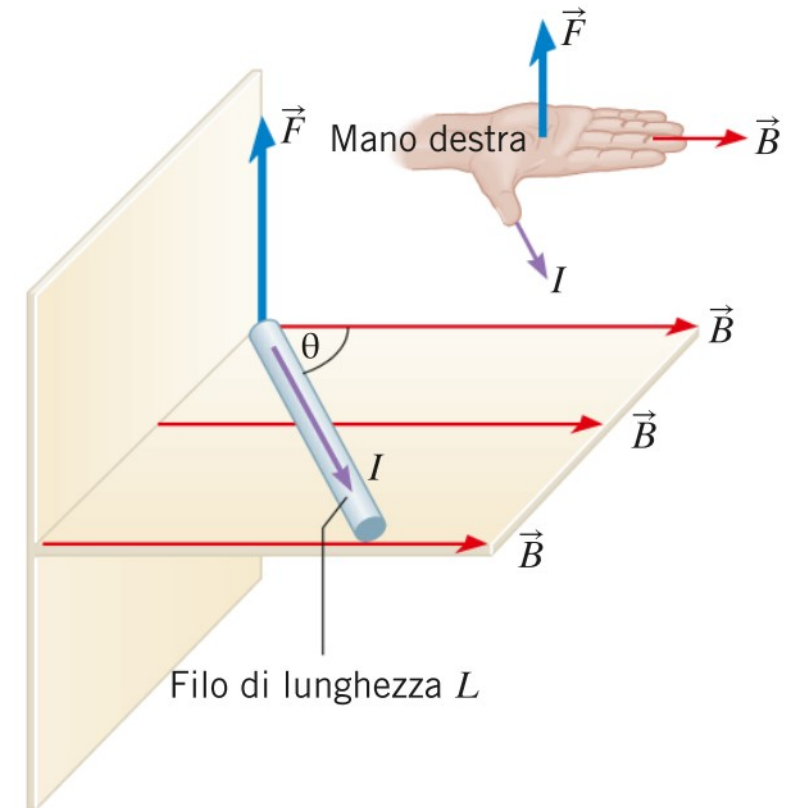
$$F = (\Delta q) v B \sin \theta$$

Se si moltiplica e si divide per Δt

$$F = \underbrace{\left(\frac{\Delta q}{\Delta t}\right)}_I \underbrace{(v \Delta t)}_L B \sin \theta$$

Si ottiene che l'intensità della forza magnetica esercitata sul filo dipenda dall'intensità del campo magnetico, dalla lunghezza del filo e dalla sua posizione e dall'intensità di corrente che lo attraversa.

$$F = BIL \sin \theta$$



Generalizzazione della forza di Lorentz – Forza di Laplace

La forza magnetica su un filo percorso da corrente

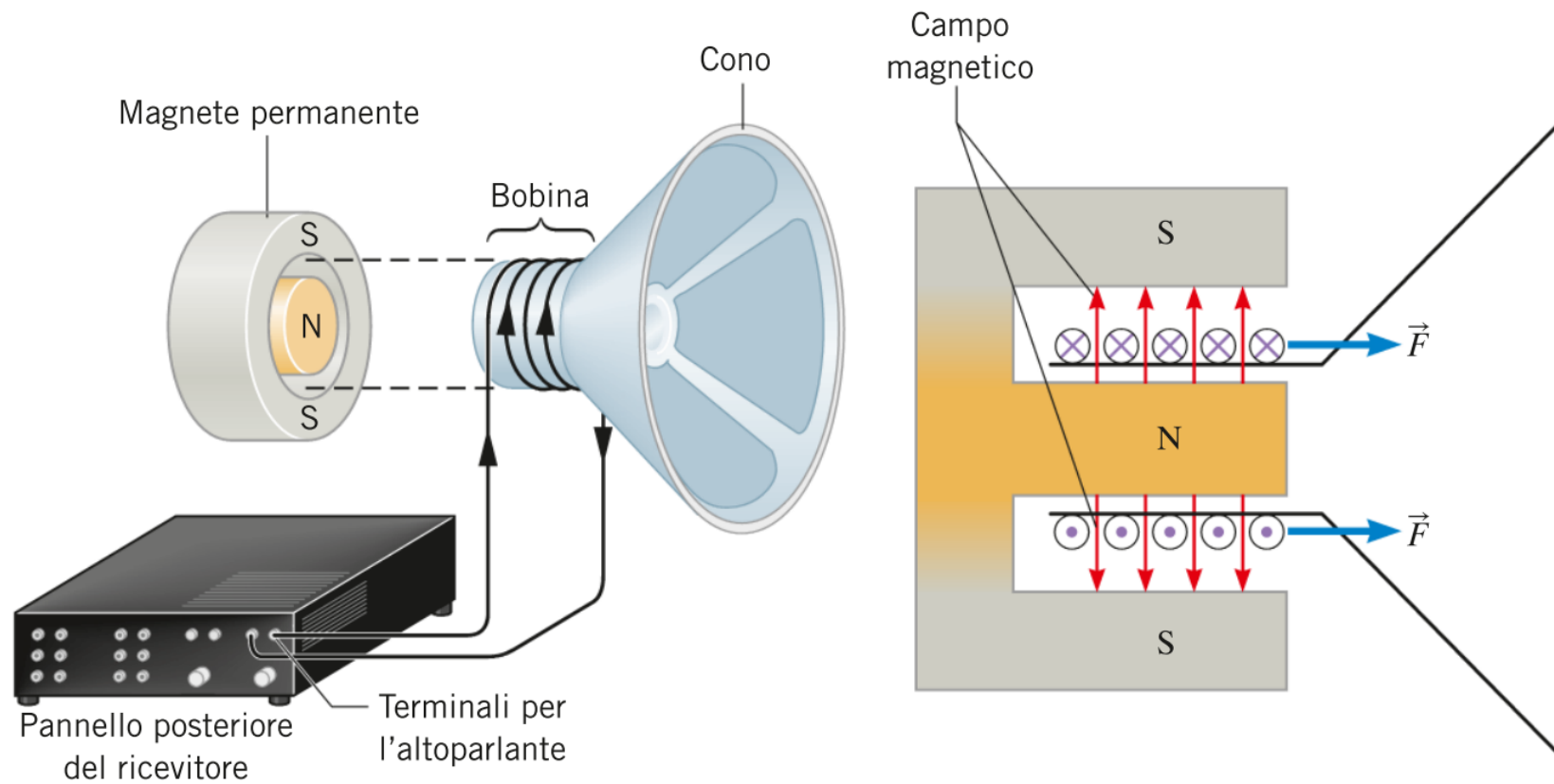
è massima quando il filo è perpendicolare al campo ($\theta = 90^\circ$)

$$F = BIL$$

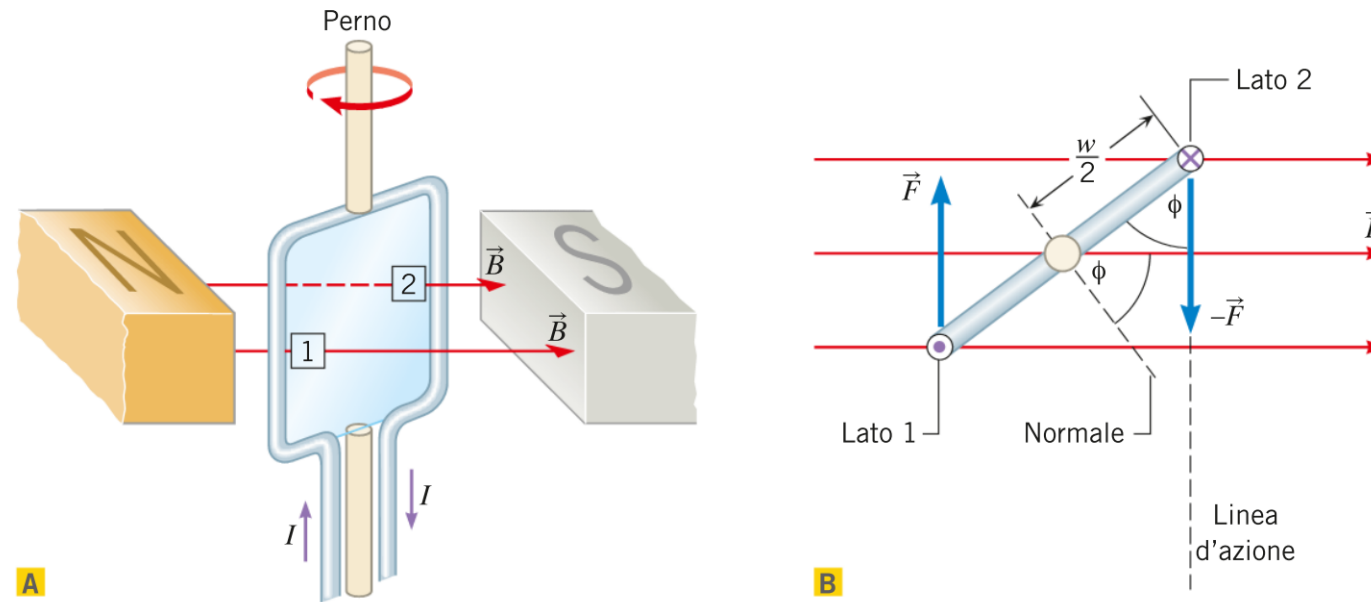
si annulla quando la corrente è parallela o antiparallela al campo ($\theta = 0^\circ$ o $\theta = 180^\circ$)

$$F = 0$$

Applicazione di $F=BIl$



Il momento torcente su una spira percorsa da corrente

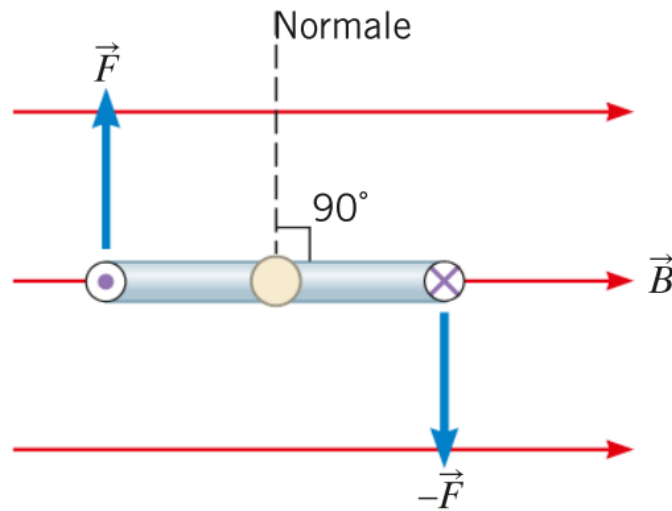


La spira risente di un momento torcente totale che tende a ruotarla in senso orario attorno al perno. Il momento torcente è massimo quando la normale al piano della spira è perpendicolare al campo, mentre è nullo quando la normale è parallela al campo. Quando una spira percorsa da corrente è posta in un campo magnetico, essa tende a ruotare in modo tale che la sua normale si allinei con il campo magnetico.

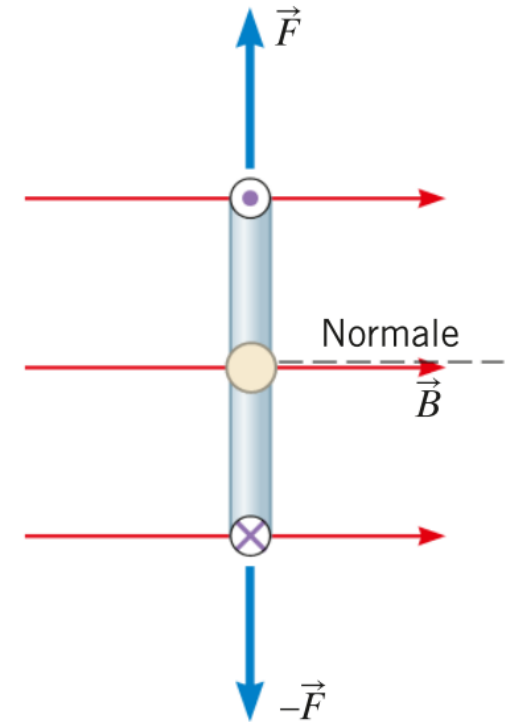
Momento massimo e momento nullo

Il momento torcente è massimo quando la normale al piano della spira è perpendicolare al campo magnetico.

Il momento è nullo quando la normale è parallela al campo.



A Momento torcente massimo



B Momento torcente nullo

Momento torcente di una e più spire

In Meccanica, il momento di una forza è il prodotto dell'intensità della forza per il braccio.

Il braccio è $(w/2) \sin \phi$, dove w è la larghezza della spira e ϕ è l'angolo formato dalla normale al piano della spira e dalla direzione del campo magnetico. Detto τ il momento totale, si ha

$$\tau = ILB \left(\frac{1}{2} w \sin \phi \right) + ILB \left(\frac{1}{2} w \sin \phi \right) = IAB \sin \phi$$

essendo il prodotto Lw uguale all'area A della spira.

Se la spira è sostituita da una bobina di N avvolgimenti, ognuno si comporta come una spira

$$\tau = NIAB \sin \phi$$

Esercizio

In una spira circolare lunga $7,00 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ scorre una corrente di $4,30 \text{ A}$. La spira è immersa in un campo magnetico di $2,50 \text{ T}$.

► Qual è il momento torcente massimo che può agire sulla spira?

Campi magnetici prodotti da correnti

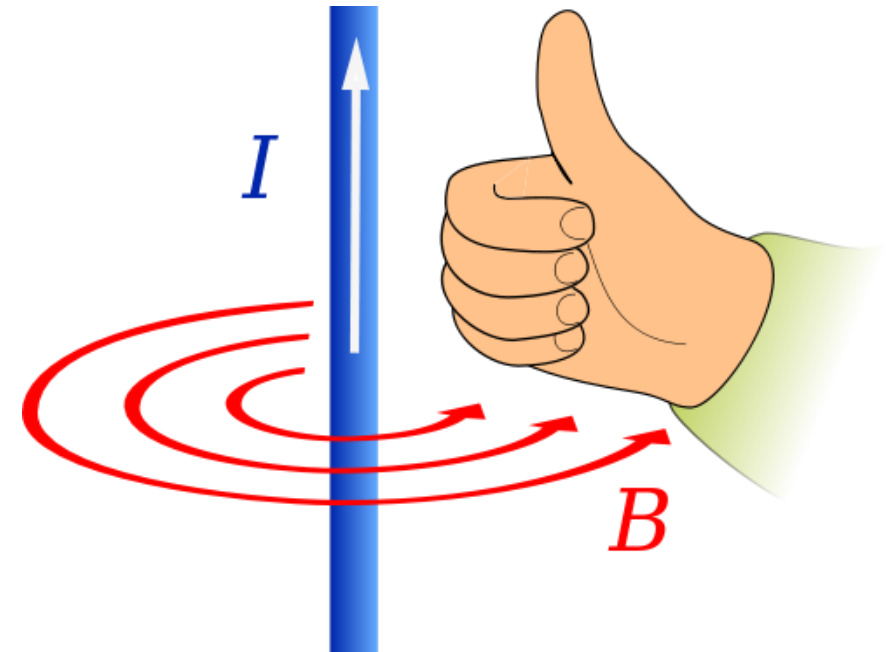
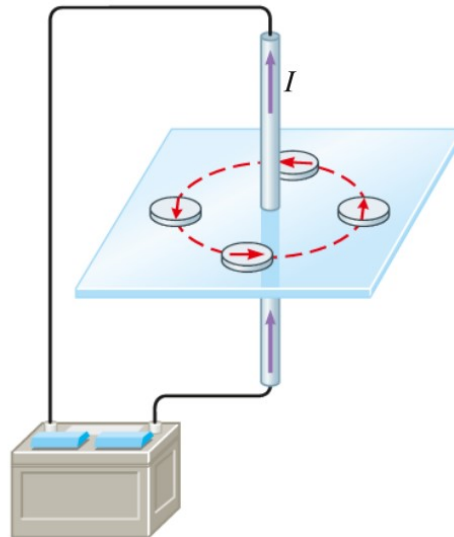
Hans Christian Ørsted (1777-1851) scoprì nel 1820 che un filo attraversato da corrente produce nello spazio circostante un campo magnetico.

Egli osservò che un filo percorso da corrente influenza l'orientazione di un ago magnetico posto nelle vicinanze. L'ago magnetico si allinea con il campo magnetico risultante dalla somma del campo magnetico generato dal filo e di quello terrestre.



Il campo magnetico generato da un filo percorso da corrente

Un filo rettilineo molto lungo percorso da corrente genera linee di forza di campo magnetico che sono circolari, concentriche con centro sul filo, come indicano gli aghi magnetici.

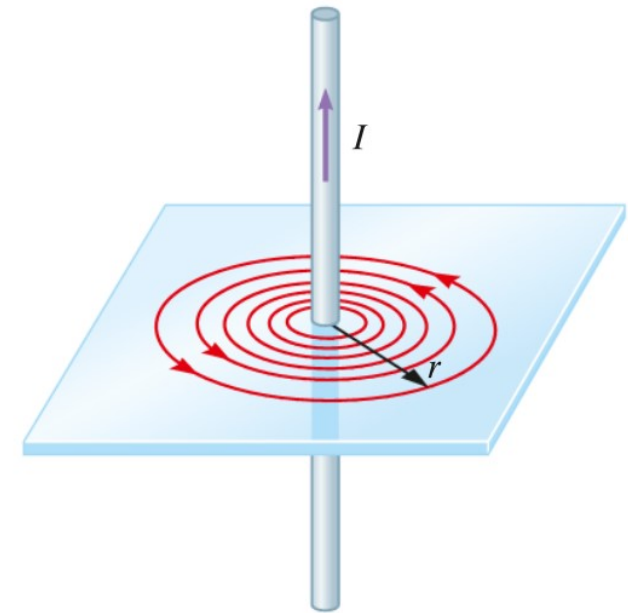


SECONDA REGOLA DELLA MANO DESTRA

Intensità del campo generato dalla corrente

Sperimentalmente si trova che l'intensità B del campo magnetico prodotto da un filo rettilineo indefinitamente esteso è direttamente proporzionale alla corrente I che lo percorre e inversamente proporzionale alla distanza radiale r dal filo

$$B \propto \frac{I}{r}$$



Legge di Biot-Savart

Introducendo la costante di proporzionalità $\frac{\mu_0}{2\pi}$



Un filo rettilineo indefinitamente esteso produce un campo magnetico B di intensità:

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

La costante μ_0 è detta permeabilità magnetica del vuoto ; il suo valore è $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} / \text{A}$.

Esercizio

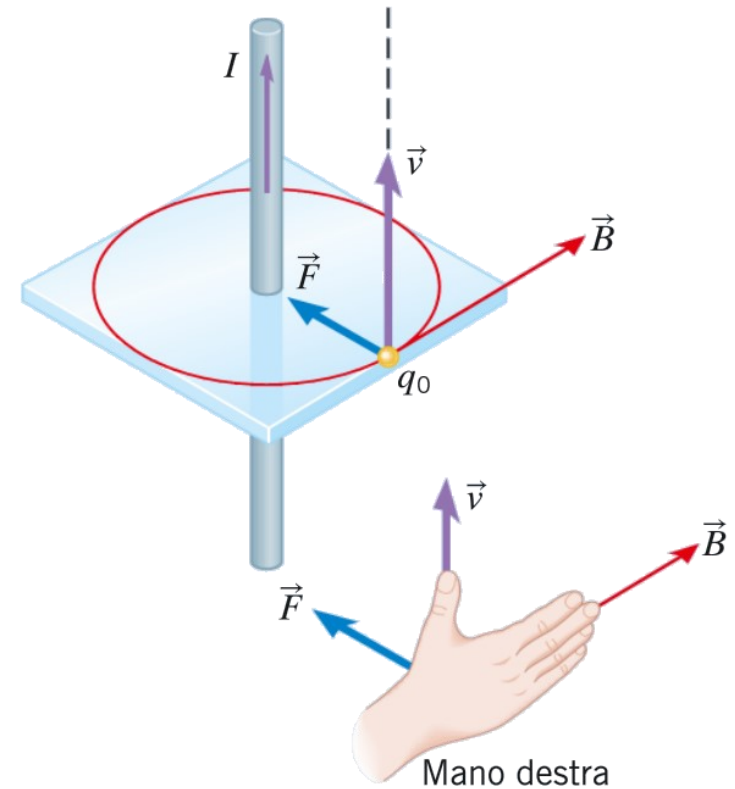
Un filo rettilineo molto lungo è percorso da una corrente di 48 A. Il campo magnetico prodotto da questa corrente in un certo punto è $8,0 \cdot 10^{-5}$ T.

► Qual è la distanza del punto dal filo?

Una particella carica in un campo magnetico indotto

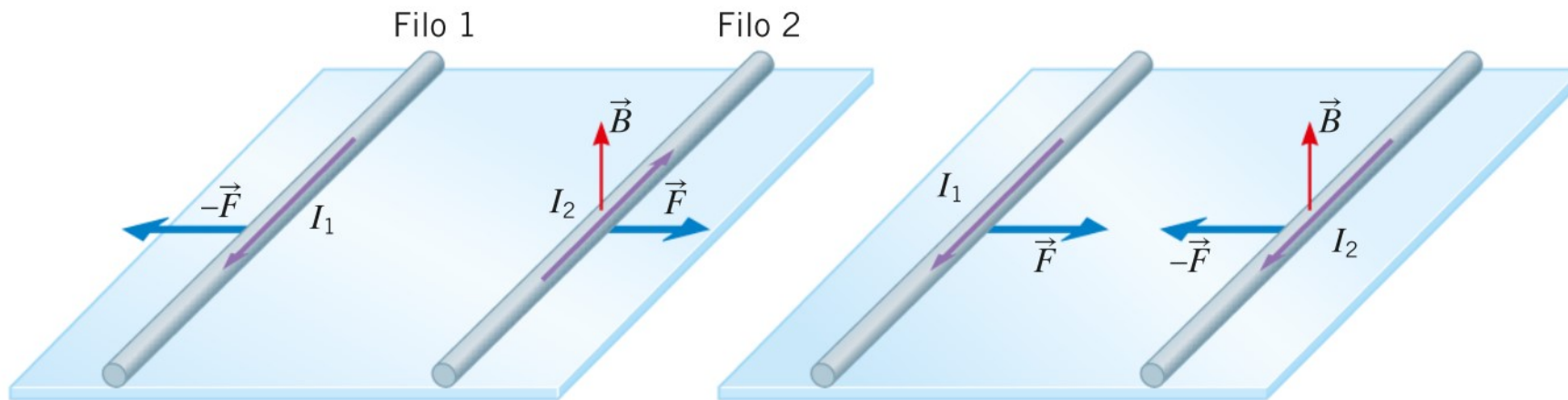
Una carica positiva q_0 in moto risente di una forza magnetica \vec{F} a causa del campo magnetico \vec{B} generato dalla corrente che scorre nel filo.

$$F = \overset{\mathbf{1}}{\downarrow} q_0 v B \sin \theta = \overset{\mathbf{2}}{\downarrow} q_0 v \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sin \theta$$



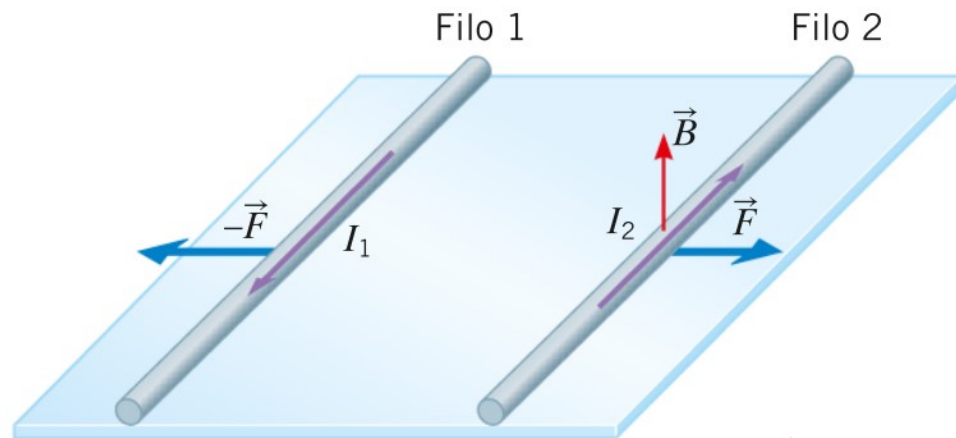
Forze magnetiche tra correnti

Consideriamo due fili rettilinei, indefinitamente estesi e paralleli, posti a una distanza d . Nei fili scorrono le correnti I_1 e I_2 con verso opposto.



Versi opposti della corrente

Nei fili scorrono le correnti I_1 e I_2 con verso opposto. La corrente I_2 è immersa nel campo magnetico generato dalla corrente I_1 . Quindi un tratto L del filo 2 risente di una forza dovuta a questo campo



$$F = I_2 L B \sin \theta$$

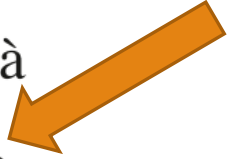
la direzione e il verso sono determinati dalla prima regola della mano destra.

Determinazione dell'interazione

Il campo \vec{B} generato dalla corrente I_1 è dato dalla legge di Biot-Savart

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

con $r = d$, per cui sul tratto di filo 2 agisce una forza di intensità

$$F = I_2 L B \sin \theta = I_2 L \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \sin 90^\circ = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} L$$


Terzo principio della Dinamica

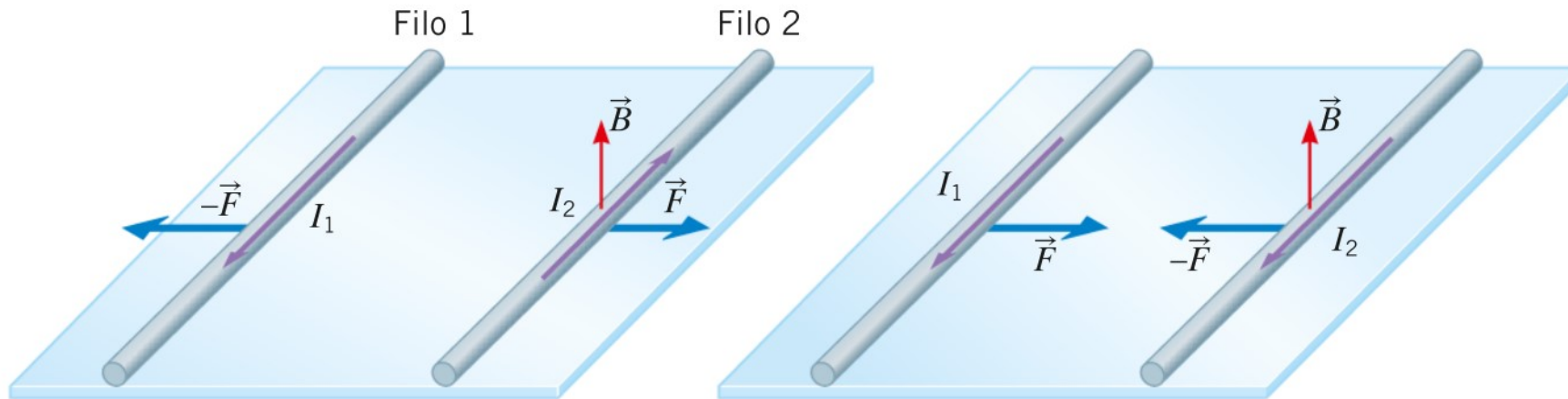
Per il terzo principio della dinamica il filo 1 risente di una forza magnetica uguale e opposta. Quindi:

due fili rettilinei paralleli percorsi da correnti con versi opposti si respingono.

mentre

due fili rettilinei paralleli percorsi da correnti con lo stesso verso si attraggono.

Forze magnetiche tra correnti



due fili rettilinei paralleli percorsi da correnti con versi opposti si respingono.

due fili rettilinei paralleli percorsi da correnti con lo stesso verso si attraggono.

Definizioni operative di ampere e coulomb

■ DEFINIZIONE DI AMPERE

1 ampere è l'intensità di corrente elettrica che scorrendo in due fili rettilinei molto lunghi e paralleli, posti a 1 metro di distanza, provoca una forza di $2 \cdot 10^{-7}$ N su ogni tratto di 1 metro di filo.

■ DEFINIZIONE DI COULOMB

1 coulomb è la quantità di carica elettrica che attraversa in 1 secondo la sezione di un filo in cui scorre una corrente elettrica di 1 ampere.

una spira attraversata da corrente

Al centro di una spira di raggio R il campo magnetico è perpendicolare al piano della spira e ha intensità

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R},$$

dove I è l'intensità di corrente lungo la spira.

Qualora si dovesse trattare di una bobina formata da N spire,

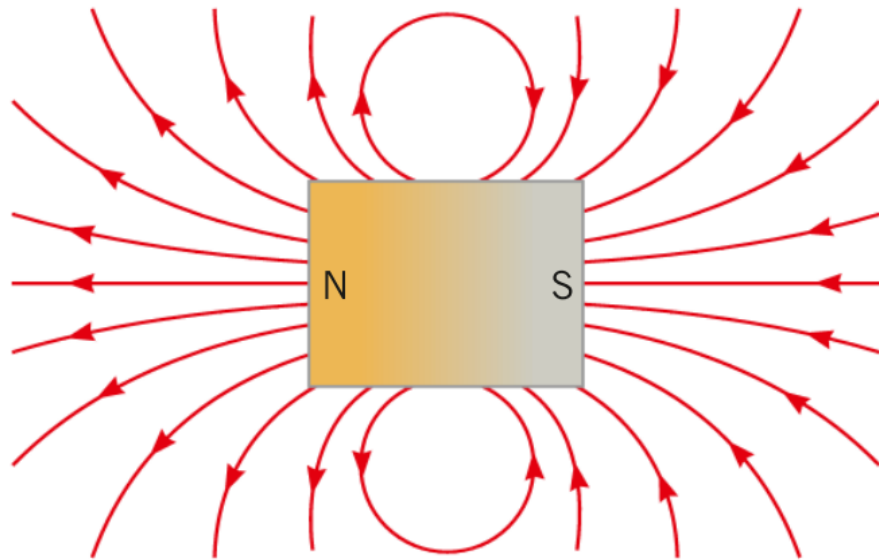
nel centro della bobina si ha

$$B = N\mu_0 \frac{I}{2R}$$

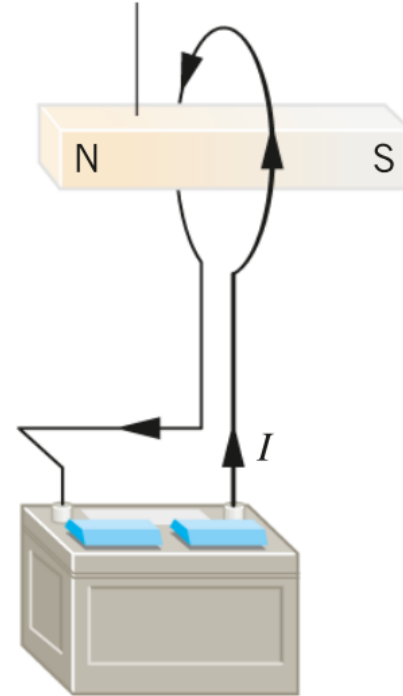


Linee di campo prodotte dalla spira

Analogia tra campo magnetico prodotto da una spira e barra magnetica



Ipotetico magnete a barra



Polo nord



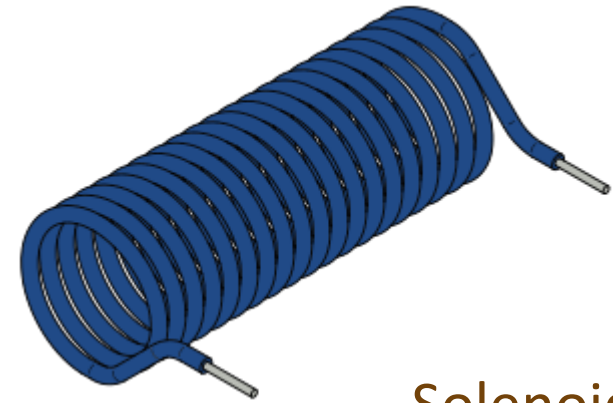
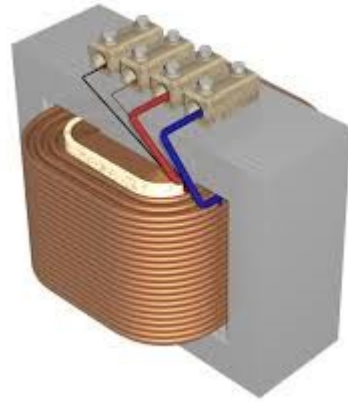
Solenoidi e bobine

Un **solenoid** è una **bobina di forma cilindrica** formata da una serie di spire circolari molto vicine fra loro e realizzate con un unico filo di materiale conduttore.

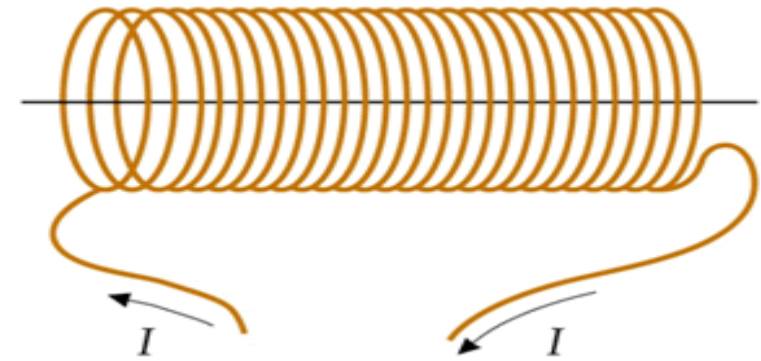
Se la lunghezza dell'avvolgimento di spire è minore di 10 volte il raggio della singola spira è definito bobina, mentre se la lunghezza dell'avvolgimento è maggiore di 10 volte il raggio è definito solenoide.



Bobine



Solenoidi

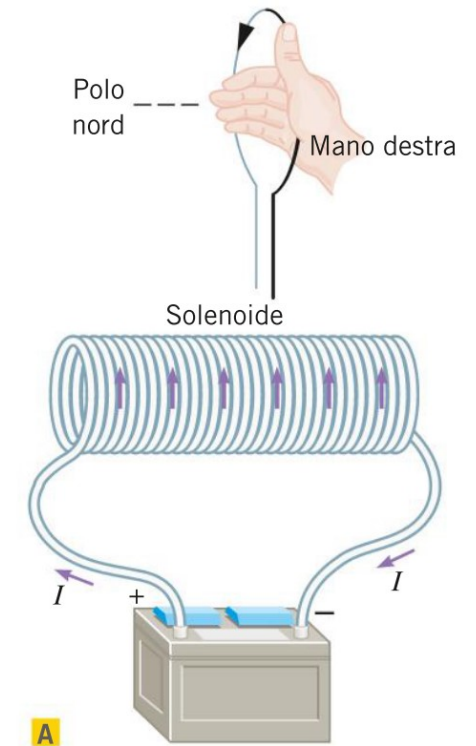


Il solenoide

Intensità del campo magnetico all'interno di un solenoide molto lungo

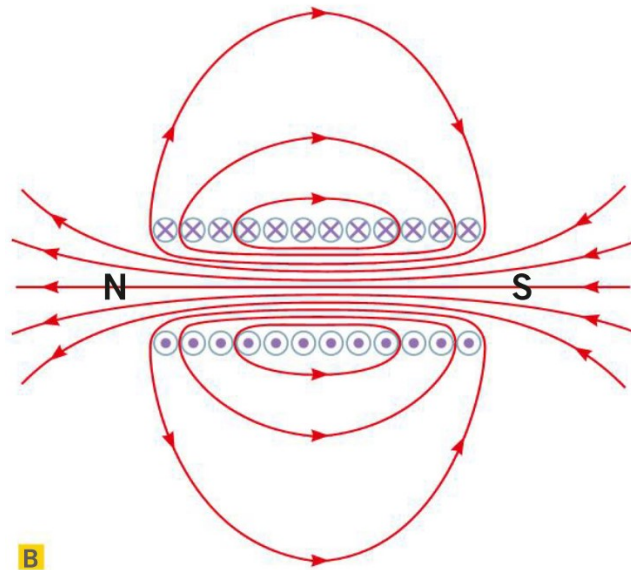
$$B = N \cdot \mu_0 \frac{I}{L}$$

dove N è il numero di avvolgimenti, L la lunghezza del solenoide e I è l'intensità di corrente che scorre nel solenoide.



Geometria del solenoide

Quando il solenoide è molto lungo rispetto al diametro, il campo magnetico all'esterno del solenoide è praticamente nullo, mentre all'interno, lontano dalle estremità, è uniforme e parallelo all'asse del solenoide



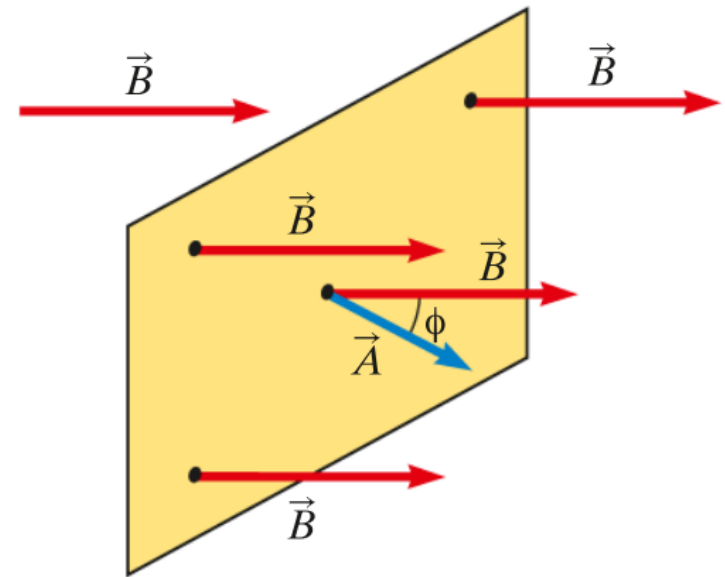
Curiosità

I solenoidi sono spesso chiamati elettromagneti e presentano molti vantaggi rispetto ai magneti permanenti. Per prima cosa, l'intensità del campo magnetico può essere modificata variando la corrente o il numero di avvolgimenti per unità di lunghezza. Inoltre, i poli nord e sud di un elettromagnete possono essere facilmente scambiati invertendo la corrente.

Il flusso del campo magnetico

Se il campo magnetico è uniforme, si definisce flusso di \vec{B} attraverso la superficie S la grandezza

$$\Phi(\vec{B}) = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi$$

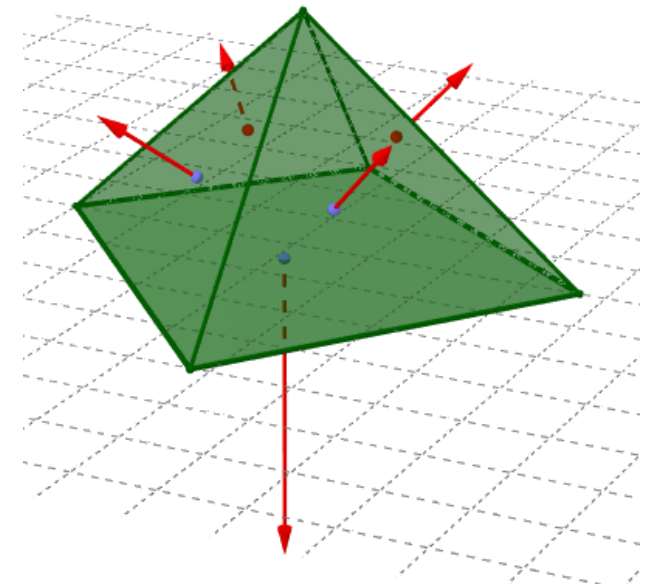


Flusso attraverso una superficie gaussiana

Consideriamo una qualsiasi superficie chiusa S , detta superficie gaussiana, immersa in un campo magnetico. Per calcolare il flusso magnetico attraverso questa superficie, dividiamola in regioni di area A_1, A_2, \dots , che hanno le seguenti caratteristiche:

- ogni regione è così piccola che può essere considerata piana;
- il campo magnetico su di essa può essere considerato uniforme (sia in intensità sia in direzione e verso).

$$\Phi_S(\vec{B}) = \vec{B}_1 \cdot \vec{A}_1 + \vec{B}_2 \cdot \vec{A}_2 + \vec{B}_3 \cdot \vec{A}_3 + \dots$$



Il teorema di Gauss per il campo magnetico

■ TEOREMA DI GAUSS

Il flusso $\Phi_S(\vec{B})$ del campo magnetico attraverso una superficie gaussiana S qualsiasi è **nullo**:

$$\Phi_S(\vec{B}) = 0$$

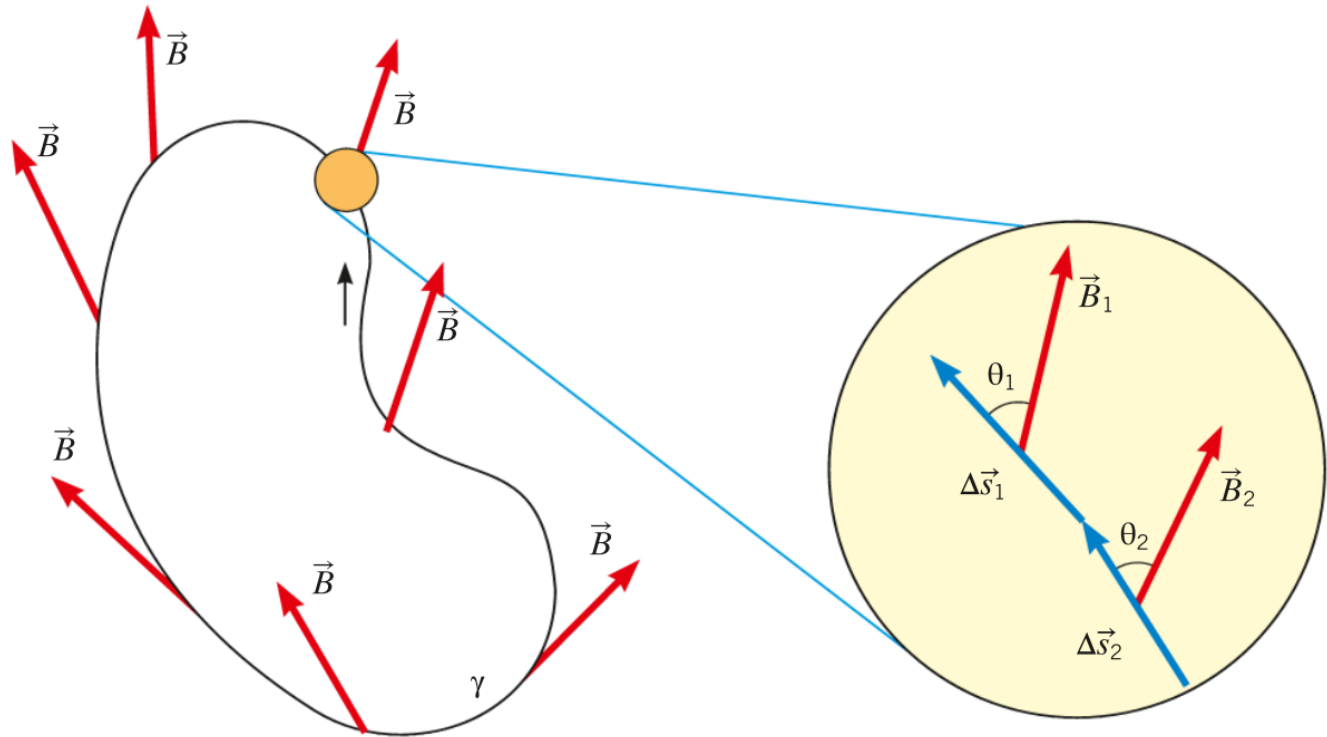
Il flusso del campo elettrico è dato dalla somma algebrica delle cariche racchiuse dalla superficie, pertanto la carica netta può essere diversa da zero

Il flusso del campo magnetico è sempre nullo. Questa differenza è dovuta al fatto che non esistono monopoli magnetici e quindi una superficie racchiude sempre un numero uguale di «poli nord» e «poli sud».

La circuitazione del campo magnetico

Per ognuno di questi tratti di curva calcoliamo il prodotto scalare

$$\Delta \vec{B}_k \cdot \Delta \vec{s}_k = \Delta B_k \Delta s_k \cdot \cos \theta_k$$



La circuitazione del campo magnetico

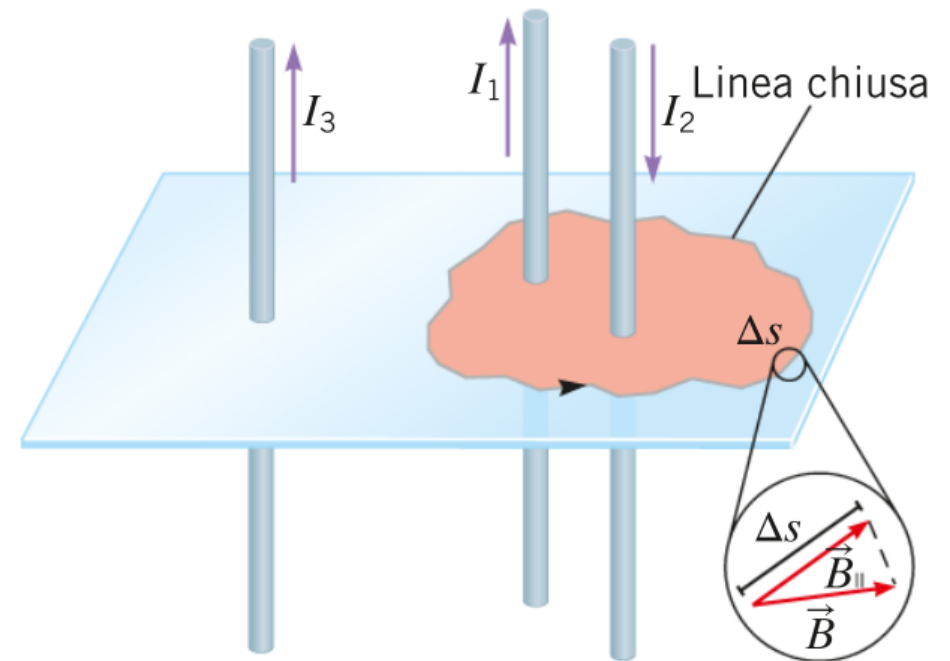
Si definisce **circuitazione** $\Gamma_\gamma(\vec{B})$ del campo magnetico \vec{B} lungo la curva chiusa orientata γ la somma

$$\begin{aligned}\Gamma_\gamma(\vec{B}) &= \vec{B}_1 \cdot \Delta\vec{s}_1 + \vec{B}_2 \cdot \Delta\vec{s}_2 + \dots = \\ &= \sum_k \vec{B}_k \cdot \Delta\vec{s}_k = \sum_k B_k \Delta s_k \cos \theta_k\end{aligned}$$

Correnti concatenate

Una corrente si dice concatenata a una curva γ quando attraversa ogni superficie che ha come contorno la curva γ .

Le correnti I_1 e I_2 sono concatenate alla curva γ



Il teorema di Ampère

La circuitazione del campo magnetico \vec{B} lungo una curva chiusa γ qualsiasi è uguale al prodotto fra la permeabilità magnetica del vuoto e la somma algebrica delle correnti concatenate con γ :

$$\Gamma_{\gamma}(\vec{B}) = \mu_0 \sum_k I_k$$

La corrente è presa con il segno positivo se genera su γ un campo magnetico con lo stesso verso con cui è percorsa γ , negativo nel caso opposto.