

# Il Corso di Fisica per Scienze Biologiche

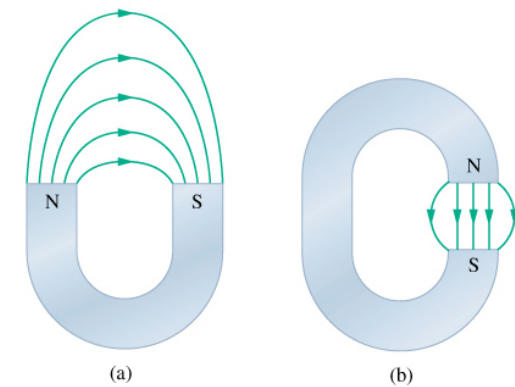
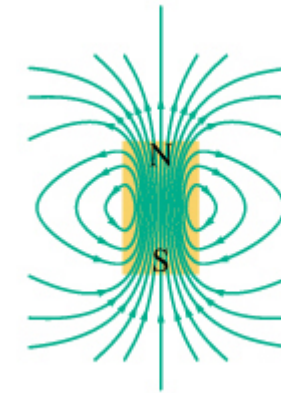
- Prof. Attilio Santocchia
- Ufficio presso il Dipartimento di Fisica (Quinto Piano) Tel. 075-585 2708
- E-mail: [attilio.santocchia@pg.infn.it](mailto:attilio.santocchia@pg.infn.it)
- Web: <http://www.fisica.unipg.it/~attilio.santocchia>
- Testo: Fondamenti di Fisica (Halliday-Resnick-Walker, Casa Editrice Ambrosiana)

# Il campo magnetico statico

- ◆ Sin dall'antichità è noto che alcuni minerali contenenti ferro hanno la proprietà di attrarre altri corpi contenenti anch'essi ferro. Questi minerali si dicono **calamite** o **magneti permanenti naturali**.
- ◆ I corpi ferrosi, nelle vicinanze di un magnete, diventano anch'essi dei **magneti artificiali temporanei**. Molti materiali in acciaio, avvicinati a magneti, si magnetizzano permanentemente, diventando magneti artificiali permanenti.
- ◆ Questa interazione magnetica, esercitando essa delle forze su oggetti nello spazio, può essere rappresentata tramite un **campo vettoriale**. Nel caso dell'interazione elettrostatica, passare dal campo vettoriale di forze elettriche  $F$ , al campo vettoriale del campo elettrico  $E$ , è stato facile per la semplice relazione  $F=qE$  fra forza elettrostatica e campo elettrico. Nel caso dell'**interazione magnetostatica** le cose non sono così semplici, perché per definire l'effetto del campo magnetico bisogna specificare su cosa esso agisce.
- ◆ Abbastanza immediato è definire la direzione e verso del campo magnetico, nell'intorno di un magnete. Consideriamo un ago magnetico, cioè una barretta magnetizzata libera di ruotare intorno ad un asse fisso (bussola). Sulla terra, in assenza di campo magnetico locale, esso si orienta puntando una delle sue estremità (quasi) in direzione del polo Nord geografico terrestre. Questo è dovuto al campo magnetico terrestre.

# Il campo magnetico statico 2

- ◆ Per questo motivo, in un ago magnetico, chiamiamo polo nord magnetico (N), l'estremità che punta verso il Nord geografico, polo sud magnetico (S), l'estremità che punta verso il Sud geografico. **In tutti i magneti si trovano sempre questi due poli magnetici** (spezzando un magnete in 2, si riformano i poli in modo tale che ogni troncone abbia entrambi i poli: **non è mai stato trovato un monopolo magnetico!**)
- ◆ Avvicinando due magneti fra di loro, vediamo che poli omologhi si respingono, mentre poli opposti si attraggono. (Quindi il Nord geografico della terra è in effetti un polo Sud magnetico!)
- ◆ Avviciniamo un ago magnetico ad un magnete. In ogni punto dello spazio, nell'intorno del magnete, l'ago magnetico si orienta in una certa direzione. Definiamo le linee di forza del campo magnetico come quelle linee tangenti, in ogni punto, alla direzione assunta dall'ago magnetico. Il verso è quello Sud-Nord dell'ago magnetico stesso:



# Vettore Campo Magnetico 1

- ◆ E' necessario ora parlare **di causa ed effetto**... in altre parole cosa serve per produrre un campo magnetico? E quali sono i materiali influenzati dalla presenza di campi magnetiche... cioè perché i metalli sono sensibili al campo e gli isolanti no?
- ◆ Il campo magnetico è intimamente legato al campo elettrico (in sostanza sono due aspetti dello stesso fenomeno) e l'origine è comunque legato alla carica elettrica...
- ◆ Tutti i materiali che hanno carica elettrica sono potenziali produttori di campo magnetico...

**Il campo magnetico è prodotto da una carica elettrica in movimento... e ogni carica elettrica in movimento viene influenzata dal campo magnetico**

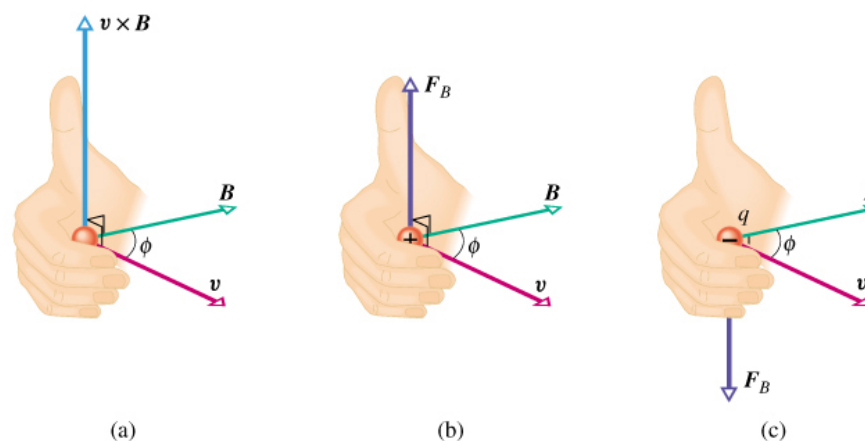
# Vettore Campo Magnetico 2

- ◆ In pratica tutti gli atomi (ci sono elettroni in movimento in un atomo) producono e vengono influenzati dal campo magnetico...
- ◆ Non tutti i materiali però producono un campo magnetico esterno perché (sempre per motivi statistici) il gran numero di atomi orientati in maniera casuale produce un campo magnetico totale nullo (a meno che non c'è un allineamento parziale degli atomi...e questo è quello che succede nelle **calamite**)
- ◆ Viceversa non tutti i materiali vengono influenzati dal campo magnetico per lo stesso motivo...
- ◆ ..nei metalli ad esempio sappiamo che esiste una gran quantità di carica libera che, sotto l'effetto del campo magnetico può reagire... negli isolanti invece l'assenza di carica libera non permette di registrare effetti macroscopici...

# Forza di Lorentz

- ◆ Abbiamo definito per il campo vettoriale direzione e verso. Per definire completamente il vettore campo magnetico occorre definirne il modulo.
- ◆ Sarebbe possibile farlo sempre con l'aiuto dell'ago magnetico, ma è consuetudine (ed è più corretto, in quanto si rivela l'intima relazione fra interazione magnetica ed interazione elettrica) **definire il campo magnetico  $\mathbf{B}$  tramite la forza che esso esercita su una carica elettrica  $q$  in moto con velocità  $\mathbf{v}$ .**
- ◆ Supponiamo che velocità e  $\mathbf{B}$  siano nelle direzioni disegnate. **Lorentz** trovò che la presenza del campo magnetico  $\mathbf{B}$  causa una deflessione della traiettoria di  $q$  ortogonale sia a  $\mathbf{v}$  che a  $\mathbf{B}$ , secondo la legge:

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



# ancora sul vettore Campo Magnetico

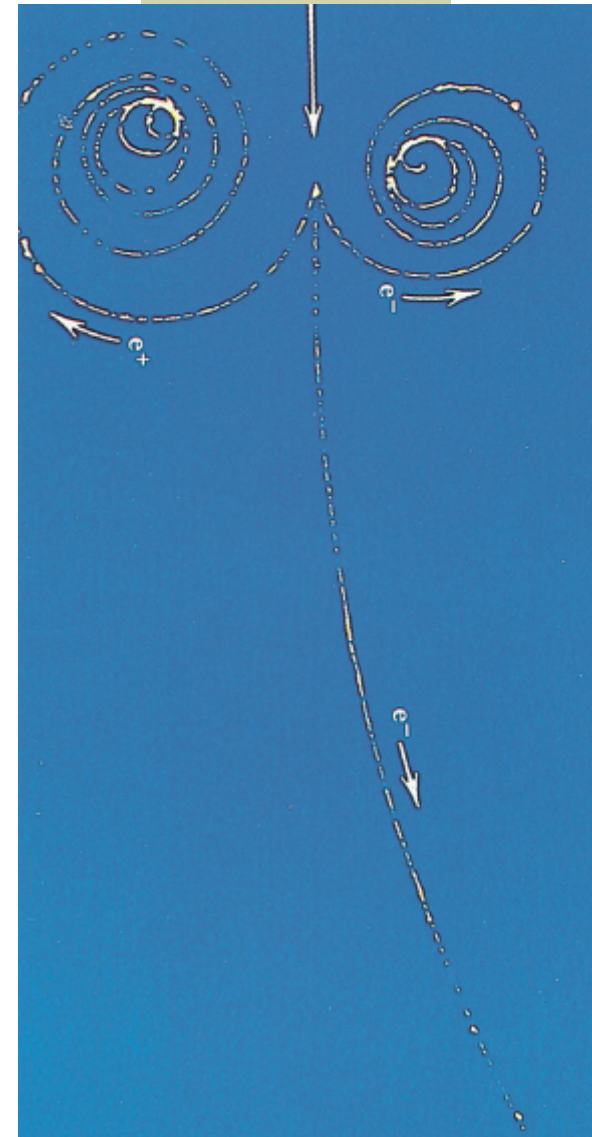
- ◆ La relazione di Lorentz può essere presa a definizione del modulo di  $\mathbf{B}$ .
- ◆ Il modulo del campo magnetico è dato dalla relazione:  $|\mathbf{B}| = |\mathbf{F}|/q|\mathbf{v}|\sin\theta$  dove  $q$  è la carica della particella di test immessa nel campo magnetico  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{v}$  è la sua velocità e  $\theta$  è l'angolo che  $\mathbf{v}$  fa con la direzione e verso di  $\mathbf{B}$  definita dalle linee di forza di  $\mathbf{B}$ .
- ◆ Dalla relazione di Lorentz, grazie alla presenza del prodotto vettoriale, si ha che  $\mathbf{B}$  è sempre **ortogonale** alla velocità  $\mathbf{v}$  e quindi allo spostamento della particella.
- ◆ Notiamo inoltre che il campo magnetico statico non compie alcun lavoro:

$$dL = \vec{F} \cdot d\vec{s} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} dt \quad \mathbf{ma} \quad (\vec{v} \times \vec{B}) \perp \vec{v} \Rightarrow (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} = 0 \Rightarrow dL = 0$$

- ◆ Il Campo magnetico si può misurare in  $N \cdot C^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s$  e tale unità di misura (nel S.I.) è detta **Tesla** ( $T$ ).
- ◆ Siccome  $1T$  è un valore piuttosto grande spesso si usa il **gauss** ( $G$ ) che vale  $10^{-4} T$ ....

# Forza di Lorentz

- ◆ L'effetto della Forza di Lorentz è quello di curvare la direzione di una particella carica...
- ◆ Nel caso di un campo magnetico uniforme e di una particella carica con velocità  $v$  perpendicolare al campo si genera quindi una traiettoria circolare (la forza è sempre perpendicolare alla direzione del moto... è una forza centripeta)
- ◆ Nella figura sono riportate le traiettorie di alcune particelle cariche all'interno di una camera a bolle
- ◆ Dal tipo di rotazione si può ricavare il segno della carica e dal raggio di rotazione combinato con la velocità della particella si può ricavare la massa della particella (il campo magnetico  $B$  infatti è noto)





# Carica in un moto Circolare

- ◆ Per il teorema dell'energia cinetica risulta che il campo magnetico statico non può variare l'energia cinetica della particella carica su cui agisce →  $v$  rimane costante in modulo, cioè l'interazione magnetica agisce solo come deflessione della particella carica.
- ◆ Se cambia solo la direzione di  $v$ , le particelle cariche in un campo magnetico uniforme e costante seguono le leggi del moto circolare uniforme: la forza  $F$  è una forza centripeta

$$\vec{F} = m \frac{v^2}{r} = qvB \quad \Rightarrow \quad r = \frac{mv}{qB} = \frac{v}{B} \left/ \left( \frac{q}{m} \right) \right.$$

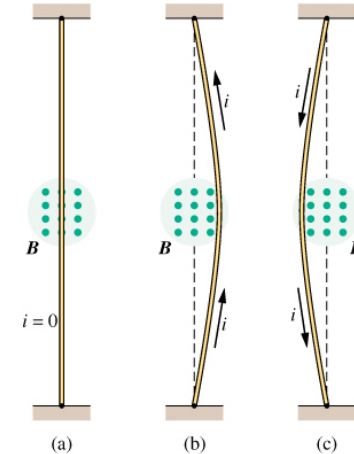
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \frac{mv}{qB} = \frac{2\pi m}{qB} \quad \Rightarrow \quad \nu = \frac{1}{T} = \frac{B}{2\pi} \left( \frac{q}{m} \right)$$

Notare che questa è la frequenza (lettera ni dell'alfabeto greco) da non confondere con la velocità

- ◆ Cioè i raggi disegnati dalle particelle dipendono dalla velocità, ma i periodi di rotazione sono caratterizzati solo dal rapporto  $|q|/m$  cioè dal tipo di particella iniettata nel campo magnetico.

# Azione di un campo magnetico su una corrente

- ◆ Una corrente in un conduttore metallico è costituita da un **flusso ordinato di elettroni**, cioè particelle di carica elementare  $q=e=1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  negativa ( $e^-$ ).
- ◆ Quindi un **campo magnetico  $B$**  in prossimità di un conduttore percorso da corrente  $i$  eserciterà una **forza  $F$**  sul conduttore stesso che sarà la **somma delle forze agenti sui singoli elettroni in moto**.



- ◆ Indichiamo  $n$  il numero di elettroni per unità di volume,  $S$  la sezione del filo conduttore e  $L$  la sua lunghezza. Supponiamo inoltre (per semplificare) che il filo sia perpendicolare al campo magnetico. Grazie alla relazione di Lorentz, la forza agente sul singolo elettrone è

$$\vec{F}_e = e^- (\vec{v} \times \vec{B}) \quad \Rightarrow \quad \vec{F} = \sum \vec{F}_e = n(SL)e^- (\vec{v} \times \vec{B})$$

- ◆ La corrente  $i$  è data dalla quantità di carica che attraversa la sezione  $S$  del conduttore nell'unità di tempo:

$$i = ne^- Sv \quad \Rightarrow \quad |\vec{F}| = iLB$$

## ...azione di un campo magnetico su una corrente

- ◆ Il verso della corrente  $i$  è opposto a  $v$  in quanto gli elettroni hanno carica negativa.
- ◆ Se consideriamo la lunghezza  $L$  come un vettore orientato nel verso di  $i$ ,  $F$  diventa:

$$\vec{F} = i(\vec{L} \times \vec{B})$$

- ◆ Questa legge vale per un conduttore rettilineo immerso in un campo magnetico  $B$ . Per un conduttore di forma qualsiasi, basta considerare un tratto abbastanza piccolo affinché si abbia:

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

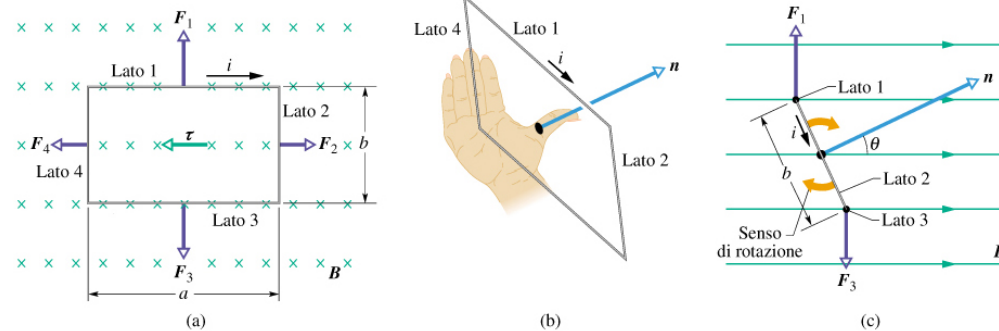
- ◆ Queste relazioni suggeriscono un interessante equivalenza per il Tesla:

$$1 T = 1 \frac{N}{Am}$$

- ◆ Il campo magnetico terrestre è dell'ordine di  $0,5G=0,5 \times 10^{-4} T$ , mentre i magneti più forti che si riescono a realizzare (superconduttori) arrivano a  $10 T$

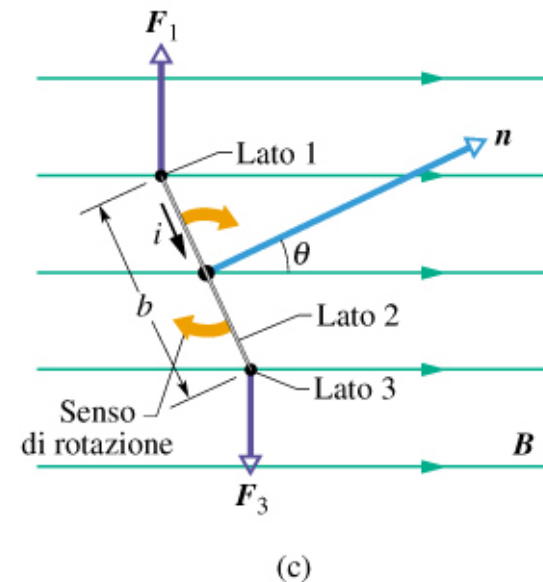
# Spira in un Campo Magnetico

- ◆ Se consideriamo una **spira rigida** percorsa da corrente  $i$  e supponiamo per semplicità che un asse sia ortogonale al campo magnetico  $\mathbf{B}$ , mentre non lo sia l'altro asse.
- ◆ Quindi definisco  $\mathbf{u}_N$  il versore ortogonale al piano della spira, orientato in modo tale che veda la corrente  $i$  fluire in senso antiorario, esso disegna un angolo  $\theta$  col vettore  $\mathbf{B}$ .
- ◆ L'effetto della **Forza di Lorentz** sulle cariche in movimento è quello di produrre **una coppia di forze** che produce una rotazione della spira



# Spira in un Campo Magnetico 2

- ◆ Su ogni lato della spira agisce una forza (di Lorentz), con riferimento alla figura del lucido precedente si ha rispettivamente:
  - Lato 2 e Lato 4: le 2 forze hanno lo stesso modulo e verso opposto  $\Rightarrow$  si compensano e la risultante è nulla. Poiché agiscono sulla stessa retta anche il momento torcente
  - Lato 1 e Lato 3:  $L$  e  $B$  sono perpendicolari fra di loro e hanno modulo uguale a  $iaB$ , le forze sono però dirette in verso opposto  $\Rightarrow$  la spira non si sposta però le forze non giacciono sulla stessa retta d'azione  $\Rightarrow$  è una coppia di forze che produce una rotazione
- ◆ Il risultato ottenuto è valido qualunque sia la forma della spira.
- ◆ Su questo fenomeno si basano molti strumenti: motori elettrici, amperometri, strumenti di misura di campo magnetico
- ◆ Una spira con una corrente elettrica produce una rotazione



# Proprietà Magnetiche della Materia

- ◆ Se ricordiamo il modello più semplice di atomo (elettroni di carica negativa che ruotano attorno ad un nucleo di carica positiva) si riconosce subito che l'orbita percorsa da un elettrone corrisponde ad una spira percorsa da una corrente pari a  $i = |e|/T = |e|\omega/2\pi$
- ◆ e quindi abbiamo un momento di **dipolo magnetico dell'atomo** dovuto al moto dell'elettrone equivalente al dipolo elettrico che abbiamo già studiato
- ◆ Inoltre l'elettrone possiede anche un momento magnetico proprio (si può pensare all'elettrone come una particella che ruota su se stessa) detto **Spin**.
- ◆ Da come, in un atomo o molecola, i momenti magnetici degli elettroni si compongono, dipende il **comportamento della materia se immersa in un campo magnetico esterno**.
- ◆ Ci sono essenzialmente tre classi comportamento della materia immersa in un campo magnetico esterno B:

# Proprietà Magnetiche della Materia

## ◆ **Diamagnetismo:**

- è un fenomeno comune a tutti i materiali, anche se spesso mascherato dai processi riportati in seguito. Le orbite degli elettroni vengono perturbate in maniera tale che la magnetizzazione  $M$  della materia è tale da opporsi a  $B$ .
- Sono diamagnetici il rame, l'argento,...
- I materiali (esclusivamente) diamagnetici hanno atomi con momento di dipolo atomico nullo

## ◆ **Paramagnetismo:**

- L'atomo o molecola, dalla combinazione dei singoli momenti magnetici degli elettroni, possiede un momento di dipolo magnetico permanente non nullo (Alluminio, Platino,...). Tali dipoli, senza  $B$ , sono casualmente orientati.
- La presenza di un campo esterno  $B$  determina l'orientazione di tali dipoli in modo concorde col campo  $B$  (orientamento disturbato dal moto di agitazione termica)

## ◆ **Ferromagnetismo:**

- Nella materia, i dipoli magnetici permanenti sono orientati in domini. La presenza di un campo esterno  $B$  determina la crescita dei domini pressoché concordi con  $B$  rispetto a quelli discordi.
  - Questo determina un forte orientamento dei dipoli ed una forte magnetizzazione della materia. Il comportamento ferromagnetico dipende dalla temperatura, e al di sopra di una temperatura critica, detta temperatura di Curie, le sostanze ferromagnetiche diventano paramagnetiche
  - Sono ferromagnetici il ferro, nichel, cobalto,...
- ◆ L'equivalenza fra ago magnetico e spira percorsa da corrente non è quindi casuale, ma testimonianza del fatto che anche il campo magnetico di un magnete permanente è dovuto a cariche in movimento (elettroni nelle loro orbite) nella materia.