Fondamenti di fisica

Elettromagnetismo: 4

Magnetismo

Il campo magnetico

Forza magnetica su cariche in movimento

Traiettorie di particelle cariche in campo magnetico

Forza magnetica su fili percorsi da corrente

momento torcente magnetico

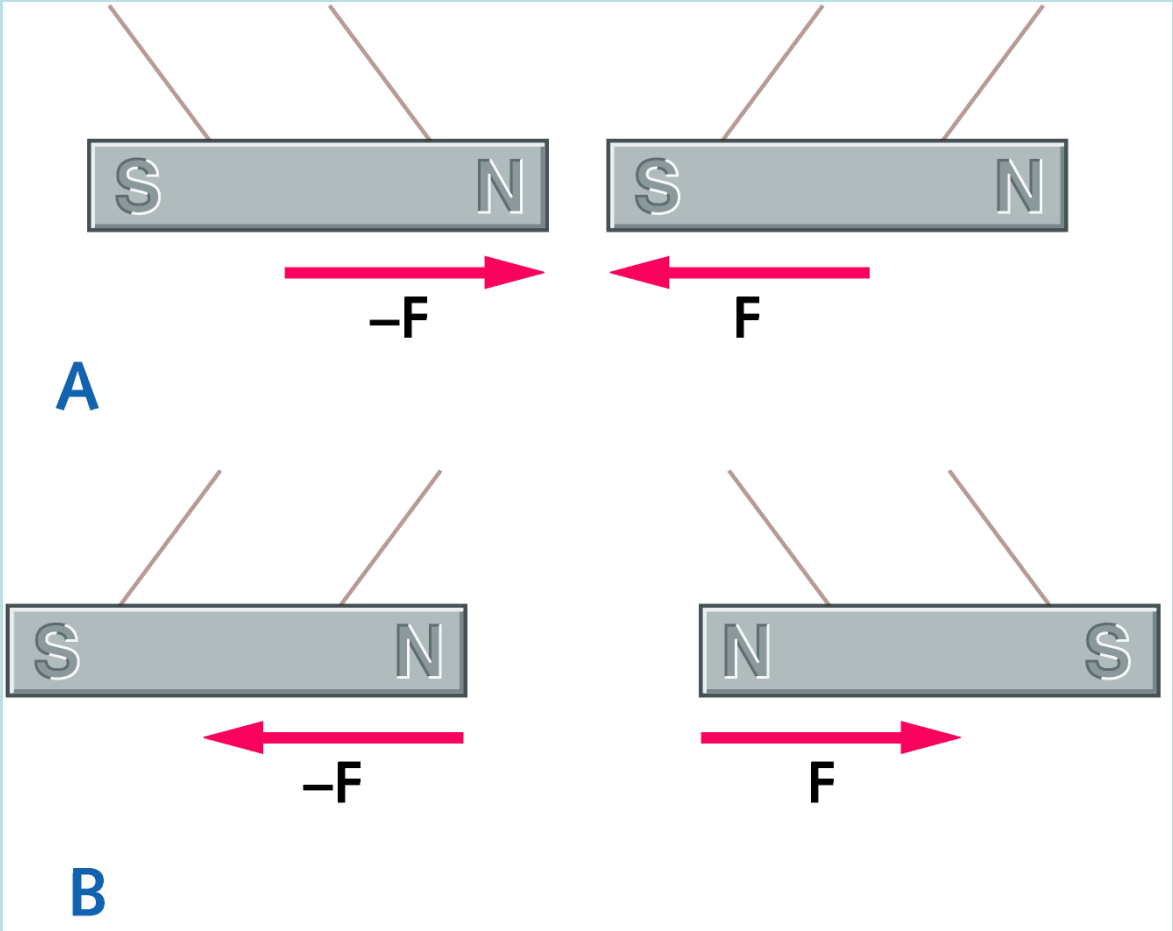
correnti elettriche e campi magnetici

la legge di Ampere

Spire e solenoidi

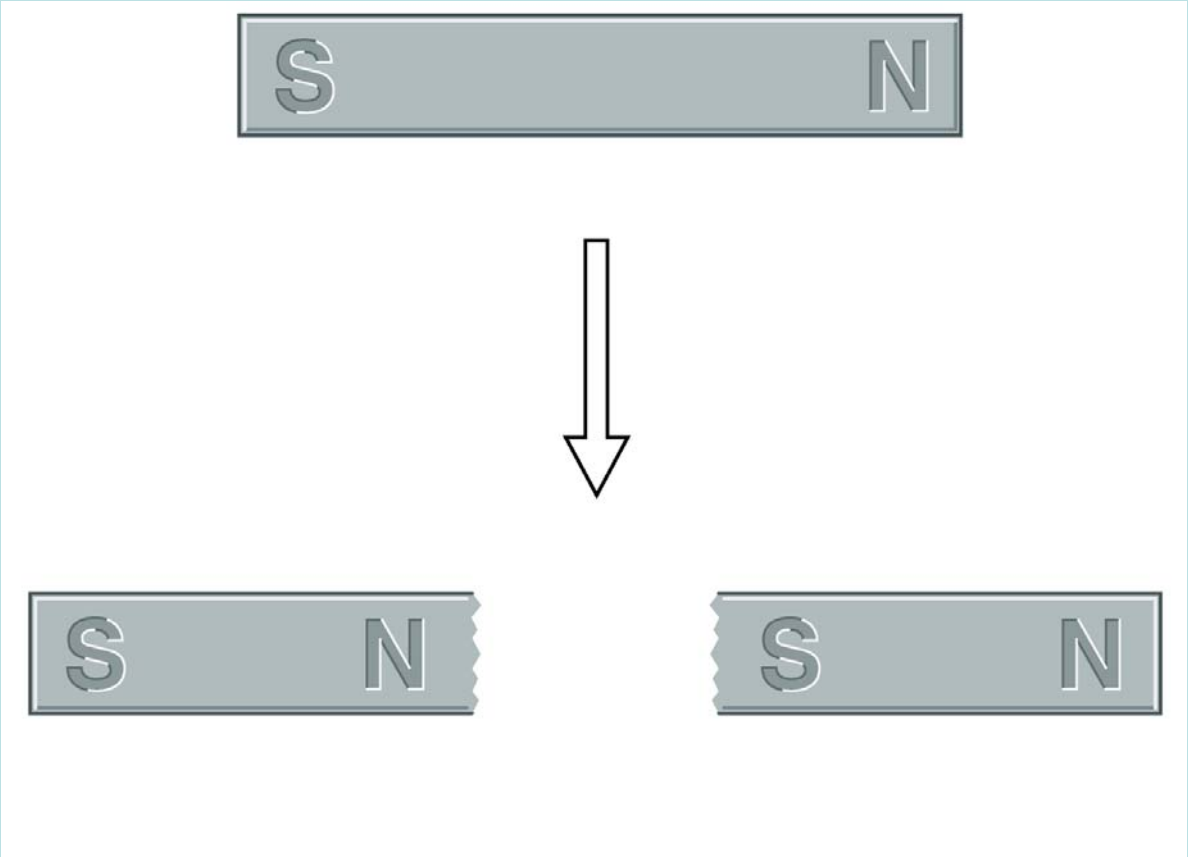
Il magnetismo nella materia

Interazione magnetica



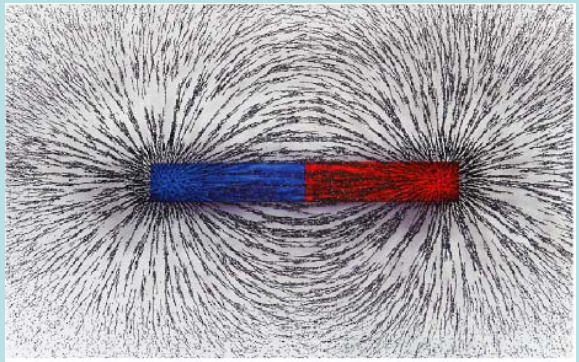
Magneti permanenti

Calamita spezzata …

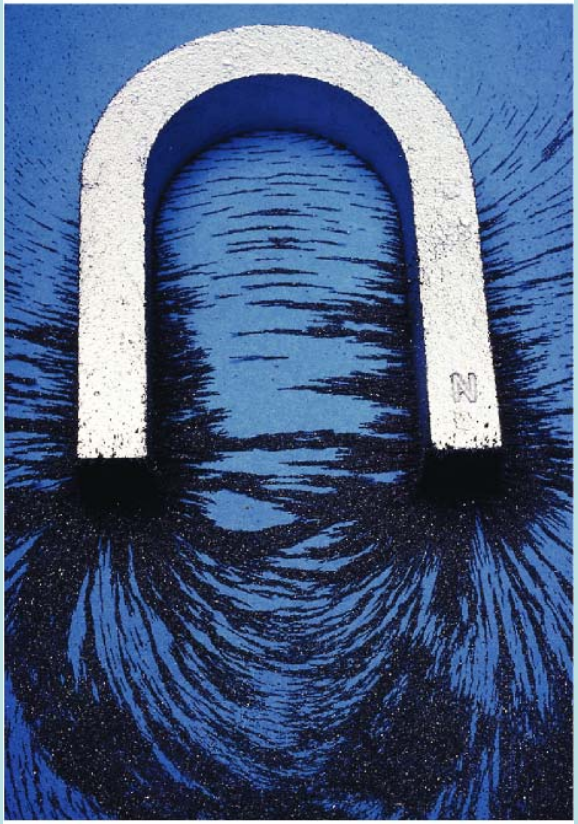


… i magneti hanno sempre **due *poli***

Il campo magnetico

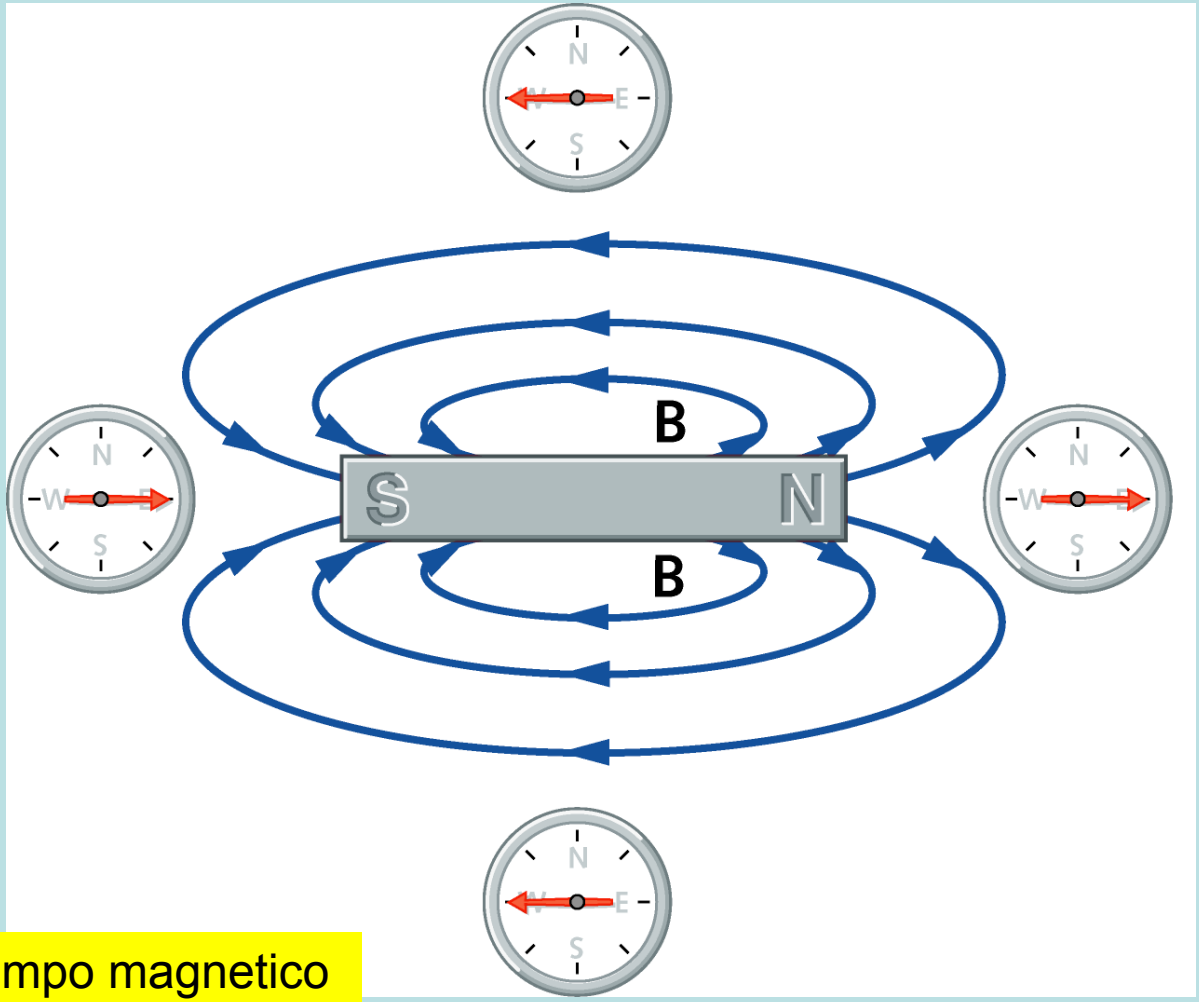


A



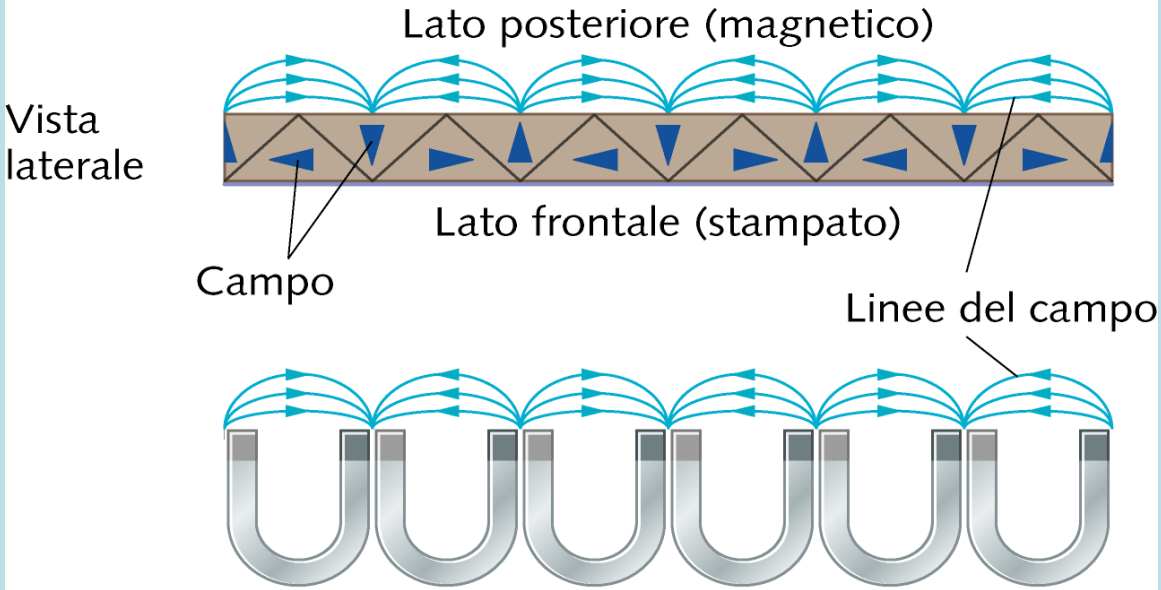
B

La direzione e il verso del campo magnetico **B** in un dato punto sono determinate dalla direzione e dal verso nei quali punta il polo nord dell'ago di una ***bussola*** posta in quel punto

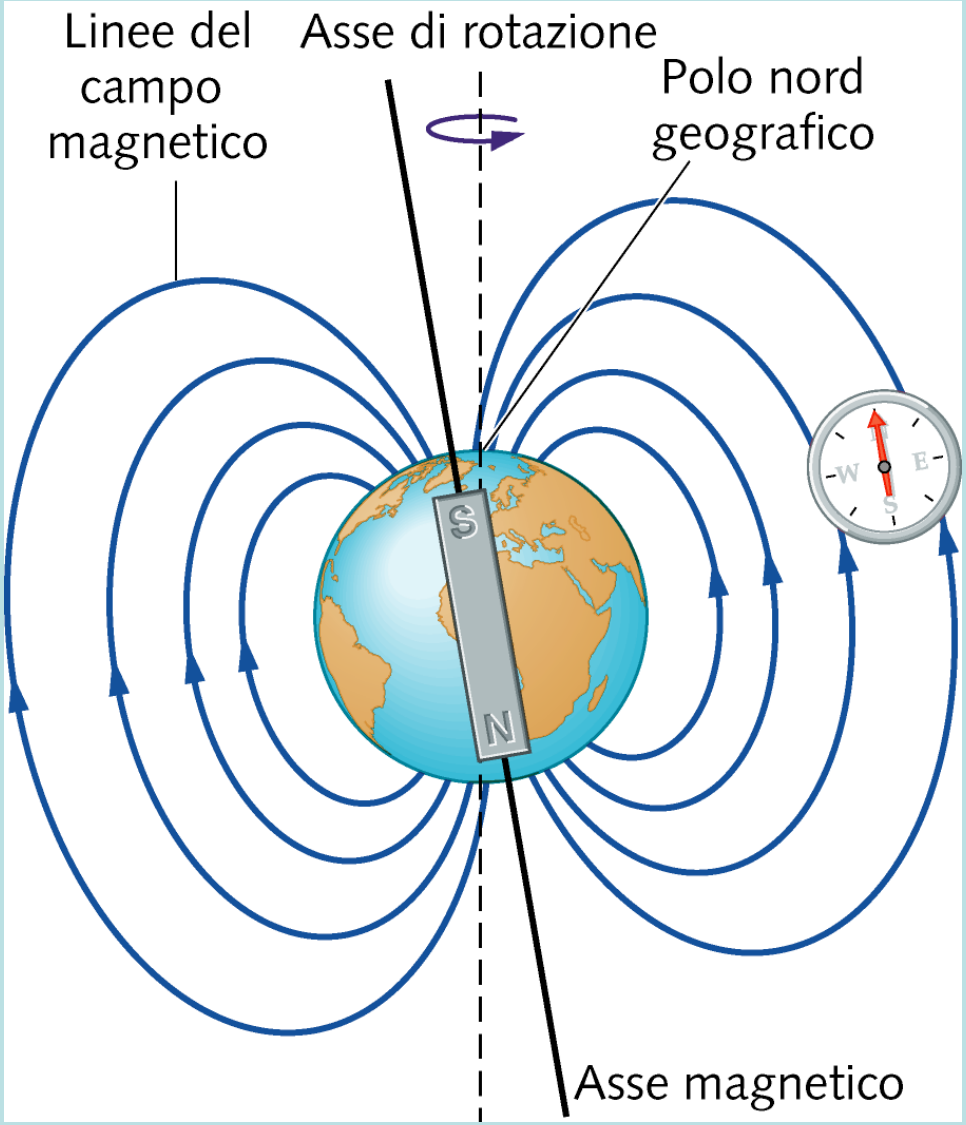


Linee del campo magnetico

Le linee del campo magnetico escono dal polo nord ed entrano nel polo sud di un magnete



Le linee del campo magnetico
sono più intense su un lato che sull'altro

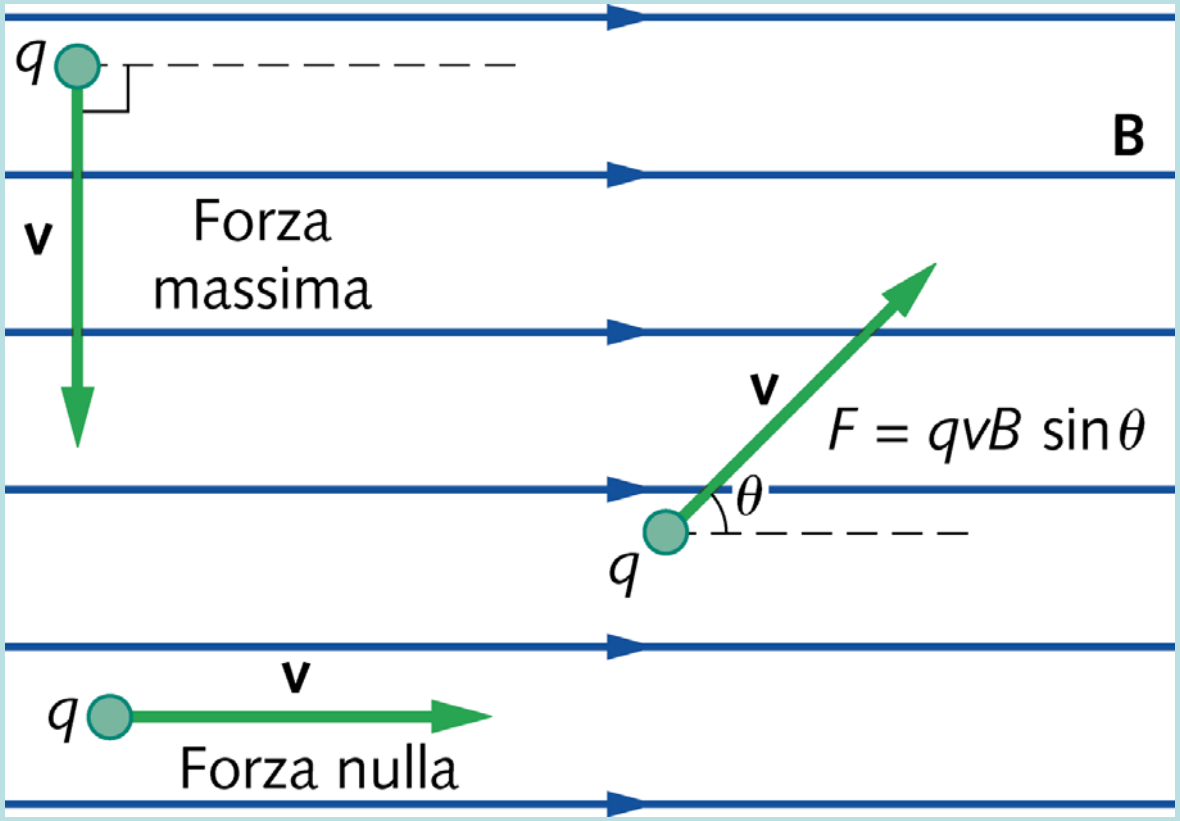


La terra è un grande magnete

Il polo nord geografico è in realtà vicino al polo sud magnetico

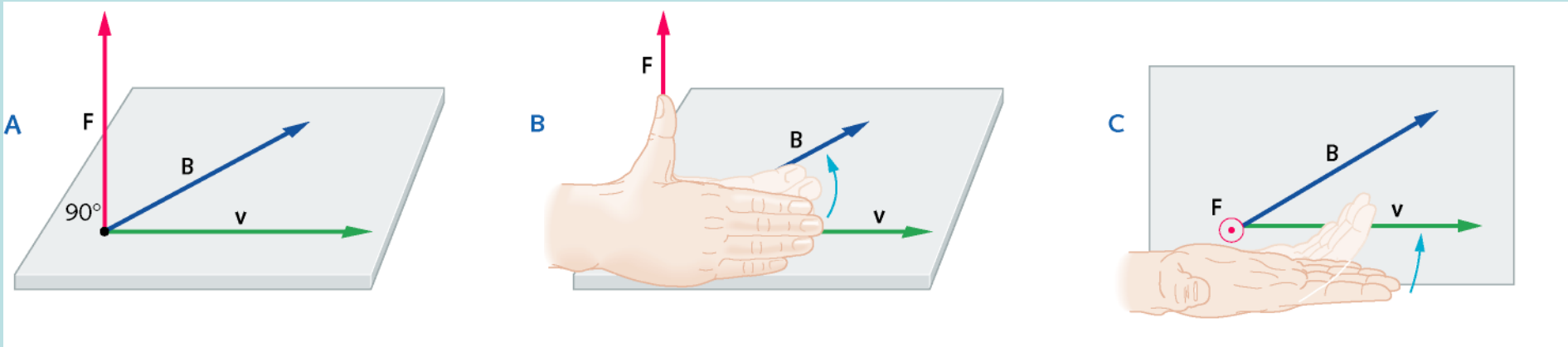
Forza magnetica su cariche in movimento

Sperimentalmente si osserva che …



$$F = q\,vB\sin\vartheta$$

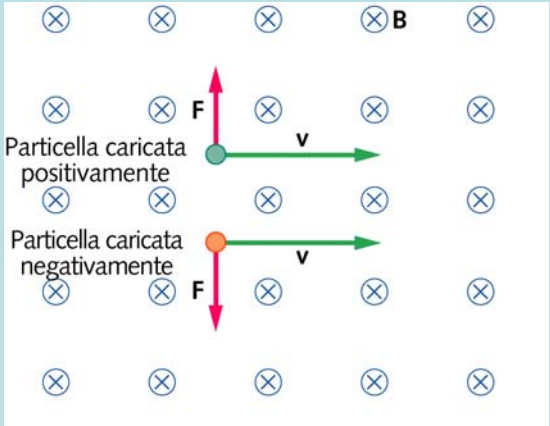
regola della mano destra

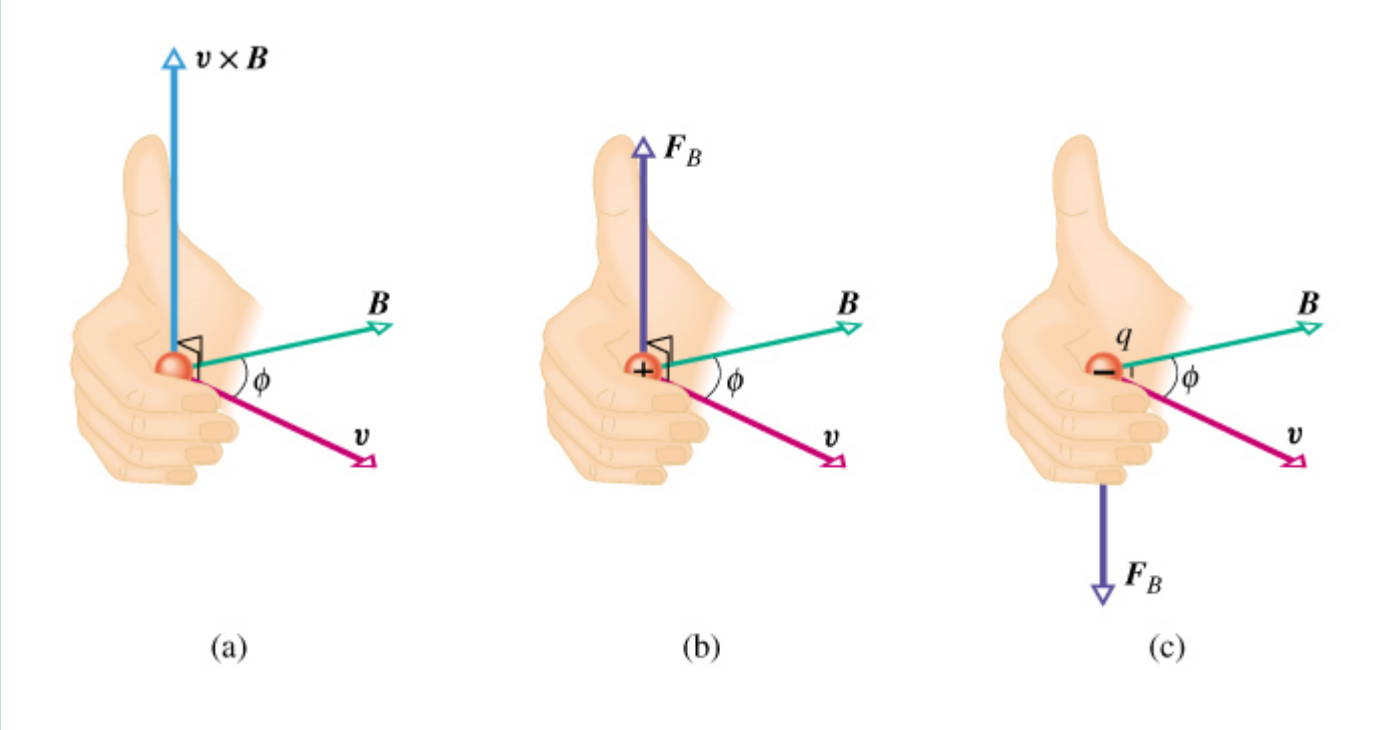


$$\mathbf{F} = q\ (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

La forza magnetica è sempre perpendicolare alla traiettoria

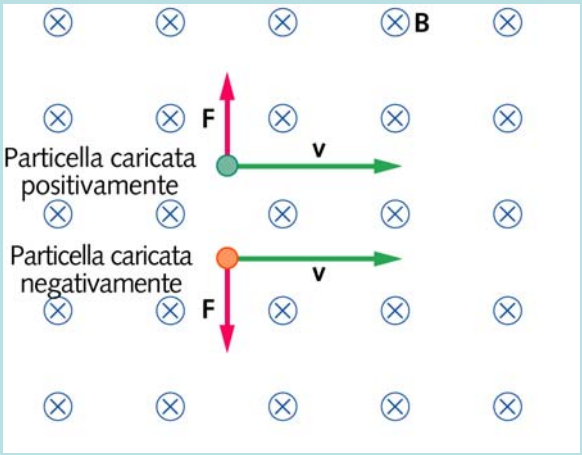
N.B. quindi **non** compie lavoro





e il verso dipende dal segno della carica in movimento

misura di B



$$B = F/(qv\sin\vartheta)$$

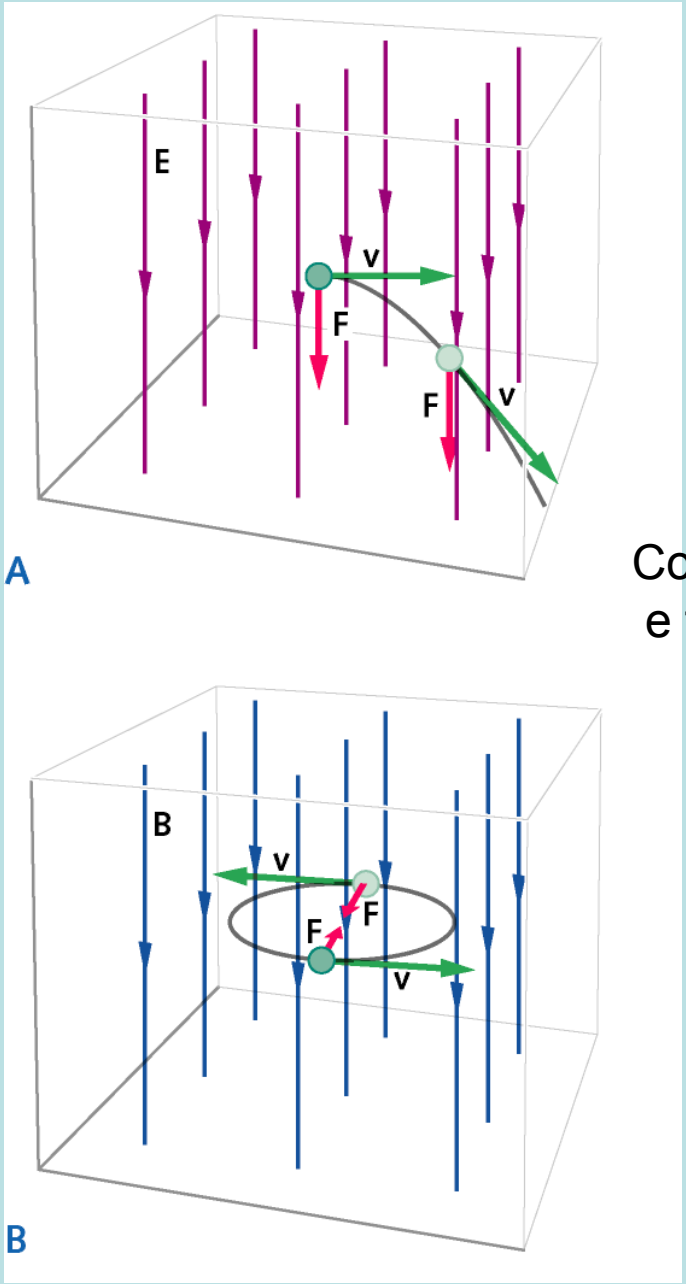
Sistema fisico	Campo magnetico (G)
Terra	0,50
Barra magnetica	100
Macchia solare	1000
MRI* a bassa intensità	2000
MRI ad alta intensità	15 000
Il più alto campo magnetico artificiale	$4 \cdot 10^5$
Magnetar (una stella di neutroni magnetica, formata dall'esplosione di una supernova)	10^5

* *Magnetic Resonance Imaging*, cioè formazione di immagini da risonanza magnetica.

Nel **Sistema Internazionale**
il campo magnetico si misura
in Newton/(ampere metro) **Tesla**

Una utile unità **cgs** è il **gauss**
1 gauss = 10^{-4} T

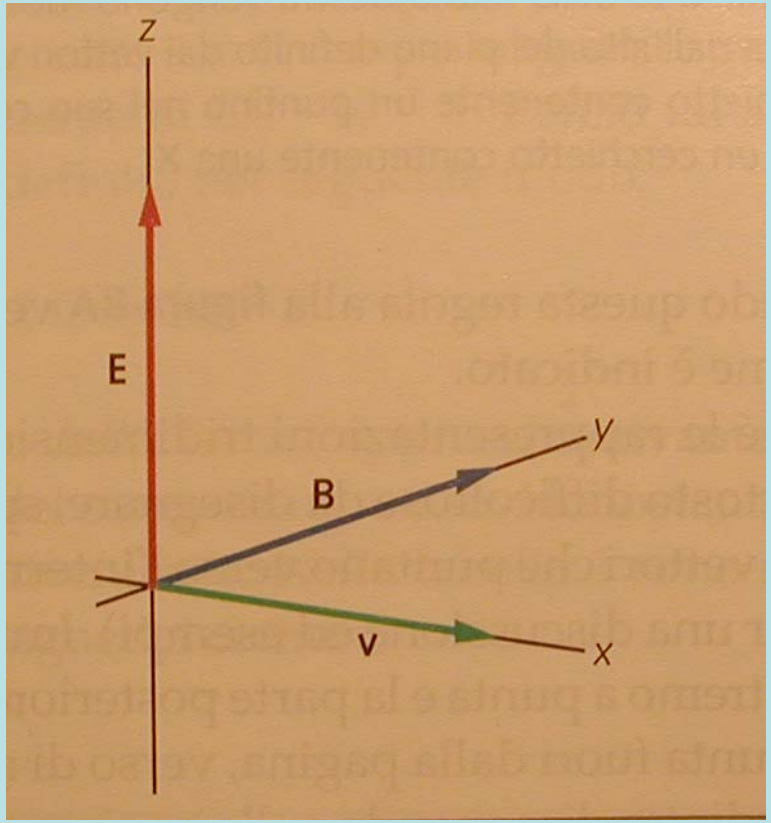
Moto di particelle cariche in campo magnetico



Confronto tra forze elettriche
e forze magnetiche

Campi incrociati

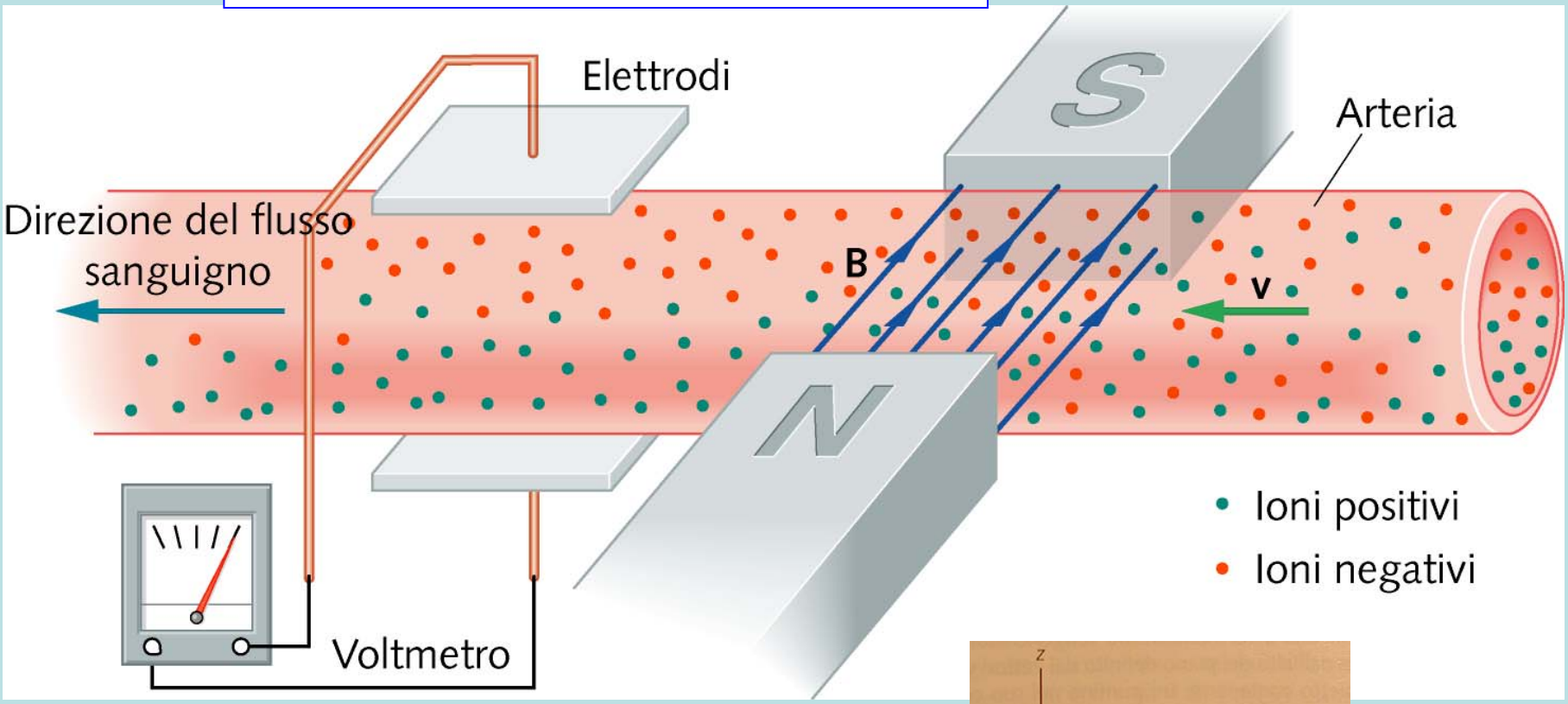
Discriminatore di velocità



$$qE = qvB$$

$$v = E/B$$

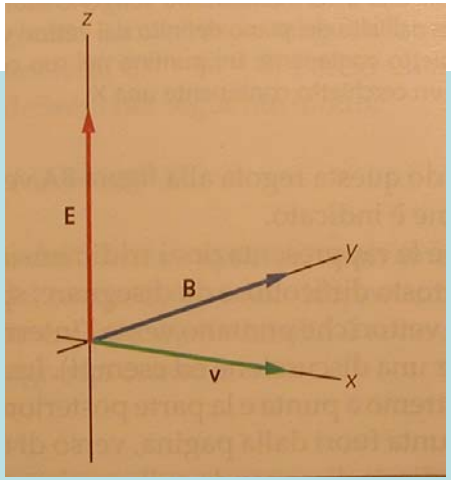
Flussometro elettromagnetico



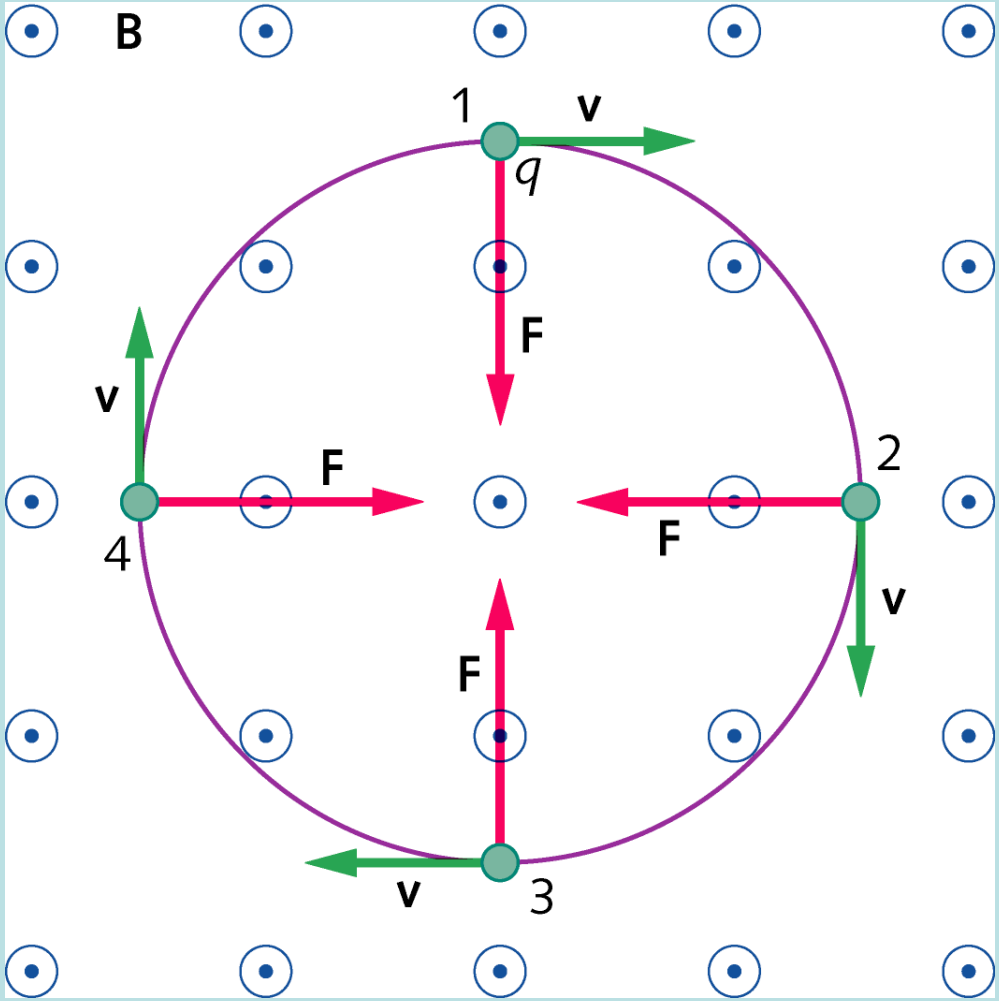
Misura della velocità del flusso sanguigno

$$qE = qvB$$

$$v = E/B$$



velocità perpendicolare a **B**

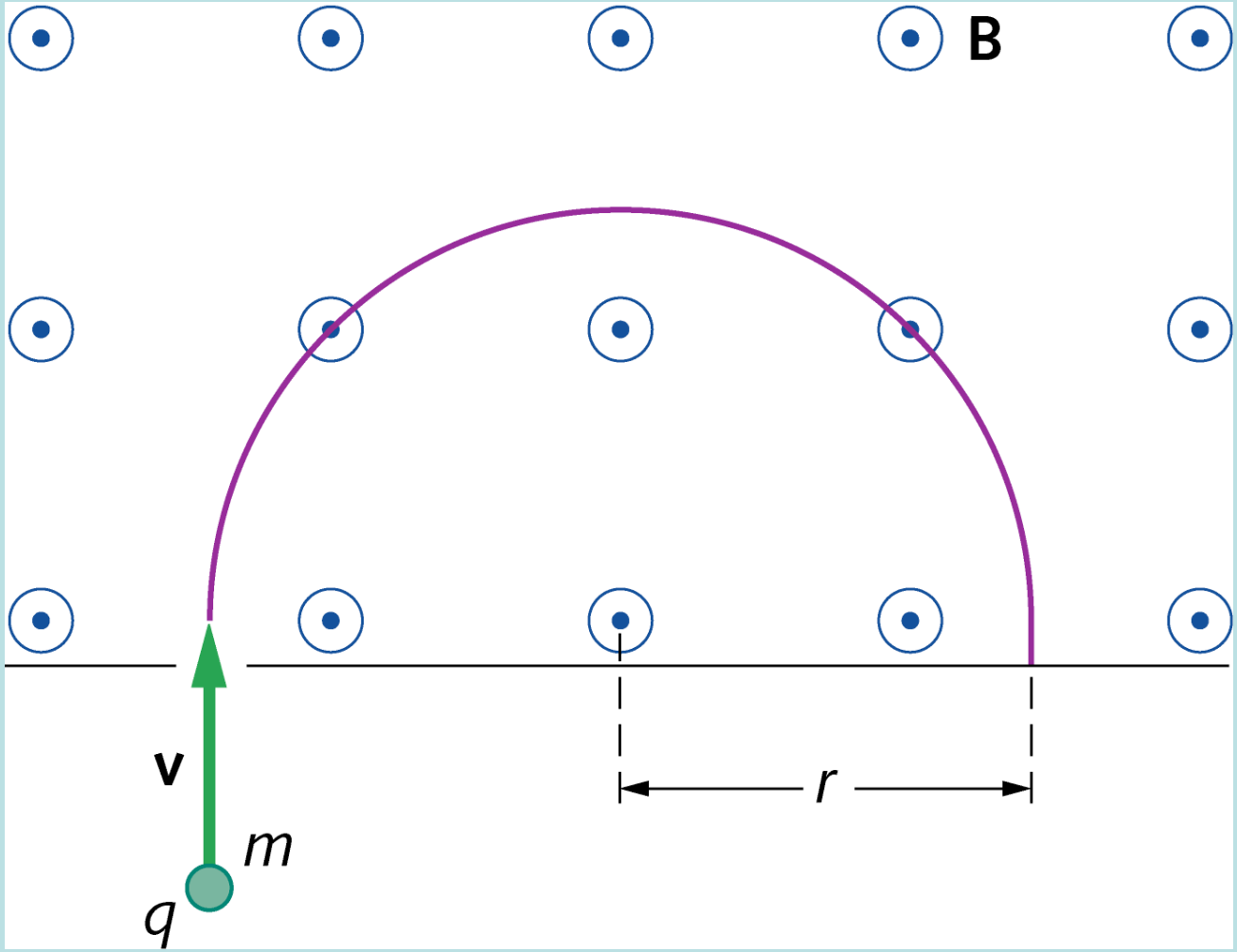


$$qvB = m\, a_{cp}$$

$$qvB = m\, v^2/r$$

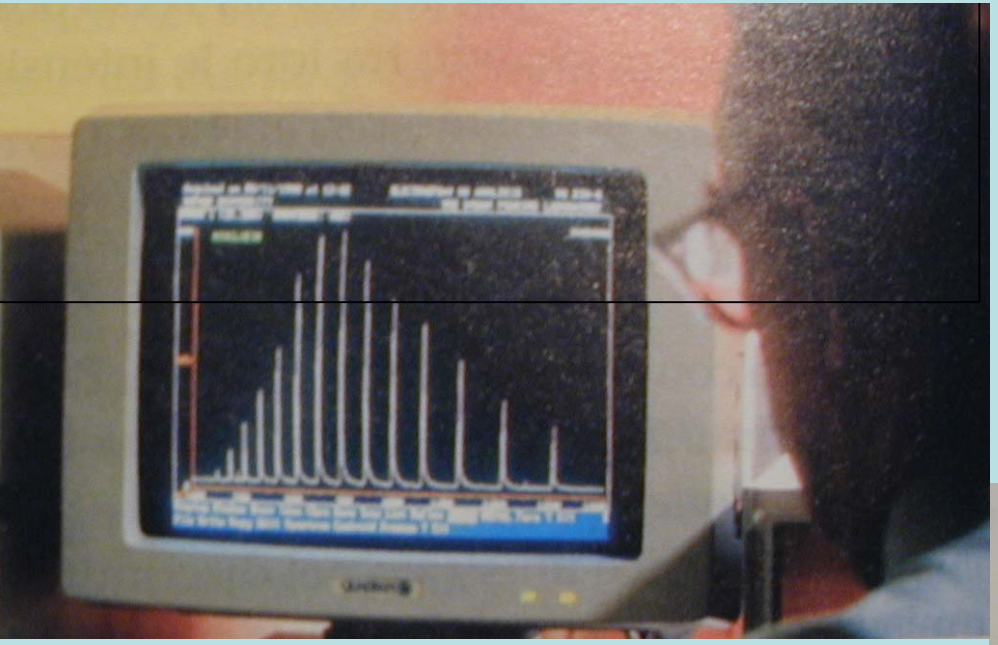
$$r = \frac{m\, v}{qB}$$

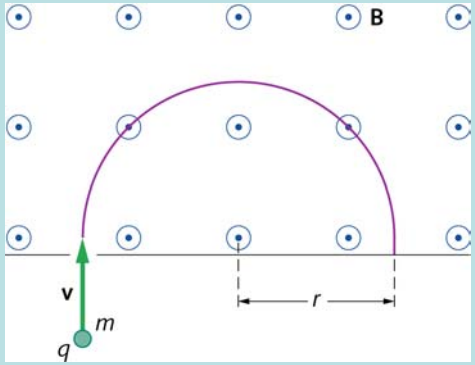
$$\boxed{\mathbf{F} = q\ (\mathbf{v} \times \mathbf{B})}$$



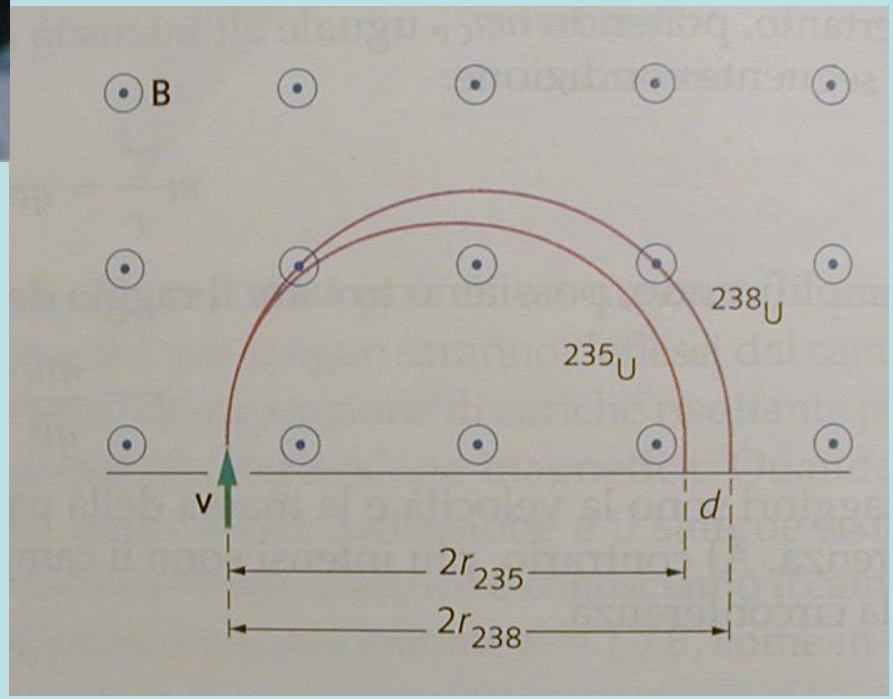
Spettrometro di massa

$$r = \frac{m\,v}{qB}$$

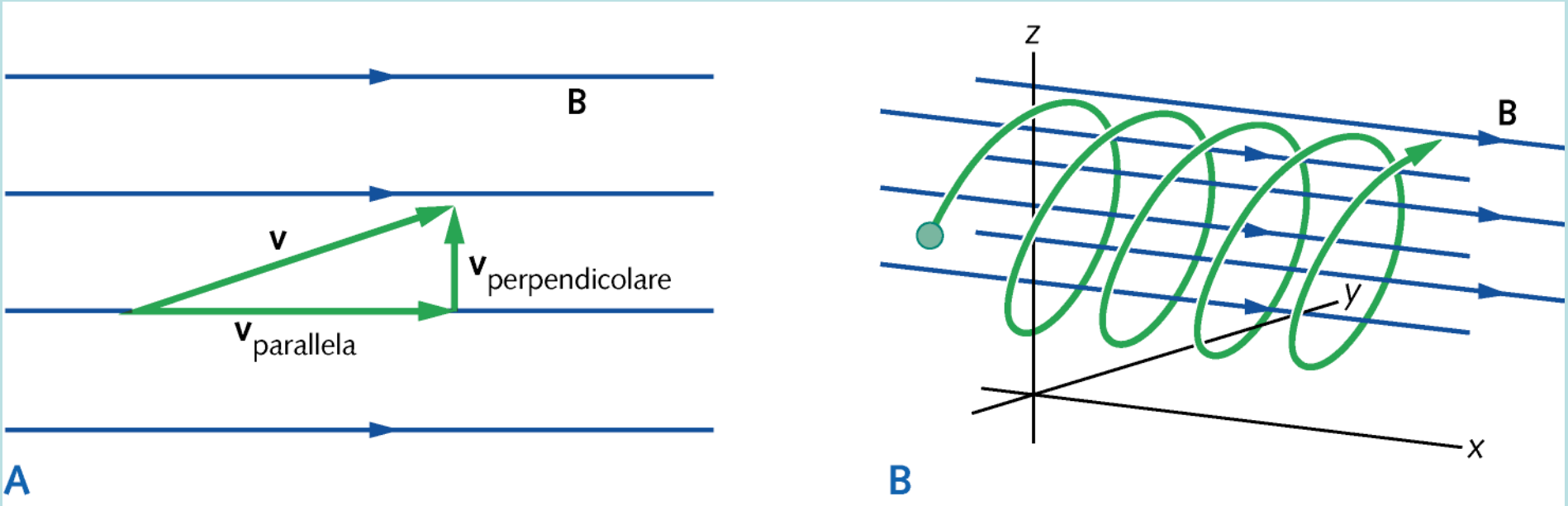




Spettrometro di massa

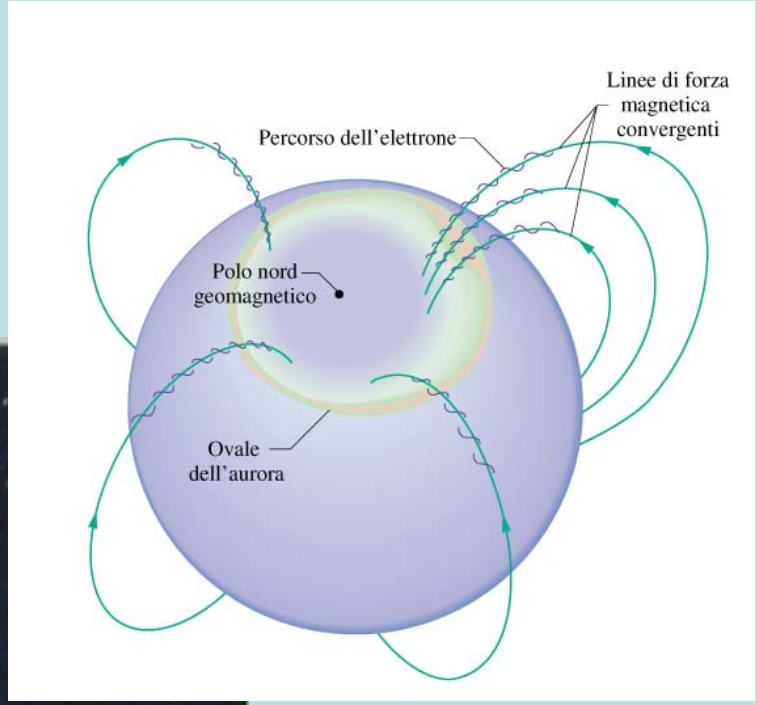


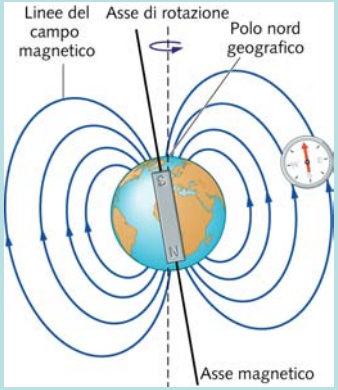
Moto con traiettoria elicoidale



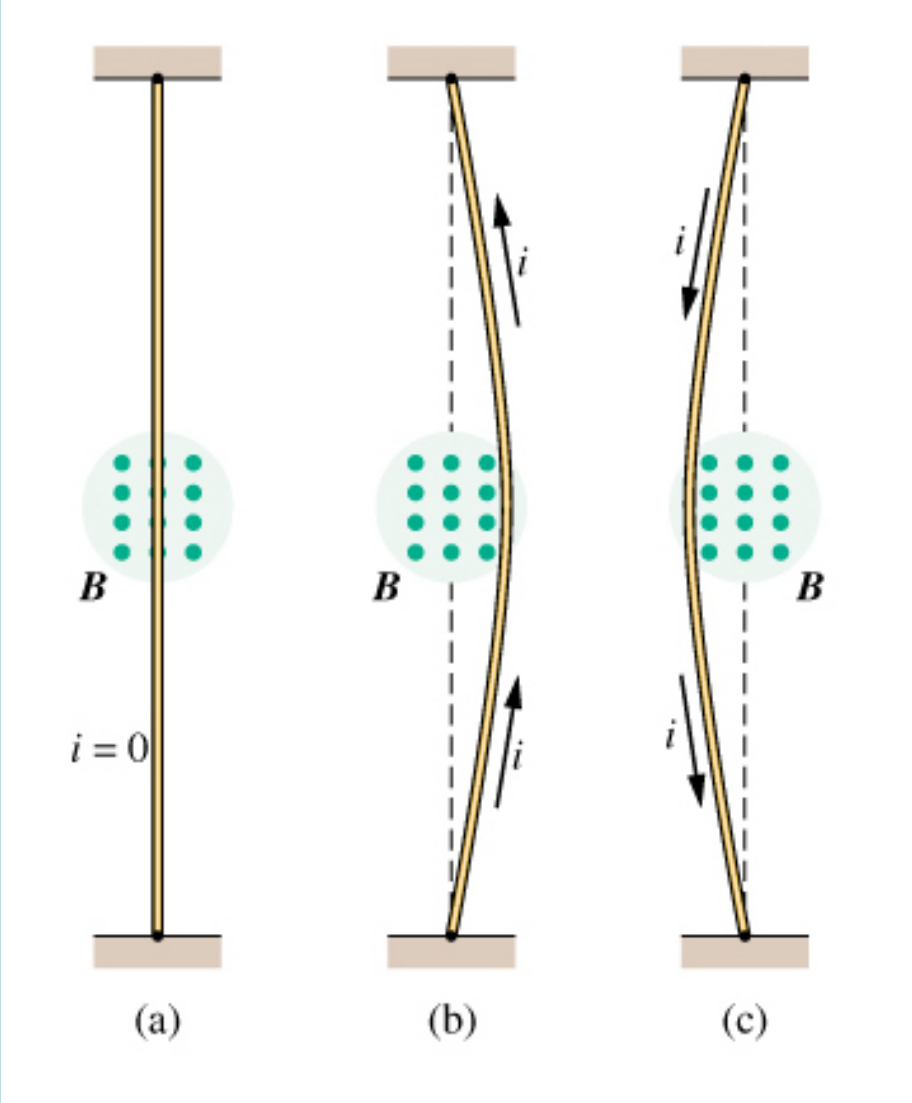
$$\mathbf{F} = q\ (\mathbf{v}_{\mathbf{perp.}} \times \mathbf{B})$$

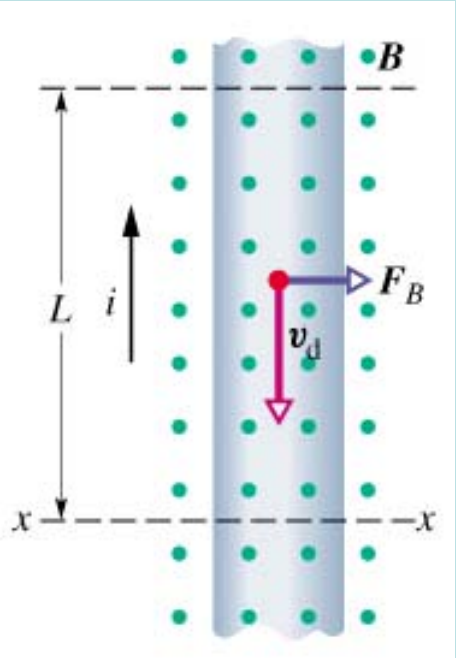
Aurora boreale





Forza magnetica su fili percorsi da corrente

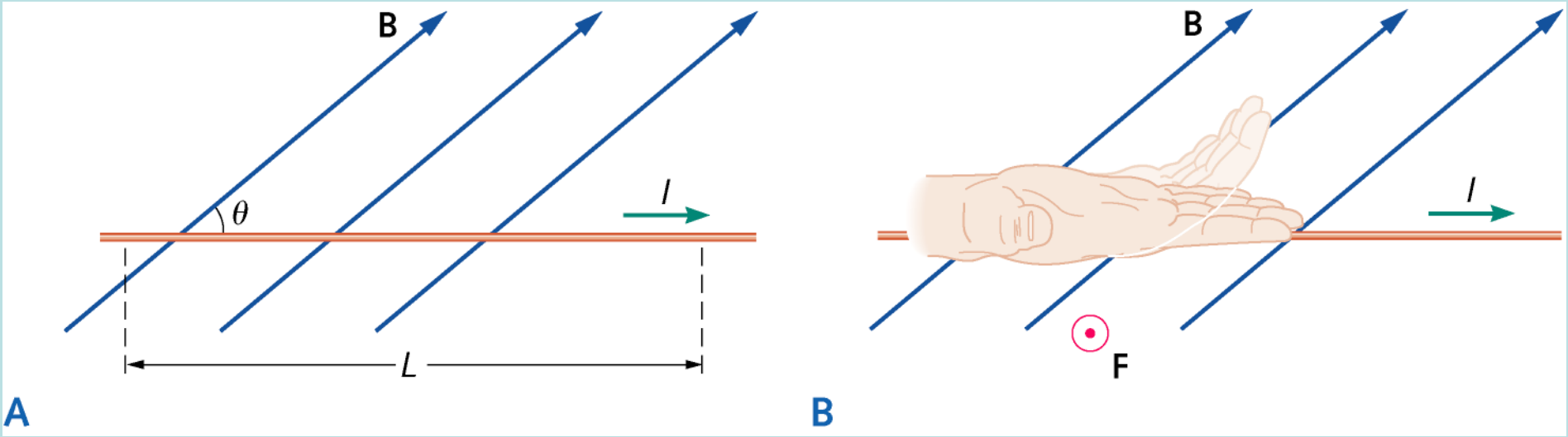




$$F_B = e\, v_d B$$

Forza magnetica che agisce sull'elettrone in moto all'interno del filo conduttore con velocità v_d

Forza magnetica su fili percorsi da corrente



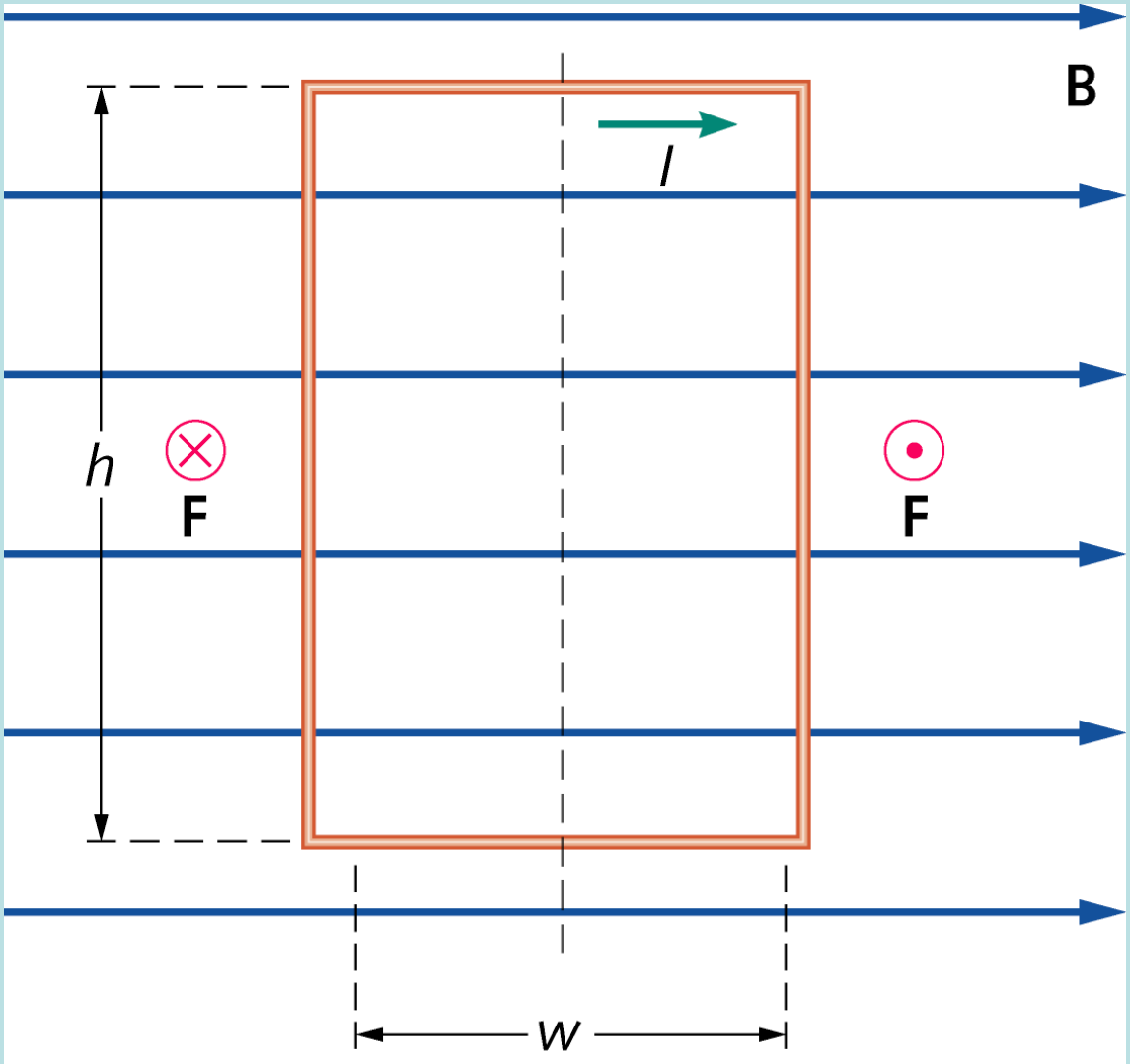
$\Delta t = L/v$

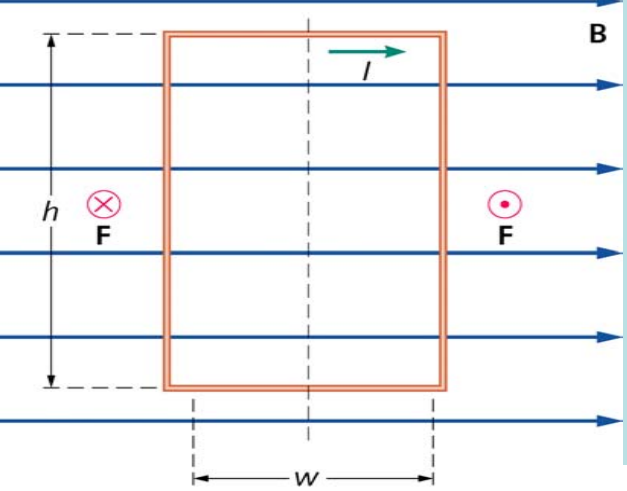
$q = I\,\Delta t = (I\,L) / v$

$$F = qvB \sin\vartheta = I\,L\,B \sin\vartheta$$

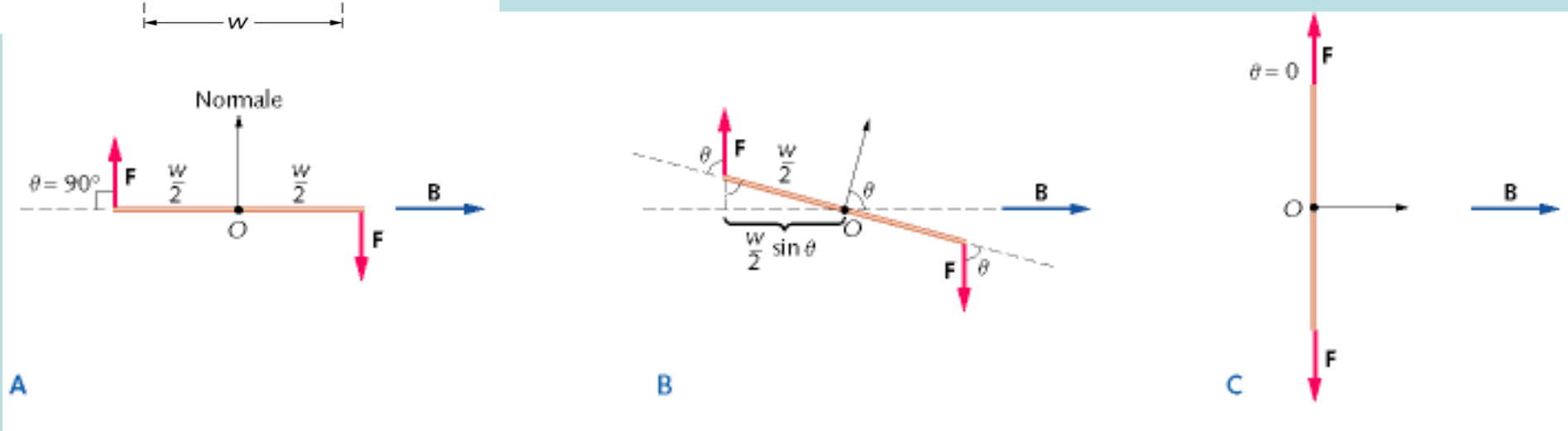
$$\boxed{\mathbf{F} = I\ (\mathbf{L} \times \mathbf{B})}$$

Forze magnetiche su spire percorse da corrente





Momento torcente su spire percorse da corrente



$\tau = (IhB)\ w$

$\tau = (IhB)\ (w\sin\vartheta)$

$\tau = (IhB)\ (w\sin 0) = 0$

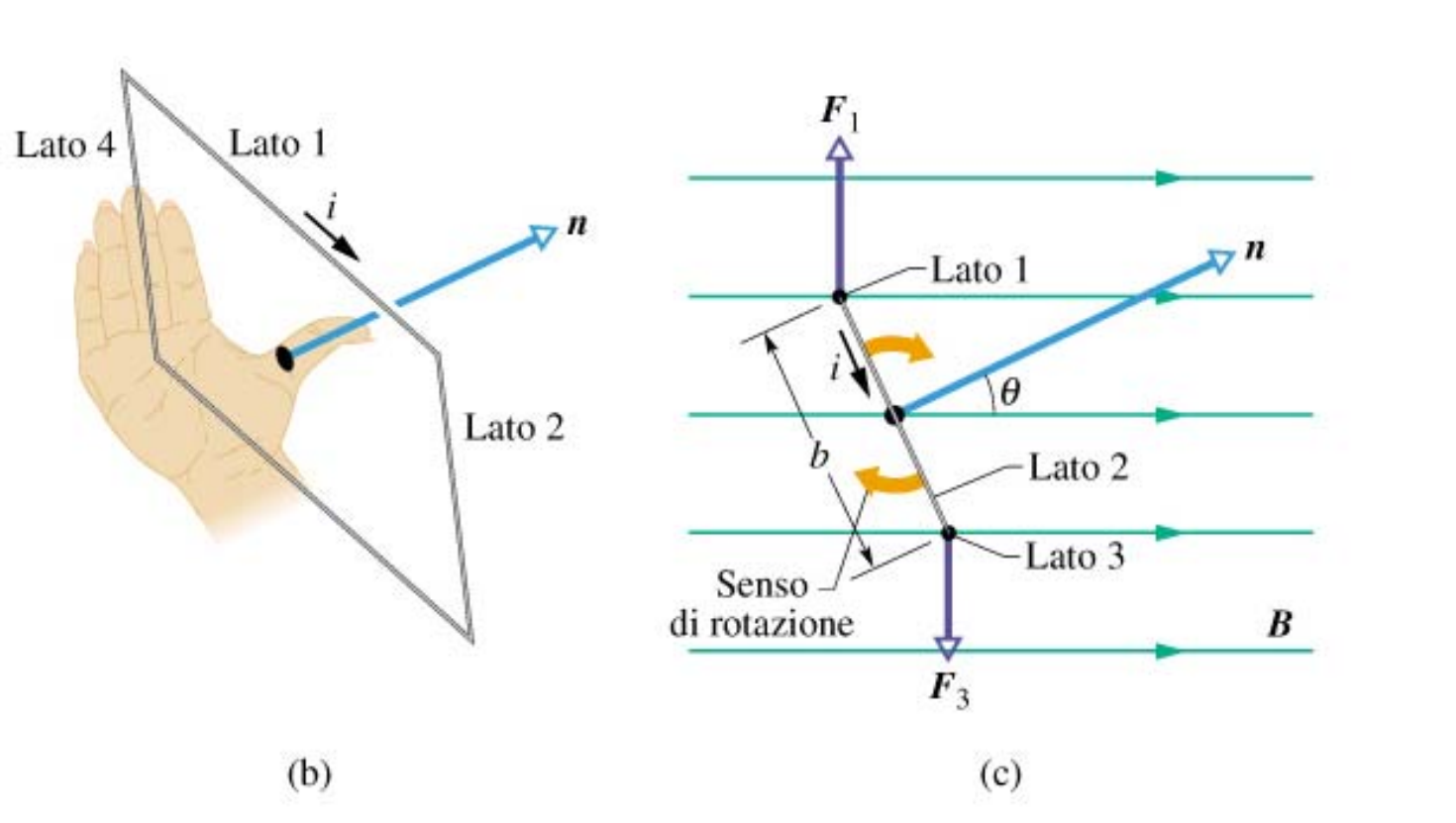
$A = hw$

$$\tau = (I\,A)\ B\sin\vartheta$$

La quantità $I\,A$ è detta momento (di dipolo) magnetico della spira (μ)

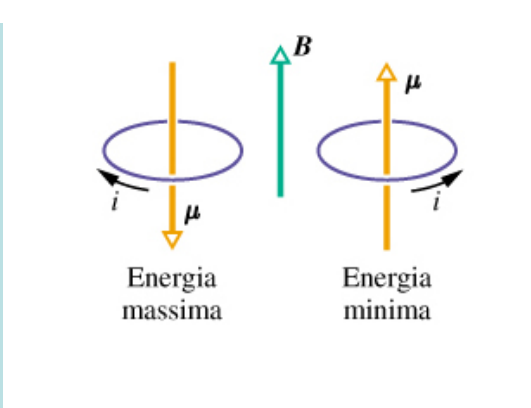
τ è direttamente proporzionale a μ

I dipoli magnetici si orientano lungo le linee di B



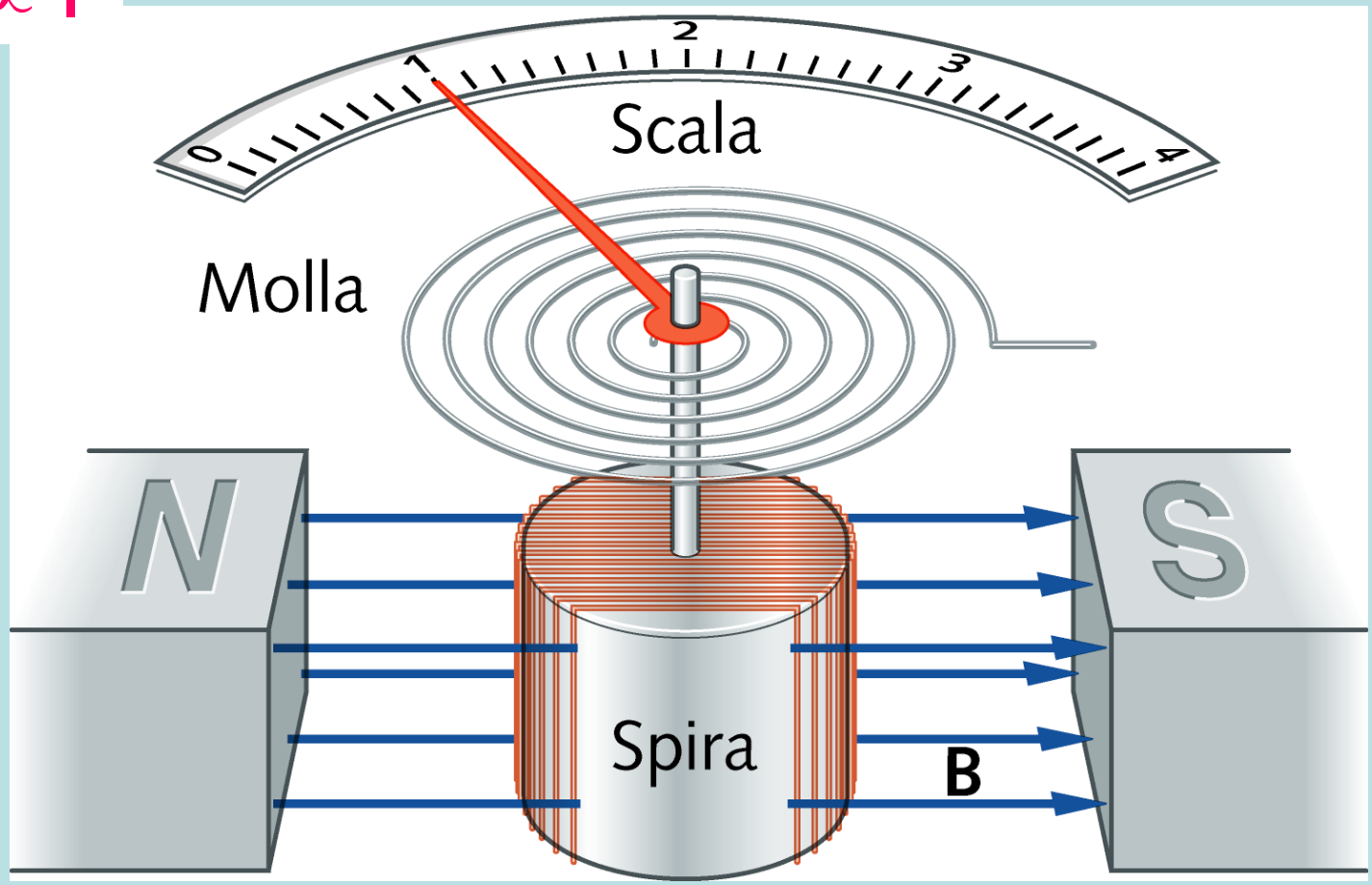
$\tau = \mu \times \mathbf{B}$

$\mu = (I\ A)$ **vers** n



galvanometro

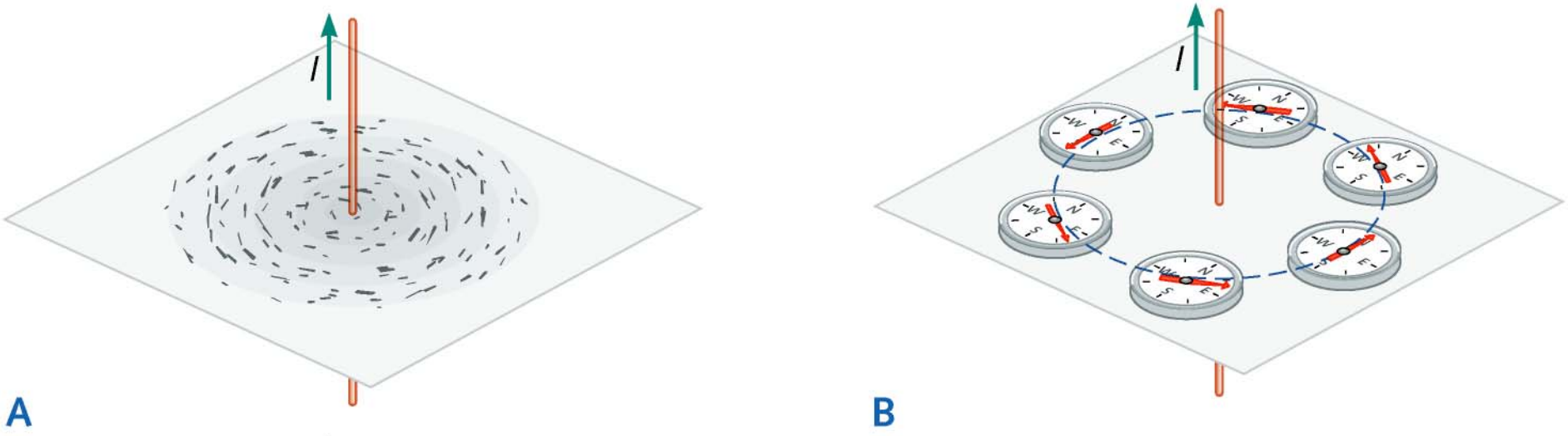
$\mu \propto I$



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

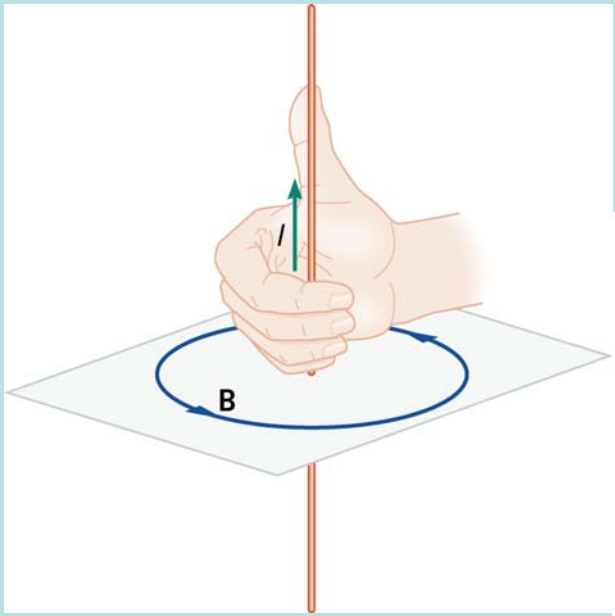
Le sorgenti di **B**

Campi magnetici e correnti elettriche

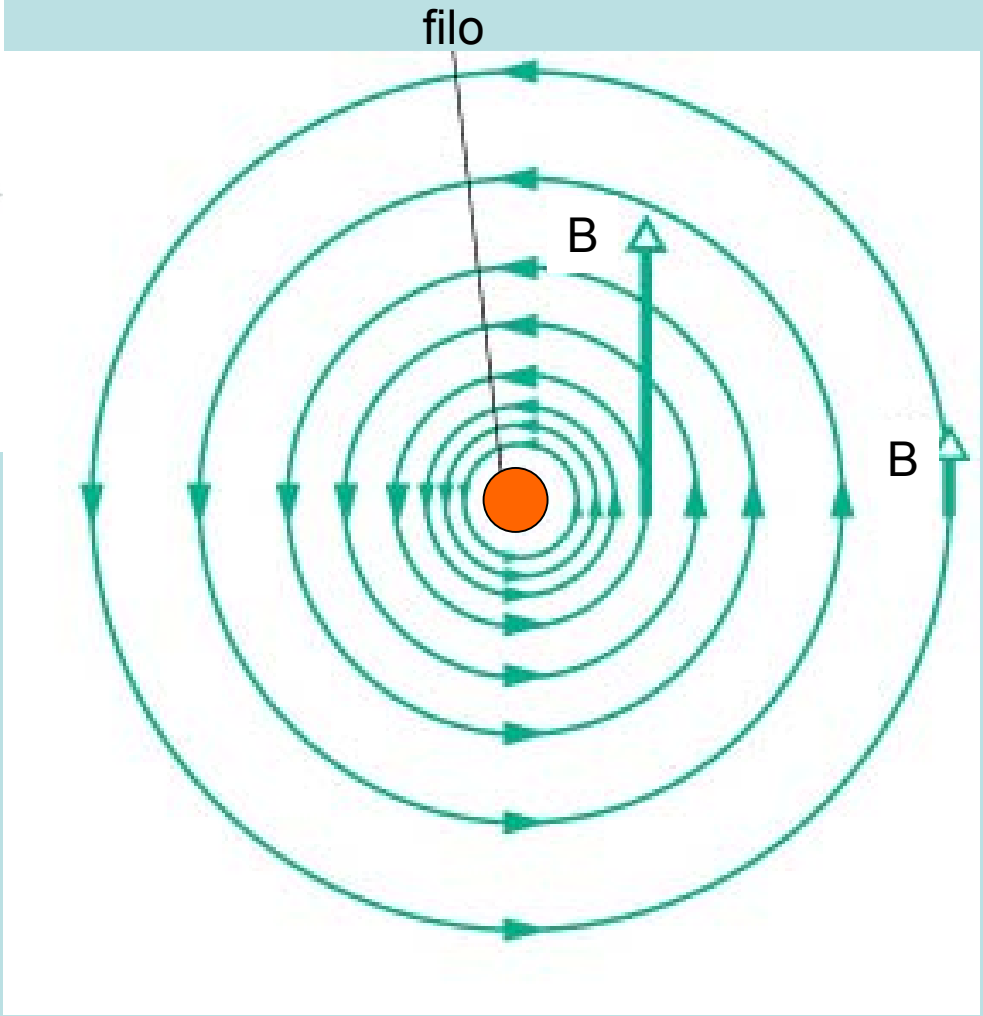


Esperimento di Oersted (1820)

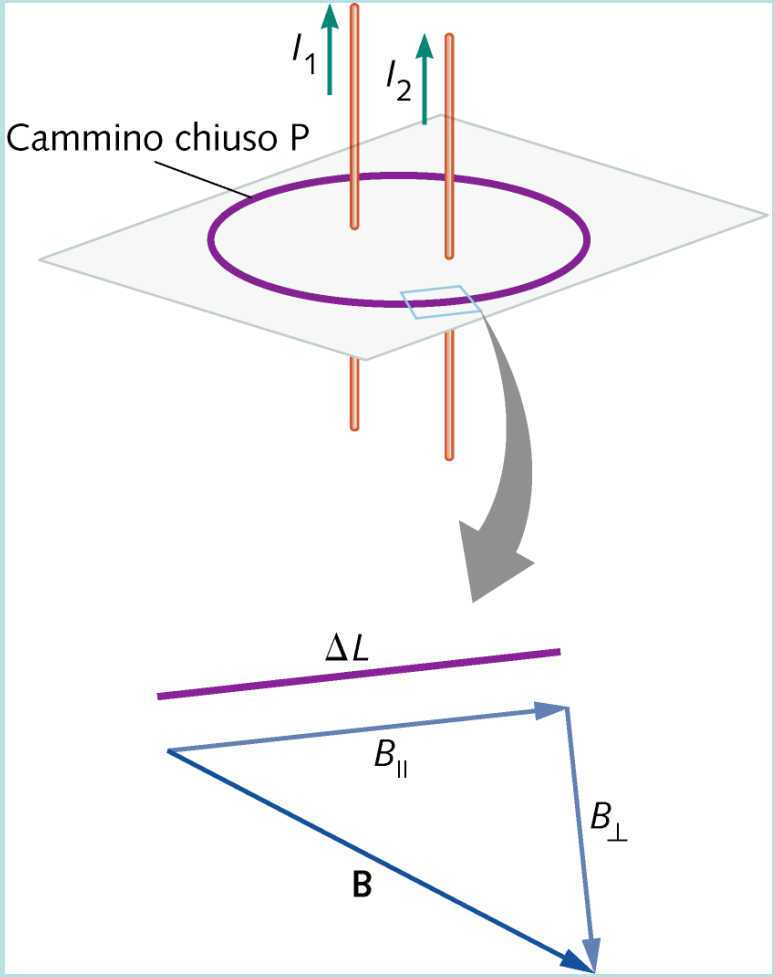
Cariche in movimento sono le sorgenti del campo magnetico



Linee di B



Legge di Ampere

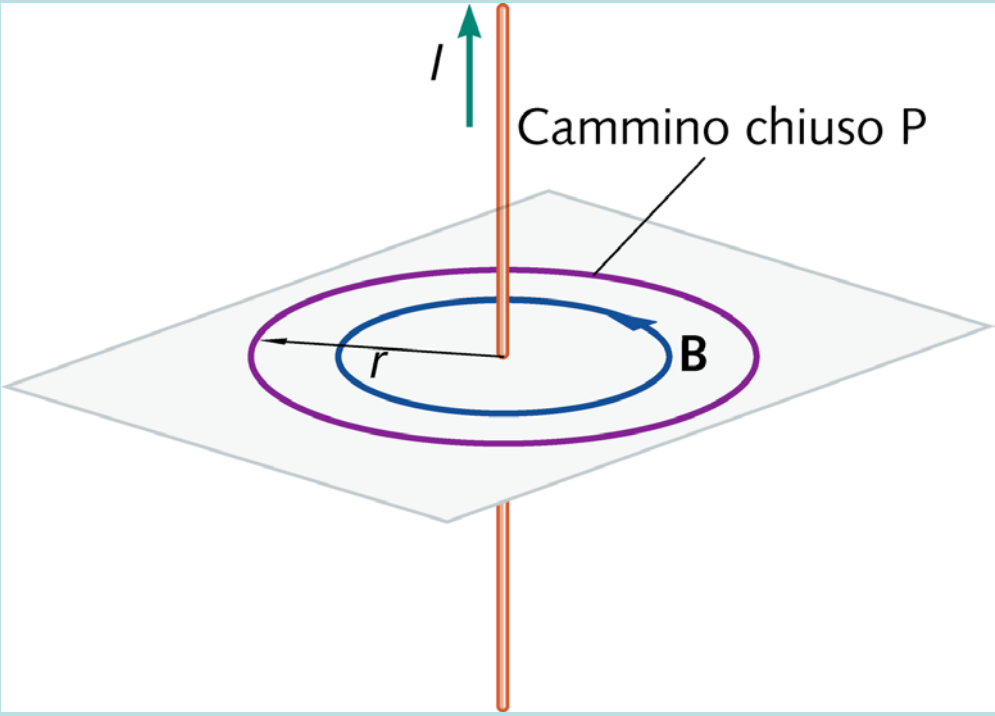


$$\Sigma_i B_{/\!/} \Delta L = \mu_0 I_{concatenata}$$

La circuitazione di B è proporzionale
alla corrente concatenata al percorso chiuso P

$\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}$ T m/A
è la permeabilità magnetica del vuoto

B genererato da un filo rettilineo …

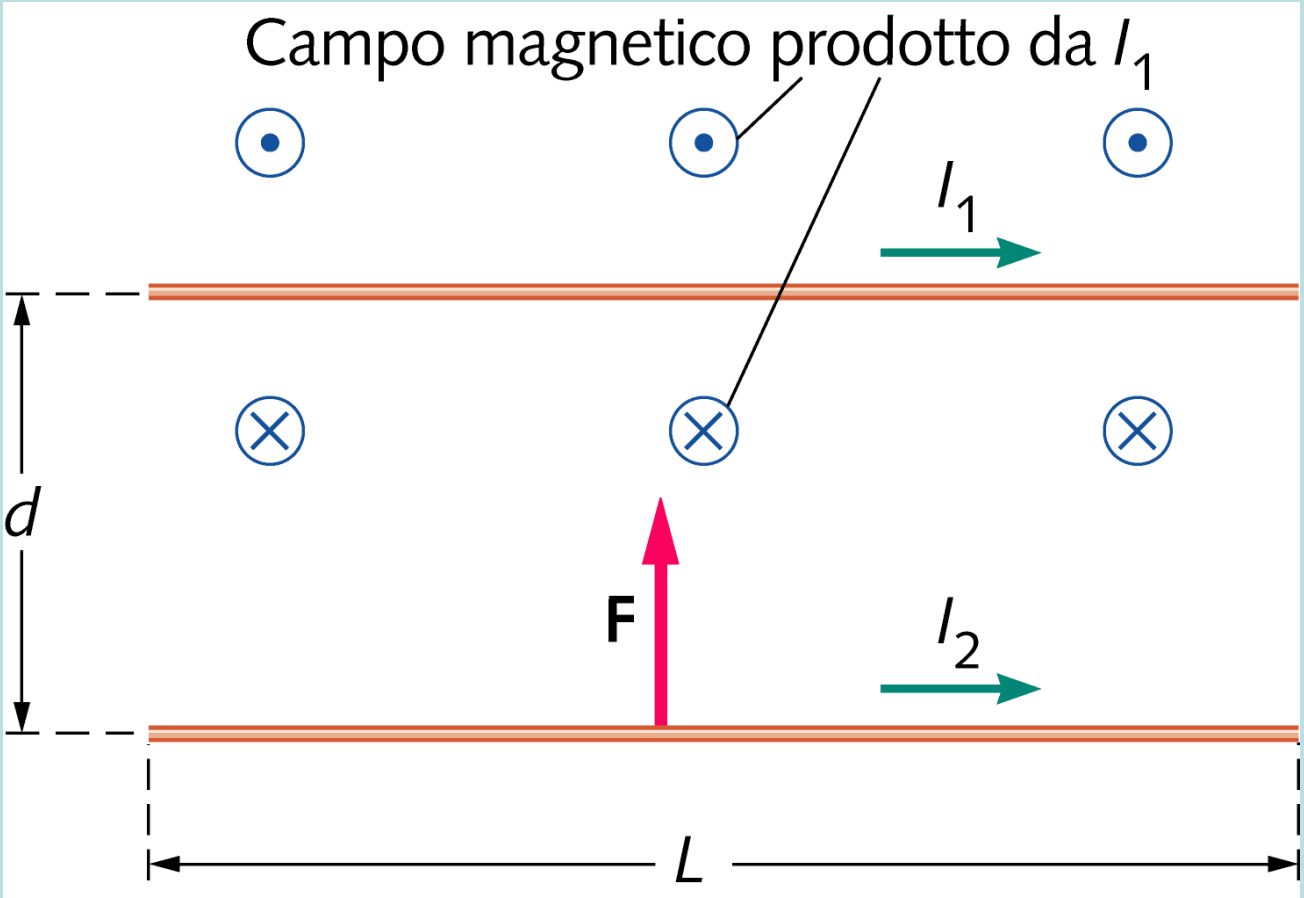


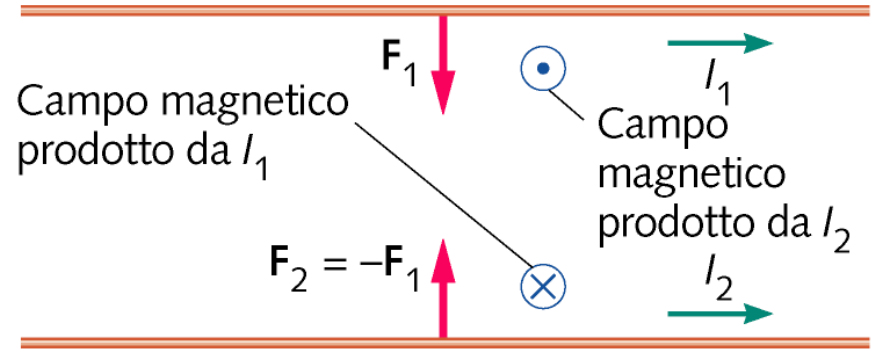
$$\Sigma_i B_{/\!/} \Delta L = B \, \Sigma_i \Delta L = B \, (2\pi r)$$

$$B \, (2\pi r) = \mu_0 \, I$$

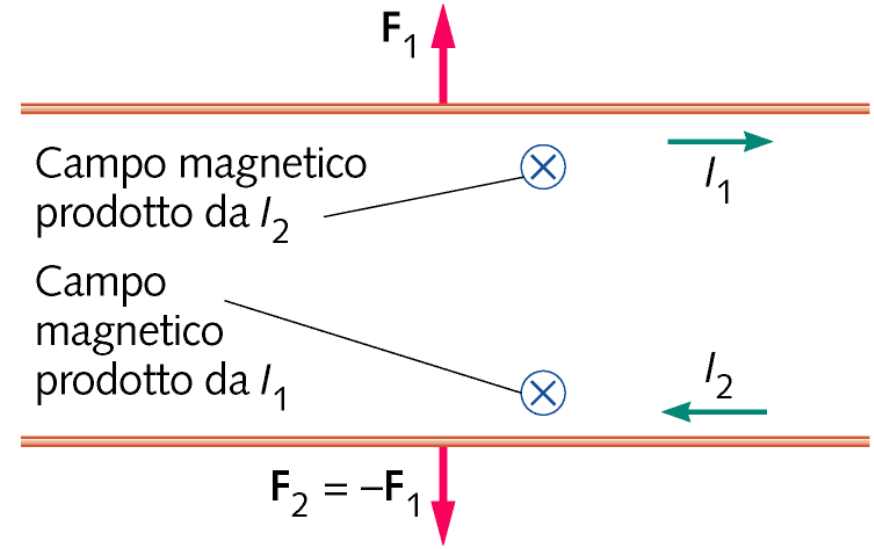
$$B = \frac{\mu_0 \, I}{(2\pi r)}$$

Forze tra fili percorsi da corrente



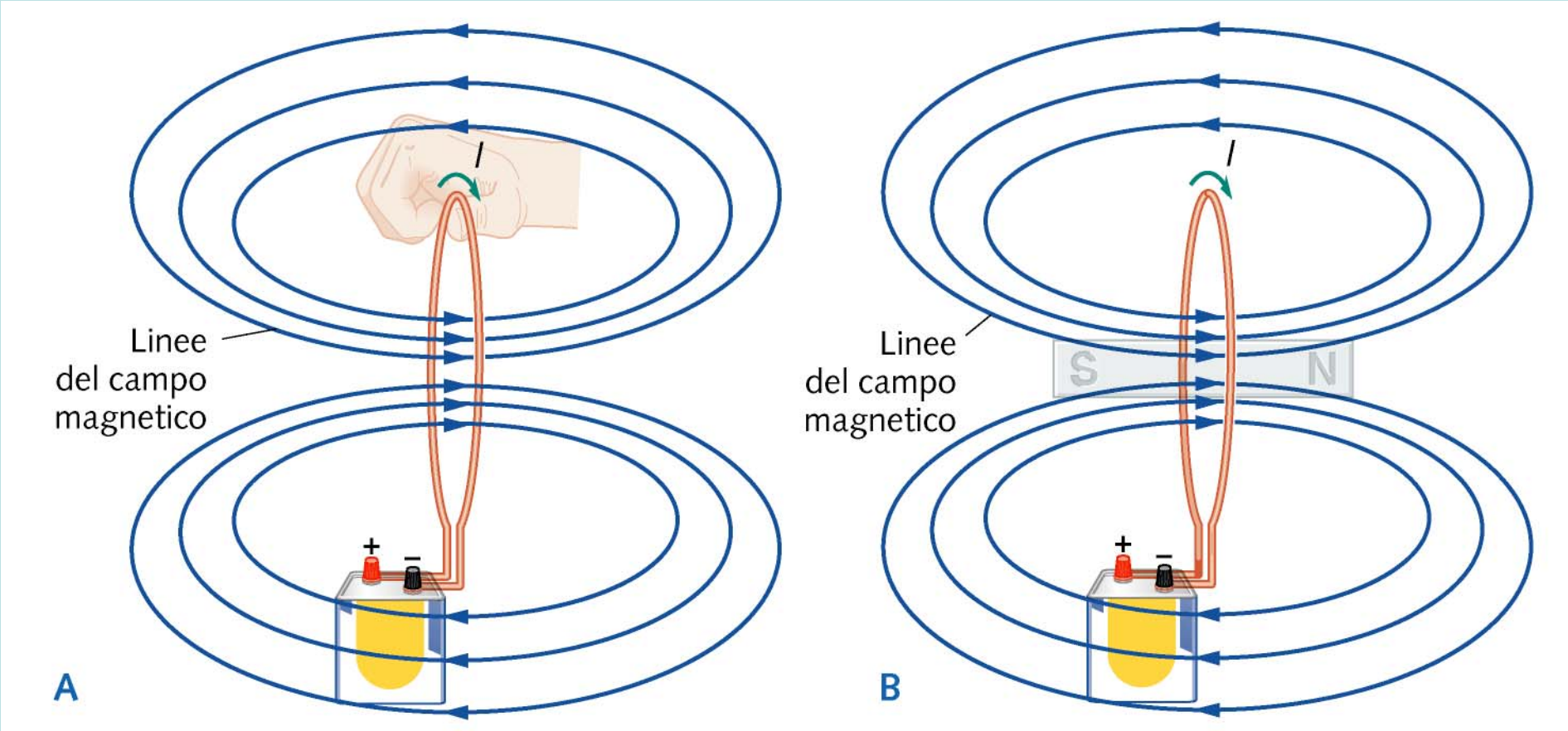

F_1
I_1
Campo magnetico prodotto da I_1
Campo magnetico prodotto da I_2
$F_2 = -F_1$
I_2

A


F_1
Campo magnetico prodotto da I_2
I_1
Campo magnetico prodotto da I_1
I_2
$F_2 = -F_1$

B

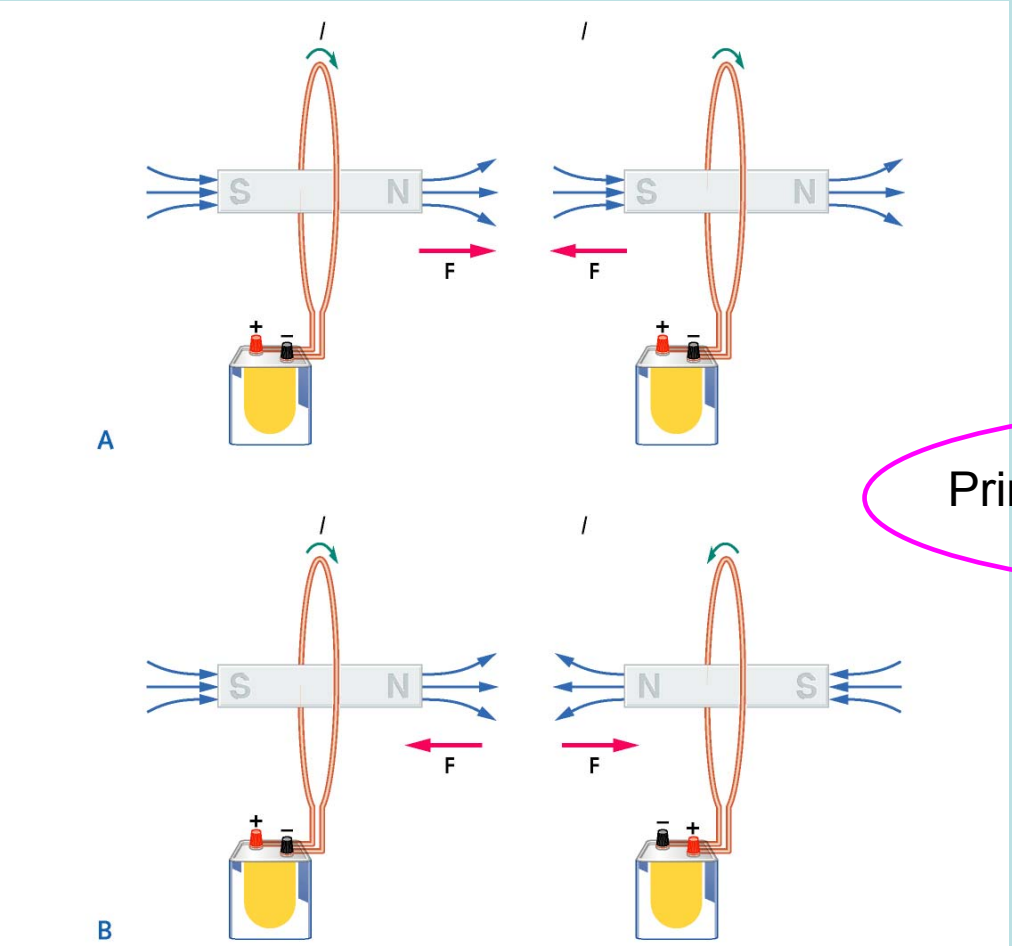
spire percorse da corrente

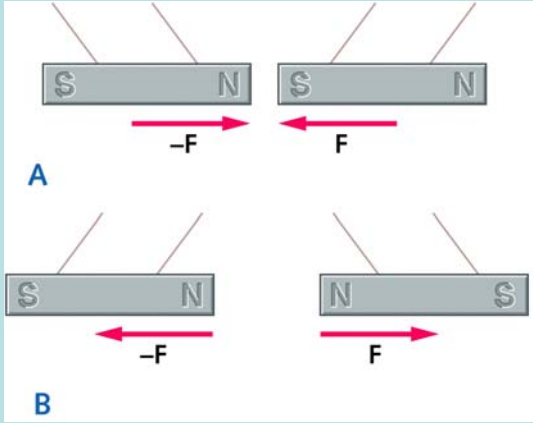


$$B_{centro} = \mu_0 \, I \, (1/2R)$$

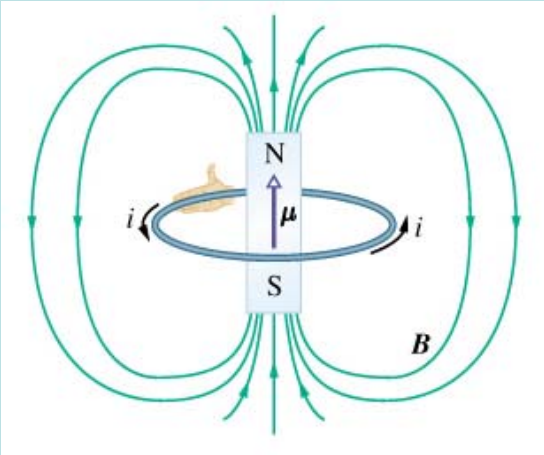
campo al centro della spira

Forze tra spire percorse da corrente

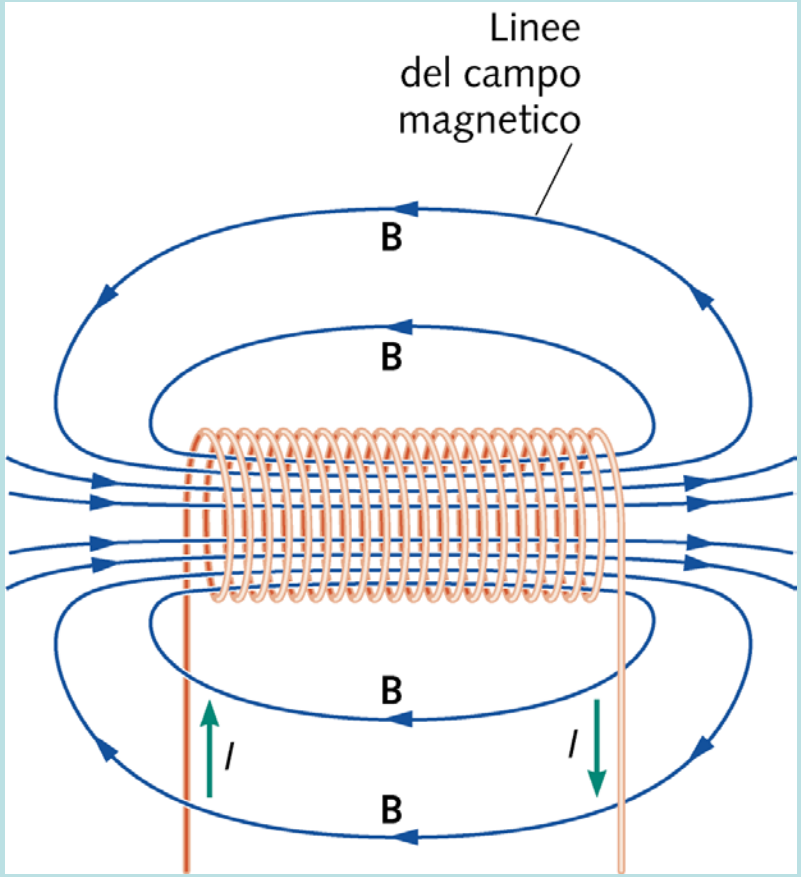




Principio di equivalenza di Ampere



solenoide

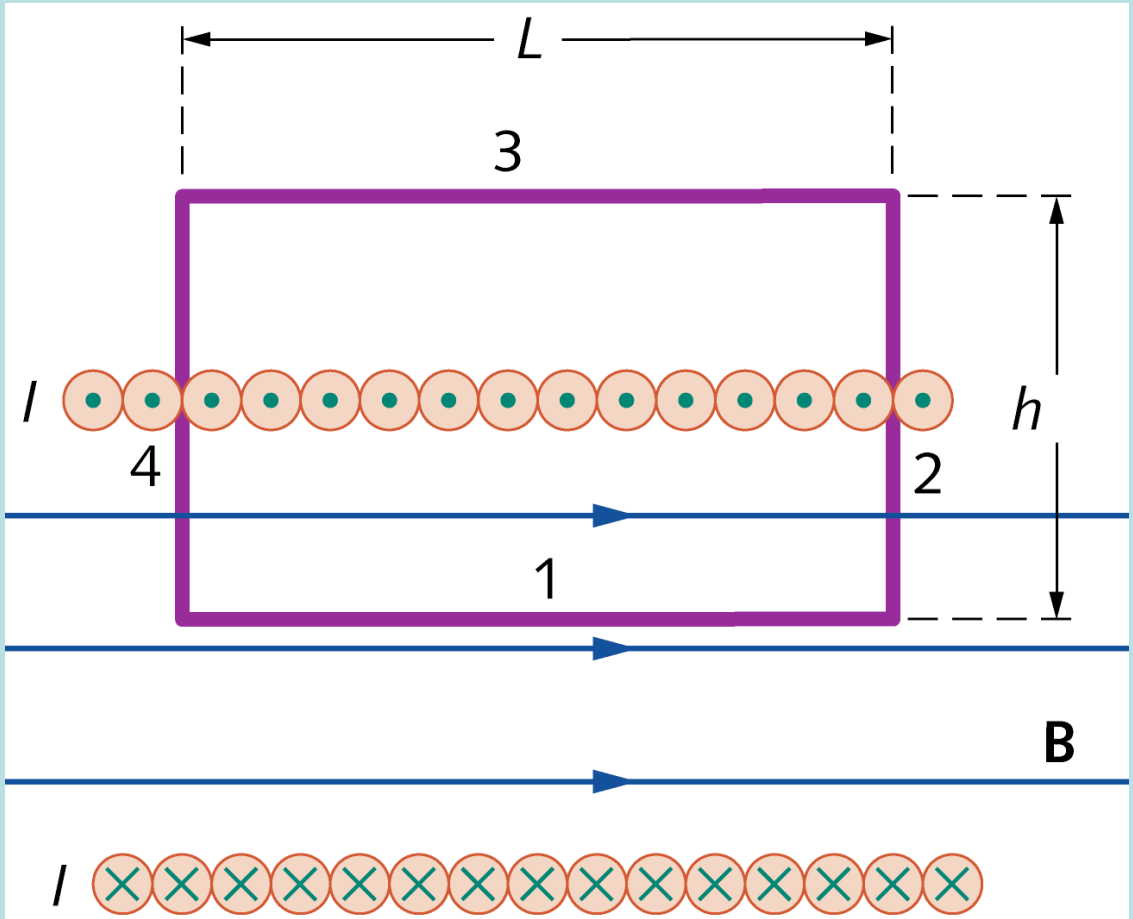


All'interno del solenoide il campo è uniforme e la sua intensità vale:

$$B = \mu_0 \, n \, I$$

Campo generato da un solenoide

$B = \mu_0 n I$



$$\Sigma_i B_{/\!/} \Delta L = B \, \Sigma_i \Delta L = B \, (L)$$

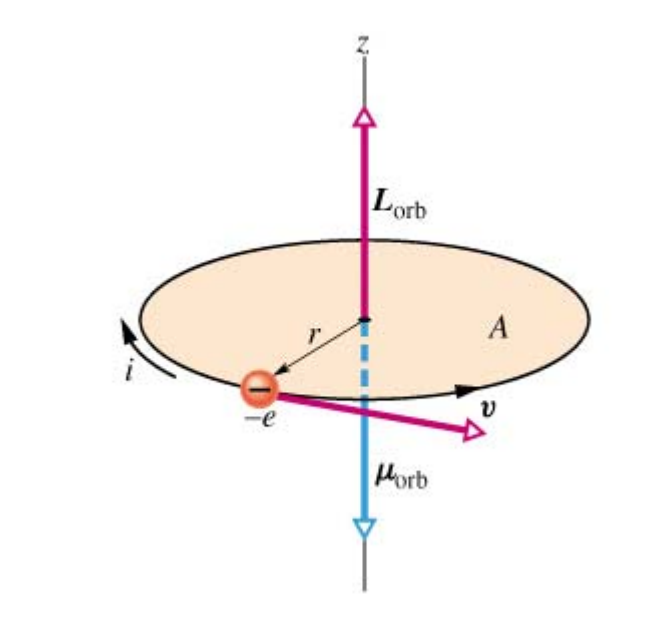
$$B \, (L) = \mu_0 N I$$

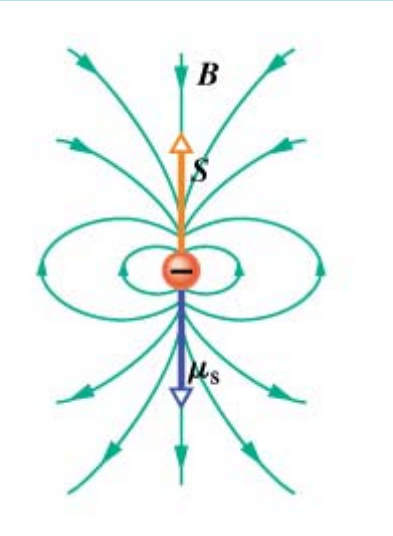
$$B = \mu_0 (N/L) I$$

$$n = (N/L)$$

Densità lineare delle spire del solenoide

Il magnetismo nella materia





Momento magnetico dovuto allo **spin** μ_{spin}

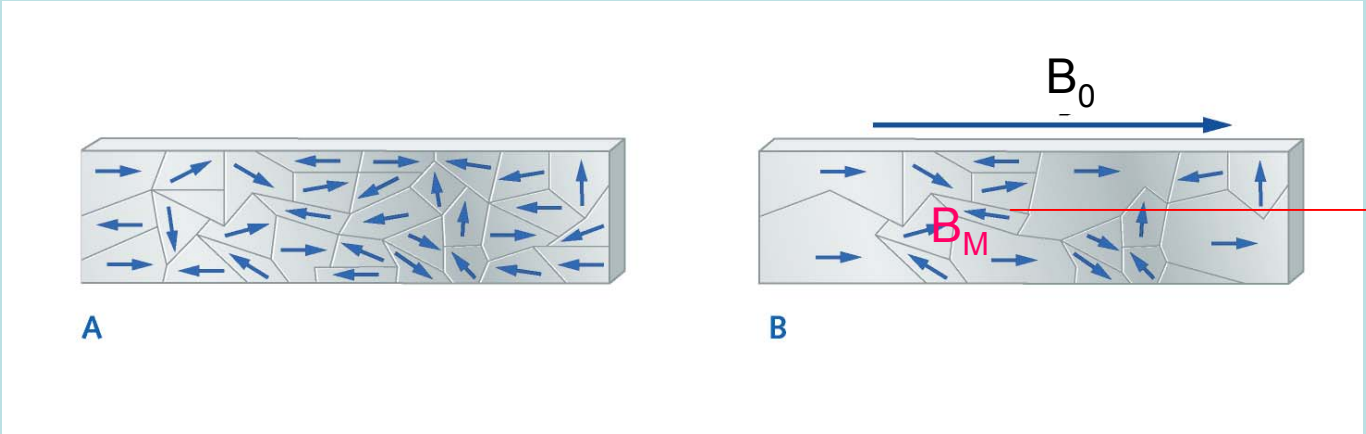
Momento magnetico associato al **moto orbitale** $\mu_{orbitale}$

Negli atomi gli elettroni tendono ad *"accoppiarsi"* in modo che i rispettivi **spin** siano opposti così da produrre un campo magnetico risultante nullo …

tuttavia …

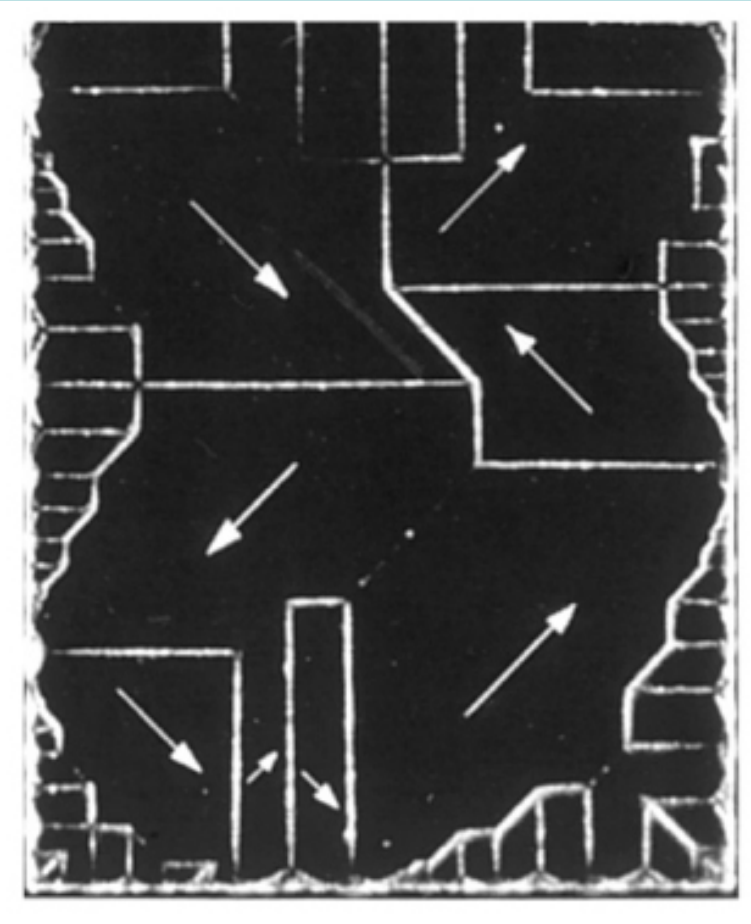
Materiali ferromagnetici

In alcuni materiali
l'accoppiamento di scambio favorisce la formazione di regioni (dette **domini**) caratterizzate da un massiccio allineamento dei dipoli magnetici dei singoli atomi



Materiali ferromagnetici
esempi: Ferro, Nichel, Cobalto

Per questi materiali
l'intensità del campo dovuto alla magnetizzazione B_M
è molto maggiore (anche parecchi ordini di grandezza)
del campo (esterno) magnetizzante B_0
e può permanere anche quando il campo esterno viene eliminato
(isteresi magnetica)



Configurazione dei domini in un cristallo di Nichel

Per temperature sufficientemente elevate i domini
vengono distrutti …
e il magnete permanente perde le sue proprietà magnetiche …

$$\vec{B}_{tot} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$$

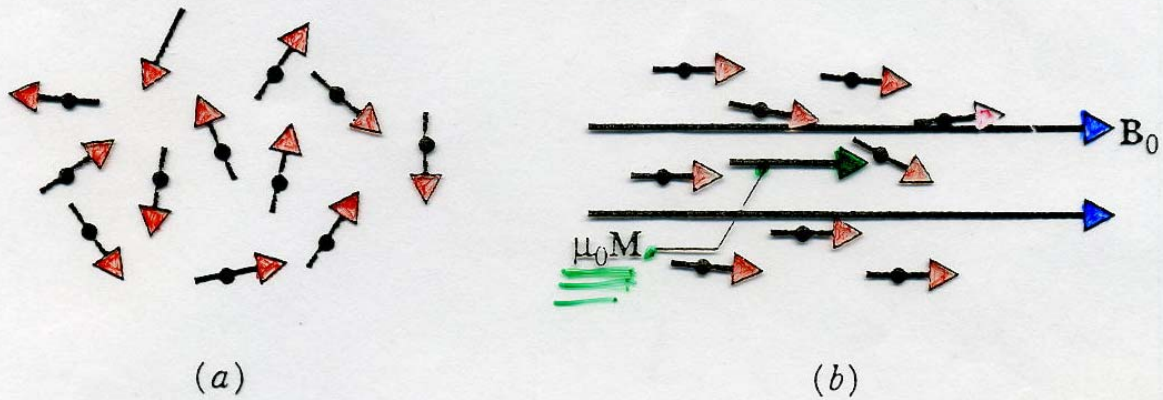
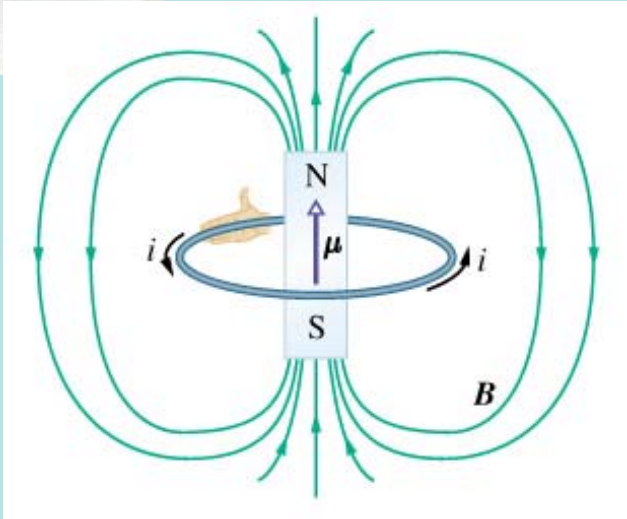


Figura 7 (*a*) In un materiale non magnetizzato, i momenti magnetici atomici sono orientati in modo casuale. (*b*) Quando viene applicato un campo esterno $\mathbf{B}_0$, i dipoli ruotano tendendo ad allinearsi col campo, e la somma vettoriale dei momenti di dipolo atomici dà un contributo $\mu_0\mathbf{M}$ al campo nel materiale.

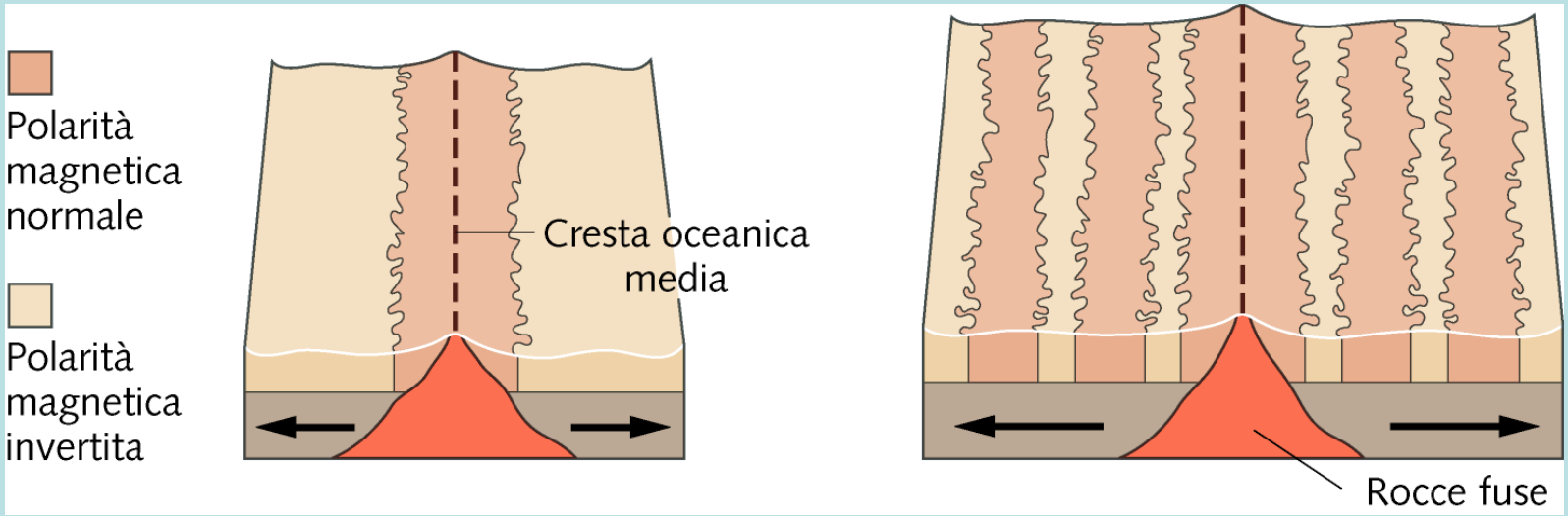
Non tutti i materiali magnetici
sono ferromagnetici …

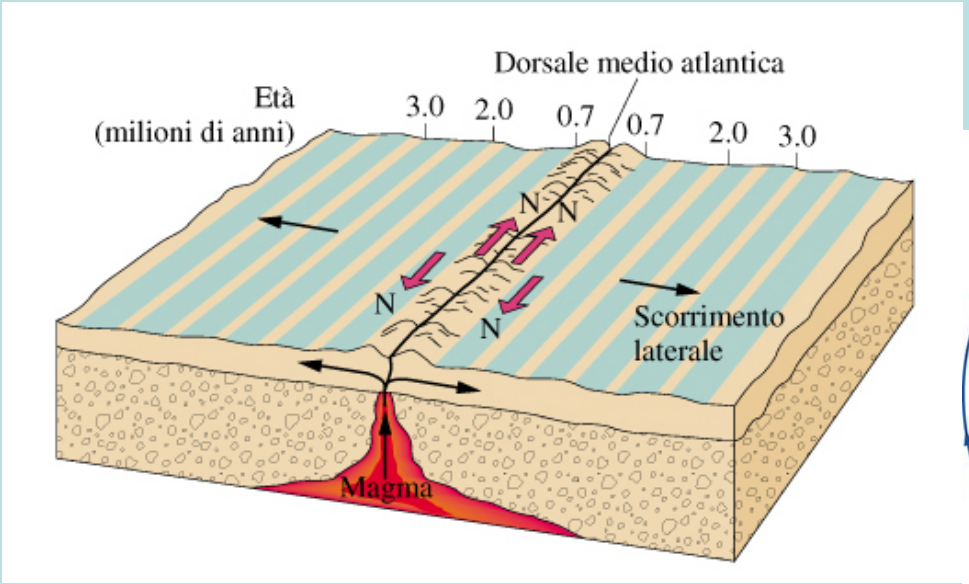
$B_M << B_0$

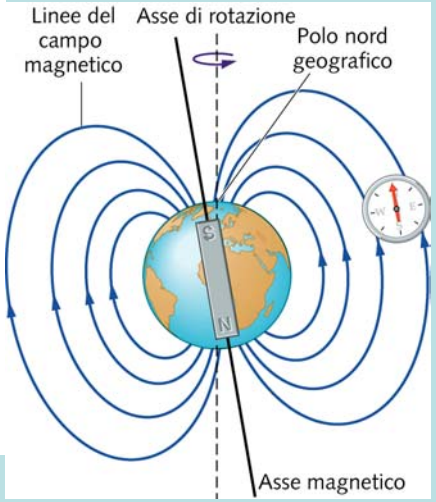
La temperatura introduce disordine nel sistema …



Il magnetismo nella materia







Materiali magnetici

$\mu_{totale} = 0$

esempi:
Bismuto
Rame
Azoto

un materiale **diamagnetico** posto in campo magnetico esterno $\mathbf{B}_{est}$ sviluppa un momento dipolare opposto alla direzione di $\mathbf{B}_{est}$

se il campo è disuniforme, il materiale diamagnetico viene respinto dalla regione di più elevata intensità verso una regione di intensità più debole

$\mu_{totale} \neq 0$

esempi:
Gadolinio
Alluminio
Magnesio
Ossigeno

un materiale **paramagnetico** posto in campo magnetico esterno $\mathbf{B}_{est}$ sviluppa un momento dipolare nella stessa direzione di $\mathbf{B}_{est}$

se il campo è disuniforme, il materiale paramagnetico è attratto verso una regione di più elevata intensità da una regione di campo più debole