

## Elettrostatica

- Legge di Coulomb e campo elettrico
- Legge di Gauss
- Potenziale elettrico
- Conduttori, capacità e dielettrici

## Correnti e Magnetismo

- Corrente e resistenza
- Circuiti in corrente continua
- Il campo magnetico
- Campo magnetico e correnti
- Campi magnetici nella materia

Massimo.Ghidini@unipr.it

## Campi dipendenti dal tempo e Onde

- L'induzione elettromagnetica
- Autoinduzione e mutua induzione
- Circuiti con corrente alternata e transiente
- Le equazioni di Maxwell
- Onde elettromagnetiche

Fisica Generale II  
Anno Accademico 2021/22

**Testo consigliato**

G. Cantatore, L. Vitale, Gettys Fisica 2  
Elettromagnetismo-Onde.  
McGraw-Hill Libri Italia, Milano, 2016.

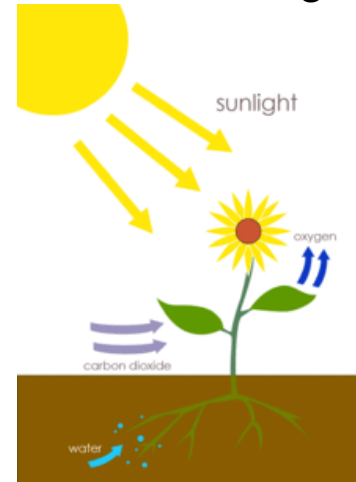
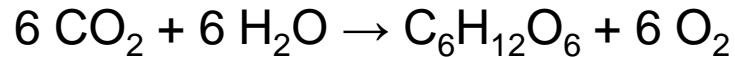
**Ricevimento:**

Lunedì' mattina  
E-mail: [massimo.ghidini@unipr.it](mailto:massimo.ghidini@unipr.it)  
Telefono: 0521 905244

# ELETTROSTATICA: LEGGE DI COULOMB E CAMPO ELETTRICO

# INTERAZIONE ELETTROMAGNETICA

- L'interazione elettromagnetica tiene insieme nuclei ed elettroni per formare gli atomi, tiene insieme gli atomi per formare le molecole e tiene insieme le molecole per formare gli oggetti macroscopici.
- La vita sulla Terra in ultima analisi deriva dall'interazione elettromagnetica tramite il fenomeno della fotosintesi.



richiede assorbimento di luce (onda elettromagnetica) con conversione della sua energia in energia potenziale elettromagnetica (molecole di carboidrati).

L'osservazione di fenomeni di natura elettrica

in particolare che alcuni oggetti strofinati con pellicce animali attraggono a distanza altri oggetti molto più leggeri

era già nota parecchi secoli prima di Cristo in Fenicia, Mesopotamia, Persia e naturalmente in Grecia.

Anche in assenza di fonti affidabili **Talete di Mileto** (n. ~ 624 – m. ~546) viene accreditato spesso con la “scoperta dell'elettricità”, insieme ad altri. In realtà non c'è uno scopritore dell'elettricità  
[https://www.leeds.ac.uk/heritage/Electricity/Tutorial1/Stage1/6\\_Tutorial\\_1/index.html](https://www.leeds.ac.uk/heritage/Electricity/Tutorial1/Stage1/6_Tutorial_1/index.html)

Pare comunque che Talete abbia davvero sperimentato con l'elettricità statica dell'ambra.



Un campione di ambra  
(*elektron* in greco antico)



“Talete (Elettricità)”  
Scultura (1908) davanti alla  
Union Station (Washington D.C.)

W. Gilbert\* chiamò “**elettrizzati**” i materiali che acquistano la proprietà di attirare i corpuscoli leggeri e forza “elettrica” la forza che si manifesta (forza dell'ambra- da *elektron*).



William Gilbert\*  
(1544 - 1603)

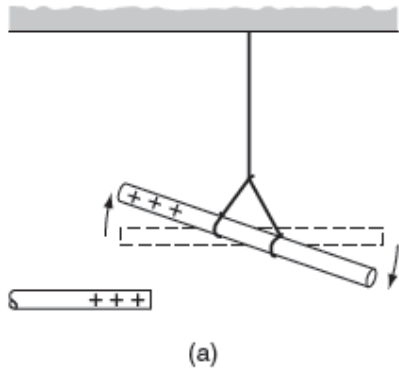
Oggi noi attribuiamo queste forze ad **interazioni tra cariche elettriche** che esistono nei corpi e che passano da un corpo all'altro durante lo strofinio, per cui i **corpi elettrizzati** si chiamano anche **elettricamente carichi**.

Sia i fenomeni **elettrici** che quelli **magnetici** dipendono dalle **cariche elettriche**. Elettricità e magnetismo sono interpendenti, ma se ci si limita a studiare cariche in equilibrio statico si possono analizzare separatamente.

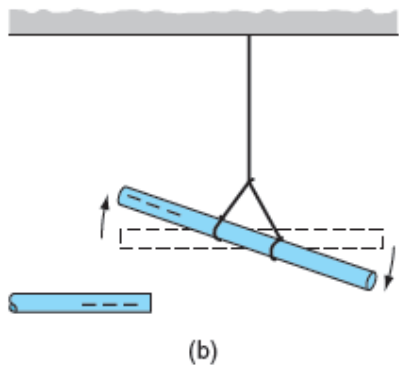
Lo studio delle **cariche in equilibrio statico** e' l'**elettrostatica**.

\* *Medico e scienziato inglese* – oltre ad aver inventato il termine “elettricità” fu il primo a studiare le proprietà magnetiche della magnetite che descrisse nel famoso libro 'De Magnete'.

# VERSO UN MODELLO DI ELETTRICITÀ

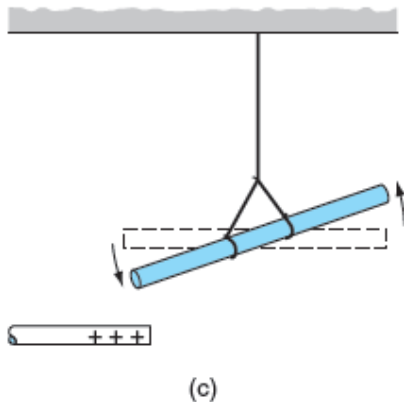


Bacchette di **VETRO** strofinate con seta  
**SI RESPINGONO**



Bacchette di **PLASTICA** strofinate con pelliccia  
**SI RESPINGONO**

Si dice che le bacchette sono diventate “**elettricamente cariche**”, cioè che “**posseggono carica elettrica**”, e la forza che esercitano l'una sull'altra è chiamata “**forza elettrica**”.



Le stesse (pre-strofinare) barrette di vetro  
e plastica invece  
**SI ATTRAGGONO**

Inoltre ciascuna barretta e' attratta dall'oggetto con cui e' stata strofinata.  
**Percio' anche panno di seta e pelliccia sono carichi.**

Esperimenti di questo tipo sono stati compiuti con barrette fatte di molti materiali diversi e strofinate con molti materiali diversi. Si conclude che:

-Se due barrette A e B si attraggono, allora tutte le altre

- **attraggono A e respingono B OPPURE respingono A ed attraggono B**
- tutte le barrette della prima categoria respingono barrette della stessa categoria ed attraggono quelle della seconda
- analogamente per le barrette della seconda categoria



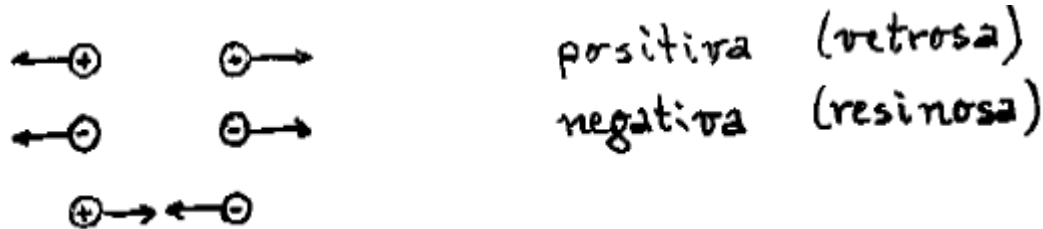
Si conclude che :

- **Ci sono due tipi di carica elettrica** (quello della prima categoria e quello della seconda)
- la carica dell'**oggetto usato per strofinare** e dell'**oggetto strofinato** sono **OPPOSTE** ma di uguale grandezza (questo passaggio ulteriore ha richiesto misure di tipo quantitativo, qui non descritte)

# Modello Eletticità'

(spesso associato al nome dell'eclettico B. Franklin)

La materia contiene **due tipi di carica elettrica**, la carica detta **positiva** e quella **negativa**.



Nei corpi *eletticamente neutri* ci sono quantità uguali dei due tipi di carica. Quando i corpi vengono caricati per strofinio, la carica elettrica si trasferisce dall'uno all'altro. Uno dei corpi mostra un eccesso di carica positiva e l'altro un eccesso di carica negativa.

Corpi che hanno **cariche in eccesso dello stesso segno** si **respingono**.

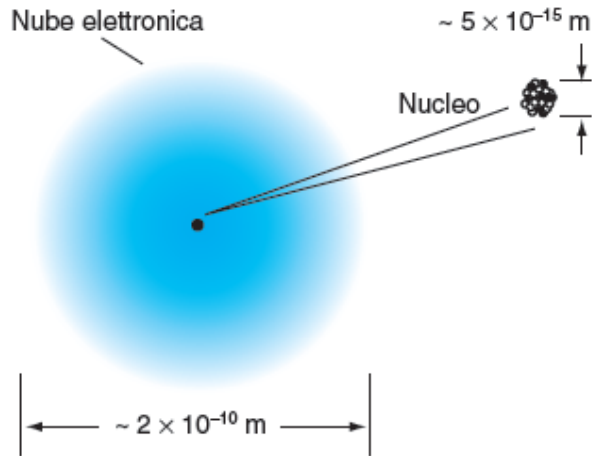
Corpi che hanno **cariche in eccesso di segno opposto** si **attraggono**.



Benjamin Franklin  
(1706- 1790)

Uno dei Padri Fondatori degli USA  
6° Presidente della Pennsylvania

# STRUTTURA ATOMICA



$$\begin{aligned} m_p &= 1.6725 \times 10^{-27} \text{ Kg} \\ m_n &= 1.6748 \times 10^{-27} \text{ Kg} \\ m_e &= 9.1091 \times 10^{-31} \text{ Kg} \end{aligned}$$

Le **particelle elementari** di cui è costituita la materia sono elettricamente neutre o hanno una carica che in modulo ha valore

$$e = 1.60207 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

dove C è il simbolo dell'unità di misura nel SI, il *Coulomb*.  
(ad es.  $-e$  è la carica dell'elettrone,  $e$  quella del protone)

Si può quindi assumere che la carica elettrica di un qualunque oggetto sia un **multiplo intero, positivo o negativo di  $e$** .

Il valore della carica elementare è molto piccolo e il numero di cariche coinvolte è di solito molto grande, per cui spesso si tratta la carica elettrica come una grandezza continua e non discreta.

### **Conservazione della carica elettrica**

**La somma algebrica delle cariche elettriche si mantiene costante nel tempo.**

Nei vari processi fisici (ad es. strofinio) si producono spostamenti di cariche da un corpo ad un altro, ma non si realizza mai la creazione di cariche la cui somma algebrica sia diversa da zero. Ad es. nello strofinio si genera una carica  **$q$**  su un corpo e  **$-q$**  sull'altro.

# ISOLANTI E CONDUTTORI

Generalmente quando la carica si muove attraverso un materiale sono gli elettroni che si spostano. Si dice che **gli elettroni sono i portatori di carica**.

**Conduttore** : materiale in cui le cariche elettriche **POSSONO** fluire facilmente (ad es. metalli)

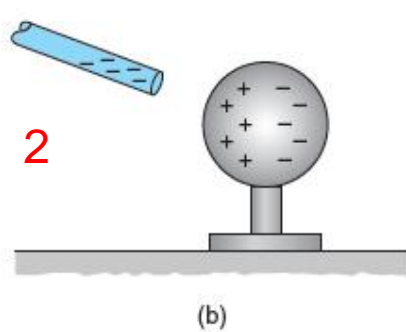
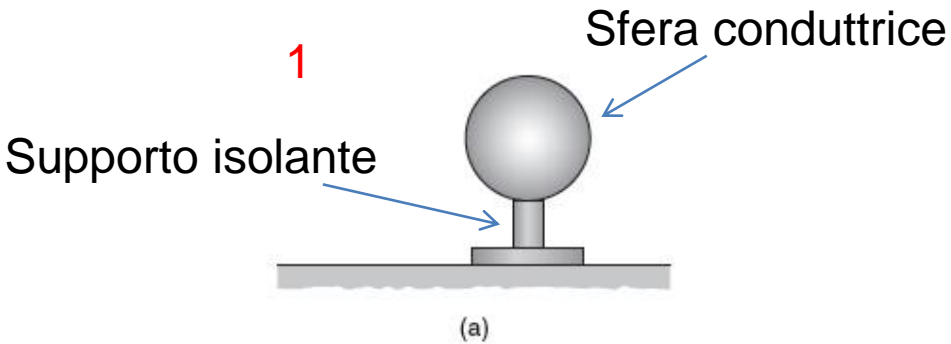
Modello: reticolo di ioni positivi fissi + elettroni "liberi" (il cui numero dipende dal materiale ma e' dell' ordine di 1 per atomo).

**Isolante** : materiale in cui le cariche elettriche **NON POSSONO** fluire facilmente (ad es. non metalli).

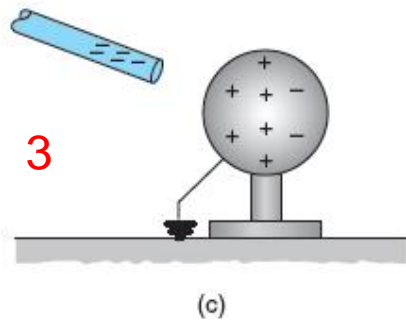
In un isolante gli elettroni sono trattenuti dai propri atomi e non possono passare da un sito a quello contiguo.

Gli isolanti si caricano per strofinio, i metalli no.

# INDUZIONE ELETTROSTATICA

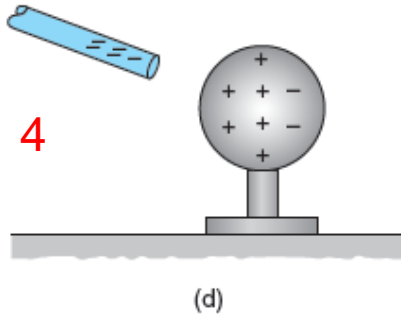


la parte della sfera più vicina alla bacchetta ha un eccesso di carica negativa e la parte più lontana ha un eccesso di carica positiva perché **cariche dello stesso segno si respingono** e sono **libere di muoversi in un conduttore** (e rimangono confinate sulla sfera perché **non possono passare attraverso il supporto isolante**).

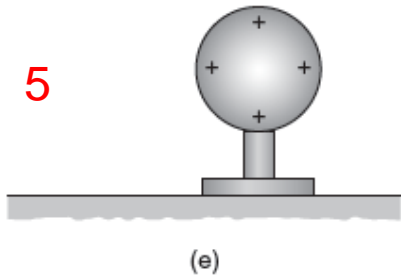


Sfera “messa a terra” con filo conduttore: le cariche negative possono allontanarsi ulteriormente dalla bacchetta.

# INDUZIONE ELETTROSTATICA



Filo rimosso: eccesso di carica positiva sulla sfera

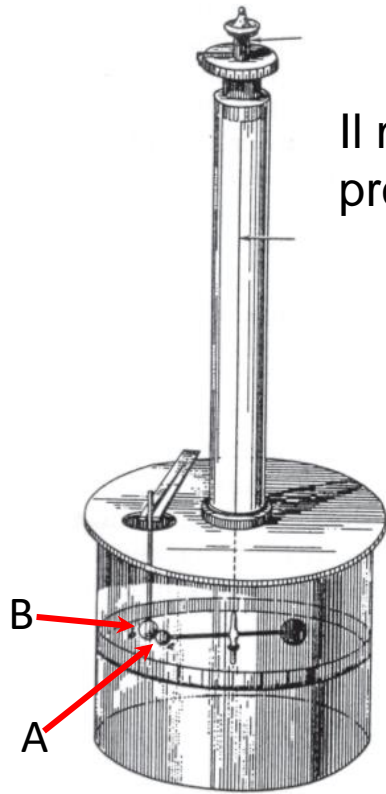


Bacchetta allontanata: l'eccesso di carica rimane (l'aria secca e' un buon isolante ).

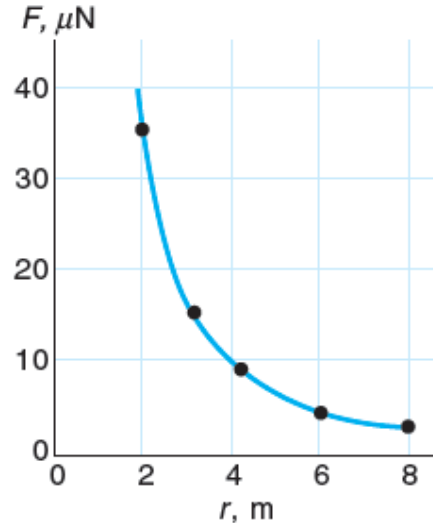
Abbiamo effettuato un **processo di carica per induzione**, perche' il processo e' avvenuto **SENZA CONTATTO** tra bacchetta e sfera.

# LA LEGGE DI COULOMB

Bilancia di torsione per misurare la forza tra due cariche poste in A e B



Il modulo della forza e' inversamente proporzionale alla distanza fra le cariche



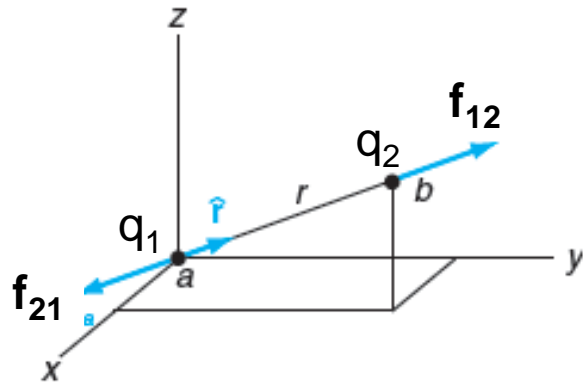
Charles Augustin Coulomb  
(1736-1806)  
Ingegnere Militare Francese

*Premier Mémoire sur l'Électricité et le Magnétisme*, 1785

Descrive come costruire una bilancia di torsione elettrica. Con questa determina la legge che descrive la forza che «due corpi elettrificati con lo stesso tipo di elettricità esercitano uno sull'altro»



# LA LEGGE DI COULOMB



Direzione e verso della forza di Coulomb tra cariche  $q_1$  e  $q_2$  con segno uguale

$$\vec{f}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{21}$$

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$  Costante dielettrica del vuoto

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.987 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2 \cong 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$$

- la forza di Coulomb è inversamente proporzionale al quadrato della distanza (come la forza gravitazionale).
- la formula esprime il dato che cariche dello stesso segno si respingono e cariche di segno opposto si attraggono.
- la forza di Coulomb obbedisce alla terza legge di Newton:  
 $\vec{f}_{21} = -\vec{f}_{12}$   
e le due forze hanno la stessa retta d'azione.

# PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

La forza agente su una carica  $q$  in presenza di due o più cariche elettriche ( $q_1, q_2, \dots, q_n$ ) è la somma vettoriale delle forze elettriche ( $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_n$ ) *esercitate su  $q$  da ciascuna delle  $n$  cariche* elettriche considerate singolarmente. Cioè:

$$\mathbf{f}_{\text{tot}} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \dots + \mathbf{f}_n$$

equivale ad affermare che l'interazione tra due cariche elettriche è indipendente dalla presenza di altre cariche

# CONFRONTO TRA FORZA GRAVITAZIONALE ED ELETTROSTATICA

Dati un protone ed un elettrone, si calcoli il rapporto tra le intensita' delle loro forze gravitazionali ed elettriche

$$m_e = 9.1091 \times 10^{-31} \text{ Kg} \quad m_p = 1.6725 \times 10^{-27} \text{ Kg} \quad m_p = 1840 m_e$$



$$r_0 \approx 0.5 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Forza elettrica:  $|q_1| = |q_2| = e$

$$F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e \cdot e}{r_0^2}$$

Forza gravitazionale:

$$F_G = G \frac{m_p m_e}{r_0^2}$$

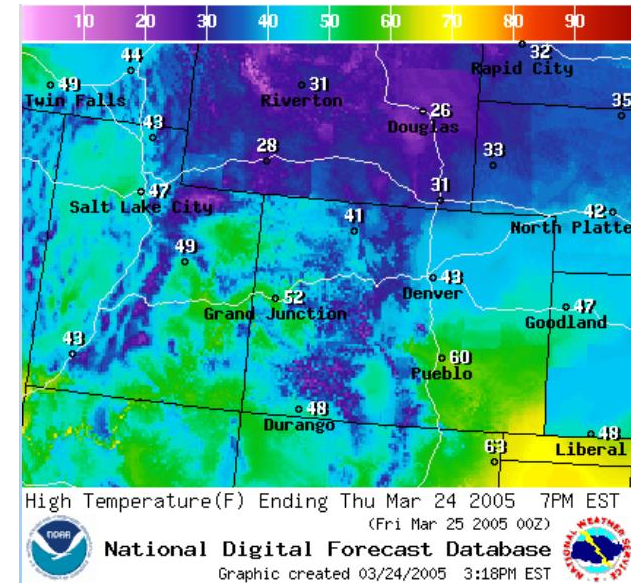
$$\frac{F_E}{F_G} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e \cdot e}{r_0^2}}{G \frac{m_p m_e}{r_0^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 G} \frac{e^2}{1840 m_e^2} = \frac{9 \times 10^9}{6.7 \times 10^{-11}} \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{1.84 \times 10^3 \times (0.91 \times 10^{-30})^2}$$

$\uparrow$   
 $6.7 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Kg}^2}$

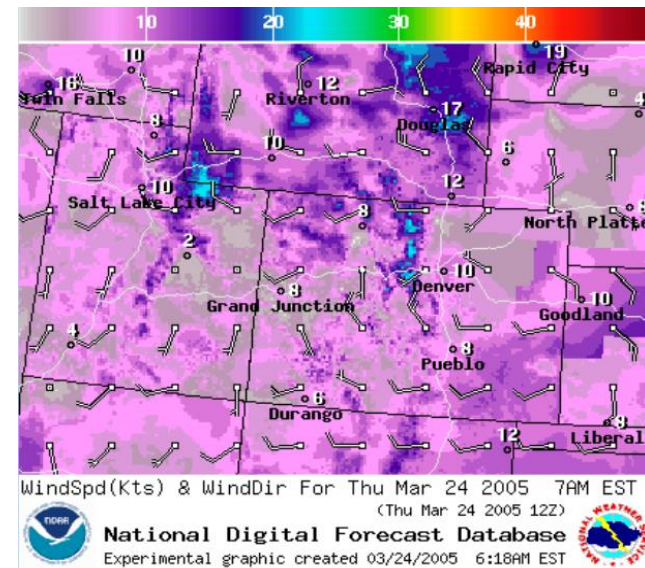
$$= 2.25 \times 10^{39}$$

# CAMPO ELETTRICO

**Campo scalare**: ad ogni punto dello spazio e' associato un numero con unita' di misura (es: previsioni temperatura)



**Campo vettoriale**: ad ogni punto dello spazio e' associato un vettore (modulo, direzione e verso) (es: previsioni della velocita' del vento).



# CAMPO ELETTRICO DI UNA CARICA PUNTIFORME

E' un campo vettoriale che descrive come la presenza di una carica  $Q$  modifica le proprieta' dello spazio circostante

Se  $Q$  e' concentrata in un punto



allora una carica  $q$  (detta *di prova*) situata in un punto a distanza  $r$  da  $Q$ , sente una forza:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \vec{r}$$

In analogia con quanto fatto per il campo gravitazionale, definiamo il campo elettrico  $\vec{E}$  come:

$$\vec{E}(\vec{r}) \equiv \vec{E}(x, y, z) = \frac{\vec{F}}{q}$$

In realta'  $q$  puo' perturbare la distribuzione di carica originale, perche' il concetto di carica puntiforme e' solo un' approssimazione dei casi pratici. Se ad esempio le altre cariche sono su sferette conduttrici la carica di prova puo' alterare la distribuzione di carica tramite il fenomeno dell'induzione elettrostatica. Quindi la definizione e' precisa se  $q \ll Q$  e  $q \ll$  di tutte le altre cariche presenti.

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^3} \vec{r}$$

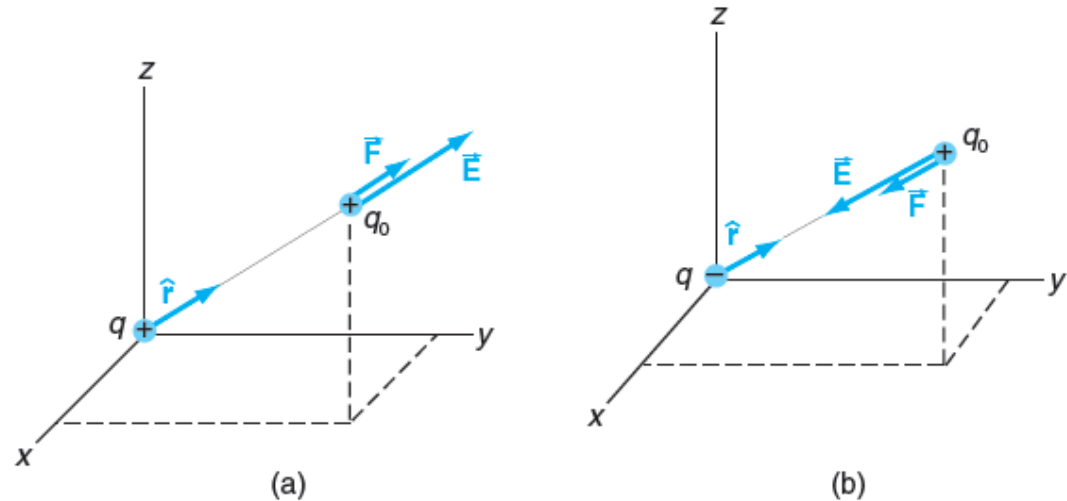
nel vuoto

sorgente

$\vec{E}$  non dipende da  $q$  ed ha le dimensioni di una forza diviso una carica e si misura in Newton/Coulomb o in Volt/Metro.

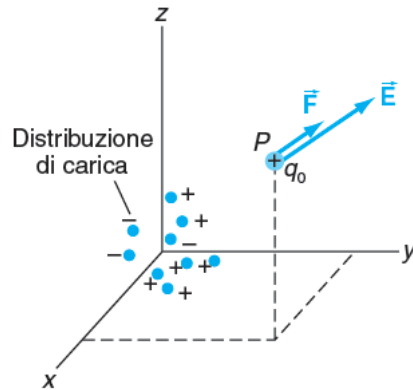
**Figura 1.11**

Campo elettrico generato da una carica puntiforme posta nell'origine. (a)  $q$  positiva. (b)  $q$  negativa.



# CAMPO ELETTRICO DI UN GRUPPO DI CARICHE PUNTIFORMI

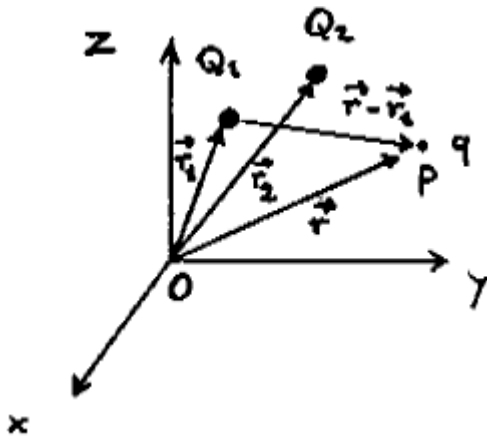
In un punto generico P il campo elettrico  $\vec{E}$ , il campo è sempre definito come rapporto tra la forza elettrica  $\vec{F}$  esercitata dal gruppo sulla carica di prova  $q$  e la carica  $q$  stessa:



$$\vec{E}(\vec{r}) \equiv \vec{E}(x, y, z) = \frac{\vec{F}}{q}$$

Siccome il principio di sovrapposizione vale per la forza di Coulomb, si avrà un principio di sovrapposizione per il campo elettrico.

**ESEMPIO: campo generato da 2 cariche**



$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|^3} (\vec{r} - \vec{r}_1) + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{|\vec{r} - \vec{r}_2|^3} (\vec{r} - \vec{r}_2)$$

# CAMPO ELETTRICO DI UN GRUPPO DI CARICHE PUNTIFORMI

Campo generato da n cariche

$$\vec{E}_o(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} (\vec{r} - \vec{r}_i)$$

Ad es.:

$$E_{ox}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i (x - x_i)}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{3/2}}$$



# VISUALIZZAZIONE CAMPI VETTORIALI: LINEE DI FORZA

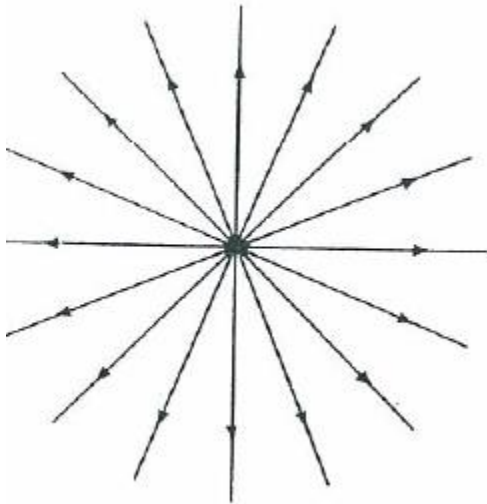
Le linee di forza del campo elettrico sono quelle linee orientate la cui tangente in ogni punto ha la stessa direzione e verso del campo  $\mathbf{E}$  in quel punto.

La densità di linee di forza dipende dal modulo del campo. Nelle regioni in cui le linee sono fitte  $E$  è *grande*, mentre dove sono rade  $E$  è *piccolo*.

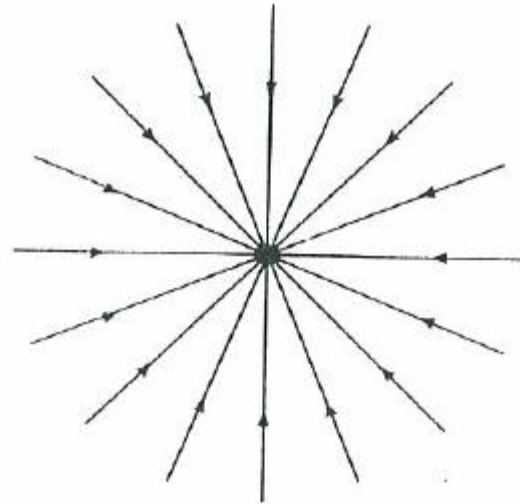
Un campo uniforme è rappresentato da linee di forza equidistanti, rettilinee e parallele.

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^3} \vec{r}$$

$Q > 0$

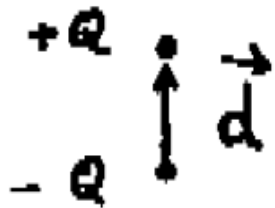


$Q < 0$



# CAMPO ELETTRICO GENERATO DA UN DIPOLO ELETTRICO

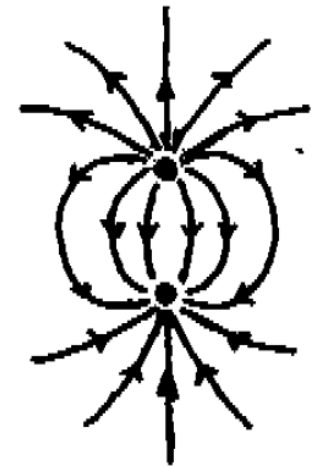
Il dipolo elettrico e' un'importante esempio di distribuzione di carica  
due cariche separate da una distanza costante  $d$  (piccola rispetto alle altre distanze)  
Con segno opposto ma uguali in modulo.



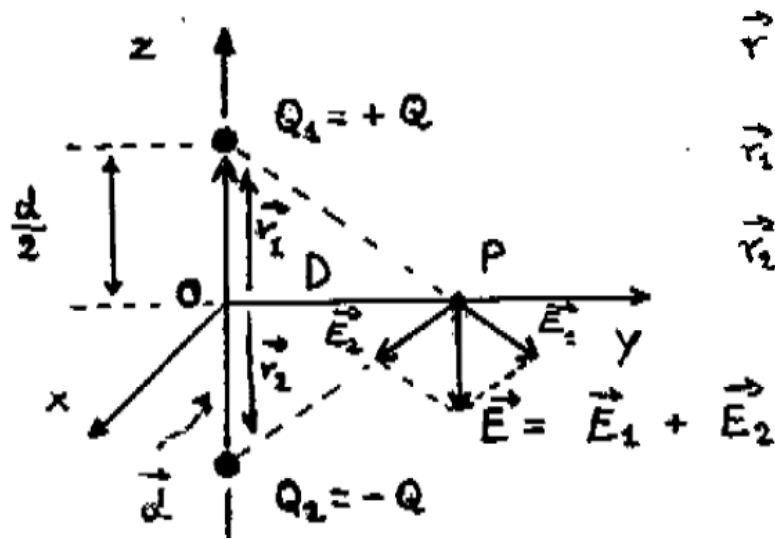
$$\vec{p} = Q \vec{d} \quad \text{momento elettrico di dipolo}$$

Il campo  $E$  si calcola sfruttando il **principio di sovrapposizione**. Si trova che il campo elettrico prodotto da un dipolo elettrico in un punto a distanza grande rispetto alle dimensioni del dipolo stesso ( $r \gg d$ ) è

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} [3(\hat{r} \cdot \hat{p}) \hat{r} - \hat{p}]$$



# CALCOLO CAMPO ELETTRICO NEL PIANO EQUATORIALE DEL DIPOLO



$$\vec{r} \equiv (x, y, z) = (0, D, 0)$$

$$\vec{r}_1 \equiv (x_1, y_1, z_1) = (0, 0, \frac{d}{2})$$

$$\vec{r}_2 \equiv (x_2, y_2, z_2) = (0, 0, -\frac{d}{2})$$

$$|\vec{r} - \vec{r}_1| = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} = \sqrt{D^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \equiv \Delta$$

$$E_{\bullet x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\Delta^3} [Q(x - x_1) - Q(x - x_2)] = 0$$

$$E_{\bullet y} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\Delta^3} [Q(y - y_1) - Q(y - y_2)] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\Delta^3} [QD - QD] = 0$$

## CALCOLO CAMPO ELETTRICO NEL PIANO EQUATORIALE DEL DIPOLO

$$\vec{E}_{02} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\Delta^3} [Q(z-z_1) - Q(z-z_2)] =$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\Delta^3} \left[ Q\left(-\frac{d}{2}\right) - Q\left(\frac{d}{2}\right) \right] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-Qd}{\Delta^3}$$

$$\vec{E}_0(\theta, D, \phi) = \frac{-\vec{p}}{4\pi\epsilon_0 \left[ D^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 \right]^{3/2}}$$

# CAMPO ELETTRICO GENERATO DA DISTRIBUZIONI CONTINUE DI CARICA

La carica che si manifesta nei corpi macroscopici, (bacchette, sfere conduttrici) è dovuta a uno squilibrio tra il numero di elettroni e di protoni.

Le cariche presenti su corpi macroscopici sono dovute a grandi numeri di elettroni in eccesso o in difetto. Quindi è possibile trattare la carica come una distribuzione continua di elementi infinitesimi di carica  $dq$ .

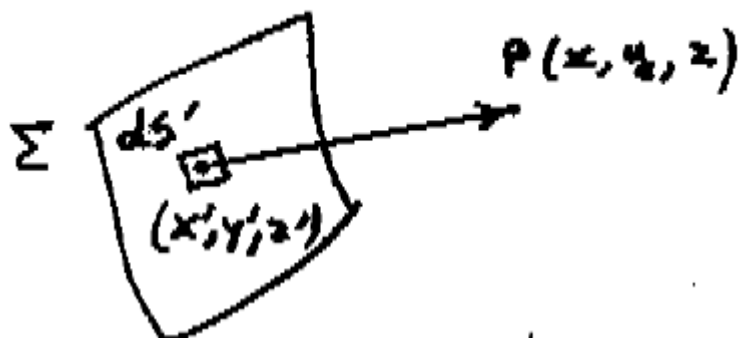
## DISTRIBUZIONE DI CARICA 3D

Densità spaziale di carica  $\rho(x,y,z)$   $dq = \rho(x,y,z) d\tau$   $\leftarrow dx dy dz$

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\tau} \frac{dq(\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3} (\vec{r}-\vec{r}')$$

# CAMPO ELETTRICO GENERATO DA DISTRIBUZIONI CONTINUE DI CARICA

## DISTRIBUZIONE DI CARICA 2D



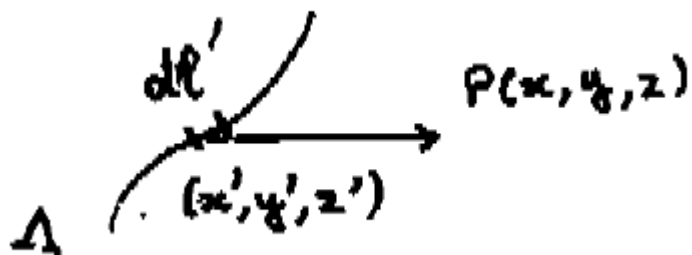
Densità superficiale di carica  $\sigma(x, y, z)$

$$dq = \sigma(x, y, z) ds$$

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Sigma} \frac{\sigma(x', y', z') (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} ds'$$

# CAMPO ELETTRICO GENERATO DA DISTRIBUZIONI CONTINUE DI CARICA

## DISTRIBUZIONE DI CARICA 1D

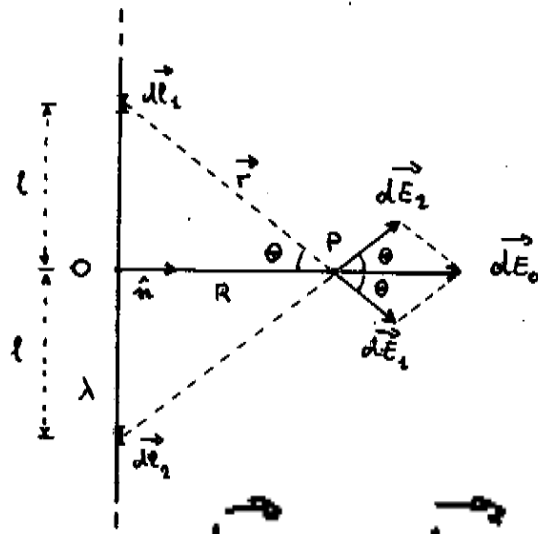


Densità lineare di carica  $\lambda(x, y, z)$

$$dq = \lambda(x, y, z) dl$$

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{\lambda(x', y', z') (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dl'$$

# ESEMPIO 1: CAMPO ELETTRICO DI UNA DISTRIBUZIONE LINEARE DI CARICA



Assumiamo distribuzione di carica uniforme perciò  
la densità lineare di carica vale:  $\lambda = Q/2l$

$$r = \frac{R}{\cos \theta} \quad l = R \tan \theta \quad dl = R \frac{d\theta}{\cos^2 \theta}$$

$$\begin{aligned} d\vec{E}_0 &= d\vec{E}_1 + d\vec{E}_2 = (dE_1 + dE_2) \cos \theta \hat{n} \\ &= \frac{2 \cos \theta}{4 \pi \epsilon_0} \frac{\lambda dl}{r^2} \hat{n} \end{aligned}$$

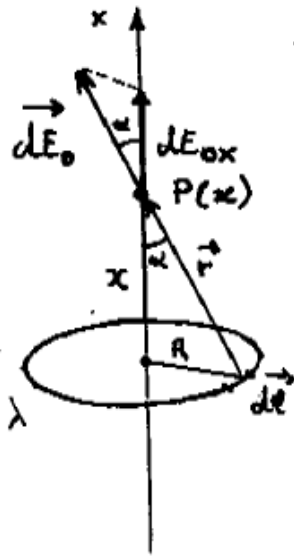
$$\vec{E}_0 = \int d\vec{E}_0 = \frac{\lambda \hat{n}}{2 \pi \epsilon_0} \int_0^\infty \frac{\cos \theta}{r^2} dl$$



$$= \frac{\lambda \hat{n}}{2\pi \epsilon_0} \int_0^{\pi/2} \frac{\cos^3 \theta}{R^2} \times R \frac{d\theta}{\cos^2 \theta} = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0 R} \hat{n} \int_0^{\pi/2} \cos \theta d\theta$$

$$\vec{E}_0 = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \frac{\lambda}{R} \hat{n}$$

## ESEMPIO 2 : SPIRA CIRCOLARE UNIFORMEMENTE CARICA (CAMPO LUNGO L' ASSE)



$$\lambda = \frac{Q}{2\pi R}$$

$$\vec{dE}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dl}{r^2} \vec{r}$$

$$dE_{0x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dl}{r^2} \cos\alpha$$

$$E_{0x} = \int dE_{0x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{Spira}} \frac{\lambda \cos\alpha}{r^2} dl = \frac{\lambda \cos\alpha}{4\pi\epsilon_0 r^2} \int_{\text{Spira}} dl = \frac{2\pi R}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda \cos\alpha}{r^2}$$

$$= \frac{\lambda R}{2\epsilon_0} \frac{\cos\alpha}{r^2} = \frac{\lambda R}{2\epsilon_0} \frac{x}{r^3} = \frac{\lambda R}{2\epsilon_0} \frac{x}{(x^2 + R^2)^{3/2}}$$

$$E_{0x}(0) = 0$$

$$E_{0x}(x) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 0$$