

☐ Magnetismo

In natura abbiamo diverse manifestazioni "macroscopiche" di effetti / fenomeni legati al magnetismo:

→ Sostanze Magnetiche Naturali:

e.g. Magnetite / Lodestone → ovvero conglomerati di magnetite  
che si sono magnetizzati <sup>spontaneamente</sup> con un campo magnetico "macroscopico"  
ben visibile

→ Campo Magnético Terrestre:

↳ Bussola

↳ Autore polariz.: interazione campo magnetico  $\oplus$   
e particelle cariche del vento solare

↳ Paleomagnetismo: Orientamento magnetico di rocce vulcaniche solidificate (e.g. basalti e dorsali oceaniche)

→ **Orientamento magnetico** uccelli migratori: Alcuni uccelli sono in grado di percepire l'inclinazione del campo magnetico (Nord vs Sud) e l'intensità (+ forte ai poli, < all'equatore)

2 ipotesi:

- a) Cristalli di magnetite nel becco / cervello
- b) Cryptochromi: proteine presenti nella retina sensibili al campo magnetico

→ **Macchie Solari**: Zone scure sulla superficie solare (fotosfera  $\sim 500\text{km}$ ) osservate per la prima volta da Galileo. Queste zone (con un diametro paragonabile a quello  $\oplus$ ) appaiono più scure in quanto più fredde ( $\sim 4000\text{K}$ ) rispetto all'ambiente circostante ( $\sim 6000\text{K}$ ).

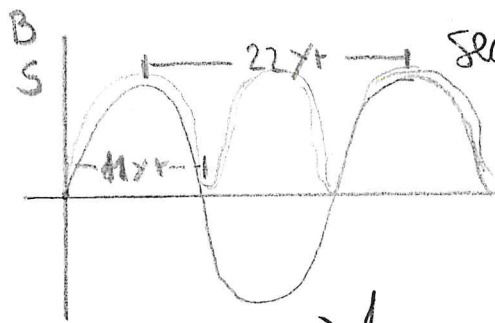


↳ La differenza di temperatura è dovuta ai forti campi magnetici che inibiscono i moti convettivi che trasportano il plasma caldo dall'interno verso la superficie del Sole.

→ le macchie si formano dove le linee di campo magnetico escono/entrano dalla superficie solare.

Generato dal moto di vortici e correnti all'interno del sole.

↳ Spesso le macchie solari sono connesse da tubi di flusso di gas ionizzato che segue le linee di campo



→ In realtà i cicli non sono sempre uguali ma variano di intensità



→ le macchie solari seguono il ciclo solare (11 anni) legato all'attività magnetica solare. Durante i massimi solari si contano centinaia di macchie solari

Il campo magnetico si inverte ad ogni ciclo. (ciclo magnetico completo ogni 22yr)

I cicli solari influenzano le aurore polari (variazioni e intensità del vento solare), le telecomunicazioni, e sul clima globale (modificando il vento solare, sulla formazione delle nubi, e quindi sull'albedo che varia ~10% tra MAX e MIN; b) variazioni di irradiazione di circa 31% tra massimo e minimo c) Cicli solari possono contribuire a raffreddamenti

→ a livello microscopico il magnetismo si manifesta:

↳ Spin e momento magnetico atomico

↓  
Responsabile del magnetismo  
nella materia

↳ Effetto Zeeman: Deformazione degli orbitali atomici a causa di un campo magnetico esterno

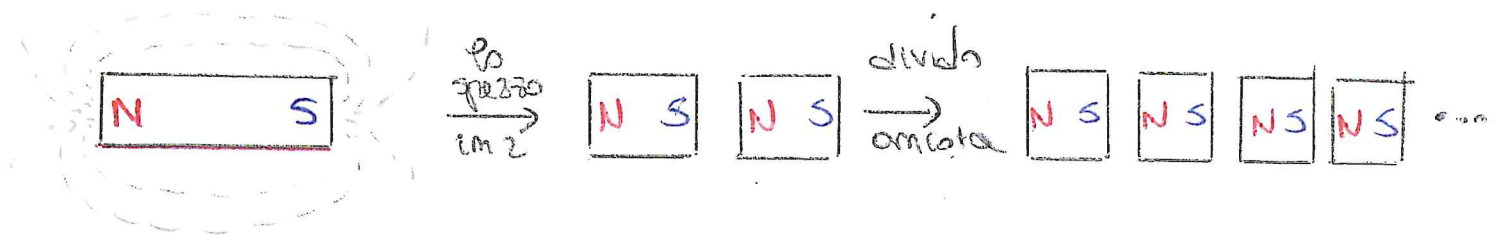
↓  
È possibile osservare l'effetto guardando  
le linee spettrali (permette una misura del  
campo magnetico e.g. nelle macchie solari)

↳ Radiazione Elettromagnetica

# ◊ Campi Magnetici

- Possono essere generati da cariche elettriche in movimento, come il flusso di cariche che dà luogo ad una corrente elettrica in un filo (elettromagnete)
  - Generato dalla somma di tanti piccoli campi magnetici "elementari" - intrinseci delle particelle elementari che costituiscono una sostanza - che sono allineati (calamite, o magneti permanenti)
- ovvero il campo magnetico "intrinseco" è una caratteristica fondamentale delle particelle come la massa o la carica elettrica. → Una differenza di base con la carica elettrica è che non è possibile isolare un polo magnetico, mentre ad esempio possiamo isolare una carica  $e$ ; i poli magnetici esistono solo sotto forma di DIPOLLO MAGNETICO

Es: Magnete

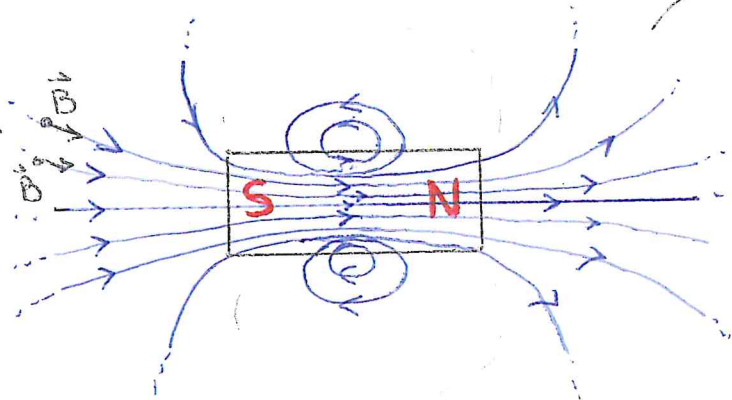


→ per quante volte io divido il magnete avrò sempre 2 poli.

→ Usando e.g. della lamiatura di ferro possiamo evidenziare le linee di forza del campo magnetico.

E.g. per un magnete permanente

Campo Magnetico  
Tangente alle  
linee di campo  
punto per  
punto

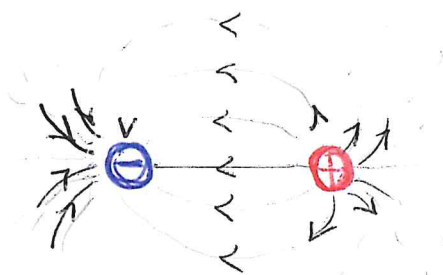


Per convenzione  
le linee escono  
dal polo Nord  
ed entrano nel  
polo Sud

- Tutte le linee di campo formano un percorso chiuso
- Dove le linee sono più fitte il campo magnetico è più intenso

Conseguenza del fatto che non esistono MONOPOLI magnetici isolati.

Nota: le linee di forza del campo magnetico generate da un magnete rettilineo, hanno la stessa configurazione del campo elettrico generato da un dipolo elettrico

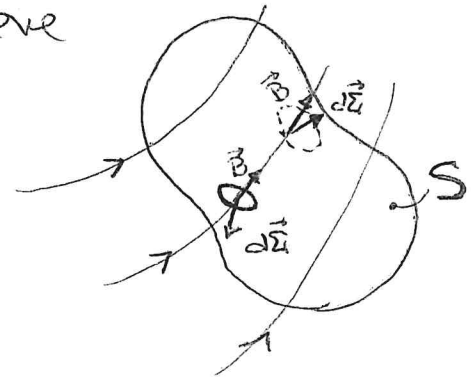


N.B. L'analogia però non è perfetta! Tra le due cariche il campo non è uguale a quello del dipolo magnetico

- Poli magnetici uguali si respingono, mentre poli magnetici opposti si attraggono

## Φ Flusso del campo Magnetico

→ il fatto che le linee del campo magnetico sono sempre linee chiuse continue (senza "inizio" o "fine") in cui  $\vec{B}$  ha lo stesso verso implica che il flusso del campo  $\vec{B}$  attraverso una superficie chiusa è sempre nullo. Infatti  $\forall$  linea entrante del campo  $\vec{B}$  in una superficie  $S$  ( $d\Phi(\vec{B}) > 0$ ), dove anche uscirne ( $d\Phi(\vec{B}) < 0$ ), e questi 2 contributi sono uguali in modulo, ed opposti:



$$\Phi(\vec{B}) = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

legge di Gauss per il  
campo magnetico

→ in forma locale

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{B} \text{ è un campo solenoidale}$$

↓  
Questa proprietà è legata al fatto che NON esistono monopoli magnetici

→ il flusso magnetico si  
misura in Weber (Wb)

$$\text{Wb} = \text{Tm}^2$$

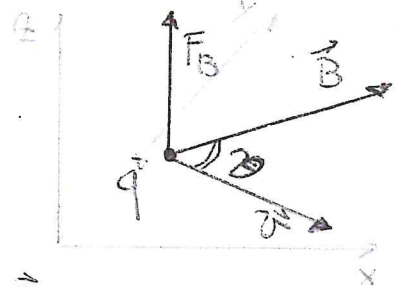
## Forza Magnetica su una particella carica

→ Sperimentalmente si osserva che <sup>su</sup>una particella carica ferma in un campo magnetico non agisce alcuna forza.

Se invece la particella si muove con una velocità  $\vec{v}$  all'interno di un campo magnetico  $\vec{B}$ , su essa agisce una forza:

Forza di  
Lorentz

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



→ direzione della forza  $\perp$  al piano  $\vec{v}\vec{B}$

→ Modulo:  $F_B = q v B \sin \theta$

→ Concettualmente abbiamo che la carica elettrica in moto genera un campo magnetico che interagisce col campo magnetico esterno  $\vec{B}$ .

N.B. Essendo la forza  $\perp$  a  $\vec{v}$  e quindi  $\perp$  allo spostamento

$$W = \vec{F}_B \cdot \vec{s} = 0 = \Delta E_k = \frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2$$

ovvero il modulo della velocità non cambia, ma cambia solo la direzione  $\rightarrow$  la  $F_B$  genera solo un'accelerazione centripeta

Unità di Misura B: Tesla

$$T = \frac{N}{A \cdot m} = \frac{kg}{A \cdot s^2}$$

$\swarrow$   $\frac{C \cdot m}{s}$   $\searrow$   $\frac{C}{s}$   
 $[q]$   $[v]$

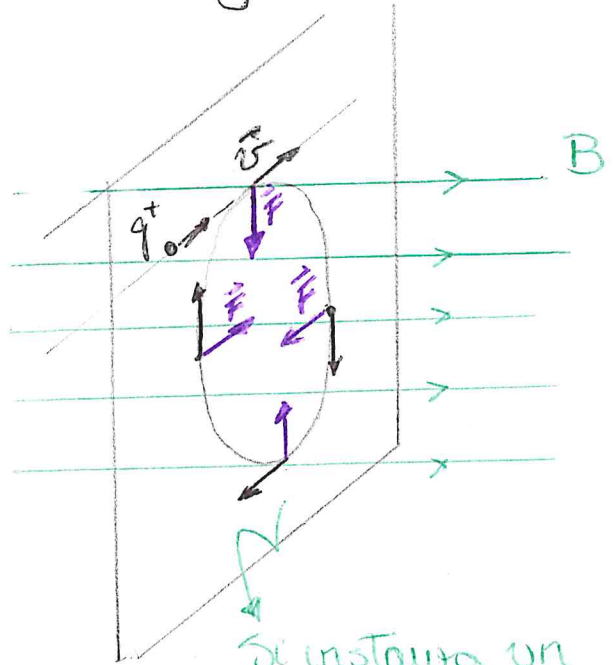
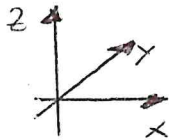
## Forza Magnetica su una carica in moto

→ Consideriamo quindi un campo  $\vec{B}$  costante in una regione di spazio, ed una palla con velocità  $\perp$  a  $\vec{B}$ .

La forza risultante,  $\perp$  a  $\vec{B}$ , produce una variazione della direzione di  $\vec{v}$  ancora  $\perp$  a  $\vec{B}$ , ovvero il moto della palla si svolge su un piano  $\perp$  a  $\vec{B}$ .

accelerazione  
centripeta

$$F = qvB = m a_c = m \frac{v^2}{r}$$



Il raggio di curvatura della traiettoria sarà quindi:

$$r = \frac{mv}{qB} \Rightarrow \text{costante}$$

con velocità angolare:  $\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$  [rad/s]

Il verso di rotazione dipende dal segno della carica. ↓

$\omega$  Non dipende dalla velocità della carica; ovvero il periodo

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Si instaura un moto circolare uniforme

→ Se la p.lla ha velocità iniziale non  $\perp$  a  $\vec{B}$ ,  
 scomponiamo  $\vec{v} = \vec{v}_m + \vec{v}_p$ , dove  $\vec{v}_m \perp \vec{B}$  e  
 $\vec{v}_p \parallel \vec{B}$ ; la forza magnetica sarà quindi data  
 da:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} = q (\vec{v}_m + \vec{v}_p) \times \vec{B} = q \vec{v}_m \times \vec{B}$$

$$\vec{v} = (v_m, v_p)$$

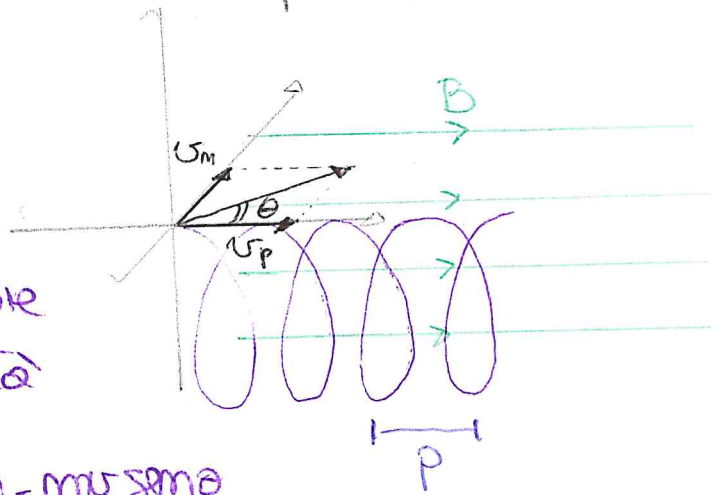
$$v_m = v \sin \theta \rightarrow \theta = \text{angolo tra } \vec{v} \text{ e } \vec{B}$$

$$v_p = v \cos \theta$$

$$\vec{v}_p \times \vec{B} = \emptyset$$

→ Nel piano ortogonale  
 a  $\vec{B}$  ho un moto circolare  
 uniforme con velocità

$$v_m \text{ e periodo } T = \frac{m v_m}{q B} = \frac{m v \sin \theta}{q B}$$



→ Mentre lungo  $v_p$  non agiscono forze, quindi il moto  
 è rettilineo uniforme

→ La composizione dei due moti dà luogo ad un moto  
 elicoidale con asse  $\vec{B}$ , e di passo:

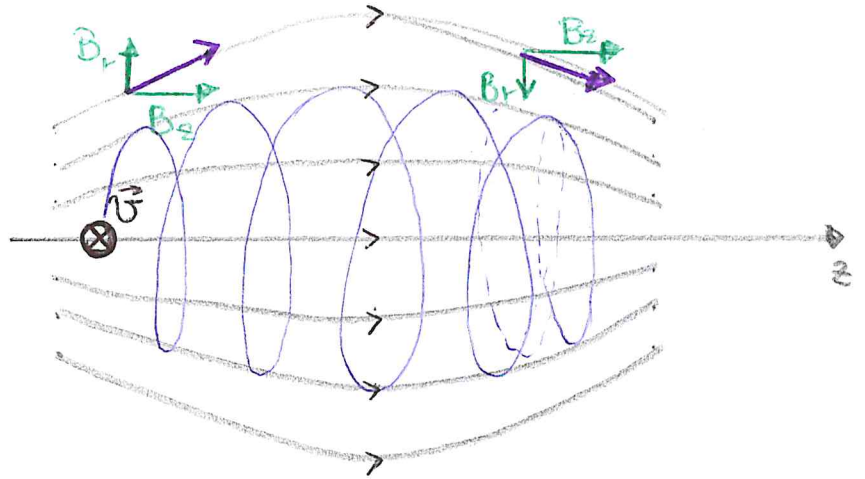
$$p = v_p T = \frac{2\pi m v \cos \theta}{q B}$$

T moto  
circolare

# ♠ Bottiglia Magnetica

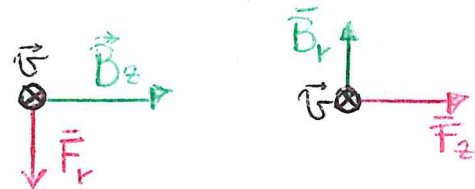
- Consideriamo campo  $\vec{B}$  a simmetria assiale, più intenso alle estremità e più debole al centro.

La componente  $B_z$  lungo l'asse ha sempre lo stesso segno, mentre la componente radiale si inverte.



Supponiamo di immettere una palla  $q$  con velocità  $v$  entrante. Questa si muoverà sotto la  $+$  forza:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times (\vec{B}_z + \vec{B}_r)$$



La componente  $\vec{B}_z$  induce una forza radiale che genera moto circolare nel piano  $\perp$  a  $\vec{B}_z$



Si instaura un moto elicoidale con  $r$  e  $p$  variabile in quanto  $B$  varia lungo  $z$ .

La componente  $\vec{B}_r$  genera una forza lungo  $z$  che cambia verso spostandosi da dx a sx della bottiglia

Passata la "pancia" della bottiglia la componente  $B_r$  del campo rallenta la particella lungo  $z$ , fino a fare invertire la direzione del moto lungo  $z$ .

Questo effetto di "specchio" magnetico si ripete a sx e dx intrappolando la particella.

## • ~~Ciclo Elettrico~~ ~~Atmosferico~~

→ Questo tipo di sistema può essere efficace per mantenere confinato un plasma di  $e^-$  o ioni.

Tuttavia il sistema è stabile solo a basse densità, quando il campo  $\vec{B}$  prodotto dalle particelle non altera il campo  $\vec{B}$  di confinamento.

→ Le fasce di Van Allen sono un esempio di effetto bottiglia magnetica dovuto al campo magnetico terrestre, le cui linee hanno l'andamento descritto, con gli estremi ai poli. Le particelle cariche ( $e^-$  e ioni) provenienti dal vento solare restano intrappolate nella bottiglia magnetica. Il confinamento non è perfetto e si raggiunge un equilibrio tra pile entranti ed uscenti. Una parte delle pile ~~si~~, specialmente ai poli dove la componente  $B_r$  del campo è assente e l'effetto bottiglia è minore, raggiunge l'atmosfera entrando in collisione con le sue particelle e generando le aurore.