

Unità Didattica N° 20

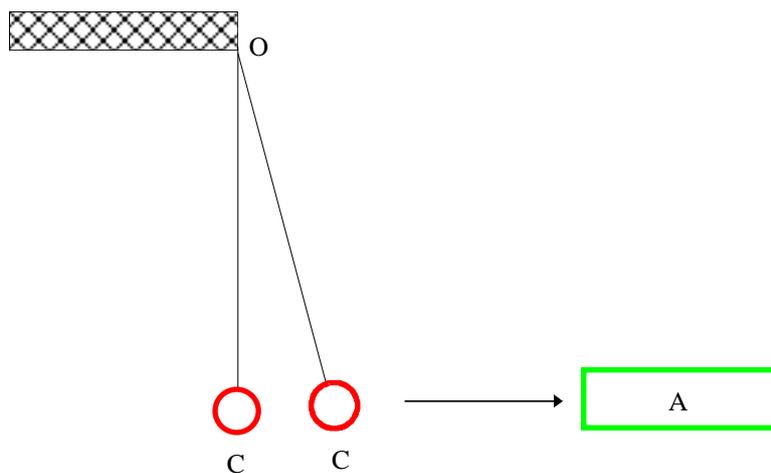
La carica elettrica e la legge di Coulomb

- 01) I fatti sperimentali dell'elettrostatica**
- 02) Interpretazione elettronica dell'elettrizzazione di un corpo**
- 03) Conduttori ed isolanti**
- 04) Principio di conservazione della carica elettrica**
- 05) Legge di Coulomb**
- 06) La costante dielettrica relativa**
- 07) Induzione elettrostatica**
- 08) Lo schermo elettrostatico**
- 09) Elettroscopio a foglie**
- 10) Elettroforo di Volta**
- 11) Induzione completa : pozzo di Beccaria-Faraday**
- 12) Distribuzione della carica elettrica sulla superficie dei conduttori**
- 13) Densità elettrica**
- 14) La polarizzazione del dielettrico**
- 14) Stabilità dei nuclei : le forze nucleari**

I fatti sperimentali dell'elettrostatica

• L'**elettrostatica** studia i fenomeni elettrici che si attribuiscono a cariche elettriche in quiete. Analizzeremo alcuni fatti sperimentali che ci chiariranno i concetti di **corpo elettrizzato** e di **corpo allo stato neutro**.

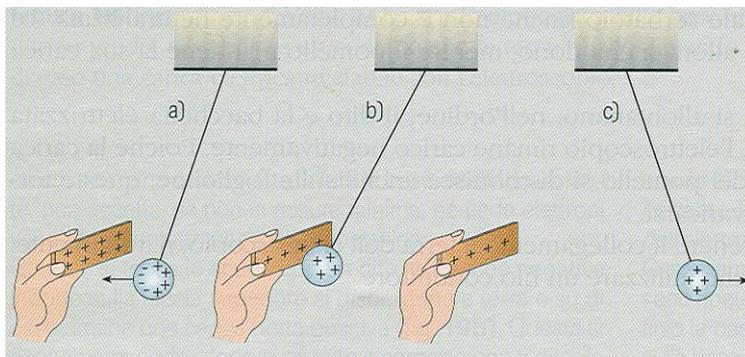
• Una bacchetta di vetro, di ambra, di ebanite, di ceralacca strofinata ad un suo estremo con lana, con seta, con una pelliccia, acquista la proprietà di attirare i corpi ai quali è avvicinata. Si dice che la bacchetta si è **elettrizzata** o si è **caricata di elettricità**. Per rendere manifesta l'attrazione conviene che il corpo attirato sia molto leggero, mobile e prossimo all'estremo elettrizzato di A. L'attrazione si indebolisce rapidamente al crescere della distanza. Serve bene una pallina **C** di sughero o di midollo di sambuco, ricoperta di una fogliolina d'alluminio o d'oro sospesa ad un filo di seta (**pendolino elettrostatico**). I corpi non elettrizzati si dicono **corpi allo stato neutro**.



• Se, in conseguenza dell'attrazione, **C** tocca **A**, l'attrazione si muta bruscamente in repulsione. In tali condizioni, ogni corpo elettrizzato per strofinio ed avvicinato ad **C**, produce un'azione che è di **attrazione** o di **repulsione**. Esistono due specie di elettrizzazione: vetro ed ebanite, strofinati con lana, danno **elettrizzazioni differenti**, sicché le due elettrizzazioni sono state dette rispettivamente **vitrea** e **resinosa**. In seguito hanno preso il nome di **elettrizzazione positiva e negativa** d'accordo col fatto che hanno azione opposta su di uno stesso pendolino elettrizzato. Si suole dire che vi sono **due specie di elettricità**: positiva e negativa .

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

Una lastra metallica elettrizzata positivamente prima attira la pallina di un pendolino elettrico (a) a causa dell'induzione elettrostatica e successivamente, dopo che è avvenuto il contatto (b), la respinge (c): per contatto la pallina si è caricata positivamente.

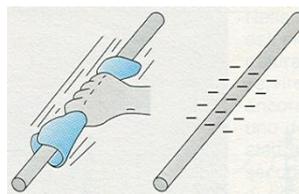
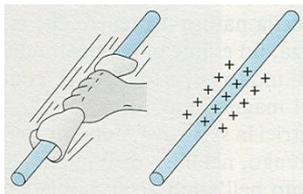


Conclusioni

Esistono due diversi **stati elettrici**: quello dell'**ebanite** che viene detto **negativo** e quello del **vetro** che viene detto **positivo**.

- Due bacchette di ebanite vengono elettrizzate per strofinio agli estremi **A** e **B**. Si controlla sul pendolino **C** che A e B hanno elettricità di segno uguale. Indi le due bacchette vengono sospese mediante fili di seta e disposte in modo che le estremità A e B siano fra loro vicine. Si osserva **repulsione**. **Cariche elettriche di uguale segno (omonome) si respingono**. Analogamente si osserva che **cariche elettriche di segno diverso (eteronome) si attirano**.

Una bacchetta di vetro viene strofinata con un panno di seta. La parte di bacchetta strofinata perde elettroni cedendoli alla seta e si carica positivamente.



Una bacchetta di ebanite viene strofinata con un panno di lana. La parte di bacchetta strofinata acquista elettroni dalla lana e si carica negativamente.

- Nel **1909** il fisico americano **Robert Millikan** scoprì che la **carica elettrica** si presenta sempre in quantità intere multiple di una unità fondamentale, cioè la **carica elettrica è quantizzata**. Qualunque carica può essere scritta nella forma $q = N \cdot e$ dove **N** è un numero intero ed e rappresenta il valore dell'unità fondamentale.

L'**elettrone** (simbolo e^-) ha carica $-e$, il **protone** (simbolo e^+) ha carica $+e$.

- Quando il vetro è strofinato con la seta, gli **elettroni** si trasferiscono dal vetro alla seta lasciando il **vetro positivo** e la **seta negativa**. Quando l'ambra è strofinata con la pelliccia gli elettroni si trasferiscono dalla pelliccia all'**ambra** che si **elettrizza negativamente**.

I modi di elettrizzazione			
Metodo	Descrizione	Meccanismo	Materiali
Per strofinio	Si ottiene strofinando tra loro due corpi.	Gli elettroni che si trovano sulla superficie di uno dei corpi (che risulterà carico positivamente) sono «strappati» da esso e si portano sull'altro corpo (che si caricherà negativamente).	Isolanti o conduttori (questi ultimi impugnati con un manico isolante).
Per contatto	Si ottiene mettendo a contatto un corpo elettricamente neutro con uno caricato in precedenza.	Una parte delle cariche che si trovano sul corpo elettrizzato si spostano su quello che era neutro.	Avviene in maniera molto efficace tra corpi conduttori. Un corpo isolante può cedere solo le cariche che si trovano nella parte di esso che è posta a contatto diretto con il corpo neutro.
Per induzione	Si pone un corpo carico (induttore) in prossimità di un conduttore scarico (indotto) costruito in modo da potersi suddividere in due parti. Poi, senza allontanare il corpo carico, si allontanano tra loro le due parti del conduttore indotto.	Per il fenomeno dell'induzione elettrostatica le cariche libere di muoversi che si trovano nel corpo neutro si spostano: quelle dello stesso segno della carica inducente si allontanano, quelle di segno diverso si avvicinano. In questo modo le due parti del conduttore indotto si elettrizzano con quantità di carica eguali e di segno opposto.	Conduttori di forma qualsiasi (il conduttore che si può suddividere può essere anche un corpo conduttore qualunque che viene «messo a terra» toccandolo con le dita o con un filo metallico collegato a terra).

Interpretazione elettronica della elettrizzazione di un corpo

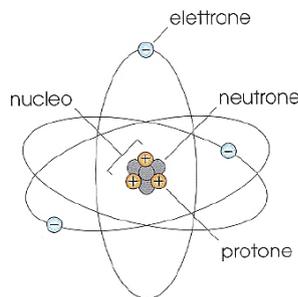
Secondo le vedute moderne, tutta la materia è costituita da tre specie di particelle elementari, il **protone**, il **neutrone** e l'**elettrone**. Le loro caratteristiche sono riportate nella seguente tabella:

particella	simbolo	carica elettrica	massa in kg
elettrone	e^-	$-e = -1,602 \cdot 10^{-19} C$	$m_e = 9,1091 \cdot 10^{-31}$
protone	e^+ , p	$+e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$	$m_p = 1,6748 \cdot 10^{-24}$
neutrone	n	0	$m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27}$

La materia ordinaria è composta di **atomi**. Un atomo è formato da un **nucleo** in cui è concentrata quasi tutta la massa dell'atomo che è costituito da **protoni e neutroni** (ognuno dei quali prende il nome di **nucleone**). Il nucleo è circondato da un numero di elettroni uguale al numero di protoni, sicché un atomo che si trovi nel suo stato normale è **neutro**. Il diametro di un nucleo varia da un minimo di $2 \cdot 10^{-15} m$ ad un massimo di $14 \cdot 10^{-15} m$.

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

L'atomo è costituito da un **nucleo centrale** formato da **protoni** e **neutroni** intorno al quale ruotano gli **elettroni**, in numero uguale a quello dei protoni del nucleo.



Il diametro esterno della nube elettronica (cioè dell'atomo) è compreso nell'intervallo $[10^{-10} m, 3 \cdot 10^{-10} m]$ ed è quindi circa 10^4 volte più grande del diametro nucleare. Un nucleo avente **numero di massa A** e **numero atomico Z** (numero di protoni) possiede $N = A - Z$ **neutroni**. $N + Z = A$

N = numero di **neutroni** **A** = **numero di massa** **Z** = numero di protoni = **numero atomico** Un particolare atomo, di simbolo **X** generico, ha un nucleo che si indica con uno dei seguenti simboli: ${}^A_Z X$ oppure ${}_Z X^A$ §

Le varie specie nucleari vengono catalogate a seconda dei parametri **Z**, **N**, **A**. Si definisce **nuclide** una specie di nucleo caratterizzata da un dato **Z** e un dato **N**. Se è **radioattivo** si dirà **radionuclide**. Tra le specie nucleari, di grande importanza sono gli **isotopi**, che sono nuclei aventi lo **stesso numero Z di protoni** (e quindi appartenenti allo stesso elemento chimico ed occupanti lo stesso posto nel sistema periodico degli elementi), ma aventi **diverso numero N di neutroni**.

I tre **isotopi** dell'idrogeno sono:



Altre specie nucleari sono:

isotoni : nuclidi aventi lo stesso numero **N** di neutroni (${}^{14}_6C$, ${}^{15}_7N$, ${}^{16}_8O$)

isobari : nuclidi aventi lo stesso numero di massa **A** (${}^{14}_6C$, ${}^{14}_7N$)

§ Poiché la massa di un atomo è quasi tutta concentrata nel suo nucleo, la **massa atomica** è espressa da un numero molto prossimo al numero intero **A** che rappresenta il **numero di massa**. Per questo motivo usiamo il simbolo **A** per esprimere la **massa atomica**

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

isodiaferi: nuclidi aventi la stessa differenza $N-Z$ (${}^{12}_6C$, ${}^{14}_7N$, ${}^{16}_8O$)

isomeri: nuclidi aventi lo stesso numero di protoni e neutroni nel loro nucleo, ma esistenti in diversi livelli di eccitazione nucleare.

• In alcuni casi un atomo può perdere uno o più elettroni periferici: si formerà un **atomo ionizzato** o **ione positivo**. Oppure un atomo può aggregare qualche elettrone di atomi vicini: si avrà un **ione negativo**. Nel caso normale la materia è costituita da atomi neutri o da ioni positivi legati a ioni negativi per cui, da un punto di vista macroscopico, essa risulterà **elettricamente neutra**.

• Ma cosa significa che un corpo è elettrizzato?

Significa che il corpo, rispetto al suo stato neutro, ha acquistato o ceduto cariche elettriche. Se n_1 è il numero di protoni ed n_2 il numero di elettroni, il corpo possiede la **carica elettrica** o **quantità di elettricità** $Q=(n_1-n_2)e$ dove e è la **carica elettrica elementare**. Quindi quella che si chiama **carica elettrica** di un corpo è in effetti un **eccesso di cariche** di un segno rispetto a quelle di segno opposto. In generale l'elettrizzazione consiste in un passaggio di elettroni da un corpo ad un altro.

Quindi **carica elettrica negativa** significa eccesso di elettroni, mentre **carica elettrica positiva** significa carenza di elettroni. In alcune sostanze, come i **metalli**, alcune **cariche elettriche** sono libere di muoversi, mentre in altre sostanze, come il vetro, le **cariche elettriche** rimangono localizzate.

• Per quanto sia comodo trattare in **elettrostatica** in modo perfettamente simmetrico le cariche positive e quelle negative, è ben noto che tale simmetria nel nostro universo non esiste e che le cariche elettriche negative (**elettroni**) hanno massa e proprietà assai diverse da quelle delle cariche positive (**protoni**) alle quali si accompagnano. Diciamo ciò per chiarire che **elettrizzazione** è passaggio di elettroni da un corpo all'altro e che **carica negativa** è **eccesso di elettroni**, mentre **carica positiva** è **carenza di elettroni**: eccesso e carenza sono sempre estremamente piccoli se rapportati al numero totale di cariche elementari presenti nel corpo.

• La grandezza **quantità di elettricità non è continua ma discontinua** in quanto costituita da multipli interi di una certa carica elettrica minima, la **carica fondamentale** e . Ogni altra carica q fisicamente esistente, qualunque sia la sua origine, può essere scritta come $N \cdot e$ dove N è un numero intero. Per la sua caratteristica di esistere in **quantità discrete anziché continue**, si dice che la **carica elettrica** è una **grandezza quantizzata**. La **quantizzazione** è uno dei

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

fondamenti della fisica moderna; infatti l'esistenza degli atomi e di particelle come gli elettroni ed i protoni, indica che anche la massa è quantizzata. Il quanto di carica elettrica è così piccolo che la **granulosità** dell'elettricità non si può mettere in evidenza con la semplice esperienza quotidiana, allo stesso modo per cui non ci accorgiamo che l'aria che respiriamo è fatta di atomi. Nella **teoria classica dell'elettromagnetismo** non si parla di **quantizzazione** della carica così come non si parla di **quantizzazione** della massa (cioè dell'esistenza di elettroni, protoni, atomi,...) nelle leggi del moto di Newton, ed è per questo che le due teorie sono incomplete in quanto non descrivono correttamente il comportamento della carica elettrica e della materia su scala atomica.

Conduttori ed isolanti

Esistono corpi nei quali le cariche elettriche si possono muovere facilmente da un punto all'altro e si dicono **conduttori**; altri nei quali le cariche rimangono localizzate e prendono il nome di **isolanti** o **dielettrici** o **coibenti**. Un **isolante è perfetto** se non si lascia attraversare da nessuna carica (elettroni o ioni). Un **conduttore è perfetto** se non oppone resistenza al passaggio delle cariche elettriche (elettroni o ioni). Gli **isolanti reali**, anche i migliori, hanno sempre una lieve conducibilità. I **conduttori reali** oppongono sempre una certa resistenza al moto delle cariche elettriche. Da un punto di vista microscopico i **conduttori di elettricità** sono sostanze nelle quali alcune o tutte le cariche elettriche (elettroni di conduzione nei metalli, ioni nelle soluzioni elettrolitiche) possono muoversi liberamente sotto l'azione di forze elettriche. Nei metalli i **portatori di carica** sono **elettroni di conduzione**. Quando atomi isolati si uniscono per formare un metallo, gli elettroni dell'ultima orbita non restano attaccati al proprio atomo, ma diventano liberi di muoversi all'interno del reticolo cristallino. Nei **conduttori elettrolitici** i portatori di carica sono **ioni positivi e ioni negativi**. negli isolanti, invece, gli elettroni dell'ultima orbita sono vincolati più o meno rigidamente agli atomi.

Si distinguono varie specie di conduttori

1) conduttori metallici o di prima classe

Sono i metalli e molte leghe. Il flusso di elettricità (**corrente elettrica**) è dovuto al moto ordinato degli *elettroni di conduzione* (**elettroni dell'ultima orbita**) capaci di

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

passare da una posizione all'altra all'interno del conduttore. Gli atomi, privati degli elettroni di conduzione, costituiscono degli **ioni positivi** che vibrano attorno a delle posizioni di equilibrio e costituiscono il **reticolo cristallino**. danno luogo a **conduzione metallica**.

2) conduttori elettrolitici o di seconda classe

Sono le soluzioni elettrolitiche, cioè le soluzioni di basi, acidi e sali. Il flusso di elettricità è dovuto al moto di porzioni di materia cariche positivamente (**ioni positivi** o **cationi**) e negativamente (**ioni negativi** o **anioni**).

3) conduttori gassosi

In particolari condizioni negli aeriformi si ha **conduzione gassosa**. Il flusso di elettricità è dovuto al moto di **ioni gassosi**, talvolta al moto di elettroni liberi. Uno **ione gassoso** è costituito da una molecola che ha perso un elettrone (almeno) e ne acquistato uno (almeno).

4) Esiste poi una classe di materiali, quella dei **semiconduttori** che è intermedia fra i conduttori e gli isolanti per le sue proprietà di condurre l'elettricità. Sono **semiconduttori** il **germanio**, il **silicio**. Nei **semiconduttori** la conducibilità può essere aumentata notevolmente con l'aggiunta di piccole quantità di altri elementi. Al silicio si aggiungono spesso tracce di arsenico e di boro. I semiconduttori hanno molte applicazioni, in particolare sono usati per la costruzione di transistori. Il comportamento di questi elementi non può essere descritto in modo adeguato senza alcune conoscenze di **fisica quantistica**. I semiconduttori sono sostanze solide, cristalline, nella quali è presente una lieve conduzione elettrica il cui carattere, in definitiva, è elettronico ma accompagnato da talune proprietà specifiche (non obbedienza alla legge di Ohm, particolare asimmetria direzionale nella conduzione elettrica) che hanno reso queste sostanze preziose per talune applicazioni industriali.

Legge di conservazione della carica elettrica

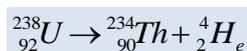
Fondamentale è in elettrologia il **principio di conservazione della carica elettrica** enunciato per la prima volta da Beniamino Franklin nel **1750**. Esso afferma che **in un sistema isolato la carica elettrica totale rimane costante**. Il principio di conservazione della carica elettrica è verificabile a livello macroscopico mediante esperimenti che coinvolgono processi di elettrizzazione per strofinio. Quando una bacchetta di vetro è strofinata con seta sulla bacchetta appare una **carica positiva** e sulla seta una **carica negativa** di uguale grandezza. Questo

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

ci suggerisce che lo strofinio non crea carica elettrica ma la trasferisce da un corpo ad un altro alterando debolmente la neutralità elettrica di ciascuno di essi. Con precisione molto elevata il **principio di conservazione della carica elettrica** è verificabile oggi anche a livello microscopico nelle reazioni nucleari e nelle particelle elementari. Diamo alcuni esempi.

1) Quando un **elettrone** (e^-) avente carica elettrica $-e$ ed un **positrone** (e^+ , elettrone positivo, antiparticella di e^-) avente carica $+e$ vengono a trovarsi uno vicino all'altro danno luogo ad un **processo di annichilazione**. Le due cariche scompaiono convertendo tutta la loro massa in energia secondo la relazione di Einstein $E = mc^2$. L'energia compare sotto forma di due **raggi gamma** diretti in versi opposti. Si noti che mentre la massa non si è conservata essendo stata trasformata in energia, la carica totale si conserva perché il suo valore totale è **zero** prima e dopo l'annichilazione

2) Decadimento radioattivo dell'uranio



${}_2^4\text{H}_e$ = particella α = nucleo di Elio

Per le cariche elettriche vale il **principio di invarianza** rispetto al sistema di riferimento in cui viene misurata. Esso afferma quanto segue :

la carica elettrica di una particella o di un sistema di particelle è uno scalare invariante, cioè indipendente rispetto al sistema di riferimento in cui viene misurata.

In che cosa consiste la differenza tra la conservazione della carica elettrica e l'invarianza della carica elettrica? Col primo termine si intende che in un sistema isolato la carica totale rimane costante. Col secondo che la carica elettrica di un sistema non varia a seconda che sia in moto o ferma rispetto al sistema di riferimento, cioè la carica elettrica non dipende dallo stato di moto.

Legge di Coulomb

Essa descrive la legge quantitativa della interazione tra due cariche elettriche puntiformi q_1 e q_2 .

Coulomb verificò sperimentalmente (1785) che se si hanno nel vuoto due cariche elettriche puntiformi q_1 e q_2 , la forza che si esercita tra di esse:

- 1)** è diretta lungo la congiungente le due cariche
- 2)** è direttamente proporzionale al prodotto delle due cariche

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

3) è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza

4) è **attrattiva** per cariche di segno opposto (**cariche eteronome**), **repulsiva** per cariche di uguale segno (**cariche omonome**). In simboli abbiamo:

$$F = k_o \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad \text{legge di Coulomb nel vuoto}$$

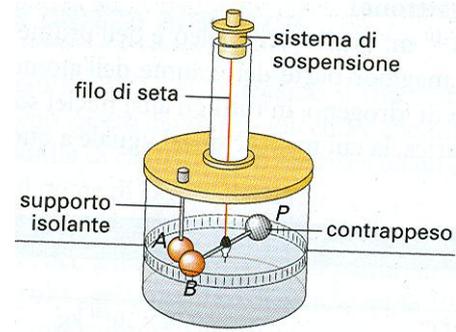
Tale relazione vale anche in segno quando si adotta la convenzione $F > 0$ per la **repulsione**, $F < 0$ per l'**attrazione**.

Nel vuoto si pone: $k_o = \frac{1}{4\pi\epsilon_o}$ e la legge di Coulomb si scrive: $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$ [1]

ϵ_o prende il nome di **costante dielettrica del vuoto** ed è una **costante universale** cioè una costante il cui valore numerico dipende soltanto dalle unità di misura di **F, r, q**.

Bilancia di torsione di Coulomb

Serve per misurare la **forza di attrazione** o di **repulsione** tra due sfere elettrizzate. La sferetta **A** è fissa, la sferetta **B** può ruotare poiché è attaccata ad un manubrio di materiale isolante sospeso ad un filo di seta tenuto in tensione mediante un peso **P**.



Nella [1] intervengono due grandezze fisiche che allo stato attuale non sappiamo misurare. Esse sono ϵ_o e **q**. Possiamo seguire due vie:

1) dare un valore arbitrario ad ϵ_o ed utilizzare la formula [1] per definire l'unità di misura della carica elettrica

2) definire l'unità di misura della carica elettrica **q** mediante qualche altra legge fisica in cui interviene **q**. In questo caso il valore di ϵ_o non può essere più arbitrario, ma ϵ_o deve avere un valore numerico tale da rendere il termine di sinistra della legge [1] numericamente uguale a quello di destra. Nel **S.I.** si preferisce questo secondo metodo. Infatti l'unità di misura fondamentale in elettrostatica è l'**ampere** che definiremo successivamente, mentre l'unità di misura delle cariche elettriche è il **coulomb** (C) definito dalla legge $q = i \cdot t$

Il **coulomb** è la quantità di elettricità che attraversa in un secondo una qualsiasi sezione di un conduttore percorso dalla corrente di 1 ampere .

$$1 \text{ coulomb} = 1 \text{ ampere} \cdot 1 \text{ secondo}$$

$$1 C = 1 A \cdot 1 s$$

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

In base a verifiche sperimentali risulta: $\epsilon_o = 8,8541 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} = 8,8541 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_o} = 8,9922 \cdot 10^9 \frac{m}{F} = 8,9922 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{m}{F} = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

In base a queste considerazioni possiamo definire il **coulomb** servendoci della legge [1] :

il **coulomb è la quantità di elettricità che posta nel vuoto , alla distanza di 1 metro da una carica uguale, la respinge con la forza di $9 \cdot 10^9$ newton .**

Infatti ponendo nella [1] $q_1 = q_2 = 1C$, $r = 1m$ otteniamo: $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_o}$ newton $\approx 9 \cdot 10^9$ newton

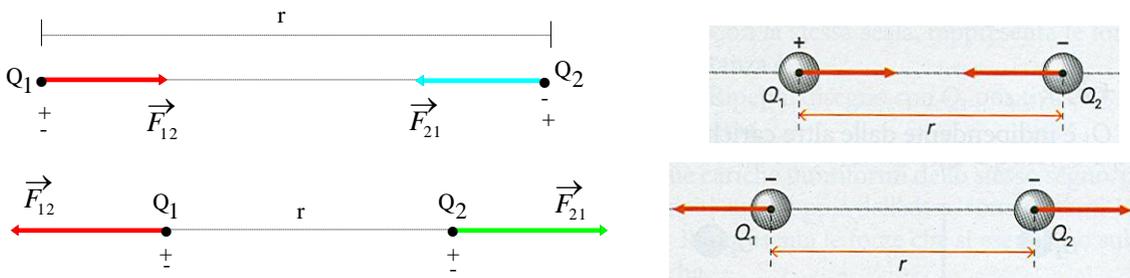
In effetti le cose stanno un po' diversamente da come le abbiamo illustrate. Infatti nel **S.I.** si sceglie arbitrariamente il valore di μ_o (**permeabilità magnetica del vuoto**), cioè si pone:

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

e si ricava il valore di ϵ_o dalla relazione: $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \mu_o}} = c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ = velocità della luce nel vuoto

μ_o è **quantità assegnata** , ϵ_o è **quantità ricavata**

$$[\epsilon_o] = \left[\frac{q^2}{F \cdot \ell^2} \right] = \left[\frac{I^2 T^2}{L M T^{-2} L^2} \right] = [L^{-3} \cdot M^{-1} \cdot T^4 \cdot I^2]$$



L'esperienza mostra che la forza che si esercita tra una coppia di cariche elettriche è indipendente dalla presenza di altre cariche .vale, cioè, per le cariche elettriche il **principio di sovrapposizione**. In altre parole, date n cariche puntiformi $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ la forza che si esercita su una di esse (ad esempio q_1) è data dalla somma vettoriale delle forze che ogni singola carica puntiforme eserciterebbe su di essa in assenza di tutte le altre, cioè:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \dots$$

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

dove \vec{F}_1 è la forza che si esercita sulla carica q_1 e dovuta alla presenza delle cariche q_2, q_3, \dots, q_n ,
 \vec{F}_{12} è la forza che si esercita sulla carica q_1 proveniente dalla carica q_2 ,

Le **interazioni elettrostatiche sono molto più intense di quelle gravitazionali.**

Confrontare la forza elettrostatica di repulsione e la forza gravitazionale di attrazione tra due elettroni posti alla distanza r .

$$F_{gr} = G \cdot \frac{m_e^2}{r^2} \quad F_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} \quad F_{el} = 0,4 \cdot 10^{43} F_{gr} \quad \text{in quanto :}$$

$$\frac{F_{el}}{F_{gr}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{G} \cdot \frac{e^2}{m_e^2} = 8,9922 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{11}}{6,67} \cdot \frac{(1,6)^2 \cdot 10^{-38}}{(9,1)^2 \cdot 10^{-62}} = 0,041677 \cdot 10^{44} \approx 0,4 \cdot 10^{43}$$

La **forza elettrostatica** è più intensa di quella **gravitazionale** di un fattore dell'ordine di 10^{43} . Nei problemi riguardanti atomi, molecole, solidi le forze gravitazionali sono trascurabili rispetto a quelle elettrostatiche. La distanza r tra l'elettrone ed il protone nell'atomo di idrogeno è $5,3 \cdot 10^{-11} m$. Quanto valgono le intensità della forza elettrostatica e della forza gravitazionale esercitate tra le due particelle?

$$F_{el} = 8,1 \cdot 10^{-8} N \quad F_{gr} = 3,7 \cdot 10^{-47} N \quad F_{el} = 2,2 \cdot 10^{39} F_{gr}$$

La forza elettrostatica è molto più intensa di quella gravitazionale che può essere trascurata.

Osservazioni

- 1) Le **interazioni elettrostatiche** sono molto più intense di quelle **gravitazionali**
- 2) L'**eccesso di carica** è di solito piccolo rispetto alla carica totale del corpo.
- 3) E' immediato osservare una identità formale tra la **forza elettrostatica** di Coulomb e la **forza gravitazionale** di Newton. Vanno però sottolineate alcune differenze:
 - le **cariche elettriche** possono essere positive o negative, mentre le **masse gravitazionali** sono positive.
 - in elettrostatica esistono forze sia **attrattive** che **repulsive**, mentre le forze gravitazionali sono soltanto **attrattive**.
 - le **masse gravitazionali** (che sono dello stesso segno) si attraggono, mentre le **cariche elettriche** aventi lo stesso segno si respingono.
 - la **costante gravitazionale** G è una **costante universale** e quindi la **forza gravitazionale** che si esercita tra due masse **non dipende dal mezzo** in cui esse sono

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

poste. Invece la costante **k** che appare nella legge di Coulomb **dipende dal mezzo** e così pure la corrispondente **forza elettrostatica**.

- da un punto di vista gravitazionale tutte le sostanze si **comportano nello stesso modo**. Invece da un punto di vista **elettrostatico** i dielettrici ed i conduttori si comportano in modo diverso.

- Il **coulomb**, unità di misura della carica elettrica nel **S.I.**, è **eccessivamente grande** per cui nella pratica si utilizzano suoi opportuni sottomultipli. La carica elettrica più piccola esiste in natura è l'elettrone il cui valore, espresso in **coulomb** vale $1,6 \cdot 10^{-19}$, cioè: **$e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$**

A meno del segno, tale carica coincide con quella del protone. Se vogliamo sapere quante **cariche elementari** ci vogliono per formare la **carica di 1 coulomb** è sufficiente scrivere: **$N \cdot e = 1 \text{ coulomb}$** dove **N** è il numero di elettroni in questione ed **e** la carica dell'elettrone espressa in coulomb. Ne

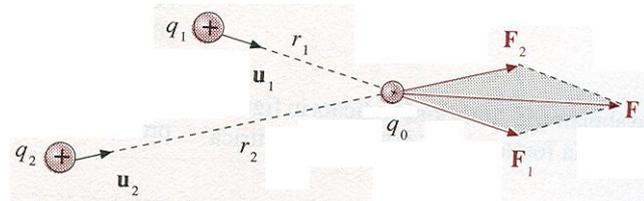
consegue che:

$$N = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ elettroni} \approx 6 \cdot 10^{18} \text{ elettroni}$$

Il risultato ottenuto stabilisce che la carica di un coulomb corrisponde a quella di $6 \cdot 10^{18}$ elettroni, un numero veramente grande se si pensa che, attualmente, tutta la popolazione mondiale è pari a $4 \cdot 10^8$ persone.

Principio di indipendenza delle forze simultanee

Le forze elettriche agenti su una carica q_o dovute alle cariche circostanti si sommano come vettori: vige cioè il **principio di**

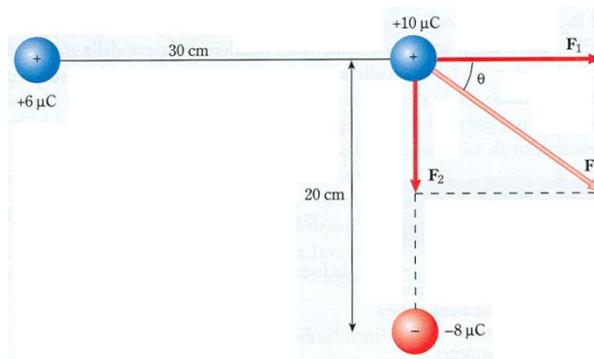


sovrapposizione, detto anche **principio di indipendenza delle forze simultanee**.

Consideriamo tre cariche puntiformi q_1 , q_2 , q_o . La carica q_1 esercita separatamente la forza \vec{F}_1 sulla carica q_o e la carica q_2 esercita la forza \vec{F}_2 sulla carica q_o . Quando entrambe le cariche sono presenti, la forza \vec{F} che agisce su q_o è data dalla somma vettoriale di \vec{F}_1 ed \vec{F}_2 .

Problema: Trovare la forza risultante \vec{F} che agisce sulla carica $q = +10 \mu C$ in presenza delle cariche $q_1 = +6 \mu C$ e $q_2 = -8 \mu C$, come indicato in figura.

Per trovare la **forza risultante** che agisce sulla carica $q = +10 \mu C$ dobbiamo **sommare vettorialmente** le forze delle altre due cariche che agiscono su di essa.



La forza \vec{F}_1 esercitata dalla carica positiva $q_1 = +6 \mu C$ respinge la carica $q = +10 \mu C$ verso destra;

La forza \vec{F}_2 esercitata dalla carica positiva $q_2 = -8 \mu C$ attira verticalmente verso il basso la carica

$$q = +10 \mu C. \quad F_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{(0,3)^2} = 6 N \quad F_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{(0,2)^2} = 18 N$$

Essendo le forze \vec{F}_1 ed \vec{F}_2 vettori perpendicolari tra loro, per calcolare il modulo F della forza risultante possiamo applicare il teorema di Pitagora. Risulta:

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{36 + 324} = \sqrt{360} = 18,97 N \approx 19 N \quad \text{tg } \vartheta = \frac{F_2}{F_1} = \frac{18}{6} = 3 \quad \vartheta = \text{arctg } 3 \approx 72^\circ$$

Guscio metallico sferico elettrizzato

Un guscio metallico sferico elettrizzato uniformemente attrae o respinge una carica puntiforme posta fuori dal guscio come se tutta la carica del guscio fosse concentrata nel suo centro. Un guscio metallico sferico elettrizzato uniformemente non esercita alcuna forza elettrostatica su una qualsiasi carica puntiforme posta all'interno del guscio.

La costante dielettrica relativa

Abbiamo visto che le cariche elettriche q_1 e q_2 poste nel vuoto alla distanza r interagiscono fra loro mediante una forza il cui modulo F_o ci viene dato dalla legge di Coulomb :

$$F_o = k_o \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

dove ϵ_o prende il nome di **costante dielettrica del vuoto**.

In un mezzo materiale isolante omogeneo, isotropo, illimitato il coefficiente k_o assume un valore generalmente diverso che nel vuoto: **a parità di cariche e di distanza la forza F**

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

con cui le cariche q_1 e q_2 interagiscono risulta generalmente minore di

F_o . Il valore di \mathbf{F} dipende dal mezzo in cui le cariche q_1 e q_2 sono poste. Si può dimostrare

teoricamente e verificare sperimentalmente che il rapporto tra queste due forze $\varepsilon_r = \frac{F_o}{F}$ non

dipende dai valori delle due cariche q_1 e q_2 né dalla loro distanza. Esso è un **numero puro** (in

quanto rapporto di due grandezze fra loro omogenee) caratteristico del mezzo in cui sono poste le

cariche e ci fornisce una misura di come un dielettrico riduce la forza rispetto al vuoto. ε_r prende il

nome di **costante dielettrica relativa del mezzo considerato**. Il prodotto $\varepsilon_o \varepsilon_r$ si indica

spesso col simbolo ε e si chiama **costante dielettrica del mezzo** . $\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r$ con $\varepsilon_r > 1$

La **legge di Coulomb** in un dielettrico assume la forma :

$$F = \frac{F_o}{\varepsilon_r} = \frac{k_o}{\varepsilon_r} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi \varepsilon_o \varepsilon_r} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi \varepsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Osservazioni

- E' opportuno sottolineare che la costante dielettrica del vuoto ε_o è di natura sostanzialmente diversa dalla costante dielettrica relativa ε_r . Infatti ε_r ha lo stesso valore in tutti i sistemi di unità di misura ed esprime una proprietà del mezzo considerato, mentre il valore della costante ε_o è il frutto delle nostre convenzioni, cioè risulta diverso nei vari sistemi di unità di misura.

- Ci si può domandare quale sia la ragione per cui, in un dielettrico, la forza \mathbf{F} che si esercita tra due cariche q_1 e q_2 risulti, a parità di altre condizioni, ε_r volte più piccola della forza F_o esercitata nel vuoto. L'introduzione di materia in un **campo elettrico** determina sempre un moto, cioè una redistribuzione, delle cariche elettriche all'interno di essa. Se si tratta di un **conduttore**

perfetto (nella pratica un metallo) gli elettroni di conduzione si spostano liberamente al suo interno finché il campo elettrico totale si annulla. Nella maggior parte delle altre sostanze però le cariche elettriche non sono libere di muoversi perché gli elettroni sono legati alle rispettive molecole. l'unica redistribuzione possibile è uno spostamento delle cariche elettriche all'interno di ogni molecola. Queste deformazioni delle molecole sono estremamente piccole, ma il loro effetto cumulativo, l'unico osservabile dal punto di vista macroscopico, può diventare anche rilevante ed essere così misurato. E' questo nuovo stato elettrico (**polarizzazione del dielettrico**) che

determina una **riduzione** del valore della forza F_o nel vuoto di un fattore pari a $\frac{1}{\varepsilon_r}$. Il

comportamento descritto ci induce a chiamare la sostanza **dielettrico** perché l'effetto della sostanza non conduttrice è quello di **ridurre** la forza. Le sostanze dotate di queste proprietà conseguentemente vengono definite **sostanze dielettriche** o **dielettrici** o **isolanti** o **coibenti**. In seguito studieremo nei dettagli, cioè da un punto di vista molecolare, la **polarizzazione dei dielettrici**.

- Per quanto riguarda i dielettrici più comuni l'effetto macroscopico che essi producono è descritto completamente dalla costante dielettrica ϵ_r . Vedremo in seguito che questa costante può essere definita alternativamente come il rapporto tra il valore E_o del campo elettrico di una carica elettrica puntiforme nel vuoto e quello che si produce se la carica viene immersa nel dielettrico.

Michael Faraday nel **1838** dimostrò teoricamente e verificò sperimentalmente che se tra le armature di un **condensatore** (ad esempio piano) si introduce una sostanza non conduttrice la sua **capacità** aumenta di un fattore ϵ_r , cioè:

$$\frac{C}{C_o} = \epsilon_r \quad c = \epsilon_r \cdot C \quad \text{dove } C \text{ e } C_o \text{ sono le}$$

capacità del condensatore con e senza dielettrico tra le armature. Le proprietà elettriche macroscopiche dei dielettrici possono essere convenientemente descritte anche per mezzo della loro **costante dielettrica assoluta** $\epsilon = \epsilon_o \epsilon_r$.

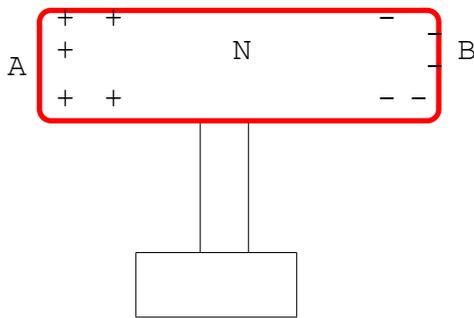
INDUZIONE ELETTROSTATICA

Sia AB un conduttore metallico, isolato e neutro. Avviciniamo a tale conduttore un corpo C caricato ad esempio positivamente. Il conduttore AB , detto **corpo indotto**, si carica di segno opposto al corpo C (detto **corpo inducente**) nella parte più vicina al corpo C e dello stesso segno nella parte più lontana. Le cariche che si manifestano nel conduttore AB si dicono **cariche indotte**; al fenomeno si dà il nome di influenza o **induzione elettrostatica**. Le cariche indotte sono separate da una zona neutra N . In generale la carica indotta è minore della carica distribuita sul corpo inducente. Se il corpo inducente C viene allontanato, il conduttore AB torna allo stato neutro. Quando la carica indotta è uguale alla carica del corpo inducente si ha l'**induzione completa**. In questo caso le superfici del corpo indotto e del corpo inducente debbono essere completamente affacciate. Concludendo possiamo affermare che l'induzione elettrostatica consiste nella proprietà che presenta un conduttore di elettrizzarsi tutte le volte che si

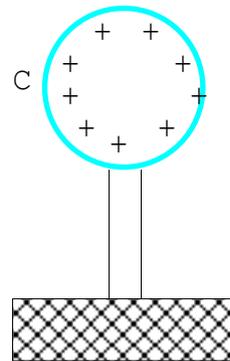
Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

trova in vicinanza di un corpo carico di elettricità. Nell'induzione elettrostatica la regione più vicina al corpo inducente si carica di segno contrario e la regione più lontana dello stesso segno. L'interpretazione del fenomeno è la seguente. Il corpo C, carico positivamente, attira verso la zona B gli elettroni di conduzione presenti nel conduttore. Si potrebbe pensare che tutti gli elettroni di conduzione vadano a finire in B. Ma non è così. Infatti gli altri elettroni di conduzione attirati dal corpo C vengono respinti dagli elettroni in eccesso che già si trovano in B. Inoltre vengono attirati dall'eccesso di carica positiva che si trova in A. Il flusso di elettroni di conduzione cessa quando si fanno equilibrio le forze antagoniste che agiscono sugli elettroni di conduzione. **Un corpo può essere elettrizzato per induzione.**

Mediante un filo conduttore colleghiamo un punto qualsiasi della zona A con la terra. La carica che si trova in A si scarica a terra, mentre la carica opposta rimane distribuita nella zona B. Indi stacciamo il filo che collega il conduttore AB con la terra ed allontaniamo il corpo inducente C. Il conduttore AB risulta carico di elettricità di segno opposto al corpo inducente.

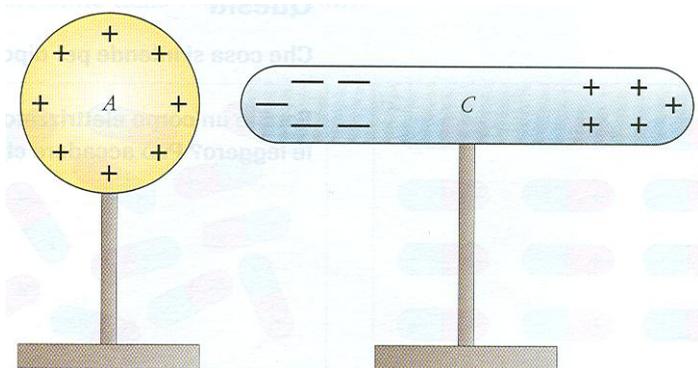


Corpo indotto

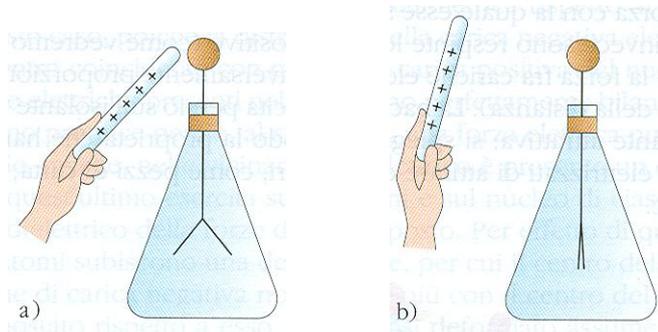


Corpo inducente

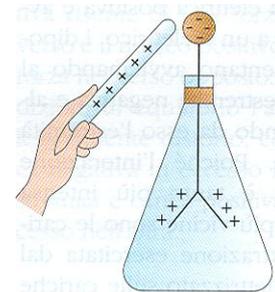
Se avviciniamo un corpo **A** carico positivamente ad un corpo **C**, conduttore ed inizialmente neutro, il conduttore si carica **negativamente** nella parte più vicina ad A e **positivamente** nella parte più lontana.



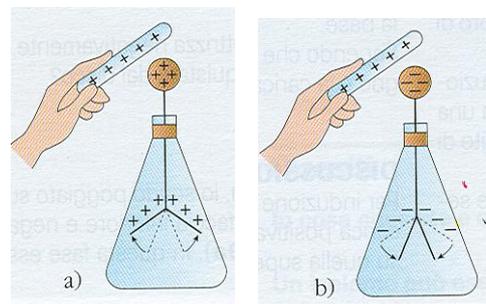
Le foglioline di un elettroscopio **divergono** quando un corpo elettrizzato **è avvicinato** al pomello **(a)** e si **richiudono** quando il corpo è **allontanato** **(b)**.



Avvicinando ad un elettroscopio una bacchetta elettrizzata positivamente **alcuni elettroni di conduzione** si spostano dalle foglioline, cioè dalla parte più lontana dell'elettroscopio, al pomello. In tal modo le foglioline assumono una **carica positiva** mentre il pomello assume una **carica negativa**.



Si può riconoscere il segno della carica posseduta da un elettroscopio avvicinando ad esso una bacchetta carica positivamente: se la divergenza delle foglioline aumenta, la carica è **positiva (a)**, mentre se la **divergenza diminuisce** la carica è **negativa (b)**.



OSSERVAZIONE

a) Attrazione di un conduttore neutro

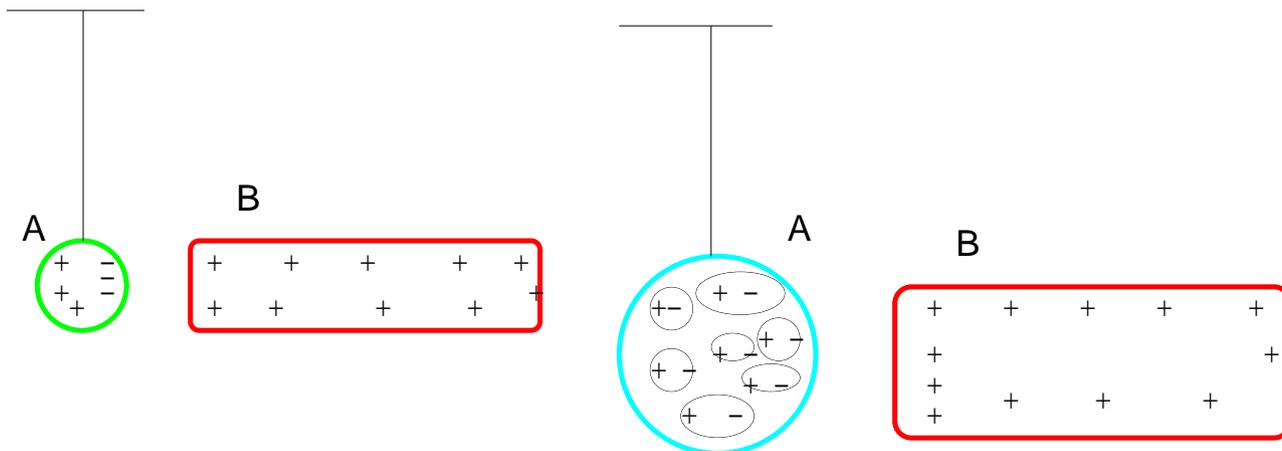
Quando un conduttore neutro A si trova vicino ad un corpo B carico positivamente, gli elettroni di conduzione vengono attratti verso l'estremità prossima alla carica positiva e sulla parte restante del conduttore rimane una carica positiva. Poiché la carica negativa indotta è più vicina al corpo positivo, la forza risultante è attrattiva. Quando il corpo A viene a contatto col corpo B, cariche negative passano dal corpo A al corpo B. I corpi A e B si respingono in quanto elettrizzati dello stesso segno.

b) Attrazione di un isolante neutro

Un corpo B carico positivamente si trova vicino ad un corpo isolante A scarico. Negli isolanti non vi sono particelle elettriche libere di muoversi, ma le particelle positive e negative di ciascuna molecola possono allontanarsi di poco. Le particelle negative sono così tutte un poco più vicine alla

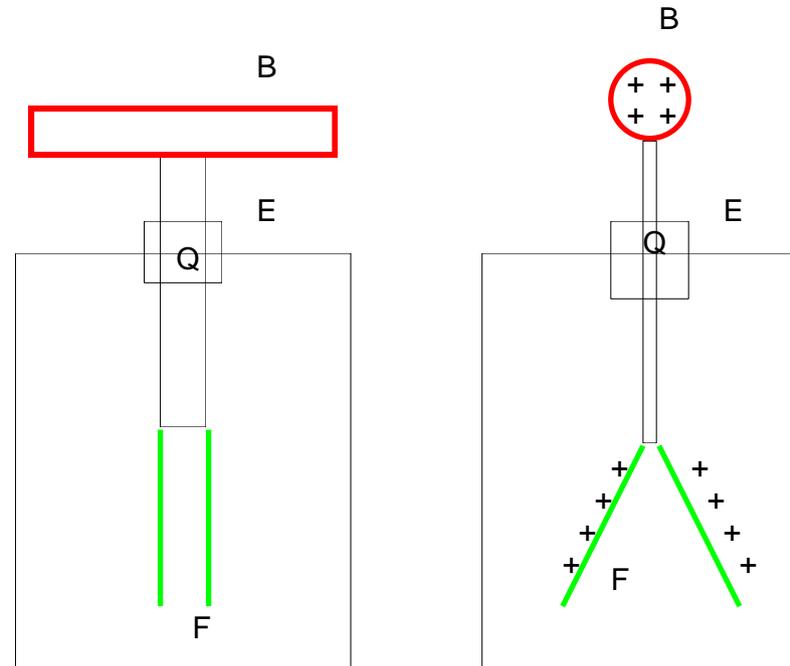
Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

carica positiva, dando luogo anche in questo caso ad una forza risultante attrattiva. Quando A tocca B non si ha passaggio di cariche elettriche da un corpo all'altro e quindi non si ha repulsione.

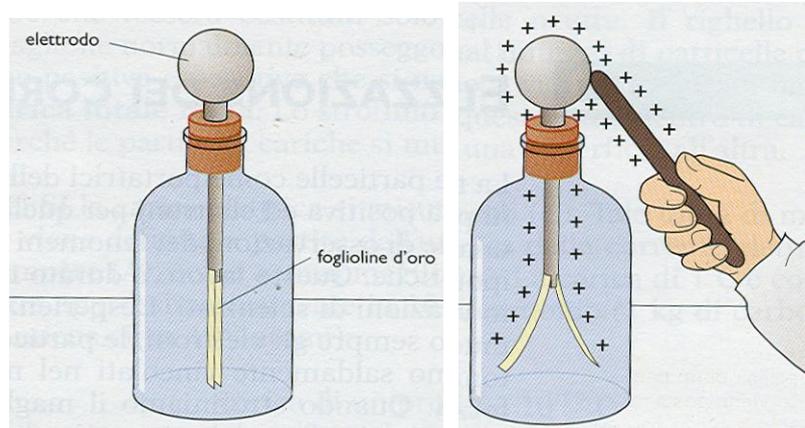


ELETTROSCOPIO A FOGLIE

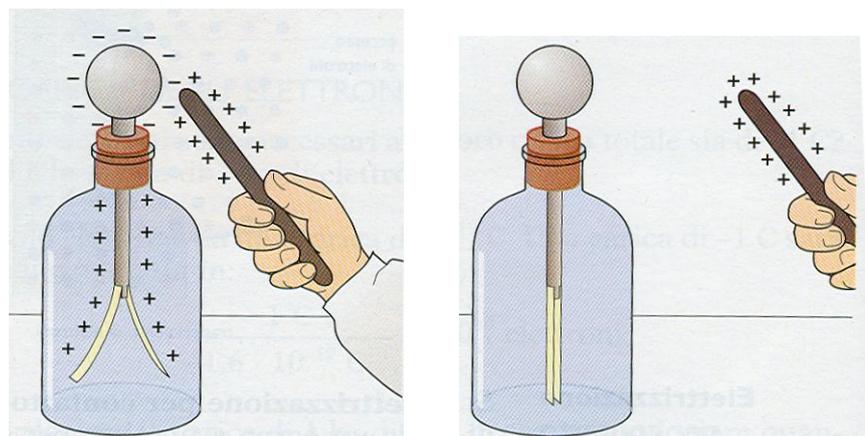
L'**elettroscopio a foglie** è costituito da un'asta metallica Q portante ad un'estremità un piatto o un recipiente o un pomello sferico B pure metallico, ed all'altra estremità due sottili foglioline F d'oro o d'alluminio. Queste sono racchiuse in un recipiente protettivo di vetro o a pareti metalliche in cui sono praticate delle aperture per potere vedere la posizione delle foglie. Se il conduttore formato dall'asta metallica e dalle foglioline non è carico di elettricità, queste ultime, sotto l'azione del loro peso, si dispongono verticalmente l'una accanto all'altra. Se si tocca l'elettroscopio con un corpo carico, la sua carica si diffonde su tutto il conduttore, ed una parte andrà sulle foglioline, le quali, possedendo cariche dello stesso segno, si respingeranno. L'angolo di deviazione è proporzionale alla carica dell'elettroscopio ed è indipendente da ogni altra circostanza (forma del corpo, estensione del contatto,..). L'elettroscopio serve per vedere se un corpo è elettrizzato oppure no. Se il tappo E è di ambra ben pulita ed asciutta, l'elettroscopio perde la sua carica con grande lentezza, per molti minuti la sua carica rimane praticamente invariata. I corpi elettrizzati che successivamente si avvicinano a B (senza toccarlo) si dividono in due categorie: quelli che aumentano la divergenza preesistente e quelli che la diminuiscono. I primi hanno carica dello stesso segno di B, i secondi hanno segno opposto. La spiegazione del fenomeno è da ricercarsi nell'induzione elettrostatica che subiscono i conduttori. L'elettroscopio serve pure a stabilire il segno della carica elettrica di un corpo elettrizzato. In questo caso l'elettroscopio va preventivamente caricato con elettricità di segno noto.



Carica di un elettroscopio per contatto. Portando a contatto del pomello di un elettroscopio scarico una bacchetta elettrizzata, le foglioline acquistano cariche dello stesso segno e divergono in quanto si respingono vicendevolmente .



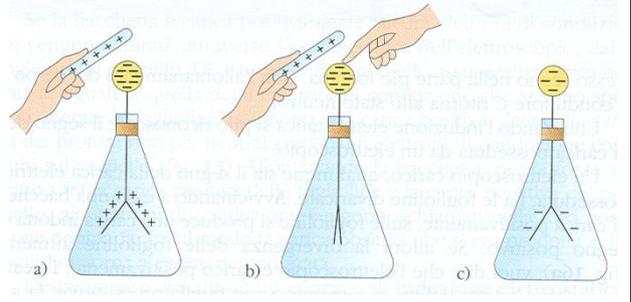
Elettrizzazione di un elettroscopio per induzione elettrostatica.



Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

Carica di un elettroscopio per induzione

a) Avvicinando all'elettroscopio una bacchetta carica positivamente, sulle foglioline è indotta una carica positiva; **b)** toccando con un dito il pomello, la carica positiva delle foglioline si disperde a terra; **c)** allontanando il dito e subito dopo la bacchetta, l'elettroscopio rimane carico negativamente.

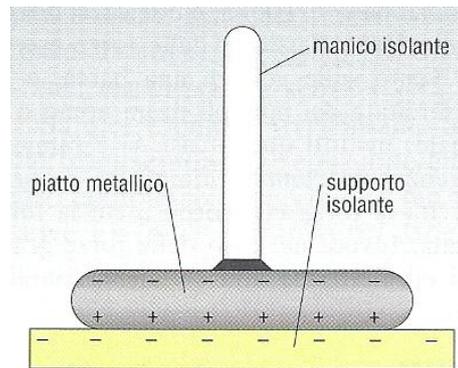


ELETTROFORO di VOLTA

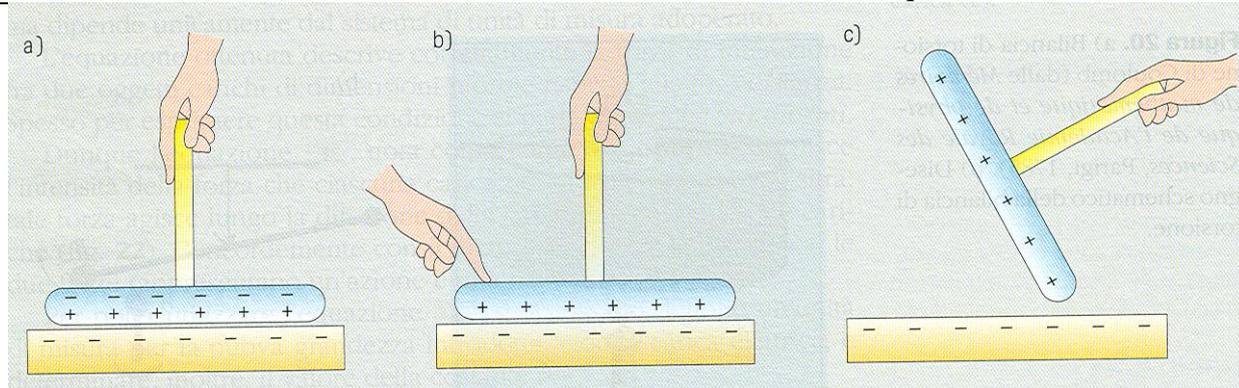
L'**elettroforo di Volta** è una macchina elettrostatica ad induzione ideata da Volta nel 1775.

Una macchina elettrostatica è un qualsiasi dispositivo capace di separare cariche elettriche.

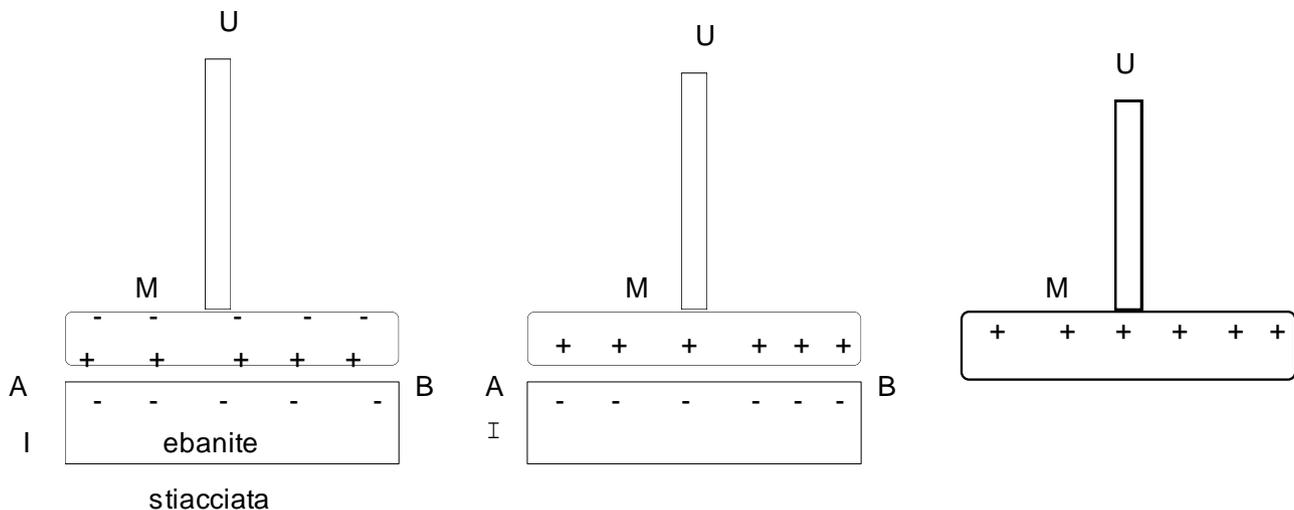
L'**elettroforo di Volta** è costituito da un disco metallico M munito di un manico isolante U, che viene posto su una piastra I di ebanite (-) o su una piastra I di vetro (+) in precedenza elettrizzata per strofinio sulla faccia AB.



Poiché la piastra I non è perfettamente piana il contatto con lo scudo M avviene solo in alcuni punti; le due facce del disco si caricano allora per induzione, una positivamente e l'altra negativamente. Il disco M viene quindi toccato con un dito, il che stabilisce il contatto col suolo, e determina la dispersione delle cariche indotte di segno uguale a quelle presenti sulla piastra inducente. Dopo questa operazione, il disco M risulta carico di segno opposto rispetto alla piastra I ; esso viene allora allontanato da questa (prendendolo per il manico isolante) e posto a contatto con il corpo da elettrizzare. L'operazione può essere ripetuta a piacere senza che vi sia bisogno di ricaricare per strofinio la stacciata I , dato che le cariche da noi utilizzate sono solo quelle indotte.



Le fasi del processo di carica di un elettroforo di Volta. a) Per induzione si accumulano cariche positive sulla faccia inferiore dello scudo e cariche negative su quella superiore; **b)** le cariche negative si disperdono a terra attraverso il corpo dello sperimentatore; **c)** rimuovendo il contatto con la terra, lo scudo, sollevato dalla base, resta carico positivamente.

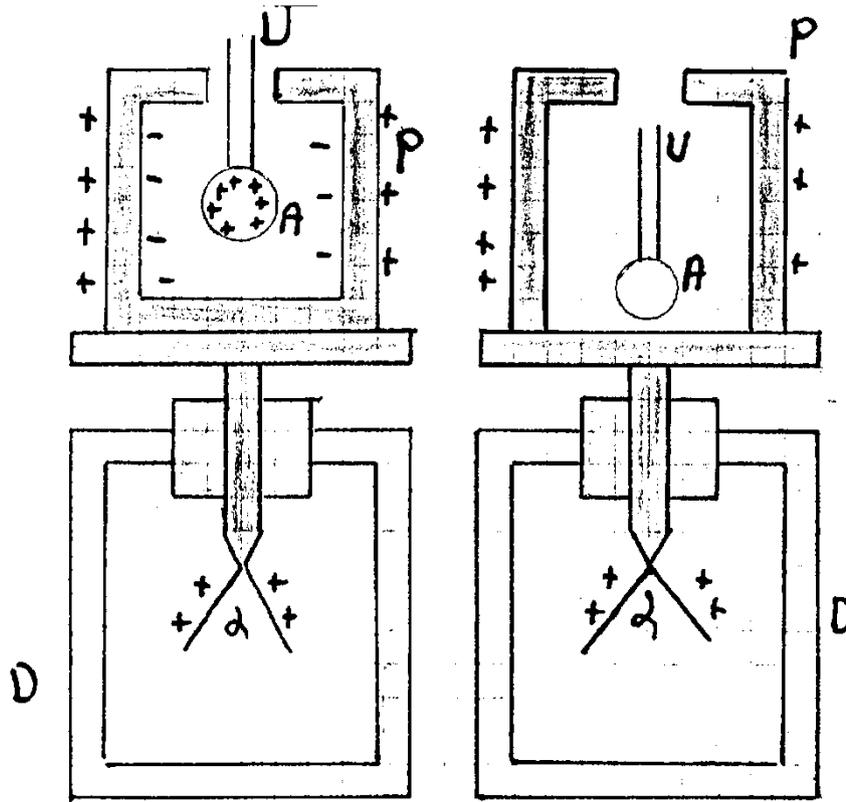


Elettroforo di Volta :

prototipo delle macchine elettrostatiche ad induzione

Induzione completa: pozzo di Beccaria-Faraday

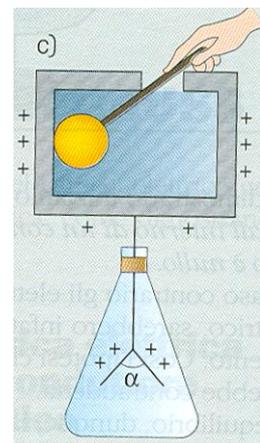
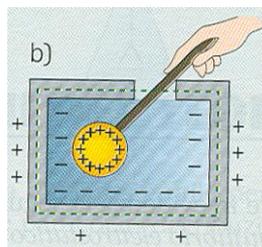
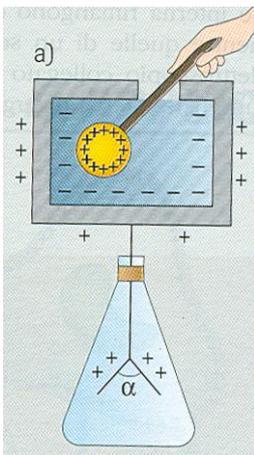
Abbiamo visto che le cariche elettriche indotte che si manifestano in un conduttore sono uguali ed opposte. In generale la carica indotta in ciascuna delle due regioni del conduttore è uguale, in valore assoluto, all'eccesso di carica presente nel corpo inducente quando la superficie del conduttore indotto circonda completamente la superficie del corpo inducente. In questo caso il fenomeno prende il nome di **induzione elettrostatica completa**. Il fenomeno viene messo in evidenza attraverso l'esperienza del pozzo di **Beccaria-Faraday**. Una sferetta A elettrizzata (ad esempio positivamente), tenuta da un manico isolante U, è introdotta in un recipiente metallico P (**Pozzo di Beccaria-Faraday**) provvisto di una apertura piccola e posto sul piatto di un elettroscopio D. Si ha il fenomeno dell'induzione elettrostatica; la sfera A, carica positivamente, induce cariche negative sulla parte interna del pozzo e positive sulla parete esterna. Pertanto anche le foglioline dell'elettroscopio si caricano positivamente e divergono di un angolo α . Purché A sia lontana dall'imboccatura del pozzo, in modo che possa ritenersi completamente circondata dalle pareti di questo, se A non tocca le pareti del pozzo, la divergenza delle foglioline dell'elettroscopio non varia risultando indipendente dalla posizione di A entro il pozzo. Quando la sfera A tocca la parete interna la divergenza α rimane inalterata e lo stesso succede quando la sfera A viene estratta dal pozzo dopo il contatto con la parete interna. In questo caso A risulta scarica. Ciò prova che la carica indotta e quella inducente sono uguali ed opposte, si da neutralizzarsi completamente.



OSSERVAZIONE

Se avviciniamo un corpo carico ad un elettroscopio , la divergenza delle foglioline indica la presenza di un campo elettrostatico. Se invece poniamo l'elettroscopio dentro una gabbia metallica ed avviciniamo dall'esterno il corpo carico , le foglioline non divergono . Quindi una gabbia metallica scherma il campo elettrostatico , come scoprì Michael Faraday nel **1823** .

Infatti la distribuzione di carica , che si forma sulla gabbia , crea all'interno di essa un controcampo che si sovrappone a quello iniziale annullandolo completamente .

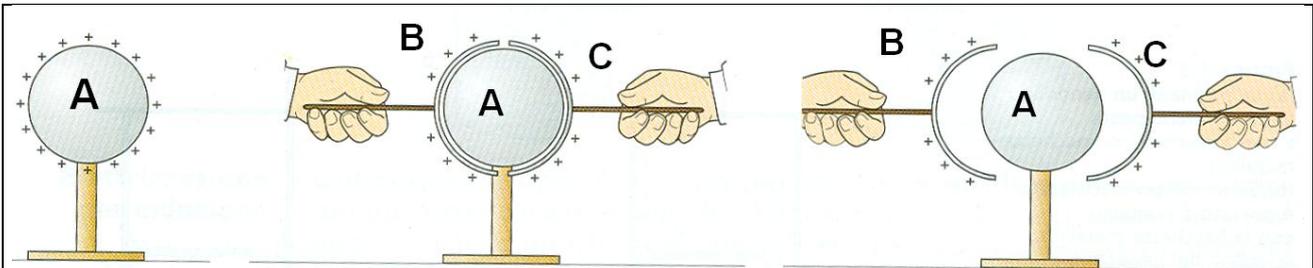


Pozzo di Beccaria-Faraday

- a) Una sfera conduttrice carica sorretta da un manico isolante viene introdotta all'interno di un cilindro metallico munito di una piccola apertura.
- b) Per il fenomeno dell'induzione completa la quantità di carica indotta sulle superficie interna del cilindro uguaglia in valore assoluto quella posseduta dalla sferetta.
- c) Se la sferetta viene a contatto con le pareti, la sua carica neutralizza la carica indotta sulla superficie interna del cilindro lasciando invariata quella distribuita sulla superficie esterna.

Distribuzione della carica elettrica sulla superficie dei conduttori

L'eccesso di carica è localizzata alla superficie esterna dei conduttori. Il conduttore elettrizzato (ad esempio positivamente) A viene circondato da due emisferi metallici B e C, tenuti dai manici isolanti ℓ_1 ed ℓ_2 . Gli emisferi toccano il conduttore A, indi vengono contemporaneamente e bruscamente staccati da A. A risulta ormai scarico, B e C hanno diviso fra loro la carica presa da A. Questo è possibile perché, in condizioni statiche, un eccesso di carica si distribuisce sulla superficie esterna dei conduttori. Quanto detto può essere verificato anche con la gabbia di Faraday.

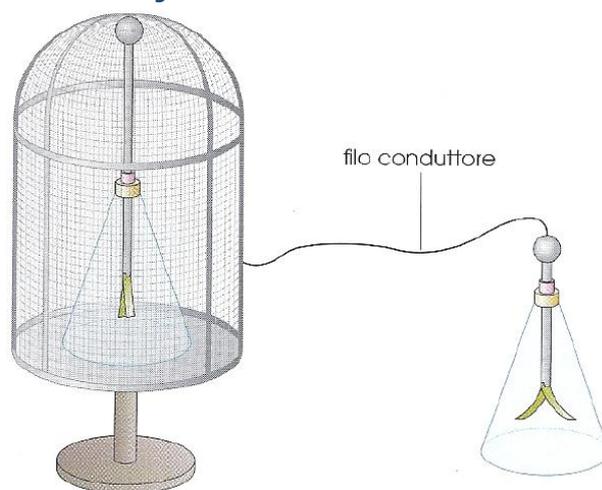


La sfera A conduttrice, sorretta da un supporto isolante, ha una certa carica $+q$, mentre le due semisfere, pure metalliche e sorrette da manici isolanti, sono scariche. Se le due semisfere sono poste, anche per un breve istante, intorno alle sfere ed a contatto con essa, la carica si trasferisce interamente su di esse. Infatti, alla fine dell'esperimento la sfera è completamente scarica.

La carica elettrica in un conduttore carico in equilibrio elettrostatico si distribuisce sulla superficie esterna del conduttore.

La gabbia di Faraday

Faraday verificò che un elettroscopio posto a contatto con il lato interno delle sbarre metalliche di una gabbia elettrizzata non rilevava la presenza di cariche elettriche. Un elettroscopio collegato con il lato esterno delle sbarre, al contrario, si elettrizzava. All'interno di un conduttore, pieno o cavo, **la carica elettrica è nulla**, il campo elettrico è nullo.



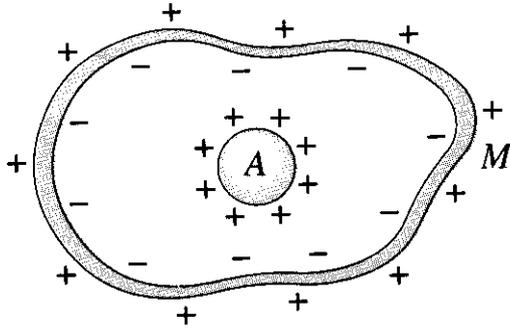
Lo schermo elettrostatico

Un altro importante esperimento classico di elettrostatica riguarda l'effetto noto come schermo elettrostatico: una carica posta all'interno di un conduttore cavo non risente della presenza delle cariche poste all'esterno del conduttore stesso oppure distribuite sulla superficie. Per evitare che i fenomeni elettrici presenti all'esterno di una data regione producano disturbi (cioè campi elettrici) all'interno della regione stessa bisogna schermarla elettricamente cioè bisogna circondarla mediante un involucro metallico. Ad esempio, l'interno di un tubo catodico di un televisore deve essere schermato per evitare che l'immagine (prodotta da un fascio di elettroni che colpiscono lo schermo fluorescente) sia disturbata dalle perturbazioni elettriche che si manifestano all'esterno.

Conclusioni

- 1)** Un conduttore cavo è schermo elettrostatico nel senso che qualunque campo elettrostatico esterno non è capace di produrre azioni elettriche entro la cavità, ma soltanto di creare in ogni punto di questa un potenziale costante
- 2)** Se la cavità è sede di un campo elettrico perché qualche conduttore interno è elettrizzato, questo campo elettrico interno non è per nulla modificato dalla presenza di un campo esterno. Questo campo esterno è in grado soltanto di mutare il potenziale V in ogni punto della cavità di un valore V_0 costante.
- 3)** Una gabbia di rete metallica (gabbia di Faraday), purché a maglie non troppo larghe, si comporta anch'essa con ottima approssimazione da **schermo elettrostatico**.

Schermo elettrostatico



l'involucro M scherma il campo elettrico interno da azioni elettriche esterne .

Una carica posta all'interno di un conduttore cavo non risente della presenza di alcuna carica che si trovi all'esterno del conduttore stesso , oppure distribuita sulla sua superficie .

DENSITA' ELETTRICA

Consideriamo un corpo di volume V all'interno del quale c'è un eccesso do cariche q. Definiamo

densità elettrica cubica media il seguente rapporto: $\rho = \frac{Q}{V}$

Definiamo **densità elettrica cubica** (o **volumetrica** o **spaziale**) nel punto P il

seguinte rapporto: $\rho = \frac{dQ}{dV}$ dove dQ è la carica in eccesso distribuita in un elemento di

volume dV contenente il punto P. $\{\rho\} = \frac{\{Q\}}{\{V\}} = \frac{C}{m^3}$ $[\rho] = [L^{-3} \cdot T \cdot I]$

Similmente abbiamo:

$\sigma = \frac{Q}{S}$ = **densità elettrica superficiale media** $\{\sigma\} = \frac{\{Q\}}{\{S\}} = \frac{C}{m^2}$ $[\sigma] = [L^{-2} \cdot T \cdot I]$

$\sigma = \frac{dQ}{dS}$ = **densità elettrica superficiale nel punto P**

dQ =carica in eccesso distribuita in un elemento dS contenente il punto P

Q = carica in eccesso distribuita sulla superficie S

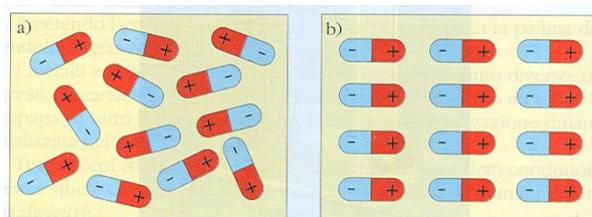
$\lambda = \frac{Q}{\ell}$ = **densità elettrica lineare media** $\{\lambda\} = \frac{\{Q\}}{\{\ell\}} = \frac{C}{m}$ $[\lambda] = [L^{-1} \cdot T \cdot I]$

$\lambda = \frac{dQ}{d\ell}$ = **densità elettrica lineare nel punto P**

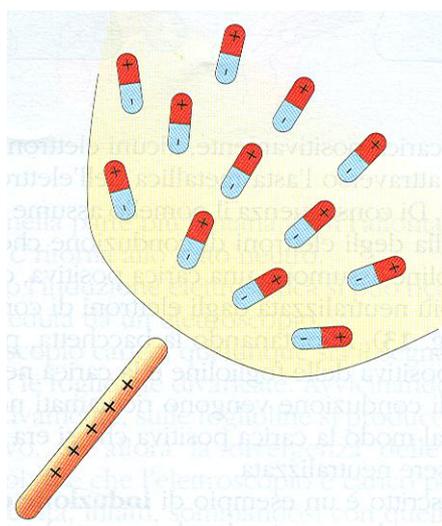
Polarizzazione del dielettrico

In un isolante le cariche elettriche non sono libere di muoversi come avviene nei conduttori, tuttavia un campo elettrico intenso è in grado di modificare la struttura molecolare del dielettrico generando dei **dipoli** che sono dei sistemi costituiti da due cariche di uguale valore ma di segno opposto poste ad una piccola distanza l'una dall'altra.

Rappresentazione schematica dei dipoli di un dielettrico polare. I dipoli sono orientati casualmente **(a)** in assenza di un campo elettrico esterno; **(b)** sono orientati uniformemente per effetto di un campo elettrico esterno.

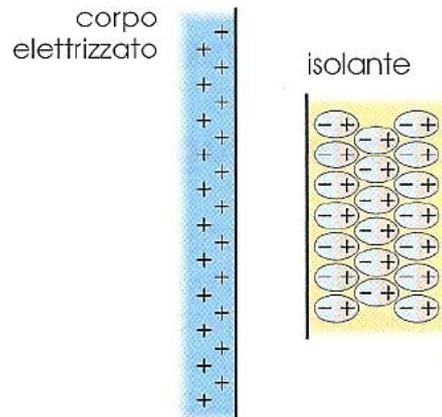


Se un corpo dotato di carica elettrica positiva è avvicinato ad un dielettrico, i **dipoli del dielettrico si orientano**. La **parte più vicina del dielettrico si carica negativamente**, quella più lontana positivamente. Il **dielettrico è soggetto ad una forza risultante attrattiva** in quanto l'attrazione esercitata dal corpo elettrizzato positivamente sulle cariche negative del dipolo prevale sulla repulsione esercitata sulle cariche positive.



Immaginiamo che una bacchetta carica positivamente sia posta in prossimità di un isolante: la bacchetta attira gli elettroni dell'isolante senza strapparli dalle molecole cui appartengono, ma deforma ed orienta le molecole. Anche se rimangono complessivamente neutre, le molecole dell'isolante acquistano all'estremità più vicina alla bacchetta un eccesso di carica negativa ed all'estremità più vicina alla bacchetta un eccesso di carica positiva. Questo processo è chiamato **polarizzazione del dielettrico**. Poiché l'interazione elettrica è tanto più intensa quanto più le cariche sono vicine, la carica positiva della bacchetta attrae con una forza maggiore le estremità negative delle molecole di quanto non respinga le estremità positive. Per questo motivo l'isolante è soggetto all'azione di una debole forza attrattiva.

In prossimità di un corpo elettrizzato, le singole molecole di un isolante assumono, nella parte più vicina, una carica di segno opposto a quello della carica del corpo elettrizzato e, nella parte più lontana, una carica dello stesso segno.



Stabilità dei nuclei: le forze nucleari

Le forze finora descritte sono la **forza gravitazionale** e la **forza elettrica**. Esse sono le sole forze necessarie per spiegare i moti degli oggetti che cadono sotto l'esperienza quotidiana ed anche il comportamento dei sistemi atomici. Però, quando si esamina più profondamente l'atomo e si indaga la natura delle forze che agiscono all'interno dei nuclei, si trova che la forza gravitazionale e la forza elettrica non sono più adeguate per descrivere gli effetti che si osservano. Infatti, secondo la legge di Coulomb, i protoni all'interno del nucleo dovrebbero respingersi, e pertanto i nuclei non potrebbero essere stabili. **Come mai essi esistono ?** E' chiaro che all'interno dei nuclei deve agire qualche forza estremamente intensa capace di vincere la forza coulombiana repulsiva la quale tende ad allontanare i protoni uno dall'altro.

Qual è la forza elettrostatica che agisce fra due protoni in un nucleo medio ?

$$F_{el} \approx 6 \cdot 10 N = 60 N$$

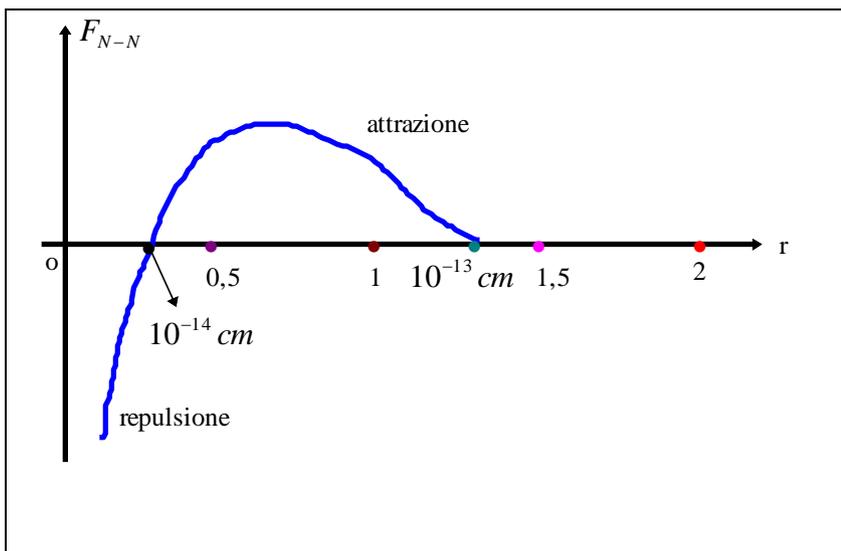
E' **forza repulsiva** enorme. E' all'incirca uguale alla forza gravitazionale che agisce su una massa di $6 kg$ in prossimità della superficie terrestre. Questo risultato sottolinea la straordinaria intensità delle forze nucleari, poiché queste forze devono vincere la repulsione elettrostatica e tenere unito il nucleo. La forza che agisce alle piccole distanze presente all'interno dei nuclei e che assicura la stabilità dei nuclei nonostante la loro tendenza a spezzarsi a causa della repulsione coulombiana è chiamata **forza nucleare forte**. Le forze nucleari sono molto complicate ed ,

Unità Didattica N° 20: La carica elettrica e la legge di Coulomb

allo stato attuale, non completamente note. La **forza nucleare è attrattiva** quando agisce fra **nucleone-nucleone** ($N-N$) cioè fra **protone-protone** ($p-p$), fra **protone-neutrone** ($p-n$), fra **neutrone-neutrone** ($n-n$)

La forza $N-N$ ha una dipendenza dalla distanza che è nettamente diversa da quella della forza gravitazionale e della forza elettrostatica. Queste ultime forze variano come $\frac{1}{r^2}$ e per questo motivo sono chiamate **forze a lungo raggio d'azione** in quanto gli effetti gravitazionali ed elettrostatici si manifestano anche a grandi distanze. La forza $N-N$ ha un **corto raggio d'azione** ed è efficace solo su distanze fino a $\approx 10^{-13} \text{ cm}$ (**dimensioni nucleari**).

Un **protone** che viene rimosso da un nucleo, quando si è allontanato da esso di una distanza pari ad alcune volte 10^{-13} cm non è più soggetto ad alcuna forza nucleare: su di esso continua ad agire la sola forza di repulsione del nucleo proveniente dagli altri protoni presenti nel nucleo. La forza $N-N$ non è del tutto **attrattiva**. Ad una distanza di 10^{-14} cm la forza $N-N$ diventa **repulsiva**. Cioè la forza $N-N$ ha un **nocciolo duro** che impedisce a due nucleoni di avvicinarsi l'uso all'altro.



La dipendenza della forza $N-N$ dalla distanza è rappresentata in figura.

La forza $N-N$ è **fortemente attrattiva** ma solo nell'intervallo compreso tra $\approx 10^{-14} \text{ cm}$ e $\approx 10^{-13} \text{ cm}$

Strategie per la risoluzione di problemi

Applicazione della legge di Coulomb

- L'equazione $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ fornisce il **modulo** della forza di interazione fra due cariche puntiformi ed i simboli q_1 e q_2 rappresentano i valori assoluti delle cariche: non bisogna sostituire ad essi valori negativi.

- Per determinare F utilizzando il valore $8,988 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ per la costante k_o o il valore $8,854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N m^2}$ per la costante dielettrica del vuoto $\epsilon_o = \frac{1}{4 \pi k_o}$, ricorda di esprimere le cariche q_1 e q_2 in coulomb e la distanza in metri. Se i dati sono espressi in altre unità, devi prima convertirli.
- Con un sistema di cariche interagenti è importante applicare correttamente il principio di sovrapposizione: ricorda che la forza risultante su ciascuna carica è la **somma vettoriale** delle forze esercitate singolarmente dalle rimanenti cariche. Disegna un diagramma di corpo libero per ogni carica, determinando la direzione ed il verso di ogni forza da un punto di vista fisico (cariche dello stesso segno si respingono, cariche di segno opposto si attraggono). Per sommare le forze può essere conveniente usare la scomposizione cartesiana dei vettori.

Applicazione della legge di Coulomb

- L'equazione $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ fornisce il *modulo* della forza di interazione fra due cariche puntiformi e i simboli q_1 e q_2 rappresentano i valori assoluti delle cariche: non sostituire a essi numeri negativi.
- Per determinare F utilizzando il valore di $8,988 \cdot 10^9 N m^2/C^2$ per la costante k o il valore di

$8,854 \cdot 10^{-12} C^2/(N m^2)$ per la costante dielettrica del vuoto

$\epsilon_o = \frac{1}{4 \pi k}$, ricorda di esprimere le cariche q_1 e q_2 in coulomb e la distanza r in metri. Se i dati sono in altre unità, devi prima convertirli.

- Con un sistema di cariche interagenti è importante applicare correttamente il principio di sovrapposizione: ricorda che la forza risultante su ciascuna carica è la

somma vettoriale delle forze esercitate singolarmente dalle rimanenti cariche.

Disegna un diagramma di corpo libero per ogni carica, determinando la direzione e il verso di ogni forza da un punto di vista fisico (cariche dello stesso segno si respingono, cariche di segno opposto si attraggono). Per sommare le forze può essere conveniente usare la scomposizione cartesiana dei vettori.