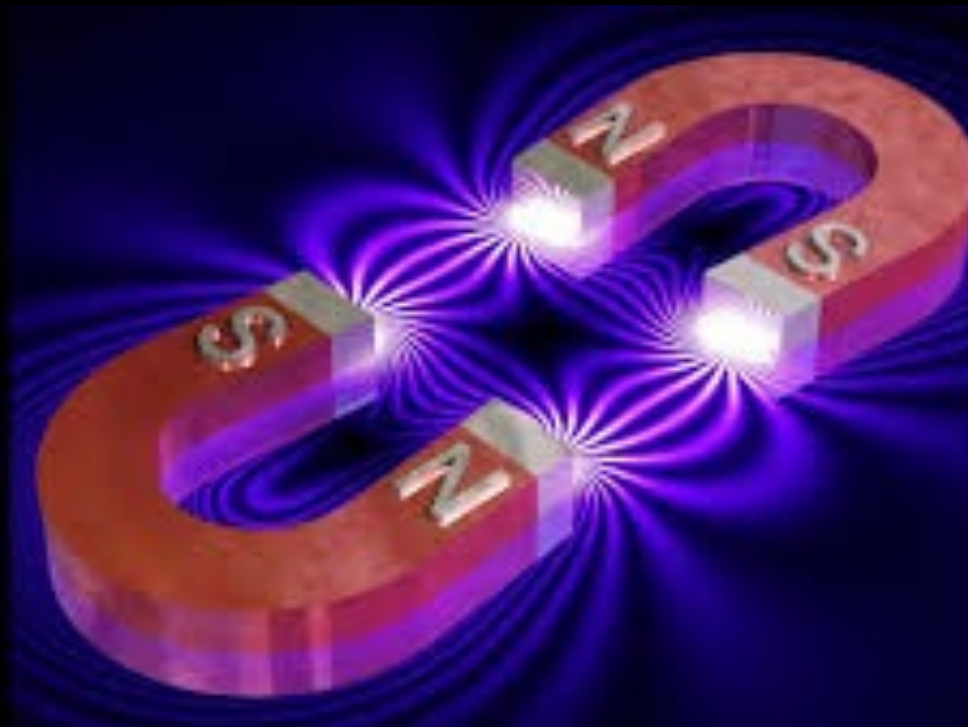
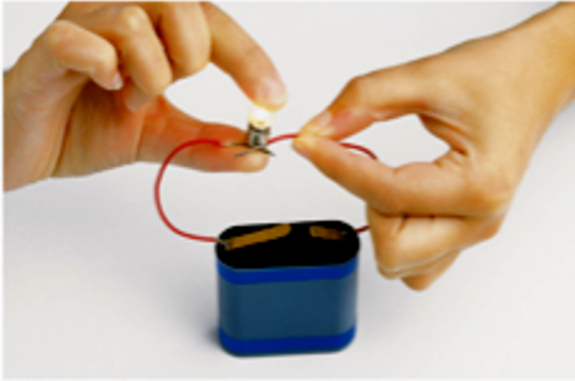


## Dal Magnetismo all'Elettromagnetismo



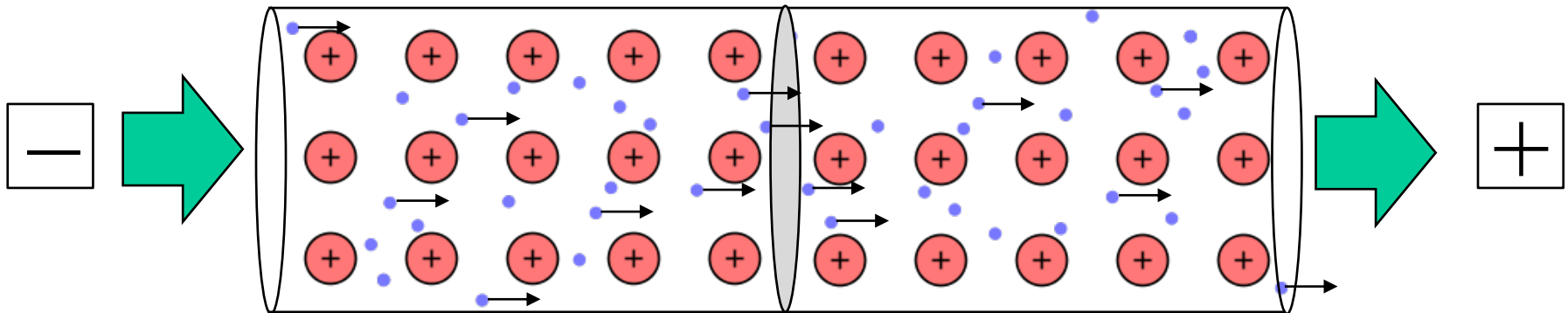
# Elettrodinamica: la Corrente Elettrica



La **corrente elettrica** che fluisce nel conduttore (filo di rame) viene definita come *la quantità di carica che attraversa la sezione trasversale del filo nell'unità di tempo*, cioè:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

La sua **unità di misura** sarà dunque il Coulomb al secondo, detto **Ampère (A)**:  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$  (come già anticipato la corrente elettrica è una delle 7 grandezze fisiche fondamentali del SI)



Struttura interna di un filo elettrico in presenza di tensione

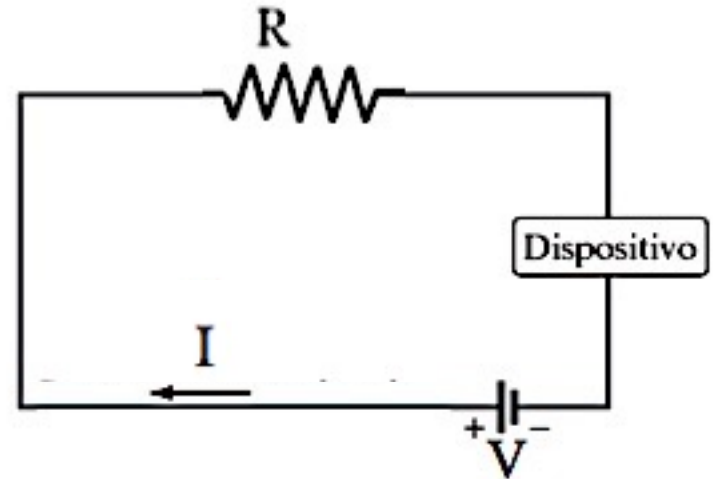
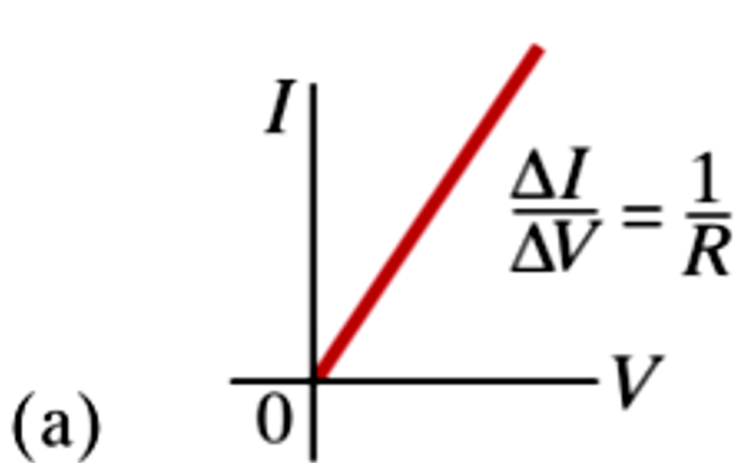
# La Legge di Ohm

Il fisico tedesco **Georg Simon Ohm** fu il primo a mostrare sperimentalmente che la **corrente  $I$**  che scorre in un filo metallico è **direttamente proporzionale alla tensione  $V$**  applicata ed **inversamente proporzionale alla resistenza  $R$**  del conduttore secondo la celebre relazione conosciuta appunto come **legge di Ohm**:

$$V = RI \rightarrow I = \frac{V}{R}$$



Georg Simon Ohm  
(1787-1854)



# Un quesito...

Vi siete mai chiesti come funziona un **asciugacapelli**?

O un **ventilatore**? O un **motorino** di avviamento?

Come fa una **corrente elettrica**, costituita da microscopici **elettroni**, a mettere in movimento **ingranaggi macroscopici enormi** rispetto alle loro dimensioni?





# La risposta è nel Magnetismo!

Come mostreremo tra poco, il funzionamento di questi dispositivi è reso possibile dallo stretto **legame che esiste tra l'elettricità e il magnetismo**, una nuova interazione fondamentale con azione a distanza. Questo legame è stato scoperto nel corso del XIX secolo, quando ci si accorse che *le correnti elettriche sono in grado di produrre effetti magnetici e dunque di generare forze magnetiche*: oggi quasi tutti gli elettrodomestici e le altre apparecchiature di uso comune sfruttano le **proprietà magnetiche dell'elettricità**, dai motori agli altoparlanti, dalle memorie dei calcolatori ai generatori elettrici. Ma procediamo con calma...

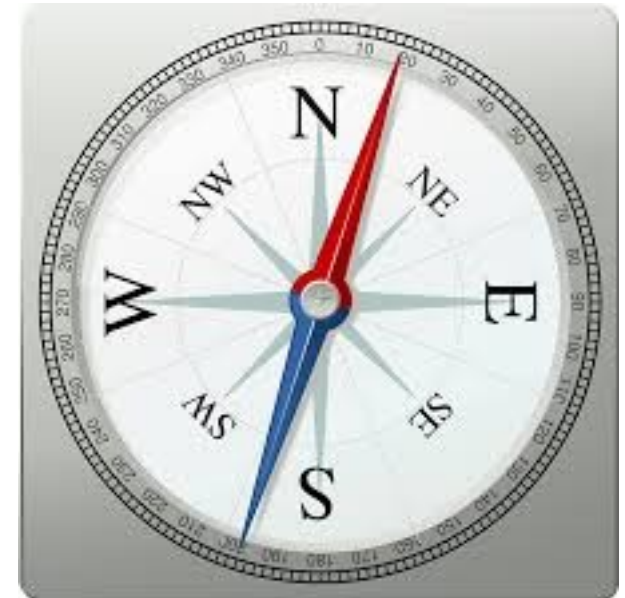


# Il Magnetismo

La storia del **magnetismo** ha inizio alcune migliaia di anni fa in Asia minore dove, in una regione greca chiamata **Magnesia**, furono scoperte alcune rocce in grado di attrarsi reciprocamente, alle quali fu dato il nome di “**magneti**”.



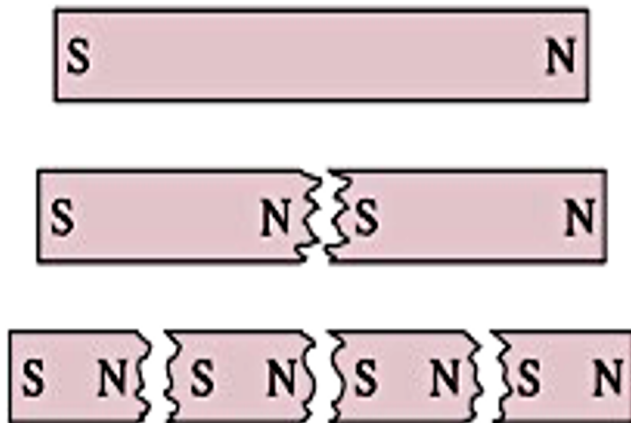
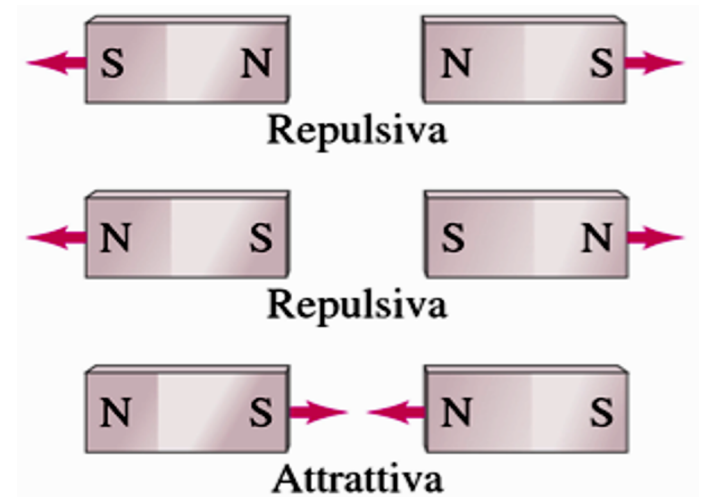
Tutti abbiamo avuto esperienza di come una **calamita** (un esempio tipico di magnete) sia in grado di attrarre piccoli oggetti di ferro. Qualunque sia la sua forma, **un magnete possiede sempre due estremità**, dette **poli magnetici**, dove gli effetti del magnetismo sono più evidenti.



**L'ago magnetico di una bussola** è un esempio di magnete: come noto, in prossimità della superficie terrestre l'ago **tende a ruotare** in modo che una delle sue estremità punti verso il **polo nord terrestre**, e per questo viene detta “**polo nord**” (N) del magnete, mentre l'altra punta verso l'altro polo e viene detta “**polo sud**” (S). Questa denominazione viene estesa ai poli di qualunque magnete.

# Le strane proprietà dei Magneti

Tra i **poli di due magneti diversi** (tipicamente rappresentati da barrette di ferro) 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**): come avevamo anticipato, la forza magnetica rappresenta dunque un altro esempio di **interazione fondamentale** della natura, dopo quella gravitazionale e quella elettrica. 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**.



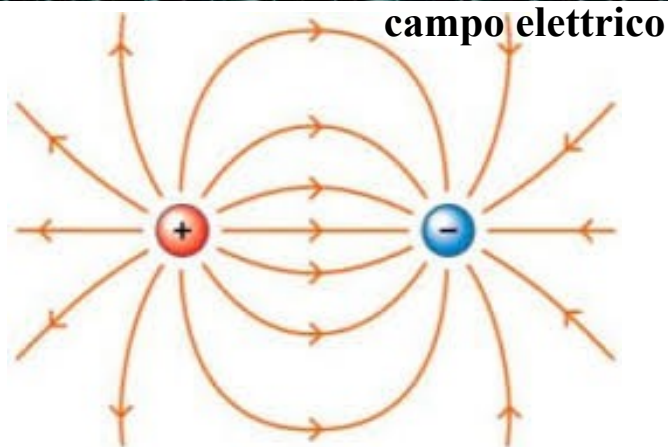
Ma il comportamento dei magneti differisce da quello delle cariche elettriche per una caratteristica molto importante e per certi versi **strana**, che poi è la ragione per cui si parla di “barrette magnetiche” e non di “cariche magnetiche”: **spezzando una barretta magnetica non si ottengono un polo 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 anche la possibilità teorica della loro esistenza è molto dubbia.

# Il Campo Magnetico

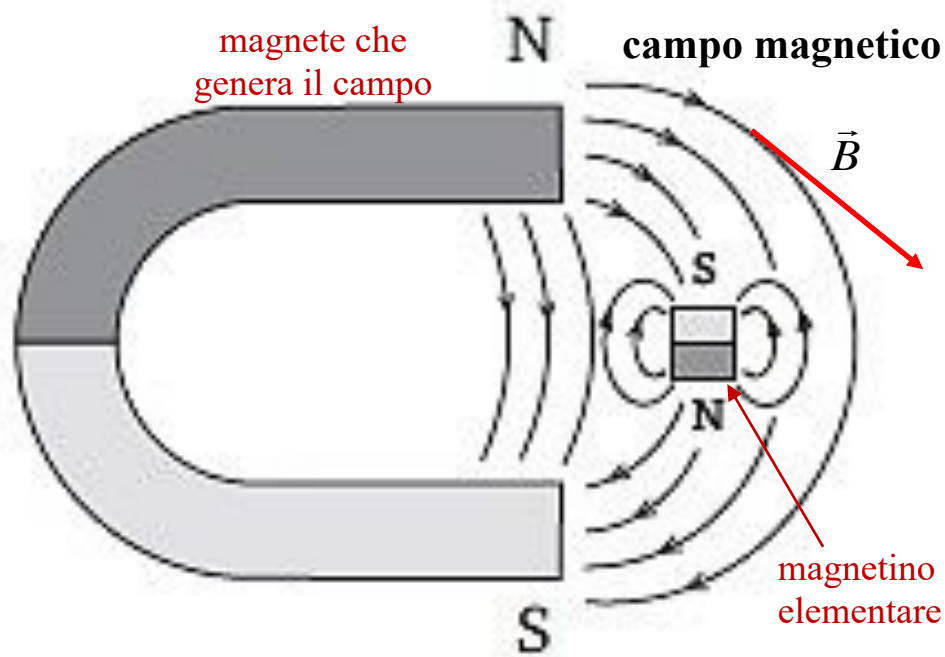
In modo del tutto analogo a come abbiamo introdotto il concetto di campo gravitazionale per spiegare l'interazione a distanza tra due **masse** e quello elettrico per spiegare l'interazione tra due **cariche**, è possibile introdurre il concetto di **campo magnetico** per descrivere l'interazione tra due o più **magneti**: anche in questo caso il campo, che indicheremo con il vettore  $\vec{B}$ , può essere rappresentato da linee di forza tali che (1) la **direzione** del campo magnetico in un punto sia tangente alla linea di forza passante per quel punto e (2) l'**intensità** del campo sia proporzionale al numero di linee tracciate per unità di superficie.



campo gravitazionale



campo elettrico



magnete che genera il campo

campo magnetico

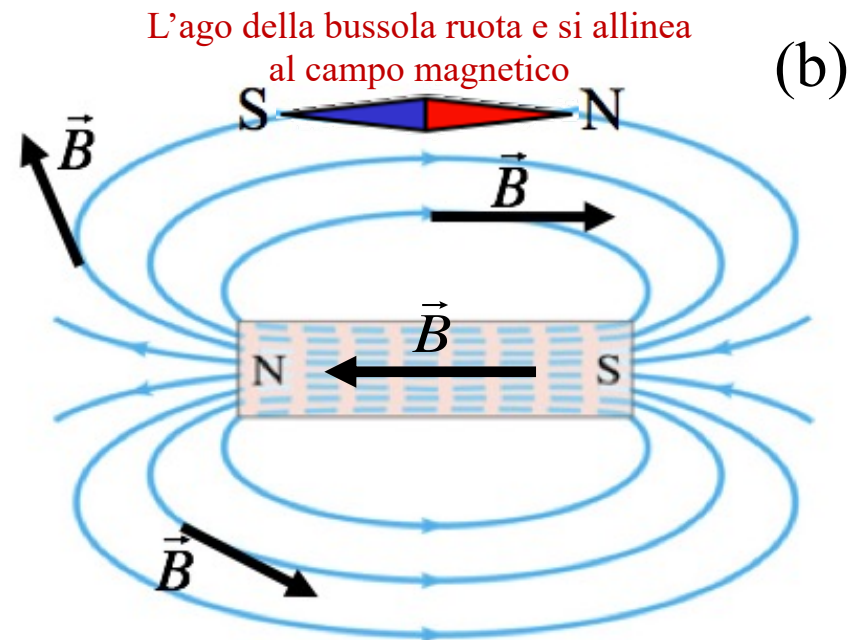
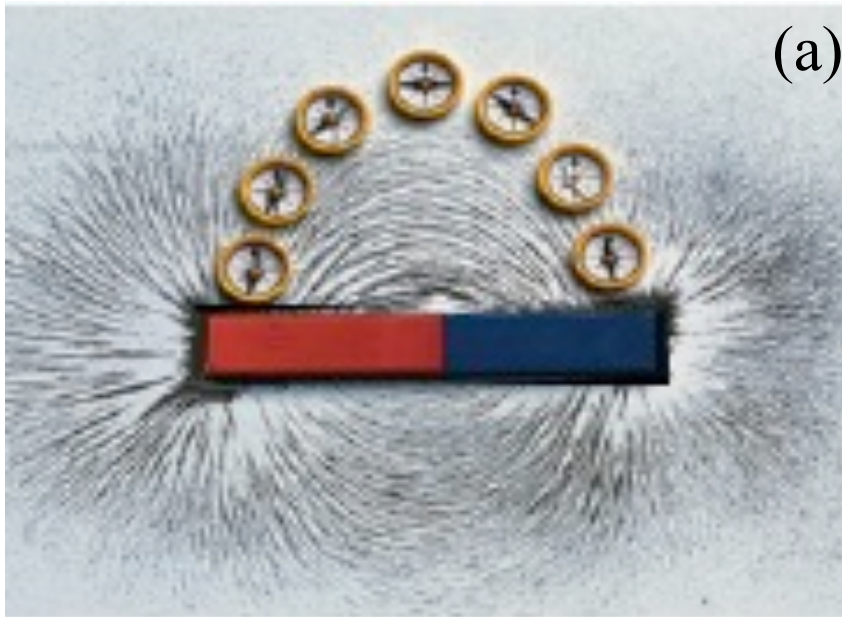
magnetino elementare



# Il Campo Magnetico

Per capire che aspetto hanno le **linee di campo magnetico attorno a un magnete** è conveniente utilizzare una **limatura di ferro**, fatta da minuscoli aghi magnetici, e alcune **bussole** poste nelle vicinanze (a). Applichiamo le seguenti regole: 1. Il **verso positivo** del campo in un punto è indicato per definizione dal polo nord dell'ago di una bussola posta in quel punto; 2. Il **polo nord** dell'ago di una bussola viene attratto dal **polo sud** di un magnete posto nelle vicinanze, e viceversa.

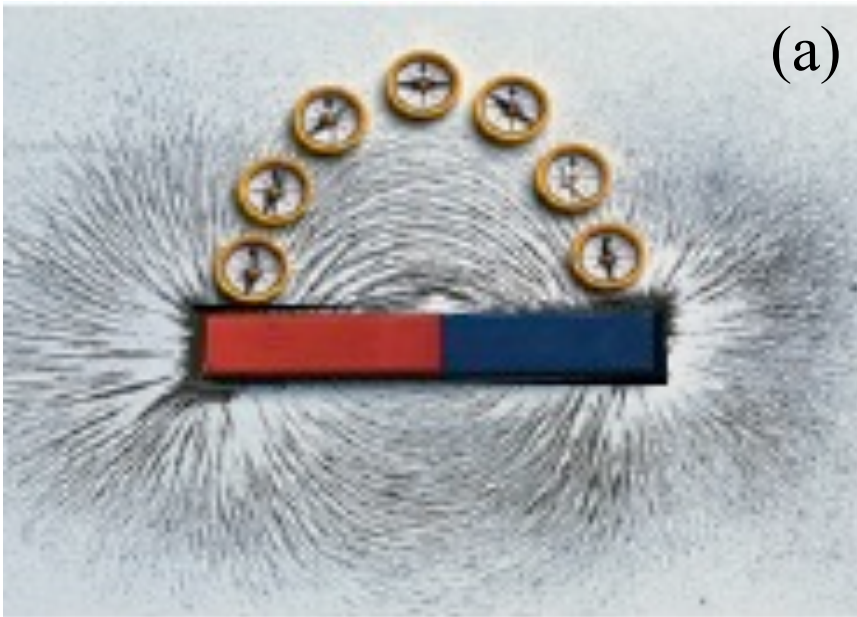
Dalla figura (a) deduciamo che linee di forza del campo magnetico risultano orientate in modo da essere sempre **uscenti dal polo nord ed entranti nel polo sud**, come mostrato in (b).



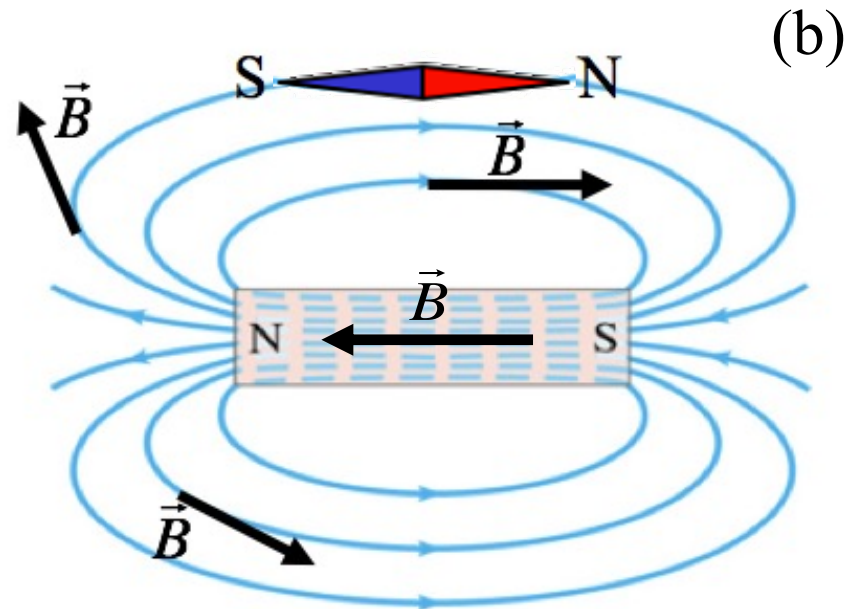
# Il Campo Magnetico

Per capire che aspetto hanno le **linee di campo magnetico attorno a un magnete** è conveniente utilizzare una **limatura di ferro**, fatta da minuscoli aghi magnetici, e alcune **bussole** poste nelle vicinanze (a). Applichiamo le seguenti regole: 1. Il **verso positivo** del campo in un punto è indicato per definizione dal polo nord dell'ago di una bussola posta in quel punto; 2. Il **polo nord** dell'ago di una bussola viene attratto dal **polo sud** di un magnete posto nelle vicinanze, e viceversa.

Dalla figura (a) deduciamo che linee di forza del campo magnetico risultano orientate in modo da essere sempre **uscenti dal polo nord ed entranti nel polo sud**, come mostrato in (b). Inoltre le linee di campo continuano il loro percorso anche **dentro il magnete**, generando un campo magnetico interno: infatti, a causa dell'assenza di monopoli magnetici **le linee di forza magnetiche devono essere chiuse**, a differenza di quanto accade per le linee di forza del campo elettrico, che come sappiamo hanno origine sulle cariche positive (sorgenti) e terminano sulle cariche negative (pozzi).



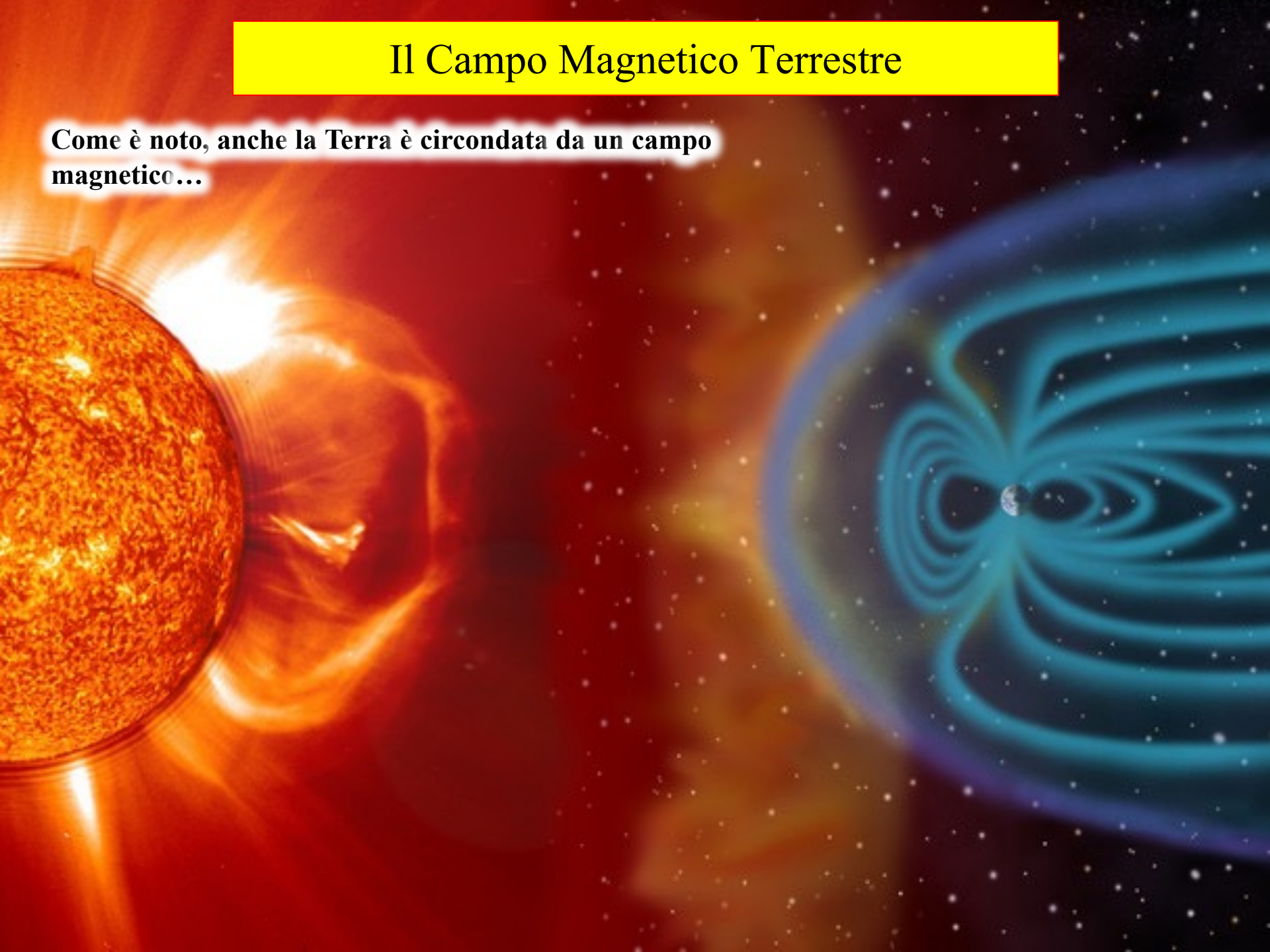
(a)



(b)

# Il Campo Magnetico Terrestre

Come è noto, anche la Terra è circondata da un campo magnetico...

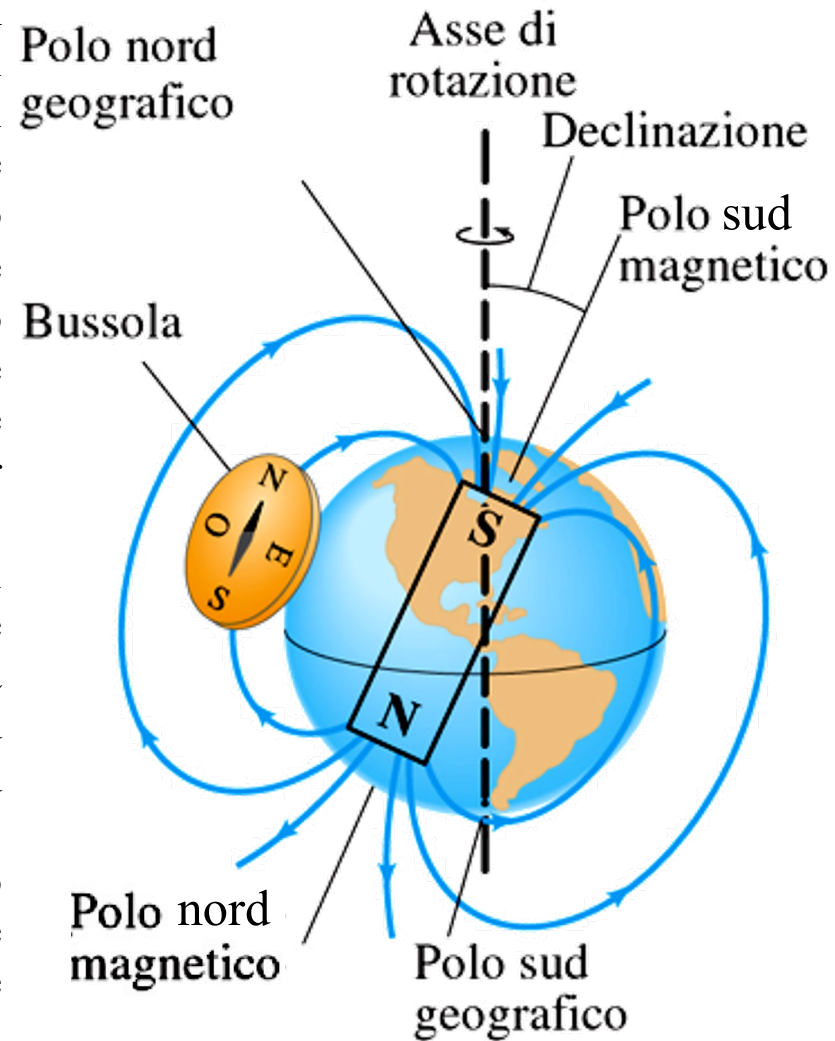




# Il Campo Magnetico Terrestre

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) e viceversa. Nonostante ciò, spesso il polo nord geografico terrestre viene chiamato anche polo nord magnetico, e lo stesso vale per il polo sud. Nel seguito faremo anche noi così.

E' da notare che **i poli magnetici non coincidono con quelli geografici**: ad esempio, il polo sud magnetico è stato originariamente individuato da un punto della calotta artica canadese posto a circa 900 km dal polo nord geografico. Questa differenza angolare tra il nord geografico e magnetico è detta **declinazione magnetica**. Inoltre, come si vede anche dalla figura, le linee di campo magnetico non sono sempre parallele alla superficie terrestre: l'angolo formato dalla loro direzione e l'orizzontale è detto **inclinazione magnetica**.



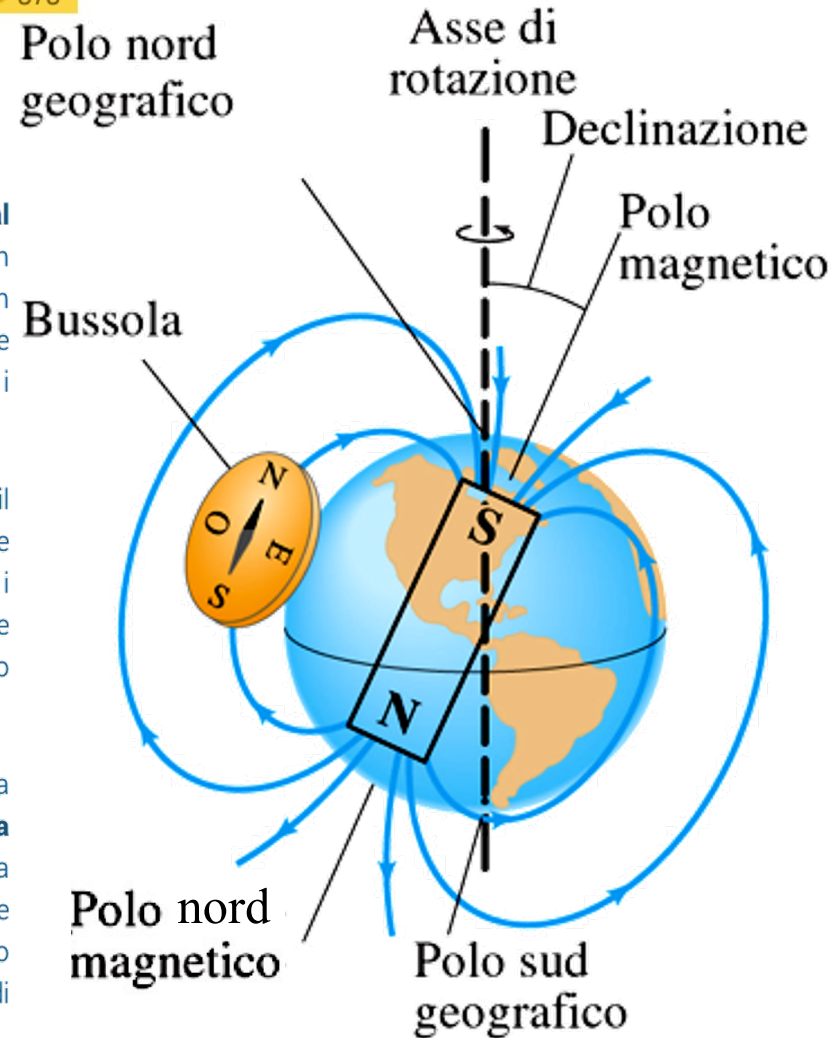
# Il polo nord magnetico della Terra si sta spostando molto rapidamente

15 Gennaio 2019 373

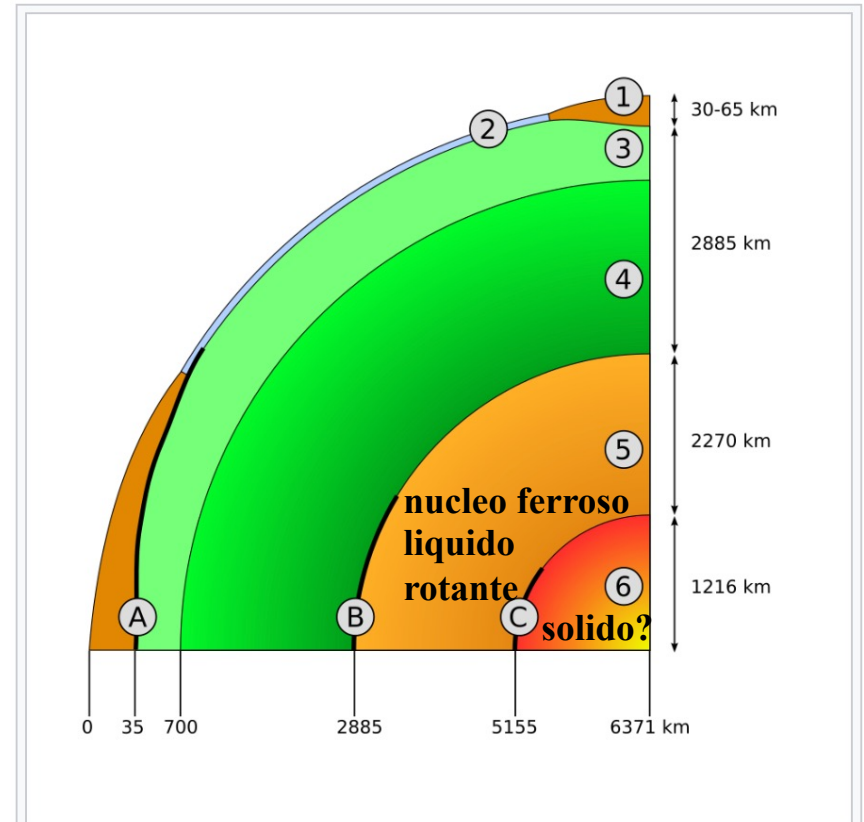
**Il polo nord magnetico della Terra si sta spostando rapidamente, allontanandosi dal Canada per avvicinarsi invece alla Siberia.** A darne notizia è stato, negli scorsi giorni, un articolo su *Nature*. Il fatto, le cui cause sono ancora tutte da approfondire, rappresenta un problema di notevole portata, al punto che gli esperti di geomagnetismo saranno a breve costretti ad aggiornare il **modello magnetico mondiale**, che funge da riferimento per tutti i sistemi di posizionamento e navigazione moderni, a partire dagli smartphone.

**Lo spostamento**, di per sé "fisiologico", è tuttavia **molto più rapido di quanto si pensasse**: il *modello magnetico mondiale* attuale, risalente al 2015, avrebbe dovuto rimanere in vigore fino al 2020, ma la velocità del fenomeno - che probabilmente vede come concausa i **movimenti del nucleo ferroso liquido del nostro pianeta** - ha spinto gli esperti ad aggiornare parzialmente i dati in anticipo, in vista dell'aggiornamento vero e proprio previsto per l'anno prossimo.

Non è la prima volta che il polo magnetico si sposta più velocemente del dovuto: la sua velocità è progressivamente aumentata a partire dagli anni '90 del XX secolo, passando **da 15 km a 55 km all'anno**; nel 2016, inoltre, parte del campo magnetico terrestre ha temporaneamente accelerato il proprio moto nella zona compresa tra il Sudamerica e l'Oceano Pacifico. E proprio questo spostamento, intervenuto a ridosso dell'aggiornamento del modello magnetico mondiale del 2015, ha contribuito ad "abbreviarne" il periodo di validità.



**Ma l'importante è che il nucleo ferroso non si fermi e che il campo magnetico non scompaia...;-)**



Struttura schematica della Terra 1. crosta terrestre - 2. crosta oceanica - 3. mantello superiore - 4. mantello inferiore - 5. nucleo esterno - 6. nucleo interno - A: discontinuità di Mohorovičić - B: discontinuità di Gutenberg - C: discontinuità di Lehmann

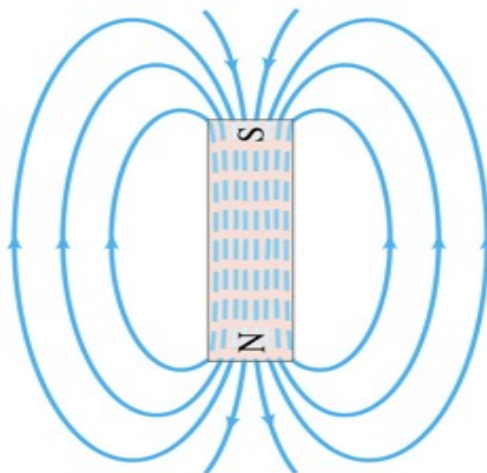
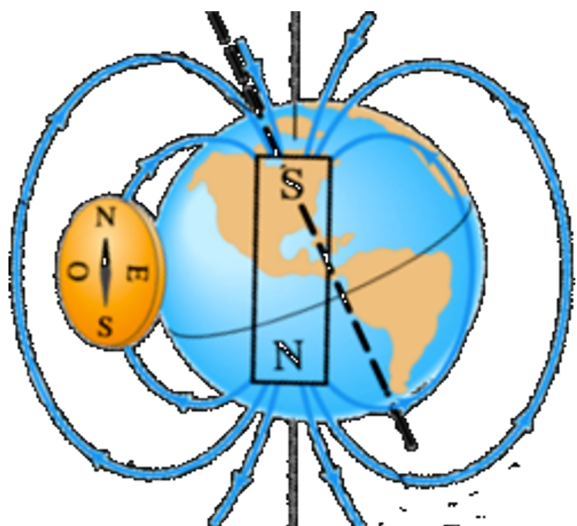


# Unità di misura del Campo Magnetico

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  $1\text{T} = 1\text{N/A}\cdot\text{m}$ . 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)



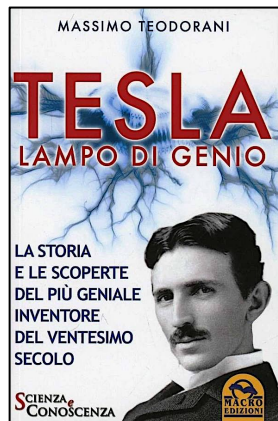
# Tesla, un genio incompreso...

HOME / HI-TECH

## L'ENERGIA CHE VIAGGIA NELL'ARIA

di **Enzo Sossi**

09 gennaio 2026



Negli hangar della **periferia di Helsinki**, in Finlandia, degli ingegneri stanno sperimentando il nostro futuro. Fanno ricerca per trasmettere **l'elettricità alle case senza fili ma in wireless**. Un passo enorme verso un domani migliore per il mondo e tutti noi.

**Nikola Tesla** fu il primo "visionario", che all'inizio del **XX secolo** sognava un mondo in cui torri gigantesche erano in grado di trasmettere elettricità a case, fabbriche e città intere. La **famosa torre di Wardenclyffe**, mai completata, era il simbolo di un progetto forse troppo ambizioso per l'epoca, ma già in linea con ciò che i ricercatori finlandesi stanno facendo oggi.

Tesla immaginava un pianeta avvolto in un - oceano di energia - accessibile a tutti, un po' come oggi abbiamo il Wi-Fi. Gli **scienziati finlandesi** non puntano a coprire il mondo intero, ma a creare **aree mirate** in cui l'energia può essere trasferita senza contatto fisico.

<https://opinione.it/hi-tech/2026/01/09/enzo-sossi-energia-che-viaggia-nel-aria/>

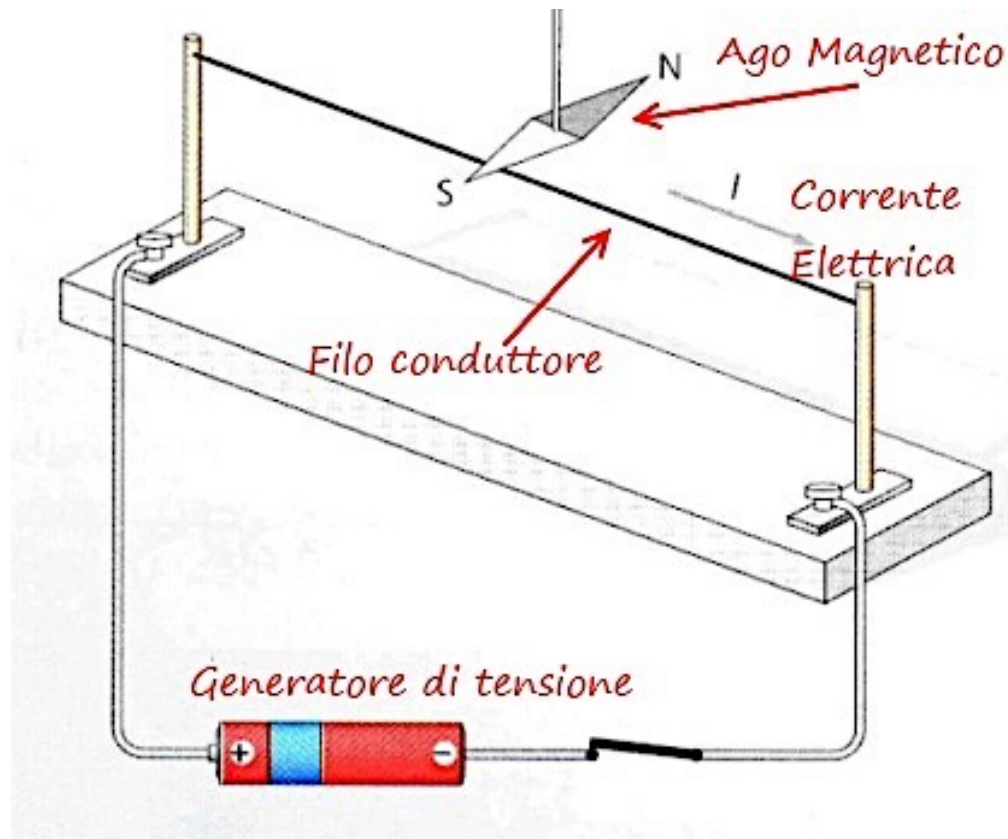
<https://www.youtube.com/watch?v=DjoHw8Wji5o>

# Legami tra Elettricità e Magnetismo

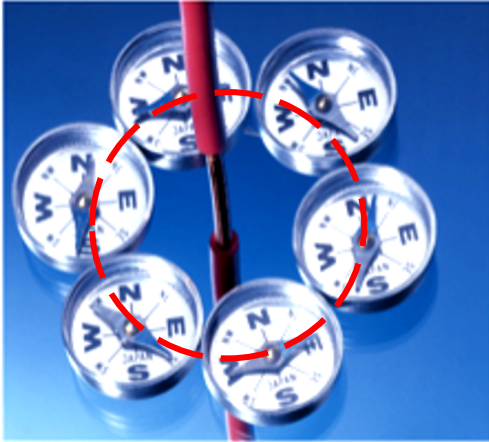
Già nel corso del XVIII secolo gli scienziati sospettavano che vi fosse un legame tra elettricità e magnetismo ma gli esperimenti con cariche elettriche statiche non avevano avuto alcun successo. Fu solo **nel 1820** che il fisico danese **Christian Oersted** scoprì per caso che una bussola posta nei 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)

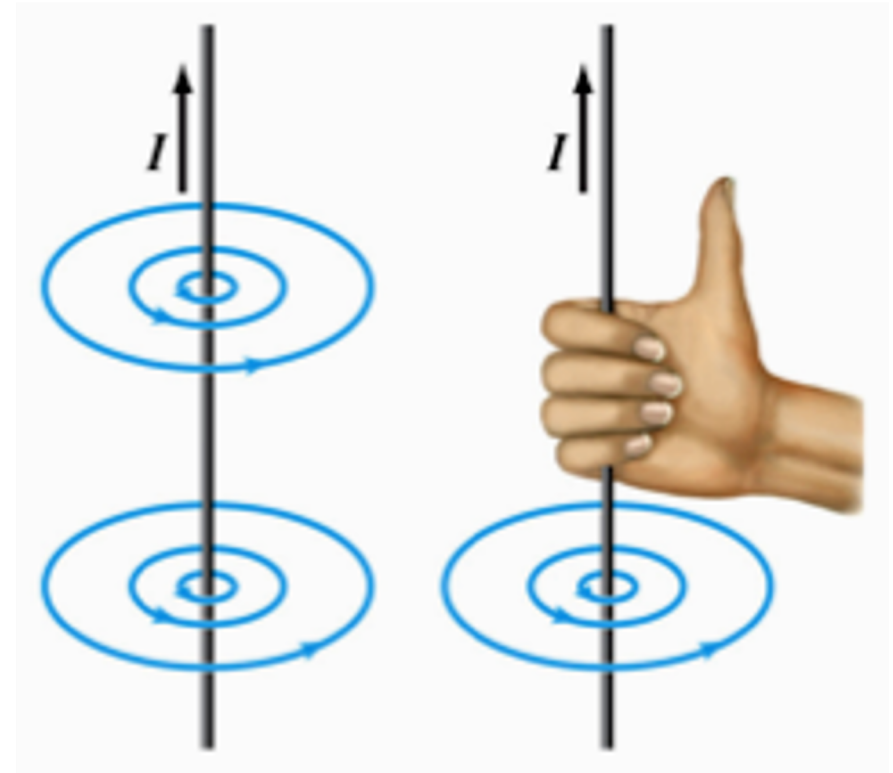


# Campi Magnetici prodotti da Correnti Elettriche



Se delle bussole vengono poste nei pressi di un **filo rettilineo molto lungo percorso da una corrente elettrica  $I$** , 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 il verso di rotazione (orario o antiorario) del campo magnetico non uniforme prodotto dal filo.

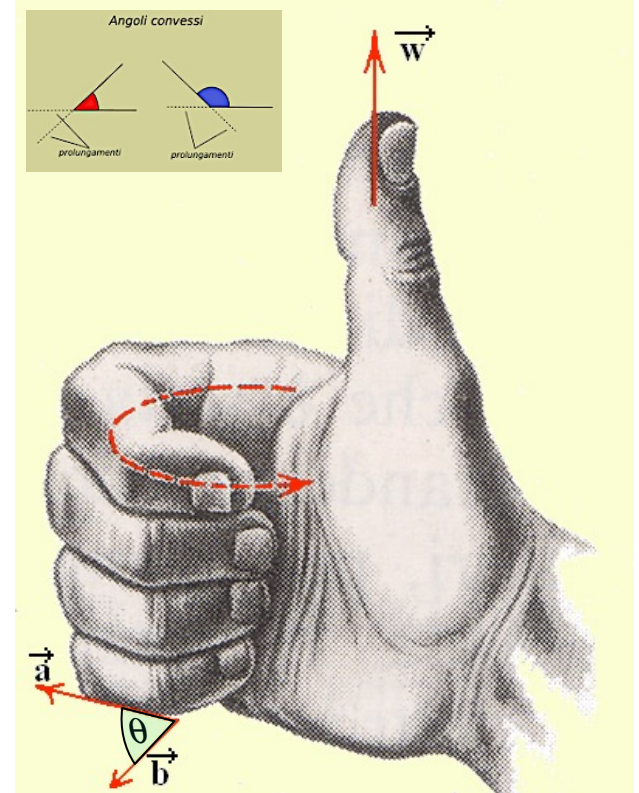




# Il Prodotto Vettoriale

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 **direzio**ne 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 ( $\theta < 180^\circ$ ) 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  $\vec{b}$ .

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



Proprietà del prodotto vettoriale:

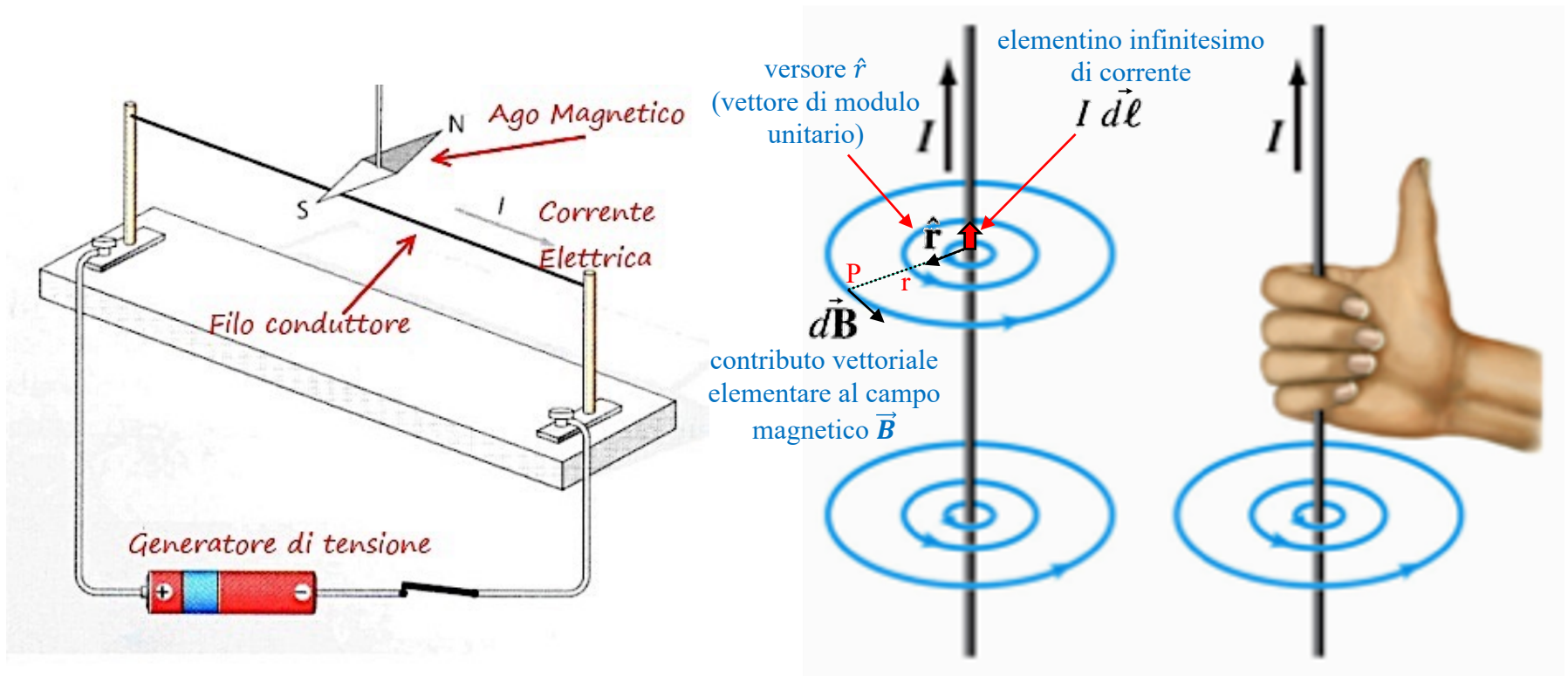
- 1) Il prodotto vettoriale è **anticommutativo**:  $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$
- 2) Il prodotto vettoriale è **massimo** quando i vettori  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  sono **perpendicolari** ( $\theta = 90^\circ \rightarrow \sin \theta = 1$ ) ed è **uguale a zero** quando i due vettori sono paralleli ( $\theta = 0^\circ \rightarrow \sin \theta = 0$ ) o quando uno dei due vettori è nullo;

# Legge di Biot e Savart

Utilizzando il **prodotto vettoriale** è possibile calcolare qual è il **contributo elementare**  $d\vec{B}$  che un **elemento infinitesimo di corrente**  $I d\vec{\ell}$  che scorre in un filo elettrico apporta al campo magnetico complessivo che, come abbiamo visto, si crea attorno al filo stesso. Immediatamente dopo la scoperta di Oersted, infatti, i fisici francesi **Biot e Savart** trovarono che questo contributo elementare del campo magnetico, in un punto P posto alla **distanza**  $r$  dall'elemento infinitesimo di corrente, è dato dalla seguente legge (per certi versi simile a quella di Coulomb, ma anche alquanto diversa):

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

dove la costante  $\mu_0$  è la cosiddetta «*permeabilità magnetica del vuoto*» (analogo magnetico della costante dielettrica del vuoto  $\epsilon_0$ ) e vale:  $\mu_0 = 1.2566 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2}$

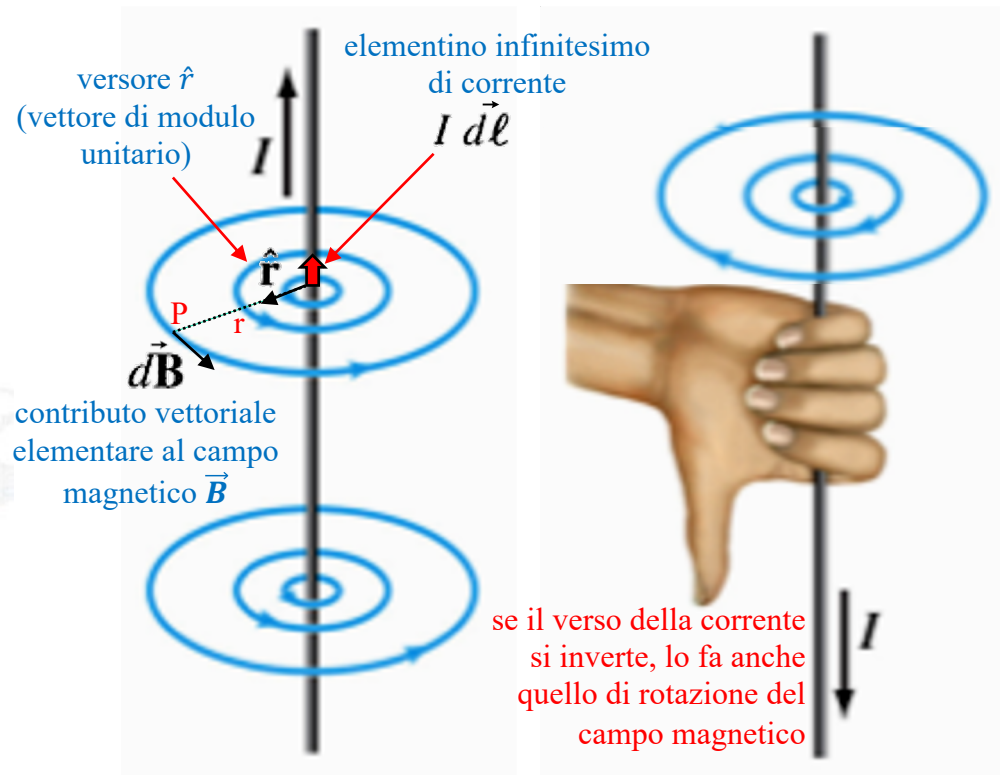
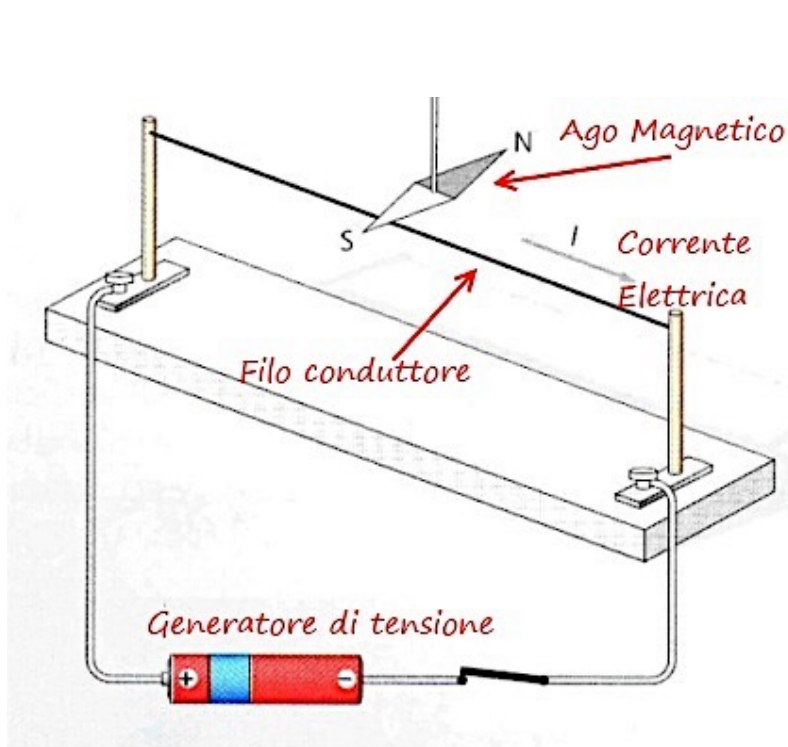


# Legge di Biot e Savart

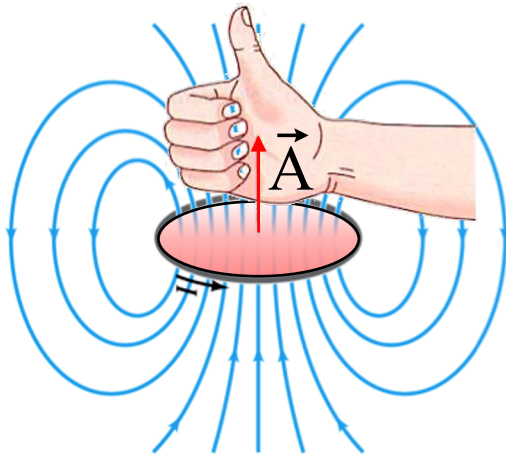
Utilizzando il **prodotto vettoriale** è possibile calcolare qual è il **contributo elementare**  $d\vec{B}$  che un **elemento infinitesimo di corrente**  $I d\vec{\ell}$  che scorre in un filo elettrico apporta al campo magnetico complessivo che, come abbiamo visto, si crea attorno al filo stesso. Immediatamente dopo la scoperta di Oersted, infatti, i fisici francesi **Biot e Savart** trovarono che questo contributo elementare del campo magnetico, in un punto P posto alla **distanza**  $r$  dall'elemento infinitesimo di corrente, è dato dalla seguente legge (per certi versi simile a quella di Coulomb, ma anche alquanto diversa):

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

dove la costante  $\mu_0$  è la cosiddetta «*permeabilità magnetica del vuoto*» (analogo magnetico della costante dielettrica del vuoto  $\epsilon_0$ ) e vale:  $\mu_0 = 1.2566 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2}$



# Il Momento Magnetico di una Spira

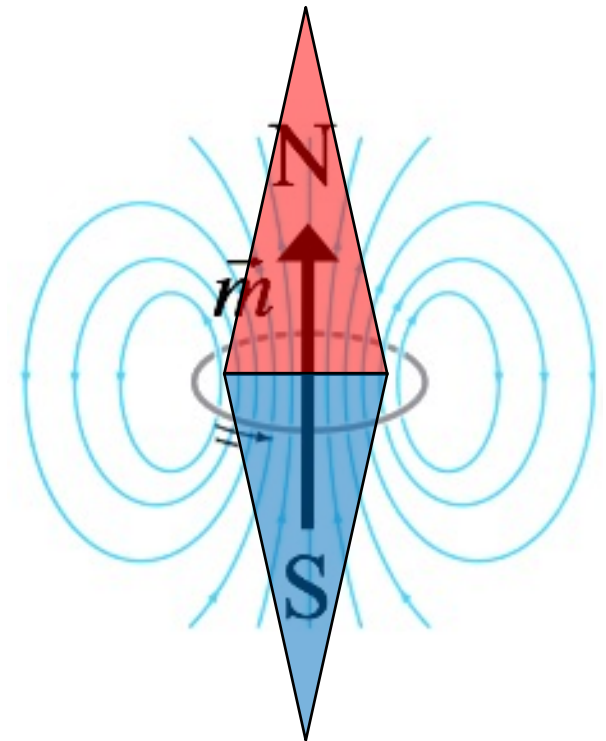


Con una bussola si può verificare che le linee di forza del campo magnetico prodotto dalla corrente  $I$  che fluisce in una **spira circolare di area  $A$**  sono quelle mostrate nella figura qui accanto: chiudendo le dita della mano destra lungo il verso di rotazione della corrente nella spira, il 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.

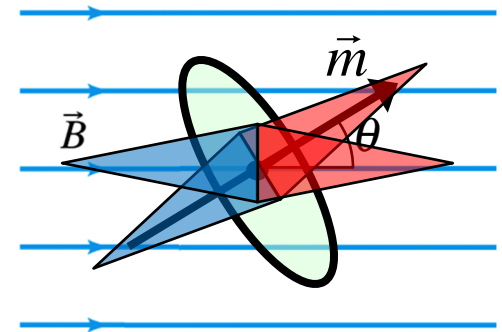


# Momento Torcente e Magnetismo nella Materia

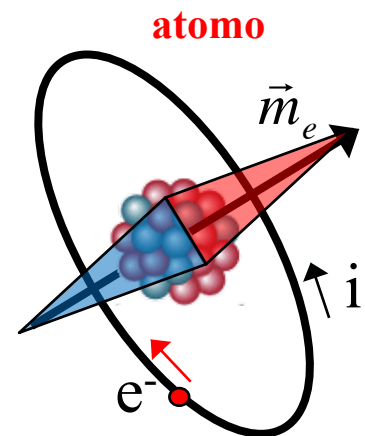
E' interessante osservare a questo punto che se una spira percorsa da corrente viene posta in un **campo magnetico uniforme**, essa subisce una forza (**momento torcente**)  $\vec{\tau}$  che tende a farla ruotare in modo da minimizzare l'angolo  $\theta$  tra il campo magnetico  $\vec{B}$  e il momento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

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

In altre parole la forza  $\vec{\tau}$  (di direzione 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!



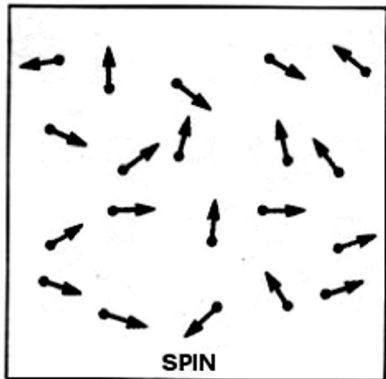
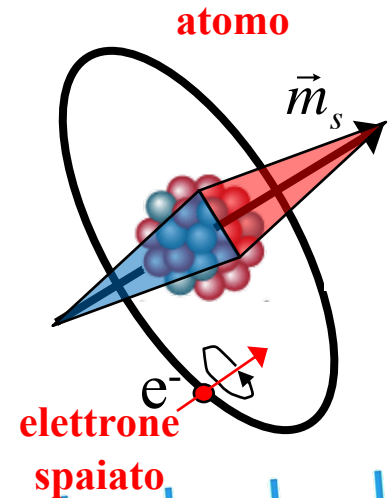
A questo punto diventa immediato comprendere da cosa ha origine il **magnetismo nella materia** e quali sono le sue proprietà. Infatti, da un punto di vista microscopico, è plausibile pensare che ogni atomo possieda delle proprietà magnetiche a causa del movimento degli elettroni intorno al nucleo, movimento che costituisce a tutti gli effetti una corrente: dunque **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!).





# Momento Torcente e 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.

