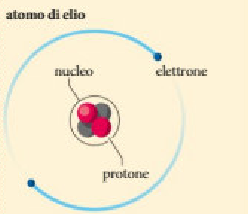
# Le formule

Formule in 3 minuti

## La carica elettrica




**La carica elettrica** è una proprietà delle particelle che compongono gli atomi:
- gli elettroni hanno carica elettrica negativa;
- i protoni hanno carica elettrica positiva, uguale in valore assoluto e opposta a quella degli elettroni;
- i neutroni sono privi di carica elettrica.

Solo gli elettroni possono passare da un atomo a un altro e transitare da un corpo a un altro:
- un corpo è carico negativamente quando ha più elettroni che protoni;
- è carico positivamente quando ha meno elettroni che protoni.

La mobilità della carica elettrica distingue i conduttori dagli isolanti:
- i materiali conduttori lasciano fluire la carica;
- i materiali isolanti la trattengono.

→ p. 119

$e = 1{,}6022 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$

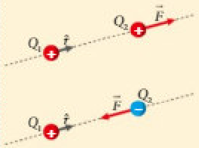
**L'unità di misura della carica elettrica** è il coulomb (C). La carica elettrica si presenta sempre come un multiplo positivo o negativo della carica elementare $e$, valore assoluto della carica dell'elettrone e del protone, che è 19 ordini di grandezza più piccola di un coulomb..

→ p. 121

## La forza elettrica nel vuoto

$$\vec{F} = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}\hat{r}$$

con $k_0 = 8{,}99 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$ nel vuoto




**La legge di Coulomb**: due cariche puntiformi $Q_1$ e $Q_2$ separate da una distanza $r$ interagiscono con una forza elettrica $\vec{F}$ diretta lungo la congiungente, direttamente proporzionale a $Q_1$ e a $Q_2$ e inversamente proporzionale al quadrato di $r$; questa forza è repulsiva se le cariche hanno segni concordi (entrambe positive o entrambe negative) ed è attrattiva se le cariche hanno segni discordi.

→ p. 126-127

$$F = k_0 \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

con $k_0 = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ nel vuoto

e con $\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N \cdot m^2)}$

**Il modulo della forza elettrica** tra due cariche puntiformi $Q_1$ e $Q_2$ poste alla distanza reciproca $r$ è uguale al prodotto dei valori assoluti di $Q_1$ e $Q_2$, diviso per $r^2$ e moltiplicato per la costante di proporzionalità $k_0$.
Il valore assunto da $k_0$ nel caso in cui le cariche siano nel vuoto è legato alla costante dielettrica del vuoto $\varepsilon_0$.

→ p. 127-128



## La forza elettrica in un isolante

$$\varepsilon_r = \frac{F_0}{F}$$

**La costante dielettrica relativa** $\varepsilon_r$ di un isolante è il rapporto, sempre maggiore di 1, tra il modulo $F_0$ della forza con cui due cariche elettriche interagiscono nel vuoto e il modulo $F$ della forza con cui, a parità di altre condizioni, esse interagiscono nell'isolante.

→ p. 134

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

con $\varepsilon = \varepsilon_0\,\varepsilon_r$

**Il modulo della forza elettrica in un isolante** si ottiene dalla formula che vale per il vuoto sostituendo alla costante dielettrica del vuoto $\varepsilon_0$ la costante dielettrica assoluta $\varepsilon$ dell'isolante, uguale al prodotto tra $\varepsilon_0$ e $\varepsilon_r$.

→ p. 135

## Il campo elettrico di una carica puntiforme e di un sistema di cariche

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

**Il campo elettrico** $\vec{E}$ in un punto è il rapporto tra la risultante $\vec{F}$ delle forze elettriche che agiscono su una carica di prova $q$ posta in quel punto e la carica stessa. L'unità di misura del campo elettrico è il newton fratto coulomb (N/C). → p. 153

$$\vec{E} = k_0 \frac{Q}{r^2}\hat{r} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\hat{r}$$

con $k_0 = 8{,}99 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$

ed $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N \cdot m^2)}$

$$\vec{E}_{\text{mezzo}} = \frac{k_0}{\varepsilon_r}\frac{Q}{r^2}\hat{r} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r^2}\hat{r}$$

con $\varepsilon = \varepsilon_0\,\varepsilon_r$

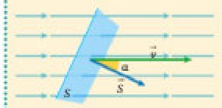
**Il campo elettrico di una carica puntiforme**:
- è direttamente proporzionale alla carica e inversamente proporzionale al quadrato della distanza da essa;
- ha direzione radiale rispetto alla carica, con verso uscente se la carica è positiva ed entrante se la carica è negativa.

In un mezzo isolante con costante dielettrica relativa $\varepsilon_r$, il campo elettrico $\vec{E}_{\text{mezzo}}$ è ridotto del fattore $\varepsilon_r$ rispetto al campo elettrico $\vec{E}$ che si ha nel vuoto a parità di altre condizioni. → p. 155

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n$$

**Il campo elettrico totale** generato da un insieme di cariche in un punto è la somma vettoriale dei campi che le cariche produrrebbero a una a una in quel punto se le altre non ci fossero. → p. 156

## Il flusso del campo elettrico e il teorema di Gauss

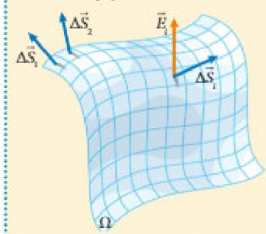



$$\Phi_S(\vec{v}) = \vec{v} \cdot \vec{S} = Sv\cos\alpha$$

**Il flusso di un campo vettoriale uniforme attraverso una superficie piana** è il prodotto scalare del vettore $\vec{v}$ che rappresenta il campo per il vettore $\vec{S}$ che rappresenta la superficie. Il vettore $\vec{S}$ è perpendicolare alla superficie in verso arbitrario e ha modulo uguale all'area $S$ della superficie. → p. 163

$$\Phi_S(\vec{E}) = \vec{E} \cdot \vec{S}$$

$$\Phi_\Omega(\vec{E}) = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{S}_i$$




**Il flusso di un campo elettrico uniforme attraverso una superficie piana** è il prodotto scalare del vettore campo elettrico $\vec{E}$ e del vettore superficie $\vec{S}$.
**Il flusso del campo elettrico** nel caso generale si calcola come somma di $n$ contributi:
- si suddivide la superficie $\Omega$ in $n$ parti, ciascuna così piccola da essere circa piana e da avere su di sé un campo elettrico $\vec{E}_i$ (per $i = 1, 2, \ldots, n$) circa uniforme;
- si assegnano versi concordi agli $n$ vettori superficie $\Delta\vec{S}_i$ che rappresentano le singole parti;
- si determinano gli $n$ contributi nella forma $\Delta\Phi_i(\vec{E}_i) = \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{S}_i$.

L'unità di misura del flusso del campo elettrico è il $\mathrm{N \cdot m^2/C}$. → p. 163

$$\Phi_\Omega(\vec{E}) = \frac{Q_{\text{tot}}}{\varepsilon_0}$$

**Il teorema di Gauss per il campo elettrico**: il flusso $\Phi_\Omega(\vec{E})$ del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è uguale al rapporto tra la carica totale $Q_{\text{tot}}$ contenuta all'interno della superficie e la costante dielettrica del vuoto $\varepsilon_0$. → p. 164



## Il campo elettrico di un piano infinito di carica

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S}$$

**La densità superficiale di carica** $\sigma$ caratterizza una carica elettrica distribuita su una superficie. È definita come la carica $\Delta Q$ di una piccola porzione della superficie divisa per l'area $\Delta S$ di quella porzione ed è misurata in C/m². Se la carica è distribuita in modo uniforme, $\sigma$ non dipende dalla particolare porzione di superficie. → p. 166

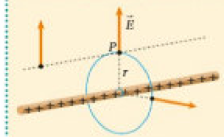
$$E = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0}$$

**Il campo elettrico di un piano infinito uniformemente carico** ha:
- direzione perpendicolare al piano, con verso uscente se il piano ha carica positiva ed entrante se ha carica negativa;
- lo stesso modulo $E$, direttamente proporzionale al valore assoluto di $\sigma$, in tutti i punti che non appartengono al piano. → p. 166

## Il campo elettrico di un filo rettilineo infinito di carica

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta l}$$

**La densità lineare di carica** $\lambda$ caratterizza una carica elettrica distribuita lungo una linea. È definita come la carica $\Delta Q$ di un piccolo tratto della linea divisa per la lunghezza $\Delta l$ di quel tratto ed è misurata in C/m. Se la carica è distribuita in modo uniforme, $\lambda$ è la stessa su qualunque tratto. → p. 170

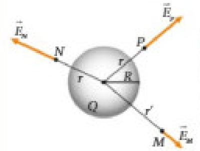



$$E = \frac{|\lambda|}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

**Il campo elettrico di un filo rettilineo infinito uniformemente carico** ha:
- direzione radiale rispetto al filo, con verso uscente se il filo ha carica positiva ed entrante se ha carica negativa;
- modulo direttamente proporzionale al valore assoluto di $\lambda$ e inversamente proporzionale alla distanza $r$ dal filo. → p. 170

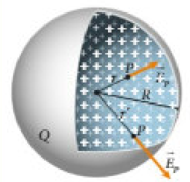
## Il campo elettrico di una distribuzione sferica di carica

$$E = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \quad (r \geq R)$$




**Il campo elettrico all'esterno di una distribuzione di carica con simmetria sferica** è uguale a quello che si avrebbe se tutta la carica fosse concentrata nel centro della distribuzione. → p. 172

$$E = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0 R^3}\, r \quad (r \leq R)$$




**Il campo elettrico all'interno di una sfera omogenea di carica** ha:
- direzione radiale rispetto al centro, con verso uscente se la carica è positiva ed entrante se è negativa;
- modulo direttamente proporzionale alla distanza $r$ dal centro, con costante di proporzionalità che dipende dal valore assoluto della carica totale $Q$ e dalla terza potenza del raggio $R$ della sfera. → p. 173

## La differenza di potenziale elettrico e il potenziale

$$\Delta V = V_B - V_A = -\frac{W_{A\to B}}{q} = \frac{\Delta U}{q}$$

**La differenza di potenziale elettrico ΔV** tra due punti $B$ e $A$:
- è il lavoro della forza elettrica su una carica di prova $q$ che si sposta da $A$ a $B$, cambiato di segno e diviso per $q$;
- è uguale alla variazione di energia potenziale elettrica $\Delta U$ dovuta allo spostamento della carica $q$ divisa per $q$.

L'unità di misura del potenziale elettrico è il volt (V), uguale al joule fratto coulomb. → p. 204

$$V_A = \frac{W_{A\to R}}{q}$$
$$V = \frac{U}{q}$$

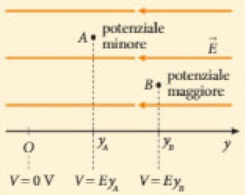
**Il potenziale elettrico $V_A$** di un punto $A$ è il lavoro della forza elettrica su una carica di prova $q$ che si sposta da $A$ a un punto di riferimento $R$, in cui è fissato lo zero del potenziale e dell'energia potenziale elettrica, diviso per $q$.
Il potenziale di ogni punto è uguale al rapporto tra l'energia potenziale elettrica $U$ e $q$. Poiché $U$ è direttamente proporzionale a $q$, $V$ è indipendente da $q$. → p. 205

$$1\ \text{eV} = e\,(1\ \text{V}) = 1{,}6022 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

**L'elettronvolt** (eV) è un'unità di misura dell'energia, uguale al prodotto della carica elementare $e$ per l'unità di potenziale elettrico (1 V). → p. 206

## Il potenziale in un campo elettrico uniforme

$$U = qEy$$
$$V = Ey$$




**In un campo elettrico uniforme $\vec{E}$:**
- l'energia potenziale elettrica $U$, posta uguale a zero quando la carica di prova $q$ è in un punto di riferimento $O$, è uguale al prodotto tra $q$, il modulo di $\vec{E}$ e la coordinata $y$ di $q$ rispetto a un asse antiparallelo a $\vec{E}$;
- il potenziale elettrico $V$ di un punto di coordinata $y$, posto uguale a zero in $O$, è il prodotto del modulo di $\vec{E}$ per $y$. → p. 206

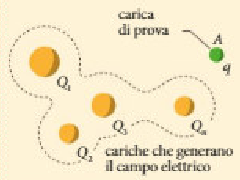
## Il potenziale di una carica puntiforme

$$U = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon r}$$
$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r}$$

**Nel campo elettrico di una carica puntiforme $Q$:**
- l'energia potenziale elettrica $U$, posta uguale a zero quando la carica di prova $q$ è infinitamente lontana da $Q$, è direttamente proporzionale al prodotto $qQ$ (positivo o negativo) e inversamente proporzionale alla distanza reciproca $r$ delle due cariche;
- il potenziale elettrico $V$ di un punto a distanza $r$ da $Q$, posto uguale a zero per $r$ che tende all'infinito, è direttamente proporzionale a $Q$ e inversamente proporzionale a $r$. → p. 207



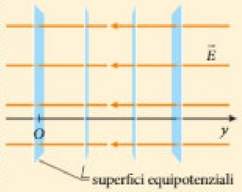
$$V_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\sum_{i=1}^{n}\frac{Q_i}{r_{iA}}$$




**Il potenziale elettrico prodotto da un sistema di cariche puntiformi** in un punto $A$ è la somma algebrica dei potenziali che le singole cariche producono in $A$ indipendentemente dalle altre. → p. 208

## Le superfici equipotenziali


**Una superficie equipotenziale:**
- è il luogo dei punti in cui il potenziale elettrico assume uno stesso valore;
- è perpendicolare in ogni punto alla linea di campo che passa per quel punto. → p. 211




$$E = \frac{\Delta V}{\Delta y}$$

**Il calcolo del campo elettrico dal potenziale:**
- il vettore $\vec{E}$ in un punto è perpendicolare alla superficie equipotenziale che contiene il punto ed è orientato nel verso in cui il potenziale diminuisce;
- se il campo è uniforme, il suo modulo $E$ è il rapporto tra la differenza di potenziale $\Delta V$ tra due punti e la differenza $\Delta y$ delle coordinate dei due punti rispetto a un asse antiparallelo al campo. → p. 212

## La circuitazione del campo elettrico

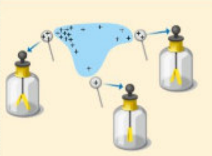
$$\Gamma_{\mathcal{L}}(\vec{E}) = \sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i\cdot\Delta\vec{l}_i$$

**La circuitazione del campo elettrico** lungo una linea $\mathcal{L}$, chiusa e orientata, si calcola come somma di $n$ termini:
- si suddivide $\mathcal{L}$ in $n$ tratti, ciascuno così piccolo da essere circa rettilineo e da avere su di sé un campo elettrico $\vec{E}_i$ (per $i = 1, 2, \ldots, n$) circa uniforme;
- si rappresentano i singoli tratti come spostamenti $\Delta\vec{l}_i$ orientati nel verso di percorrenza di $\mathcal{L}$;
- si addizionano gli $n$ prodotti scalari $\vec{E}_i\cdot\Delta\vec{l}_i$. → p. 215

$$\Gamma_{\mathcal{L}}(\vec{E}) = 0$$

**La circuitazione del campo elettrostatico**, cioè del campo elettrico generato da cariche ferme in equilibrio, è nulla qualunque sia il cammino chiuso e orientato lungo il quale è calcolata. → p. 216

## L'equilibrio elettrostatico di un conduttore



**La carica elettrica in un conduttore** in equilibrio elettrostatico:
- è tutta sulla superficie;
- ha densità maggiore nelle parti più incurvate. → p. 231

$E = \frac{|\sigma|}{\varepsilon_0}$

con $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}\ \frac{C^2}{N \cdot m^2}$

**Il campo elettrico in un conduttore** carico in equilibrio elettrostatico:
- è nullo all'interno;
- è diverso da zero all'esterno;
- è diverso da zero anche nei punti della superficie e in essi è perpendicolare alla superficie.

**Il teorema di Coulomb**: all'equilibrio, il modulo $E$ del campo elettrico in un punto della superficie di un conduttore è direttamente proporzionale al valore assoluto della densità di carica $\sigma$ in quel punto; nel vuoto, la costante di proporzionalità è $1/\varepsilon_0$. → p. 232

$C = \frac{Q}{V_0}$

**Il potenziale di un conduttore** in equilibrio elettrostatico ha lo stesso valore $V_0$ in tutti i punti del conduttore, sia all'interno sia sulla superficie.

**La capacità di un conduttore**:
- è il rapporto tra la carica $Q$ e il potenziale $V_0$ del conduttore;
- è una costante caratteristica del conduttore e non dipende da $Q$ né da $V_0$.

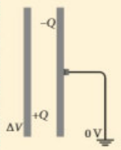
L'unità di misura della capacità è il farad (F), uguale al coulomb fratto volt. → p. 235-239

$V_0 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}$

$C = 4\pi\varepsilon_0 R$

**Una sfera conduttrice**:
- ha potenziale $V_0$ direttamente proporzionale alla carica $Q$ e inversamente proporzionale al raggio $R$;
- ha capacità $C$ direttamente proporzionale a $R$. → p. 239

## Il condensatore




$C = \frac{Q}{\Delta V}$

**Un condensatore** è un sistema di due conduttori, detti *armature*, separati dal vuoto o da un materiale isolante e fatti in modo che, quando uno di essi riceve una carica $Q$, l'altro acquisti, per induzione elettrostatica, una carica $-Q$.

**La capacità di un condensatore** è il rapporto tra $Q$ e la differenza di potenziale $\Delta V$ dell'armatura positiva rispetto a quella negativa. → p. 242-243

$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$

$\Delta V = Ed$

**In un condensatore piano e infinito**:
- le cariche $Q$ e $-Q$ sono distribuite in modo uniforme sulle facce interne delle armature, con densità superficiali $\sigma$ e $-\sigma$;
- il campo elettrico tra le armature è uniforme e perpendicolare alle armature, nel verso che va da quella positiva a quella negativa;
- se tra le armature c'è il vuoto, il modulo $E$ del campo elettrico è uguale a $\sigma$ fratto $\varepsilon_0$;
- la differenza di potenziale $\Delta V$ tra le armature, distanti d l'una dall'altra, è il prodotto di $E$ per $d$. → p. 243

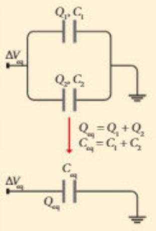
$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$

**La capacità di un condensatore piano** è direttamente proporzionale all'area $S$ della superficie delle armature e inversamente proporzionale alla loro distanza $d$. → p. 244

$C = \varepsilon_r C_0$

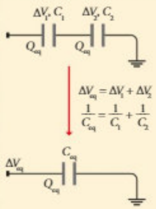
**Un materiale isolante** di costante dielettrica relativa $\varepsilon_r$ che riempie lo spazio tra le armature aumenta la capacità di un condensatore del fattore $\varepsilon_r$: dal valore $C_0$ che a parità di altre condizioni si ha in assenza dell'isolante, al valore $\varepsilon_r C_0$. → p. 245

## Condensatori in parallelo e in serie




$C_{eq} = C_1 + C_2 + \ldots + C_n$

**Due o più condensatori in parallelo** hanno tra le armature una stessa differenza di potenziale, uguale alla differenza di potenziale $\Delta V_{eq}$ tra i terminali del sistema. La loro capacità equivalente $C_{eq}$ è la somma delle singole capacità. → p. 250




$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}$

**Due o più condensatori in serie** hanno una stessa carica $Q_{eq}$, uguale alla carica totale immessa nel sistema. La loro capacità equivalente $C_{eq}$ è il reciproco della somma dei reciproci delle singole capacità. → p. 251





## L'energia di un condensatore

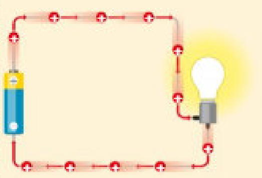
$W_C = \frac{1}{2} Q \Delta V = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{Q^2}{2C}$

**Il lavoro di caricamento** $W_C$ di un condensatore:
- è il lavoro necessario per portare su di esso una carica $Q$ e stabilire tra le sue armature la corrispondente differenza di potenziale $\Delta V$;
- coincide con l'energia immagazzinata dal campo elettrico presente tra le armature;
- è uguale al semiprodotto di $Q$ per $\Delta V$;
- è anche uguale al semiprodotto della capacità $C$ del condensatore per $(\Delta V)^2$ o a $Q^2$ fratto $2C$. → p. 253

$w_{\vec{E}} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2$

**La densità volumica di energia elettrica** $w_{\vec{E}}$ di un condensatore:
- è il rapporto tra $W_C$ e il volume interno del condensatore;
- è uguale al semiprodotto della costante dielettrica assoluta $\varepsilon$ dell'isolante che riempie il condensatore ($\varepsilon = \varepsilon_0$ se il condensatore è vuoto) per il modulo quadrato del campo. → p. 255

## La corrente elettrica



**Un generatore di tensione**:
- mantiene una differenza di potenziale tra il polo «+» e il polo «−»;
- quando fa parte di un circuito crea una *corrente elettrica*, cioè un flusso di carica positiva che va da «−» a «+» al suo interno e da «+» a «−» lungo il resto del circuito.

La carica che fluisce lungo un circuito elettrico è per convenzione positiva: il moto di elettroni che in realtà attraversa i conduttori metallici equivale al moto inverso di altrettante cariche elementari positive. → p. 290

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

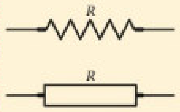
$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$$

**L'intensità di corrente elettrica** $i$ è il rapporto tra la carica $\Delta Q$ che attraversa una sezione trasversale $S$ di un conduttore nel verso convenzionale della corrente in un intervallo di tempo $\Delta t$ e l'intervallo di tempo stesso.
- Il rapporto $\Delta Q/\Delta t$ quando dipende da $\Delta t$, definisce l'*intensità di corrente media* in $\Delta t$.
- Lo stesso rapporto, al tendere di $\Delta t$ a zero, definisce l'*intensità di corrente istantanea* ed è uguale alla derivata, calcolata rispetto all'istante di tempo $t$, della carica $Q(t)$ che passa per $S$ tra l'istante zero e $t$.

Nel SI l'unità di misura dell'intensità di corrente elettrica è l'ampere (A). → p. 291

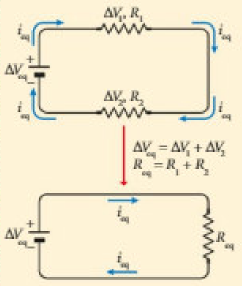
## La resistenza elettrica e le leggi di Ohm

$$i = \frac{\Delta V}{R}$$



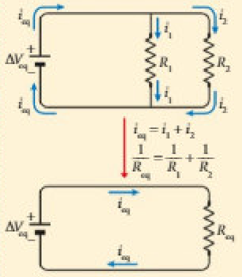

**La prima legge di Ohm**:
- vale per una vasta categoria di conduttori che comprende i metalli e le soluzioni di acidi, basi e sali;
- dice che l'intensità $i$ della corrente che attraversa un conduttore di questa categoria è uguale al rapporto tra la differenza di potenziale $\Delta V$ applicata al conduttore e una costante $R$, detta *resistenza elettrica* e misurata in ohm ($\Omega$).

Ogni componente di circuito elettrico che segue la prima legge di Ohm è chiamato *resistore* e caratterizzato da una particolare resistenza $R$. → p. 293



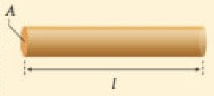

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$$

**Due o più resistori in serie** sono percorsi da una stessa corrente. La loro resistenza equivalente $R_{eq}$ è la somma delle singole resistenze. → p. 295-296




$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

**Due o più resistori in parallelo** hanno tra i capi una stessa differenza di potenziale. Il reciproco della loro resistenza equivalente $R_{eq}$ è la somma dei reciproci delle singole resistenze. → p. 297




$$R = \rho\frac{l}{A}$$

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha\Delta T)$$

con $\rho_{20}$ resistività a 20 °C, $\alpha$ coefficiente di temperatura della resistività e $\Delta T$ differenza di temperatura rispetto ai 20 °C

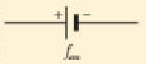
**La seconda legge di Ohm**: la resistenza $R$ di un filo conduttore è direttamente proporzionale alla sua lunghezza $l$ e inversamente proporzionale alla sua area trasversale $A$.

**La resistività $\rho$**:
- è la costante di proporzionalità tra $R$ e $l/A$, caratteristica del materiale di cui è fatto il filo e misurata in $\Omega \cdot m$;
- dipende linearmente dalla temperatura se il materiale è un metallo.

→ p. 300-302

## Generatori di tensione ideali e reali

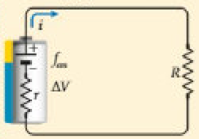
$$f_{em} = \frac{W_g}{q}$$




**La forza elettromotrice** $f_{em}$ di un generatore è il lavoro $W_g$ che compie il generatore per portare una carica positiva $q$ dal polo «−» al polo «+», diviso per $q$. Questa grandezza è misurata in volt.

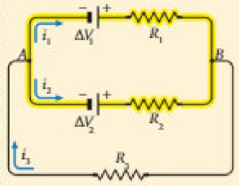
**Un generatore ideale di tensione** mantiene tra i poli una differenza di potenziale sempre uguale alla propria forza elettromotrice $f_{em}$. → p. 302

$$\Delta V = \frac{R}{R + r} f_{em}$$




**Un generatore reale di tensione** di forza elettromotrice $f_{em}$ è descritto come un generatore ideale di uguale forza elettromotrice posto in serie con una resistenza $r$, detta *resistenza interna*. In un circuito di resistenza $R$, la differenza di potenziale $\Delta V$ tra i poli del generatore è minore di $f_{em}$ e dipende da $r$ e da $R$. A circuito aperto (per $R$ infinitamente grande) vale l'uguaglianza $\Delta V = f_{em}$. → p. 303

## Le leggi di Kirchhoff




**La prima legge di Kirchhoff o legge dei nodi**: la somma delle intensità delle correnti entranti in un nodo di un circuito (come il punto $A$ o il punto $B$ della figura) è uguale alla somma delle intensità delle correnti uscenti.
**La seconda legge di Kirchhoff o legge delle maglie**: la somma algebrica delle differenze di potenziale che si incontrano percorrendo una maglia di un circuito (come la linea chiusa evidenziata in giallo) è uguale a zero.

→ p. 307-308

## La potenza elettrica

$$P = Ri^2 = \frac{\Delta V^2}{R} = i\Delta V$$

**L'effetto Joule** è la trasformazione di energia elettrica in energia interna che la corrente produce in un resistore. La rapidità di questa trasformazione, cioè la potenza elettrica $P$ dissipata, ha tre espressioni equivalenti: in esse compaiono, a due a due, la resistenza $R$, l'intensità di corrente $i$ e la differenza di potenziale $\Delta V$ applicata al resistore. → p. 310

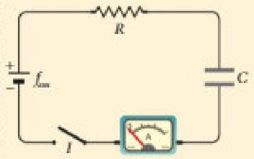
$$P_g = i\Delta V$$

**La potenza di un generatore di tensione** è il prodotto dell'intensità $i$ della corrente che lo attraversa per la differenza di potenziale $\Delta V$ tra i suoi poli. → p. 313

## I circuiti RC

$$i(t) = \frac{f_{em}}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

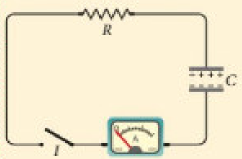
$$Q(t) = Cf_{em}\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$




**Un circuito RC nel processo di carica**:
- è alimentato da una forza elettromotrice costante $f_{em}$;
- è percorso da una corrente di intensità $i(t)$ che decresce esponenzialmente nel tempo dal valore massimo $f_{em}/R$ verso lo zero, con tempo caratteristico $RC$;
- accumula sul condensatore una carica $Q(t)$ che cresce da zero, con lo stesso tempo caratteristico, verso il valore limite $Q_{max} = Cf_{em}$.

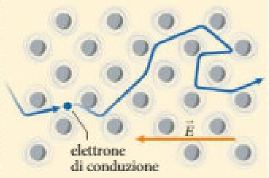
→ p. 314-315

$$Q(t) = Cf_{em} e^{-\frac{t}{RC}} = Q_{max} e^{-\frac{t}{RC}}$$




**Un circuito RC nel processo di scarica** è privo di generatore.
L'intensità della corrente che attraversa il circuito decresce esponenzialmente come nel processo di carica e anche la carica $Q(t)$ del condensatore ha un andamento esponenziale decrescente. → p. 316

## La corrente elettrica nei metalli




**Un metallo** è un reticolo di ioni positivi, attraverso cui si muovono in modo casuale gli *elettroni di conduzione*. Se un pezzo di metallo è collegato a un generatore di tensione, al moto casuale di questi elettroni si sovrappone una corrente, cioè un moto di insieme che è il risultato dell'accelerazione prodotta dalla forza elettrica e delle frenate causate dagli urti contro gli ioni. → p. 338

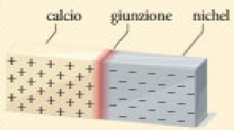
$i = enAv_d$

**La velocità di deriva** $\vec{v}_d$ è la velocità media degli elettroni di conduzione in un metallo percorso da corrente. L'intensità di corrente $i$ in un filo metallico è il prodotto tra la carica elementare $e$, il numero $n$ degli elettroni di conduzione per unità di volume, l'area trasversale $A$ del filo e il modulo di $\vec{v}_d$. → p. 340

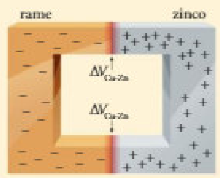
## Il potenziale di estrazione di un metallo e le proprietà delle giunzioni tra metalli

$V_e = \frac{W_e}{e}$

**Il lavoro di estrazione** $W_e$ è il lavoro che bisogna compiere per far uscire un elettrone dalla superficie di un metallo senza far variare la sua energia cinetica ed è caratteristico del particolare metallo.
**Il potenziale di estrazione** $V_e$ è il rapporto tra $W_e$ ed $e$. → p. 343



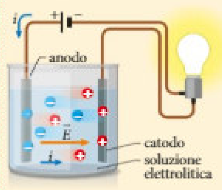

**L'effetto Volta**: se due metalli diversi vengono messi a contatto, tra di essi si stabilisce una differenza di potenziale uguale alla differenza tra i loro potenziali di estrazione cambiata di segno. → p. 344-345




**Un circuito bimetallico chiuso**:
- non è percorso da corrente, se le due giunzioni hanno la stessa temperatura;
- è percorso da corrente per *effetto termoelettrico* (o *effetto Seebeck*), se le due giunzioni sono mantenute a temperature differenti;
- raffredda una giunzione e riscalda l'altra per *effetto Peltier*, se in esso è inserito un generatore di tensione. → p. 346-347



## La corrente elettrica nelle soluzioni elettrolitiche




**Una soluzione elettrolitica** è una soluzione conduttrice che si ottiene sciogliendo in acqua o in un altro solvente un sale, un acido o una base.
**Una cella elettrolitica** è il sistema che serve per far passare corrente attraverso una soluzione elettrolitica: è costituita dalla soluzione e dal suo recipiente, dagli elettrodi in essa immersi e dal generatore di tensione collegato agli elettrodi; in essa la corrente è fatta di ioni positivi che vanno verso l'elettrodo negativo (il catodo) e ioni negativi che vanno verso l'elettrodo positivo (l'anodo).
**L'elettrolisi** è l'insieme dei fenomeni che hanno luogo in una cella elettrolitica: a seconda dei casi, gli ioni che arrivano agli elettrodi e si neutralizzano possono liberarsi come gas, depositarsi sugli elettrodi o prendere parte a reazioni chimiche. → p. 348

$M = \frac{\mathcal{M}}{zeN_A} Q$

**La prima legge di Faraday**:
- la massa $M$ della quantità di sostanza che in un dato intervallo di tempo si deposita o si libera presso un elettrodo è direttamente proporzionale alla carica $Q$ che nello stesso tempo giunge all'elettrodo;
- la costante di proporzionalità è determinata dalla carica elementare $e$, dal numero di Avogadro $N_A$, dalla massa molare $\mathcal{M}$ e dalla valenza $z$, cioè dal numero che moltiplicato per $e$ dà il valore assoluto della carica di uno ione della sostanza. → p. 350

$M = \frac{Q}{eN_A} \frac{\mathcal{M}}{z}$

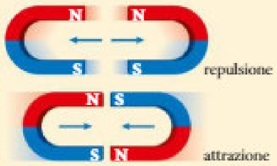
**La seconda legge di Faraday**: fissata la carica $Q$ che attraversa una cella elettrolitica, la massa $M$ della quantità di sostanza che si deposita o si libera presso un elettrodo è direttamente proporzionale all'equivalente chimico $\mathcal{M}/z$ della sostanza. → p. 351

$F = eN_A \approx 9{,}65 \times 10^4 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$

**La costante di Faraday**, prodotto di $e$ per $N_A$, misura la carica elettrica per mole di elettroni. → p. 351

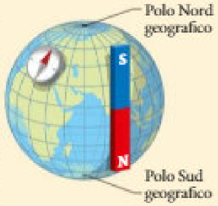
7

## Le interazioni magnetiche di magneti e correnti elettriche

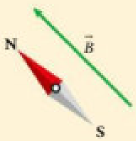



**I magneti** hanno tutti un *polo nord* e un *polo sud*, due estremità che si distinguono per come interagiscono con le estremità degli altri magneti:

- poli dello stesso tipo (nord e nord, sud e sud) si respingono;
- poli di tipo diverso (nord e sud) si attraggono. → p. 371

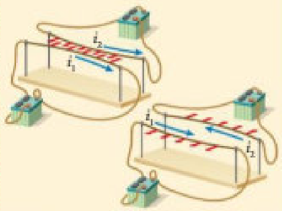



**L'ago di una bussola** è un magnete che tende sempre a rivolgere la stessa estremità, detta polo nord per convenzione, verso il Nord geografico.
La ragione di questo fenomeno è che la Terra stessa si comporta come un magnete: l'estremità del magnete Terra che si trova vicino al Polo Nord geografico attira il polo nord dell'ago e quindi è un polo magnetico di tipo «sud». → p. 371




**Il campo magnetico** $\vec{B}$ ha come sorgenti i magneti o le correnti elettriche.
Se un *magnete di prova* (l'ago di una bussola) è libero di ruotare attorno a un punto, esso assume un'orientazione di equilibrio. In quel punto, per definizione:

- la direzione del vettore $\vec{B}$ è la retta che unisce i poli del magnete di prova;
- il verso di $\vec{B}$ è quello che va dal polo sud al polo nord dello stesso magnete. → p. 371




**L'interazione magnetica tra due correnti** che scorrono in fili paralleli si manifesta con forze attrattive o repulsive: attrattive se le correnti hanno lo stesso verso, repulsive se hanno versi opposti. → p. 375

$$F = k_m \frac{i_1 i_2}{d} l$$

Nel vuoto (e nell'aria):

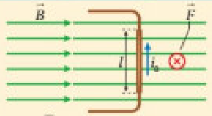
$$k_m = \frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \times 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \Rightarrow$$

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_1 i_2}{d} l$$

con $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A² permeabilità magnetica del vuoto.

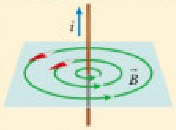
**La legge di Ampère**: dati due fili rettilinei e paralleli, separati da una distanza $d$ molto minore della loro lunghezza e percorsi da correnti di intensità $i_1$ e $i_2$, il modulo $F$ della forza che ciascuno dei due esercita su un tratto di lunghezza $l$ dell'altro è direttamente proporzionale a $i_1$, a $i_2$ e a $l$ e inversamente proporzionale a $d$. → p. 376

## Il campo magnetico



$B = \dfrac{F}{i_0 l}$

**Il modulo del campo magnetico** è definito tramite il modulo $F$ della forza magnetica che agisce su un *filo di prova*, cioè su un segmento di filo di lunghezza $l$ percorso da una corrente di intensità $i_0$. Se il filo di prova è perpendicolare al campo magnetico, $F$ è direttamente proporzionale al prodotto $i_0 l$. Allora il modulo $B$ del campo è il rapporto (indipendente dal filo) tra $F$ e $i_0 l$. L'unità di misura di $B$ è il tesla (T). → p. 378-379



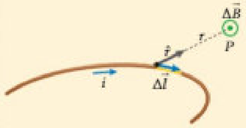
$B = k_m \dfrac{i}{d}$

Nel vuoto (e nell'aria):

$k_m = \dfrac{\mu_0}{2\pi} \Rightarrow B = \dfrac{\mu_0}{2\pi}\dfrac{i}{d}$

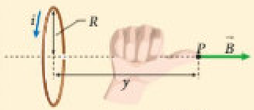
**Il campo magnetico di un filo rettilineo infinito percorso da corrente** ha:

- linee di campo circolari, concentriche con il filo sui piani a esso perpendicolari e orientate come le dita della mano destra quando il pollice punta nel verso della corrente;
- modulo direttamente proporzionale all'intensità di corrente $i$ e inversamente proporzionale alla distanza $d$ dal filo. → p. 379-380



$\Delta\vec{B} = \dfrac{\mu_0 i}{4\pi}\dfrac{\Delta\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$

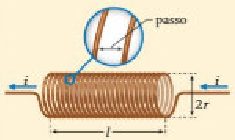
**Il campo magnetico generato da un tratto di filo infinitesimo** in un punto $P$ è determinato dal vettore $\Delta\vec{l}$ che rappresenta il tratto (tangente al filo nel verso della corrente e lungo quanto il tratto), dal versore $\hat{r}$ che punta dalla coda di $\Delta\vec{l}$ verso $P$, dal quadrato della distanza $r$ di $P$ e dall'intensità di corrente $i$. Sommando tutti i contributi infinitesimi si ottiene il campo prodotto da un filo di qualunque forma. → p. 382



Lungo l'asse: $B = \dfrac{\mu_0 i R^2}{2\sqrt{(R^2+y^2)^3}}$

Al centro: $B = \dfrac{\mu_0 i}{2R}$

**Il campo magnetico di una spira circolare percorsa da corrente** in un punto $P$ dell'asse giace lungo l'asse, nel verso indicato dal pollice della mano destra quando le altre dita sono avvolte nel verso della corrente. Il suo modulo $B$ dipende dall'intensità di corrente $i$, dal raggio $R$ della spira e dalla distanza $y$ di $P$ dal centro della spira. → p. 383



$B = \mu_0 \dfrac{N}{l} i = \mu_0 n i$

**Un solenoide** è una bobina cilindrica di filo conduttore, avvolta in $N$ spire per una lunghezza l. Una corrente nel filo crea un campo magnetico $\vec{B}$, che all'interno del solenoide, lontano dai bordi, è circa uniforme e parallelo all'asse (nel verso indicato dalla stessa regola che vale per la spira). Se dentro il solenoide c'è il vuoto o c'è l'aria, il modulo di $\vec{B}$ è il prodotto di $\mu_0$, del numero di spire per unità di lunghezza $n = N/l$ e dell'intensità di corrente $i$. → p. 384



## La forza magnetica sulle correnti elettriche e sulle cariche in movimento

$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B}$

**La forza magnetica su un tratto rettilineo di filo percorso da corrente**:

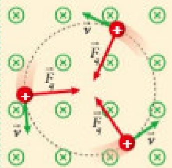
- è perpendicolare al vettore $\vec{l}$ che rappresenta il tratto di filo (di uguale lunghezza e parallelo a esso nel verso della corrente) e al campo magnetico $\vec{B}$;
- è uguale al prodotto vettoriale di $\vec{l}$ per $\vec{B}$, moltiplicato per l'intensità di corrente $i$. → p. 386

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

**La forza di Lorentz** $\vec{F}_q$ su una particella carica in movimento in un campo magnetico:

- è perpendicolare alla velocità $\vec{v}$ della particella e al campo magnetico $\vec{B}$;
- è uguale al prodotto vettoriale di $\vec{v}$ per $\vec{B}$, moltiplicato per la carica $q$ (positiva o negativa) della particella. → p. 388

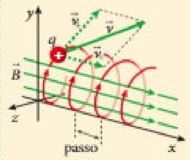
## I moti delle cariche nei campi magnetici



$r = \dfrac{mv}{|q|B} \quad T = \dfrac{2\pi m}{|q|B}$

**Il moto circolare uniforme di una particella carica in un campo magnetico**:

- è prodotto dalla forza $\vec{F}_q$ se $\vec{B}$ è uniforme e $\vec{v}$ è inizialmente perpendicolare a $\vec{B}$;
- ha raggio $r$ dipendente dalla massa e dalla carica della particella e dai moduli di $\vec{v}$ e $\vec{B}$;
- ha periodo $T$ indipendente dal modulo di $\vec{v}$. → p. 390-391



$r = \dfrac{m|v_\perp|}{|q|B}$

$\Delta s = |v_\parallel| T = |v_\parallel| \dfrac{2\pi m}{|q|B}$

**Il moto elicoidale di una particella carica in un campo magnetico**:

- è prodotto dalla forza $\vec{F}_q$, se $\vec{B}$ è uniforme e $\vec{v}$ è inizialmente obliqua rispetto a $\vec{B}$, cioè ha proiezioni parallela e perpendicolare, $\vec{v}_\parallel$ e $\vec{v}_\perp$, entrambe diverse da zero;
- è la composizione di un moto rettilineo uniforme con velocità di modulo $|v_\parallel|$ nella direzione di $\vec{B}$ e un moto circolare uniforme con velocità di modulo $|v_\perp|$ nel piano trasversale.

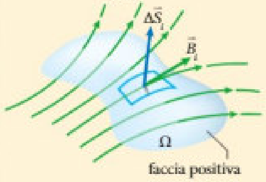
La traiettoria del moto è un'elica cilindrica:

- il suo raggio $r$ è dato dalla stessa formula che vale per il moto circolare uniforme, con $|v_\perp|$ al posto di $v$;
- il suo passo $\Delta s$ è il prodotto di $|v_\parallel|$ per il periodo $T$ del moto trasversale (lo stesso del moto circolare uniforme). → p. 392

## Il teorema di Gauss per il campo magnetico e il teorema di Ampère

$$\Phi_S(\vec{B}) = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

$$\Phi_\Omega(\vec{B}) = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i \cdot \Delta\vec{S}_i$$




**Il flusso di un campo magnetico uniforme attraverso una superficie piana** è il prodotto scalare del vettore campo magnetico $\vec{B}$ per il vettore superficie $\vec{S}$, perpendicolare alla superficie e di modulo uguale alla sua area.

**Il flusso del campo magnetico** attraverso una superficie $\Omega$ nel caso generale si calcola:
- suddividendo $\Omega$ in $n$ parti circa piane, a ciascuna delle quali corrisponda un campo magnetico $\vec{B}_i$ (per $i = 1, 2, \ldots, n$) circa uniforme;
- rappresentando ogni parte con un vettore superficie $\Delta\vec{S}_i$, uscente da una faccia fissata di $\Omega$;
- sommando gli $n$ prodotti scalari $\vec{B}_i \cdot \Delta\vec{S}_i$.

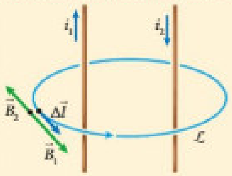
L'unità di misura del flusso del campo magnetico è il weber (Wb). → p. 420

$$\Phi_\Omega(\vec{B}) = 0$$

**Il teorema di Gauss per il campo magnetico**: il flusso di campo magnetico uscente da una superficie chiusa è sempre nullo. → p. 421

$$\Gamma_{\mathcal{L}}(\vec{B}) = \sum_{j=1}^{n} \vec{B}_j \cdot \Delta\vec{l}_j$$

**La circuitazione del campo magnetico** lungo una linea $\mathcal{L}$, chiusa e orientata, si calcola:
- suddividendo $\mathcal{L}$ in n piccoli spostamenti $\Delta\vec{l}_j$ (per $j = 1, 2, \ldots, n$), a ciascuno dei quali corrisponda un campo magnetico $\vec{B}_j$ circa uniforme;
- sommando gli $n$ prodotti scalari $\vec{B}_j \cdot \Delta\vec{l}_j$. → p. 424




$$i_{tot} = \sum_{k=1}^{m} i_k$$

**Una corrente concatenata** con una linea $\mathcal{L}$ chiusa e orientata:
- passa attraverso una superficie qualsiasi, piana o curva, contornata da $\mathcal{L}$;
- è positiva, e uguale all'intensità di corrente $i$, se il campo magnetico da essa generato è orientato nel verso di $\mathcal{L}$;
- è negativa e uguale a $-i$ nel caso contrario.

**La corrente concatenata totale** è la somma algebrica di tutte le correnti concatenate $i_1, i_2, \ldots, i_m$, ciascuna con il suo segno. → p. 425

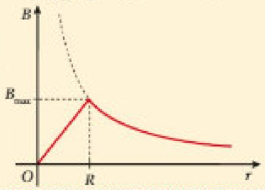
$$\Gamma_{\mathcal{L}}(\vec{B}) = \mu_0 \, i_{tot}$$

$$\text{con } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \, \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

**Il teorema di Ampère**: la circuitazione del campo magnetico, calcolata lungo una linea chiusa $\mathcal{L}$ posta nel vuoto, è uguale al prodotto della permeabilità magnetica del vuoto $\mu_0$ per la corrente totale $i_{tot}$ concatenata con $\mathcal{L}$. → p. 425

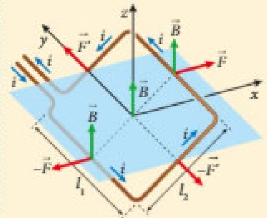
$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i}{R^2} r \quad (\text{per } 0 \le r \le R)$$

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i}{r} \quad (\text{per } r \ge R)$$

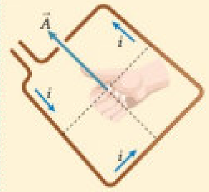



**Una corrente omogenea lungo un cilindro infinito** di raggio $R$ genera un campo magnetico il cui modulo $B$:
- si può calcolare applicando il teorema di Ampère;
- all'interno, per $0 \le r \le R$, è direttamente proporzionale all'intensità di corrente $i$ e alla distanza $r$ dall'asse;
- all'esterno, per $r \ge R$, è descritto dalla legge di Biot-Savart, ossia è direttamente proporzionale a $i$ e inversamente proporzionale a $r$. → p. 427

## L'effetto del campo magnetico su una spira percorsa da corrente




**Una spira percorsa da corrente in un campo magnetico uniforme** $\vec{B}$ è soggetta a una coppia di forze magnetiche $\vec{F}$ e $-\vec{F}$. Nel caso illustrato, le altre due forze $\vec{F}'$ e $-\vec{F}'$ si elidono perché hanno la stessa retta di azione. → p. 432




$$\vec{M} = i\vec{A} \times \vec{B}$$

$$M = iAB\sin\alpha$$

**Il vettore superficie** $\vec{A}$ che rappresenta una spira percorsa da corrente ha modulo uguale all'area della superficie della spira, direzione perpendicolare alla superficie e verso indicato dal pollice della mano destra quando le altre dita seguono il verso della corrente.

**Il momento risultante delle forze magnetiche** a cui è soggetta la spira in un campo magnetico uniforme $\vec{B}$ è il vettore $\vec{M}$ che si ottiene moltiplicando l'intensità di corrente $i$ per il prodotto vettoriale di $\vec{A}$ per $\vec{B}$. Il modulo di $\vec{M}$ è quindi il prodotto tra $i$, i moduli di $\vec{A}$ e $\vec{B}$ e il seno dell'angolo $\alpha$ compreso tra $\vec{A}$ e $\vec{B}$. → p. 433

$$\vec{\mu}_m = i\vec{A}$$

**Il momento magnetico** $\vec{\mu}_m$ di una spira percorsa da corrente è il prodotto dell'intensità $i$ della corrente per il vettore superficie $\vec{A}$ della spira. Nel SI è misurato in A · m². → p. 434

$$\vec{M} = \vec{\mu}_m \times \vec{B}$$

**Il momento delle forze magnetiche su una spira e il momento magnetico della spira**, $\vec{M}$ e $\vec{\mu}_m$, sono legati tra loro:
- $\vec{M}$ è dato dal prodotto vettoriale di $\vec{\mu}_m$ per il campo magnetico $\vec{B}$ in cui è immersa la spira;
- $\vec{M}$ accelera la rotazione della spira verso lo stato di equilibrio in cui $\vec{\mu}_m$ e $\vec{B}$ sono paralleli e concordi. → p. 434

## Le proprietà magnetiche dei materiali

$$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$$

**La permeabilità magnetica relativa** $\mu_r$ di un materiale omogeneo e isotropo:
- è il numero che, moltiplicato per il campo magnetico esterno $\vec{B}_0$ in cui è immerso il materiale, dà il campo magnetico totale $\vec{B}$ dentro il materiale;
- è una costante poco minore di 1 per i materiali diamagnetici (debolmente respinti dai magneti);
- è una costante poco maggiore di 1 per i materiali paramagnetici (debolmente attratti dai magneti);
- raggiunge ordini di grandezza da $10^3$ a $10^5$ e varia con $\vec{B}_0$ per i materiali ferromagnetici. → p. 440