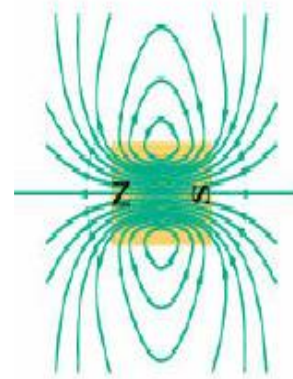
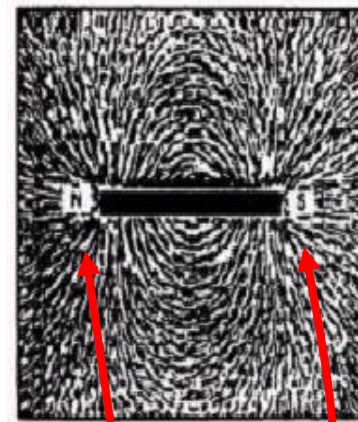


Campo Magnetico

Le proprietà magnetiche della materia vennero scoperte dai greci circa 2000 anni fa. I magneti permanenti sono sostanze capaci di attrarre o respingere pezzi di ferro.

*Per questo, l'interazione tra magneti non è riconducibile a forze di natura elettrica. Per descrivere la nuova interazione, introdurremo un nuovo campo vettoriale, **il campo magnetico B***



Un magnete permanente presenta sempre due polarità (Nord e Sud); le linee di forza di B possono essere evidenziate con della limatura di ferro.

Si osserva che ogni magnete ha due poli ma a differenza del caso elettrico non esistono poli magnetici (monopoli) isolati. Questo comporta una differente definizione del campo magnetico. Si osserva comunque che correnti o cariche in moto in un campo magnetico sono soggette a forze.

Campo Magnetico



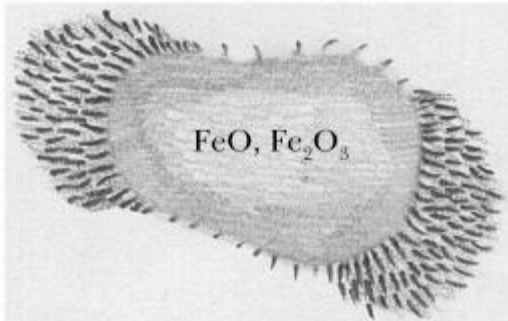
Scorie di ferro raccolte da un magnete in acciaieria

Così come il campo elettrico è generato da una carica ed esercita una forza su una carica, il campo magnetico è generato da, ed esercita forza su due diverse entità:

- ☐ un **magnete**
- ☐ una **particella carica in movimento**.

Nella vita quotidiana siamo *circondati da fenomeni magnetici*: che utilizziamo per le più svariate applicazioni:

- ✓ le vecchie cassette musicali e video.
- ✓ I lettori CD e DVD
- ✓ Gli hard disk nei computer;
- ✓ Microfoni di cuffie, TV, computer, telefoni.
- ✓ Nelle automobili: iniettori benzina, finestrini elettronici
- ✓ Allarmi di sicurezza, citofoni, chiusura e apertura automatica delle porte

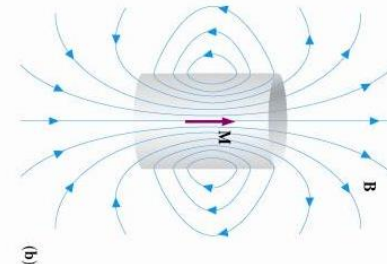
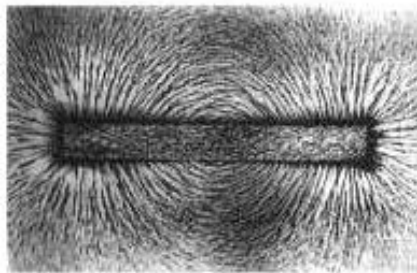


Proprietà della **magnetite** di attirare a se materiali ferrosi. Si definiscono i **Poli del magnete come** quelle parti in cui la proprietà si manifesta maggiormente.

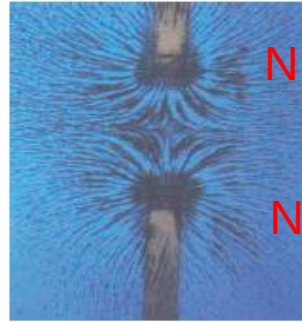
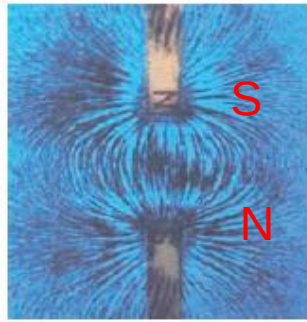
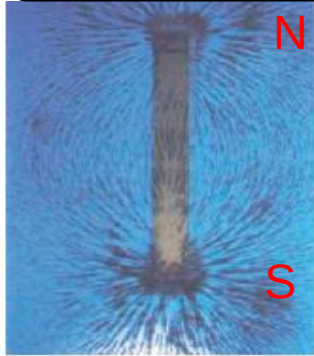
Se ad un magnete sospeso ad un filo viene avvicinato un secondo magnete: questo esercita una forza su di esso.



Un magnete genera un campo chiamato **campo magnetico B**: crea nello spazio circostante un campo di forze. Le linee di campo sembrano provenire da i due poli. Sono chiuse, nascono da un polo (nord o positivo) e terminano sull'altro (sud o negativo).

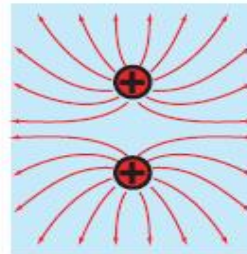
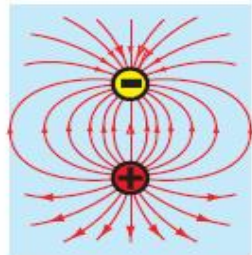
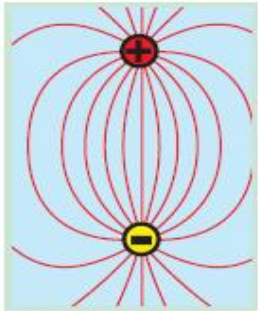


Linee di Campo Magnetico



Definiamo come polo Nord (positivo) di un magnete il polo da cui escono le linee di campo magnetico (in modo da avere una completa analogia con il campo elettrico) e sud (o negativo) l'altro.

Simili agli spettri originati da cariche elettriche,



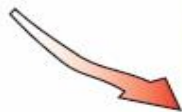
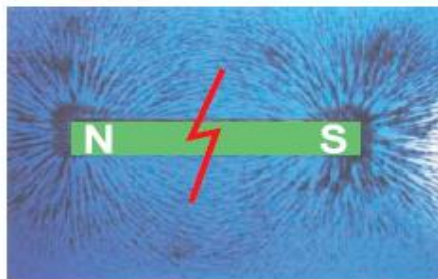
Abbiamo inoltre che poli di segno uguale si respingono e di segno opposto si attraggono

Alcuni valori approssimati di campo

magnetico

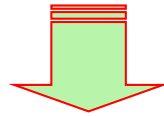
Sulla superficie di una stella di neutroni	10^8 T
In prossimità di un grande elettromagnete	1.5 T
Vicino a una barretta magnetica	10^{-2} T
Sulla superficie della Terra	10^{-4} T
Nello spazio interstellare	10^{-10} T
Il più piccolo valore in una camera magneticamente schermata	10^{-14} T

ma ...



Interazione tra cariche elettriche e $\mathcal{B}$

In presenza di campo magnetico, particelle cariche in moto vengono deflesse. Sperimentalmente, la forza che deflette le cariche è proporzionale alla loro velocità $\mathbf{v}$, ed all'intensità del campo. Inoltre, la forza è sempre diretta ortogonalmente sia alla direzione di $\mathbf{v}$ che a quella di $\mathcal{B}$.



Forza di Lorentz

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

Conseguenza di questa espressione è che essendo la forza sempre perpendicolare sia a $\mathbf{v}$ che a $\mathcal{B}$, non ha mai una componente tangenziale alla traiettoria quindi è sempre centripeta e compie sempre lavoro nullo

$$L = \vec{F} \cdot d\vec{s} = F_{\parallel} ds = 0$$

e quindi non può cambiare l'energia cinetica (teorema del lavoro e dell'energia cinetica)

Forza di Lorentz

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

Nel sistema MKS l'unita' di misura (derivata) del campo magnetico B e' il **tesla**:

$$1 \text{ Tesla} = \text{Newton} \cdot \text{s} / \text{Coulomb} \cdot \text{m}$$

La Forza di Lorentz NON compie lavoro, essendo sempre diretta ortogonalmente alla velocità:

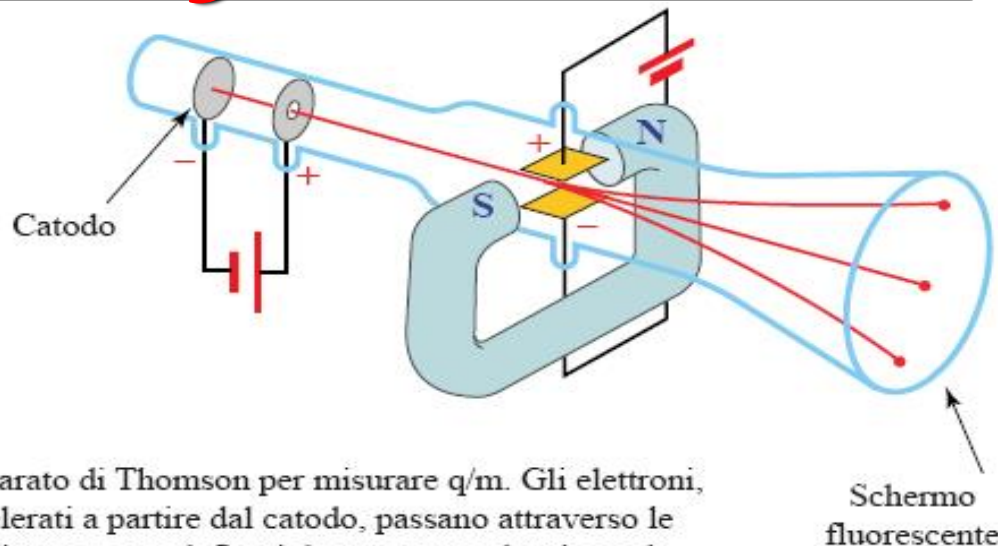
$$\text{Potenza} = dW/dt = \vec{F} \cdot \vec{v} = 0$$



QUANDO IMPARI LA REGOLA DELLA MANO DESTRA

Regola della mano destra per individuare il verso della forza

Campi Incrociati



Apparato di Thomson per misurare q/m . Gli elettroni, accelerati a partire dal catodo, passano attraverso le fenditure e sono deflessi da un campo elettrico e da un campo magnetico perpendicolare al piano della figura. Il fascio deflesso colpisce quindi uno schermo fosforescente.



Thomson nel laboratorio Cavendish dell'Università di Cambridge

Sia il campo E che B comportano delle forze su cariche in moto.

Se i due campi hanno direzioni perpendicolari tra loro si dicono incrociati.



Quando una carica attraversa una regione con campi incrociati siamo nelle condizioni per avere delle forze agenti parallele tra loro e in condizioni opportune anche nulle.

Se v è perpendicolare a B

$$F_B = q \cdot v \cdot B$$

contemporaneamente

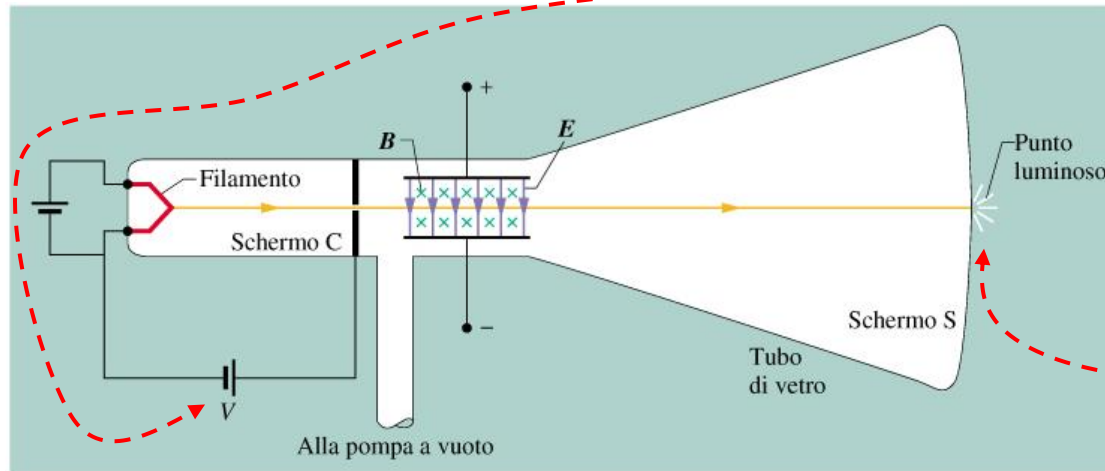
$$F_E = q \cdot E$$

$$q \cdot E = q \cdot v \cdot B \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

I campi incrociati permettono quindi di misurare la velocità di una carica elettrica.

Campi Incrociati: scoperta dell'elettrone

Acceleriamo una carica q mediante una differenza di potenziale V



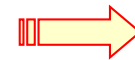
$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

La deflessione di una particella carica in un campo elettrico misurata all'uscita dei piatti paralleli vale (vedi problema svolto 23.4)

$$y = \frac{at^2}{2} = \left(\frac{qE}{2m} \right) \left(\frac{L}{v} \right)^2$$

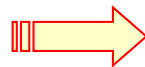
Misuro la deflessione y tramite la posizione del punto luminoso

Regolo il campo B in modo da bilanciare la deflessione dovuta ad E
(il punto luminoso torna al centro)



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

Per cui si ricava $\frac{m}{q} = \frac{B^2 L^2}{2yE}$

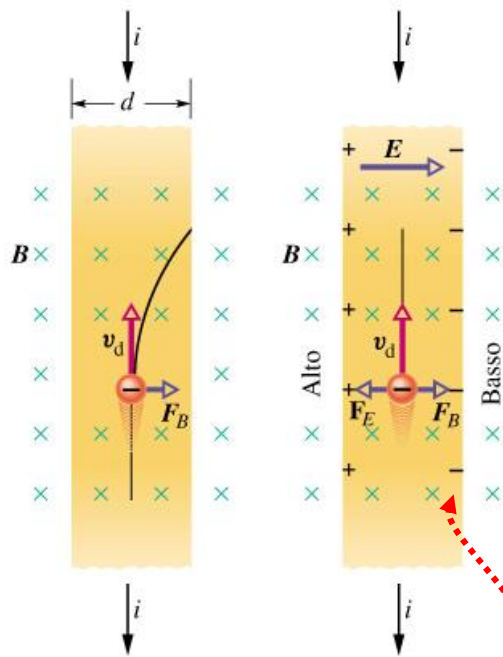


$$m_e = \frac{m_p}{1836.15}$$

Thomson scopre una cosa clamorosa: il rapporto m/e è qualche migliaio di volte più piccolo dell'entità più leggera allora conosciuta, ovvero l'atomo di idrogeno!!

Scoperta dell'elettrone

Effetto Hall



Se abbiamo una lamina conduttrice percorsa da corrente ed immersa in campo magnetico, abbiamo che le cariche in movimento risentono di una forza di Lorentz che le devia.

Entrambi i segni di carica sono deviati dallo stesso lato (ma in genere un solo tipo di portatori di carica è maggioritario).

Nel caso di un conduttore di rame sono gli elettroni in movimento ad essere spostati verso destra e ciò provoca un accumulo di cariche negative a destra e di conseguenza cariche positive a sinistra.

Si genera un campo elettrostatico che va da sinistra a destra che sulle altre cariche negative in movimento provoca una forza da destra a sinistra (qE con il segno meno della carica) quindi opposta a quella di Lorentz.

All'equilibrio si ha:

$$e \cdot E = e \cdot v \cdot B$$

inoltre

$$J = n \cdot e \cdot v = \frac{i}{A}$$

Per cui sostituendo si ricava

$$E = \frac{iB}{neA}$$

Effetto Hall II

Possiamo quindi affermare che tra i due lati della lamina vi è una d.d.p.

$$V = E \cdot d$$

$$\frac{V}{d} = E = \frac{iB}{ne \cdot d \cdot l}$$

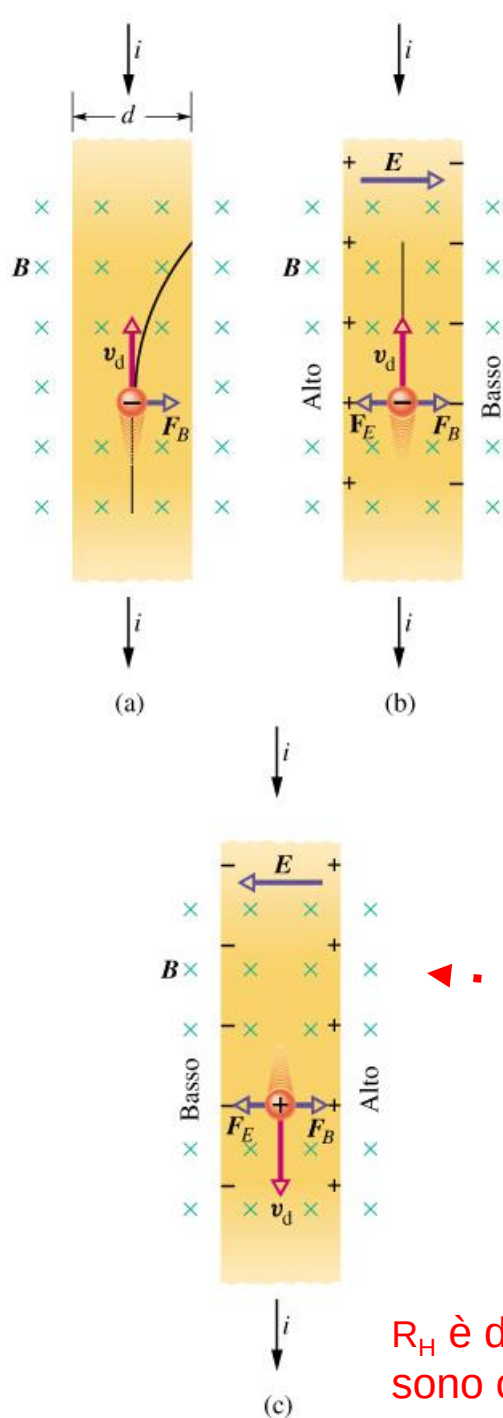
$$B = \frac{ne \cdot l \cdot V}{i} \Rightarrow n = \frac{iB}{e \cdot l \cdot V}$$

Da una misura di tipo Hall si può ricavare la densità di portatori di carica

L'effetto Hall per cariche positive dà luogo ad un potenziale di segno opposto

Si definisce **coefficiente di Hall**: $R_H = \frac{E}{JB} = \frac{EA}{iB} = \frac{VI}{iB}$

R_H è dato da quantità facilmente misurabili; il segno di R_H ci dice se i portatori sono cariche + o -; l'inverso di R_H ci dà la densità di portatori nel conduttore.



Sonde Hall per la misura del campo magnetico



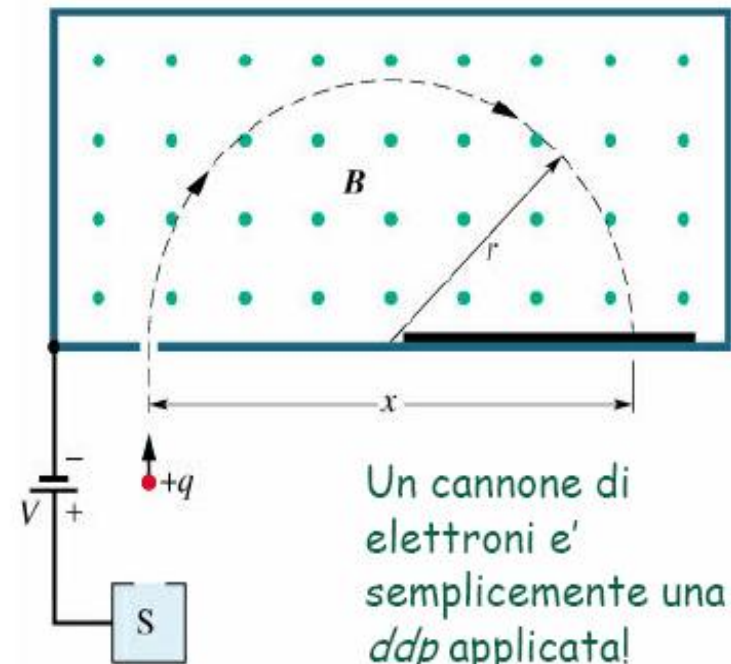
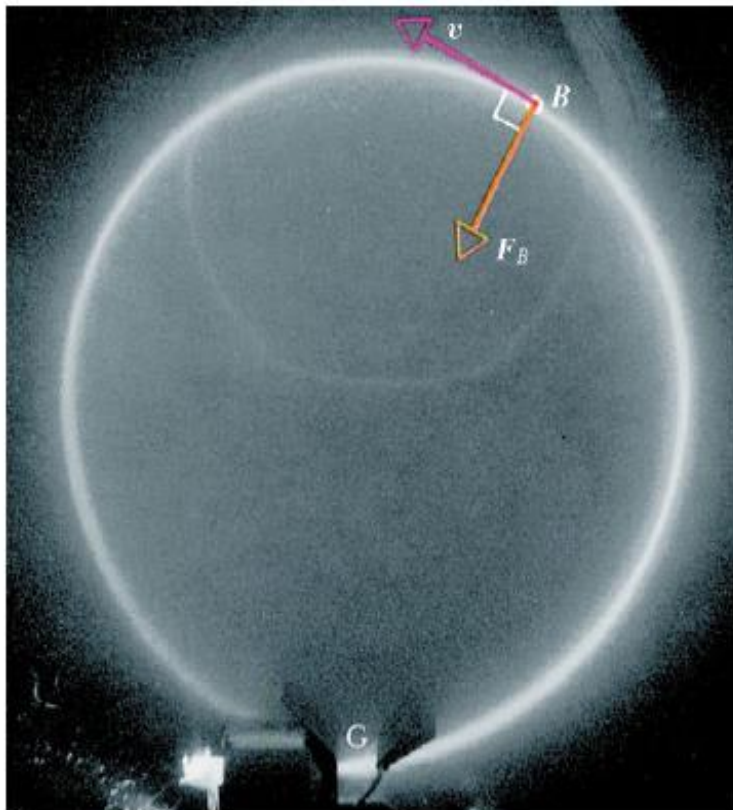
Carica in moto circolare

Come applicazione della Forza di Lorentz, consideriamo una regione in cui $\mathbf{B}$ è uniforme e costante, e la particella entri con velocità ortogonale al campo. La forza ha modulo qvB , ed è diretta verso il centro. Quindi, dalla II L. di Newton:

$$qvB = \underset{\text{Lorentz}}{F} = \underset{\text{II Newton}}{ma} = \underset{\text{moto circolare}}{m \frac{v^2}{r}} \longrightarrow r = \frac{mv}{qB} \quad ; \quad T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

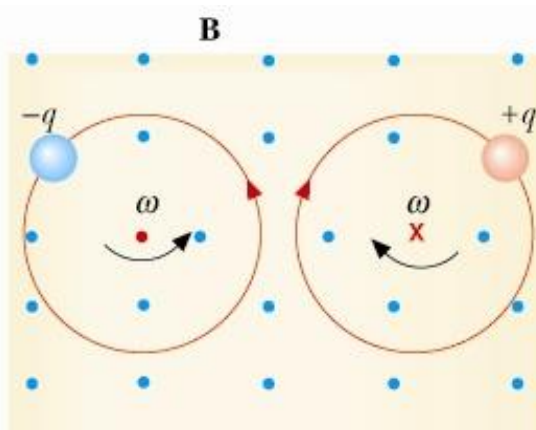
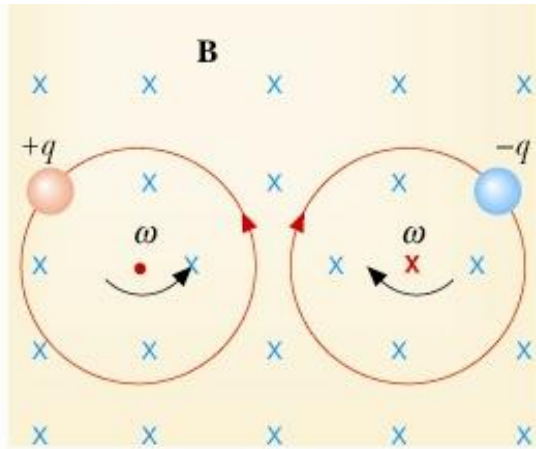
Raggio

Periodo

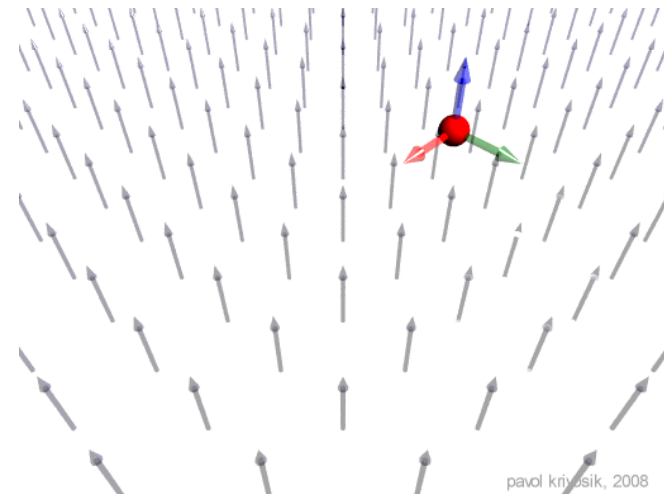


In termini più generali

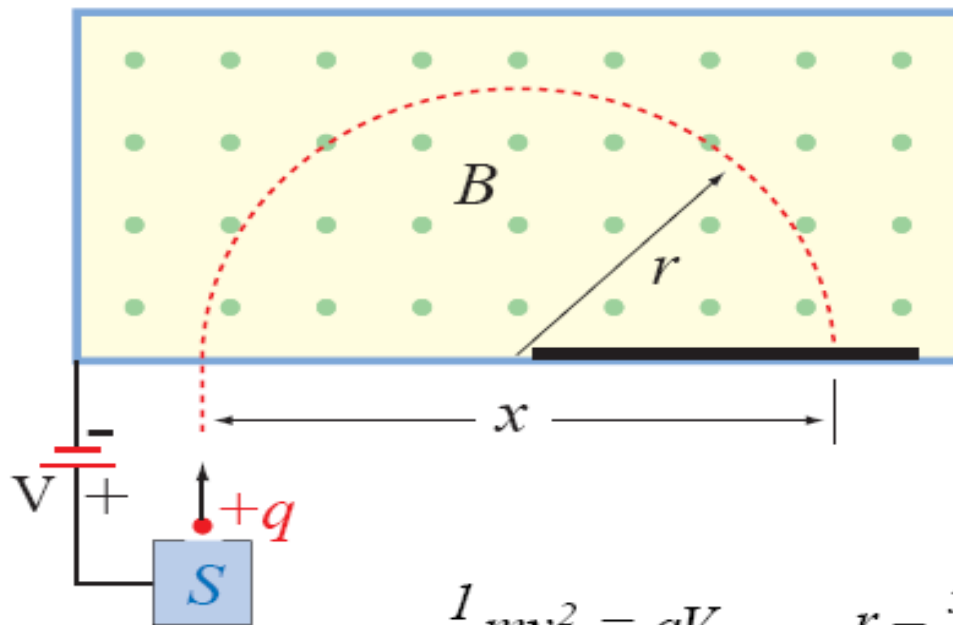
$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} = m \vec{\omega} \times \vec{v} = -m \vec{v} \times \vec{\omega}$$



$$\vec{\omega} = -\frac{q}{m} \vec{B}$$



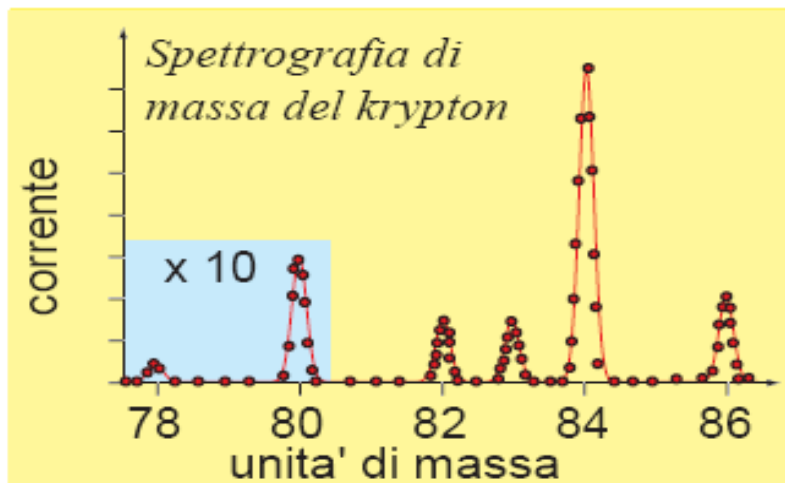
Spettrometro di massa



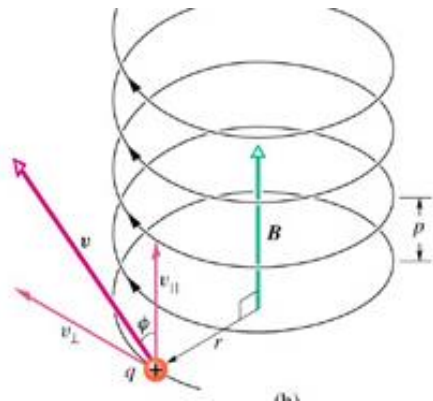
$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

$$r = \frac{x}{2} = \frac{mv}{qB}$$

$$m = \frac{x^2 B^2 q}{8V}$$



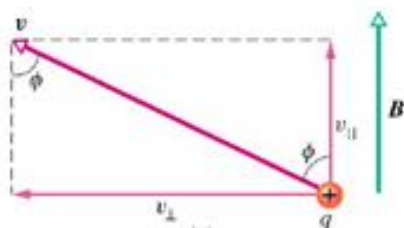
$\vec{B}$ uniforme, θ fra $\vec{v}$ e $\vec{B}$ diverso da $\frac{\pi}{2}$



Nella direzione perpendicolare a B

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \Leftrightarrow qv \sin \theta B = m \frac{(v \sin \theta)^2}{R}$$

$$R = \frac{mv \sin \theta}{qB} \quad \text{e} \quad T = \frac{2\pi m}{qB}$$

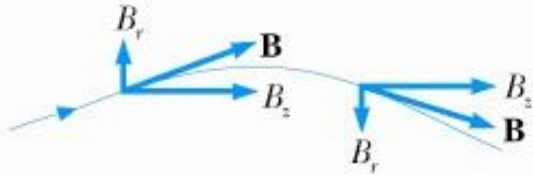


Nella direzione parallela a B

$$\text{passo } p = v_d T = v_d \frac{2\pi m}{qB}$$

Moto elicoidale uniforme

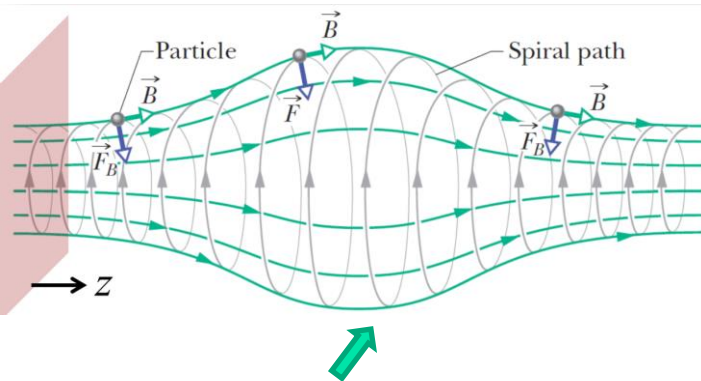
$\vec{B}$ non uniforme a simmetria assiale (bottiglia magnetica)



Consideriamo una particella carica entrante nel piano del disegno.

B_z : **forza radiale** responsabile del moto elicoidale intorno all'asse z . Se B diminuisce, raggio di curvatura e passo aumentano.

B_r : **forza lungo z** . La particella torna indietro oscilla avanti e indietro.

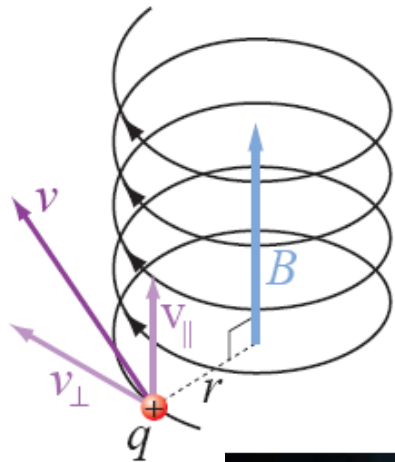
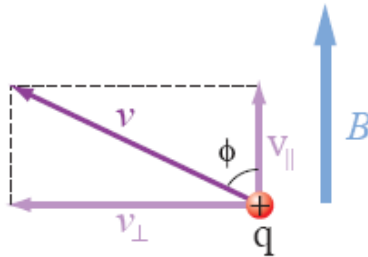


Il campo magnetico cambia di direzione lungo la linea di flusso; di conseguenza $\vec{F}_B$, essendo perpendicolare a $\vec{B}$, non è più parallela al piano di rotazione (in viola) ma ha una componente lungo l'asse z ; nella regione di destra $\vec{F}_B \cdot \vec{z}$ è negativa, per cui se $\vec{B}$ è abbastanza intenso, la particella può frenare e ritornare indietro lungo lo stesso moto elicoidale; nella regione di sinistra $\vec{F}_B \cdot \vec{z}$ è positiva, dunque la particella può invertire il moto lungo z e tornare verso l'interno del tubo di flusso; nel piano il verso del moto circolare resta invariato, si inverte soltanto la direzione perpendicolare al piano.

Questa particolare conformazione di campo magnetico si dice *bottiglia magnetica*, poiché è in grado di intrappolare le particelle cariche in un moto elicoidale oscillatorio perpetuo.

Cariche in moto con traiettoria elicoidale

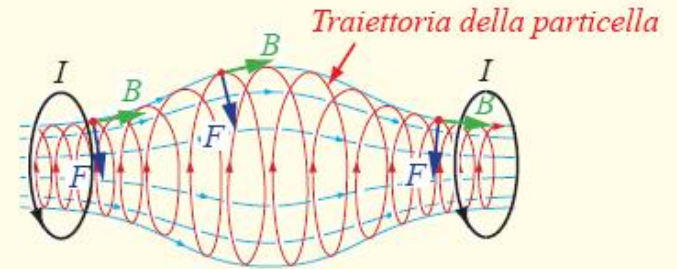
Se v ha sia una componente
perpendicolare al campo,
sia una parallela, ...



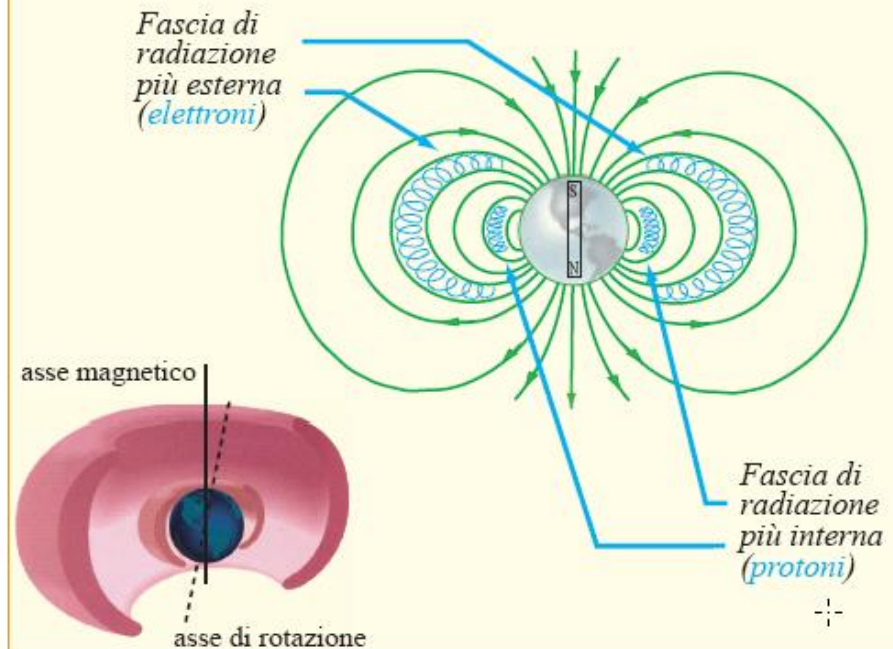
La componente parallela
dà il passo dell'elica,
quella perpendicolare il
raggio ed il periodo.



Bottiglia magnetica

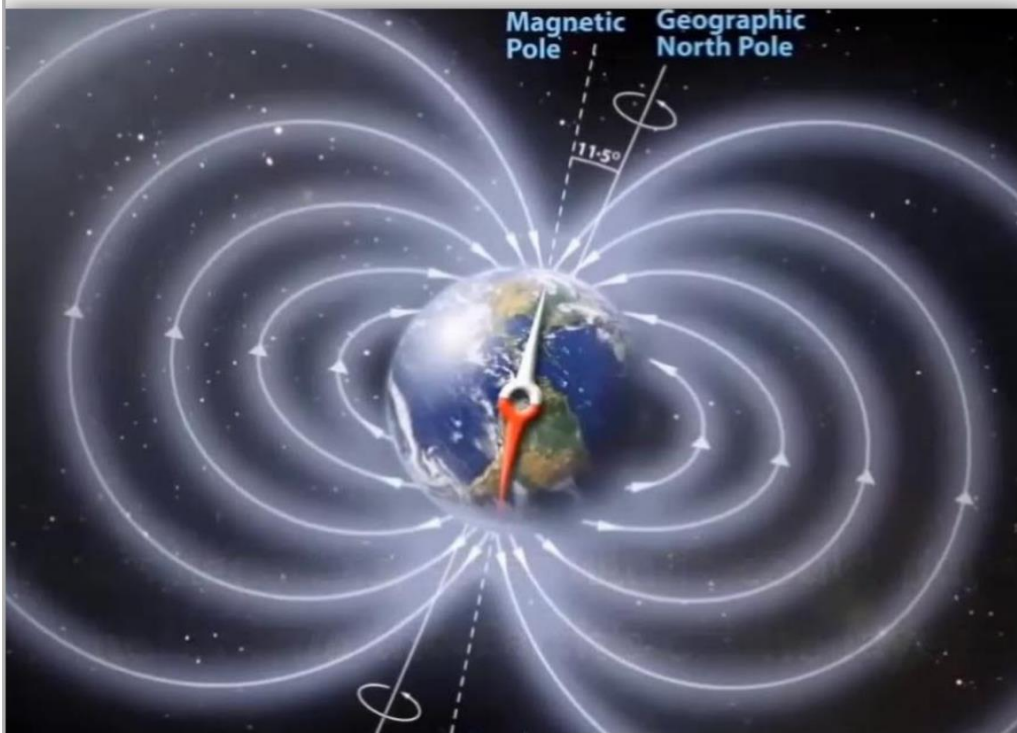


Fasce di Van Allen



Il campo magnetico terrestre

La **terra ha un suo campo magnetico**, prodotto dal nucleo terrestre (costituito da Ferro liquido ad altissima T) per ragioni ancora ignote. La presenza del campo magnetico è immediatamente verificabile mediante la bussola, che essenzialmente è un aghetto magnetico libero di ruotare attorno ad un perno centrale: l'ago si allinea parallelamente al campo, e così ci indica la direzione



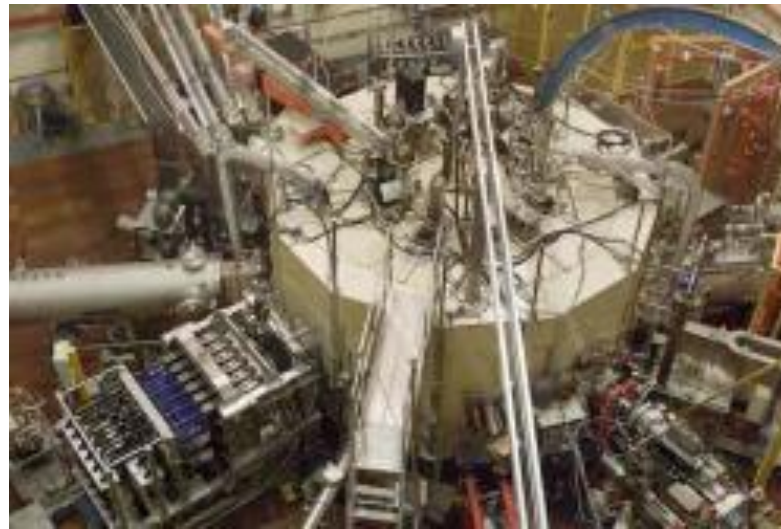
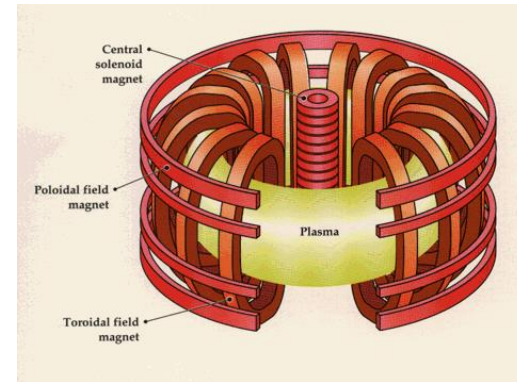
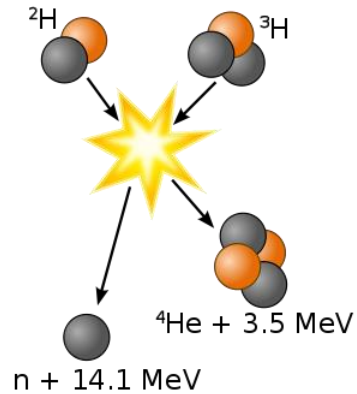
sulla superficie terrestre:

$$B \approx 10^{-4} T = 1 \text{ Gauss}$$

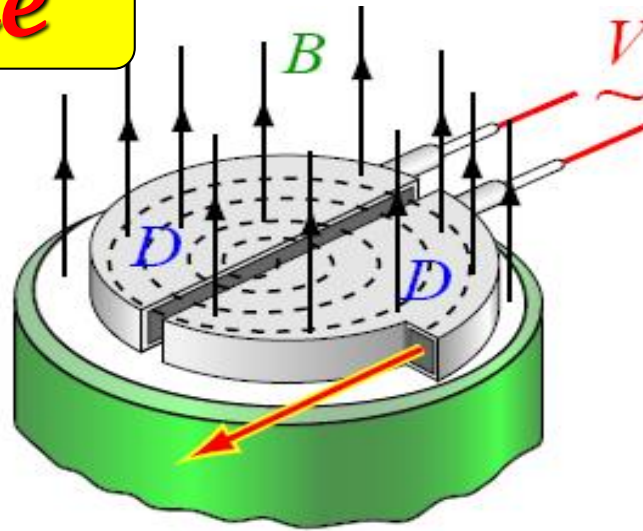
Due cose da notare in figura:

- ✓ Le linee di campo ENTRANO nel nord geografico ed ESCONO dal sud GEOGRAFICO: dunque quello che chiamiamo 'polo nord' è in realtà il polo sud magnetico, e viceversa
- ✓ L'asse magnetico non è esattamente allineato all'asse polare geografico: c'è un angolo di 11.5° di differenza.

Confinamento magnetico per la fusione nucleare



Ciclotrone

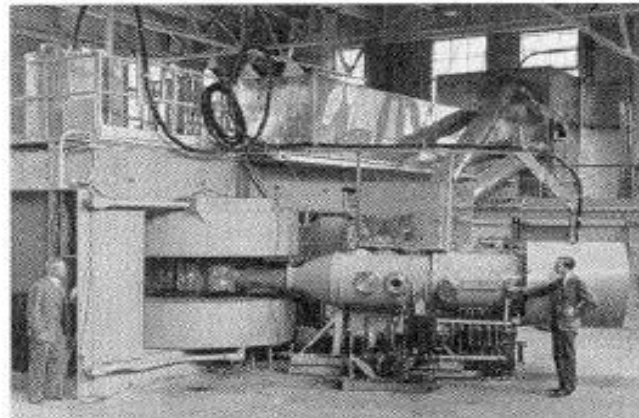


La possibilità di generare raggi di particelle cariche (elettroni, protoni) ad alta energia è di grande importanza per lo studio delle proprietà fondamentali della materia. Facendo collidere questi raggi con gli atomi si è scoperto che i nuclei sono formati da protoni e neutroni, e che questi a loro volta sono formati da quarks e gluoni.



*Il primo ciclotrone, sviluppato da Ernest O. Lawrence nel 1929 (Lawrence Berkeley Nat. Lab.)
diametro ~10 cm*

Un ciclotrone "moderno"

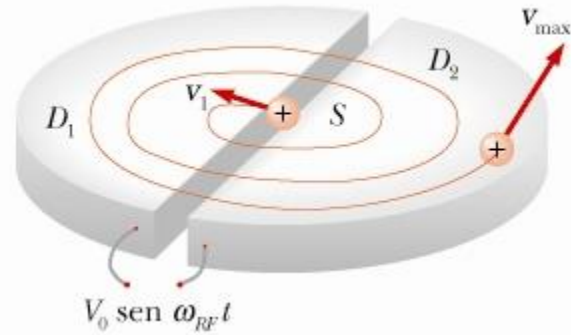
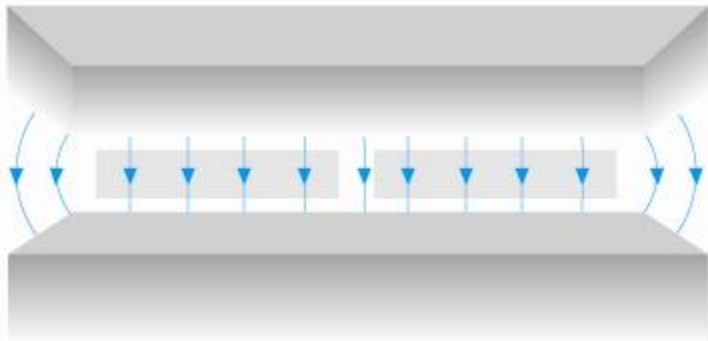


Magnetostatica

Moto di particelle cariche in campo magnetico

Per accelerare le particelle si utilizza una combinazione di campo elettrico e magnetico, che *obblighi la particella ad attraversare ripetutamente una stessa regione di potenziale*: dopo molte iterazioni, la particella acquisirà una grande energia cinetica. Una tipologia di acceleratori basati sull'utilizzo del campo magnetico è il ciclotrone.

Il ciclotrone



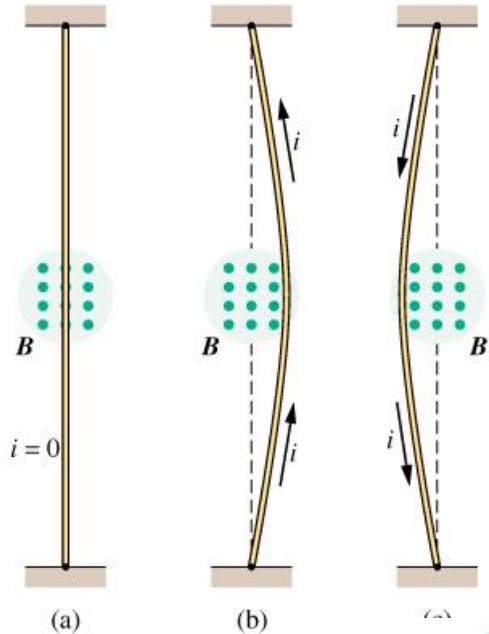
Il semiperiodo della radio frequenza deve essere uguale alla velocità angolare delle particelle cariche

$$\omega_{RF} = \frac{qB}{m} \quad v_{Max} = \frac{qBR}{m}$$



Sincrotrone ESRF, Grenoble

Forza magnetica su un filo percorso da corrente



A causa dell'effetto Hall gli elettroni sono deviati su un lato del conduttore. Non riuscendo ad uscire la forza su di essi viene trasmesso all'intero conduttore e può deformare il filo stesso

Consideriamo un tratto di filo lungo L . Gli elettroni per percorrere questo tratto impiegano un tempo $t = L/v_d$

La carica spostata è pari a:

$$q = i \cdot t = \frac{i \cdot L}{v_d}$$

La forza complessiva agente è quindi

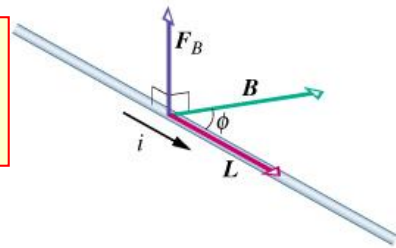
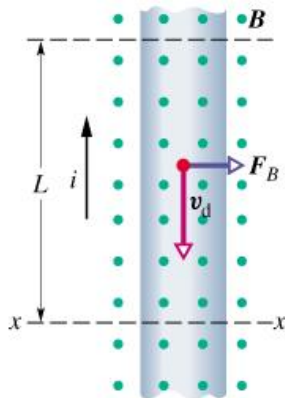
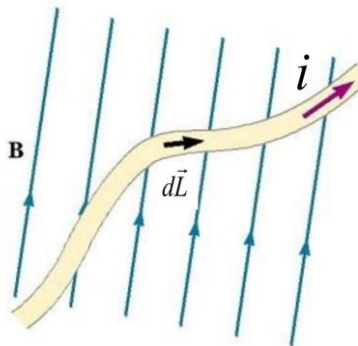
$$F = q \cdot v \cdot B = i \cdot L \cdot B$$

In termini
vettoriali

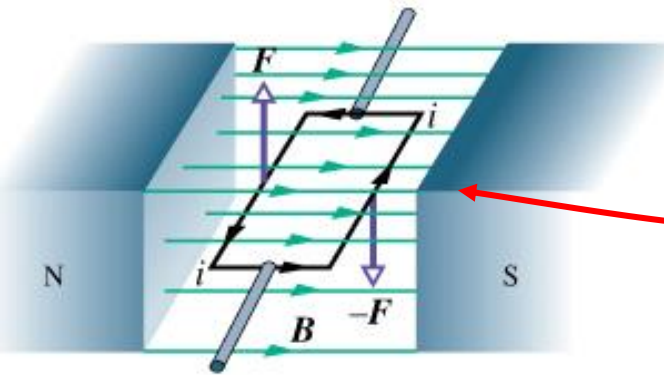
$$\vec{F} = i \cdot \vec{L} \times \vec{B}$$

Se il filo non è rettilineo dobbiamo considerare tratti infinitesimi per ognuno dei quali

$$d\vec{F} = i \cdot d\vec{L} \times \vec{B}$$



Momento torcente su una spira percorsa da corrente



Una spira percorsa da corrente e immersa in un campo magnetico è soggetta a forze su ognuno dei suoi lati.

Se la spira è libera di ruotare su un asse le forze sono uguali tra loro ma costituiscono una coppia danno luogo cioè ad un momento di forze.

Considerando la spira rettangolare di lati a e b abbiamo che

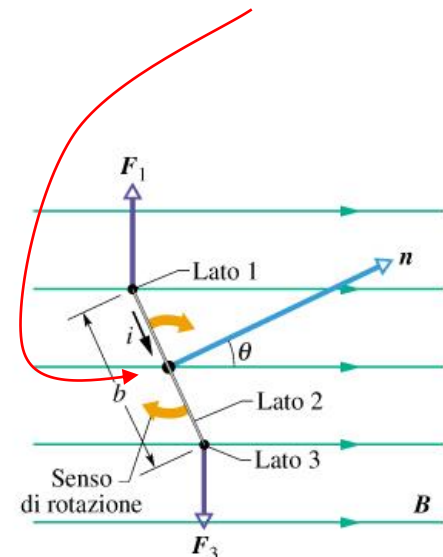
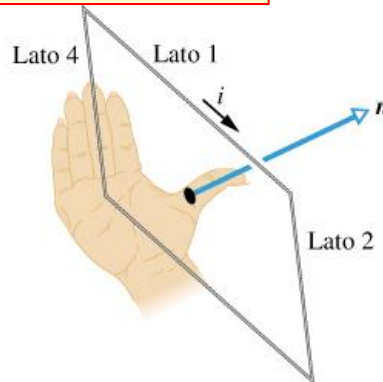
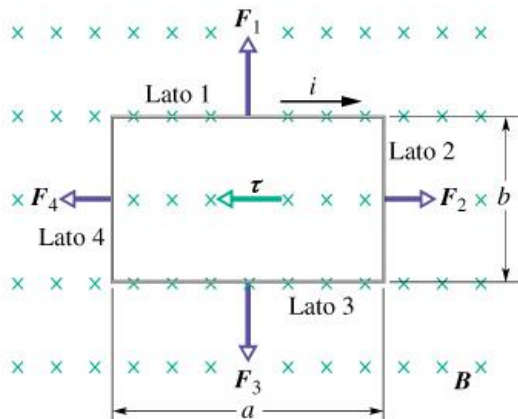
$$F_1 = F_3 = iaB \quad F_2 = F_4 = ibB \sin(90 - \vartheta) = ibB \cos \vartheta$$

Di verso opposto a due a due

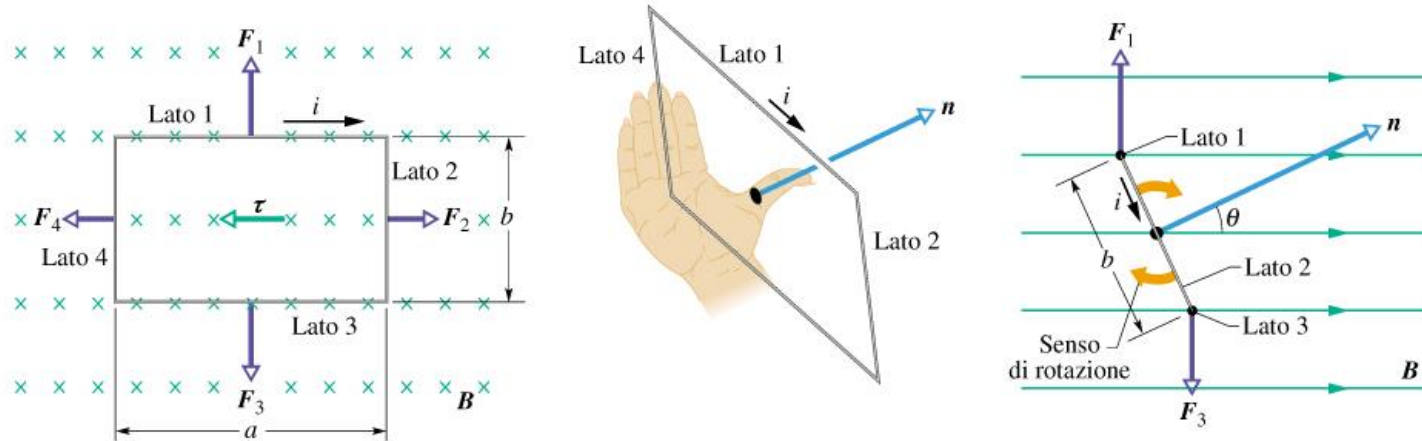
Se la spira può ruotare rispetto all'asse

Il momento totale vale:

$$\tau = iaBb \sin \vartheta$$



Momento torcente su una spira percorsa da corrente I



$$\tau = i a B b \sin \vartheta$$

Se indico con $A = a \cdot b$ l'area della spira posso scrivere

$$\tau = i A B \sin \vartheta$$

In forma vettoriale vale

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

Vettore superficie
orientata della spira

Se la spira è composta di N avvolgimenti si ha:

$$\tau = N i \vec{A} \times \vec{B}$$

Dalla spira alla bobina



Se invece di una spira si ha una serie di spire o avvolgimenti, supponendo che queste siano avvolte così strettamente tra loro da poter considerare identiche la dimensione di ogni spira ed il piano di avvolgimento, si ha quella che si chiama una bobina piana. Per N avvolgimenti, il momento torcente della bobina è la somma dei momenti di ciascuna spira:

$$\tau = NiAB \sin(\theta)$$



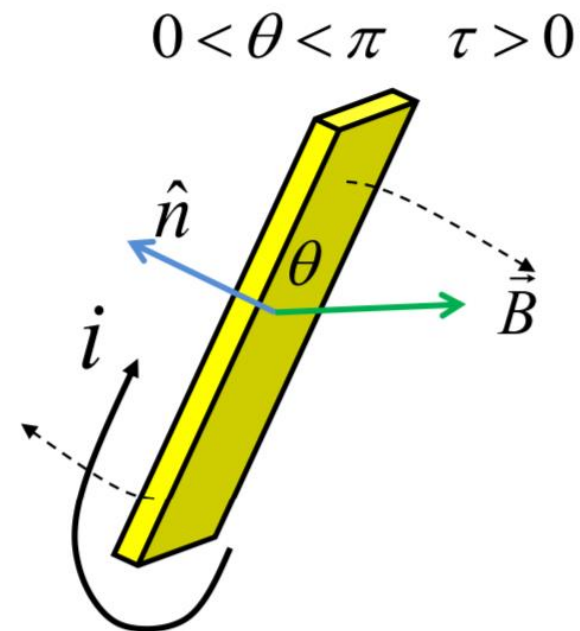
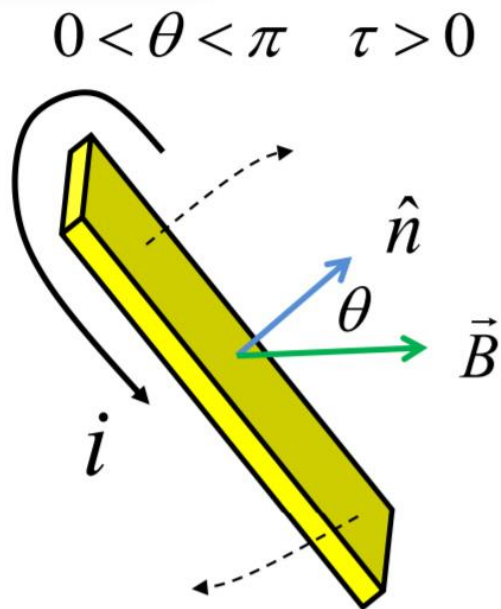
Questa espressione, ricavata per una bobina rettangolare, vale in realtà per qualsiasi bobina piana di area A , qualunque sia la sua forma, purché B sia uniforme in tutta l'area della bobina. Ad esempio, per la bobina cilindrica (in figura) di raggio r , la torsione è:

$$\tau = Ni(\pi r^2)B \sin(\theta)$$

Il motore elettrico



Come funziona un motore elettrico? Il campo magnetico fa ruotare la bobina in modo da allineare $\mathbf{n}$ col campo; una volta allineati ($\theta = 0$), il sistema è in equilibrio ed il moto si interrompe; ***al fine di avere un moto continuo, il verso della corrente deve essere invertito sistematicamente*** non appena $\mathbf{n}$ sta per allinearsi col campo, in modo da continuare il moto con lo stesso verso di rotazione. ***L'inversione automatica della corrente viene realizzata mediante un commutatore*** interconnesso tra la spira rotante e i contatti che forniscono la corrente



Momento di dipolo magnetico

La formula

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

Può anche essere espressa come

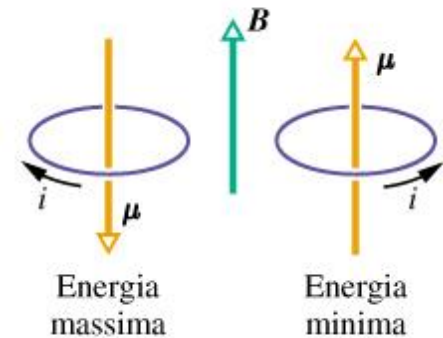
$$\tau = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

Si definisce

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

MOMENTO DI DIPOLO MAGNETICO

In analogia al caso del dipolo elettrico



Se il dipolo è allineato con il campo si ha l'equilibrio

$$\theta = 0$$

Equilibrio Stabile

$$\theta = 180^\circ$$

Equilibrio Instabile

Alcuni momenti di dipolo magnetico

Una barretta magnetica	5 J/T
La Terra	$8.0 \cdot 10^{22}$ J/T
Un protone	$1.4 \cdot 10^{-26}$ J/T
Un elettrone	$9.3 \cdot 10^{-24}$ J/T

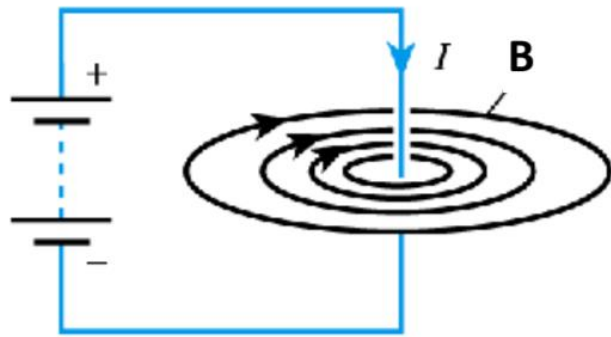
Possiamo quindi introdurre un'energia potenziale per il dipolo magnetico

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

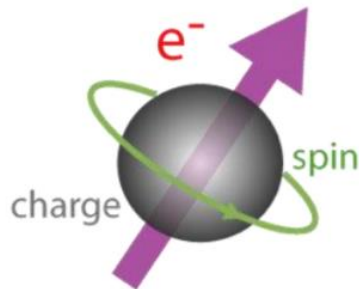
Cosa produce un campo magnetico ?

Potremmo pensare che come il campo elettrico è prodotto dalla carica elettrica, anche il campo magnetico sia prodotto da una carica magnetica, ma non è così !!

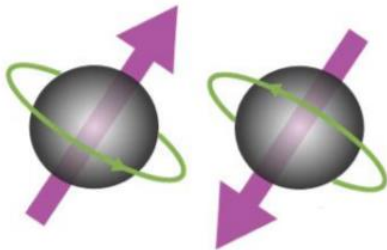
Il campo magnetico può essere prodotto in 2 modi:



- ✓ Da **cariche elettriche in movimento**; ad esempio la corrente in un circuito.
- ✓ Dallo **SPIN delle particelle elementari** (ad esempio gli elettroni stessi)

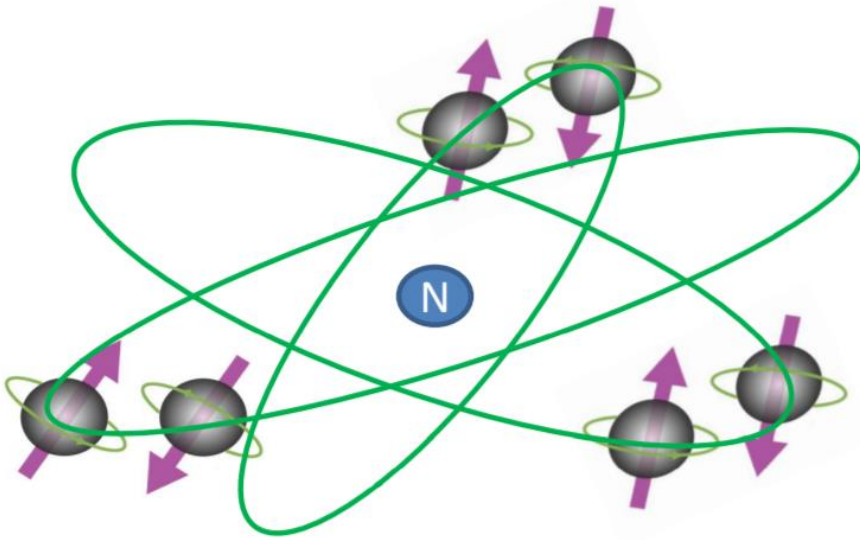


SPIN: proprio come massa e la carica, lo **spin è una proprietà fondamentale delle particelle elementari**. Lo spin si raffigura come una rotazione della particella attorno al proprio asse, che dà origine ad un **momento di dipolo magnetico** (indicato dalla freccia viola) in grado di generare un piccolissimo campo magnetico attorno a sé.



Girando in senso orario o antiorario, lo **spin può essere orientato 'up' oppure 'down'**

Campo magnetico nella materia



□ normalmente gli elettroni negli orbitali atomici si **accoppiano a due a due con spin opposti**, cosicché il loro campo magnetico risultante si cancella; questo è un bene: immaginate se il nostro corpo fosse una calamita: ogni volta che passiamo davanti al frigo rimarremmo attaccati alla porta...

□ In alcuni materiali **una porzione degli elettroni rimane spaiata**: c'è un momento di spin risultante su ciascun atomo. Se gli spin sono orientati casualmente, il momento magnetico risultante è nullo, ed il materiale si dice **paramagnetico**.

□ In alcuni casi gli spin si allineano concordemente, dando vita ad un **campo magnetico macroscopico**: il materiale si dice **ferromagnetico**. Dunque un **magnete è un materiale con gli spin tutti concordemente allineati**.

