

FISICA

ElettroMagnetismo

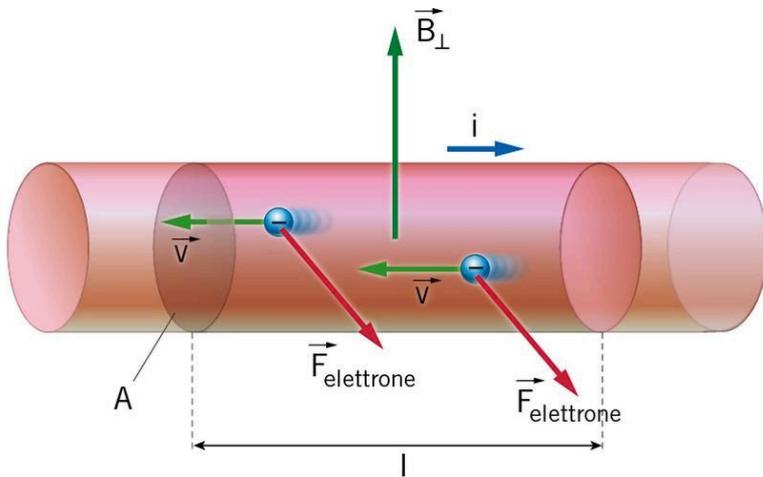
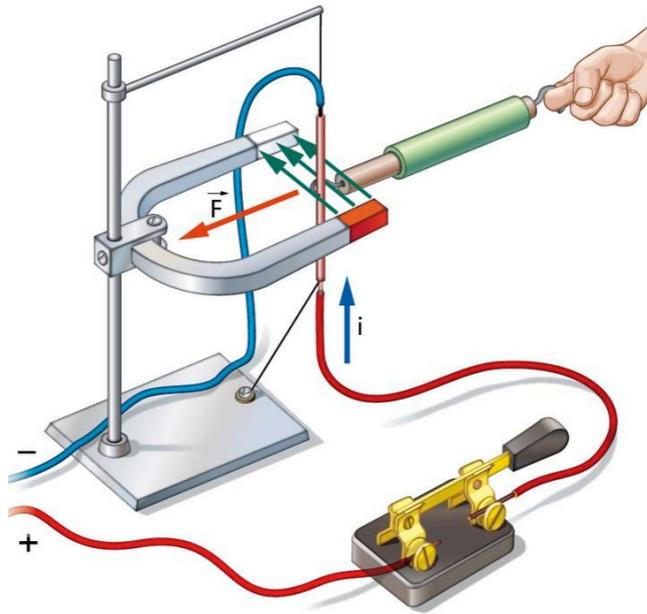
MOTO DI CARICHE ELETTRICHE
IN CAMPI MAGNETICI

Autore: prof. Pappalardo Vincenzo

docente di Matematica e Fisica



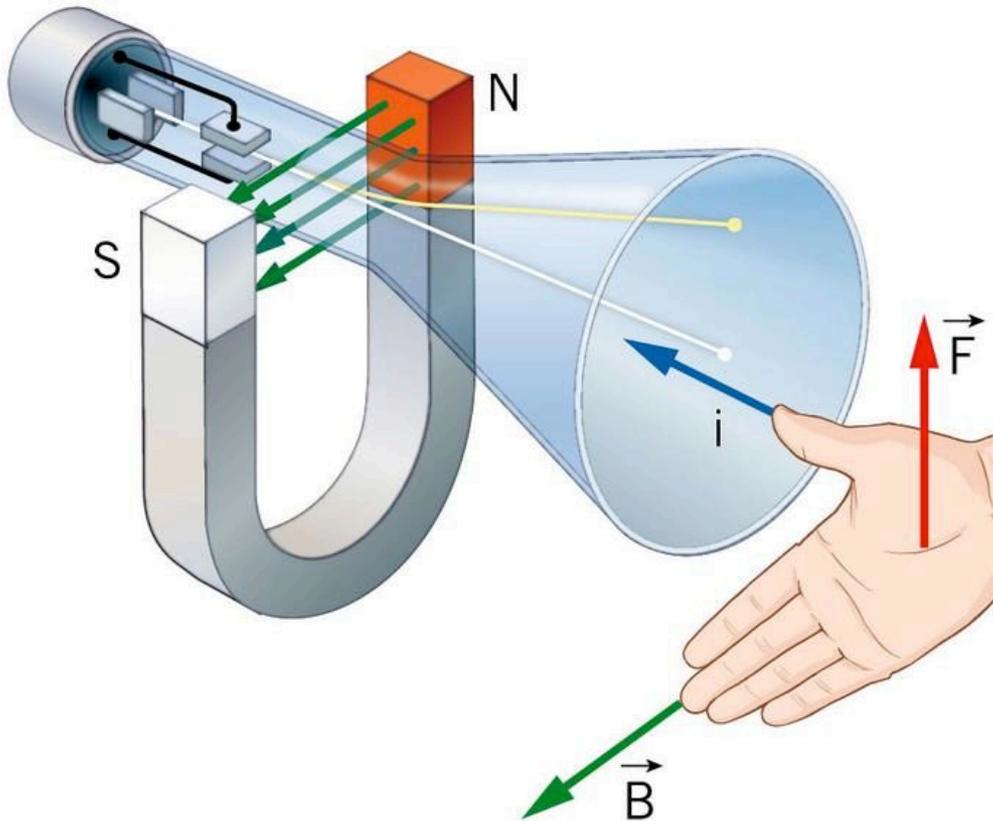
FORZA DI LORENTZ



Abbiamo visto che un campo magnetico agisce con una forza su un filo conduttore percorso da corrente.

Poiché la corrente è costituita da elettroni in movimento, sembra logico pensare che anche un singolo elettrone (o una generica carica) in movimento in un campo magnetico risenta di una forza.

Gli esperimenti confermano questa nostra riflessione.
Infatti:



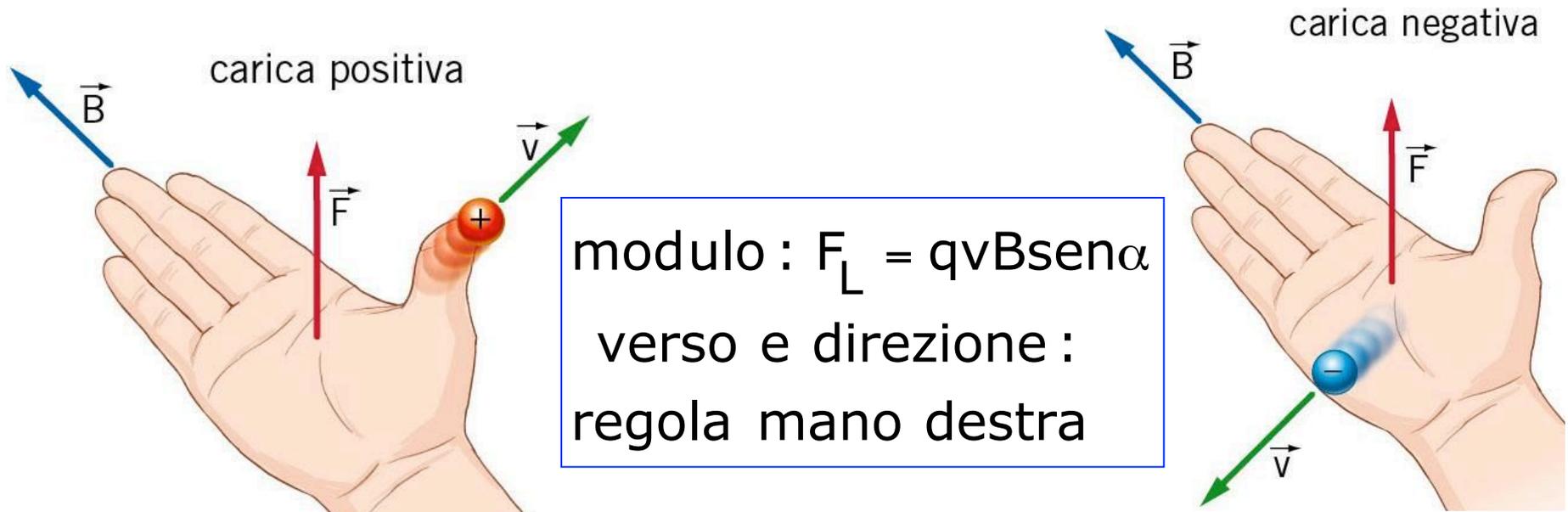
Si osserva che il fascio catodico (fatto di elettroni) è deviato da un campo magnetico **B** con la stessa regola della mano destra che vale per un filo.

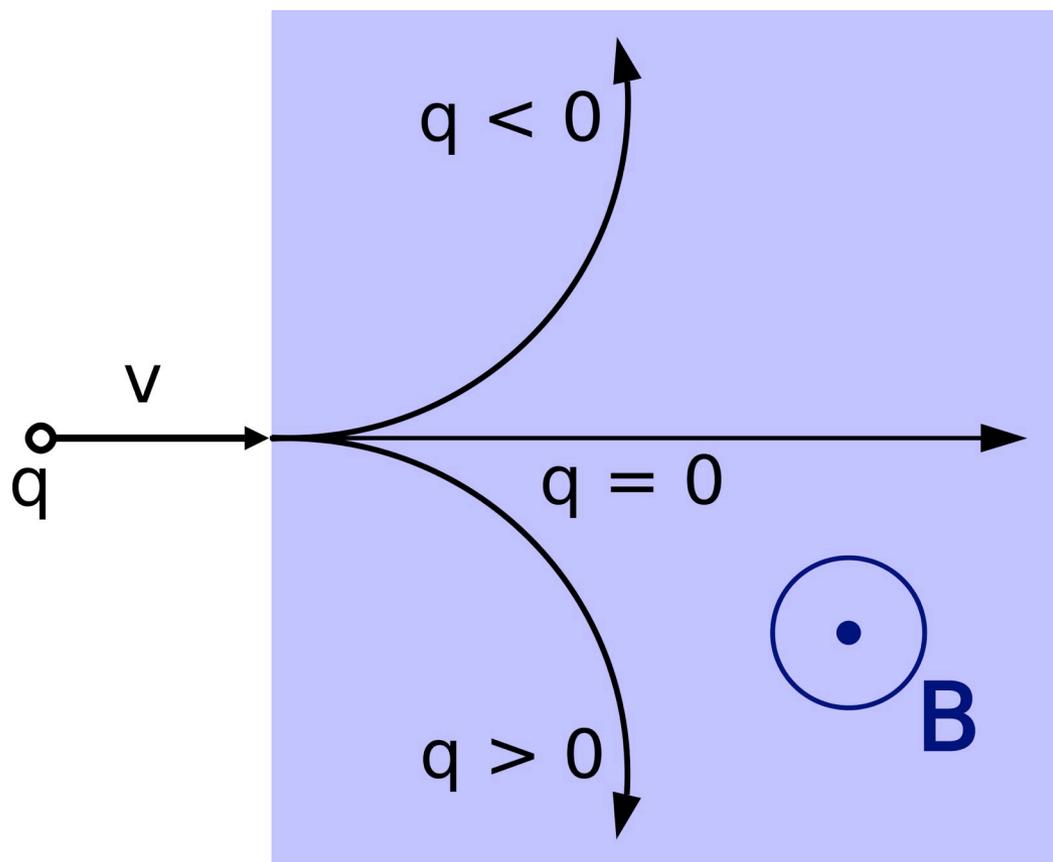
Conclusione:

Forza di Lorentz

Su una qualsiasi particella di carica q in moto con velocità \mathbf{v} in un campo magnetico \mathbf{B} agisce una forza data dal prodotto vettoriale:

$$\vec{F}_L = q\mathbf{v} \otimes \mathbf{B}$$

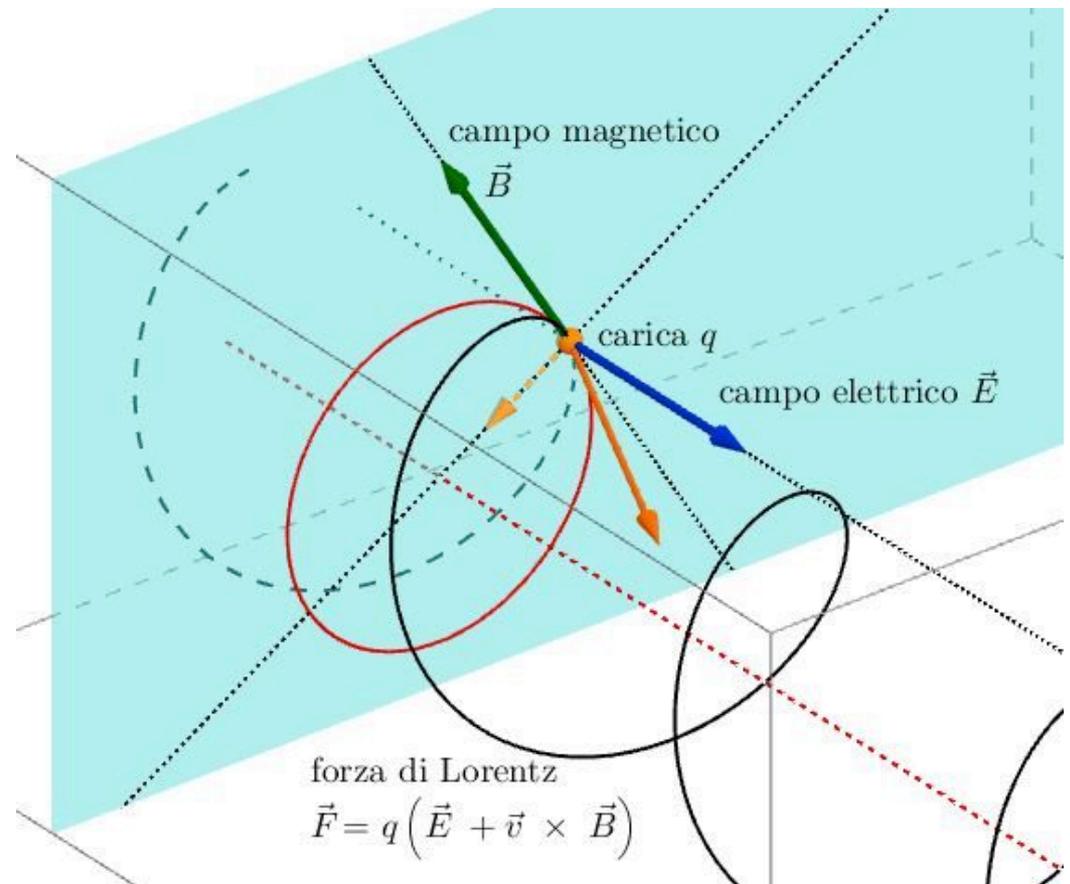




Esempio: deflessione subita da una particella carica che entra in una zona sede di campo magnetico perpendicolare al piano della lavagna con verso uscente.

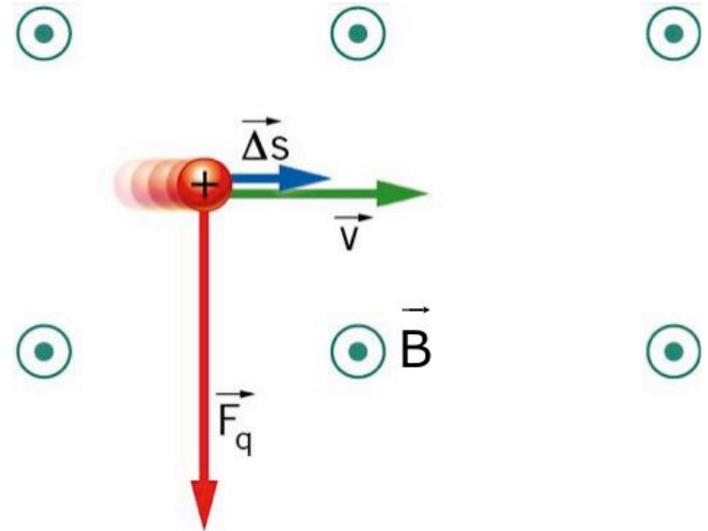
Se la regione di spazio, in cui si muove la carica q con velocità \mathbf{v} , è sede, oltre del campo magnetico \mathbf{B} , anche di un campo elettrico \mathbf{E} , la forza di Lorentz che si esercita sulla carica è data da:

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \otimes \vec{B})$$



MOTO DI UNA CARICA IN UN CAMPO MAGNETICO UNIFORME

La forza di Lorentz, essendo in ogni istante perpendicolare alla velocità e quindi anche allo spostamento della particella, non compie alcun lavoro $W=0$.

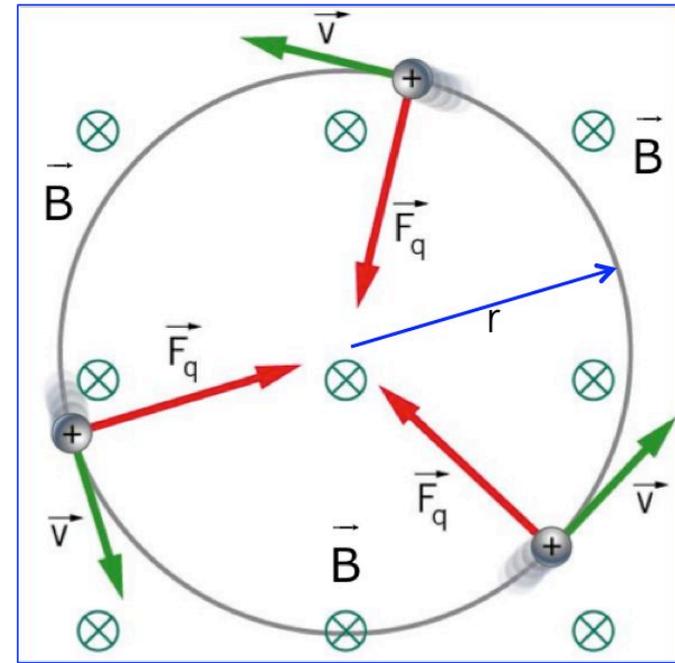


Per il teorema dell'energia cinetica $W = \Delta K = 0$, quindi:

L'energia cinetica di una particella dotata di carica elettrica in moto in un campo magnetico è costante, per cui è costante anche il modulo della velocità.

La forza di Lorentz non modifica il modulo del vettore velocità, ma modifica direzione e verso.

Sotto le condizioni dette, la carica puntiforme q si muove di moto circolare uniforme: istante per istante la forza di Lorentz (che svolge il ruolo della forza centripeta) è diretta verso il centro della traiettoria circolare (regola mano destra).



Calcoliamo il raggio della traiettoria circolare.

Poiché la forza di Lorentz è perpendicolare alla velocità ($\alpha=90^\circ$) e svolge il ruolo di forza centripeta, per il 2° principio della dinamica otteniamo:

$$F_L = qvB = ma_c \xrightarrow{a_c = v^2/r} r = \frac{mv}{qB}$$

Una carica elettrica, immessa in un campo magnetico uniforme perpendicolarmente alle linee di forza, si muove di moto circolare uniforme nel piano perpendicolare al campo. Il raggio della traiettoria, essendo m, v, B, q grandezze costanti, non varia:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Per un moto circolare uniforme si ha che:

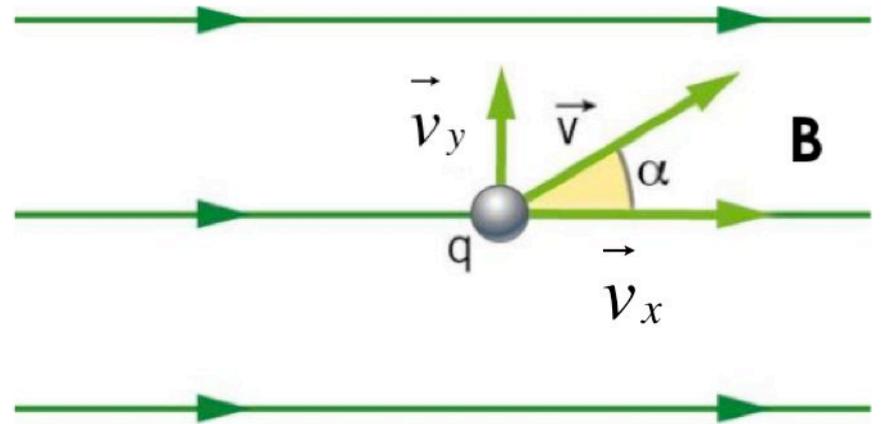
$$v = \frac{2\pi r}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi r}{v}$$

Quindi, nota l'espressione di r , il moto della carica si svolge con periodo e frequenza:

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \xrightarrow{f=1/T} f = \frac{qB}{2\pi m}$$

T ed f non dipendono da r .

Che succede alla traiettoria della particella carica se la sua velocità \mathbf{v} forma un angolo qualsiasi con il campo magnetico \mathbf{B} ?



Lungo la direzione di \mathbf{v}_x non agisce nessuna forza magnetica ($\alpha = 0^\circ$), e, per il 1° principio della dinamica, in questa direzione il moto della carica è rettilineo uniforme.

Invece, essendo \mathbf{v}_y perpendicolare al campo \mathbf{B} , si produce una forza magnetica che cambia continuamente direzione a \mathbf{v}_y , lasciandone invariato il modulo (caso visto in precedenza).

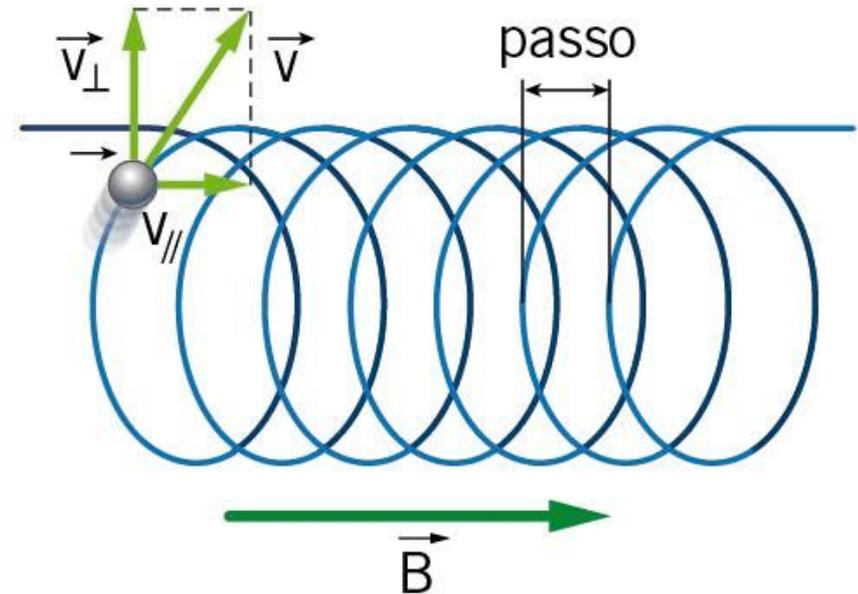
Il moto della carica puntiforme è la sovrapposizione di:

- un moto rettilineo uniforme, con velocità \mathbf{v}_x nella direzione parallela a \mathbf{B} ;
- un moto circolare uniforme, con velocità \mathbf{v}_y nel piano perpendicolare a \mathbf{B} .

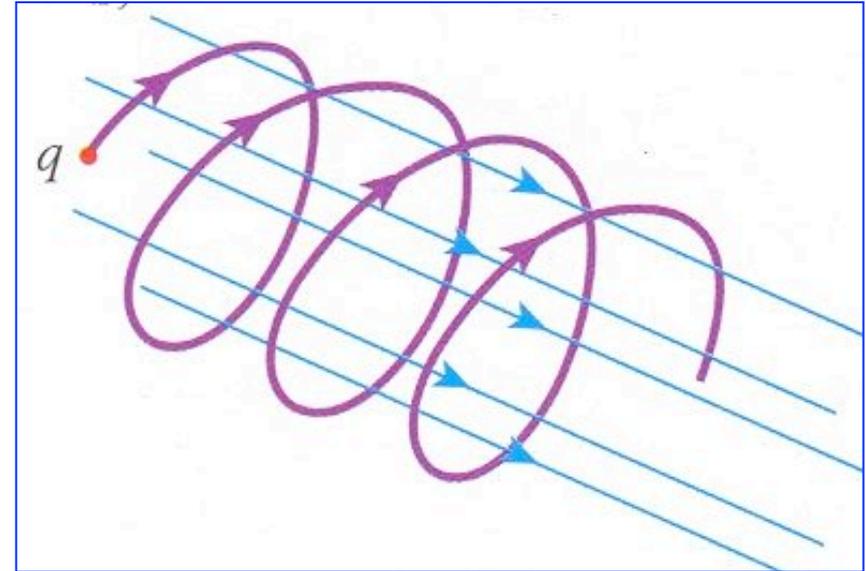
La sovrapposizione dei due moti è un'elica cilindrica a passo costante.

Il raggio dell'elica è dato da:

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

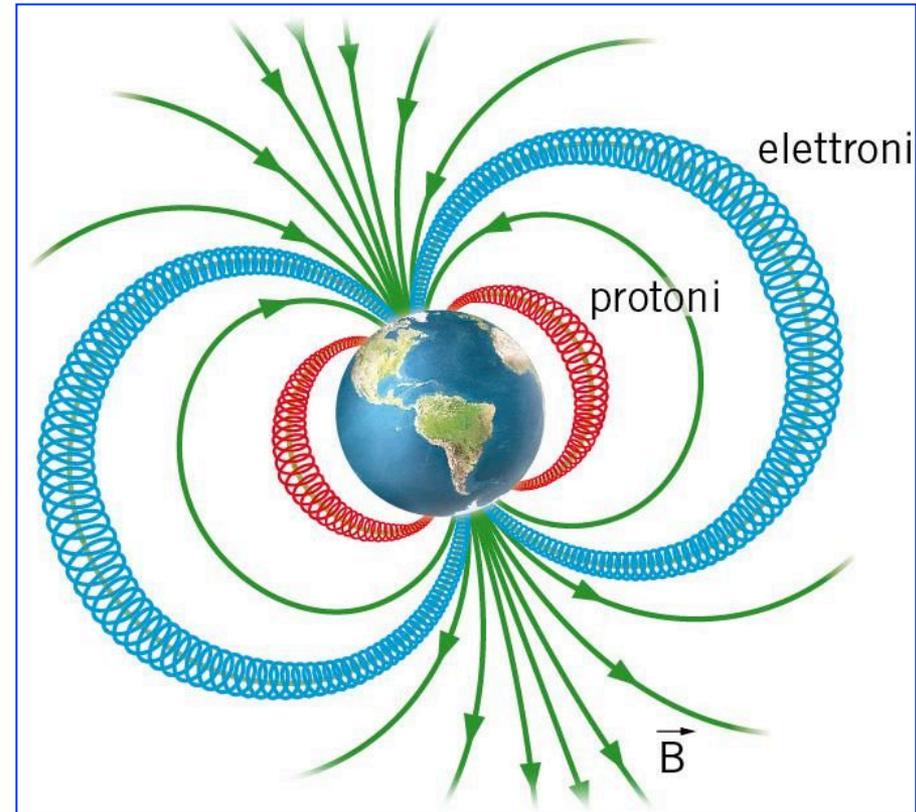


In definitiva la particella, ruotando con moto circolare uniforme intorno alla direzione del campo magnetico e allo stesso tempo avanzando con moto rettilineo uniforme lungo quella stessa direzione, descrive un'elica cilindrica con asse parallelo al campo.



Se il campo magnetico non è uniforme, la traiettoria delle particelle cariche è un'elica incurvata.

Esempio: le particelle cariche, provenienti dal Sole, rimangono intrappolate nel campo magnetico terrestre e contribuiscono a formare le **fasce di van Allen**.





Quando queste particelle, che sono molto energetiche, colpiscono le molecole dell'atmosfera, possono provocare il fenomeno delle aurore boreali.

Il fenomeno si osserva alle alte latitudini, dove le linee di forza sono più dense (aurora boreale all'emisfero nord e l'aurora australe nell'emisfero Sud). L'emissione di luce è dovuta al fatto che le particelle cariche ionizzano ed eccitano le molecole dell'aria. Nelle aurore prevale il colore verde della luce emessa dagli atomi di ossigeno e il rosso emesso dall'azoto.

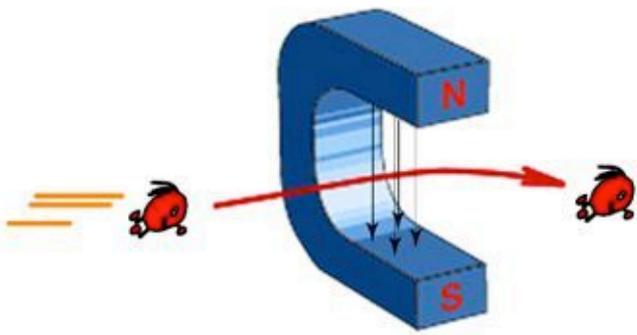
Acceleratore di particelle

E' una macchina il cui scopo è quello di produrre fasci di ioni o particelle subatomiche (elettroni, positroni, protoni, antiprotoni etc.) con "elevata" energia cinetica.

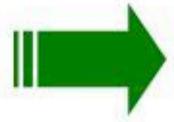
Tali macchine vengono usate per: scopi industriali (sterilizzazioni); medici (produzione di isotopi radioattivi per la cura di tumori); studio della struttura dei materiali; fisica delle particelle (studiare le particelle elementari).

I metodi per accelerare particelle sono basati sull'uso di campi elettrici e magnetici: i campi elettrici accelerano le particelle; i campi magnetici curvano le particelle.

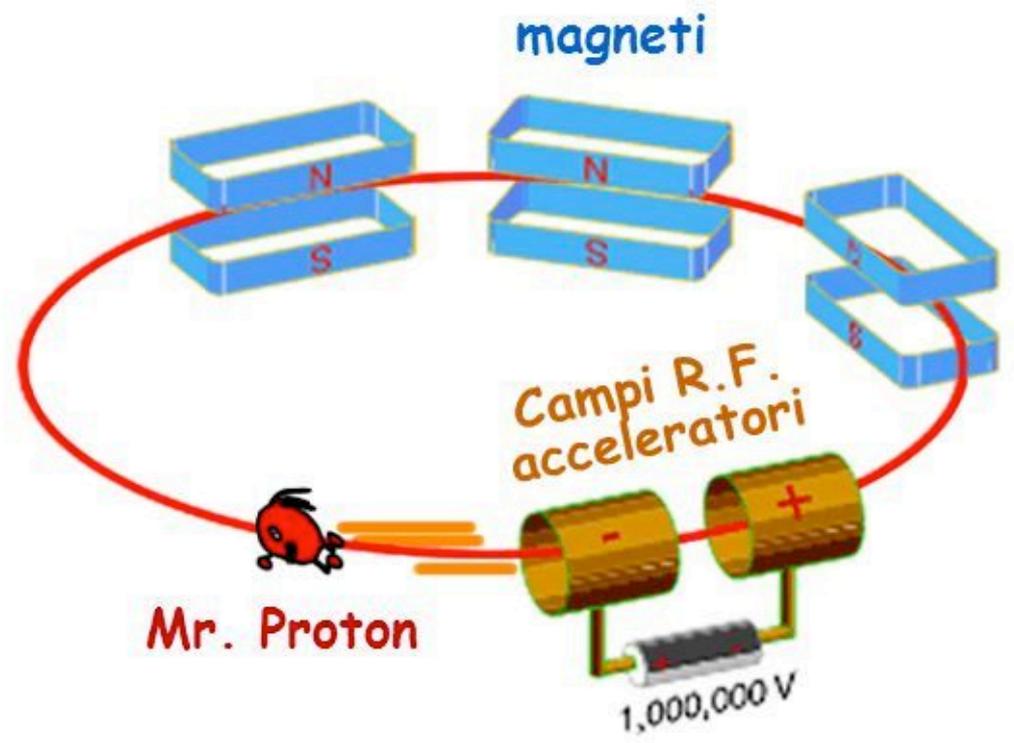
Deflessione (campi magnetici)



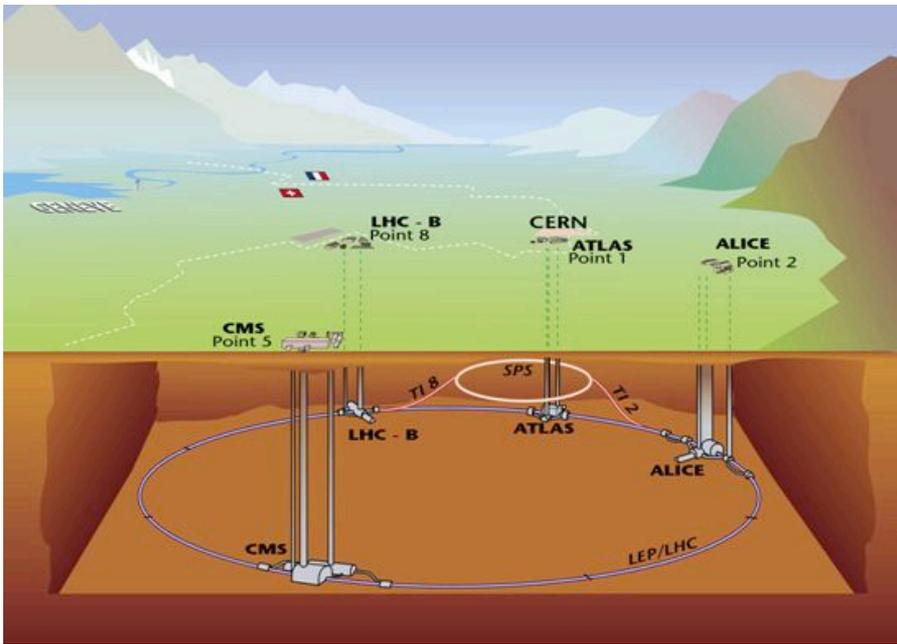
+



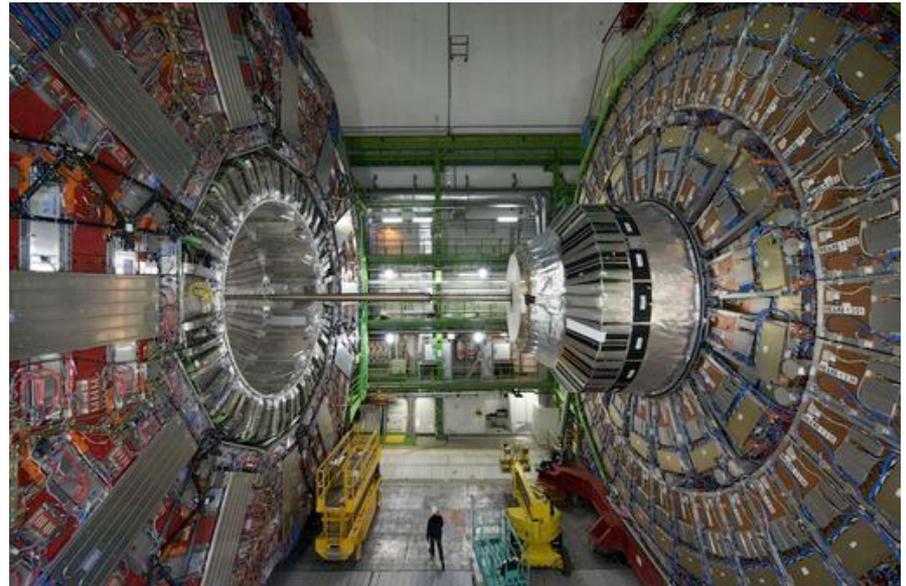
Accelerazione (campi elettrici)



Mr. Proton



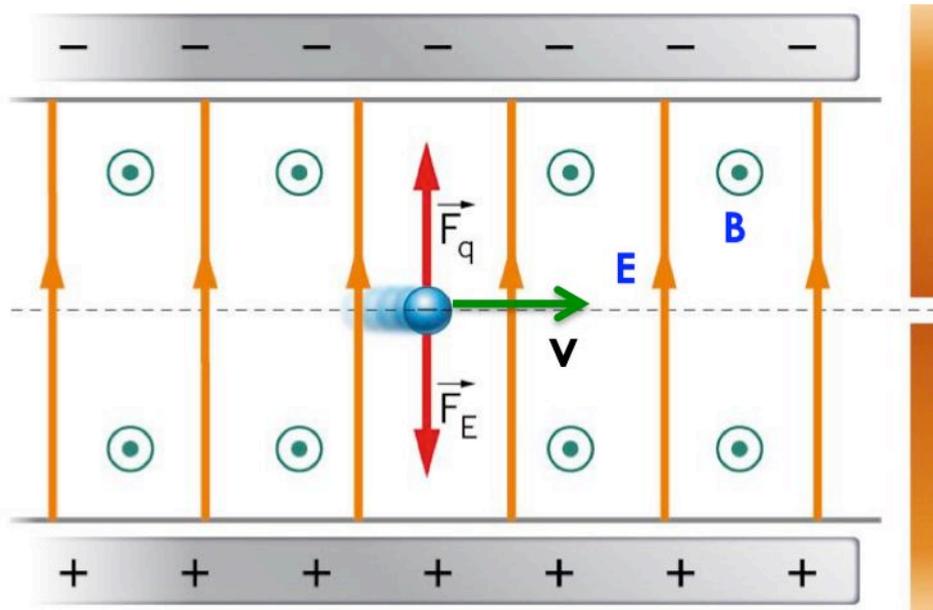
CERN



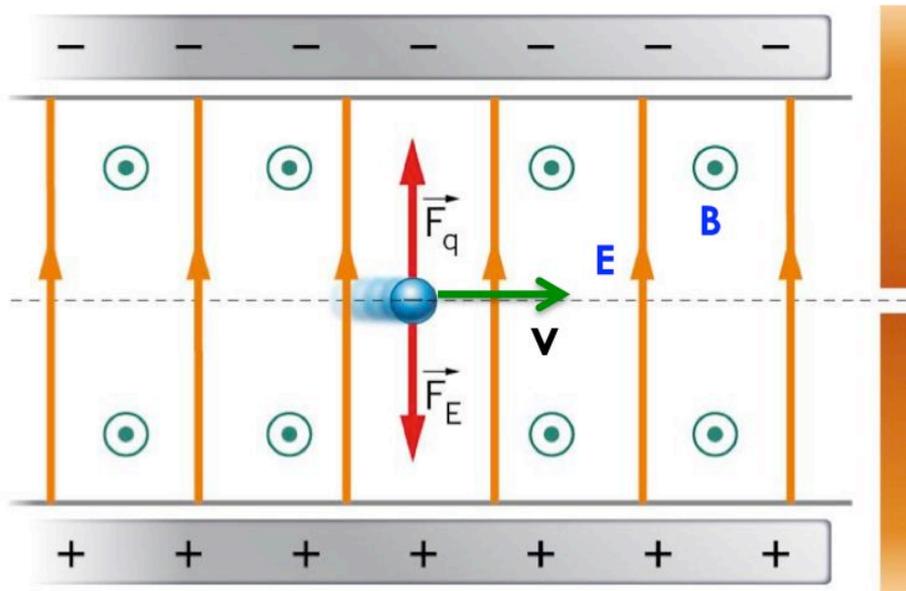
FORZA ELETTRICA E MAGNETICA

Analizziamo due fenomeni in cui agiscono contemporaneamente, su una carica puntiforme, sia un campo elettrico che un campo magnetico.

Selettore di velocità



Le linee di campo elettrico vanno dall'armatura positiva a quella negativa; Le linee di campo magnetico sono perpendicolari alla pagina e uscenti da essa.



Su un elettrone il campo elettrico presente nel condensatore esercita una forza F_E diretta verso il basso. Sulla stessa carica agisce la forza di Lorentz F_q dovuta al campo magnetico.

Per la regola della mano destra, tale forza è diretta verso l'alto. **Quindi le due forze si oppongono l'una all'altra.**

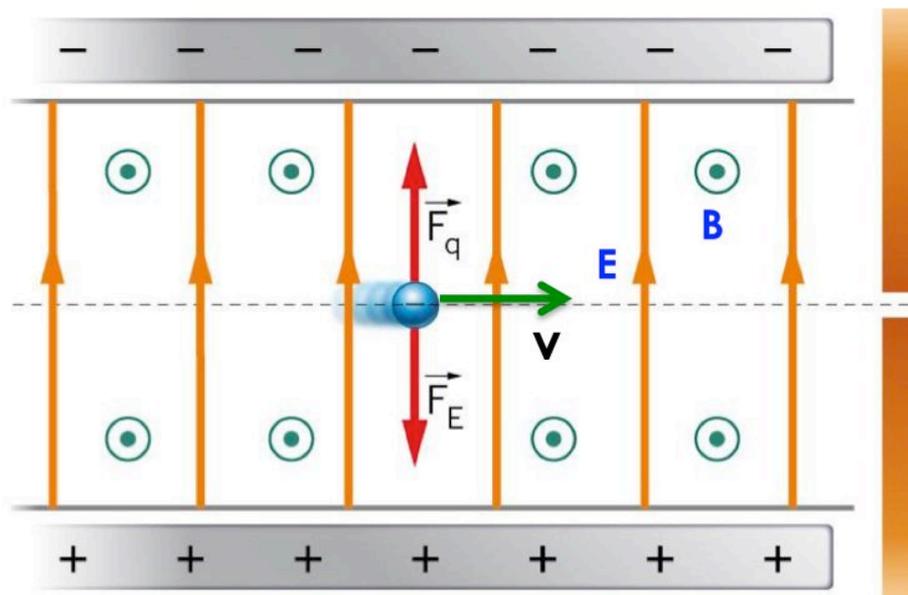
In particolare, se F_E e F_q hanno lo stesso modulo, l'elettrone risente di una forza totale nulla: per il 1° principio della dinamica, esso si muove di moto rettilineo uniforme, passando per il foro praticato nello schermo che si trova alla fine del condensatore.

Ossia:

$$F_E = F_q \Rightarrow eE = evB \rightarrow$$

$$v = \frac{E}{B}$$

- Se tutte le particelle del fascio, di cui fa parte l'elettrone, hanno la stessa velocità v , possiamo misurare tale velocità, trovando quali valori di E e di B lasciano il fascio non deviato.
- Se il fascio contiene particelle che hanno diverse velocità, passano attraverso il foro praticato nello schermo soltanto le particelle che hanno il valore di v dato dalla formula precedente.



Infatti, per le particelle più lente la forza elettrica prevale su quella magnetica, generando una deflessione nel verso di F_E .

Su quelle più veloci, si esercita una forza magnetica più intensa, per cui sono deviate nel verso di F_q .

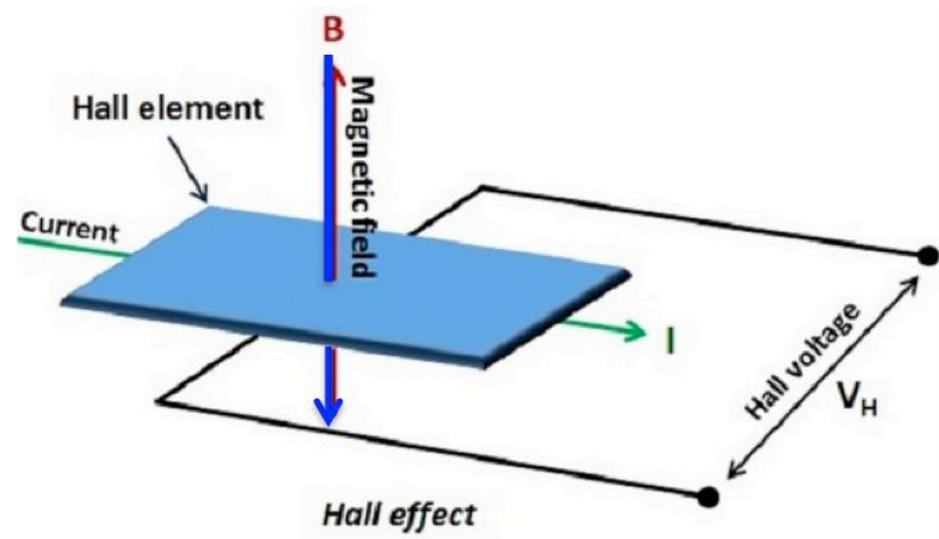
Soltanto quelle della velocità voluta restano indeflesse e passano al di là dello schermo forato.

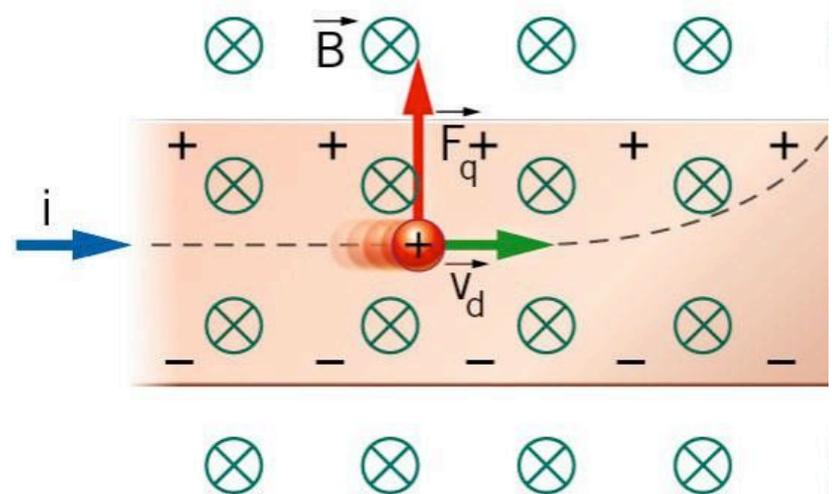
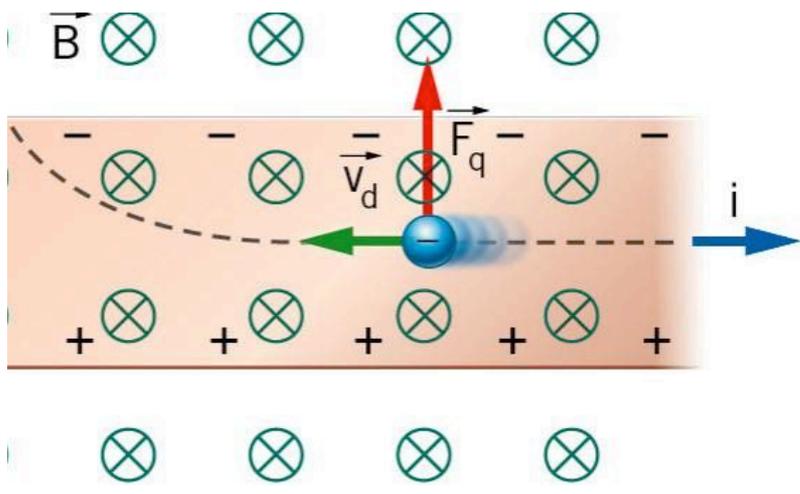
Per questa ragione il dispositivo appena descritto è detto **selettore di velocità**.

Effetto Hall

Un fenomeno per certi versi analogo al selettore di velocità, avviene quando si pone in un campo magnetico una lamina metallica percorsa da corrente, in modo che la direzione della corrente sia perpendicolare a quella del campo magnetico.

Consideriamo il caso in cui la corrente scorra verso destra e che il campo \mathbf{B} , perpendicolare al disegno, entri nella pagina.





Sugli elettroni agisce la forza di Lorentz (regola mano destra), che tende a spostarli verso l'alto, e il bordo si carica negativamente, mentre quello inferiore si carica positivamente.

Se la corrente fosse trasportata da cariche positive, la forza di Lorentz sposterebbe anche queste verso l'alto, caricando positivamente il bordo, e quello inferiore risulterebbe carico negativamente.

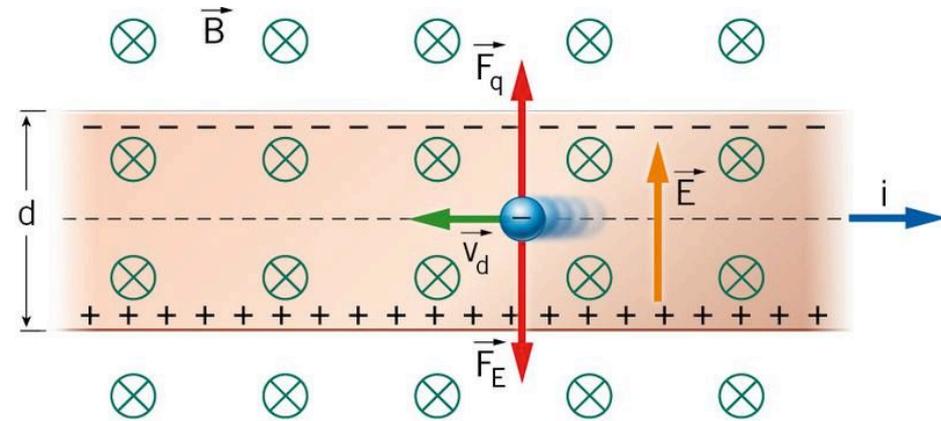
La ddp fra la parte superiore e la parte inferiore della lamina è nota come **fem di Hall**, il cui segno dipende dal segno dei portatori di carica che si muovono all'interno del metallo.

Grazie all'effetto Hall è stato possibile accertare che nei conduttori metallici la corrente elettrica è costituita da un flusso di elettroni, mentre invece, in alcuni semiconduttori è dovuta allo spostamento di cariche positive.

Infatti, Hall verificò che: **la differenza di potenziale osservata era quella che si prevede nel caso di portatori di carica negativa.**

Ricaviamo la relazione per la fem di Hall.

La separazione delle cariche negative verso l'alto della lamina e di quelle positive verso il basso crea un campo elettrico E_H che tende a spingere gli elettroni verso il basso



A un certo punto si crea una situazione di equilibrio: la forza elettrica equilibra quella magnetica e gli elettroni non sono più deviati:

$$F_q = F_E \Rightarrow ev_d B = eE_H \quad \text{da cui} \quad E_H = v_d B$$

v_d =velocità di deriva degli elettroni

Ricordando la relazione tra campo elettrico e potenziale elettrico, la **tensione di Hall** ΔV_H che si raggiunge nella situazione di equilibrio è data da:

$$\Delta V_H = E_H d = d v_d B$$

d =spessore lamina; v_d =velocità deriva elettroni; E_H =campo elettrico di Hall

La tensione di Hall ΔV_H è proporzionale al campo magnetico. Per questo motivo **l'effetto Hall permette misure precise dell'intensità del campo magnetico a partire dalla misura, molto più facile, di una ddp.**

APPLICAZIONI SPERIMENTALI: SPETTROMETRO DI MASSA

Le conoscenze sul moto delle cariche elettriche nei campi magnetici possono essere sfruttate per ottenere importanti informazioni sperimentali sulle particelle elementari.

Esperimento di Thomson

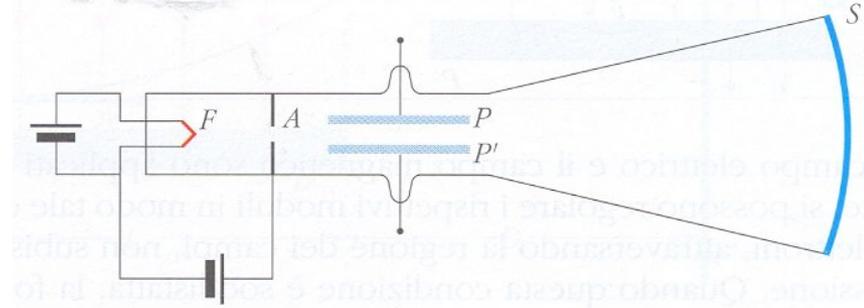
Il fisico inglese **Joseph Thomson (1856-1940)** è considerato lo scopritore dell'elettrone grazie a un esperimento del 1897, in cui riuscì a misurare il rapporto e/m (carica specifica dell'elettrone) fra la carica e la massa delle particelle costituenti i raggi catodici, ossia gli elettroni.

Nelle applicazioni moderne, si preferisce utilizzare un apparato sperimentale un pò diverso da quello utilizzato da Thomson.

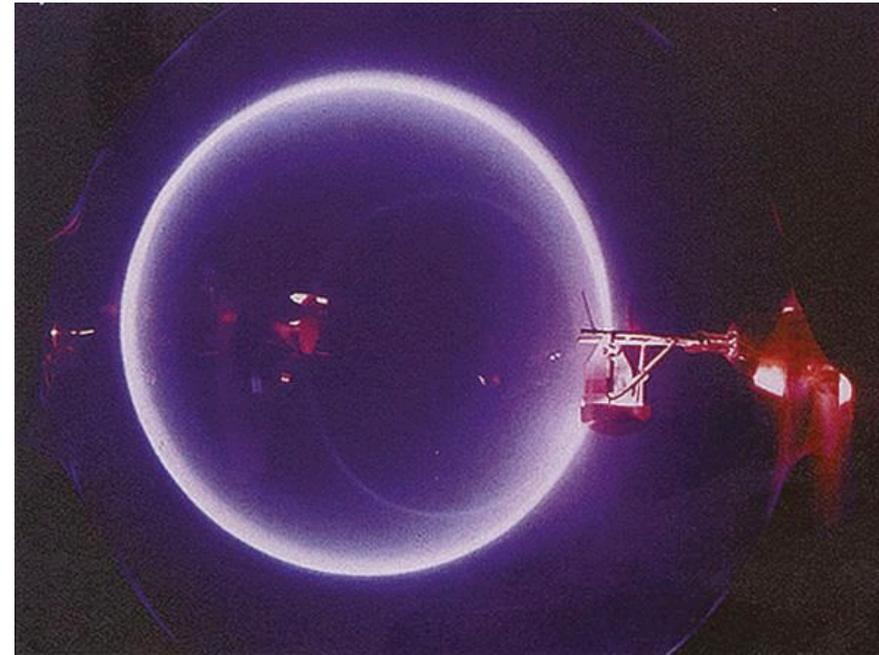
Gli elettroni sono emessi per effetto termoionico, con velocità iniziale trascurabile, da un cannone elettronico ai cui capi è applicata una ddp ΔV .

Il fascio di elettroni è reso visibile grazie a un gas a bassa pressione.

Tubo a raggi catodici utilizzato da Thomson



Apparato moderno



Per il principio di conservazione dell'energia si ha:

$$K = U \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = e\Delta V \rightarrow v^2 = \frac{2e\Delta V}{m}$$

Una volta usciti dal cannone elettronico, gli elettroni entrano in un campo magnetico \mathbf{B} noto che li costringe a descrivere una circonferenza di raggio r (moto di una carica in un campo magnetico uniforme):

$$r = \frac{mv}{eB}$$

che può essere scritta come:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{rB} \Rightarrow \left(\frac{e}{m}\right)^2 = \frac{v^2}{r^2B^2}$$

Sostituendo al posto di v^2 la relazione precedente, si ottiene l'espressione che cercavamo:

$$\frac{e}{m} = \frac{2\Delta V}{r^2 B^2}$$

Carica specifica
dell'elettrone

Essendo ΔV , r , B quantità misurabili, il valore che si ottiene per la carica specifica dell'elettrone è:

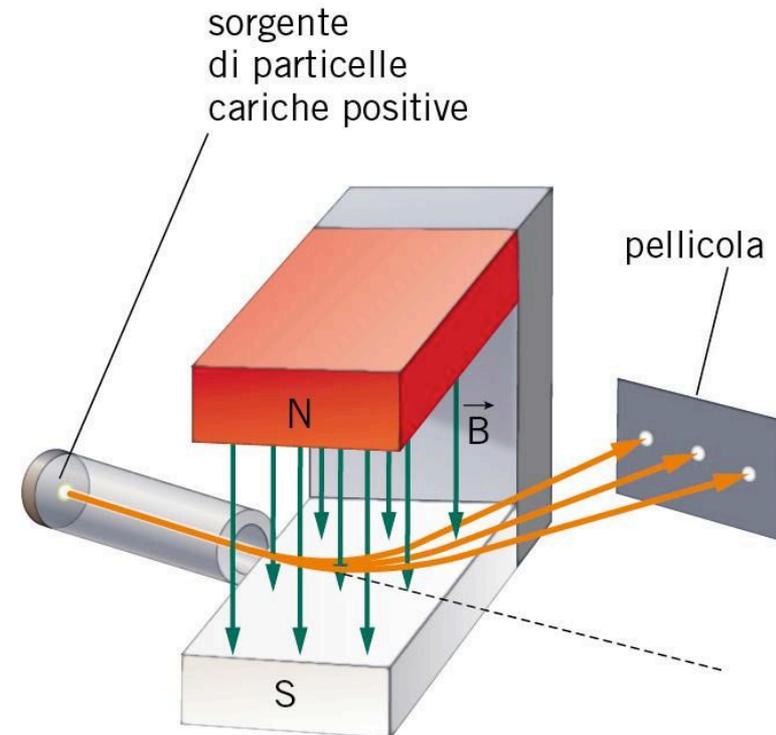
$$\frac{e}{m} = (1,758820150 \pm 0,000000044) \cdot 10^{11} \text{ C / kg}$$

Spettrometro di massa

A parità di v , q e B , i raggi delle circonferenze descritte dalle particelle, sono direttamente proporzionali alla massa m delle particelle.

Facciamo entrare un fascio, composto da particelle che hanno tutte la stessa velocità (selettore di velocità) e la stessa carica, ma masse diverse, in direzione perpendicolare a un campo magnetico.

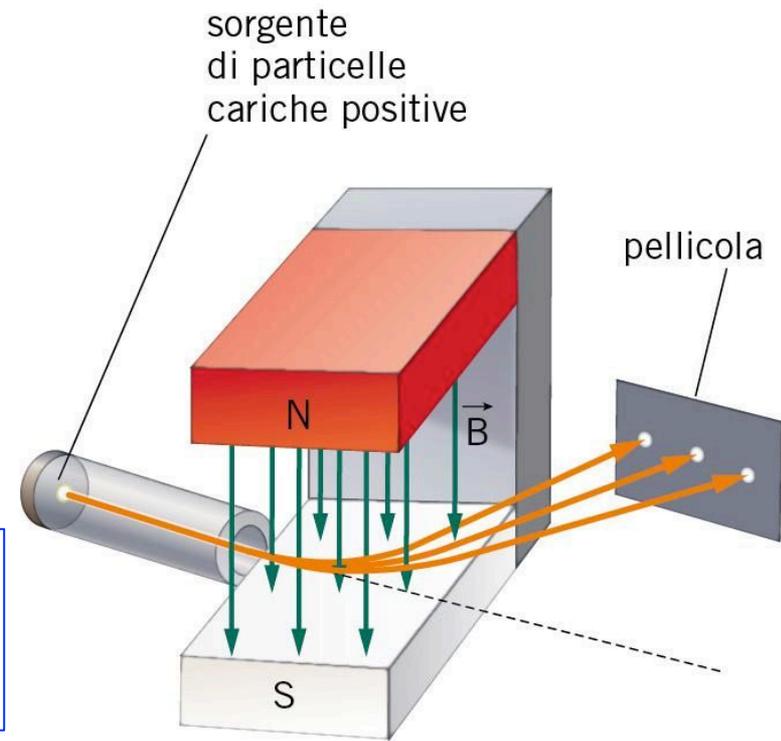
$$r = \frac{mv}{qB}$$



La forza di Lorentz suddivide il fascio in diverse componenti che descrivono traiettorie con raggi diversi, uno per ogni valore della massa presente nel fascio.

Quali informazioni è possibile ricavare da questo esperimento?

- ❑ contare quanti tipi di particelle con masse diverse sono contenute nel fascio;
- ❑ misurare la massa di ciascun tipo di particelle a partire dalla misura di r , v e B ;
- ❑ determinare la presenza in percentuale di ogni tipo di particella.



Grazie allo spettrometro di massa, è possibile misurare anche la carica specifica q/m degli ioni:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{rB}$$

Operando con gas chimicamente puri, si sono trovati diversi valori della carica specifica degli ioni, corrispondenti alla stessa carica ma a diversa massa.

Si è concluso così che esistono elementi chimicamente identici, aventi lo stesso numero atomico, ma diversa massa atomica, chiamati **isotopi**.