

1. Interazioni elettrostatiche

1. Alcuni fatti sperimentali – Prime definizioni di carica elettrica

L'ambra è una sostanza, che, strofinata con un pezzo di stoffa, acquista la proprietà di attrarre corpi leggeri, come pagliuzze, fili d'erba, pezzetti di carta. Per indicare questa proprietà si dice che l'ambra si *elettrizza*. Il termine *elettricità*, introdotto dall'inglese William Gilbert (1540, 1603), deriva dal nome stesso dell'ambra: *élektron*, in greco.

Molte altre sostanze, quando sono strofinate, si comportano come l'ambra: si elettrizzano e attirano piccoli corpi. Tra queste sostanze ci sono il vetro e molte materie plastiche, per esempio il *plexiglas*.

È possibile elettrizzare gli oggetti anche senza strofinio, ponendoli semplicemente a contatto con altri oggetti già elettrizzati. In tal caso si parla di *elettrizzazione per contatto*.

Due oggetti elettrizzati interagiscono tra loro. Se sono dello stesso materiale e vengono elettrizzati allo stesso modo, i due oggetti si respingono. È il caso, per esempio, di due sferette di vetro strofinate con lana. Se invece sono oggetti di materiale diverso possono anche attrarsi, come, per esempio, nel caso di due sferette di vetro e plastica.

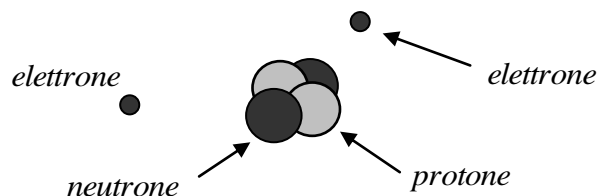
Verso la metà del Settecento il fisico statunitense Benjamin Franklin (1706-1790) spiegò questi fenomeni parlando di fluidi elettrici scambiati tra i diversi corpi. Secondo Franklin, durante lo strofinio o il contatto, una certa *quantità di elettricità* si trasferisce da un oggetto a un altro.

Alla quantità di elettricità si dà il nome di **carica elettrica**. Per distinguere l'attrazione e la repulsione tra corpi carichi, diciamo che, strofinando una bacchetta di vetro con un panno di lana, il vetro acquista una *carica positiva*, mentre la lana acquista una *carica negativa* di uguale entità. Viceversa, strofinando una bacchetta di plexiglas con un panno di lana, il plexiglas si carica negativamente e la lana si carica positivamente in egual misura.

Il fatto di definire positiva la carica assunta dal vetro e negativa quella assunta dal plexiglas è una scelta convenzionale. Poiché un corpo non elettrizzato non ha la proprietà di esercitare forze elettriche sui corpi circostanti, diciamo che esso è *elettricamente neutro*: contiene cariche positive e negative in ugual numero.

2. Struttura dell'atomo

Tutta la materia che ci circonda è fatta di atomi. Un atomo è essenzialmente composto da tre componenti diversi: elettroni, protoni e neutroni. I protoni e i neutroni sono nella parte più interna, nel nucleo, ma solo i protoni hanno una carica elettrica positiva. Gli elettroni, più esterni, hanno carica elettrica negativa.



Normalmente, un atomo è elettricamente neutro: ciò significa che esso ha un ugual numero di protoni e di elettroni; la carica positiva dei protoni è bilanciata dalla carica negativa degli elettroni. Un atomo non ha quindi carica elettrica risultante.

Un elettrone può essere strappato facilmente da un atomo. Quando gli atomi guadagnano o perdono elettroni essi vengono indicati con il nome di *ioni*.

- uno ione positivo, *catione*, è un atomo o una molecola che ha perduto uno o più elettroni.
- uno ione negativo, *anione*, ha invece guadagnato uno o più elettroni aggiuntivi.

3. Carica Elettrica

Quando allora un corpo possiede carica elettrica? Si dice che determinati oggetti hanno una carica elettrica se essi esercitano forze elettriche con altri corpi carichi. La carica elettrica è dunque la causa di una forza elettrica. L'esistenza in un corpo di una carica elettrica macroscopica, cioè osservabile ad occhio o con normali strumenti di misura, è sempre riconducibile alla struttura atomica della materia e cioè al fatto che i costituenti più piccoli della materia (elettroni e protoni) sono dotati di carica elettrica.

Ci sono due tipi di cariche elettriche, la carica positiva (+) e la carica negativa (-). Si è già detto che cariche elettriche dello stesso tipo (+ con +, o - con -) si respingono, mentre cariche opposte (+ con -) si attirano reciprocamente.

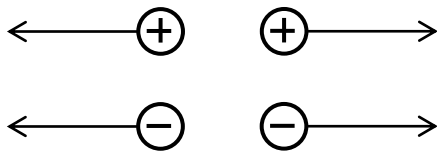


Figura 1 Repulsione tra cariche dello stesso segno



Figura 2 – Attrazione tra cariche di segno opposto

L'unità di misura della grandezza fisica carica elettrica è il coulomb, indicato con "C". 1 coulomb è una carica elettrica enorme. Si pensi che due cariche di 1 coulomb, poste alla distanza di 1 metro, si attraggono (o si respingono) con una forza di 9 miliardi di Newton, pari al peso di 900.000 tonnellate. Le cariche elettriche in gioco nei processi di elettrizzazione sono molto più piccole.

4. Conduttori ed isolanti

Le sostanze possono essere classificate dal punto di vista elettrico in tre categorie: *isolanti*, *conduttori*, e *semiconduttori*.

Gli **Isolanti** sono materiali che si lasciano attraversare da pochissime cariche elettriche, come anche da pochissima energia termica. Le plastiche, il vetro, l'aria secca e il legno secchi sono esempi di isolanti.

I **Conduttori** sono materiali in cui le cariche elettriche e l'energia termica si possono trasmettere molto facilmente. Quasi tutti i metalli, come l'argento, il rame, il ferro, l'oro ed il piombo, sono buoni conduttori; sono buoni conduttori di elettricità l'acqua salata o acidula.

I **Semiconduttori** sono materiali che permettono alle cariche elettriche di scorrere meglio che negli isolanti, ma meno che nei conduttori. Esempi di semiconduttori sono il silicio ed il germanio con un drogaggio, cioè la presenza voluta di piccoli quantitativi di altri elementi. I semiconduttori sono alla base del funzionamento di tutte le tecnologie elettroniche.

5. Elettrizzazione

Si definisce elettrizzazione un qualsiasi processo fisico mediante il quale le cariche elettriche positive vengono separate da quelle negative. Un corpo elettrizzato presenta dunque un accumulo di carica elettrica di un solo segno; per tale motivo, può attrarre a sé piccoli oggetti, anche neutri.

Esistono tre tipi di elettrizzazione: per *strofinio*, per *contatto*, per *induzione elettrostatica*.

Elettrizzazione per strofinio

Quando due oggetti sono strofinati insieme, alcuni elettroni da uno degli oggetti si spostano sull'altro. Per esempio, quando una bacchetta di vetro è strofinata su della lana, alcuni elettroni si trasferiscono dal vetro alla lana. Perciò, la lana sarà carica negativamente (in quanto avrà acquistato degli elettroni) e la bacchetta di vetro sarà carica positivamente (in quanto ha perso degli elettroni).

Elettrizzazione per contatto

Un conduttore neutro può essere caricato mettendolo a contatto con un secondo corpo che possiede un eccesso di cariche elettriche dello stesso segno.

Nella *fig. a* il corpo carico è C e il corpo neutro è N; quando C viene posto a contatto con N (*fig. b*), parte delle cariche di C si distribuiscono su N; una volta separati (*fig. c*) i due oggetti risultano carichi entrambi dello stesso segno.

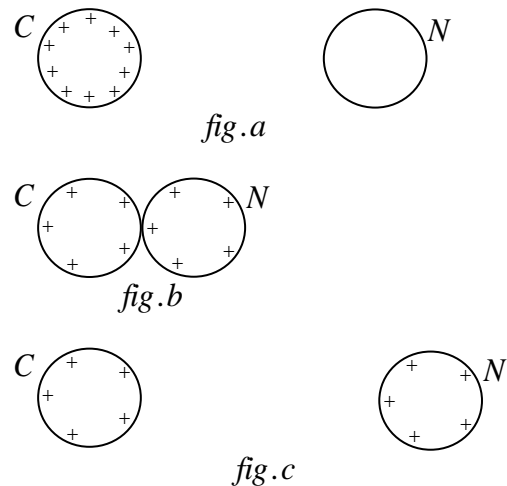


Figura 3 Elettrizzazione per contatto tra due corpi

Elettrizzazione per induzione

Se si avvicina un corpo carico C ad un corpo conduttore senza che essi siano a contatto, nel conduttore avviene una ridistribuzione delle cariche elettriche. Sulla parte del conduttore che guarda al corpo carico appaiono cariche di segno opposto a quelle di C (poiché cariche di segno opposto si attraggono); sul lato opposto del conduttore appaiono cariche dello stesso segno di C (poiché cariche dello stesso segno si respingono).

Ad esempio, se alle due sferette metalliche A e B, inizialmente a contatto tra loro (*fig. a*), viene avvicinato il corpo C carico positivamente (*fig. b*), la sferetta A che è dalla stessa parte di M si carica negativamente; la sferetta B che è dalla parte opposta rispetto a C si carica positivamente (*fig. c*). Se successivamente si separano le due sferette esse manterranno il loro stato di carica (*fig. d e fig. e*).

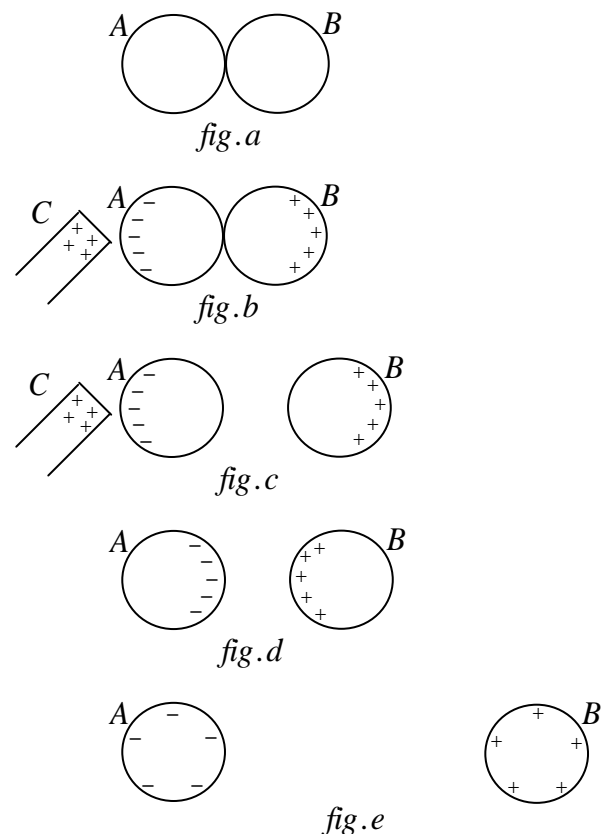


Figura 4 – Elettrizzazione per induzione

6. La Legge di Coulomb

L'interazione tra due cariche elettriche puntiformi fisse nel vuoto è governata dalla *legge di Coulomb*. In base ad essa, la forza esercitata da una carica sull'altra risulta:

- a) direttamente proporzionale al prodotto delle due cariche;
- b) inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le due cariche;
- c) diretta secondo la retta congiungente le due cariche;
- d) repulsiva per cariche dello stesso segno e attrattiva per cariche di segno opposto.

La forza di Coulomb può essere espressa dalla formula seguente:

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

dove:

F è la forza tra le due particelle,

q_1 è la prima carica,

q_2 è la seconda carica,

d è la distanza tra le particelle,

ϵ_0 è una costante che prende il nome di *costante dielettrica del vuoto*, di valore pari a $8,854 \cdot 10^{-12}$.

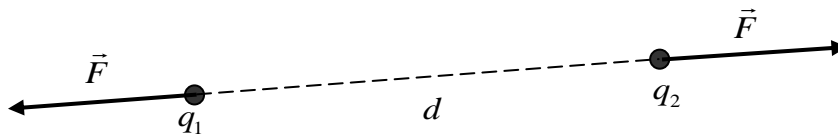


Figura 5 Forze repulsive tra cariche dello stesso segno

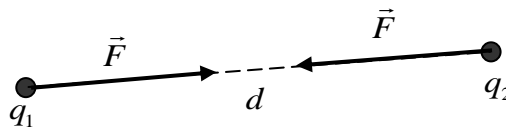


Figura 6 Forze attrattive tra cariche di segno opposto

La forza F viene esercitata dalla carica q_1 sulla carica q_2 e viceversa, dalla carica q_2 sulla carica q_1 . Per il terzo principio della dinamica la forza che q_1 esercita su q_2 è uguale (in modulo e come direzione) ed opposta (come verso) a quella che q_2 esercita su q_1 .

La legge di Coulomb fu enunciata da Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) nel 1785, in seguito ad numerose esperienze con un apparato sperimentale detto *bilancia di torsione*. Tale legge ha avuto dai tempi di Coulomb ad oggi innumerevoli verifiche sperimentali dirette e indirette.

La forza di Coulomb è molto simile, nell'espressione matematica, alla forza di attrazione gravitazionale di Newton. Ricordiamo l'espressione matematica di tale forza:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

dove:

F è la forza di attrazione tra le due masse,

m_1 è la prima massa,

m_2 è la seconda massa,

r è la distanza tra le masse,

G è una costante che prende il nome di *costante di gravitazione universale*.

Come la forza di Coulomb è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche, così la forza di gravitazione universale è direttamente proporzionale al prodotto delle due masse; entrambe le forze sono inversamente proporzionali al quadrato della distanza e sono dirette lungo la retta congiun-

te i due corpi. L'unica differenza strutturale è che la forza di Coulomb può essere attrattiva o repulsiva, mentre la forza di gravitazione è sempre attrattiva.

Inoltre le forze elettriche sono enormemente più intense di quelle gravitazionali: se ad esempio si considerano due protoni, che sono particelle elementari dotate di massa e di carica, le forze elettriche (repulsive perché cariche dello stesso segno) sono 1,2 miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di volte più intense di quelle gravitazionali.

7. Costante dielettrica di un mezzo

Date due cariche elettriche alla distanza r , la forza che si esercita tra loro quando sono immerse in un mezzo è minore di quella che si esercita quando sono nel vuoto.

L'espressione della forza elettrica in un mezzo diverso dal vuoto si modifica così:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Vediamo che al posto della costante ϵ_0 compare la costante ϵ , che è la *costante dielettrica del mezzo*. Il valore della costante dielettrica di un mezzo ϵ si esprime poi rispetto alla costante nel vuoto ϵ_0 secondo la formula seguente:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

dove ϵ_r è la costante dielettrica relativa del mezzo rispetto al vuoto. La formula precedente è molto comoda: per avere il valore della costante dielettrica di un mezzo qualunque, è sufficiente moltiplicare il valore di ϵ_0 per il valore di ϵ_r di quel mezzo. I valori di ϵ_r possono essere trovati sulle tabelle:

mezzo	ϵ_r
Vuoto	1
Aria	1,0006
Plexiglas	3,4
Acqua	80

mezzo	ϵ_r
Olio	2,2
Vetro	da 5 a 80
Porcellana	5,3

Se ad esempio ci chiediamo quanto valga la forza esercitata tra due cariche poste in acqua, rispetto alla forza esercitata tra le stesse due cariche disposte all'asciutto, possiamo scrivere:

$$F_{ACQUA} = \frac{1}{4\pi\epsilon_{ACQUA}} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi \cdot 80 \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = \frac{1}{80} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = \frac{1}{80} \cdot F_{VUOTO}$$

Dunque la forza elettrica tra due cariche in acqua è 80 volte meno intensa di quella che si eserciterebbe tra le stesse due cariche poste nel vuoto.

8. Il principio di sovrapposizione della forza elettrostatica.

Tra due cariche elettriche si esercita una forza attrattiva o repulsiva, il cui valore è determinato dalla legge di Coulomb. Ma se una carica elettrica subisce attrazione non da una, ma da più cariche elettriche contemporaneamente, cosa succede?

Per la forza elettrica vale il cosiddetto *principio di sovrapposizione delle forze*. Tale principio afferma che: *in presenza di più cariche elettriche la forza agente su ciascuna, risultante dall'interazione con tutte le altre, è pari alla somma vettoriale delle forze di Coulomb che su essa vengono esercitate da ogni singola carica.*

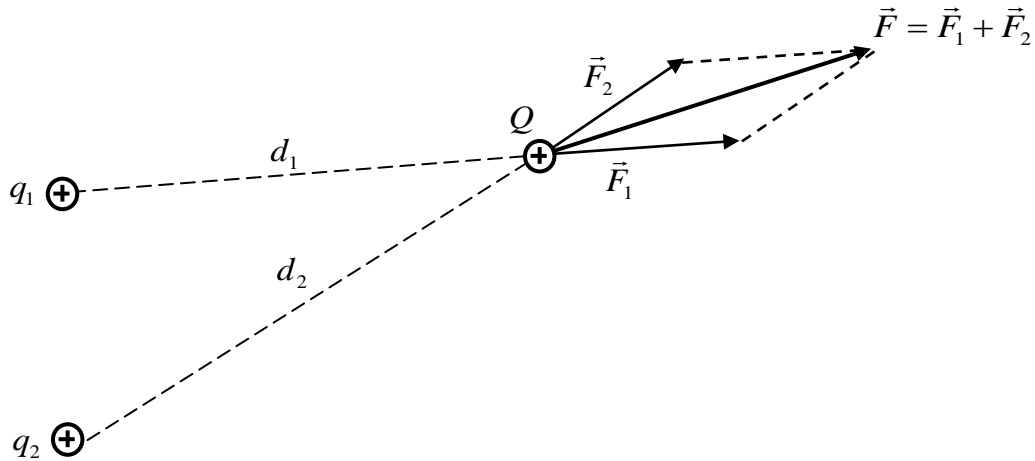


Figura 7 – Sovrapposizione delle forze elettriche

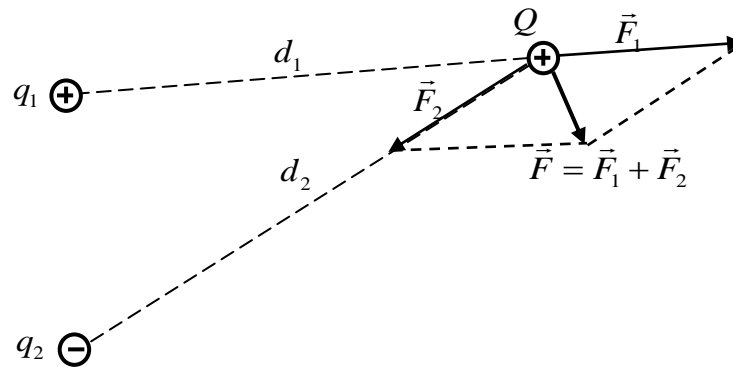


Figura 8 – Sovrapposizione delle forze elettriche

Nelle figure di sopra sulla carica Q (positiva) agisce una forza F_1 , esercitata dalla carica q_1 e una forza F_2 , esercitata dalla carica q_2 (positiva nell'esempio di fig. 7 e negativa nell'esempio di figura 8); la forza complessiva F sarà la somma vettoriale delle due forze F_1 e F_2 , eseguita mediante la nota regola del parallelogramma.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

9. Conservazione della carica elettrica

Un sistema fisico si dice *isolato* quando esso non ha scambi di materia attraverso la superficie che lo limita.

Il principio di conservazione della carica elettrica si può enunciare dicendo che *in un sistema fisico isolato la carica totale, pari alla somma algebrica delle cariche (positive e negative) in esso contenute, è costante nel tempo.*

In altre parole, non è stata mai osservata creazione (o scomparsa) di una singola carica senza che, contemporaneamente si verificasse, nello stesso luogo, la creazione (o la scomparsa) di una carica uguale e contraria.

Il principio di conservazione della carica elettrica fu scoperto sperimentalmente da Michael Faraday (1791-1867), un fisico inglese. L'esperimento consisteva nell'entrare in una grande sfera di metallo, all'esterno della quale c'era un delicatissimo galvanometro per misurare la carica sulla sfera in modo che una piccola carica avesse un grande effetto. All'interno della sfera Faraday costruì ogni

sorta di strani apparecchi elettrici. Produsse delle cariche strofinando bacchette di vetro con pelli di gatto, e costruì grosse macchine elettrostatiche cosicché l'interno della sua sfera sembrava uno di quei laboratori dei film dell'orrore. Ma durante tutti questi esperimenti nessuna carica si sviluppava alla superficie; non c'era nessun cambiamento della carica totale. Sebbene la bacchetta di vetro poteva essere diventata positiva dopo che era stata caricata strofinandola sulla pelle di gatto, questa diventava negativa nella stessa quantità, e la carica totale era sempre nulla, perché, se si fosse sviluppata all'interno della sfera, il suo effetto sarebbe apparso sul galvanometro all'esterno. E così, la carica totale è conservata.

10. Quantizzazione della carica elettrica.

Un risultato sperimentale di grandissima importanza per la fisica è quello della quantizzazione della carica elettrica. Tale risultato è stato confermato da moltissime esperienze, la più importante delle quali è quella di Millikan del 1909:

I valori assunti dalla carica elettrica sono soltanto multipli interi della carica dell'elettrone (che pertanto è indivisibile). Ciò significa che la carica dell'elettrone è la più piccola quantità di carica esistente in natura. Ogni altro corpo ha una carica che può essere uguale a quella dell'elettrone, doppia, tripla, quadrupla di quella dell'elettrone, pari a 1000 volte, ecc., ma mai pari una frazione di quella dell'elettrone. A questo proposito si suole dire che la carica elettrica è *quantizzata*.

La carica di un elettrone, indicata con il simbolo e , è negativa, quella del protone, ad essa uguale in valore assoluto, è positiva. Il suo valore, nel Sistema Internazionale è:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Quanti elettroni ci sono in 1 C di carica?

La risposta corretta è un numero di Avogadro di elettroni, cioè $6,25 \cdot 10^{18}$. Infatti:

$$N_e = \frac{1}{e} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{18}$$

Nota. Già da alcuni anni è stata avanzata l'ipotesi, fondata su considerazioni teoriche, che esistano particelle, i cosiddetti *quark*, aventi carica elettrica frazionaria ed inferiore a quella dell'elettrone, pari a $(+ 2/3)e$ e $(- 1/3)e$; grazie a tale ipotesi è stato possibile inquadrare in un unico modello teorico (il cosiddetto Modello Standard) il grande numero di particelle elementari oggi conosciute.

Data l'elevata intensità delle interazioni nucleari forti, osservare un quark libero richiedere un'energia estremamente elevata, che tuttora è al di là della portata degli acceleratori di particelle. Si pensa sia possibile l'esistenza di un *plasma* di quark e gluoni (QGP) liberi ad elevatissime energie.

Resta un mistero da sciogliere da cosa derivi la carica dei quark e dell'elettrone.

2. Il campo elettrostatico

1. Campi scalari e campi vettoriali

Immaginiamo la seguente situazione: nello stesso istante, molte persone, poste in punti diversi di una stessa regione misurano la temperatura e ce la comunicano. Possiamo descrivere la situazione di quella regione con un disegno in cui indichiamo i vari punti dove si trovano le persone. Associamo a ogni punto un numero, che rappresenta la temperatura misurata in quel luogo. La mappa che ne risulta è il *campo* di temperatura che c'è in quel momento nella regione.

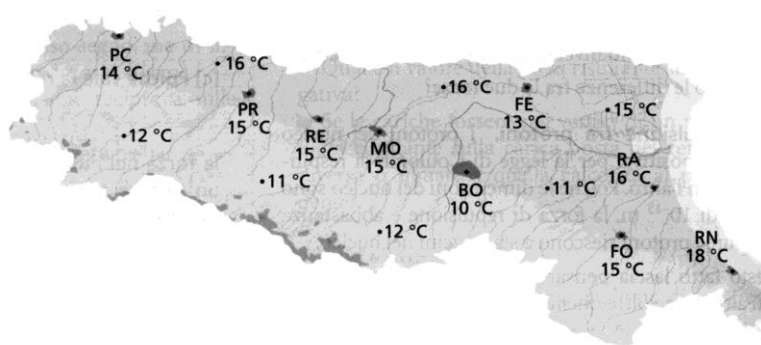


Figura 1 – Campo scalare di temperature

Poiché per specificare la temperatura è sufficiente solo un numero (è una grandezza scalare), il campo di temperatura è definito **campo scalare**. Nello stesso modo, è possibile definire un **campo vettoriale**, che invece rappresenta la distribuzione nello spazio di una grandezza vettoriale.

Quando lo scorso anno abbiamo studiato la gravitazione, abbiamo visto come Terra generi attorno a sé un *campo gravitazionale*. Abbiamo detto che la presenza della Terra “modifica” le proprietà dello spazio circostante nel senso che, se poniamo in un punto qualunque dello spazio vicino alla Terra una massa, questa risente della forza attrattiva terrestre. Per comprendere come la presenza della Terra possa alterare le proprietà dello spazio circostante, abbiamo paragonato lo spazio ad un tappeto elastico. Se il tappeto è libero, esso è ben teso ed indeformato. Se invece sul tappeto viene posto un corpo pesante, esso si deforma e si crea un avvallamento. Un qualunque altro corpo dotato di massa, in movimento sul tappeto, risentirà dell’influenza dell’avvallamento e vi “cadrà dentro” oppure vedrà la sua traiettoria inizialmente rettilinea deformarsi e incurvarsi verso la buca.

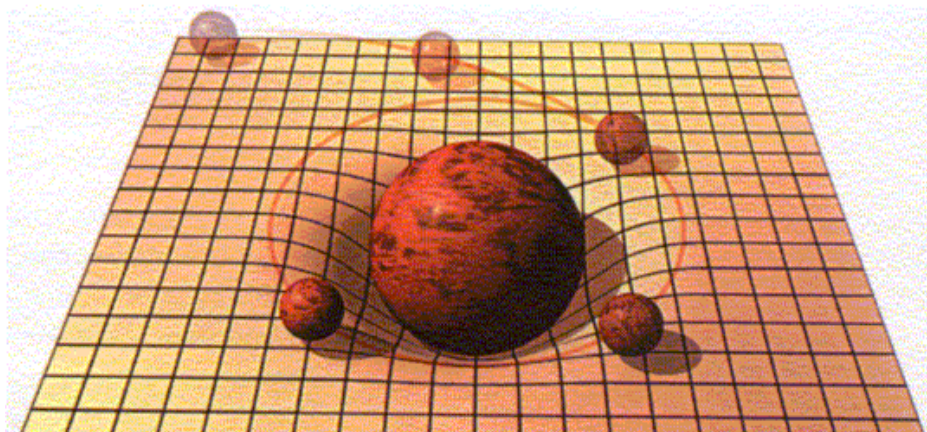


Figura 2 – Rappresentazione di un campo gravitazionale mediante l’analogia del tappeto elastico

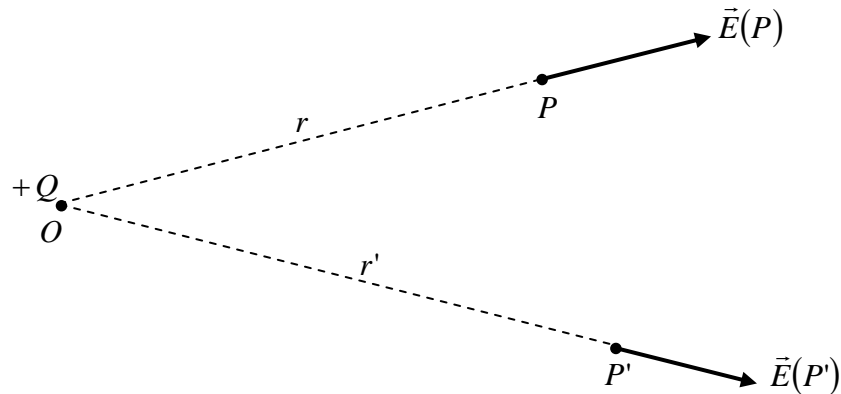
2. Campo elettrico di una carica puntiforme

Definizione

Il concetto di campo elettrico è analogo a quello di campo gravitazionale.

Consideriamo una carica puntiforme Q posta in un punto O dello spazio. La presenza della carica Q modifica le proprietà dello spazio circostante nel senso che, se poniamo in un qualunque punto dello spazio attorno a Q un'altra carica elettrica q , quest'ultima sarà sollecitata da una forza elettrica attrattiva o repulsiva proveniente da Q .

La carica Q viene denominata *carica sorgente* del campo.



Il campo elettrico è un vettore definito in ogni punto dello spazio e in generale diverso da punto a punto, a seconda della sua posizione rispetto alla carica sorgente (**campo vettoriale**). Nel Sistema Internazionale (S.I.) il campo elettrico si misura in newton/coulomb (simbolo N/C).

Il vettore campo elettrico nel punto P ha:

- come direzione quella della retta congiungente OP;
- come verso quello uscente se la carica sorgente è positiva, entrante se la carica sorgente è negativa;

- come modulo l'espressione $E(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$

Dall'espressione matematica si vede che:

- il campo elettrico in un determinato punto dipende dal valore della carica Q ; per tale motivo Q viene denominata **sorgente** del campo; infatti se Q fosse uguale a zero anche il campo sarebbe nullo.
- il campo elettrico in un punto P dello spazio dipende dalla distanza r del punto P dalla posizione O della sorgente: il suo valore diminuisce con il quadrato di tale distanza.

Quando studiammo il campo gravitazionale dicemmo che esso è invisibile ai nostri occhi ma ce ne possiamo accorgere indirettamente, quando osserviamo che un corpo dotato di massa viene attratto verso il centro della Terra.

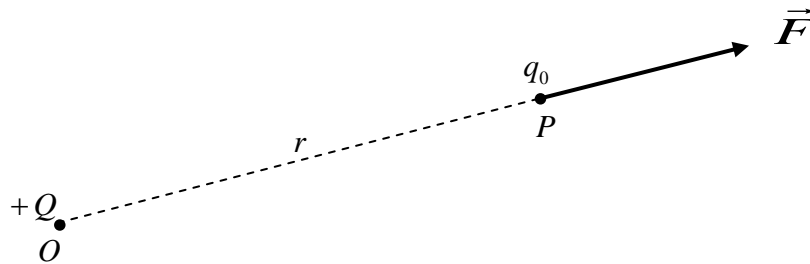
Analogamente ci accorgiamo dell'esistenza del campo elettrico generato da una carica sorgente Q se, ponendo nella zona circostante un'altra carica q_0 (detta *carica di prova*) essa subisce una forza elettrostatica attrattiva o repulsiva.

Ribadiamo però due punti fondamentali:

- il campo elettrico in una zona dello spazio esiste indipendentemente dal fatto che ci mettiamo o meno una carica di prova per rivelarne la presenza. È un po' come quando siamo in un luogo illuminato ma teniamo gli occhi chiusi; il fatto che non vediamo la luce non implica che la luce non ci sia: la luce esiste indipendentemente da se ci sono occhi a vederla oppure no.
- il campo elettrico in un determinato punto non dipende dal valore particolare della carica di prova q_0 che subisce la forza. Esso resta inalterato, qualunque sia la carica q_0 che ci mettiamo.

Calcolo della forza elettrostatica con il campo elettrico

La conoscenza del campo elettrico E in un dato punto dello spazio ci permette di determinare la forza elettrostatica \vec{F} che agirebbe su una qualunque carica q posta in quel punto.



Ricordando che $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$, dalla legge di Coulomb possiamo scrivere:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q_0}{r^2} = \underbrace{\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \right)}_E q_0 = E \cdot q_0$$

e sinteticamente:

$$\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E}$$

È dunque sufficiente moltiplicare il valore della carica q_0 per il valore del campo elettrico per ottenere il valore della forza elettrica agente sulla carica stessa. In questo modo il valore della forza elettrostatica è noto senza conoscere né il valore né la posizione della carica sorgente.

Determinazione sperimentale del campo elettrico

Invertendo la relazione $\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E}$ si ottiene

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Da tale risultato si vede che il valore del campo elettrico in un punto dello spazio è dato dal rapporto tra la forza elettrostatica subita dalla carica di prova e il valore della carica stessa. Quindi possiamo definire la distribuzione del campo elettrico in una regione dello spazio in maniera assolutamente sperimentale, ponendo in diversi punti la carica di prova, misurando la forza elettrostatica cui essa è sottoposta e dividendo la forza per il valore della carica.

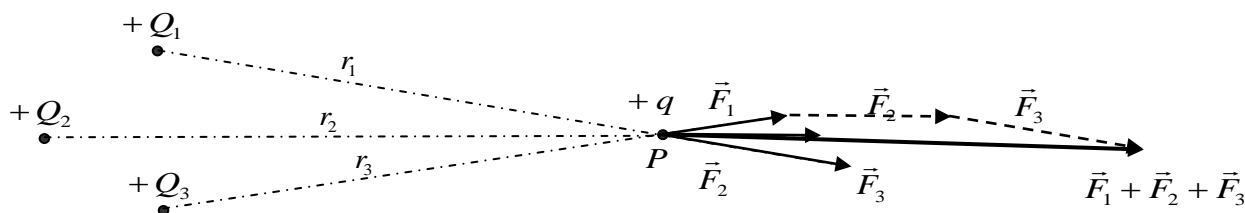
Se poi la carica di prova è unitaria positiva, la formula precedente si semplifica:

$$q_0 = +1 \Rightarrow \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{\vec{F}}{1} = \vec{F}$$

Potremmo dire così che **il valore del campo elettrico in un punto dello spazio è pari alla forza elettrostatica a cui sarebbe sottoposta una carica unitaria positiva posta in quel punto.**

3. Campo elettrico dovuto a più cariche puntiformi

La nozione di campo elettrico, data per una sola *carica-sorgente* Q , può essere facilmente estesa al caso di più cariche-sorgenti. Supponiamo di avere tre cariche sorgenti, come indicato nel disegno:



Per il principio di sovrapposizione della forza elettrica la forza \vec{F} agente sulla carica q sarà data dalla somma vettoriale delle tre forze, \vec{F}_1 , \vec{F}_2 e \vec{F}_3 , dovute alle tre cariche Q_1 , Q_2 e Q_3 . Il campo elettrico nel punto P sarà allora la somma dei singoli campi dovuti alle cariche Q_1 , Q_2 e Q_3 .

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3}{q} = \frac{\vec{F}_1}{q} + \frac{\vec{F}_2}{q} + \frac{\vec{F}_3}{q} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

La relazione precedente esprime il **principio di sovrapposizione per i campi elettrici**: *Il campo elettrico prodotto da un insieme di cariche sorgenti fisse nel vuoto è pari alla somma (vettoriale) dei campi prodotti singolarmente da ciascuna delle cariche.*

Per determinare rapidamente il valore del campo elettrico determinato da più cariche sorgenti si può, come prima detto, considerare una carica di prova unitaria positiva.

4. Linee di forza

Un campo elettrico può essere rappresentato convenientemente da un insieme di linee dette *linee di forza*. Per linea di forza si intende quella linea formata da tutti i punti del piano in cui il vettore campo elettrico è tangente alla linea stessa. Le linee di forza ci danno due informazioni riguardanti il campo elettrico:

- la linea passante per un dato punto indica la direzione lungo cui si sposterebbe una carica positiva, posta in quel punto; la freccia della linea indica il verso dello spostamento;
- dove le linee si addensano, il campo elettrico è grande; dove sono meno fitte, il campo elettrico è piccolo.

L'idea delle linee di forza o linee di campo si deve allo scienziato inglese Michel Faraday (1791 - 1867) che le utilizzò per rappresentare il campo magnetico cioè la deformazione dello spazio fisico intorno ad un magnete; oggi possiamo utilizzare la sua idea per rappresentare qualsiasi grandezza di campo vettoriale.

4.1. Linee di forza del campo di una carica puntiforme. Vediamo adesso la rappresentazione per linee di forza del campo elettrico prodotti da una **carica puntiforme positiva o negativa**:

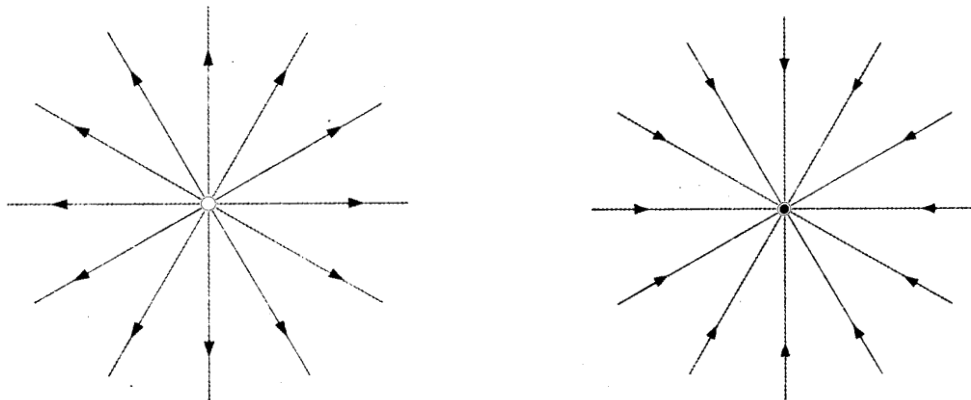
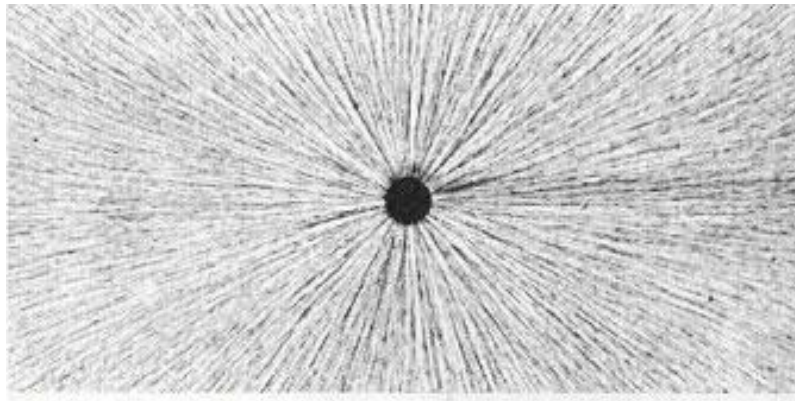


Figura 3 Rappresentazione grafica del campo elettrico prodotto da una carica puntiforme positiva (a sinistra) e negativa (a destra)

Nella foto seguente possiamo osservare delle linee di campo reali, visualizzate con semi d'erba sospesi in olio che si orientano lungo le linee del campo elettrico.



Dalle immagini precedenti il campo creato da un'unica carica puntiforme ha un andamento di tipo **radiale**. Le linee di forza sono disposte a raggiera intorno alla carica sorgente e sono dirette verso l'esterno se la sorgente Q è positiva, verso l'interno se Q è invece negativa.

La densità delle linee di forza è maggiore vicino alla carica sorgente: questo significa che il campo elettrico è *più intenso vicino alla carica*. Si faccia attenzione al fatto che la rappresentazione delle linee di forza deve essere immaginata in uno spazio *tridimensionale*.

4.2 Linee di forza del campo di un dipolo.

Un **dipolo elettrico** è un sistema formato da due cariche elettriche uguali e opposte poste ad una certa distanza. Il campo creato da un dipolo è la combinazione di due campi radiali in cui le linee di campo si incurvano per incontrarsi. Il campo è particolarmente intenso nello spazio tra le due cariche.

Vediamo la rappresentazione grafica del campo generato da un dipolo:

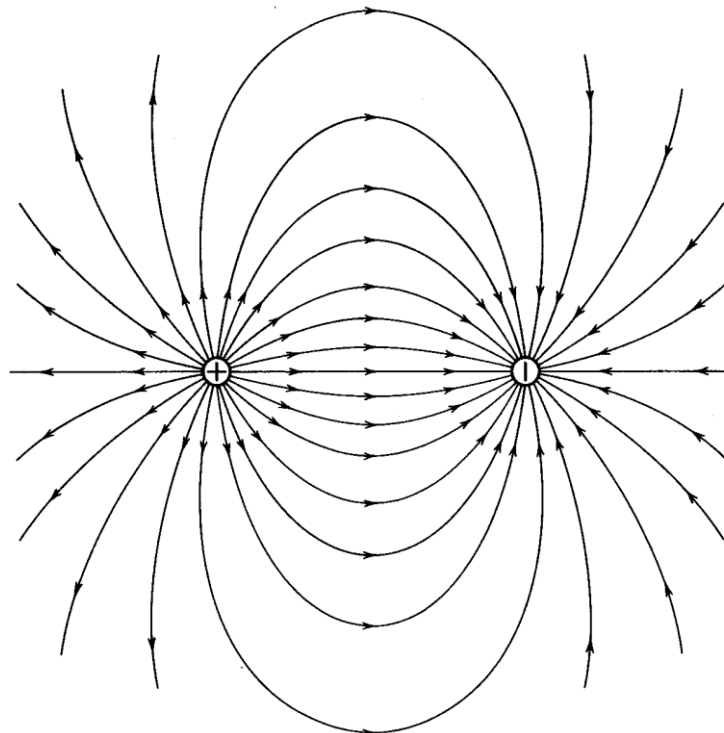
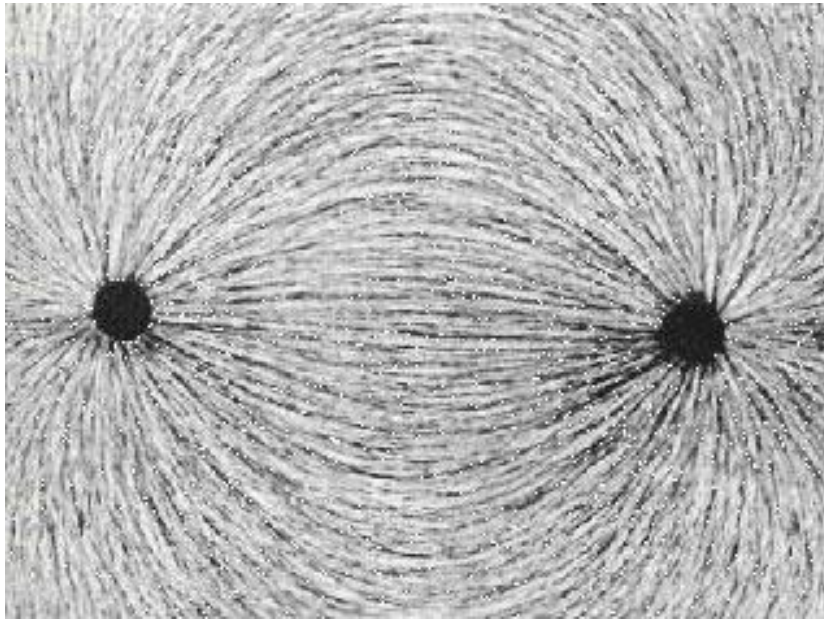


Figura 5 – Rappresentazione del campo elettrico generato da due cariche uguali ma di segno opposto (dipolo elettrico)

Nella foto seguente possiamo osservare le linee di forza di un dipolo elettrico reale.



4.3 Linee di forza del campo generato da due cariche dello stesso segno.

Vediamo la rappresentazione grafica del campo generato due cariche elettriche dello stesso segno:

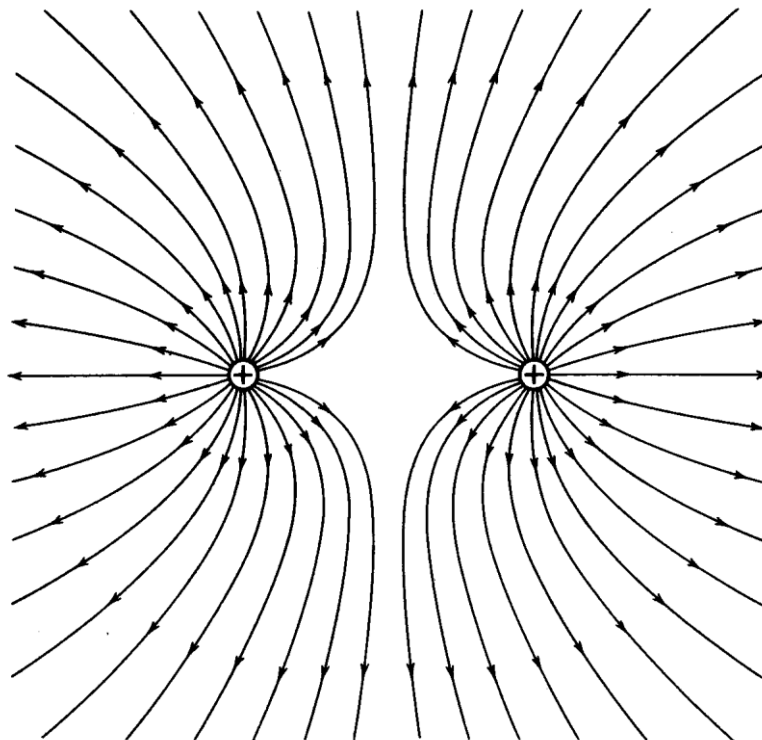
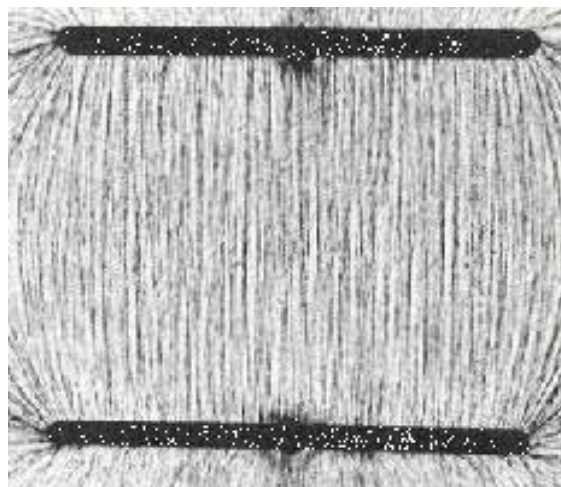
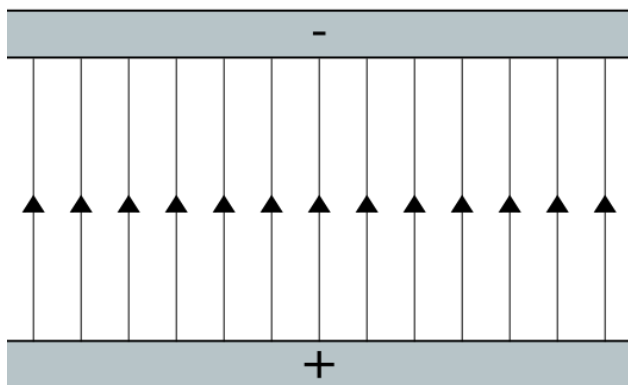


Figura 4 – Rappresentazione del campo elettrico generato da due cariche uguali, positive

4.4 Linee di forza del campo uniforme.

Nelle immagini seguente vediamo la rappresentazione e la foto delle linee di forza di un *campo elettrico uniforme*, che assuma lo stesso valore in tutti i punti di una data regione dello spazio.



Il **campo uniforme** si crea intorno ad una *piastra caricata in modo uniforme* o *tra due piastre cariche di segno opposto*: le linee di campo sono *parallele* e di *densità costante*. Il verso (non visibile nella foto) va dalla piastra positiva a quella negativa.

Una carica elettrica q in un campo uniforme sarà sottoposta ad una forza F uguale in ogni punto dello spazio. La forza avrà lo stesso verso del campo se la carica q è positiva, verso opposto se q è negativa.

4.5 Linee di forza del campo generato da due cariche di valore diverso.

Riportiamo infine l'andamento del campo elettrico con due cariche sorgenti nel caso in cui esse non abbiano esattamente lo stesso valore.

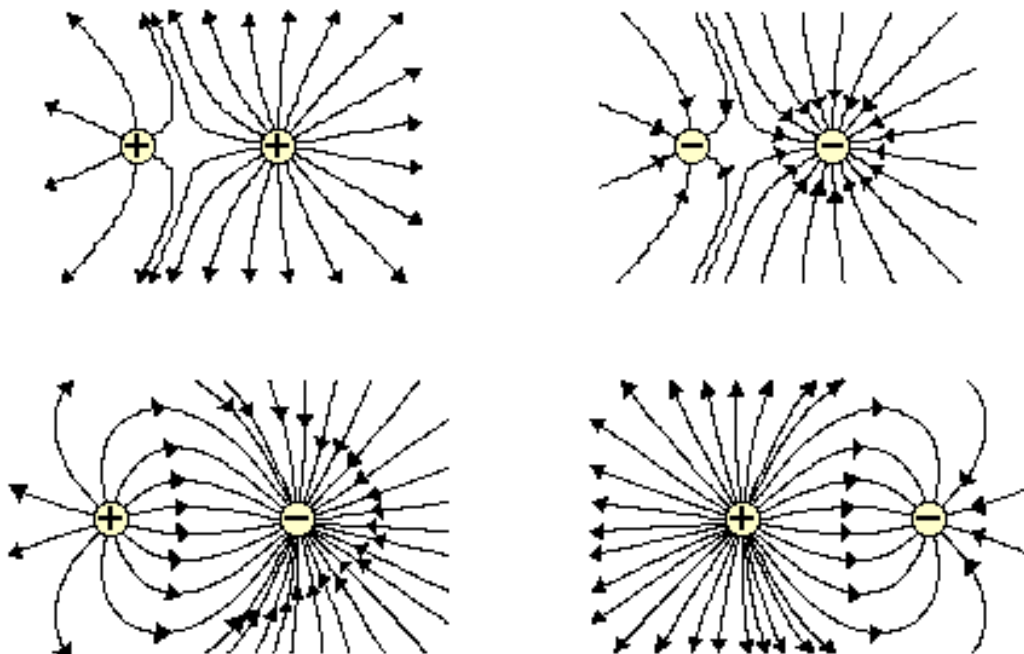


Figura 7 – Rappresentazione del campo elettrico per coppie di cariche con diverso valore assoluto

3. Il potenziale elettrostatico

1. Energia Potenziale e Potenziale Elettrostatico

Vogliamo definire per gradi il concetto di *potenziale elettrostatico*. Riprendiamo in primo luogo la definizione di lavoro.

Lavoro di una forza. Si definisce lavoro di una forza il prodotto della forza F per lo spostamento s .

$$L = F \cdot s$$

Tale definizione è valida anche per i campi di forze; supponiamo che un punto materiale (oggetto puntiforme, dotato di massa apprezzabile) si sposti da un punto P_1 dello spazio ad un altro punto P_2 , lungo una traiettoria C e che nella zona di spazio in cui avviene tale spostamento sia presente un campo di forze F . Si parla di lavoro compiuto dalla forza F del campo nello spostamento del punto dalla posizione P_1 alla posizione P_2 , lungo la curva C .

Tale lavoro dipende:

- dalla posizione iniziale P_1 ;
- dalla posizione finale P_2 ;
- dal particolare percorso seguito nello spostamento:

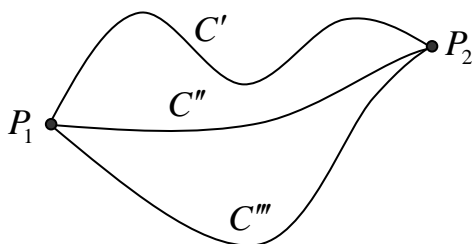
$$L = L(C, P_1, P_2)$$

Se consideriamo ad esempio tre percorsi diversi, come in figura, avremo:

$$L' = L(C, P_1, P_2)$$

$$L'' = L(C, P_1, P_2)$$

$$L''' = L(C, P_1, P_2)$$



In generale il lavoro compiuto dalla forza per passare da P_1 a P_2 è diverso lungo ognuno dei percorsi C' , C'' , C''' . Avremo cioè:

$$L' \neq L'' \neq L'''$$

Campi conservativi. Di particolare interesse sono alcuni campi di forza chiamati *campi conservativi*; essi godono della proprietà che il lavoro compiuto dalla forza per spostare un punto materiale da una posizione qualsiasi del campo (P_1) ad un'altra (P_2) non dipende dal percorso seguito ma soltanto dalle posizioni iniziale e finale.

$$L = L(P_1, P_2)$$

Si può dimostrare che sono conservativi i campi di forze uniformi (cioè costanti), i campi delle forze gravitazionali, i campi delle forze elastiche, i campi delle forze elettrostatiche.

Energia Potenziale. La caratteristica fondamentale di un campo conservativo è quindi espressa dal fatto che il lavoro $L_{1,2}$ compiuto dalle forze del campo per lo spostamento del punto materiale da P_1 a P_2 dipende solo dalle posizioni P_1 e P_2 e non da altri fattori quali il particolare percorso seguito, il tempo, la velocità, la accelerazione.

Possiamo allora introdurre una funzione matematica $U(P)$ definita in ogni punto dello spazio in cui è presente il campo vettoriale, tale che con la differenza dei valori assunti in P_1 e P_2 dia proprio $L_{1,2}$. Diremo cioè che esiste una funzione $U(P)$ tale che:

$$L_{1,2} = U(P_1) - U(P_2)$$

Tale funzione $U(P)$ descrive la capacità delle forze del campo a *compiere lavoro*, e poiché la capacità di compiere lavoro prende il nome di *energia*, la funzione $U(P)$, rappresentando una capacità a compiere lavoro legata alla posizione del punto materiale nel campo, prende il nome di *energia potenziale*.

Energia Potenziale del campo elettrostatico. Supponiamo di avere una carica sorgente Q in un punto O dello spazio; abbiamo visto che essa genera un *campo elettrostatico* $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$; tale campo è conservativo, cioè il lavoro necessario per spostare una carica q da un punto a distanza r_1 (da O) ad un altro punto a distanza r_2 (da O) non dipende dal percorso seguito ma solo dalle posizioni iniziale e finale.

Per tale motivo si definisce *l'energia potenziale elettrostatica di una carica q nel campo elettrico generato dalla sorgente Q la funzione:*

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{r}$$

La funzione $U(r)$ è definita in ogni punto dello spazio e con le sue differenze ci fornisce il lavoro necessario per spostare q da un punto all'altro; essa dipende:

- dalla carica sorgente Q del campo;
- dalla carica di prova q ;
- dalla distanza r della carica di prova dalla sorgente.

Potenziale Elettrostatico. Se cambiassimo la carica di prova, ad esempio q_1 al posto di q , otterremmo una diversa energia potenziale, pari a $U_1(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q_1}{r}$; se le cariche di prova sono numerose e di valori diversi, dovremmo definire tante energie potenziali quante sono le cariche di prova.

Sarebbe più semplice avere a disposizione una funzione che dipenda solo dalla carica sorgente Q del campo e non dalla particolare carica di prova.

Si può allora definire un'altra funzione, detta *potenziale elettrico*, ottenuto dividendo il potenziale U per la carica q che si sposta:

$$V = \frac{U}{q}$$

Sostituendo nella formula precedente l'espressione del potenziale elettrico si ha:

$$V = \frac{U}{q} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qq}{r}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

e quindi

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

Come si vede dall'espressione, il potenziale elettrico V dipende solo:

- dalla carica sorgente Q del campo;
- dalla distanza dalla sorgente Q .

Significato del potenziale elettrostatico. Dalla definizione di potenziale si ottiene $U = q \cdot V$ e quindi:

$$L_{1,2} = U_1 - U_2 = q \cdot V_1 - q \cdot V_2 = q \cdot \underbrace{(V_1 - V_2)}_{\Delta V} = q \cdot \Delta V$$

La quantità $\Delta V = V_1 - V_2$ prende il nome di *differenza di potenziale (d.d.p.)*; il lavoro necessario per spostare la carica q dal punto r_1 al punto r_2 è uguale al prodotto della carica q per la differenza di potenziale tra i due punti.

Se la carica fosse unitaria, cioè pari a 1 Coulomb, il lavoro sarebbe uguale a:

$$L_{1,2} = q \cdot (V_1 - V_2) = +1 \cdot (V_1 - V_2) = V_1 - V_2$$

In questo modo la *differenza di potenziale tra due punti dello spazio sede di un campo elettrico si può definire come il lavoro necessario per spostare una carica unitaria dal primo al secondo punto.*

L'unità di misura della differenza di potenziale è il Volt (V). Poiché il potenziale è uguale all'energia potenziale diviso la carica, avremo:

$$1\text{Volt} = \frac{1\text{Joule}}{1\text{Coulomb}}$$

Riportiamo, infine, per confronto nella tabella seguente le formule della forza elettrostatica, del campo, dell'energia potenziale e del potenziale elettrostatici:

$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$
$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{r}$	$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$

2. Potenziale elettrostatico dovuto a più cariche elettriche

Anche per il potenziale elettrostatico vale il *principio di sovrapposizione degli effetti*: in presenza di più cariche sorgenti, il potenziale complessivo è pari alla somma dei potenziali associati alle singole cariche-sorgente.

Se ad esempio il campo è generato da 3 cariche Q_1 , Q_2 e Q_3 , il potenziale è uguale alla somma dei potenziali associati alle tre cariche:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1}{r_1} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_2}{r_2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_3}{r_3}$$

3. Superfici equipotenziali

In un campo elettrico esistono delle superfici i cui punti si trovano tutti allo stesso potenziale. Tali superfici sono dette **equipotenziali**. *Le superfici equipotenziali sono perpendicolari al vettore campo elettrico \vec{E} e, di conseguenza, alle linee di forza del campo elettrostatico.* In questo modo, risulta facile tracciarle a partire dalle rappresentazioni conosciute dei campi elettrici. Si tenga presente, che poiché il campo elettrico è disposto nello spazio, le superfici equipotenziali sono superfici spaziali, a tre dimensioni.

Vediamo l'andamento delle superfici equipotenziali per alcuni campi elettrici tipici.

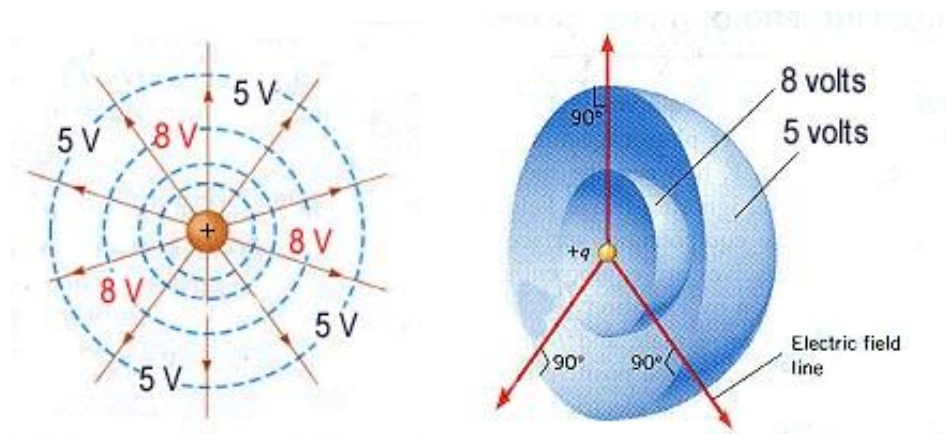


Figura 9 – Campo Elettrico e Superfici Equipotenziali di una carica positiva +q.
 Le linee di forza, come già visto, sono semirette uscenti dalla sorgente del campo. Le superfici equipotenziali sono allora sfere concentriche, con centro nella sorgente del campo. Il potenziale diminuisce con l'aumentare delle dimensioni delle sfere, poiché aumenta la distanza dall'origine del campo.

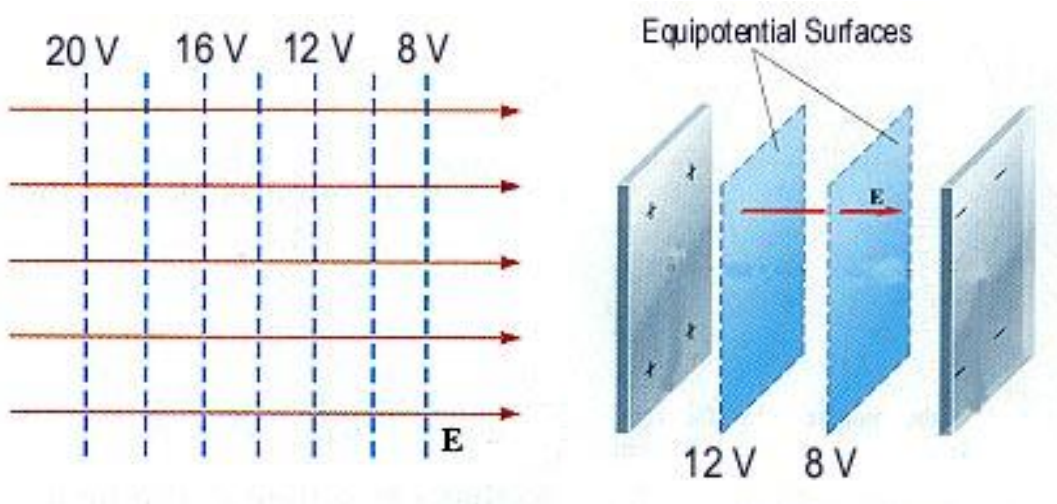


Figura 10 – Campo Elettrico e Superfici Equipotenziali di un campo elettrico uniforme.
 Le linee di forza sono rette parallele, aventi direzione e verso coincidenti con quelle del vettore del campo elettrico. Le superfici equipotenziali sono allora piani paralleli, ortogonali alla direzione del campo. Il potenziale su tali superfici diminuisce spostandosi secondo il verso delle linee di forza.

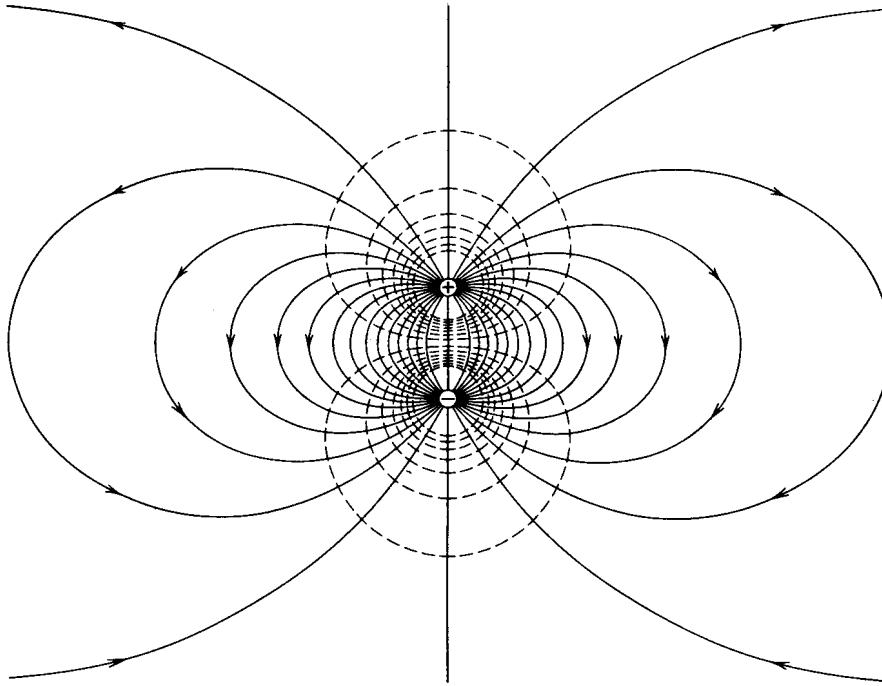


Figura 11 Campo Elettrico e Superfici Equipotenziali di un dipolo elettrico.

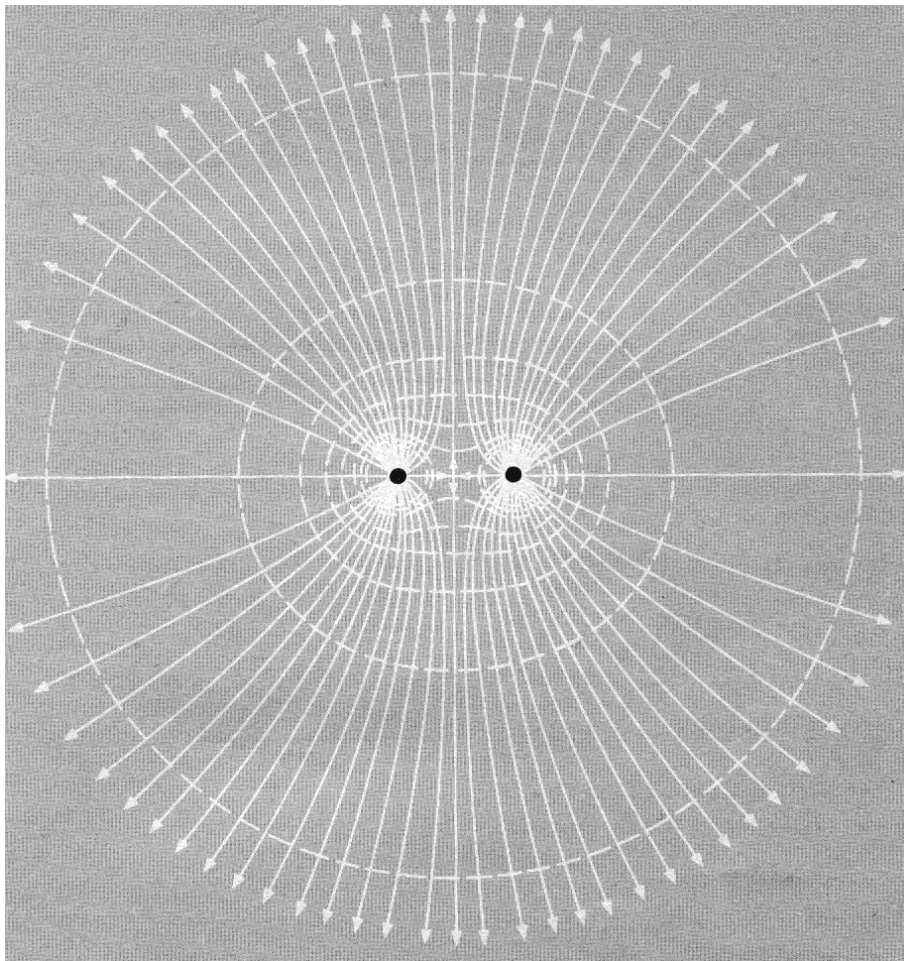


Figura 12 Campo Elettrico e Superfici equipotenziali di una coppia di cariche elettriche positive uguali.

4. Flusso del Campo Elettrico

Consideriamo una regione dello spazio sede di un campo elettrico \vec{E} ; consideriamo poi una superficie S . Il campo elettrico sarà definito in tutti i punti dello spazio e anche sulla superficie in questione. In generale il vettore campo elettrico non è ortogonale alla superficie ma è sempre possibile considerare la sua componente di \vec{E} ortogonale ad S , detta \vec{E}_n . Si definisce allora *flusso Φ del campo elettrico attraverso la superficie S il prodotto dell'area della superficie S per la componente del campo lungo la perpendicolare alla superficie stessa.*

$$\Phi = E_n \cdot S$$

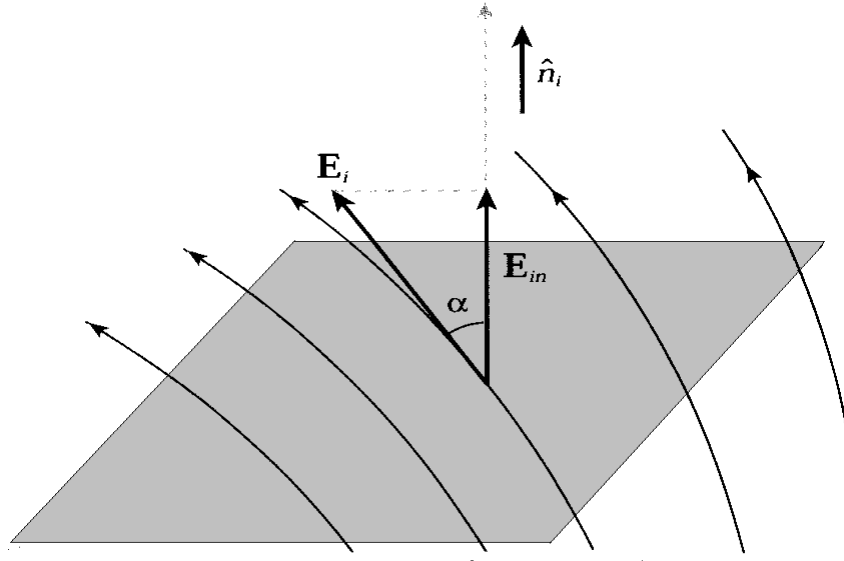


Figura 13 – Definizione di flusso del campo elettrico

5. Teorema di Gauss

Consideriamo una carica puntiforme Q posta in un punto O dello spazio: sappiamo che essa genera un campo elettrico dato da

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

Consideriamo poi una superficie sferica ideale con centro proprio nel punto O e di raggio r qualsiasi. Vogliamo calcolare il flusso del campo elettrico attraverso la superficie della sfera. Sapendo che l'area della superficie di una sfera è pari a $4\pi r^2$, si ha:

$$\Phi = E \cdot S = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Il flusso del campo elettrico attraverso la superficie sferica di raggio r è pari al rapporto della carica Q per la costante dielettrica. Tale risultato, ricavato per una sola carica puntiforme, è del tutto generale e va sotto il nome di Teorema di Gauss.

Il Teorema di Gauss afferma che il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è dato dal rapporto tra la carica complessiva contenuta entro la superficie e la costante dielettrica del mezzo. Naturalmente, se all'interno della superficie non ci sono cariche elettriche, il flusso vale zero.

4. Campo elettrostatico nei conduttori metallici

1. Equilibrio elettrostatico nei conduttori

In un conduttore le cariche elettriche sono libere di muoversi. Si dice che *un conduttore è in equilibrio elettrostatico quando in esso non si riscontra alcun moto macroscopico di cariche elettriche*, cioè quando tutte le cariche sono ferme. In un conduttore in equilibrio elettrostatico si verificano tre circostanze interessanti. Vediamole:

a) Affinché le cariche elettriche presenti nel conduttore siano ferme, occorre che su di esse non agiscano forze; poiché $F = q \cdot E$, anche il campo elettrico deve essere necessariamente nullo in tutti i punti interni al conduttore. Diciamo quindi che *all'interno di un conduttore in equilibrio elettrostatico il campo elettrico è nullo*.

b) *In una situazione di equilibrio elettrostatico, inoltre, in ogni punto della superficie il vettore \vec{E} deve essere perpendicolare alla superficie stessa*. Se così non fosse, infatti, il vettore \vec{E} avrebbe una componente parallela alla superficie del conduttore. Tale componente farebbe muovere le cariche libere presenti nel conduttore, contro l'ipotesi di equilibrio.

c) All'interno del conduttore in equilibrio elettrostatico non vi sono cariche elettriche. In tale situazione, pertanto, la carica elettrica di un conduttore è tutta localizzata sulla superficie di quest'ultimo. Questo succede perchè, essendo le cariche libere di muoversi e respingendosi per azione elettrostatica (se ci sono cariche in soprannumero saranno tutte dello stesso segno) tendono a disporsi in modo da avere la massima distanza le une dalle altre.

L'ultima affermazione si può giustificare più rigorosamente mediante il teorema di Gauss; applicando tale teorema ad una superficie interna al conduttore si ha:

$$\Phi = E \cdot S = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

In base a quanto detto nel punto a) si ha $\vec{E} = 0$;
di conseguenza avremo $\Phi = 0$ e quindi anche $Q = 0$.

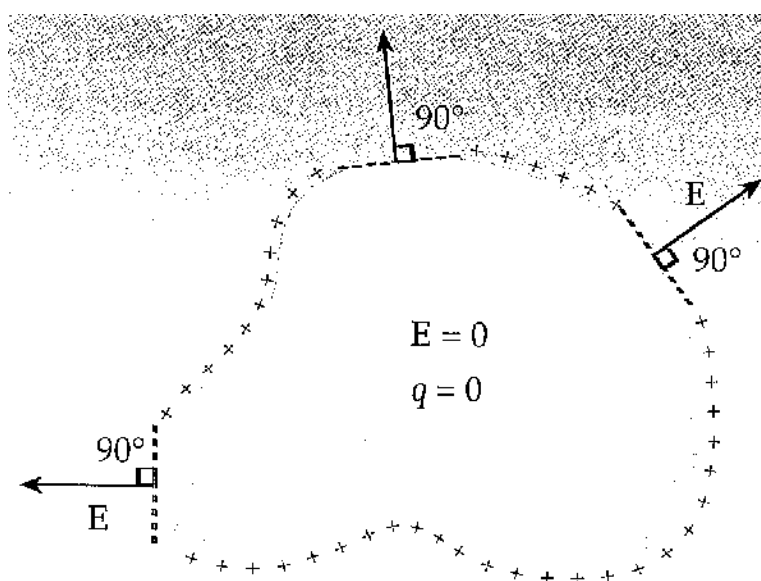


Figura 1 – Conduttore in equilibrio elettrostatico

2. Gabbia di Faraday

Quando sopraggiunge un temporale con molti fulmini è sicuramente pericoloso stare all'aperto per il rischio di essere colpiti. Un rimedio efficace può essere quello di salire in macchina (se c'è una nelle vicinanze, ovviamente!) e restarci fino a temporale finito. Se un fulmine dovesse colpire l'auto con noi dentro, non ci accadrebbe nulla. Perché?

La macchina si comporta come una *gabbia di Faraday*.

Con **gabbia di Faraday** si intende qualunque sistema costituito da un contenitore in materiale elettricamente conduttore (o conduttore cavo) in grado di isolare l'ambiente interno da un qualunque campo elettrostatico presente al suo esterno, per quanto intenso questo possa essere.

È utilizzato il termine *gabbia* per sottolineare che il sistema può essere costituito, oltre che da un foglio metallico continuo, anche da una rete o una serie di barre metalliche opportunamente distanziate.

Questo effetto schermante è utilizzato per proteggere ambienti e apparati da campi esterni, come per esempio quelli generati dai fulmini. Alcuni edifici, come le cabine di distribuzione del gas o le scuole, ecc., sono dotate esternamente di gabbie di Faraday di protezione: esse sono costituite da una serie di bande metalliche distanziate poche decine di centimetri e collegate a terra.

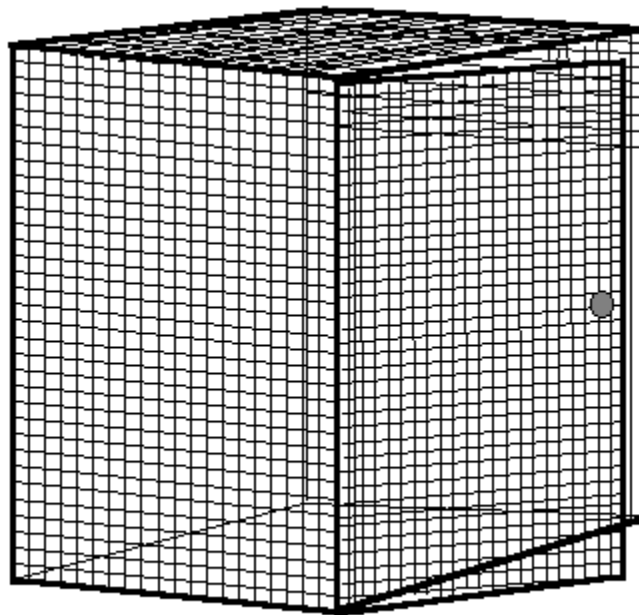
Un'altra applicazione si ha in elettronica per eliminare le interferenze dei campi elettromagnetici esterni in apparecchi radio e per telecomunicazioni, oppure per evitare la fuoriuscita di campi elettromagnetici da un ambiente, come nel caso del forno a microonde.

La scoperta di Faraday

Michael Faraday osservò nel 1836 che in un conduttore cavo elettricamente carico le cariche si concentrano sulla superficie esterna e non hanno alcuna influenza su ciò che si trova all'interno. Per dimostrarlo costruì una stanza rivestita da un foglio metallico e applicò dall'esterno l'alta tensione prodotta da un generatore elettrostatico. Utilizzando un elettroscopio mostrò che all'interno della stanza non era presente carica elettrica.

Lo stesso effetto fu predetto da Francesco Beccaria (1716–1781) dell'università di Torino il quale, dopo avere studiato il lavoro di Benjamin Franklin, affermò che "l'elettricità va sulle tre superfici del corpo senza diffondersi al materiale interno".

Successivamente il fisico belga Louis Melens (1814–1886) applicò il principio alla protezione dai fulmini.



Faraday cage

Principio di funzionamento

Il funzionamento della gabbia di Faraday è riconducibile alla situazione di equilibrio elettrostatico dei conduttori metallici. Per quanto detto nel paragrafo precedente, se sulla superficie di un conduttore metallico viene immessa una carica elettrica, questa rimane sulla superficie e all'interno del conduttore il campo elettrico risulterà sempre nullo: nulla di ciò che accade fuori dunque trapela all'interno del conduttore.

3. Capacità di un conduttore

Consideriamo un corpo conduttore costituito da una sfera di raggio R . Se dotiamo questo corpo di una carica pari a Q , questa si spalmerà uniformemente su tutta la sua superficie, mentre all'interno del corpo non sarà presente né carica né campo elettrico.

La distribuzione di carica superficiale darà origine ad un campo elettrico \vec{E} , esistente in tutta la zona esterna alla sfera. In prossimità della superficie il campo risulta ortogonale a questa; esternamente esso è diretto lungo la congiungente in centro della sfera.

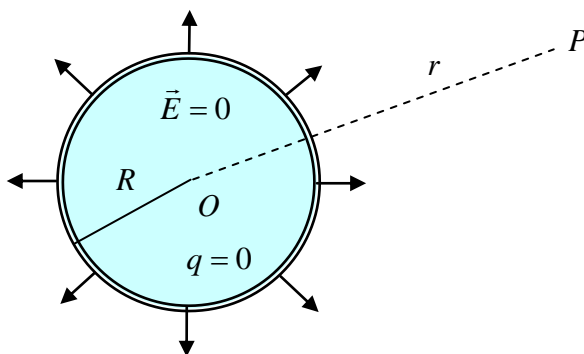


Figura 3 – Sfera Conduttrice

Si può dimostrare, attraverso il teorema di Gauss, che il valore del campo è

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

Il potenziale assume l'espressione

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

Vogliamo considerare il valore del potenziale sulla superficie; basterà sostituire alla distanza r il valore del raggio R della sfera.

$$V(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R}$$

Se nella formula precedente poniamo:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \cdot R$$

avremo:

$$V = \frac{Q}{C} \quad (1)$$

Il potenziale sulla superficie del conduttore sferico è direttamente proporzionale alla carica trasmessa ad esso. Ciò vuol dire che se la carica raddoppia, raddoppia anche il potenziale e se Q triplica, triplica anche V , e così via. La costante di proporzionalità prende il nome di *capacità del conduttore sferico*. Tale proprietà vale non solo per conduttori sferici, ma per tutti i corpi conduttori. Si può vedere che, quando ad un corpo conduttore di forma qualsiasi è trasmessa una carica Q , esso si porta ad un potenziale V , direttamente proporzionale al valore della carica stessa.

La capacità di un corpo conduttore generico dipende dalla forma e dalle dimensioni del corpo e non dalla carica presente. In genere, più un corpo conduttore è grande, maggiore è la sua capacità.

Invertendo la formula (1), si ha:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

Da tale formula si può vedere che, a parità di potenziale, corpi di capacità grande contengono grandi quantità di carica e corpi di capacità piccola presentano piccole quantità di carica.

L'unità di misura della capacità è il *Farad*.

$$1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}}$$

1 Farad è una capacità enorme; nella pratica vengono usati i sottomultipli come il μF (1 microFarad = 1 milionesimo di Farad) e il nF (nanoFarad = 1 miliardesimo di Farad).

4. Condensatori

Con il termine *condensatore* intendiamo un sistema fisico costituito da due conduttori (*armature*) affacciati e separati da un mezzo isolante, caricati in modo che la carica comunicata a uno sia uguale e opposta a quella dell'altro. Spesso le armature del condensatore sono realizzate in forma di lamine di dimensioni molto maggiori rispetto alla loro distanza.

Questi semplici dispositivi permettono di creare intensi campi elettrostatici in regioni limitate e di immagazzinare quindi notevoli quantità di energia elettrostatica.



Figura 4 – Condensatore generico

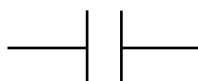
Dette A e B le armature del condensatore, e $+Q$ e $-Q$ le cariche su esse presenti, i due corpi si portano ai potenziali V_A e V_B ; la d.d.p. (differenza di potenziale) tra le armature è direttamente proporzionale al valore di Q :

$$\Delta V = V_A - V_B = \frac{Q}{C} \quad (3)$$

La C , denominata *capacità* del condensatore, rappresenta un coefficiente caratteristico di questo; essendo omogeneo all'analogo coefficiente introdotto nel paragrafo precedente per un conduttore isolato, si misura in *Farad*.

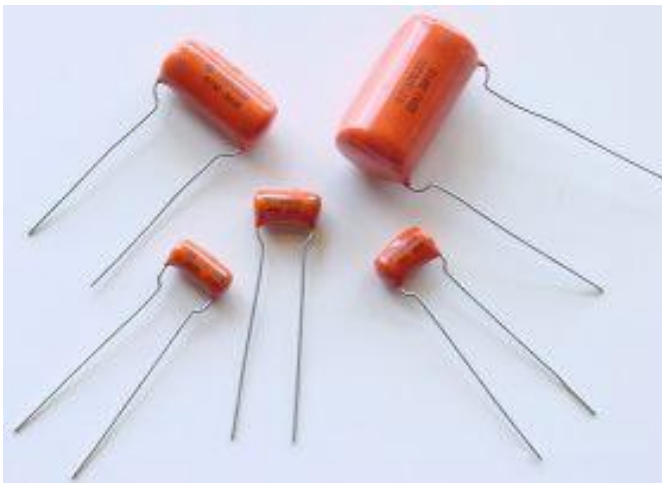
La capacità di un condensatore dipende, dunque, soltanto dalla geometria del sistema, cioè dalla forma delle armature e dalla loro distanza. Esistono diverse geometrie di condensatori: i più importanti sono i condensatori piani, i condensatori cilindrici e i condensatori sferici.

Il simbolo elettrico del condensatore è il seguente:



Tipologie di condensatori

Nelle fotografie seguenti vediamo le tipologie più comuni di condensatori disponibili in commercio:



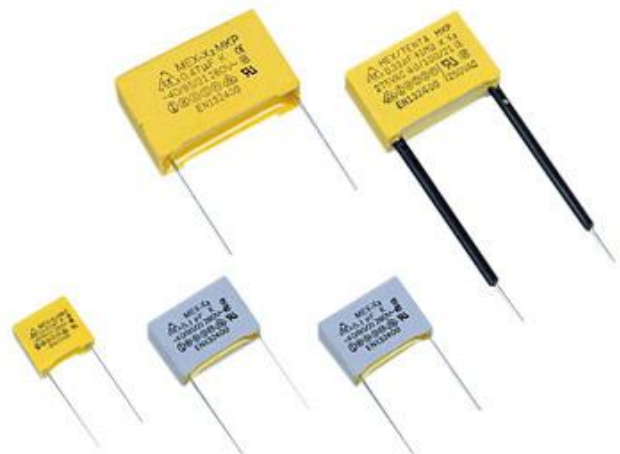
Condensatori ceramici



Condensatori a disco



Condensatori elettrolitici



Condensatori a poliestere

Energia accumulata nei condensatori

L'accumulo di cariche sulle armature equivale ad un accumulo di energia elettrica nel condensatore; esso perciò funziona da serbatoio di energia. L'energia elettrica accumulata è pari al lavoro compiuto per caricare il condensatore.

Si può dimostrare che l'energia accumulata in un condensatore è data dall'espressione seguente:

$$E_{ELETTRICA} = \frac{1}{2} C \cdot (\Delta V)^2 \quad (4)$$

Tale energia viene restituita durante la fase di scarica del condensatore.

5. Condensatore piano

Un condensatore piano è costituito da due armature piane e parallele, come mostrato in figura 3:

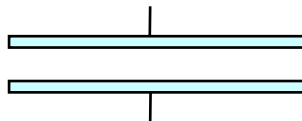


Figura 5 – Condensatore piano

Sia S l’area della superficie di ognuna di esse e d la loro distanza; con buona approssimazione si può dire che la capacità di un siffatto condensatore è uguale a:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (5)$$

La capacità di un condensatore piano è direttamente proporzionale alla superficie delle armature (più sono estese, più alta essa è) ed inversamente proporzionale alla loro distanza. Inoltre se tra le armature viene interposto un mezzo *dielettrico* di costante ϵ , la capacità assume un valore più elevato e la formula si modifica come segue:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (6)$$

Condensatori commerciali ad elevata capacità e che occupino poco spazio si possono ottenere arrotolando strisce di carta stagnola (le armature) separate da carta paraffinata (dielettrico). Si aumenta, in tal modo di molto la superficie S di affacciamento e si rende minima la distanza tra le armature.

Campo elettrico in un condensatore piano

Il campo elettrico all’interno in un condensatore piano è uniforme, cioè uguale in tutti i punti compresi tra le due armature.

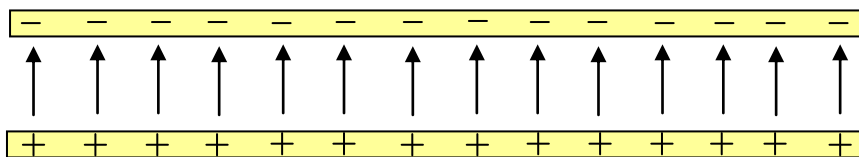


Figura 6 – Campo elettrico all’interno di un condensatore

Il suo valore si può ricavare in funzione della d.d.p. ΔV tra le armature e la distanza d tra esse:

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad (7)$$

Il vettore del campo è diretto perpendicolarmente alle armature, dall’armatura a carica positiva a quella a carica negativa.

6. Condensatori in parallelo e in serie

Ci proponiamo di studiare i sistemi costituiti da più condensatori collegati elettricamente mediante fili conduttori. Le tipologie dei collegamenti sono due: *collegamento in parallelo* e *collegamento in serie*.

Più condensatori sono collegati in parallelo quando lo schema è il seguente:

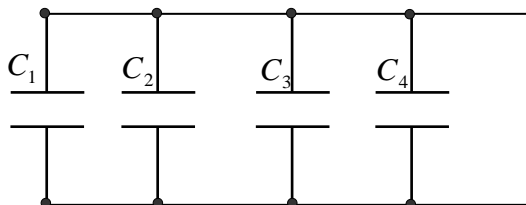


Figura 7 – Condensatori in parallelo – La d.d.p. è la stessa, la carica si somma

Essi sono soggetti tutti alla stessa differenza di potenziale tra le armature, poiché queste, connesse tra loro, costituiscono un unico conduttore. Il sistema di condensatori costituisce un unico condensatore di cui vogliamo determinare la capacità C in funzione delle capacità C_1 , C_2 , C_3 e C_4 . Si può vedere che *la capacità di un sistema di condensatori collegati in parallelo è la somma delle capacità dei singoli condensatori*.

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (8)$$

Più condensatori sono collegati in serie quando lo schema è il seguente:

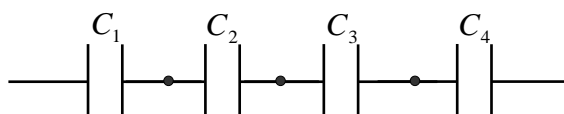


Figura 8 – Condensatori in serie – La carica è la stessa, la d.d.p. si somma

L'insieme dei condensatori costituisce un unico condensatore, le cui armature sono quelle estreme della catena di condensatori. La carica è uguale per tutti i condensatori, mentre le d.d.p. si sommano.

Si può vedere che *la capacità di un sistema di condensatori collegati in serie è il reciproco della somma dei reciproci delle capacità dei singoli condensatori*.

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}} \quad (9)$$

Se i condensatori in serie sono soltanto 2, la formula (4) si può semplificare come segue:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{1}{\frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (10)$$

Nota sulle fonti: diverse libri sono stati consultati per l'allestimento di questi appunti, a partire dal fondamentale "Elettromagnetismo" di Bobbio-Gatti. Qualche spunto è stato preso da qualche testo della Zanichelli e da qualche enciclopedia on line (Wikipedia). Una nota è del grande Richard Feynman (chi mai sarà costui?). Diverse immagini provengono dalla rete. Grazie per l'attenzione e buono studio!