



Forze Elettriche e Campi Elettrici

Cenni Storici

- Documenti cinesi suggeriscono che il magnetismo fosse conosciuto fin dal 2000 a.c.
- Anche gli antichi greci osservarono fenomeni elettrici e magnetici, in particolare trovarono che quando un pezzo di ambra veniva strofinato, attirava pezzetti di paglia e piume (il termine «**elettrico**» deriva infatti dalla parola greca per l'ambra, *elektron*)
- L'esistenza di forze magnetiche era conosciuta attraverso l'osservazione che pezzi di un minerale esistente in natura chiamato magnetite attiravano ferro (il termine «**magnetico**» deriva da *Magnesia*, una città sulla costa turca dove fu trovata la magnetite)
- Soltanto all'inizio del XIX secolo gli scienziati poterono stabilire che elettricità e magnetismo erano fenomeni correlati...

Proprietà delle cariche elettriche

- Semplici esperimenti dimostrano l'esistenza delle forze elettrostatiche
- Per esempio dopo aver passato un pettine tra i capelli si potrà osservare che il pettine attira dei pezzettini di carta
- Lo stesso effetto si verifica con altri materiali strofinati, come il vetro e la bachelite (o plastica)



© Cengage Learning/Charles D. Winters

Figura 19.1 Strofinare un palloncino sui capelli in un giorno secco fa sì che il palloncino e i capelli diventino elettricamente carichi.

Proprietà delle cariche elettriche

- Gli esperimenti dimostrano che ci sono due differenti specie di cariche elettriche, chiamate positiva e negativa da Benjamin Franklin
- Usando la convenzione suggerita da Franklin chiamiamo positiva la carica sulla bacchetta di vetro e negativa quella sulla bacchetta di bachelite (o plastica)
- Cariche dello stesso segno si respingono mentre cariche di segno opposto si attraggono

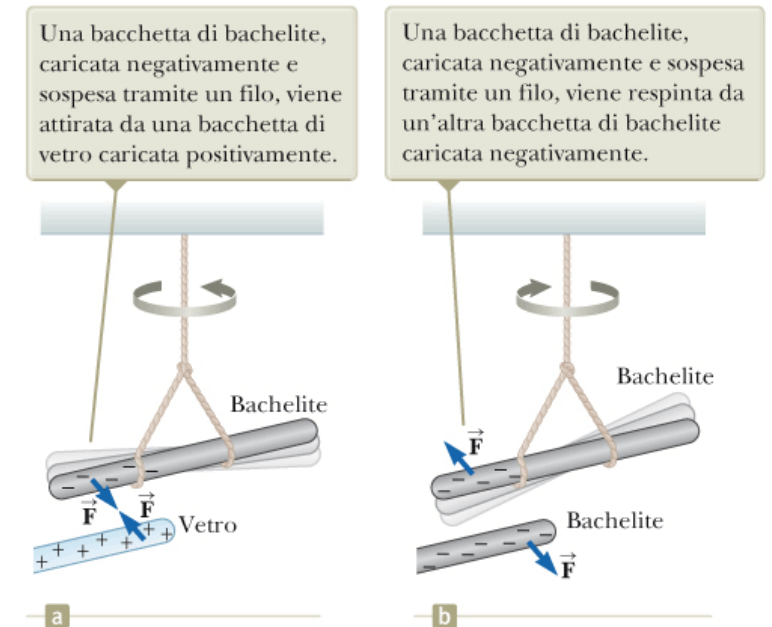


Figura 19.2 La forza elettrica tra (a) oggetti con carica di segno opposto e (b) con carica dello stesso segno.

Proprietà delle cariche elettriche

- Principio della conservazione della carica per un sistema isolato
- Gli oggetti diventano carichi in quanto elettroni vengono trasferiti da un corpo all'altro
- Per il sistema isolato di due oggetti non avviene alcun trasferimento di carica attraverso il bordo del sistema (esempio in figura)
- La carica totale di un oggetto è quantizzata come multiplo intero della carica elementare dell'elettrone $e = 1.60 \times 10^{-19} C$

A causa della conservazione della carica, ogni elettrone aggiunge una carica negativa alla seta ed una uguale quantità di carica positiva viene lasciata sulla sbarretta di vetro.

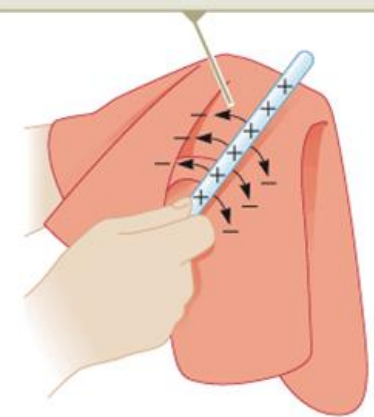


Figura 19.3 Quando una sbarretta di vetro viene strofinata con della seta, elettroni sono trasferiti dal vetro alla seta. Poiché le cariche sono trasferite in pacchetti discreti, le cariche sui due oggetti sono $\pm e$ o $\pm 2e$ o $\pm 3e$, e così via.

Quiz rapido

- Tre oggetti sono avvicinati l'uno all'altro, due alla volta. Se si avvicinano gli oggetti A e B, essi si respingono. Se si avvicinano gli oggetti B e C, anche essi si respingono. Quali delle seguenti affermazioni sono vere?
 - A. Gli oggetti A e C possiedono cariche dello stesso segno
 - B. Gli oggetti A e C possiedono cariche di segno opposto
 - C. Tutti e tre gli oggetti posseggono cariche dello stesso segno
 - D. Uno dei tre oggetti è neutro
 - E. E' necessario compiere ulteriori esperimenti per determinare il segno delle cariche

Quiz rapido

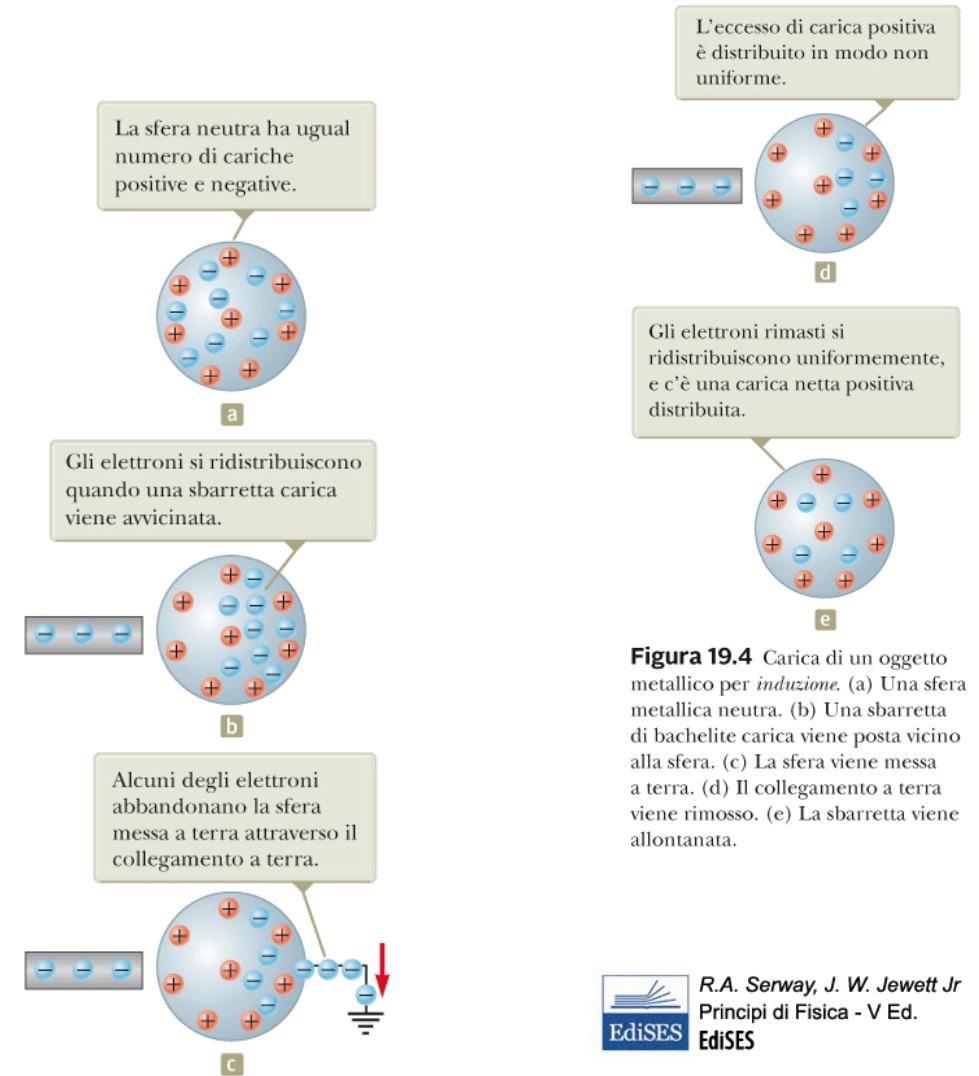
- Tre oggetti sono avvicinati l'uno all'altro, due alla volta. Se si avvicinano gli oggetti A e B, essi si respingono. Se si avvicinano gli oggetti B e C, anche essi si respingono. Quali delle seguenti affermazioni sono vere?
 - ☒ A. Gli oggetti A e C possiedono cariche dello stesso segno
 - ☐ B. Gli oggetti A e C possiedono cariche di segno opposto
 - ☒ C. Tutti e tre gli oggetti posseggono cariche dello stesso segno
 - ☐ D. Uno dei tre oggetti è neutro
 - ☒ E. E' necessario compiere ulteriori esperimenti per determinare il segno delle cariche

Isolanti e Conduttori

- Conduttori elettrici sono materiali in cui alcuni degli elettroni sono elettroni liberi che non sono legati agli atomi e possono muoversi relativamente liberi attraverso il materiale; isolanti elettrici sono materiali in cui tutti gli elettroni sono legati agli atomi e non possono muoversi liberamente attraverso il materiale
- I semiconduttori sono una terza classe di materiali e le loro proprietà elettriche sono a metà strada tra quelle degli isolanti e dei conduttori

Carica per induzione

- Quando un conduttore è collegato alla Terra per mezzo di un filo conduttore si dice che esso è messo a terra (la Terra può essere considerata un serbatoio infinito per gli elettroni, può ricevere o fornire un numero illimitato di elettroni).
- Il simbolo  indica che il filo è messo a massa (o messo a terra) e sta ad indicare un serbatoio di carica elettrica come la Terra



Polarizzazione

- Avviene negli isolanti. Nella maggior parte degli atomi e delle molecole neutre la posizione media della carica positiva coincide con la posizione media della carica negativa. In presenza di un oggetto carico queste posizioni possono spostarsi leggermente (figura), determinando così una maggiore carica positiva da un lato della molecola che dall'altro

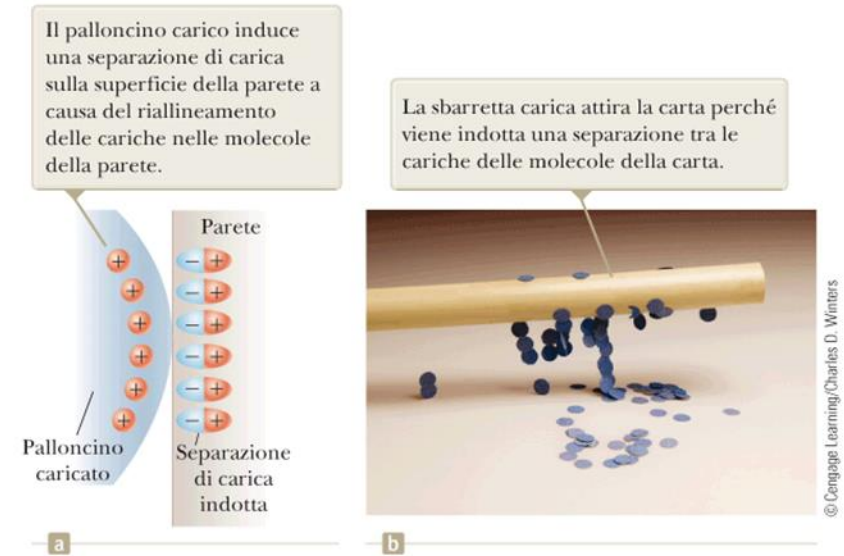


Figura 19.5 (a) Un palloncino carico viene avvicinato ad una parete isolante. (b) Una sbarretta carica viene avvicinata a pezzettini di carta.

Quiz Rapido

- Tre oggetti vengono avvicinati l'uno all'altro, due alla volta. Se si avvicinano gli oggetti A e B, essi si attraggono. Invece gli oggetti B e C, se avvicinati, si respingono. Quale di queste affermazioni è necessariamente vera?
 - A. Gli oggetti A e C possiedono cariche dello stesso segno
 - B. Gli oggetti A e C possiedono cariche di segno opposto
 - C. Tutti e tre gli oggetti possiedono cariche dello stesso segno
 - D. Uno dei tre oggetti è neutro
 - E. E' necessario compiere ulteriori esperimenti per determinare il segno delle cariche

Quiz Rapido

- Tre oggetti vengono avvicinati l'uno all'altro, due alla volta. Se si avvicinano gli oggetti A e B, essi si attraggono. Invece gli oggetti B e C, se avvicinati, si respingono. Quale di queste affermazioni è necessariamente vera?
 - A. Gli oggetti A e C possiedono cariche dello stesso segno
 - B. Gli oggetti A e C possiedono cariche di segno opposto
 - C. Tutti e tre gli oggetti possiedono cariche dello stesso segno
 - D. Uno dei tre oggetti è neutro
 - ☒ E. E' necessario compiere ulteriori esperimenti per determinare il segno delle cariche

Legge di Coulomb

- Le forze elettriche fra oggetti carichi furono misurate quantitativamente da Charles Coulomb usando la bilancia di torsione (figura)
- Gli esperimenti mostrano che la forza elettrica fra due piccole sfere cariche è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza
- $F_e \propto 1/r^2$

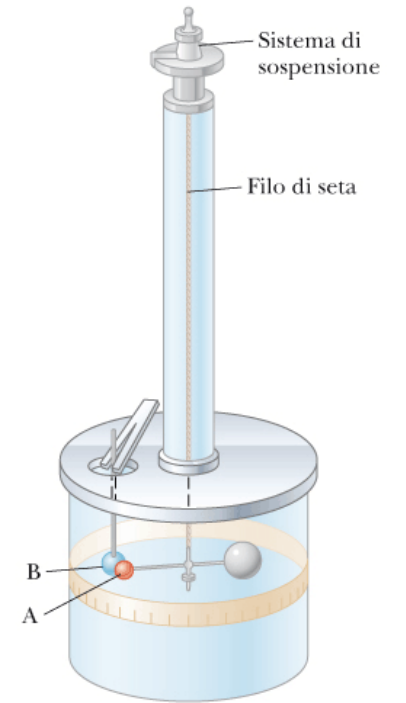


Figura 19.6 La bilancia di torsione di Coulomb, che fu usata per stabilire che la forza elettrostatica tra due cariche puntiformi è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

Legge di Coulomb

- La legge di Coulomb descrive il modulo della forza elettrostatica fra due cariche puntiformi di carica q_1 e q_2 e separate da una distanza r :

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

Dove $k_e = 8.9876 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$ è la costante di Coulomb, e la forza è espressa in newton se le cariche sono espresse in Coulomb e la distanza in metri. La costante k_e si può anche scrivere

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Dove la costante ϵ_0 è detta costante dielettrica del vuoto e ha il valore

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} C^2 / N \cdot m^2$$

Legge di Coulomb

- Il Coulomb (C) è una quantità notevole di carica, la carica di un elettrone è $q_e = -e = -1.60 \times 10^{-19} C$ (quella del protone è $+e$). Negli tipici esperimenti di elettrostatica con la sbarretta di bachelite o vetro caricata per strofinio la carica spostata è dell'ordine del

$$\mu C = 10^{-6} C$$

- La forza (grandezza vettoriale) elettrostatica esercitata da q_1 su q_2 può essere rappresentata come

$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$

Legge di Coulomb

- $\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$

Dove $\hat{r}_{12}$ è un vettore unitario (versore) diretto da q_1 a q_2 come mostrato nella figura a fianco.

- Quando sono presenti più di due cariche la forza risultante su ciascuna particella è uguale alla somma vettoriale delle forze dovute a tutte le altre particelle (**principio di sovrapposizione**)
- Ad esempio se ci sono 4 particelle la forza risultante sulla particella 1 sarà

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41}$$

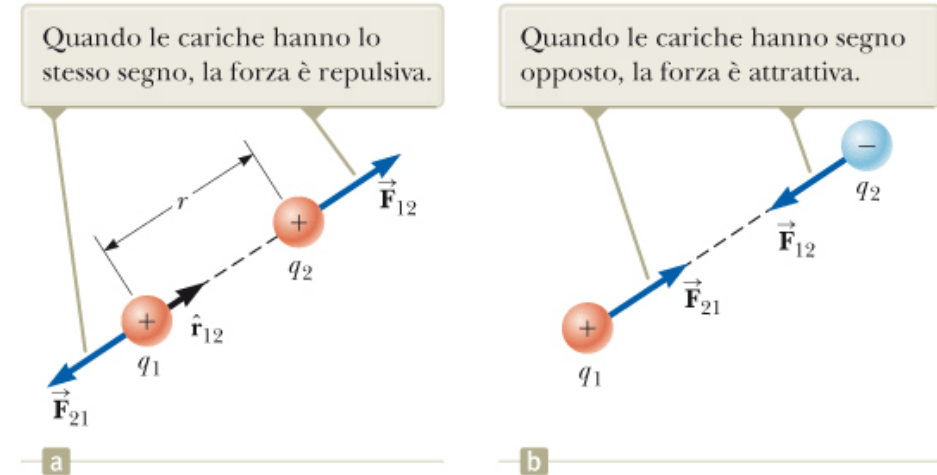


Figura 19.7 Due cariche puntiformi separate da una distanza r esercitano una forza reciproca data dalla legge di Coulomb. Si noti che la forza $\vec{F}_{21}$ esercitata da q_2 su q_1 è uguale in modulo e opposta in verso alla forza $\vec{F}_{12}$ esercitata da q_1 su q_2 .



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

Quiz rapido

- L'oggetto A ha una carica di $+2\mu C$, e l'oggetto B ha una carica di $+6\mu C$. Quale delle seguenti affermazioni riguardante le forze tra i due oggetti è vera?

A. $\vec{F}_{AB} = -3\vec{F}_{BA}$

B. $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

C. $3\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

D. $\vec{F}_{AB} = 3\vec{F}_{BA}$

E. $\vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA}$

F. $3\vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA}$

Quiz rapido

- L'oggetto A ha una carica di $+2\mu C$, e l'oggetto B ha una carica di $+6\mu C$. Quale delle seguenti affermazioni riguardante le forze tra i due oggetti è vera?

A. $\vec{F}_{AB} = -3\vec{F}_{BA}$

B. $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

C. $3\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

D. $\vec{F}_{AB} = 3\vec{F}_{BA}$

E. $\vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA}$

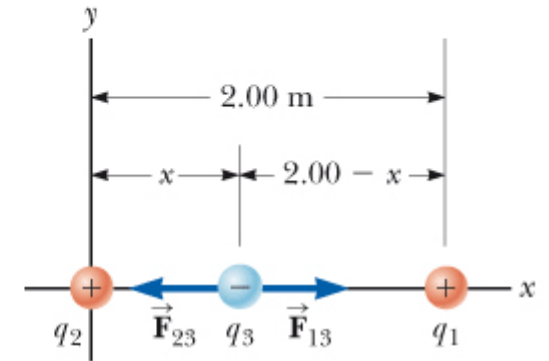
F. $3\vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA}$

Esempio – Dove è nulla la forza risultante?

- Tre cariche puntiformi giacciono lungo l'asse x come in figura. La particella con carica positiva $q_1 = 15.0 \mu\text{C}$ si trova in $x = 2.00 \text{ m}$, la particella con carica positiva $q_2 = 6.00 \mu\text{C}$ si trova nell'origine e la forza risultante agente sulla carica q_3 è zero. Quale è la coordinata x di q_3 ?

Figura 19.8 (Esempio 19.1)

Tre cariche puntiformi sono poste lungo l'asse x . Se la forza risultante che agisce su q_3 è zero, la forza $\vec{F}_{13}$ esercitata da q_1 su q_3 deve essere in modulo uguale e opposta in verso alla forza $\vec{F}_{23}$ esercitata da q_2 su q_3 .



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

Esempio – L'atomo di Idrogeno

- L'elettrone e il protone di un atomo di idrogeno sono separati (in media) da una distanza all'incirca pari a $5.3 \times 10^{-11} m$. Calcolare l'intensità della forza elettrostatica e della forza gravitazionale fra le due particelle.

Esempio – Trovare la carica sulle sfere

- Due piccole sfere cariche, identiche, ognuna avente una massa di $3.00 \times 10^{-2} \text{ kg}$, sono appese in equilibrio come in figura. La lunghezza L di ciascun filo è 0.150 m , e l'angolo θ è 5.00° . Trovare l'ampiezza della carica su ciascuna sfera.

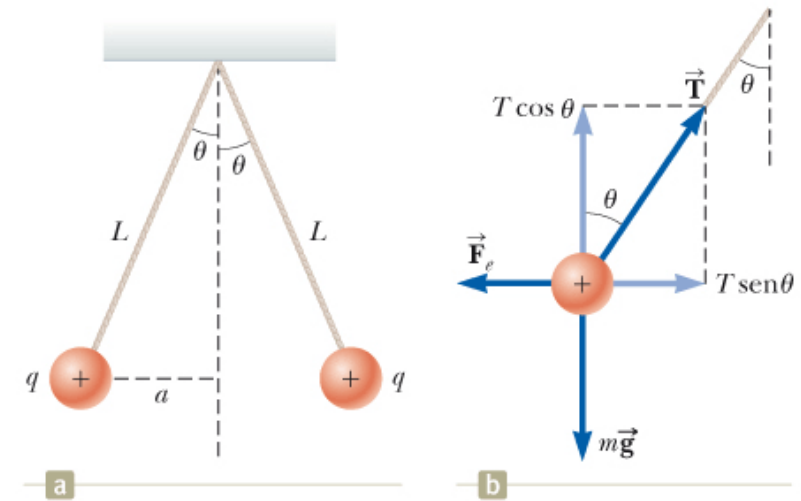


Figura 19.9 (Esempio 19.3) (a) Due sfere identiche, ognuna con la stessa carica q , sospese in equilibrio. (b) Diagramma delle forze che agiscono sulla sfera di sinistra di (a).

Campi Elettrici

- Nella regione di spazio attorno ad un oggetto carico (carica sorgente) esiste un campo elettrico
- Quando un altro oggetto carico (carica di prova) entra in questo campo elettrico, una forza elettrica agisce su di esso
- Il vettore campo elettrico $\vec{E}$ in un punto dello spazio è definito come la forza elettrica $\vec{F}_e$ che agisce sulla carica di prova positiva q_0 posizionata in quel punto, e divisa per la carica di prova, cioè:

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}_e}{q_0}$$

Il vettore $\vec{E}$ ha le unità SI di newton su Coulomb (N/C)

La direzione di $\vec{E}$ (figura) è la stessa di cui risente una carica di prova positiva posizionata nel campo

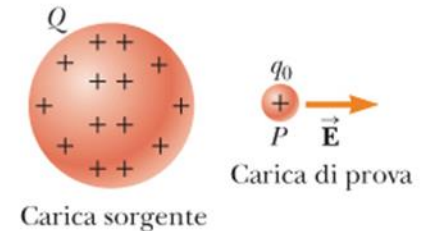


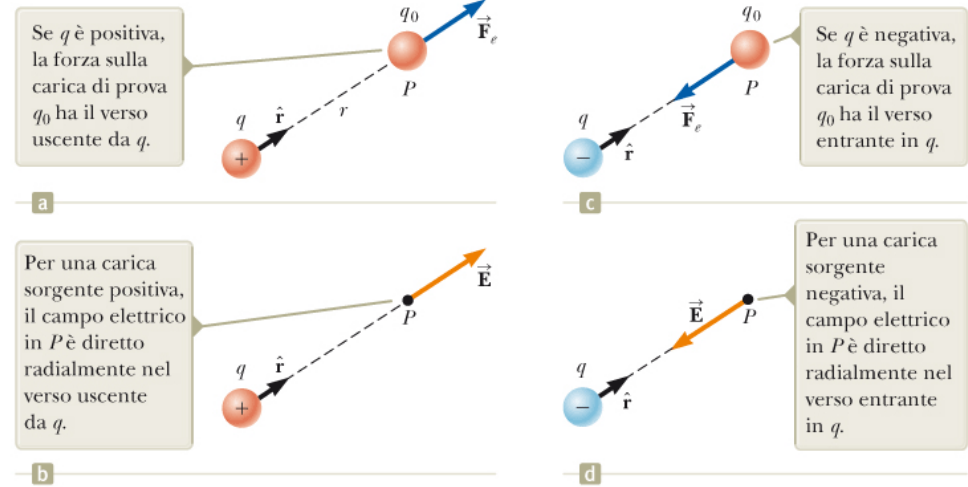
Figura 19.10 Una piccola carica di prova positiva q_0 posta nel punto P vicino ad un oggetto con una carica positiva Q molto maggiore è soggetta ad un campo elettrico $\vec{E}$ nel punto P generato dalla carica Q . Assumeremo *sempre* che la carica di prova sia così piccola che il campo generato dalla carica sorgente non venga alterato dalla sua presenza.

Campi elettrici

- Una volta noto il campo elettrico in un punto dello spazio, la forza su qualsiasi particella con carica q posta in quel punto si calcola con

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

Figura 19.11 (a), (c) Quando una carica di prova q_0 viene posta vicina ad una carica sorgente q , la carica di prova è soggetta ad una forza. (b), (d) In un punto P vicino alla carica sorgente q , esiste un campo elettrico.



EdiSES R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

- Considerando un carica puntiforme q ad una distanza r dalla carica di prova q_0 , in base alla legge di Coulomb:

$$\vec{F}_e = k_e \frac{qq_0}{r^2} \hat{r}$$

- Data la definizione di campo elettrico troviamo che:

$$\vec{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (\text{campo elettrico generato da carica puntiforme})$$

- Per il principio di sovrapposizione il campo elettrico in un punto P di un insieme di cariche puntiformi è dato da:

$$\vec{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Quiz rapido

- Una carica di prova di $+3\mu C$ si trova in un punto P dove il campo elettrico esterno è diretto verso destra e ha un modulo di $4 \times 10^6 N/C$. Se la carica di prova è sostituita con una carica di $-3\mu C$, cosa accade al campo elettrico esterno in P?
- A. Rimane inalterato
 - B. Inverte il verso
 - C. Varia in modo che non può essere determinato

Quiz rapido

- Una carica di prova di $+3\mu C$ si trova in un punto P dove il campo elettrico esterno è diretto verso destra e ha un modulo di $4 \times 10^6 N/C$. Se la carica di prova è sostituita con una carica di $-3\mu C$, cosa accade al campo elettrico esterno in P?

- ☒ A. Rimane inalterato
- ☐ B. Inverte il verso
- ☐ C. Varia in modo che non può essere determinato

Esempio – Campo elettrico di un dipolo

- Un dipolo elettrico è costituito da una carica puntiforme positiva q e da una carica puntiforme negativa $-q$ separate da una distanza $2a$, come mostrato in figura. Gli atomi neutri e le molecole, se posti in un campo elettrico esterno, si comportano come dipoli. Inoltre molte molecole, come HCl, sono dipoli permanenti (HCl può essere descritta come uno ione H^+ combinato con uno ione Cl^-).
- A. Trovare il campo elettrico $\vec{E}$ dovuto al dipolo lungo l'asse y nel punto P che dista y dall'origine
- B. Trovare il campo elettrico nei punti $y \gg a$ lontani dal dipolo

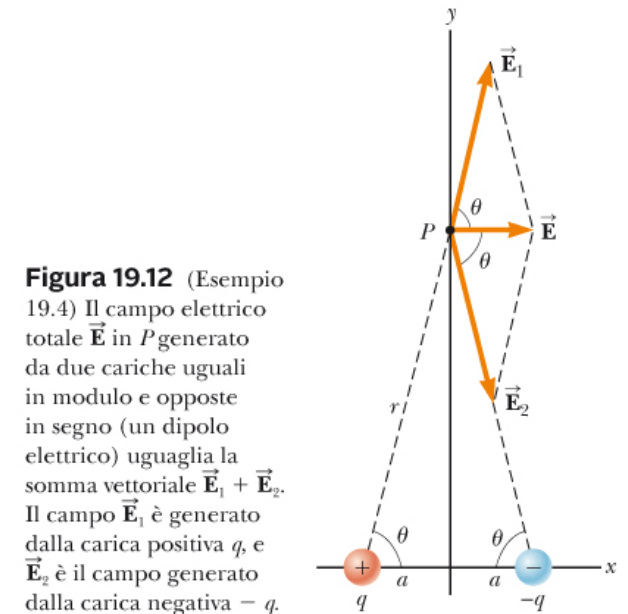


Figura 19.12 (Esempio 19.4) Il campo elettrico totale $\vec{E}$ in P generato da due cariche uguali in modulo e opposte in segno (un dipolo elettrico) uguaglia la somma vettoriale $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Il campo $\vec{E}_1$ è generato dalla carica positiva q , e $\vec{E}_2$ è il campo generato dalla carica negativa $-q$.

Campo elettrico da una distribuzione continua di carica

- In molti casi pratici la distanza media di separazione fra le cariche è piccola in confronto a quella dal punto in cui si vuole calcolare il campo. Il sistema di cariche sorgenti può quindi essere considerato continuo.
- In riferimento alla figura, il campo elettrico totale $\vec{E}$ nel punto P, dovuto a tutti gli elementi della distribuzione di cariche, è approssimativamente dato da

$$\vec{E} \approx k_e \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

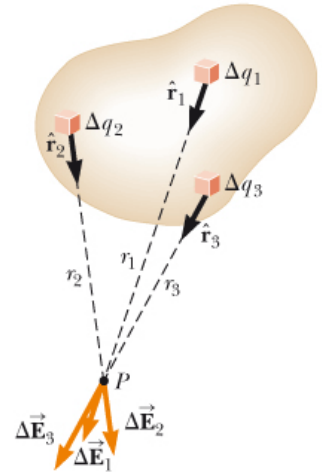


Figura 19.13 Il campo elettrico $\vec{E}$ in P generato da una distribuzione continua di carica è la somma vettoriale dei campi $\Delta\vec{E}$ generati dagli elementi di carica Δq_i della distribuzione di carica. Vengono mostrati tre elementi campione.

Campo elettrico da una distribuzione continua di carica

- Nel limite $\Delta q_i \rightarrow 0$, il campo totale nel punto P diventa

$$\vec{E} = \lim_{\Delta q_i \rightarrow 0} k_e \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

- Se una carica Q è uniformemente distribuita in un **volume** V , la **densità di carica per volume** ρ è definita da

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

- Se una carica Q è uniformemente distribuita su una **superficie** di area A , la **densità superficiale di carica** σ è definita da

$$\sigma \equiv \frac{Q}{A}$$

- Se una carica Q è uniformemente distribuita lungo una **linea** di lunghezza l , la **densità lineare di carica** per volume λ è definita da

$$\lambda \equiv \frac{Q}{l}$$

Esempio – Il campo elettrico di una sbarretta carica

- Una sbarretta di lunghezza l , ha una densità di carica uniforme λ e una carica totale positiva Q . Calcolare il campo elettrico in un punto P lungo l'asse della sbarretta a una distanza a da un estremo.

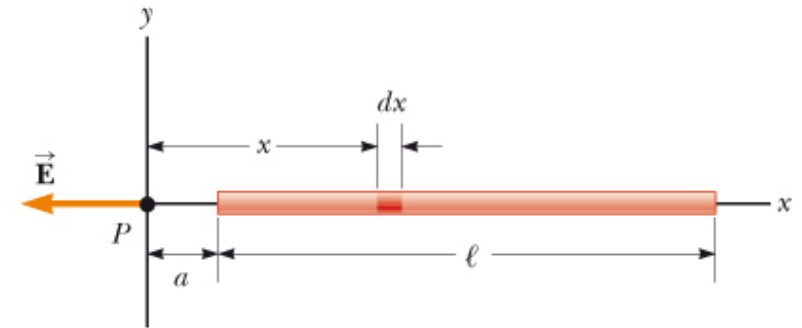


Figura 19.14 (Esempio 19.5) Il campo elettrico generato in P da una sbarretta uniformemente carica posta sull'asse x .



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

Esempio – Campo elettrico di un anello uniformemente carico

- Un anello di raggio a ha una densità lineare di carica positiva uniforme, con carica totale Q . Calcolare il campo elettrico generato dall'anello in un punto P posto a distanza x dal centro dell'anello lungo l'asse centrale perpendicolare al piano dell'anello.

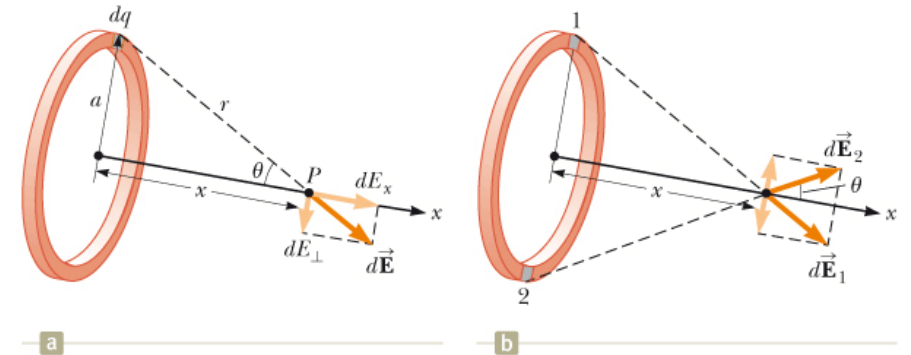


Figura 19.15 (Esempio 19.6) Un anello uniformemente carico di raggio a . (a) Il campo in P sull'asse x generato dall'elemento di carica dq . (b) Il campo elettrico totale in P è diretto lungo l'asse x . La componente perpendicolare del campo in P generata dal segmento 1 viene cancellata dalla componente perpendicolare del campo generata dal segmento 2.

Linee di campo elettrico

- Le linee di campo elettrico sono una rappresentazione grafica legata al campo elettrico nel seguente modo:
 - Il vettore campo elettrico $\vec{E}$ è tangente alle linee di campo in ogni punto
 - Il numero di linee di campo per unità di area che attraversano una superficie perpendicolare alle linee stesse è proporzionale all'intensità del campo elettrico in quella regione. Quindi, E è intenso dove le linee di campo sono fitte ed è debole dove si diradano.

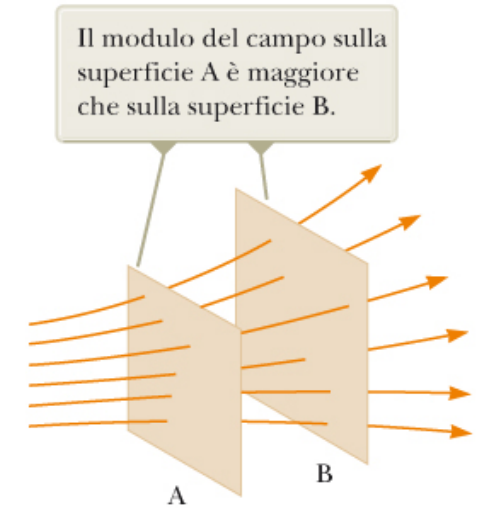


Figura 19.16 Linee del campo elettrico attraverso due superfici.

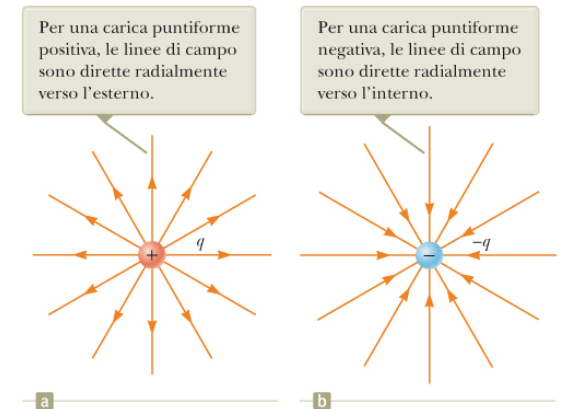


Figura 19.17 Le linee del campo elettrico per una carica puntiforme. Si noti che le figure mostrano solo quelle linee di campo che giacciono sul piano della pagina.

Linee di campo elettrico

- **Regole per disegnare le linee di campo:**
 - Le linee di campo devono avere origine dalle cariche positive e terminare sulle cariche negative. Nel caso di un eccesso di carica di un tipo, alcune linee inizieranno o termineranno all'infinito
 - Il numero di linee di campo designate che escono da una carica positiva o che entrano in una carica negativa è proporzionale alla carica
 - Due linee di campo non si possono intersecare
- **Quiz Rapido 19.5:** Ordina i moduli del campo elettrico nei punti A, B, e C in figura 19.19, iniziando dal più grande.

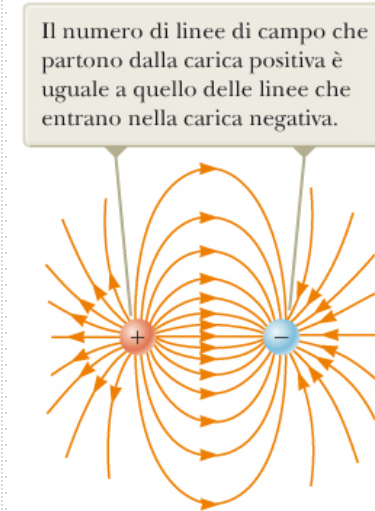


Figura 19.18 Le linee del campo elettrico per due cariche di modulo uguale e di segno opposto (un dipolo elettrico).



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

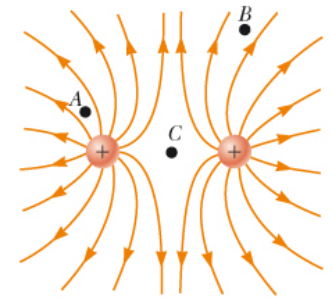


Figura 19.19 Le linee del campo elettrico generate da due cariche puntiformi positive (le posizioni A, B, e C sono discusse nel Quiz Rapido 19.5).

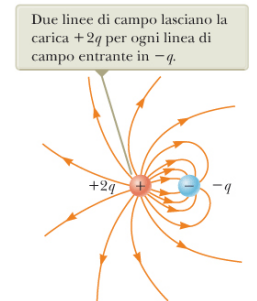


Figura 19.20 Le linee del campo elettrico generate da una carica puntiforme $+2q$ e da una seconda carica puntiforme $-q$.



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

Linee di campo elettrico

- **Regole per disegnare le linee di campo:**
 - Le linee di campo devono avere origine dalle cariche positive e terminare sulle cariche negative. Nel caso di un eccesso di carica di un tipo, alcune linee inizieranno o termineranno all'infinito
 - Il numero di linee di campo designate che escono da una carica positiva o che entrano in una carica negativa è proporzionale alla carica
 - Due linee di campo non si possono intersecare
- **Quiz Rapido 19.5:** Ordina i moduli del campo elettrico nei punti A, B, e C in figura 19.19, iniziando dal più grande.

A,B,C

Il numero di linee di campo che partono dalla carica positiva è uguale a quello delle linee che entrano nella carica negativa.

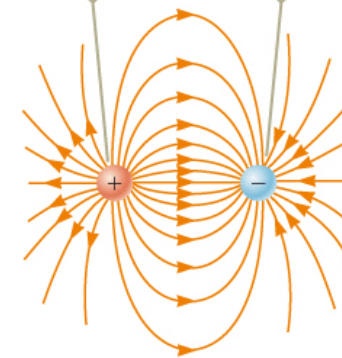


Figura 19.18 Le linee del campo elettrico per due cariche di modulo uguale e di segno opposto (un dipolo elettrico).



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

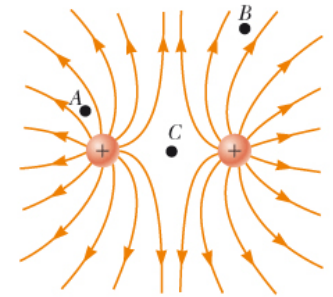


Figura 19.19 Le linee del campo elettrico generate da due cariche puntiformi positive (le posizioni A, B, e C sono discusse nel Quiz Rapido 19.5).

Due linee di campo lasciano la carica $+2q$ per ogni linea di campo entrante in $-q$.

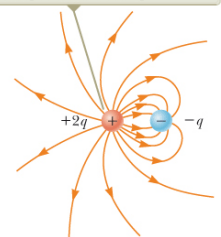


Figura 19.20 Le linee del campo elettrico generate da una carica puntiforme $+2q$ e da una seconda carica puntiforme $-q$.



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

Moto di particelle cariche in un campo elettrico uniforme

- Se la forza elettrica è l'unica forza agente su una particella, la seconda legge di Newton applicata alla particella dà

$$\vec{F}_e = q\vec{E} = m\vec{a}$$

L'accelerazione della particella è quindi data da

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$$

Se $\vec{E}$ è uniforme (cioè costante in modulo, direzione e verso), l'accelerazione è costante e possiamo applicare il modello del moto uniformemente accelerato per descrivere il moto della particella.

Esempio – Una carica positiva accelerata: due modelli

- Un campo elettrico uniforme $\vec{E}$ è diretto lungo l'asse x tra piani paralleli carichi separati da una distanza d come mostrato in figura. Una carica puntiforme positiva q di massa m è lasciata libera in quiete in un punto A vicino al piano carico positivamente e accelera verso il punto B vicino al piano negativo.
- A. Trovare la velocità della particella in B trattandola come una particella che si muove con accelerazione costante
 - B. Trovare la velocità della particella in B applicando il modello di un sistema non isolato

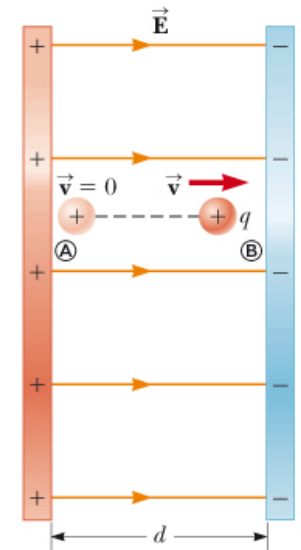


Figura 19.21 (Esempio 19.7) Una carica puntiforme positiva q in un campo elettrico uniforme $\vec{E}$ subisce una accelerazione costante nel verso del campo.

Esempio – Un elettrone accelerato

- Un elettrone entra in una regione di campo elettrico uniforme, come nella figura a fianco, con $v_i = 3.00 \times 10^6 \text{ m/s}$ e $E = 200 \text{ N/C}$. La lunghezza orizzontale delle piastre è $l = 0.100 \text{ m}$.
- A. Trovare l'accelerazione dell'elettrone nel campo elettrico
- B. Immaginiamo che l'elettrone entri nella regione in cui c'è il campo elettrico all'istante $t=0$; trovare l'istante in cui esce dalla regione in cui è presente il campo.

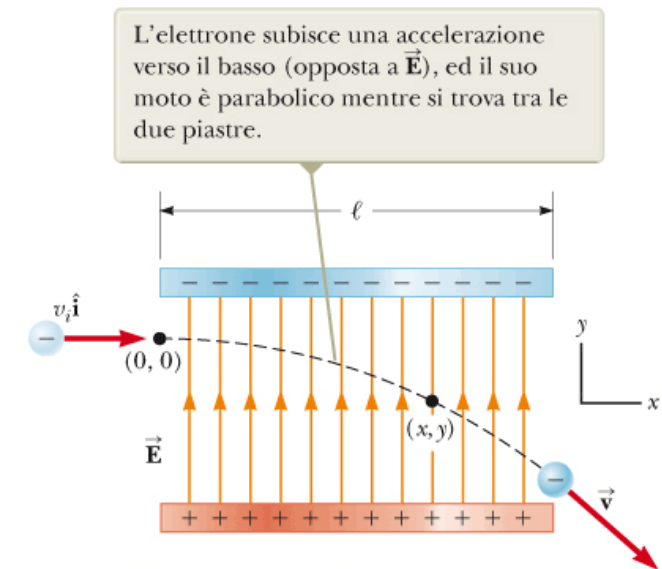


Figura 19.22 (Esempio 19.8) Un elettrone viene lanciato orizzontalmente in un campo elettrico uniforme prodotto da due piastre cariche.

Flusso Elettrico

- Il flusso elettrico è una grandezza proporzionale al numero di linee di campo elettrico che attraversano una data superficie.
- Consideriamo dapprima un campo elettrico uniforme sia in modulo che direzione e verso e che le linee di campo attraversino una superficie rettangolare di area A , perpendicolare al campo.
- Il numero di linee che attraversano la superficie di area A è proporzionale al prodotto EA
- Il prodotto dell'intensità del campo elettrico E per l'area A perpendicolare alla direzione del campo è chiamato flusso elettrico:

$$\Phi_e = EA$$

Dalle unità SI di E e A vediamo che il flusso ha come unità $N \cdot m^2 / C$.

- Se la superficie considerata non è perpendicolare al campo (figura a fianco), il numero di linee che la attraversano deve essere minore di quanto dato dall'equazione $\Phi_e = EA$
- Si può concludere che il flusso è dato da $\Phi_e = EA \cos \theta$

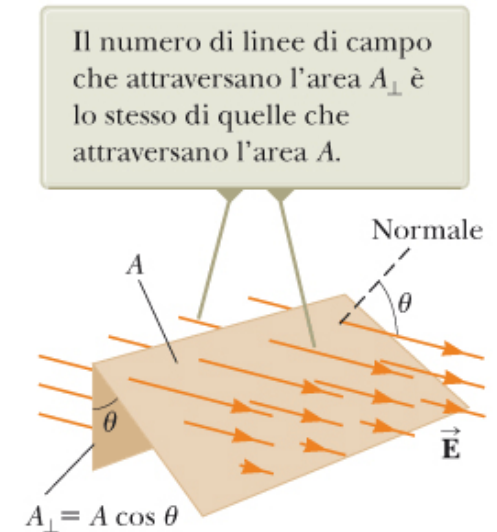


Figura 19.24 Linee di campo rappresentanti un campo elettrico uniforme che attraversa un'area A che forma un certo angolo θ rispetto al campo.

Flusso Elettrico

- Nel caso più generale il campo elettrico può variare sia in modulo che direzione e verso sulla superficie in questione. La definizione di flusso data precedentemente ha significato solo su un piccolo elemento di area (figura a fianco). Il flusso elettrico attraverso un piccolo elemento di area è dato da

$$\Delta\Phi_e = E_i \Delta A_i \cos \theta = \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i$$

(Abbiamo usato la definizione di prodotto scalare fra due vettori).

- Facendo tendere l'area di ogni elemento di superficie a zero, il numero degli elementi tende ad infinito e la somma è sostituita da un integrale. Quindi la definizione generale di flusso elettrico è

$$\Phi_e \equiv \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \sum \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i = \int_{superficie} \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Il campo elettrico forma un angolo θ_i con il vettore $\Delta\vec{A}_i$, definito come la normale all'elemento di superficie.

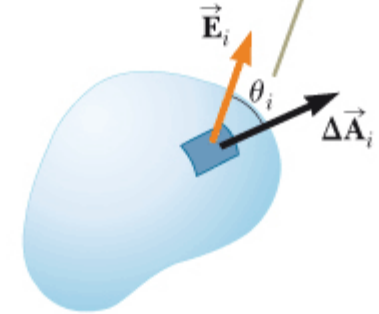


Figura 19.25 Un piccolo elemento di superficie di area ΔA_i .



R.A. Serway, J. W. Jewett Jr
Principi di Fisica - V Ed.
EdiSES

Flusso Elettrico

- Superficie chiusa (ad es. sfera o quella in figura a fianco)
- Possiamo scrivere il flusso totale attraverso una superficie chiusa come

$$\Phi_e = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint E_n dA$$

In cui E_n rappresenta la componente del campo elettrico normale alla superficie e

$\oint$

È il simbolo per rappresentare un integrale esteso ad una superficie chiusa.

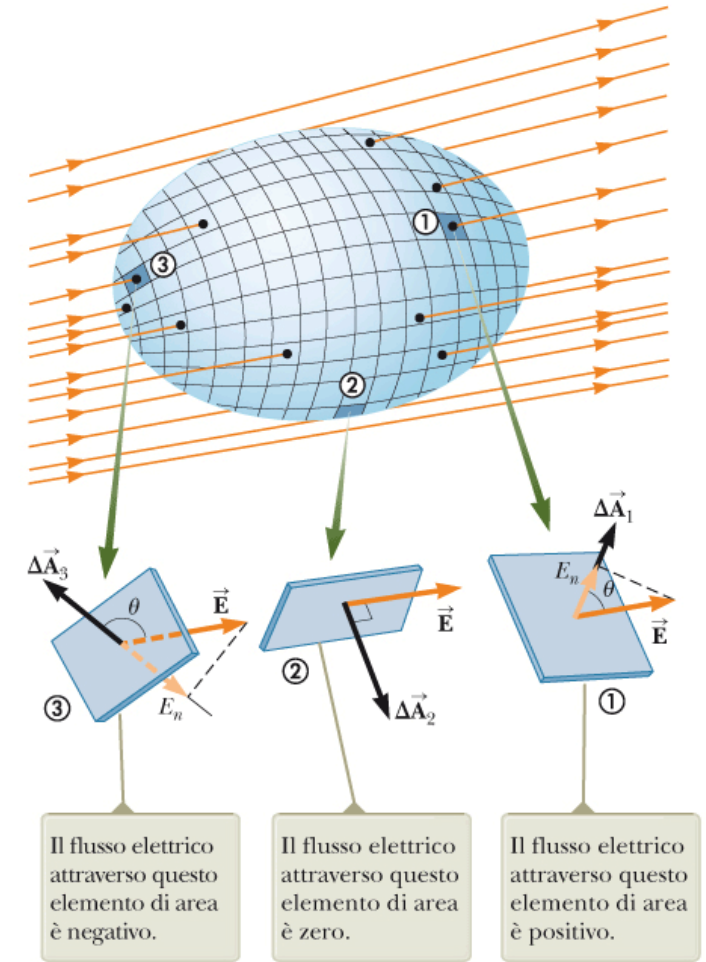


Figura 19.26 Una superficie chiusa in un campo elettrico. I vettori area sono, per convenzione, normali alla superficie ed orientati verso l'esterno.

Esempio – Flusso attraverso un cubo

- Consideriamo un campo elettrico uniforme $\vec{E}$ orientato lungo la direzione x nel vuoto. Un cubo di spigolo l è posto nel campo come mostrato in figura. Trovare il flusso elettrico totale attraverso la superficie del cubo.

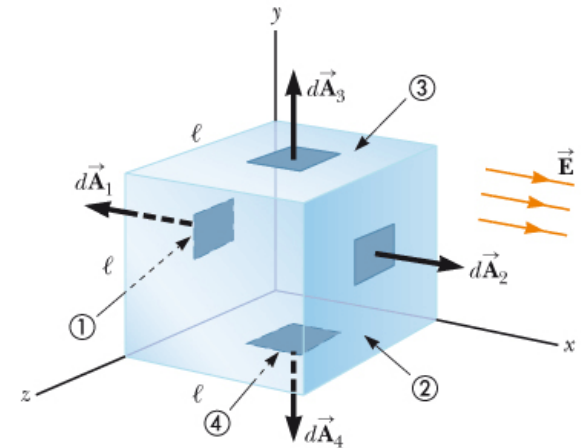


Figura 19.27 (Esempio 19.9) Una superficie chiusa con la forma di un cubo in un campo elettrico uniforme orientato parallelamente all'asse x . La faccia ④ è la base del cubo, e la faccia ① è opposta alla faccia ②.

Teorema di Gauss

- E' una relazione generale tra il flusso elettrico totale attraverso una superficie chiusa e la carica contenuta all'interno di questa superficie
- Afferma che il flusso totale attraverso una qualunque superficie chiusa è dato da

$$\Phi_e = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

Dove q_{in} rappresenta la carica totale interna alla superficie ed $\vec{E}$ rappresenta il campo elettrico in ogni punto della superficie. La superficie chiusa utilizzata nel teorema di Gauss è detta superficie Gaussiana. Il teorema di Gauss è valido per il campo elettrico generato da un sistema di cariche o da una distribuzione continua di carica qualunque.

Quiz Rapido

- Se il flusso totale attraverso una superficie gaussiana è nullo, le seguenti 4 affermazioni potrebbero essere vere. Quali delle affermazioni devono essere vere?
 - A. Non ci sono cariche all'interno della superficie
 - B. La carica totale all'interno della superficie è zero
 - C. Il campo elettrico è zero ovunque sulla superficie
 - D. Il numero di linee di campo elettrico entranti nella superficie è uguale al numero uscente dalla superficie

Quiz Rapido

- Se il flusso totale attraverso una superficie gaussiana è nullo, le seguenti 4 affermazioni potrebbero essere vere. Quali delle affermazioni devono essere vere?

A. Non ci sono cariche all'interno della superficie

B. La carica totale all'interno della superficie è zero

C. Il campo elettrico è zero ovunque sulla superficie

D. Il numero di linee di campo elettrico entranti nella superficie è uguale al numero uscente dalla superficie

Quiz Rapido

- Si consideri la distribuzione di cariche mostrata in figura. Quali sono le cariche che contribuiscono al **flusso** elettrico totale attraverso la superficie S' ?

- A. Solo q_1
- B. Solo q_4
- C. q_2 e q_3
- D. Tutte e 4 le cariche
- E. Nessuna delle 4 cariche

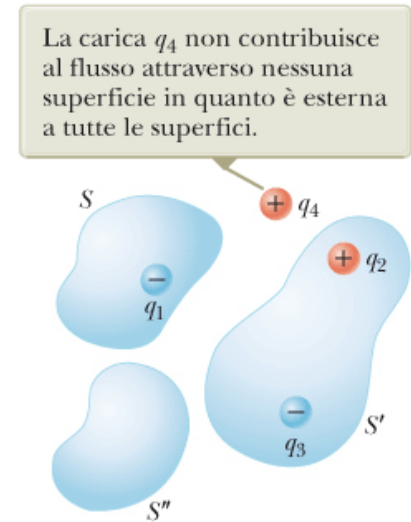


Figura 19.31 Il flusso elettrico totale attraverso qualunque superficie chiusa dipende solo dalla carica all'*interno* della superficie. Il flusso totale attraverso la superficie S è q_1/ϵ_0 , il flusso totale attraverso la superficie S' è $(q_2 + q_3)/\epsilon_0$, e il flusso totale attraverso la superficie S'' è zero.

Quiz Rapido

- Si consideri la distribuzione di cariche mostrata in figura. Quali sono le cariche che contribuiscono al **flusso** elettrico totale attraverso la superficie S' ?

- A. Solo q_1
- B. Solo q_4
- ☒ C. q_2 e q_3
- D. Tutte e 4 le cariche
- E. Nessuna delle 4 cariche

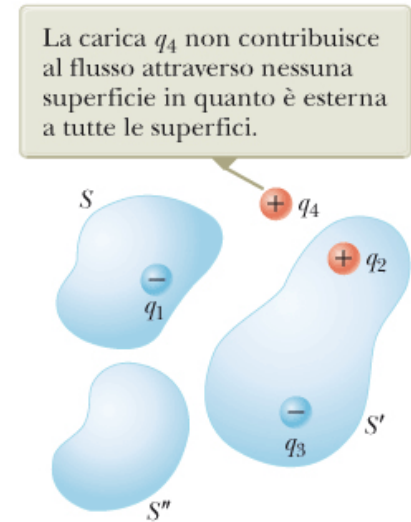


Figura 19.31 Il flusso elettrico totale attraverso qualunque superficie chiusa dipende solo dalla carica all'*interno* della superficie. Il flusso totale attraverso la superficie S è q_1/ϵ_0 , il flusso totale attraverso la superficie S' è $(q_2 + q_3)/\epsilon_0$, e il flusso totale attraverso la superficie S'' è zero.

Applicazioni del teorema di Gauss a distribuzioni simmetriche di cariche

- Il teorema di Gauss è utile per calcolare il campo elettrico quando la distribuzione di carica ha un alto grado di simmetria.
- Il punto cruciale è determinare una superficie opportuna che soddisfi ad esempio una o più tra le seguenti condizioni:
 1. Dalla simmetria si deve dedurre la costanza del campo elettrico sulla porzione di superficie
 2. Il prodotto scalare $\vec{E} \cdot d\vec{A}$ si può esprimere come un semplice prodotto algebrico «E per dA» essendo i 2 vettori paralleli
 3. Il prodotto scalare $\vec{E} \cdot d\vec{A}$ è zero perché i 2 vettori sono perpendicolari
 4. Si può dedurre che il campo è zero sulla porzione considerata della superficie

Esempio – Distribuzione di carica a simmetria sferica

- Una sfera isolante solida di raggio a possiede una densità di volume di carica uniforme ρ e una carica totale positiva Q .
- A. Calcolare l'intensità del campo elettrico in un punto al di fuori della sfera
- B. Calcolare l'ampiezza del campo elettrico in un punto interno alla sfera.

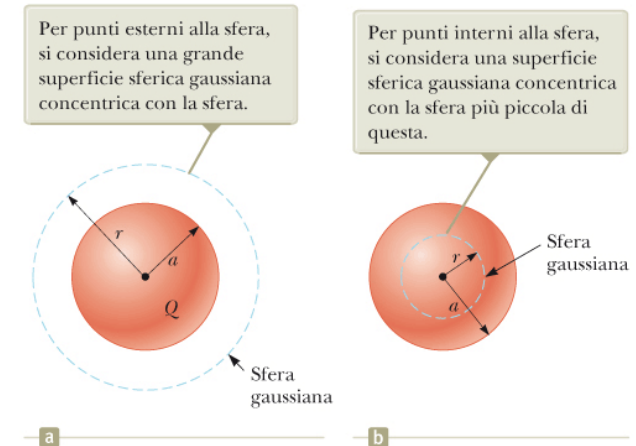


Figura 19.32 (Esempio 19.10) Una sfera isolante carica uniformemente di raggio a e con carica Q . In diagrammi come questi la linea tratteggiata rappresenta l'intersezione della superficie gaussiana col piano della pagina.

Esempio – Distribuzione di carica a simmetria cilindrica

- Calcolare il campo elettrico a una distanza r generato da un filo uniformemente carico positivo di lunghezza infinita e carica per unità di lunghezza λ costante (figura (a) di fianco)

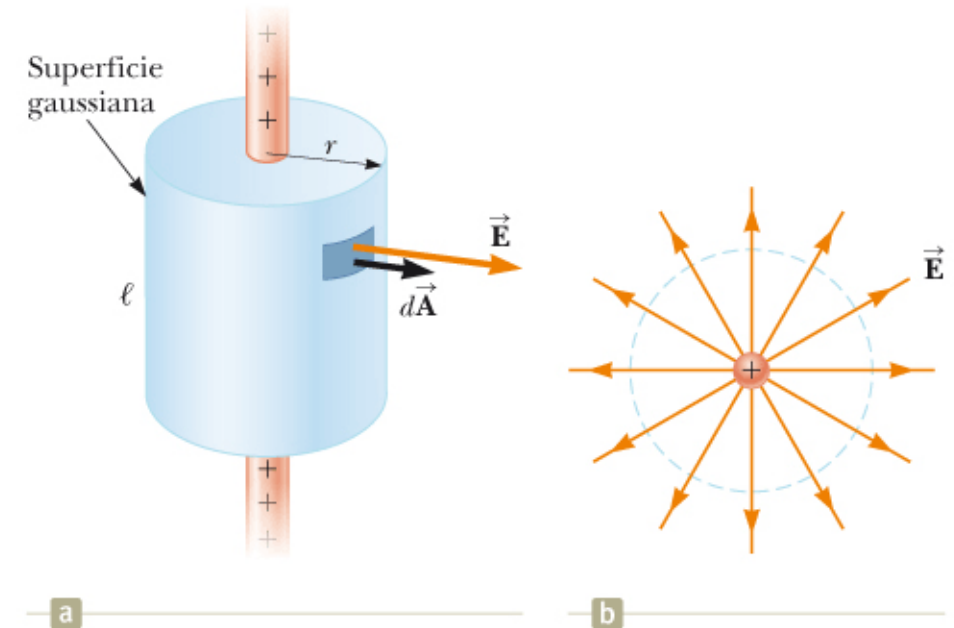


Figura 19.33 (Esempio 19.11) (a) Distribuzione lineare infinita circondata da una superficie gaussiana cilindrica coassiale alla distribuzione di carica. (b) Una vista in sezione mostra che il campo elettrico sulla superficie cilindrica è costante in modulo e perpendicolare alla superficie.

Esempio – Un piano carico

- Trovare il campo elettrico creato da un piano infinito con una densità superficiale di carica σ .

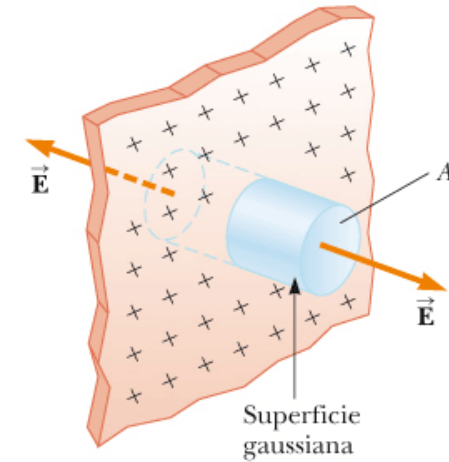


Figura 19.34 (Esempio 19.12)
Una superficie gaussiana cilindrica che penetra una distribuzione piana di carica infinita. Il flusso attraverso ciascuna delle basi della superficie gaussiana è EA , mentre è zero attraverso la superficie curva.

Conduttori in equilibrio elettrostatico

- Quando non esiste un movimento di cariche nel conduttore (a parte l'agitazione termica), il conduttore è in equilibrio elettrostatico. Un conduttore isolato (isolato da terra) in equilibrio elettrostatico possiede le seguenti proprietà:
 1. Il campo elettrico all'interno del conduttore è nullo ovunque, indipendentemente dal fatto che il conduttore sia pieno o cavo
 2. Una qualunque carica aggiunta a un conduttore isolato deve risiedere unicamente sulla superficie esterna
 3. Il campo elettrico in un punto appena al di fuori di un conduttore carico è perpendicolare alla superficie del conduttore e ha intensità σ/ϵ_0 dove σ è la densità superficiale di carica in quel punto
 4. Su un conduttore di forma irregolare, la densità di carica superficiale è maggiore in punti in cui il raggio di curvatura della superficie è minimo

Il campo elettrico atmosferico

- Sulla superficie della terra e nell'atmosfera, un certo numero di processi (raggi cosmici, decadimento radioattivo, fulmini) creano distribuzioni di cariche, dando luogo ad un campo elettrico nell'atmosfera
- Esiste quindi una carica media negativa distribuita sulla superficie terrestre di circa $5 \times 10^5 C$, la corrispondente carica positiva è distribuita nell'atmosfera (la terra nel suo insieme è neutra)

- La densità superficiale media di carica sulla superficie della terra è

$$\sigma_{media} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{5 \times 10^5 C}{4\pi (6.37 \times 10^6 m)^2} \sim 10^{-9} C/m^2$$

- La terra è un buon conduttore. Dalla proprietà 3 della slide precedente possiamo ricavare l'intensità media del campo elettrico sulla superficie terrestre:

$$E_{medio} = \frac{\sigma_{media}}{\epsilon_0} = \frac{10^{-9} C/m^2}{8.85 \times 10^{-12} C^2/N \cdot m^2} \sim 10^2 N/C$$

Questo è un tipico valore del **campo elettrico durante le giornate di bel tempo**, durante un temporale il campo elettrico al di sotto delle nubi è più alto a causa della distribuzione di carica nelle nubi temporalesche...

Il campo elettrico atmosferico

- Tipica distribuzione di carica in una nube temporalesca
- E' questa distribuzione di carica che è responsabile dei campi elettrici estremamente intensi che causano la scarica di fulmini tra la nube ed il suolo

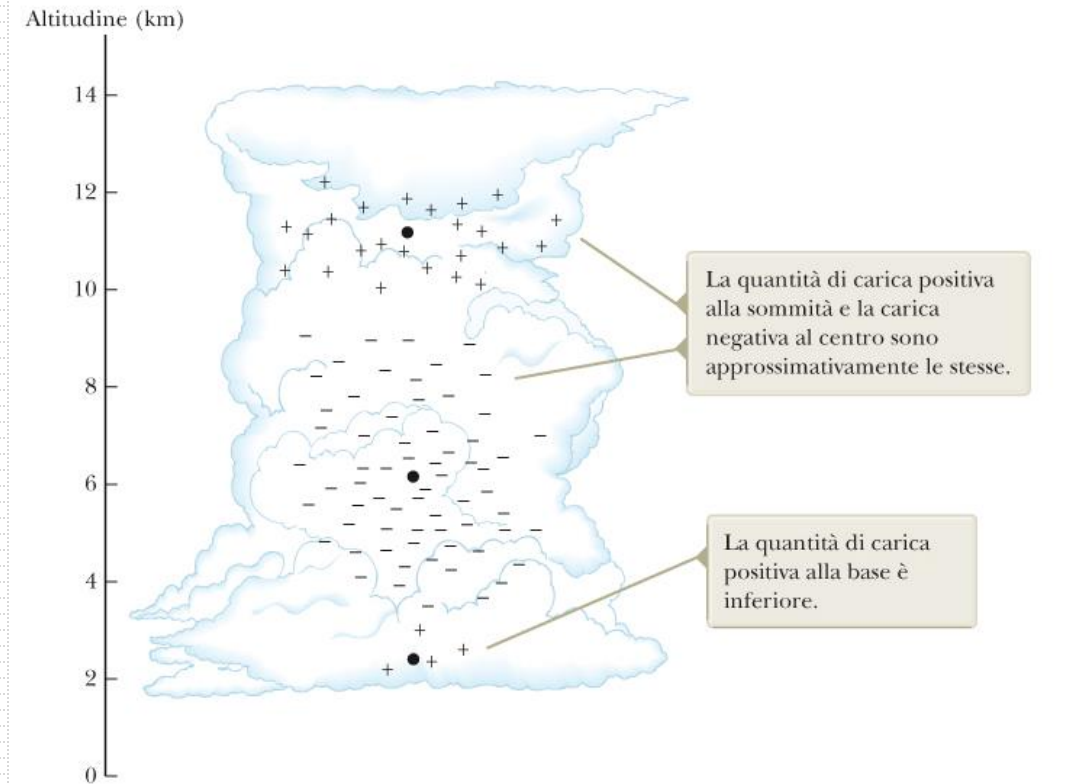


Figura 19.38 Una tipica distribuzione tripolare in una nube temporalesca. I punti indicano la posizione media di ogni distribuzione di carica.

Sommario (1)

- Le **cariche elettriche** hanno le seguenti importanti proprietà:
 1. In natura esistono due specie di cariche, **positive** e **negative**, con la proprietà che cariche di segno opposto si attraggono reciprocamente e cariche dello stesso segno si respingono reciprocamente.
 2. La forza tra particelle cariche varia come l'inverso del quadrato della loro distanza
 3. La carica elettrica si conserva
 4. La carica è quantizzata

Sommario (2)

- **Conduttori** sono quei materiali nei quali le cariche si muovono quali liberamente. **Isolanti** sono quei materiali nei quali le cariche non si muovono liberamente.

Sommario (3)

- La **legge di Coulomb** stabilisce che la forza elettrostatica che si esercita fra due particelle cariche a riposo e separate da una distanza r ha modulo dato da

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

dove la costante di Coulomb ha il valore $k_e = 8.99 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$

- La forma vettoriale della legge di Coulomb è

$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$

Sommario (4)

- Un campo elettrico esiste in un punto dello spazio se una carica di prova positiva q_0 posta in quel punto subisce una forza elettrica. Il campo elettrico è definito come

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}_e}{q_0}$$

- La forza agente su una particella di carica q posta in un campo elettrico $\vec{E}$ è

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

Sommario (5)

- Il campo elettrico dovuto a una carica puntiforme q a una distanza r dalla carica è

$$\vec{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

dove $\hat{r}$ è un versore diretto dalla carica verso il punto in questione. Il campo elettrico è diretto radialmente in uscita da una carica positiva e diretto verso una carica negativa.

Sommario (6)

- Il campo elettrico generato da un insieme di cariche si può ottenere usando il principio di sovrapposizione. Cioè, il campo elettrico totale è uguale alla somma vettoriale in un certo punto dei campi elettrici di tutte le cariche:

$$\vec{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

- Analogamente, il campo elettrico in un certo punto di una distribuzione continua di carica è

$$\vec{E} = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

dove dq è la carica su un elemento della distribuzione di carica e r è la distanza dell'elemento dal punto in esame.

Sommario (7)

- Le **linee di campo elettrico** sono utili per descrivere il campo elettrico in qualunque regione dello spazio. Il vettore campo elettrico $\vec{E}$ è sempre tangente alle linee di campo in ogni punto. Inoltre, il numero di linee di campo per unità di area su una superficie perpendicolare alle linee di campo è proporzionale al modulo di $\vec{E}$ in quella regione.

Sommario (8)

- Il **flusso elettrico** è proporzionale al numero di linee di campo elettrico che attraversano una superficie. Se il campo elettrico è uniforme e forma un angolo θ con la normale alla superficie, il flusso elettrico attraverso la superficie è

$$\Phi_E = EA \cos \theta$$

In generale, il flusso di campo elettrico attraverso una superficie è definito dall'espressione

$$\Phi_E \equiv \int_{\text{superficie}} \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Sommario (9)

- Il **teorema di Gauss** dice che il flusso totale del campo elettrico Φ_E attraverso una qualunque superficie chiusa (gaussiana) è uguale alla carica totale contenuta all'interno della superficie divisa per ϵ_0 :

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

Usando il teorema di Gauss, si può calcolare il campo elettrico dovuto a varie distribuzioni simmetriche di carica.

Sommario (10)

- Un conduttore in equilibrio elettrostatico ha le seguenti proprietà:
 1. Il campo elettrico all'interno del conduttore è nullo dovunque, indipendentemente dal fatto che il conduttore sia pieno o sia cavo.
 2. Se il conduttore è isolato e porta una carica elettrica, la carica sta sulla superficie esterna.
 3. Il campo elettrico in un punto appena al di fuori di un conduttore carico è perpendicolare alla superficie del conduttore ed ha intensità σ/ϵ_0 dove σ è la densità superficiale di carica in quel punto.
 4. Su un conduttore di forma irregolare, la carica tende ad accumularsi in punti il cui raggio di curvatura della superficie è minimo.