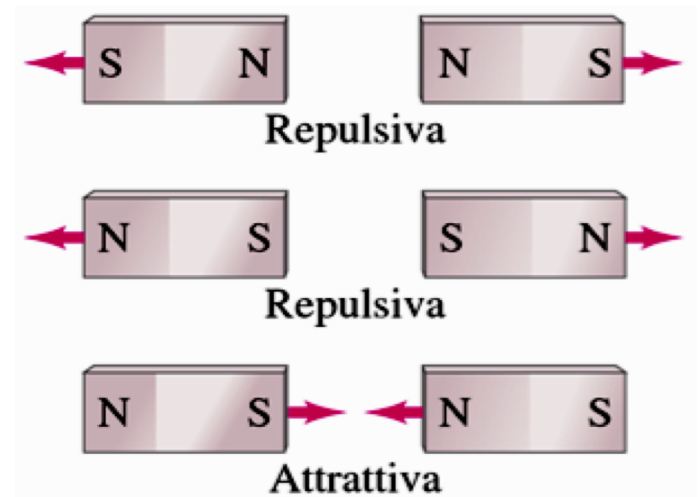
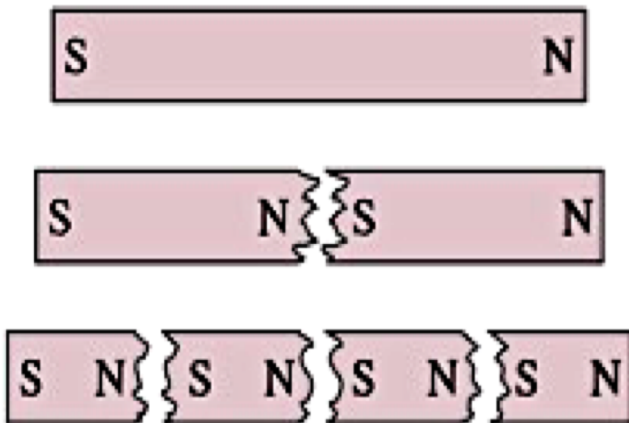


# Il Magnetismo

Tra i poli di un magnete si genera un'interazione che può essere sia attrattiva che repulsiva e che si manifesta anche se i magneti non vengono a contatto (**azione a distanza**): la forza magnetica, dopo quella gravitazionale e quella elettrica, rappresenta dunque un altro esempio di **interazione fondamentale** della natura. In analogia con quanto accade per le cariche elettriche, si verifica sperimentalmente che **poli magnetici dello stesso tipo si respingono** mentre **poli magnetici di tipo opposto si attraggono**.

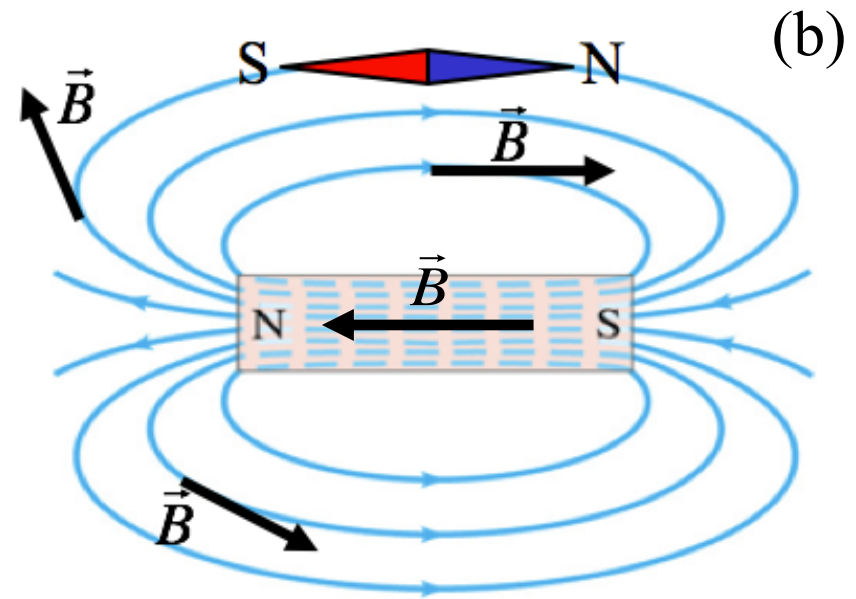
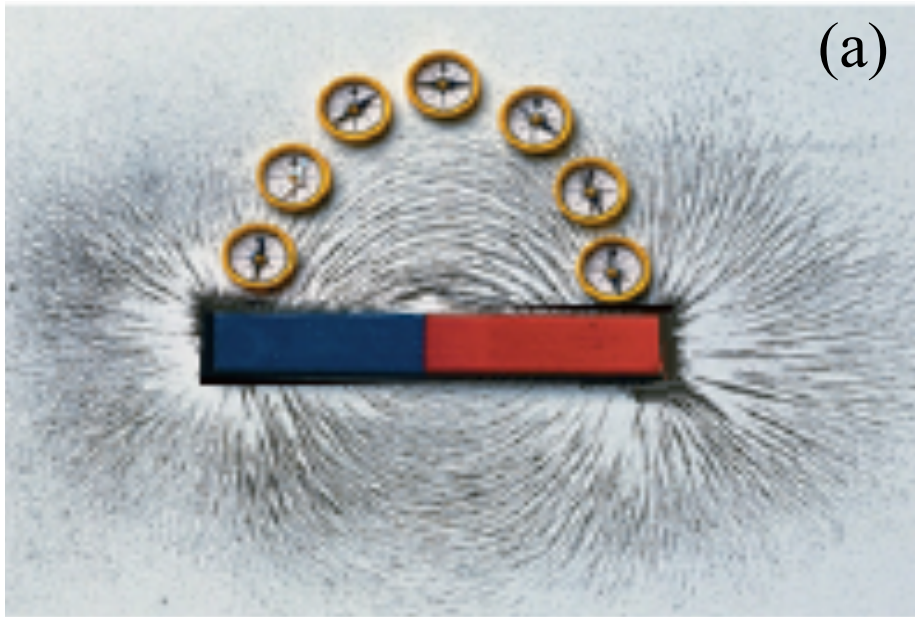


Ma il comportamento dei poli magnetici differisce da quello delle cariche elettriche per una caratteristica molto importante e per certi versi strana, che poi è la ragione per cui si parla di “poli magnetici” e non di “cariche magnetiche”: **spezzando una barretta magnetica non si ottengono un polo nord e un polo sud isolati, bensì si ottengono sempre due nuove barrette magnetiche complete, ciascuna dotata di un polo nord e di un polo sud**. Poli magnetici isolati (i cosiddetti “monopoli magnetici”, che sarebbero praticamente una sorta di “cariche magnetiche” analoghe a quelle elettriche) non sono **mai stati osservati** in natura e si ritiene che non possano esistere.



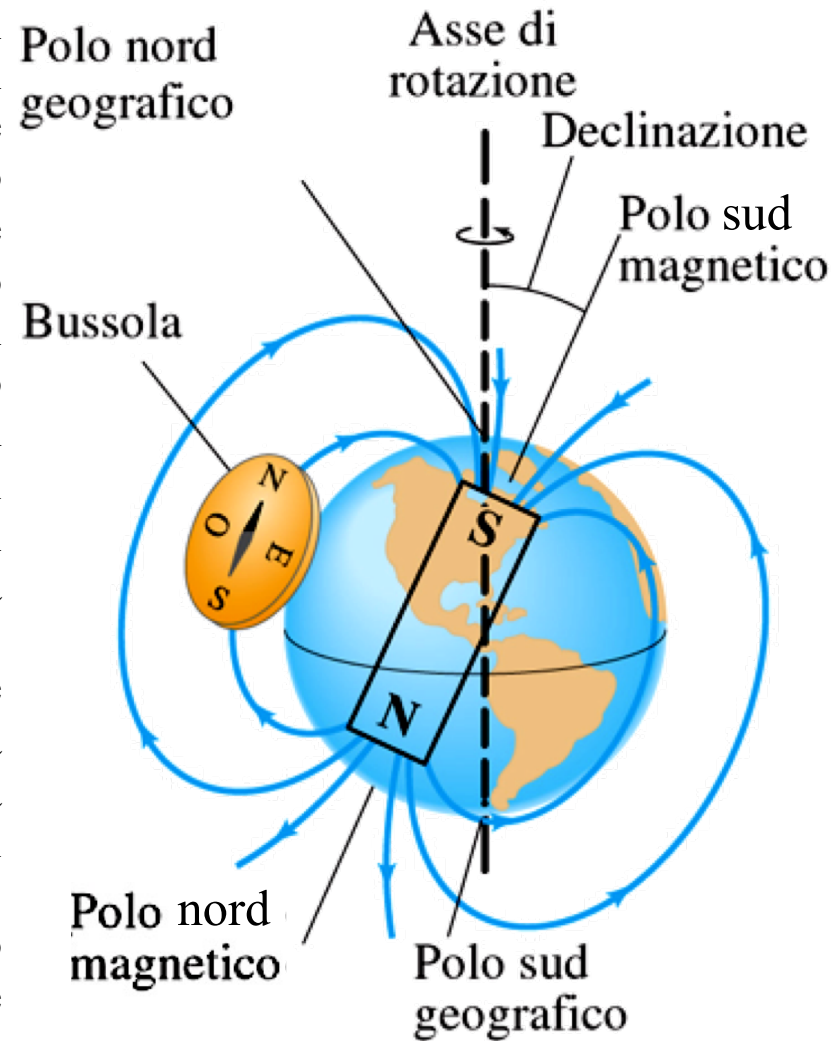
# Il Campo Magnetico

Le particelle di **limatura di ferro**, allineandosi come aghi magnetici di minuscole bussole, possono aiutarci a capire che aspetto hanno le **linee di campo magnetico attorno a un magnete** (a) : si ricordi che che il verso del campo in un punto è indicato per definizione dal polo nord dell'ago di una bussola posta in quel punto e che il polo nord dell'ago di una bussola viene attratto dal polo sud di un magnete posto nelle vicinanze. Le linee di forza del campo magnetico sono dunque orientate in modo da risultare sempre **uscanti dal polo nord ed entranti nel polo sud** (b). Si noti anche che le linee di campo magnetico continuano il loro percorso anche dentro il magnete, generando un campo magnetico interno ad esso: infatti, a causa dell'assenza di monopoli magnetici **le linee di forza devono essere necessariamente chiuse**, a differenza di quanto accade per le linee di forza del campo elettrico che, come abbiamo visto, hanno origine sulle cariche positive e terminano sulle cariche negative.



# Il Campo Magnetico Terrestre

Come è noto, anche la Terra è circondata da un campo magnetico le cui linee di forza richiamano quelle di un immaginario gigantesco magnete posto al suo interno: dal momento che il polo nord (N) delle bussole punta verso il polo nord geografico terrestre, quest'ultimo deve evidentemente fungere da polo sud (S) magnetico dell'ipotetico magnete presente nella Terra (poiché, come sappiamo, il polo N di un magnete viene sempre attratto del polo S di un altro magnete). Nonostante ciò spesso il polo nord geografico terrestre viene chiamato anche polo nord magnetico, e così il polo sud. In ogni caso **i poli magnetici non coincidono con quelli geografici**, che si trovano esattamente sull'asse di rotazione: per esempio, il nord geomagnetico è un punto della calotta artica canadese posto a circa 900 km dal polo nord geografico. Questa differenza angolare tra il nord geografico e magnetico (da tenere ben presente quando si usa la bussola!) è detta **declinazione magnetica** e varia a seconda del punto della superficie terrestre in cui si misura (in Italia è attualmente sempre inferiore a  $1^\circ$ ). L'angolo formato invece dalla direzione del campo magnetico (che, come si vede in figura, non è sempre tangente alla superficie terrestre) e l'orizzontale è detto **inclinazione magnetica**.

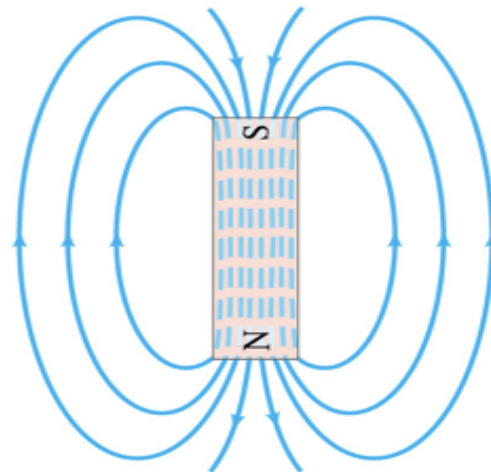
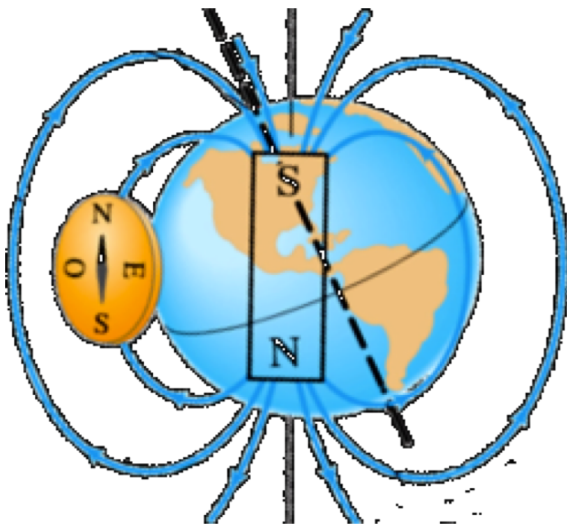


# Unità di misura del Campo Magnetico

L'unità di misura del campo magnetico nel sistema internazionale (SI) è il **tesla** (T), in onore del geniale fisico, inventore e ingegnere serbo (naturalizzato statunitense nel 1891) **Nikola Tesla**. Dal punto di vista dimensionale, si ha che  $1\text{T}=1\text{N}/\text{A}\cdot\text{m}$ . Spesso si utilizza anche l'unità di misura del sistema CGS, il **gauss** (G):  $1\text{G}=10^{-4}\text{T}$ . Si tenga presente che il **campo magnetico sulla superficie terrestre** è dell'ordine di mezzo gauss, quindi  $0.5\cdot 10^{-4}\text{T}$ . D'altro canto, elettromagneti molto potenti possono produrre campi dell'ordine di 2 T e i magneti superconduttori arrivano fino a campi da 10 T.



**Nikola Tesla**  
(1856-1943)

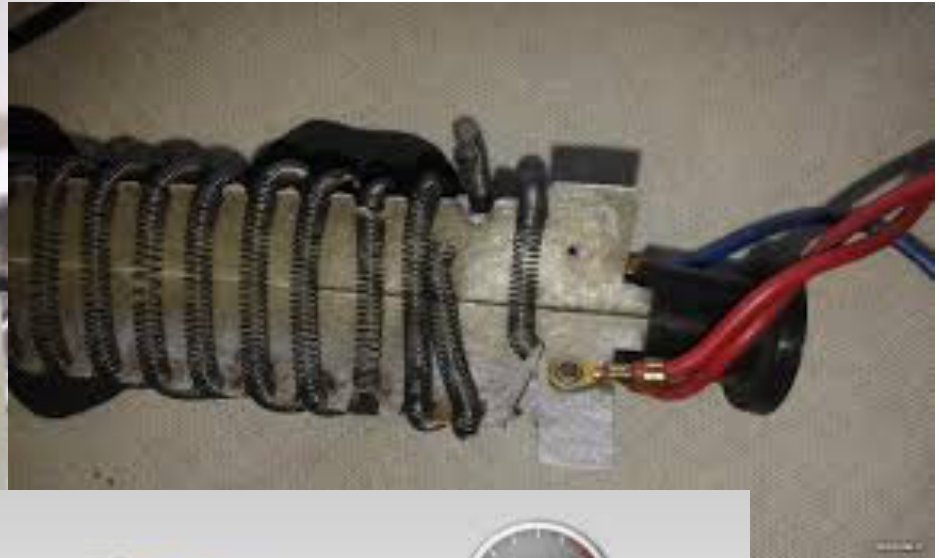


**Elon Musk**  
(1971-.....)





Ma avevamo lasciato in sospeso la domanda...come funziona un asciugacapelli? O un ventilatore? O un motorino di avviamento?

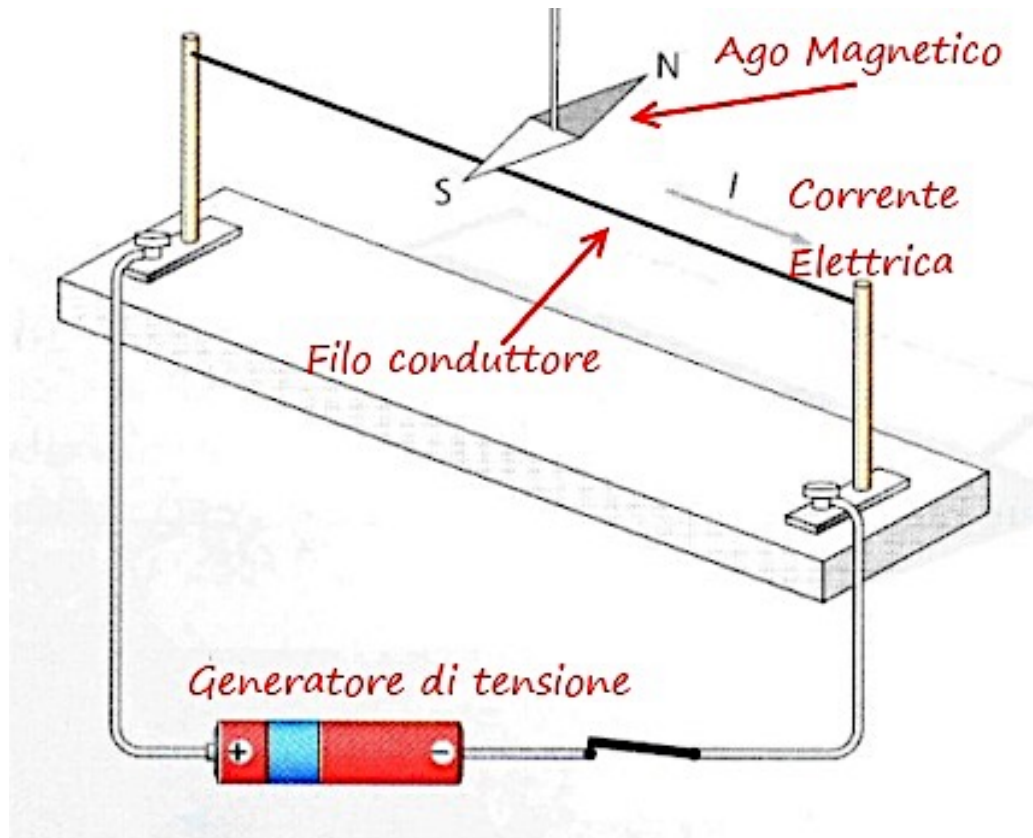


# Legami tra Elettricità e Magnetismo

Già nel corso del XVIII secolo gli scienziati sospettavano che vi fosse un legame tra elettricità e magnetismo ma gli esperimenti con cariche elettriche statiche non avevano avuto alcun successo. Fu solo **nel 1820** che il fisico danese **Christan Oersted** scoprì per caso che una bussola posta nei pressi di un circuito elettrico ruotava non appena il circuito veniva collegato a una batteria e dava luogo a una corrente. Poiché, come si è visto, l'ago di una bussola ruota solo per effetto di un campo magnetico, l'esperimento di Oersted dimostrava che **le correnti elettriche producono campi magnetici**: egli aveva così finalmente scoperto il legame nascosto tra elettricità e magnetismo!



Christian Oersted  
(1777-1851)

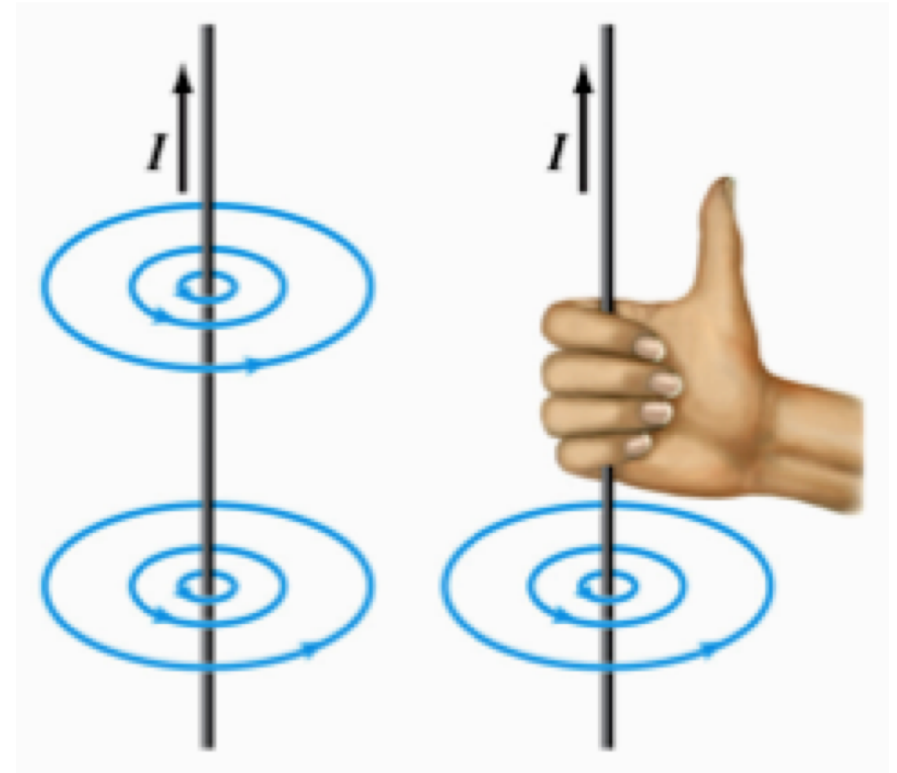


# Campi Magnetici prodotti da Correnti Elettriche



Se delle bussole vengono poste nei pressi di un **filo rettilineo molto lungo percorso da corrente** elettrica, si nota che gli aghi si dispongono tangenzialmente a una circonferenza centrata sul filo: se ne deduce che le linee di forza del campo prodotto dalla corrente che scorre nel filo sono **circonferenze concentriche** al filo e giacenti su piani ad esso **ortogonali**.

Il verso di percorrenza delle linee di campo è quello indicato dal polo nord della bussola e può essere facilmente determinato dalla cosiddetta **regola della mano destra**: afferrando il filo con la mano destra in modo che il pollice punti nel verso convenzionale della corrente, il verso in cui si chiudono le dita della mano individua la direzione del campo magnetico non uniforme prodotto dal filo.



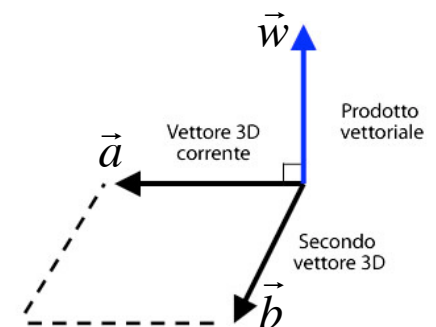
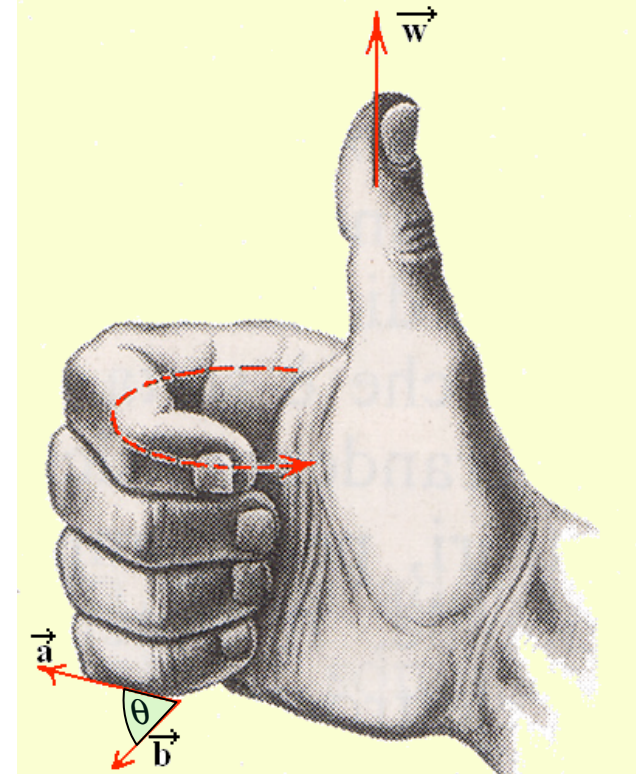
# Il Prodotto Vettoriale

La regola della mano destra appena presentata rientra in un contesto più generale, cioè quello del cosiddetto “prodotto vettoriale” tra due vettori. Abbiamo già incontrato il prodotto scalare tra due vettori, che dà come risultato uno scalare. Il **prodotto vettoriale tra due vettori complanari**  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$ , che si indica con  $\vec{a} \times \vec{b}$ , dà invece come risultato un vettore  $\vec{w}$  la cui **direzione** risulterà perpendicolare al piano individuato dai primi due vettori ed il cui **modulo** sarà dato dal prodotto dei moduli di  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  per il seno dell'angolo convesso tra essi compreso. Il **verso** di  $\vec{w}$  sarà invece determinato dalla posizione del pollice quando, ponendo le dita della mano destra lungo il vettore  $\vec{a}$ , le stesse dita verranno chiuse facendole ruotare verso il vettore  $\vec{b}$ .

$$\text{Avremo dunque: } \vec{w} = \vec{a} \times \vec{b} \quad \rightarrow \quad |\vec{w}| = |\vec{a}||\vec{b}|\sin\theta$$

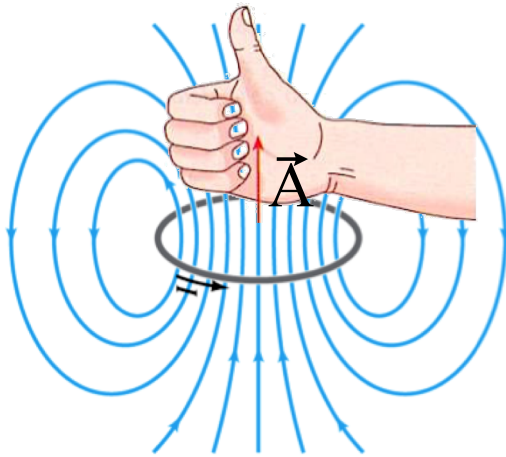
Proprietà del prodotto vettoriale:

- 1) Il prodotto vettoriale è **anticommutativo**:  $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$
- 2) Il prodotto vettoriale è **massimo** quando i vettori  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  sono **perpendicolari** ( $\theta=90^\circ$ ) ed è **uguale a zero** quando i due vettori sono **paralleli** ( $\theta=0^\circ$ ) o quando uno dei due vettori è nullo;
- 3) Il modulo del vettore  $\vec{w}$  coincide con l'**area del parallelogramma** individuato dai due vettori  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$ .





# Il Momento Magnetico di una Spira

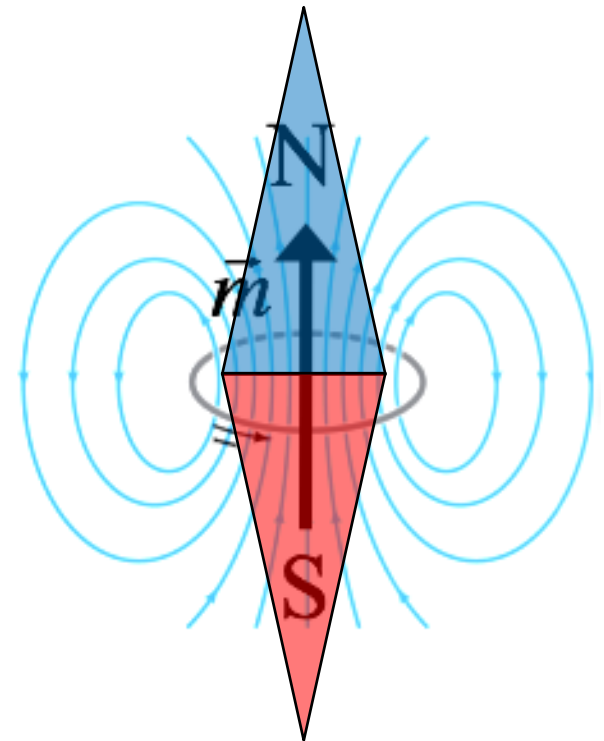


Con una bussola si può verificare che le linee di forza del campo magnetico prodotto dalla corrente  $I$  che fluisce in una **spira circolare di area  $A$**  sono quelle mostrate nella figura qui accanto: chiudendo le dita della mano destra lungo il verso di rotazione della corrente nella spira, il pollice verso l'alto indicherà la direzione del campo magnetico. Resta così definito anche il **vettore areale  $\vec{A}$**  (in rosso), di modulo pari all'area della spira, direzione perpendicolare al piano della spira e verso uguale a quello delle linee di forza che attraversano la sua superficie.

Ad ogni spira di questo tipo è possibile associare un **vettore  $\vec{m}$** , chiamato “**momento di dipolo magnetico**” o semplicemente “**momento magnetico**”, definito dal prodotto della corrente  $I$  per il **vettore areale  $\vec{A}$** . Dunque sarà:

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

Si noti che il campo prodotto dalla spira è del tutto simile a quello prodotto da una barretta magnetica o dall'ago di una bussola: infatti **anche una spira percorsa da corrente ha un polo nord e un polo sud**, individuati rispettivamente dalla punta e dalla coda del vettore momento magnetico ad essa associato.

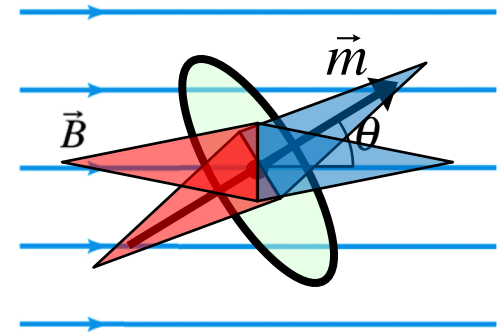


# Il Magnetismo nella Materia

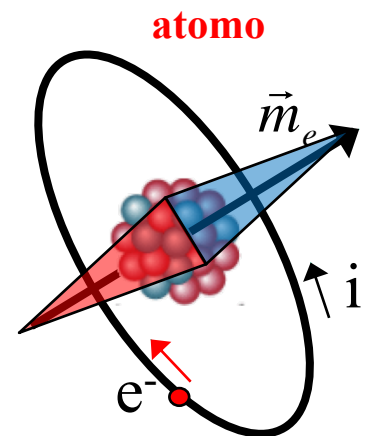
E' interessante osservare a questo punto che se una spira percorsa da corrente viene posta in un **campo magnetico uniforme**, essa subisce una forza (**momento torcente**)  $\vec{\tau}$  che tende a farla ruotare nella direzione che minimizza l'angolo  $\theta$  tra il campo magnetico  $\vec{B}$  e il momento magnetico  $\vec{m}$  della spira secondo l'equazione vettoriale:

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

In altre parole la forza  $\vec{\tau}$  (perpendicolare al piano della pagina ed entrante in essa) tenderà a far **allineare** il momento magnetico della spira con la direzione del campo magnetico, esattamente come l'ago di una bussola si allinea col campo magnetico terrestre!

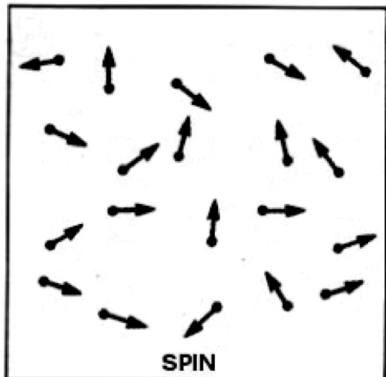
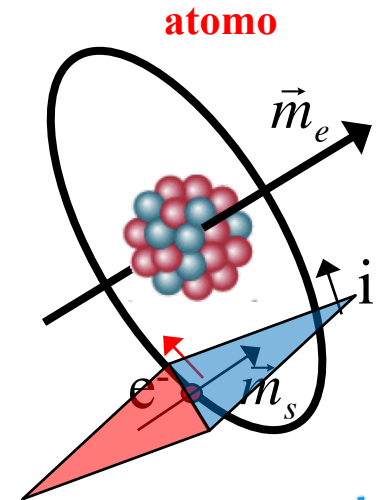


A questo punto diventa immediato comprendere da cosa ha origine il **magnetismo nella materia** e quali sono le sue proprietà. Infatti, da un punto di vista microscopico, è plausibile pensare che ogni atomo possieda delle proprietà magnetiche a causa del movimento degli elettroni intorno al nucleo, movimento che costituisce a tutti gli effetti una corrente: in questo **ciascun atomo si comporterebbe come una minuscola spira dotata di un momento di dipolo magnetico**  $\vec{m}_e$  associato al moto orbitale degli elettroni (si consideri che il moto di un singolo elettrone  $e^-$  equivale ad una corrente  $i$ , circolante nel verso opposto al senso di rotazione dell'elettrone, di circa  $1.6 \cdot 10^{-3}$  A, in grado di generare un campo magnetico di 20 T al centro dell'atomo!).



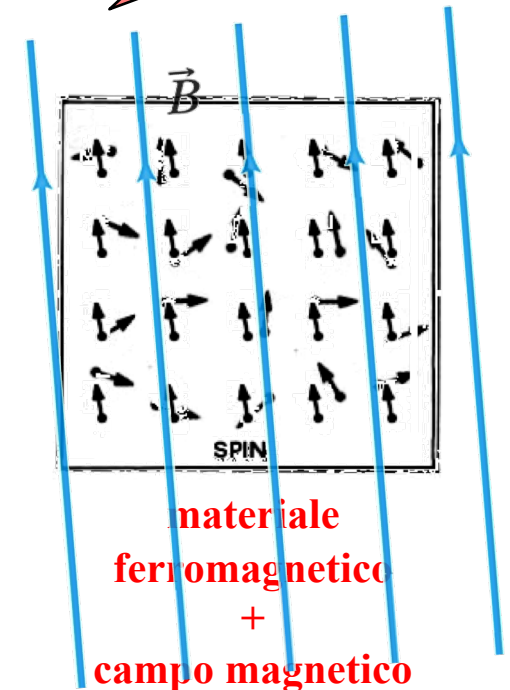
# Il Magnetismo nella Materia

In realtà i momenti magnetici orbitali degli elettroni di un **atomo multielettronico**, non essendo le orbite dei vari elettroni complanari tra loro, tendono ad annullarsi reciprocamente. Ogni elettrone però possiede un altro momento magnetico legato al suo cosiddetto **spin**, che è una proprietà quantistica intrinseca classicamente interpretabile come dovuta ad una rotazione dell'elettrone su se stesso. Di solito gli elettroni hanno, a coppie, spin antiparalleli che ancora una volta si compensano, ma gli atomi con un elettrone "spaiato" mantengono un momento di spin  $\vec{m}_s$  dello stesso ordine di quello orbitale.



**materiale  
ferromagnetico**

Sostanze come il **ferro**, il **cobalto** o il **nicel**, sono dette **ferromagnetiche** e costituiscono i magneti permanenti (o calamite): esse sono caratterizzate da momenti magnetici atomici di spin che normalmente sono disallineati a causa dell'agitazione termica (figura a sinistra) ma che in presenza di un campo magnetico esterno, anche debole come quello terrestre, tendono ad allinearsi producendo una **magnetizzazione macroscopica** del materiale (figura a destra), che permane a lungo anche una volta che il campo viene rimosso.

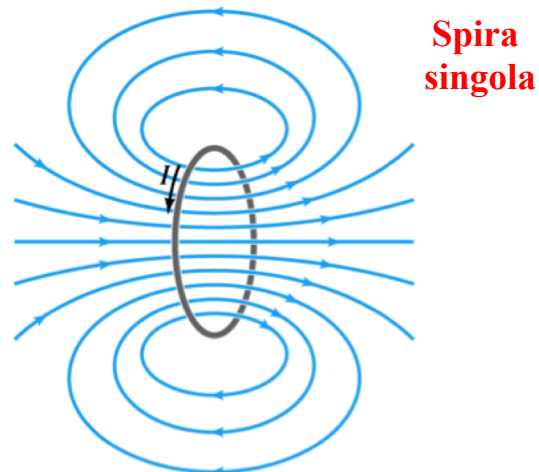
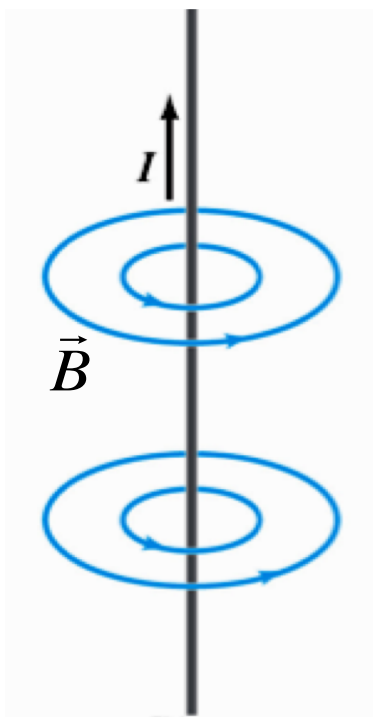


# Relazioni tra fenomeni elettrici e magnetici

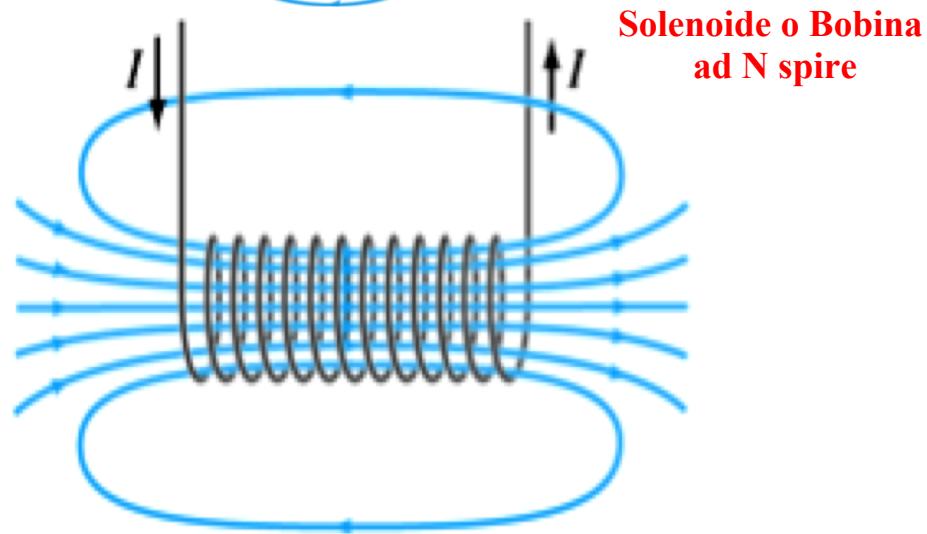
Dunque, abbiamo cominciato a vedere che i fenomeni elettrici e quelli magnetici sono in stretta relazione gli uni con gli altri. In particolare abbiamo finora visto che:

(1) le correnti elettriche producono campi magnetici...

Filo elettrico  
rettilineo infinito



Spira  
singola



Solenoido o Bobina  
ad N spire

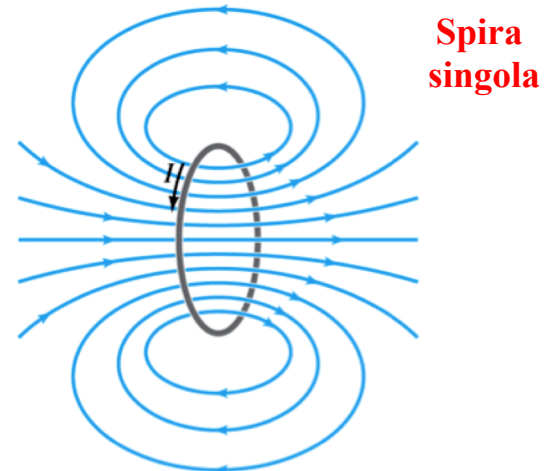
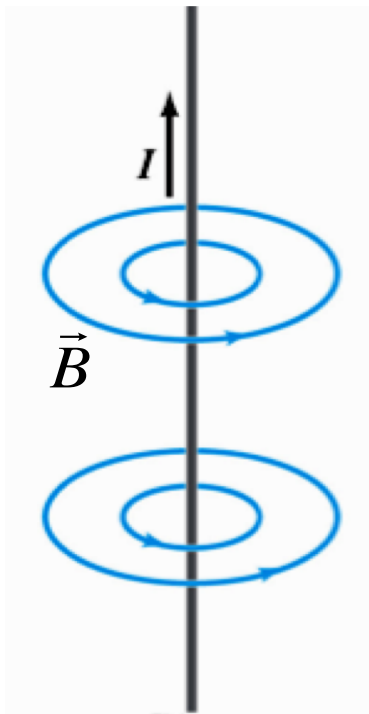


# Relazioni tra fenomeni elettrici e magnetici

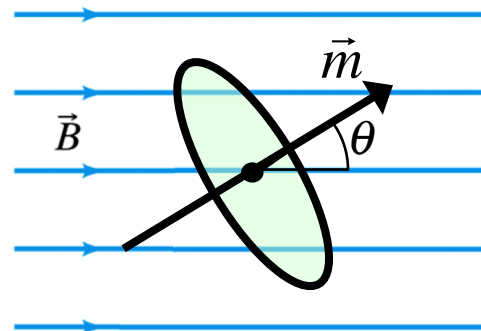
Dunque, abbiamo cominciato a vedere che i fenomeni elettrici e quelli magnetici sono in stretta relazione gli uni con gli altri. In particolare abbiamo finora visto che:

(1) le correnti elettriche producono campi magnetici...

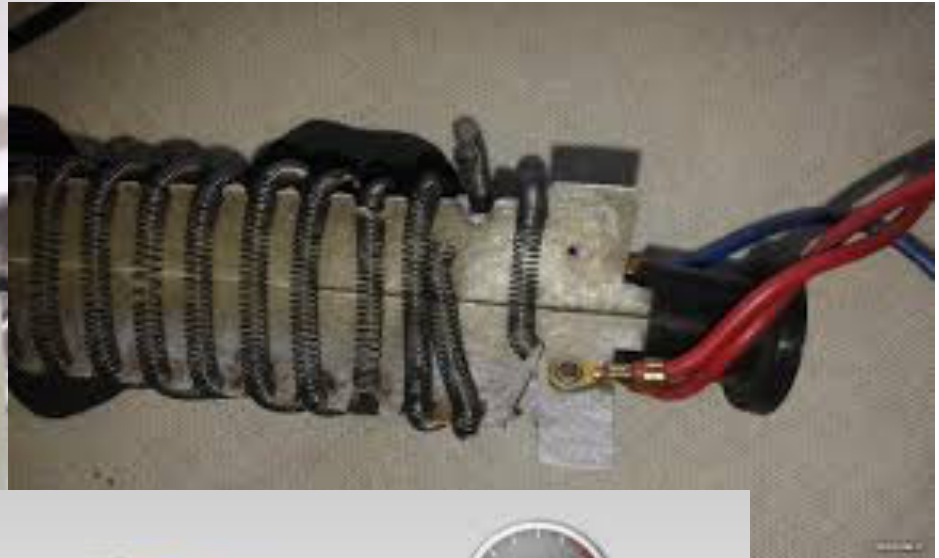
Filo elettrico  
rettilineo infinito



...e le spire (o le bobine) ruotano dentro i campi magnetici...



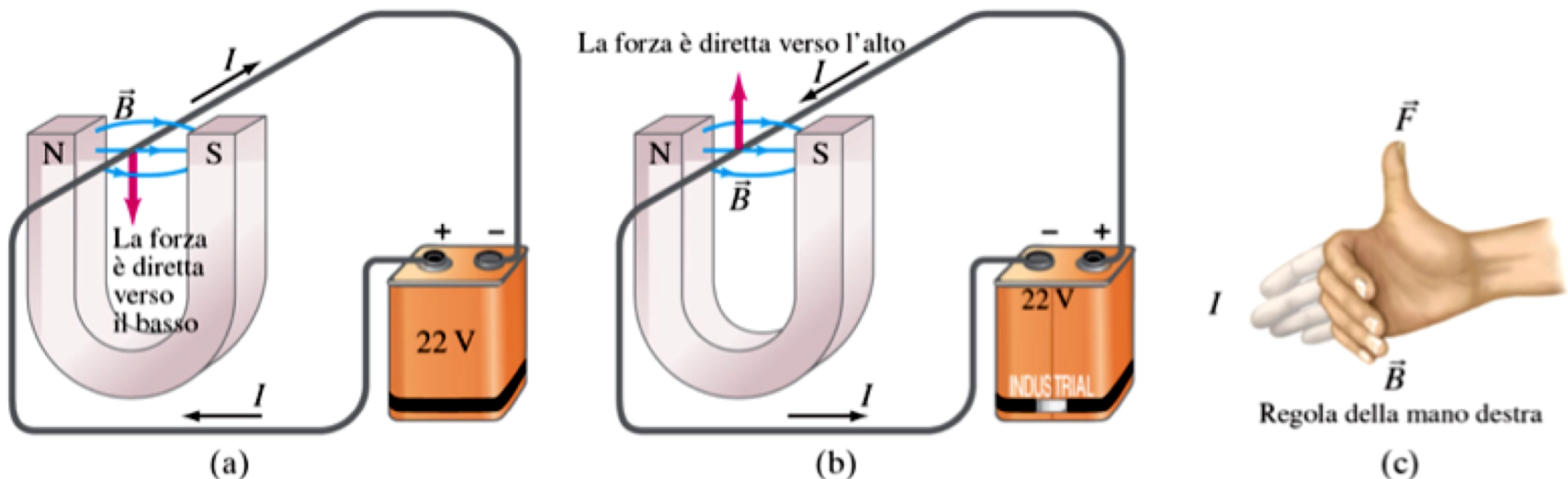
...e quest'ultima proprietà risponde già alle nostre domande sul funzionamento di alcuni dispositivi elettrici con parti in movimento...



# Forza esercitata da un Magnete su un filo elettrico

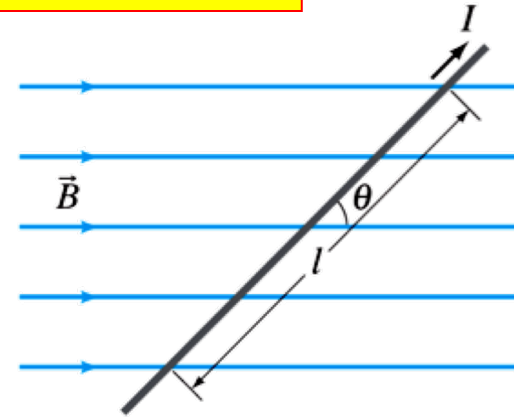
Ma se un filo percorso da corrente è in grado di produrre un campo magnetico, e quindi di esercitare una forza su un magnete posto nelle sue vicinanze, per la **terza legge della dinamica** di Newton, intuitivamente ci potremmo aspettare che anche *un magnete eserciti una forza su un filo percorso da corrente*: in realtà le cose stanno proprio così e anche questo effetto è stato dimostrato sperimentalmente da Oersted! Vediamo cosa si osserva negli esperimenti...

Consideriamo un filo percorso da una **corrente**  $I$  e passante, come mostrato nella figura qui sotto, tra i poli di un magnete a U tra i quali esisterà un **campo magnetico**  $\vec{B}$ : sul filo si osserva agire una **forza**  $\vec{F}$  diretta ortogonalmente al campo magnetico che nel caso (a) punterà verso il basso mentre nel caso (b), invertendo il verso della corrente, punterà verso l'alto. In sostanza la direzione della forza  $\vec{F}$  risulta sempre ortogonale al piano formato dal vettore  $\vec{I}$ , di intensità  $I$  e diretto lungo il filo nel verso della corrente, e dal vettore  $\vec{B}$ , mentre il suo verso può essere agevolmente determinato con la **regola della mano destra** (c): piegando le dita da  $\vec{I}$  su  $\vec{B}$  il pollice indicherà il verso di  $\vec{F}$ . E' questo un primo indizio che potrebbe suggerire la presenza di un prodotto vettoriale che agisce dietro le quinte...



# Forza esercitata da un Magnete su un filo elettrico

Gli esperimenti mostrano, inoltre, che: (1) la **forza  $\vec{F}$  agente sul filo** è direttamente proporzionale alla corrente  $I$  e alla lunghezza  $l$  della parte di filo esposta al campo magnetico  $\vec{B}$ , assunto approssimativamente uniforme tra i due poli del magnete; (2) aumentando l'intensità del campo magnetico  $\vec{B}$ , cresce proporzionalmente anche il modulo di  $\vec{F}$ ; (3) la forza  $\vec{F}$  dipende anche dall'angolo  $\theta$  tra la direzione della corrente e quella del campo magnetico.



Riassumendo tutte queste **evidenze sperimentali**, se ne può concludere che la forza agente su un filo di lunghezza  $l$  percorso da una corrente  $I$  e sottoposto all'azione di un campo magnetico  $\vec{B}$  è data dal **prodotto vettoriale**:

$$\vec{F} = \vec{I}l \times \vec{B} \quad \rightarrow \quad F = IlB \sin\theta$$

La forza avrà dunque **modulo massimo** quando la corrente è ortogonale alle linee di campo ( $\theta=90^\circ$ ,  $F = IlB$ ) mentre è **nulla** quando la corrente e le linee di campo sono parallele ( $\theta=0^\circ$ ).

