

Elettrostatica

- Strofinando una bacchetta con un panno di lana alcuni elettroni della bacchetta sono strappati dall'azione abrasiva e vengono trasferiti al panno.
- La bacchetta acquisisce una carica netta diversa da zero.
- La carica elettrica si presenta sempre in multipli interi di un'unità fondamentale di carica e , ovvero la carica che si osserva risulta quantizzata esistendo sempre in quantità discrete
- La carica q di un corpo si può sempre esprimere come $\pm Ne$, dove N è un numero intero.

Elettrostatica

- Esistono due tipi di cariche elettriche, con la caratteristica che cariche diverse si attraggono mentre cariche uguali si respingono.
- La carica si conserva.
- La carica è quantizzata.
- La forza tra cariche puntiformi è inversamente proporzionale al quadrato della mutua distanza.

Legge di Coulomb

- La legge che esprime l'intensità della forza elettrica che si esercita fra due particelle puntiformi cariche, rispettivamente di carica q_1 e q_2 , a riposo, poste alla mutua distanza r è data dalla relazione:

$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

- L'espressione rappresenta la legge di Coulomb
- L'unità di misura della carica è il coulomb (C)
- il coulomb è definito come la carica che scorre in un secondo attraverso un conduttore percorso dalla corrente di un ampere ($1C = 1A \cdot 1s$).

Legge di Coulomb

- La costante presente nella legge di Coulomb vale:

$$k \approx 8.98 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

- Tale costante, per definizione, si esprime mediante la relazione:

$$k \equiv \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \quad \epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$

- La costante ϵ_0 prende il nome di *costante dielettrica del vuoto*

Legge di Coulomb

- Se esprimiamo la legge di Coulomb in forma vettoriale servendoci del versore \mathbf{r} avente verso da q_1 a q_2 , la forza esercitata sulla carica 2 per effetto della carica 1 vale:

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \mathbf{r}$$

- Per la terza legge di Newton, deve risultare

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \mathbf{r}' = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot (-\mathbf{r}) = -\vec{F}_{21}$$

- Se fossero presenti più cariche la forza tra una coppia di cariche potrebbe essere ricavata dalla legge di Coulomb e la risultante sarebbe quindi la somma vettoriale delle forze dovute alle singole cariche; cioè le forze elettriche obbediscono al *principio di sovrapposizione degli effetti*

Campo elettrico

- L'espressione della forza elettrica sottintende che essa si manifesta direttamente e istantaneamente senza mediazione (azione a distanza).
- Le cariche riempiono lo spazio con un campo di forze: in un sistema di cariche, una carica contribuisce al campo in tutto lo spazio e, allo stesso tempo, è sensibile al campo risultante di tutte le altre cariche.
- Si definisce vettore campo elettrico \vec{E} il rapporto tra la forza F che agisce su una carica di prova positiva q_0 ed il valore di tale carica

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \Rightarrow \vec{E} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \mathbf{r}$$

- Così come le forze elettriche, anche il campo elettrico gode della proprietà di sovrapposizione degli effetti.
- Il campo elettrico è conservativo (in termini energetici)

Conduttori in equilibrio elettrostatico

- Dal punto di vista microscopico, un buon conduttore elettrico può essere rappresentato come un reticolo atomico immerso in un gas di elettroni liberi di muoversi all'interno del materiale. In assenza di un moto netto degli elettroni in una particolare direzione, il conduttore è detto in equilibrio elettrostatico. In tale circostanza valgono le seguenti proprietà:
- Il campo elettrico all'interno del conduttore è ovunque nullo;
- Un qualunque eccesso di carica sul conduttore si localizza superficialmente.
- All'esterno del conduttore, in prossimità della superficie, il campo elettrico è perpendicolare alla superficie
- Su un conduttore di forma irregolare la carica tende ad accumularsi laddove la curvatura della superficie è maggiore, ovvero sulle punte.

Differenza di potenziale

- Siccome il campo elettrico è conservativo, se una carica elettrica è immersa in un campo elettrico, su di essa agisce una forza ed il lavoro compiuto da questa forza in corrispondenza di uno spostamento infinitesimo può esprimersi come:

$$dL = \vec{F} \cdot d\vec{l} = q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

- Per effetto di tale lavoro, l'energia potenziale del sistema costituito dalle cariche che danno origine al campo elettrico subisce una diminuzione pari a dL

$$dU_e = -dL = -q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

- Nel caso di uno spostamento finito della carica da un punto A ed un punto B, la variazione di energia potenziale vale:

$$\Delta U_e = U_{eB} - U_{eA} = \int_A^B -q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l} = -q_0 \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Differenza di potenziale

- Si definisce differenza di potenziale $V_B - V_A$ tra i punti B ed A la variazione di energia potenziale per unità di carica

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{U_B - U_A}{q_0} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

- L'unità di misura del potenziale è il volt (V): $1V = 1J/1C$
- 1V rappresenta il lavoro che deve essere fatto per far superare ad una carica di 1C una differenza di potenziale di 1V
- L'introduzione del volt consente inoltre di riscrivere l'unità di misura del campo elettrico in V/m che rappresenta l'unità tradizionalmente adoperata per questa grandezza

Condensatori

- Consideriamo due conduttori tra i quali vi è una certa differenza di potenziale V ; si osserva che la loro carica Q è proporzionale alla differenza di potenziale V .
- Il sistema costituito da due conduttori (armature) tra i quali c'è induzione completa, cioè il valore assoluto della carica su ciascun conduttore è lo stesso ma il segno è opposto, prende il nome di condensatore.
- Si definisce capacità elettrica C del condensatore il rapporto:

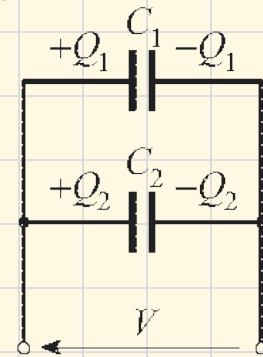
$$C \equiv \frac{Q}{V}$$

- Tale rapporto risulta, in generale, indipendente dalla differenza di potenziale applicata ma dipende unicamente dalla geometria dei conduttori e dalle caratteristiche del mezzo circostante.
- L'unità di misura della capacità è il Farad (F) e risulta $1F = 1C/1V$

Condensatori

- Consideriamo due condensatori, rispettivamente di capacità C_1 e C_2 collegati come in figura.

$$Q_1 = C_1 \cdot V \quad Q_2 = C_2 \cdot V$$



- Quando le armature hanno una comune differenza di potenziale V la connessione è detta in parallelo.
- La carica totale Q immagazzinata da entrambi i due collegati in parallelo è, in valore assoluto pari a:

$$Q = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2) \cdot V = CV \quad C = C_1 + C_2$$

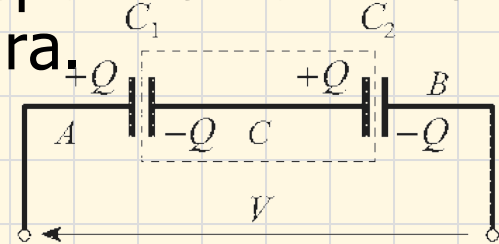
$$C = \sum_{i=1}^N C_i$$

- condensatori connessi in parallelo sono equivalenti ad un unico condensatore di capacità pari alla somma delle capacità di ciascun condensatore.

Condensatori

- Consideriamo due condensatori, rispettivamente di capacità C_1 e C_2 collegati come in figura.

$$V_A - V_C = \frac{Q}{C_1} \quad V_C - V_B = \frac{Q}{C_2}$$



- In tale connessione, detta in serie, il valore assoluto della carica su ciascuna armatura è la stessa. (La carica totale racchiusa nel volume tratteggiato di figura è nulla. La differenza di potenziale per la serie vale

$$V = V_A - V_B = (V_A - V_C) + (V_C - V_B) = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{Q}{C} \quad C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}}$$

- Condensatori connessi in serie sono equivalenti ad un unico condensatore di capacità pari al reciproco della somma dei reciproci delle singole capacità.

Corrente elettrica

- Consideriamo il moto non accelerato e con velocità piccole rispetto a quella della luce nel vuoto di un insieme di particelle dotate di carica elettrica: possono ritenersi valide le leggi dell'elettrostatica.
- Supponiamo che il moto avvenga attraverso un conduttore filiforme; esaminando una sezione S di tale conduttore, osserveremo che in un tempo dt una quantità di carica dq attraversa la sezione considerata.
- Si definisce pertanto l'intensità di corrente I come

$$I \equiv \frac{dq}{dt}$$

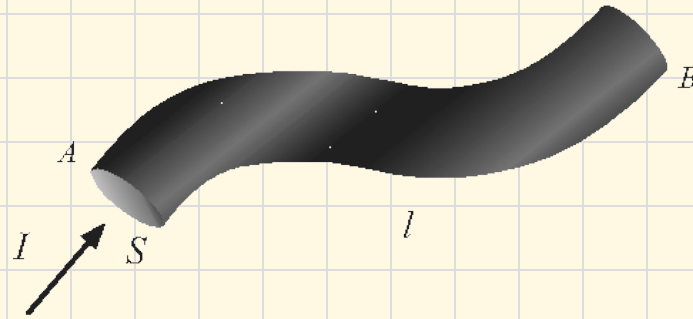
- Si misura in ampere (A) con $1A=1C/1s$.
- Se con un opportuno dispositivo (generatore) si stabilisce ai capi del conduttore una differenza di potenziale costante nel tempo, a regime si osserva che il conduttore è sede di una corrente costante che prende il nome di corrente stazionaria.

Legge di Ohm

- Non è corretto distinguere i corpi semplicemente in isolanti e conduttori
- È opportuno introdurre il concetto di resistenza elettrica per caratterizzare i materiali in relazione alla loro capacità di condurre più o meno efficacemente il fenomeno elettrico.
- La resistenza è proporzionale alla lunghezza del conduttore.
- Basandosi su una analogia tra il flusso di calore e quello di corrente elettrica Ohm giunse alla conclusione che è la differenza di potenziale applicata ai conduttori a determinare la corrente e che questa varia direttamente con la differenza di potenziale e inversamente con la resistenza.

Legge di Ohm

- Consideriamo un tratto di conduttore filiforme di lunghezza l e sezione uniforme S percorso da una corrente di intensità I .



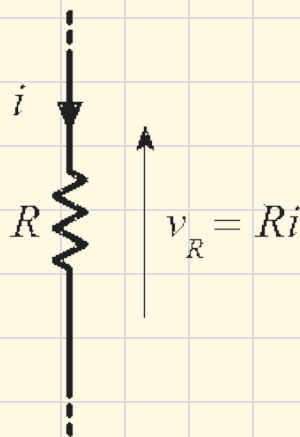
- La misura della differenza di potenziale V agli estremi del filo evidenzia l'esistenza di una relazione di proporzionalità tra questa grandezza e la corrente I

$$V \equiv V_A - V_B = RI$$

- L'espressione prende il nome di legge di Ohm

Legge di Ohm - 3

- Nell'espressione della legge di Ohm, il coefficiente di proporzionalità R è detto resistenza del tratto di conduttore considerato.
- Per conduttori metallici R è indipendente sia da V sia da I , ma dipende dalla geometria del conduttore, dal materiale che lo costituisce e dalla temperatura.



Legge di Ohm

- Si verifica che per un conduttore filiforme la resistenza è direttamente proporzionale alla sua lunghezza e inversamente proporzionale alla sua sezione

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

- L'unità di misura della resistenza è l'ohm (Ω) e risulta $1\Omega = 1V/1A$
- Il parametro ρ prende il nome di resistività del conduttore e la sua unità di misura si esprime in $\Omega \cdot m$
- L'inverso della resistenza prende il nome di conduttanza G e l'inverso della resistività di conducibilità σ

$$G = \frac{1}{R} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

Conduktivität der Metalle

- Die Fähigkeit leitend der Metalle ist beeinflusst durch die Temperatur und, für die meisten Metalle, diese Fähigkeit nimmt ab, wenn die Temperatur steigt
- Für die meisten Metalle ist die Abhängigkeit der Resistivität von der Temperatur durch eine Beziehung des Typs

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$$

- wobei ρ die Resistivität bei der Temperatur T , ρ_0 die Resistivität bei der Referenztemperatur T_0 , in der Regel 20°C , und α ein Parameter bekannt als Temperaturkoeffizient der Resistivität

Conduttività dei metalli

Materiale	Resistività ($\Omega \cdot m$)	Coefficiente Termico ($^{\circ}C^{-1}$)
<i>Argento</i>	1.59×10^{-8}	1×10^{-3}
<i>Rame</i>	1.68×10^{-8}	6.8×10^{-2}
<i>Alluminio</i>	2.65×10^{-8}	4.29×10^{-3}
<i>Tungsteno</i>	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
<i>Ferro</i>	9.71×10^{-8}	6.51×10^{-3}
<i>Platino</i>	10.6×10^{-8}	3.927×10^{-3}
<i>Grafite</i> *	$3 \div 60 \times 10^{-5}$	-5×10^{-4}
<i>Germanio</i> *	$3 \div 500 \times 10^{-3}$	-5×10^{-3}
<i>Silicio</i> *	$0.1 \div 60$	-7×10^{-2}
<i>Vetro</i>	$1 \div 10000 \times 10^9$	-
<i>Quarzo fuso</i>	7.5×10^{-17}	-
<i>Gomma indurita</i>	$1 \div 100 \times 10^{13}$	-

* In questi materiali, denominati semiconduttori, la resistività è fortemente condizionata dalla presenza di impurità nel materiale.

Effetto Joule

- Lo studio del fenomeno della conducibilità nei metalli evidenzia una apparente contraddizione con la seconda legge della dinamica che afferma che l'azione di una forza su di un corpo ne determina l'accelerazione.
- A differenza delle cariche poste nel vuoto, le cariche nei conduttori non accelerano sotto l'azione di un campo elettrico e la loro velocità, quindi non aumenta indefinitamente
- Un'analogia con tale fenomeno si incontra nello studio della caduta di un corpo materiale attraverso un mezzo viscoso; per effetto della forza di gravità il corpo inizialmente accelera, tuttavia, agendo su di esso anche una forza proporzionale alla velocità (forza di attrito viscoso), la velocità del corpo non cresce indefinitamente ma, da un certo istante in poi, diventa costante

Effetto Joule

- Un modello del fenomeno della conduzione elettrica potrebbe prevedere che un conduttore metallico può essere schematizzato come un reticolo ionico immerso in un gas di elettroni
- Per effetto della presenza di impurità nel materiale che lo costituisce ed a causa dell'agitazione termica che sposta continuamente le posizioni di equilibrio degli ioni del reticolo, gli elettroni subiscono numerosi urti, cambiando ogni volta direzione in maniera casuale
- In assenza di un campo elettrico applicato, il flusso netto degli elettroni attraverso una qualsiasi sezione del conduttore è nullo
- All'applicazione di un campo elettrico \mathbf{E} si osserva che a tale moto disordinato viene a sovrapporsi un moto più lento degli elettroni, nella direzione opposta a quella del campo applicato

Effetto Joule

- Il modello di conducibilità descritto suggerisce l'esistenza di un processo di dissipazione energetica intrinseco al meccanismo della conduzione.
- L'energia fornita alle cariche attraverso l'applicazione di un campo elettrico non ne determina l'incremento dell'energia cinetica che resta in media costante.
- Così questa energia viene, di fatto, trasferita al reticolo ionico costituente il conduttore, attraverso gli urti con gli elettroni
- Tale energia risulta quindi dissipata in calore, determinando l'aumento della temperatura del conduttore percorso da corrente.
- Questo processo viene detto effetto Joule

Effetto Joule – Legge di Joule

- Per un conduttore rettilineo, di sezione S e lunghezza l in cui le cariche elettriche attraversano una sezione S in modo uniforme (in prima approssimazione si può dire che il conduttore sia attraversato da una corrente costante), la potenza dissipata si può ricavare attraverso la relazione seguente nota con il nome di legge di Joule

$$P = V \cdot I$$

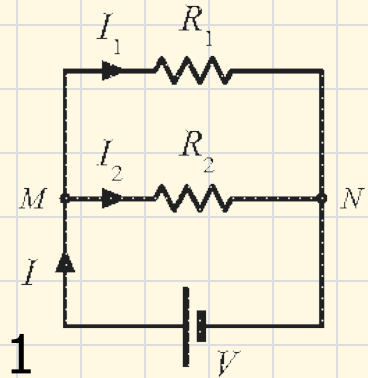
- Se applichiamo alla relazione precedente la legge di Ohm prima nella forma $V=RI$ e poi nella forma $I=V/R$, otteniamo le seguenti due espressioni equivalenti della legge di Joule

$$P = \frac{V^2}{R} \quad P = I^2 \cdot R$$

Resistori

- Consideriamo due resistori di resistenza R_1 e R_2 collegati come in figura
- Quando entrambi i resistori sono sottoposti alla stessa differenza di potenziale, la connessione è detta in parallelo

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \quad I_2 = \frac{V}{R_2}$$



- La corrente che attraversa il nodo M vale

$$I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{V}{R} \quad R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

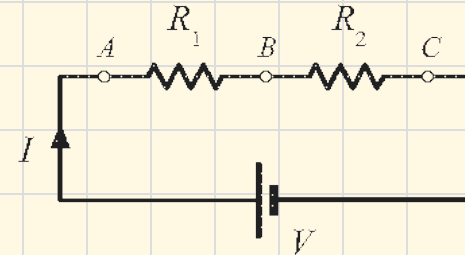
$$R = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}}$$

- Resistori connessi in parallelo sono equivalenti ad un unico resistore di resistenza pari al reciproco della somma dei reciproci delle singole resistenze

Resistori

- Consideriamo due resistori di resistenza R_1 e R_2 collegati come in figura
- Quando entrambi i resistori sono attraversati dalla stessa corrente, la connessione è detta in serie

$$V_A - V_B = R_1 \cdot I \quad V_B - V_C = R_2 \cdot I$$



- La differenza di potenziale per la serie vale

$$V = V_A - V_C = (V_B + R_1 \cdot I) - (V_B - R_2 \cdot I) = I \cdot (R_1 + R_2) = I \cdot R \quad R = R_1 + R_2$$

$$R = \sum_{k=1}^N R_k$$

- connessi in serie sono equivalenti ad un unico resistore di resistenza pari alla somma delle singole resistenze