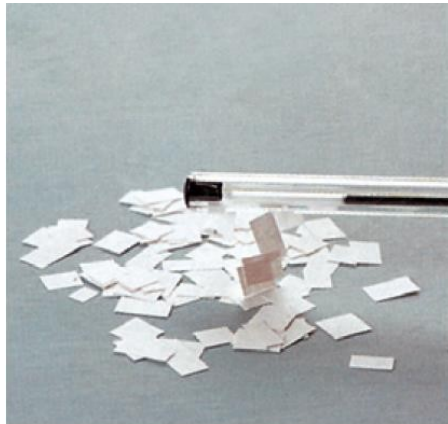


I fenomeni elettromagnetici



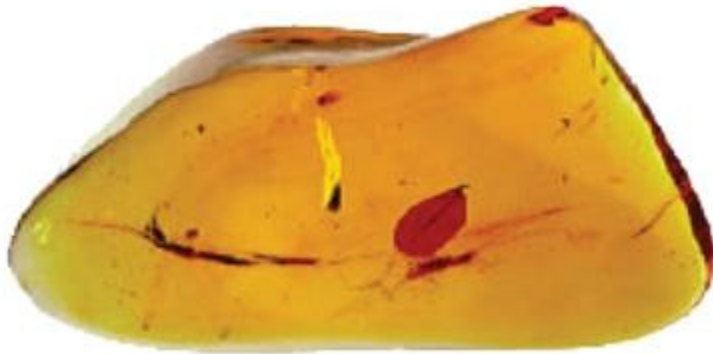
Il mondo che ci circonda è regolato da **fenomeni elettrici e magnetici**, in parte facilmente osservabili (basti pensare a **lampi, fulmini, aurore, arcobaleni**, oppure alla **penna strofinata che attrae pezzetti di carta**), in parte non visibili ad occhio umano (per esempio le **forze interatomiche** che permettono l'aggregazione della materia)



I fenomeni elettromagnetici sono noti fin dall'antichità (i filosofi greci sapevano che l'ambra strofinata poteva attrarre pagliuzze) ma solo a partire dal 19° secolo l'elettromagnetismo è stato compreso al punto da divenire **fondamentale strumento di sviluppo tecnologico, sociale ed economico**. Oggi, **dalle telecomunicazioni alla medicina, dall'elettronica di consumo ai trasporti, ogni settore delle nostre quotidiane attività è regolata da strumenti (dispositivi) basati su fenomeni elettromagnetici**

Elettricità: etimologia

dal Greco antico “electron” (ἤλεκτρον) = ambra



l'ambra è una resina fossile, prodotta in diverse epoche geologiche da 130 a 8 milioni di anni fa da vari tipi di piante: pini, larici, abeti, sequoie; per strofinamento, acquista la proprietà di attrarre piccoli corpi leggeri

In Grecia, fenomeni elettrici e magnetici (esperimenti con ambra e magnetite) erano già noti nel 700 AC. Si veda ad esempio, nel **Dialogo di Platone (360 AC):** *"Si spiegano così lo scorrere delle acque, la caduta dei fulmini, e la meravigliosa forza d'attrazione dell'ambra e della calamita: in nessuno di tutti questi oggetti vi è la forza attraente, ma poiché il vuoto non c'è, questi corpi si respingono in giro l'uno con l'altro, e separandosi e congiungendosi, cambiano di posto, e vanno ciascuno nella propria sede. Dall'intrecciarsi di queste influenze reciproche si sono operati tutti quei prodigi, come sembrerà a chi sappia indagare bene."*

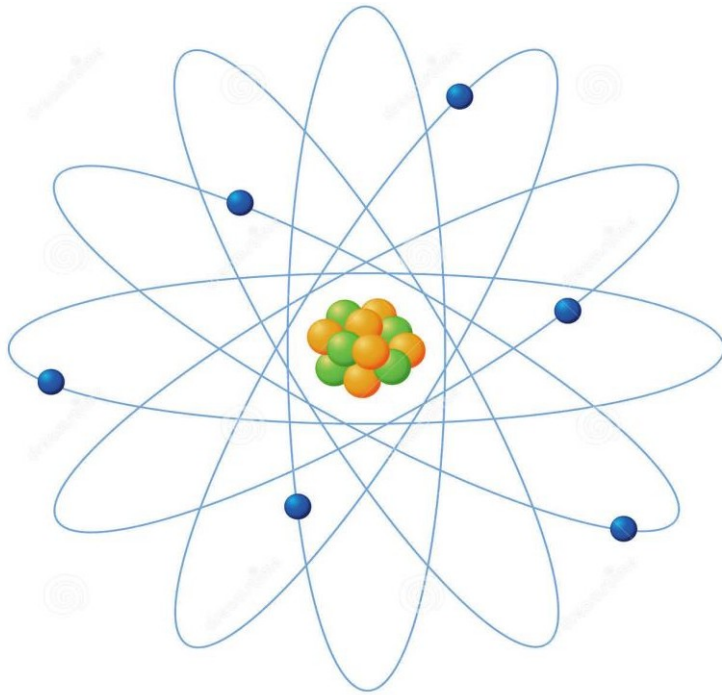
La carica elettrica

- ✓ Alla base di tutti i fenomeni elettromagnetici c'è una proprietà della materia detta **CARICA ELETTRICA**
- ✓ A differenza di altre proprietà della materia (la massa, il volume) **la carica elettrica non è percepita dai nostri sensi**; ne abbiamo evidenza ad esempio sfilandoci un maglione in un ambiente secco, o toccando lo sportello dell'auto; possiamo far scoccare scintille o prendere una scossa: sono cariche elettriche accumulate nei vestiti o nella scocca dell'auto, che si disperdono al contatto col nostro corpo.
- ✓ Qualsiasi sostanza solida, liquida o gassosa (incluso il nostro corpo) è nient'altro che un **aggregato di cariche elettriche; la materia sta insieme grazie alle cariche elettriche !!**
- ✓ **Le forze elettriche sono estremamente intense**; se le particelle non fossero cariche, le stelle, i pianeti, e i corpi di qualsiasi natura non esisterebbero: l'universo sarebbe permeato da un pulviscolo di particelle elementari vaganti nello spazio
- ✓ Ma se tutto è un aggregato di cariche elettriche, **perché non prendiamo una scossa ogni volta che tocchiamo un oggetto?** I corpi contengono un'enorme quantità di cariche elettriche, per cui dovrebbero generare forze elettriche mostruose...

Cariche positive e negative

- ✓ La carica elettrica è una proprietà che presenta due facce, proprio come una moneta; queste due facce vengono convenzionalmente chiamate **CARICA ELETTRICA POSITIVA E NEGATIVA**
- ✓ Normalmente la **materia è NEUTRA**, ovvero contiene uguale **quantità di cariche positive e negative**, che si attraggono reciprocamente; l'effetto combinato delle cariche opposte è nullo, ovvero le **cariche opposte si COMPENSANO** su scala microscopica
- ✓ Un corpo è carico se c'è **prevalenza di cariche di un tipo rispetto all'altro**: in un corpo carico positivamente vi è eccedenza di cariche positive; in un corpo carico negativamente, le cariche negative prevalgono
- ✓ La **tendenza naturale dei corpi è quella di mantenersi elettricamente neutri**, e se elettrizzati, di **scaricarsi e tornare allo stato neutro**: ad esempio, le nuvole quando sono cariche di elettricità la scaricano mediante i fulmini; quando prendiamo la scossa toccando l'auto, scarichiamo elettricità a terra. **La scarica è sempre volta a ripristinare la situazione di elettroneutralità**

L'atomo ('ατομος', indivisibile)



● Neutrone

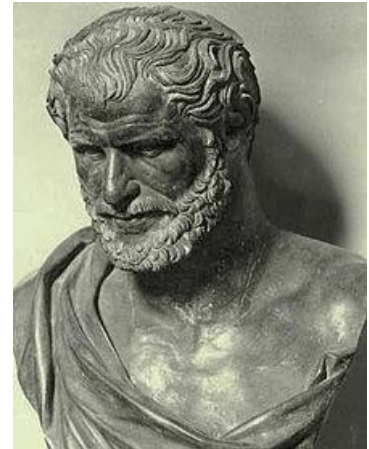
$$M_N = 1.7 \times 10^{-27} \text{ Kg} \quad q_N = 0$$

● Protone

$$M_P = 1.7 \times 10^{-27} \text{ Kg}$$
$$q_P = +e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

● Elettrone

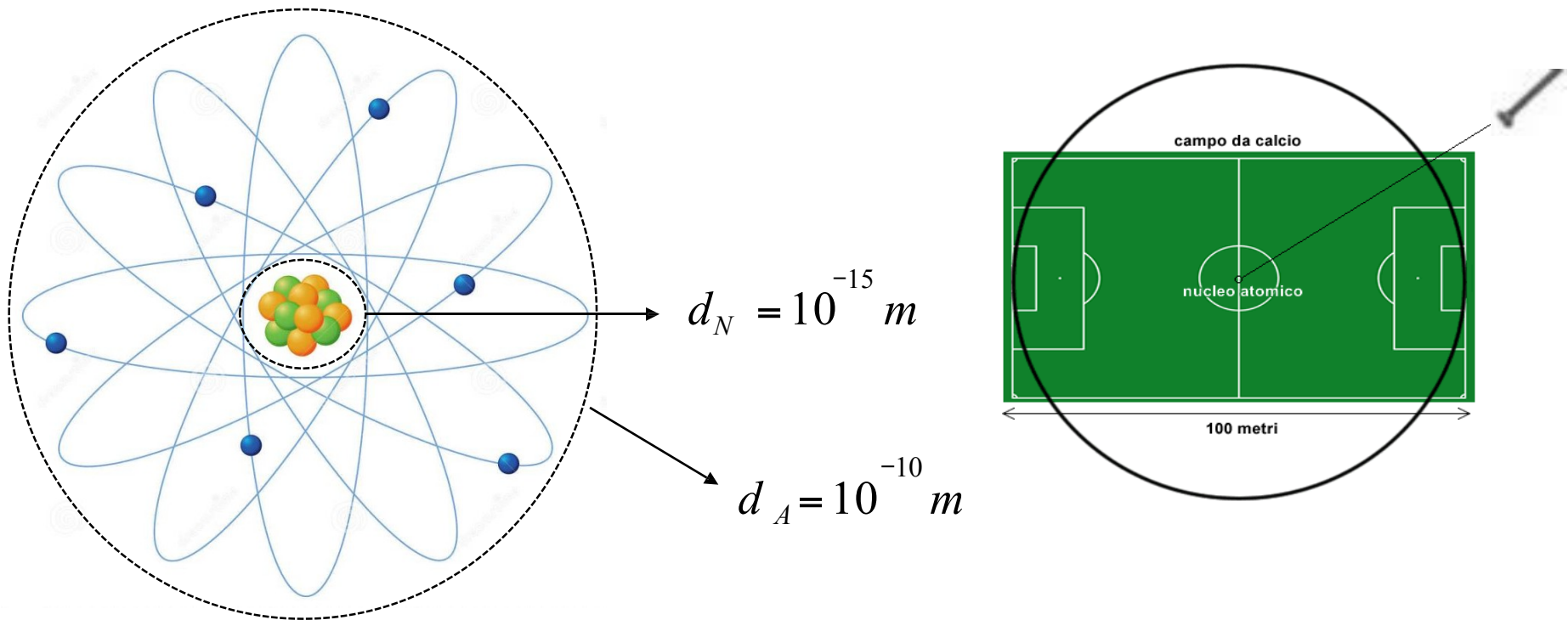
$$M_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$
$$q_e = -e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$



Democrito di
Abdera (460
a.c.)

- ✓ Ogni atomo è composto da un **nucleo** al centro formato da **neutroni** e **protoni**; il neutrone è privo di carica elettrica, il protone ha carica $+e$
- ✓ All'esterno del nucleo vi sono **gli elettroni**, i quali hanno carica $-e$; la massa dell'elettrone **è 1800 volte minore** di quella di protone e neutrone
- ✓ Normalmente **l'atomo è neutro** poiché contiene un uguale numero di elettroni di carica negativa, e protoni di carica uguale ma positiva
- ✓ Delle 3 particelle che compongono l'atomo, soltanto **l'elettrone è una particella elementare**, mentre il **protone ed il neutrone sono composti dall'unione di 3 quarks**

Dimensione dell'atomo



- ✓ La **dimensione del nucleo** è all'incirca **5 ordini di grandezza più piccola di quella dell'intero atomo** !! Se il nucleo fosse grande quanto la testa di uno spillo, circa 1 mm, l'atomo intero avrebbe un diametro di 100 m, ovvero sarebbe grande come un campo da calcio.
- ✓ L'atomo è come un **immenso spazio vuoto, abitato da particelle leggerissime e velocissime (gli elettroni)** che vagano a folle velocità attorno al nucleo, piccolissimo e pesante, posto al centro di questo spazio

Quantizzazione della carica

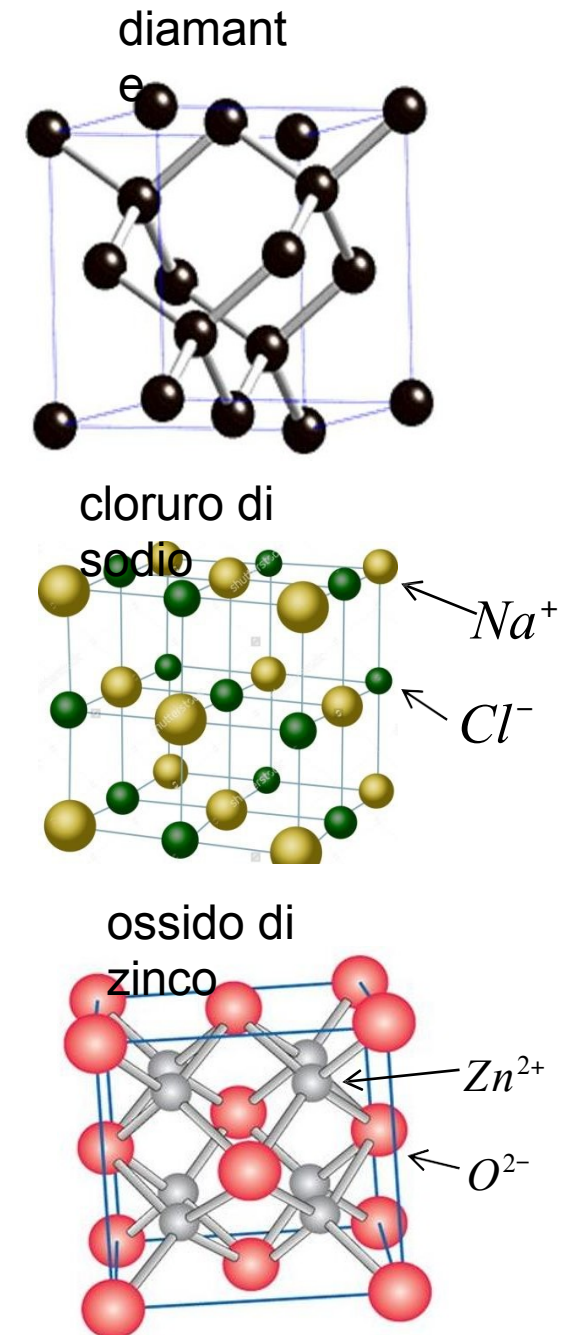
La carica elettrica è quantizzata: la materia è costituita da un numero intero di elettroni e protoni, per cui qualunque carica elettrica è sempre un multiplo intero della carica dell'elettrone o del protone:

$$Q = \pm ne \qquad e = 1.602 \times 10^{-19} C$$

- ✓ **Il quanto elementare (ovvero la carica dell'elettrone o del protone) è molto piccolo:** per esempio la corrente elettrica che fluisce in una lampadina da 100 Watt è di circa un Ampère, ovvero un Coulomb al secondo, ovvero circa 10^{19} elettroni al secondo
- ✓ Per questo **la carica elettrica normalmente appare come un 'fluido continuo'**, così come immergendo una mano in acqua non ci accorgiamo della sua natura molecolare. Soltanto ***esperimenti molto sofisticati a basse temperature riescono ad evidenziare la natura quantistica della corrente elettrica.***

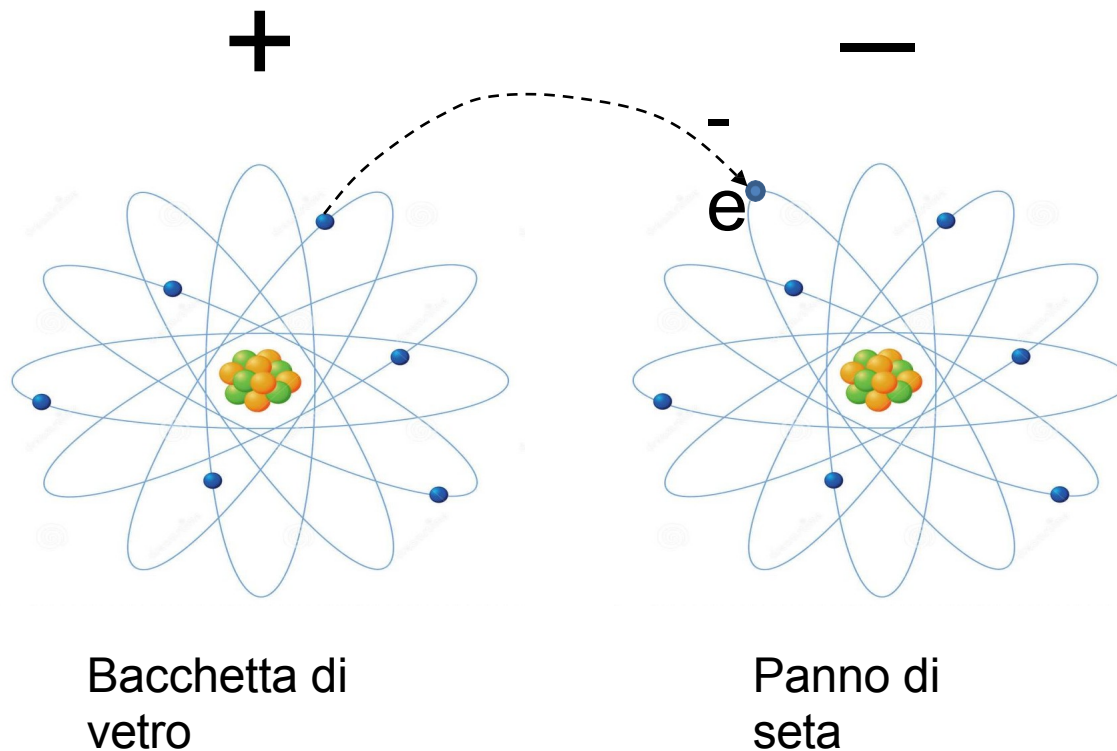
Materiali ionici o polari

- ✓ La maggior parte dei materiali sono costituiti da aggregati di atomi neutri; ad esempio il carbonio cristallino (comunemente conosciuto come DIAMANTE)
- ✓ Vi sono però moltissimi materiali, **detti IONICI o POLARI**, i cui costituenti sono ATOMI CARICHI, anche detti IONI; specificamente, se l'atomo ha elettroni in più rispetto ai protoni si dice **IONE NEGATIVO o ANIONE**; se l'atomo ha elettroni in meno rispetto ai protoni si dice **IONE POSITIVO o CATIONE**.
- ✓ Anche nel caso dei materiali polari la materia è **complessivamente neutra**, poiché contiene un egual numeri di anioni e cationi
- ✓ Esempio: il sale da cucina, ovvero cloruro di sodio (formula: NaCl) è formato da cationi sodio con un elettrone in meno (Na^+) e anioni cloro con un elettrone in più (Cl^-)
- ✓ Esempio: l'ossido di zinco (formula: ZnO) è formato da cationi zinco con 2 elettroni in meno (Zn^{2+}) e anioni ossigeno ciascuno con 2 elettroni in più (O^{2-})



Elettrizzazione per sfregamento

Lo sfregamento provoca il trasferimento di elettroni dagli atomi della **bacchetta di vetro** agli atomi del panno di seta. Gli elettroni appartenenti a orbite più distanti dal nucleo sono **poco legati** e possono essere **estratti** o **aggiunti** all'atomo, in modo da indurre la materia a diventare elettricamente carica. Se la **bacchetta è di plastica** gli elettroni saltano dal panno alla bacchetta che dunque si carica negativamente



Elettrizzazione per sfregamento

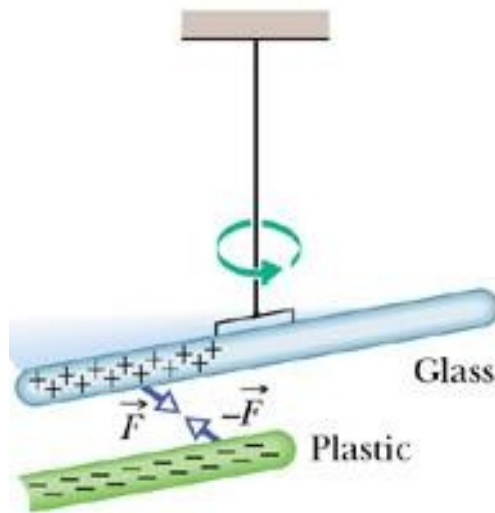
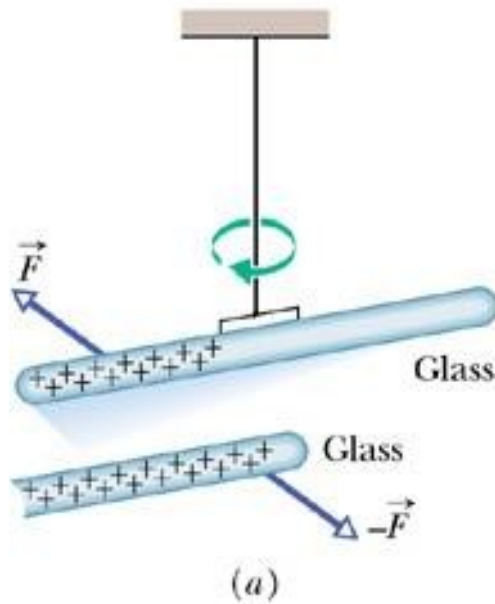
Possiamo dimostrare con un semplice esperimento l'esistenza di due tipi di carica. Strofiniamo con un panno di lana:

- ✓ due bacchette di vetro
- ✓ due bacchette di plastica
- ✓ una bacchetta di vetro e una di plastica

- ❑ Se avviciniamo le due bacchette di vetro appese a un filo esse si respingono
- ❑ Se avviciniamo le due bacchette di plastica appese a un filo esse si respingono
- ❑ Se avviciniamo le due bacchette di materiale differente esse si attraggono

Dunque se i due materiali sono gli stessi, le cariche sviluppate per strofinio sono uguali; ne segue che **cariche uguali si respingono**; al contrario, le cariche elettriche su vetro e plastica si attraggono, dunque si deve concludere che le rispettive cariche abbiano segno opposto:

cariche opposte si attraggono



Conduttori e isolanti elettrici

Abbiamo detto che **possiamo elettrizzare per strofinio plastica e di vetro**. Se strofiniamo una **bacchetta di metallo** (ad esempio rame) tenendola in mano, vediamo che non viene elettrizzata; se però **impugniamo la bacchetta di metallo con un guanto di plastica, allora la bacchetta si elettrizza**; infine **se si tocca la bacchetta con un dito questa perde immediatamente la sua carica elettrica**. Cosa succede?

► Durante lo strofinio, gli elettroni passano dal panno al cucchiaino, poi arrivano a terra attraverso il nostro corpo, che è un conduttore.



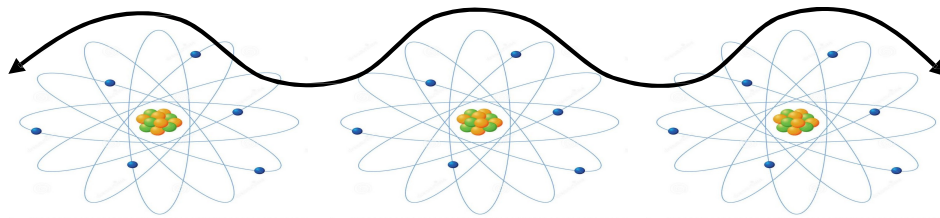
► Usando i guanti di plastica, gli elettroni si fermano nel cucchiaino, perché sono bloccati dalla plastica, che è un materiale isolante.



Connettere un conduttore carico alla terra si dice appunto **'mettere a terra'** o **'scaricare'** l'oggetto

Caratteristica microscopica dei conduttori

Nei materiali conduttori, gli elettroni più lontani dal nucleo (detti **elettroni di conduzione**) sono debolmente legati al nucleo, per cui possono muoversi liberamente all'interno del materiale, saltando da un atomo all'altro. Questi elettroni sono importantissimi poiché danno origine alla **corrente elettrica** nei corpi solidi

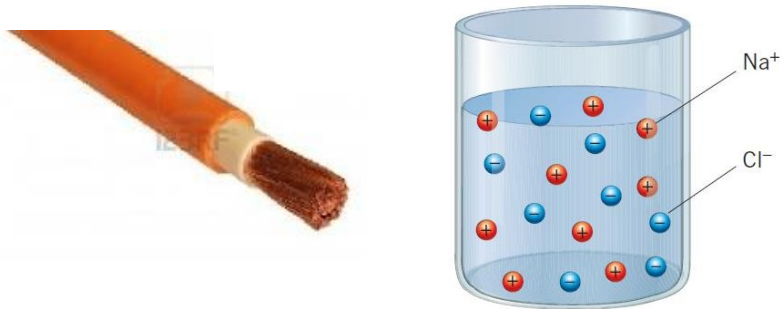


Le cariche in eccesso generate nella bacchetta di rame a causa dello sfregamento possono muoversi liberamente, per cui scappano dalla bacchetta attraverso il nostro corpo (anch'esso conduttore !!) e si disperdono a terra. Il guanto di plastica non conduce, per cui gli elettroni di conduzione restano bloccati nella bacchetta

Conduttori e isolanti elettrici

Esistono due grandi classi di materiali:

- ✓ **ISOLANTI ELETTRICI:** materiali che per strofinio si elettrizzano e mantengono per qualche tempo la carica elettrica
- ✓ **CONDUTTORI ELETTRICI:** materiali che non sono in grado di mantenere la carica se non in condizioni di totale isolamento elettrico



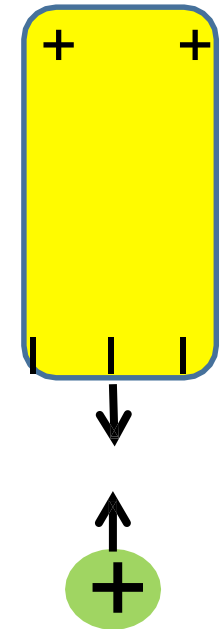
rame e metalli in genere sono buoni conduttori elettrici; così come la maggior parte dei liquidi (ad esempio l'acqua minerale o il sangue umano)



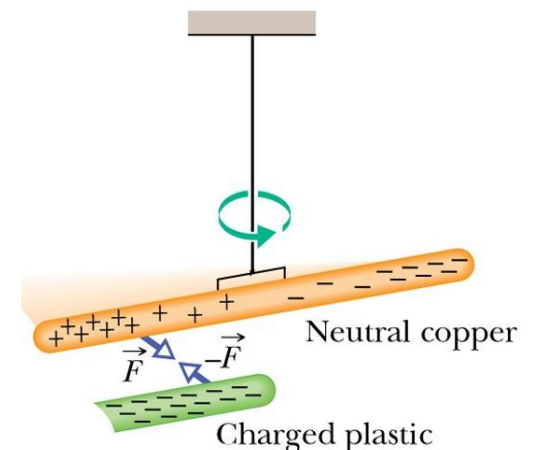
plastica, vetro, ceramica, legno sono isolanti elettrici; anche **l'acqua distillata è un isolante elettrico !**

Induzione di carica nei conduttori

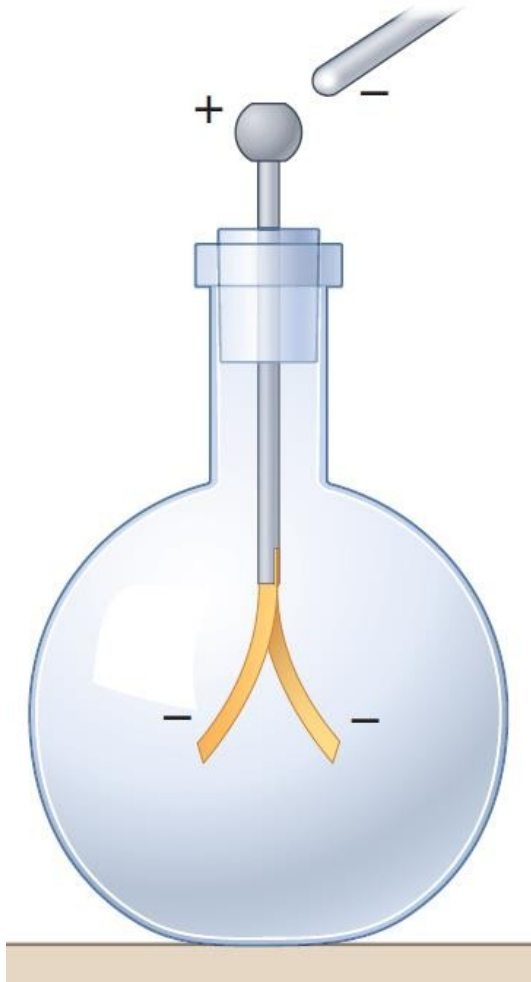
- ✓ poiché gli elettroni di conduzione sono liberi di muoversi, se avviciniamo ad un conduttore neutro (giallo) un corpo carico (sfera verde carica +), gli elettroni reagiscono alla carica esterna muovendosi e accumulandosi verso il bordo del conduttore più vicino al corpo carico
- ✓ essendo il conduttore neutro, un numero equivalente di cariche positive deve venire generato sul lato opposto. In tal caso il **conduttore si dice POLARIZZATO**: la sua carica totale è nulla, ma le cariche positive e negative non sono distribuite omogeneamente nel materiale
- ✓ tra la carica della sfera e quella indotte nel conduttore si **genera una forza elettrica attrattiva**



Esperimento: carichiamo negativamente mediante strofinio una bacchetta di plastica, e avviciniamola ad una bacchetta di rame neutra sospesa ad un filo: la bacchetta di plastica polarizza la bacchetta di rame attraendo cariche positive e respingendo quelle negative. Si genera un momento torcente sulla bacchetta di rame che tende ad avvicinare il lato carico + alla bacchetta di plastica



Induzione: l'elettroscopio a foglie

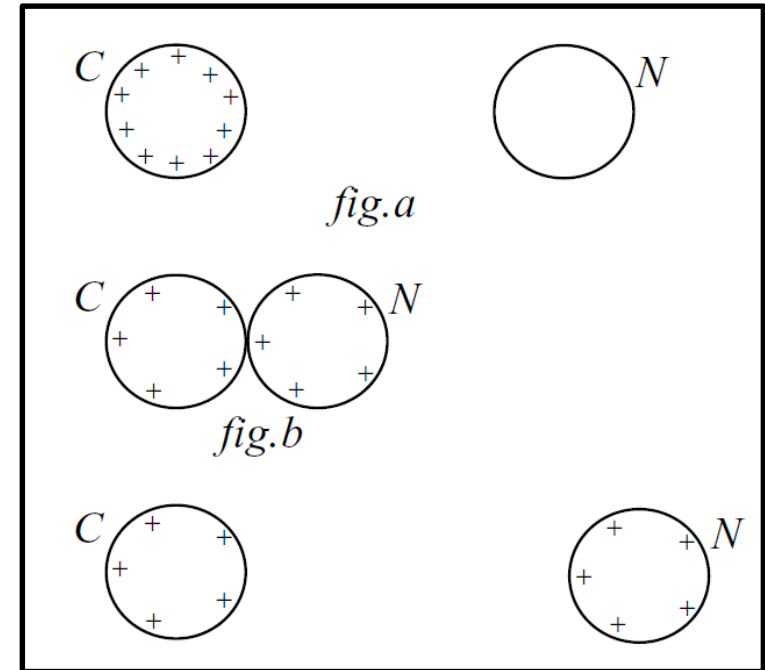


L'elettroscopio è essenzialmente una bottiglia di vetro; nel collo è inserito un supporto metallico che nella parte interna termina con due sottili lamine d'oro. Quando si avvicina al pomello un corpo elettrizzato (per esempio una bacchetta), le lamine si divaricano. Cosa succede?

La bacchetta è elettricamente carica (-) e avvicinandosi al pomello, per induzione elettrostatica induce una forza attrattiva verso le cariche di segno opposto (+), e repulsiva verso le cariche dello stesso segno di quelle della bacchetta (-). Dunque le cariche negative si accumulano sulle foglioline d'oro che, essendo sottili, si divaricano a causa della repulsione tra le cariche (-)

Esercizio concettuale #1: sfere conduttrici

Immaginiamo di aver introdotto delle cariche positive su una sferetta conduttrice C che dunque è carica positivamente; portiamola a contatto con un'altra sferetta neutra N: parte delle cariche positive si muovono da C ad N, ridistribuendosi tra le due sfere. Perché?

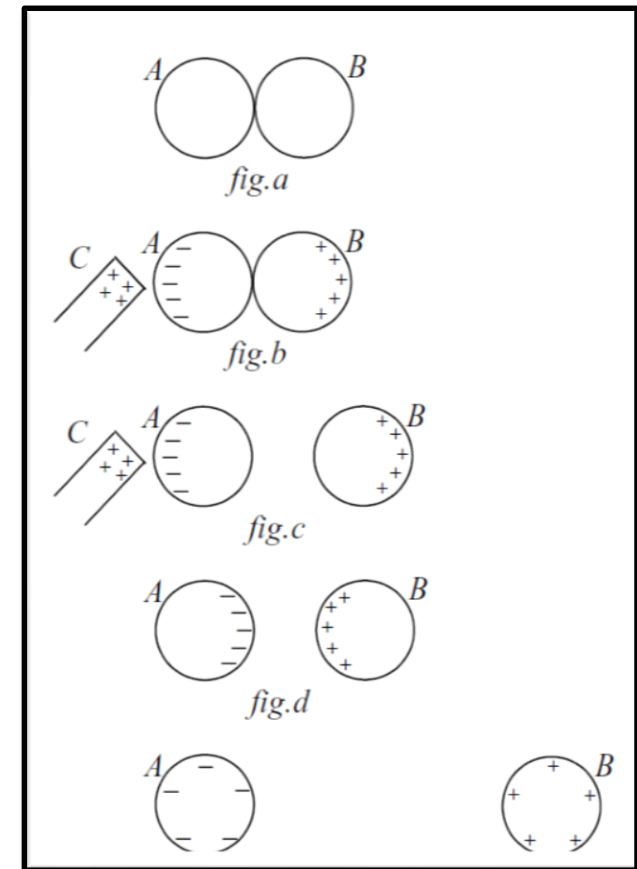


Le cariche positive si respingono e dunque **cercano di distribuirsi più lontano possibile tra loro**. Essendo **conduttori**, **le cariche possono muoversi**, e dunque trasmigrano da una sferetta all'altra. Se infine separiamo le sfere, ognuna conserva la propria carica; se le sfere sono identiche, ciascuna avrà metà della carica iniziale di C

Esercizio concettuale #2: bacchetta e sferette conduttrici

Siano A e B due sferette neutre a contatto, e C una bacchetta carica (+). Se avviciniamo la bacchetta alle sferette, cariche (-) appaiono sul bordo della sferetta A vicino alla bacchetta, e un numero esattamente uguale di cariche (+) sul bordo più lontano della sferetta B. Perché?

Per induzione, le cariche della bacchetta attraggono le cariche opposte, e respingono il più lontano possibile cariche uguali (essendo conduttori le cariche possono muoversi)

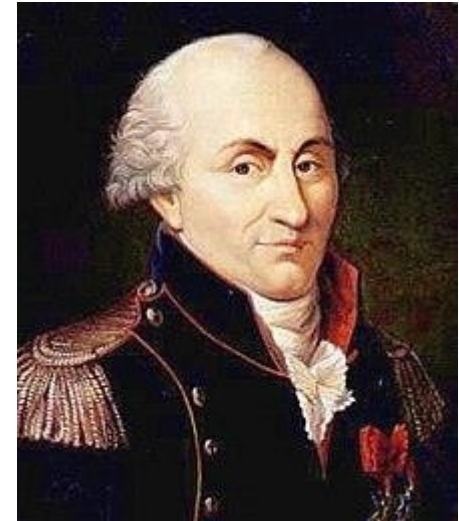
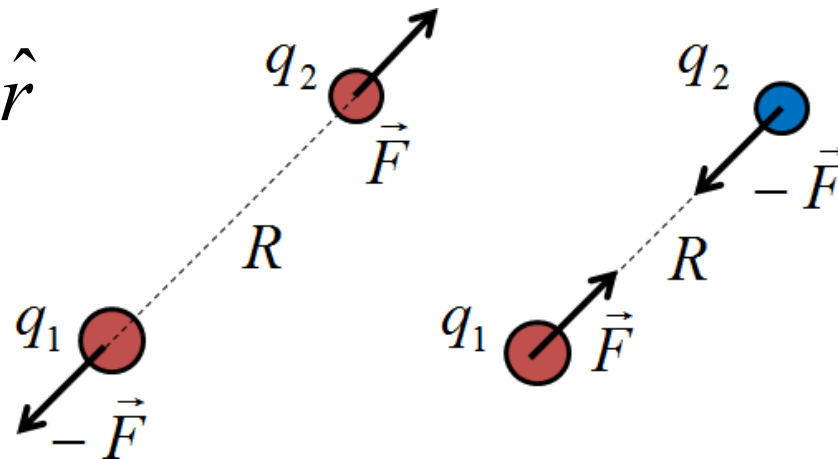


- ✓ Se allontaniamo la bacchetta, le cariche opposte su A e B si attraggono e dunque si spostano per avvicinarsi il più possibile.
- ✓ Se infine allontaniamo le sferette, le cariche su ciascuna di esse si distribuiscono radialmente, in modo da essere più lontane possibile tra loro

Legge di Coulomb

Coulomb, ingegnere e fisico francese, formulò per primo la relazione tra le cariche elettriche e le forze che si manifestano tra di esse. Il risultato fu una tra le più celebri equazioni della storia della Scienza, la **legge di Coulomb**:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{R^2} \hat{r}$$



Charles Augustin
de Coulomb
Angoulême,
Francia,
1736-1806

Due cariche q_1 e q_2 , si **attraggono o si respingono con una forza direttamente proporzionale alle rispettive cariche, ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza**

Nel Sistema Internazionale (SI), la forza si misura in Newton (N), la carica in Coulomb (C), la distanza in metri (m)

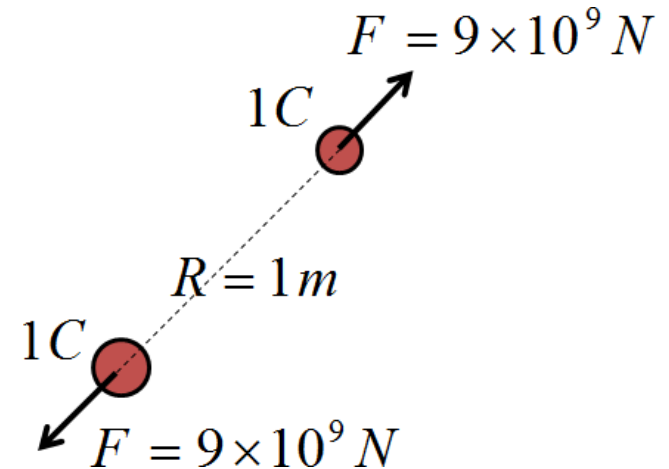
Costante di forza Coulombiana

La costante k è la **forza Coulombiana che si esercita tra due cariche unitarie a distanza unitaria**; nei suoi esperimenti, Coulomb verificò che due cariche, ciascuna di 1 C, collocate nel vuoto alla distanza di 1 m, si attraggono con una forza F di intensità uguale a $9,0 \times 10^9$ N. Per cui:

$$k = 9 \times 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Per ragioni che vedremo più avanti, la costante d'interazione Coulombiana può scriversi anche come:

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



ϵ_0 ("epsilon zero") è una costante universale detta **costante dielettrica nel vuoto**:

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2}$$

Analogie tra legge di Coulomb e gravitazionale

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{R^2} \hat{r} \qquad \vec{F} = G \frac{M_1 M_2}{R^2} \hat{r}$$

- ✓ entrambe **dirette lungo la congiungente tra i due corpi**
- ✓ entrambe **proporzionali alle due cariche / alle due masse**
- ✓ entrambe inversamente proporzionali al **quadrato della distanza**

Ci sono anche differenze importantissime:

- ✓ Le masse sono **sempre positive**, e la forza gravitazionale sempre **attrattiva**; le cariche elettriche sono **positive o negative**, e la forza di Coulomb è **repulsiva** se le cariche hanno stesso segno, **attrattiva** per cariche di segno opposto
- ✓ A parità di quantità di materia, le **forze elettrostatiche sono immensamente più intense di quelle gravitazionali**; ciò si riflette nel differente valore delle rispettive costanti universali:

$$k = 9 \times 10^9 \, N \frac{m^2}{C^2} \qquad G = 6.67 \times 10^{-11} \, N \frac{m^2}{Kg^2}$$

Esercizio: sale da cucina

- ✓ Consideriamo una piccola quantità di sale da cucina (NaCl), più precisamente una **MOLE**; una mole equivale ad un numero di molecole $N_A = 6.022 \times 10^{23}$, detto **numero di Avogadro**
- ✓ Separiamo le molecole NaCl in cationi Na^+ ed anioni Cl^- ; una mole di cationi Na^+ pesa 23 g ed ha una carica $q = e \times N_A = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (6 \times 10^{23}) \sim 10^5 \text{ C}$; una mole di cloro Cl^- pesa 35 g ed ha ovviamente stessa carica ma negativa
- ✓ Calcoliamo la forza di Coulomb e la forza gravitazionale tra le due moli poste a distanza di 10 cm

Forza elettrostatica:

$$F = 9 \times 10^9 \text{ N} \frac{m^2}{C^2} \frac{10^{10} C^2}{10^{-2} m^2} = 9 \times 10^{21} \text{ N}$$

Forza gravitazionale:

$$F = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \frac{m^2}{Kg^2} \frac{23 \times 35 \times 10^{-6} Kg^2}{10^{-2} m^2} = 5.4 \times 10^{-12} \text{ N}$$

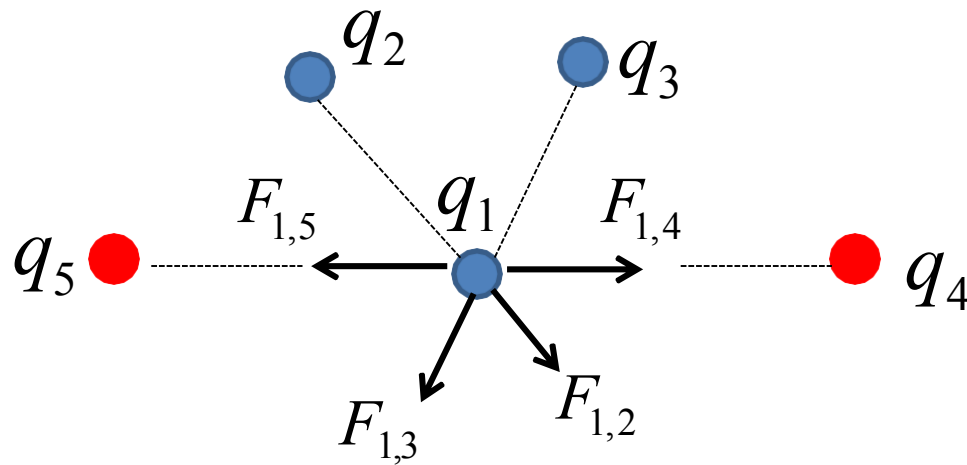


Ci sono ben 33 ordini di grandezza di differenza tra le due forze !!

Principio di sovrapposizione

principio di sovrapposizione: **la forza agente su una particella dovuta ad un insieme di cariche è la risultante delle forze esercitate da ciascuna particella**

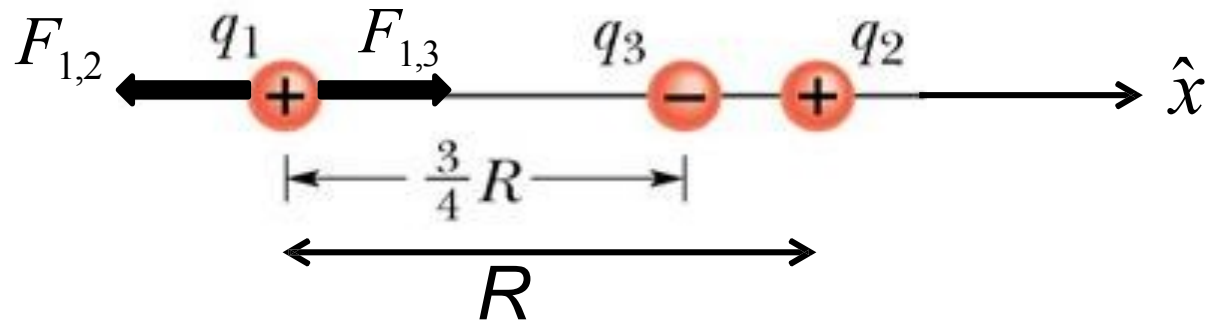
$$F_{1,tot} = F_{1,2} + F_{1,3} + F_{1,4} + F_{1,5} + \dots + F_{1,n}$$



Nell'esempio in figura, siano le cariche blu positive, e quelle rosse negative; dunque q_2, q_3 esercitano su q_1 una forza repulsiva, mentre q_4, q_5 esercitano su q_1 una forza attrattiva; la forza totale su q_1 si ottiene sommando vettorialmente le forze che agiscono tra q_1 e le altre 4 cariche

Problema 21.1

Tre cariche $q_1 = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $q_2 = 3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$, $q_3 = -3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$ sono allineate lungo l'asse x ; le distanze sono indicate in figura; sia $R = 2 \text{ cm}$; calcolare la forza su q_1 esercitata dalle altre due cariche



$$F_{1,2} = 9 \times 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \frac{5.12 \times 10^{-38} \text{ C}^2}{4 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.15 \times 10^{-24} \text{ N}$$

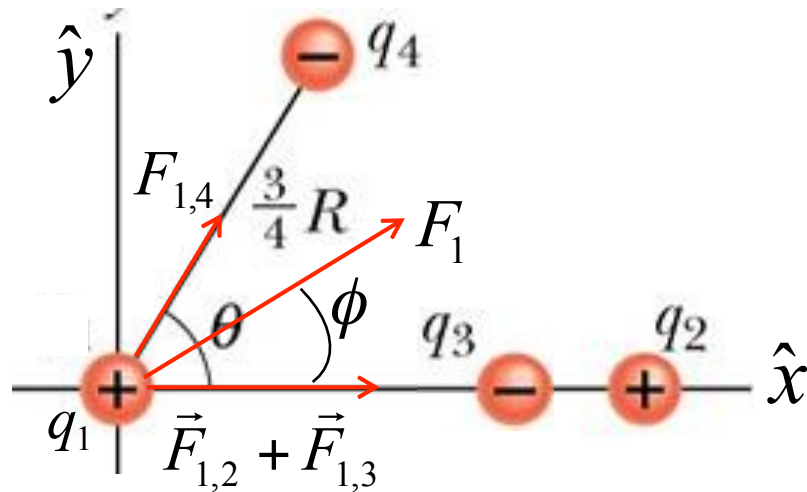
$$F_{1,3} = \frac{F_{1,2}}{(3/4)^2} = 2.04 \times 10^{-24} \text{ N}$$

La forza totale su q_1 in forma vettoriale è quindi:

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{1,2} + \mathbf{F}_{1,3} = (-1.15 + 2.04) \times 10^{-24} \text{ N } \hat{x} = 0.89 \times 10^{-24} \text{ N } \hat{x}$$

Problema 21.1

Inseriamo una quarta carica $q_4 = -3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$ ad una distanza $\frac{3}{4} R$ da q_1 lungo una direzione che forma un angolo $\theta = 60^\circ$ con l'asse x ; calcoliamo la forza totale agente su q_1



$$F_{1,4} = F_{1,3} = 2.04 \times 10^{-24} \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_{1,4} &= F_{1,3} \cos(\theta) \hat{x} + F_{1,3} \sin(\theta) \hat{y} \\ &= F_{1,3} 0.5 \hat{x} + F_{1,3} 0.866 \hat{y} \end{aligned}$$

La forza totale su q_1 è quindi:

$$\begin{aligned} \vec{F}_1 &= (0.89 + 0.5 \times 2.04) 10^{-24} \text{ N } \hat{x} \\ &+ (0.866 \times 2.04) 10^{-24} \text{ N } \hat{y} \\ &= (1.91 \times 10^{-24} \text{ N}) \hat{x} + (1.77 \times 10^{-24} \text{ N}) \hat{y} \end{aligned}$$

In

modulo:

$$F_1 = \sqrt{F_{1,y}^2 + F_{1,x}^2} = 2.6 \times 10^{-24} \text{ N}$$

Sia ϕ l'angolo che \vec{F}_1 forma con l'asse

x :

$$\tan(\phi) = \frac{F_{1,y}}{F_{1,x}} = 0.927$$

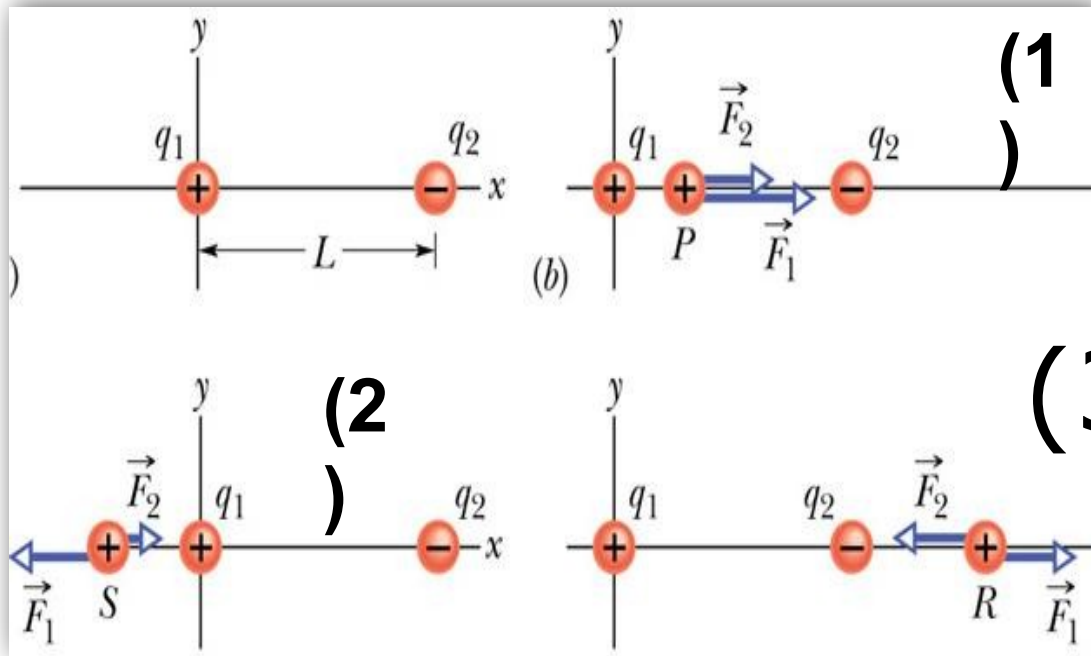
Ricaviamo l'angolo: $\phi = \arctan(F_{1,y} / F_{1,x}) = 42.8^\circ$

Problema 21.2

Date due cariche, una positiva $q_1 = +8q$ e una negativa $q_2 = -2q$ a distanza L , consideriamo un protone P di carica $q_p = e$ lungo l'asse x . Si calcoli la posizione x_p che P deve avere per rimanere fermo in equilibrio tra le due forze $F_{P,1}$ ed $F_{P,2}$ esercitate da q_1 e q_2 .

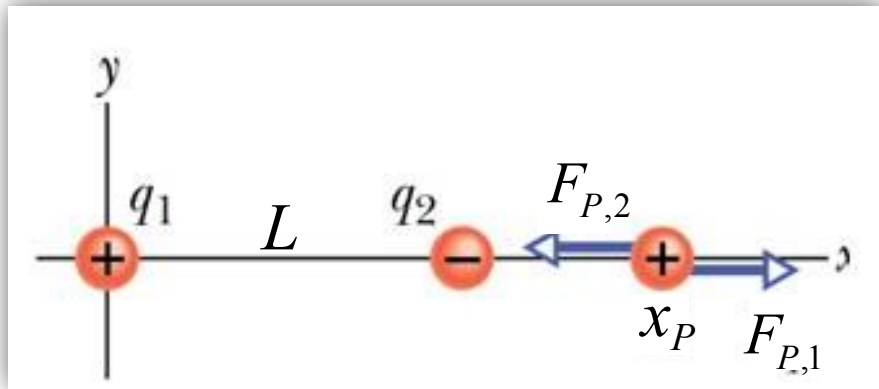
Poniamo q_1 nell'origine dell'asse x , e q_2 in $x=L$

All'equilibrio deve essere: $\vec{F}_{P,1} + \vec{F}_{P,2} = 0$



- ✓ **Caso (1):** se poniamo P in mezzo alle 2 cariche, le forze su P hanno stessa direzione, dunque non esiste punto di equilibrio
- ✓ **Caso (2):** se P è a sinistra di q_1 : la forza repulsiva di q_1 è sempre prevalente su quella attrattiva di q_2 , per cui P è respinto via in direzione delle x negative
- ✓ **Caso (3):** P a destra di q_2 : un punto di equilibrio è possibile

Problema 21.2



All'equilibrio deve essere:

$$\vec{F}_{P,1} + \vec{F}_{P,2} = 0$$

$$F_{P,1} = k \frac{8qe}{x_P^2}$$

$$F_{P,2} = -k \frac{2qe}{(x_P - L)^2}$$

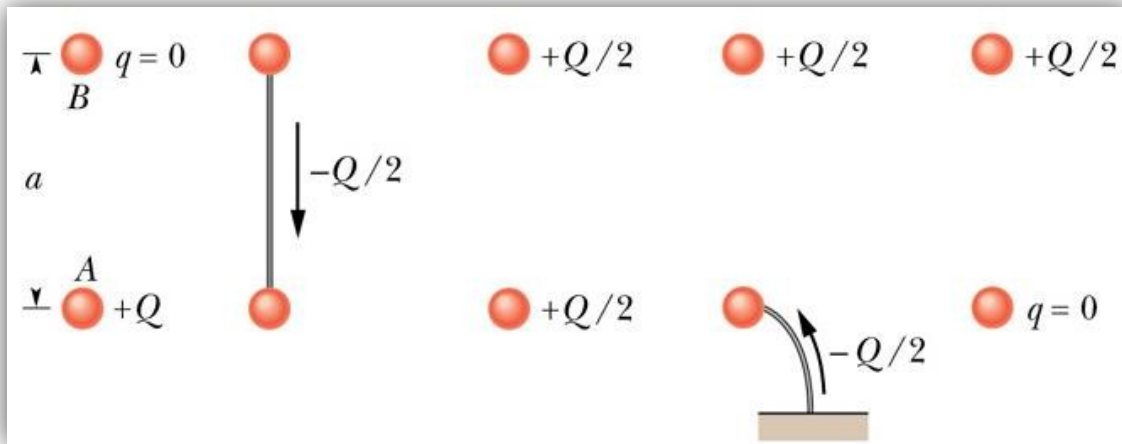
Uguagliando la somma a zero si ricava:

$$\frac{8}{x_P^2} = \frac{2}{(x_P - L)^2} \Rightarrow \frac{x_P^2}{(x_P - L)^2} = 4 \Rightarrow \frac{x_P}{x_P - L} = 2$$

$$\longrightarrow x_P = 2L$$

Problema 21.3

Siano date due sfere conduttrici identiche, una con carica $+Q$ e una neutra, poste a distanza a molto grande rispetto al diametro delle sfere; si supponga che l'induzione sia inizialmente trascurabile a causa della distanza; cosa succede se le cariche vengono connesse da un filo conduttore ?



Per induzione la carica si ridistribuisce in parti uguali tra le due sfere; se si taglia il filo, si genera una forza elettrostatica tra le sfere:

$$F = \frac{k}{4} \left(\frac{Q}{a} \right)^2$$

Se poi si connette la sfera A a terra, la carica in A è persa, e la forza elettrostatica tra le sfere è nuovamente nulla

Problema 21.4

Il nucleo di un atomo di ferro (Fe) ha un raggio di circa $r=4\times 10^{-15}$ m; e contiene 26 protoni. Calcoliamo la forza elettrostatica repulsiva tra i 2 protoni posti a distanza r :

$$F = 9 \times 10^9 \, N \frac{m^2}{C^2} \frac{1.6^2 \times 10^{-38} \, C^2}{16 \times 10^{-30} \, m^2} = 14.4 \, N$$

Ad essa si contrappone la forza attrattiva gravitazionale:

$$F = 6.67 \times 10^{-11} \, N \frac{m^2}{Kg^2} \frac{(1.67 \times 10^{-27} \, Kg)^2}{16 \times 10^{-30} \, m^2} = 1.16 \times 10^{-35} \, N$$

Come ci aspettavamo, la forza elettrostatica repulsiva è infinitamente maggiore di quella attrattiva gravitazionale; ma allora cosa tiene unito il nucleo? Perché i protoni non schizzano via lontano gli uni dagli altri? Per fortuna esistono le **forze nucleari forti**, che contrastano le forze disgregative elettrostatiche e tengono uniti i nucleoni (protoni e neutroni) in un piccolissimo volume (nucleo) al centro dell'atomo.

Legge di Coulomb: Esercizio #2

Una bacchetta di plastica strofinata presenta una carica $q_1 = -5 \times 10^{-6} \text{ C}$.

Una bacchetta di vetro ha invece una carica $q_2 = 2 \times 10^{-7} \text{ C}$. Le due bacchette sono a una distanza di 10 cm. Qual è l'intensità della forza di attrazione tra le due bacchette?

$$F = 9 \times 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \frac{10^{-12} \text{ C}^2}{10^{-2} \text{ m}^2} = 0.9 \text{ N}$$

Se le bacchette pesano 1 Kg ciascuna, qual è la forza gravitazionale?

$$F = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{Kg}^2} \frac{\text{Kg}^2}{10^{-2} \text{ m}^2} = 6.67 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Per cariche e masse unitarie, la forza di Coulomb è incommensurabilmente più grande di quella gravitazionale