Elettrostatica:

1. *Cariche Elettriche e Forza di Coulomb;*
2. *Campi Elettrici*
3. *Potenziale Elettrico*
4. *Materia e Carica*
5. *Condensatori*

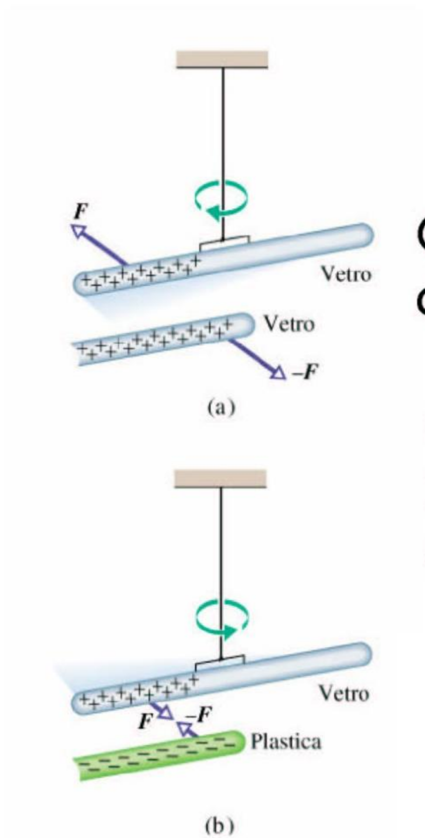
Elettrodinamica:

1. *Correnti elettriche (cariche in movimento)*
2. *Resistenza elettrica*
3. *Generatori e differenze di Potenziale*
4. *Circuiti RC*

Elettromagnetismo:

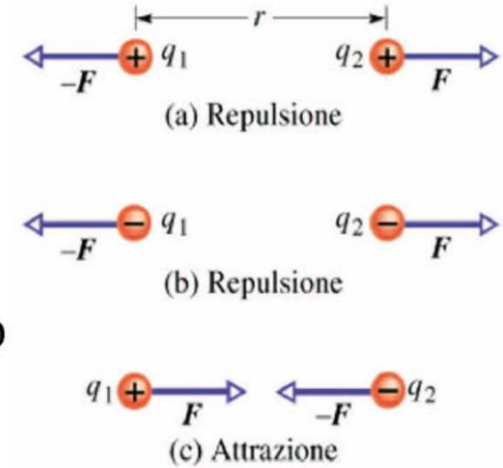
1. *Campo Magnetico*
2. *Forza di Lorentz (Forza di B su cariche in moto)*
3. *Elementi circuitali magnetici*
4. *Induzione e circuiti*

11. La carica elettrica e legge di Coulomb

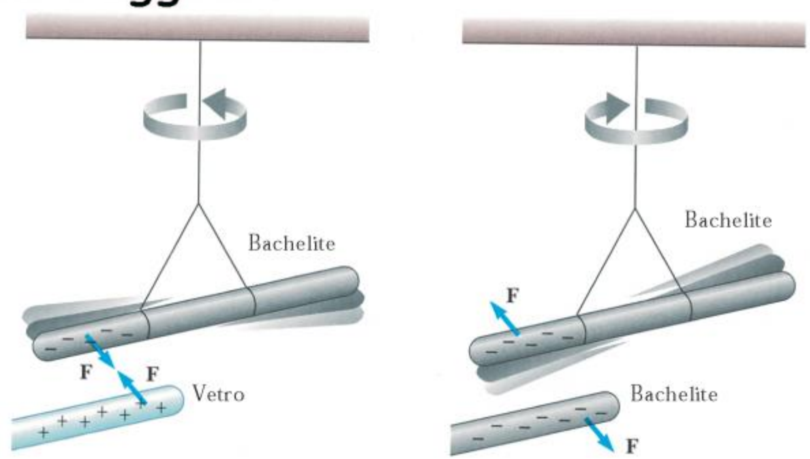


Esiste in Natura una forza di natura non gravitazionale, che può essere attrattiva o repulsiva

Questa forza e' dovuta all'esistenza di cariche elettriche di due tipi: + -



Cariche dello stesso segno si respingono, cariche di segno opposto si attraggono.



Carica positiva compare sulle sostanze tipo vetro

Carica negativa compare sulle sostanze tipo bachelite

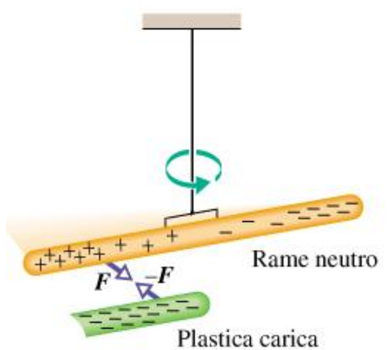
Conduttori e Isolanti

I corpi che manifestano la proprietà di attirare i corpuscoli si dicono elettrizzati o elettricamente carichi

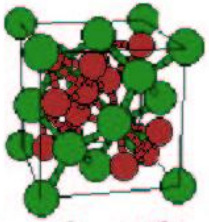
La carica elettrica è una nuova grandezza fisica che misura lo stato di elettrizzazione dei corpi, responsabile delle forze elettriche che si manifestano tra corpi elettrizzati

In base al loro comportamento elettrico i materiali si suddividono in:

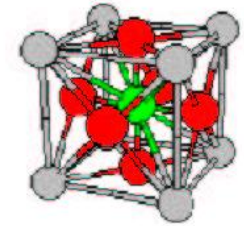
1. ***Isolanti****: si caricano per strofinio e sono in grado di trattenere la carica elettrica*
2. ***Conduttori****: non si elettrizzano per strofinio, le cariche in essi possono fluire da un punto ad un altro*



Semiconduttori e Superconduttori ?



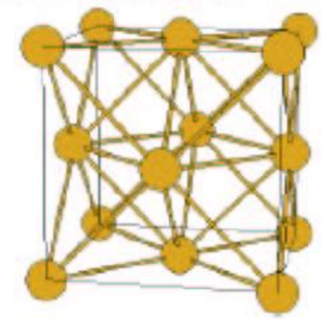
Conduttori ed isolanti



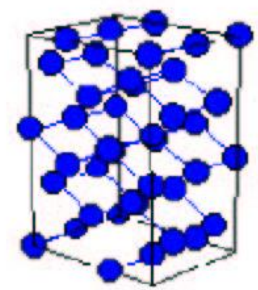
La classificazione dei materiali in isolanti e conduttori è data dalla loro maggiore o minore capacità di "condurre" l'elettricità. I materiali che trasmettono meglio l'elettricità sono i materiali "**conduttori**" (come i metalli) mentre i materiali **isolanti** non possono trasmetterla, ma solo trattenerla.

Oggi sappiamo che i materiali isolanti, non trasmettono l'elettricità perché i nuclei e gli elettroni dei loro atomi non possono variare il loro stato di equilibrio elettrico.

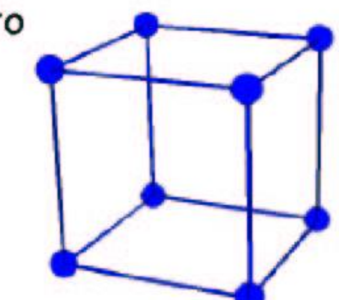
In pratica, ciascun nucleo di un isolante lega tutti gli elettroni dell'atomo, che non possono allontanarsi dal nucleo stesso.



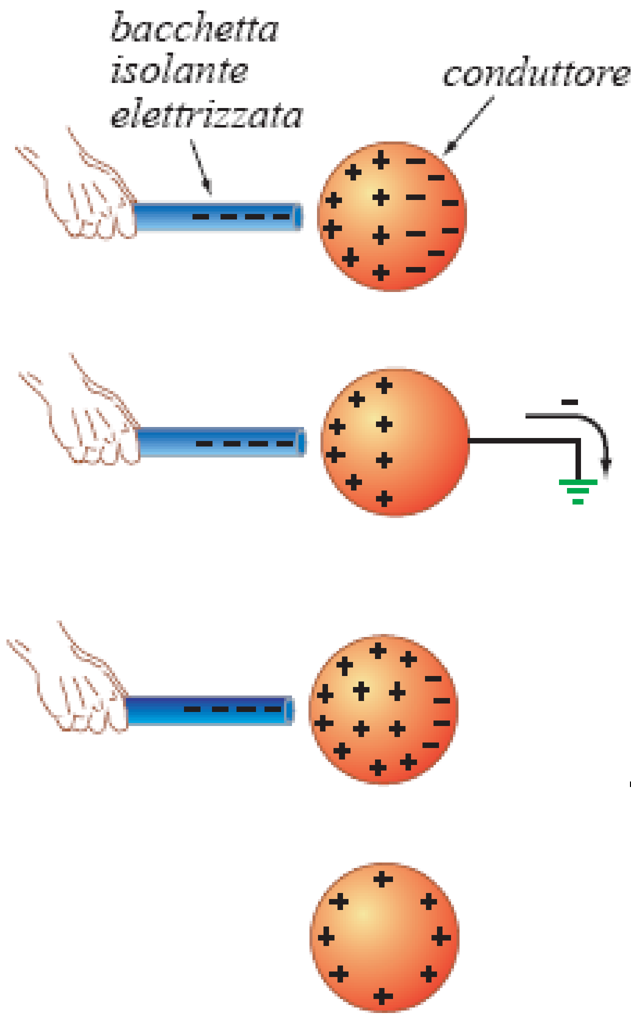
Gli atomi dei metalli si dispongono in strutture regolari (***reticoli cristallini***): in queste, gli e- più vicini ai nuclei sono fortemente legati ai nuclei stessi. Gli "ultimi elettroni" (ossia, quelli più lontani) sono invece ***condivisi*** dai nuclei nel cristallo, e costituiscono l'insieme degli "**elettroni liberi**" (o elettroni di conduzione).



Questi elettroni possono muoversi indipendentemente uno dall'altro sulla *superficie del metallo*, anche molto velocemente nei materiali conduttori. In un metallo "alcalino", per ogni atomo vi è un elettrone libero, nell'atomo dell'alluminio ve ne sono invece tre, essendo l'alluminio un buon conduttore, e così via.



Carica di un Conduttore per induzione



1) Un corpo carico viene avvicinato al conduttore

2) Il conduttore viene collegato "a terra"

3) Il collegamento viene interrotto

4) Il corpo carico viene allontanato

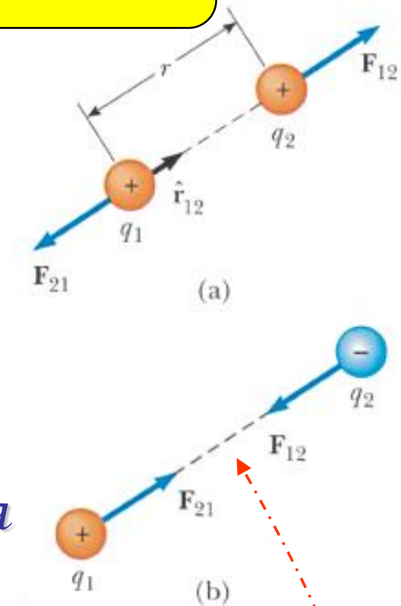
Forza di Coulomb

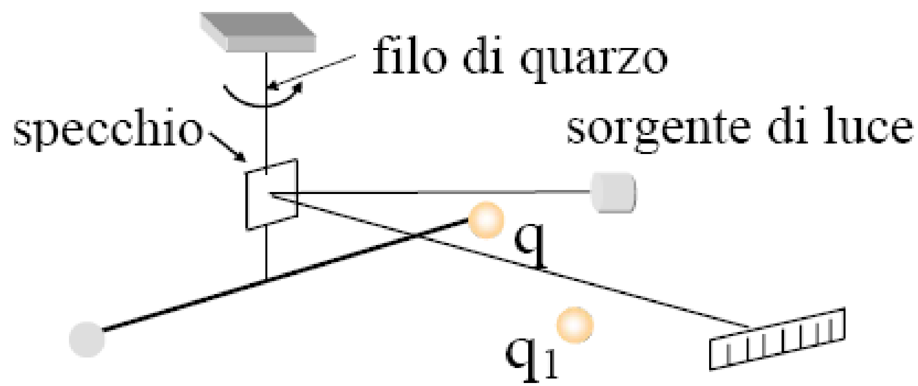
Sperimentalmente si è osservato come:

1. *Esistono due tipi di carica + e -*
2. *Le Forze di interazione tra due cariche sono dirette lungo la congiungente*

$$-\vec{F}_{12} = \vec{F}_{21}$$

3. *La forza F è proporzionale alle cariche elettriche*
4. *La forza F decresce con il quadrato della distanza*





$$F_{C12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}\vec{e}_{12}$$

Legge di Coulomb

Sperimentalmente, C.A. *Coulomb* determinò (1785) che una carica q_1 induce una forza sulla carica q_2 che è proporzionale al prodotto delle intensità q_1 , q_2 delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato delle distanze.

Carica di tre particelle

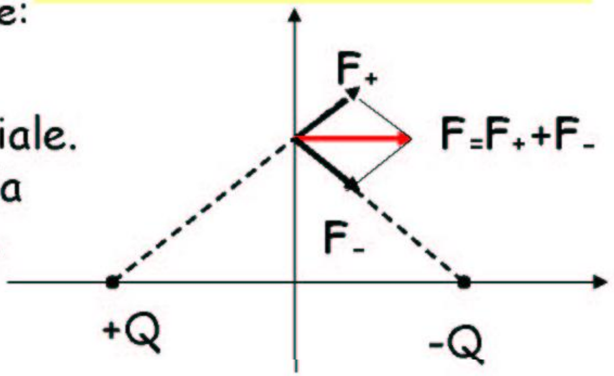
Particella	Simbolo	Carica
Elettrone	e oppure e^-	$-e$
Protone	p	$+e$
Neutrone	n	0

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r^2}\hat{r}$$

Con la carica misurata in Coulomb, la costante vale:

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_o} = 8.99 \quad 10^9\, N \cdot m^2 / C^2$$

La legge di Coulomb ha natura vettoriale.
La forza risultante da più cariche e' la somma vettoriale delle singole forze.
In generale, F= ΣF_i



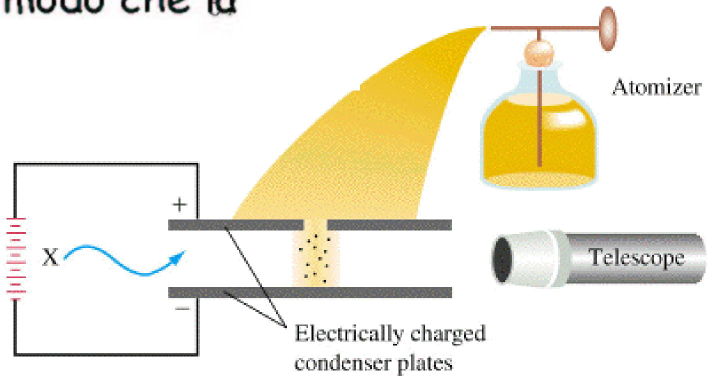
Quantizzazione della carica elettrica

Oggi noi conosciamo che la carica elettrica e' *quantizzata*, ossia esiste una carica elementare molto piccola, di cui tutte sono multiple:

q = ne con e=carica elettrone= 1.6 10-19 *C*

Inoltre, la carica elettrica e' conservata: possono esistere dei processi in cui cariche elettriche vengono create, ma in modo che la carica risultante sia nulla. Ad es: $\gamma \rightarrow e+e-$

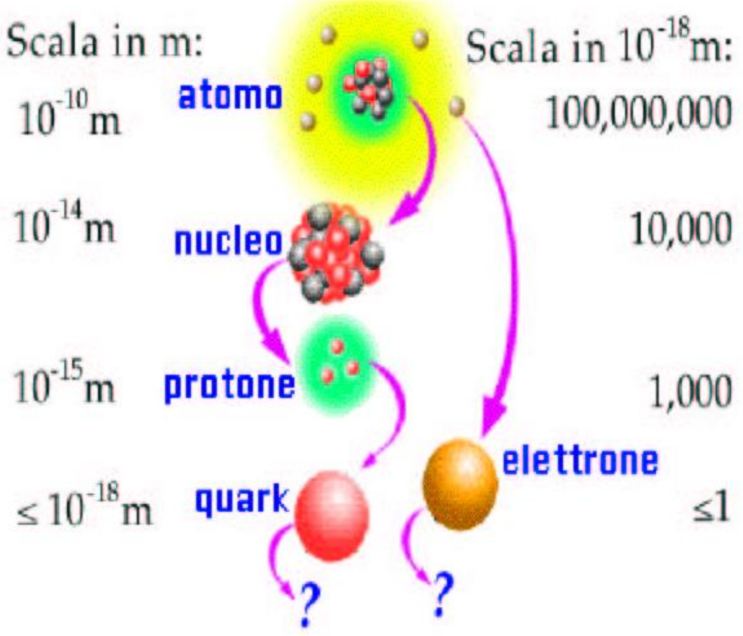
Esperimento di Millikan



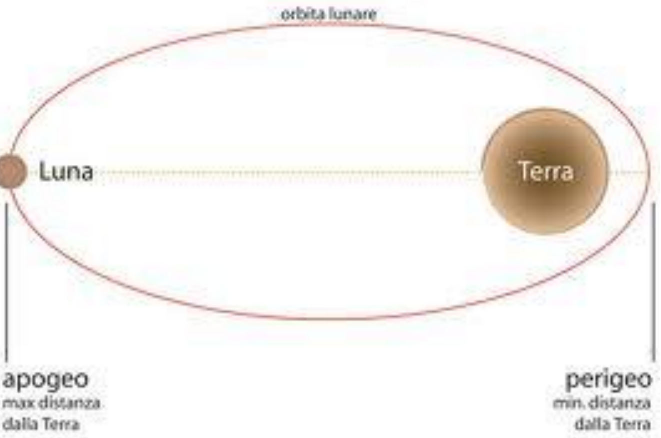
12. Uno sguardo dentro la materia

Abbiamo conosciuto due tra le forze fondamentali della natura: la forza ***gravitazionale*** e la forza ***elettrica***. La prima e' legata alla **massa**, la seconda alla **carica** di una particella. Ma come e' costituita la materia?

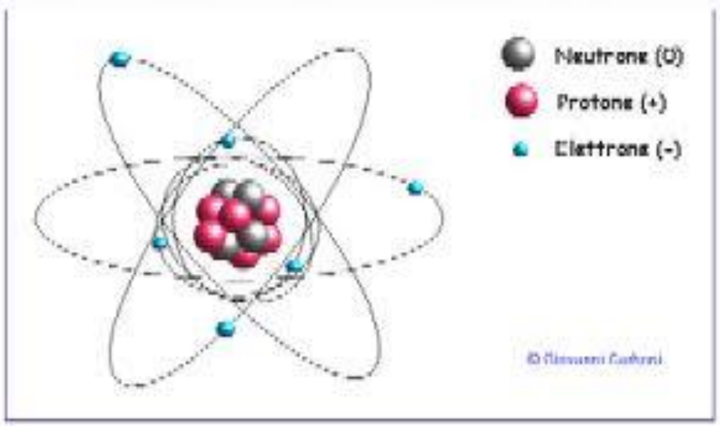
1. **Molecole**. Gran parte dei materiali, sono costituiti da molecole, che sono agglomerati di ***atomi*** legati da forze elettriche di tipo di "dipolo" (talvolta molto piu' complicate).
2. **Atomi**. Gli atomi sono aggregati neutri composti da ***nuclei*** (carichi +) ed elettroni (carichi -). Il numero Z di protoni (od elettroni) determina il nome dell'elemento: dall'idrogeno (Z=1) all'Uranio (Z=92). Gli atomi sono stabili per forze di natura elettrica.



3. **Nuclei**. Anche i nuclei sono composti da protoni (carichi +) e neutroni (neutri). La carica dei p e' la stessa degli e, cambiata di segno. I nuclei sono tenuti da forze nucleari.
4. I **protoni e neutroni** sono composti da quark….



Forze centrali



Forza gravitazionale

$$F_g = G\frac{Mm}{r^2}$$

Forza elettrica

$$F_{el} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r^2}$$

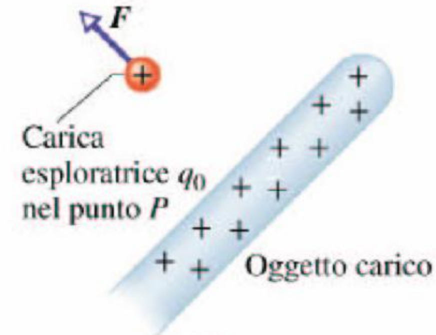
Intensità relativa delle forze gravitazionale e elettrica fra 2 protoni

$$\frac{F_{el}}{F_{gra}} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G m_p^2} = 1.24\cdot 10^{36}$$

$\boldsymbol{m_p}$ = 1.67 10^{-27} Kg
$\boldsymbol{e}$ = 1.60 10^{-19} C
G = 6.67 10^{-11} m^3 Kg^{-1} s^{-2}

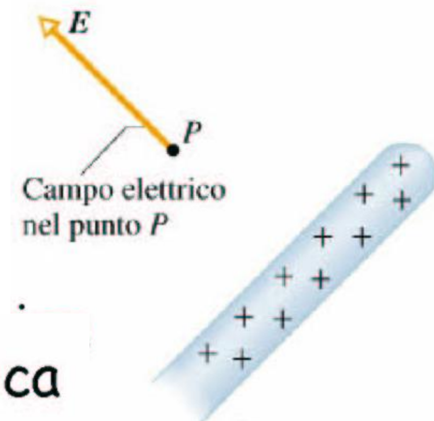
Campo Elettrico E

Se mettiamo una carica in una regione dove c'è un'altra carica essa risentirà della sua presenza manifestando una forza di Coulomb. Per spiegare ciò ricorriamo al concetto di campo



(a)

Il ***campo elettrico*** **E** è un campo vettoriale: ad ogni punto dello spazio si può immaginare associato un vettore. In fisica moderna il concetto di campo vettoriale è di importanza fondamentale.



(b)

Se q_o è una carica di prova, il ***campo elettrico*** **E** è definito come:

$$F = q_o E$$

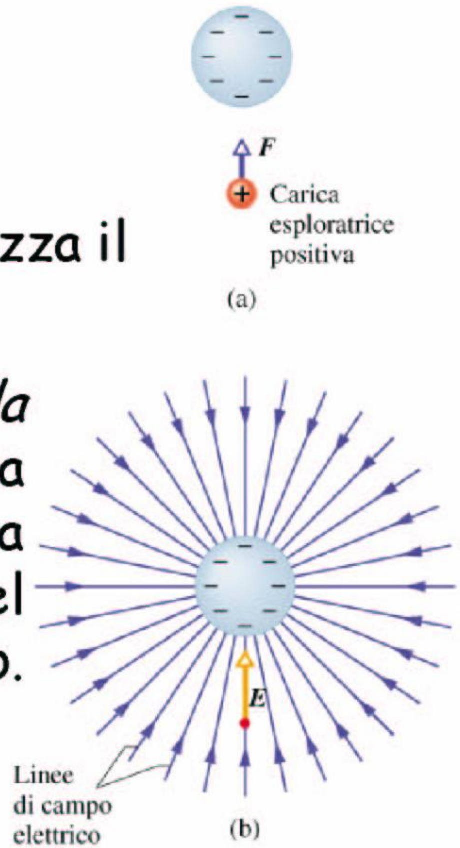
ossia, come quel vettore che, moltiplicato per la carica di prova, dà la forza (in Newton) agente sulla carica stessa. Per definizione, l'unità di misura del campo elettrico è:

$$(\mathrm{E}) = (\mathrm{Newton/C})$$

Il caso semplice di ***campo elettrico*** generato da una carica q è:

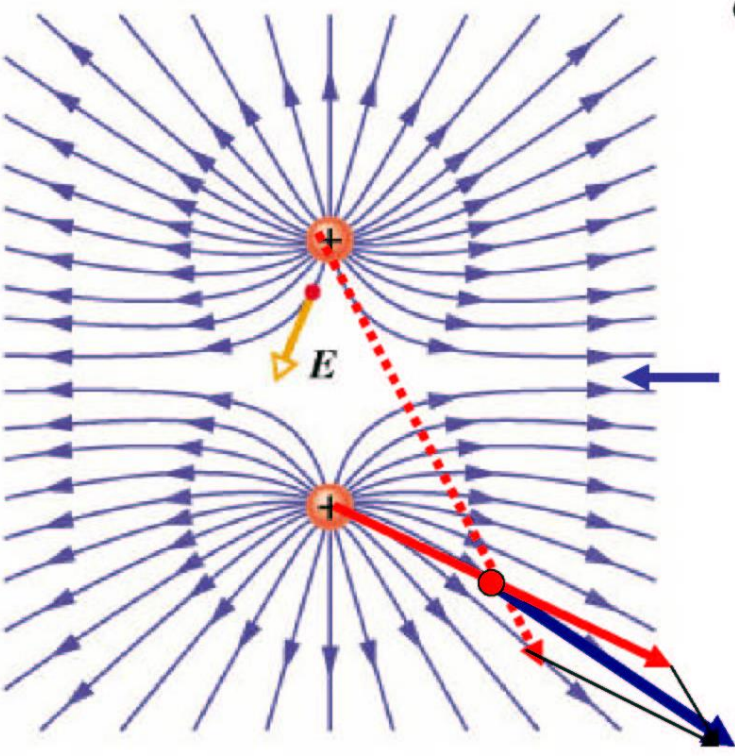
$$\frac{\vec{F}}{q_o} \equiv \vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r^2}\hat{r}$$

Linee di forza di E

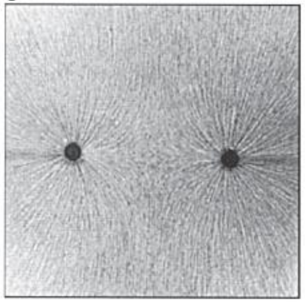


Il metodo per visualizzare il ***campo elettrico*** utilizza il concetto di ***linee di forza***.

La linea di forza in un punto rappresenta *la direzione in cui muoverebbe* una carica positiva posta in quel punto. Il numero delle linee di forza qualitativamente rappresenta l'intensità del campo elettrico stesso.



Il campo E in un punto, essendo una grandezza vettoriale, gode delle proprietà vettoriali: ad es., il campo risultante da due o più cariche si ottiene della somma dei vettori

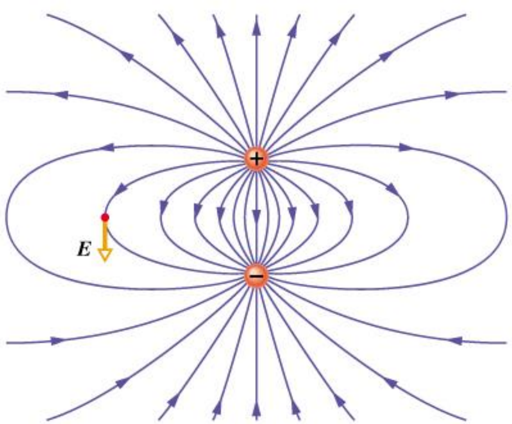


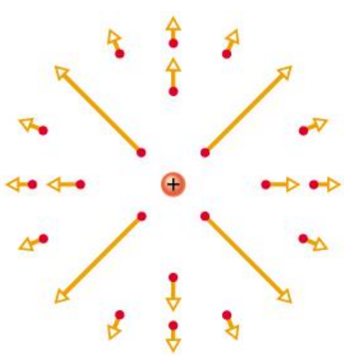
Linee di Forza del Campo Elettrico

Il concetto delle linee di forza ha un'utilità simile a quella delle linee di corrente nei fluidi:

1. in ogni punto la direzione di una linea di campo o la direzione della tangente alla linea di campo in un dato punto rappresenta la direzione ed il verso del campo stesso

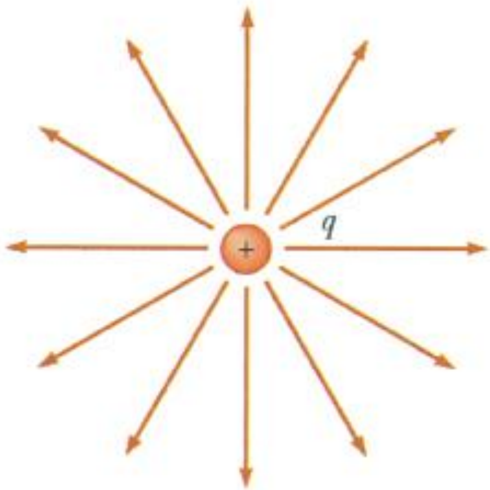
2. le linee di campo sono tracciate in modo da visualizzare dove il campo è più intenso (più densità di linee più intenso il campo)

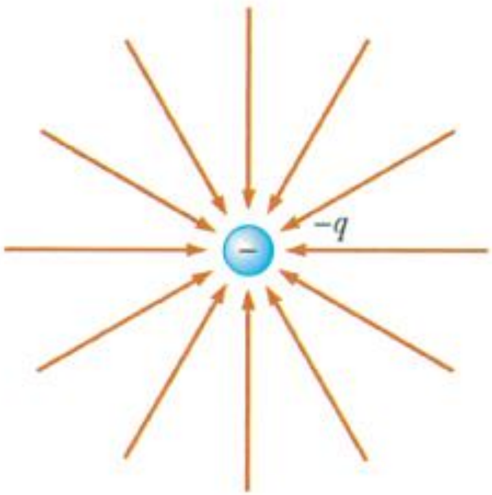


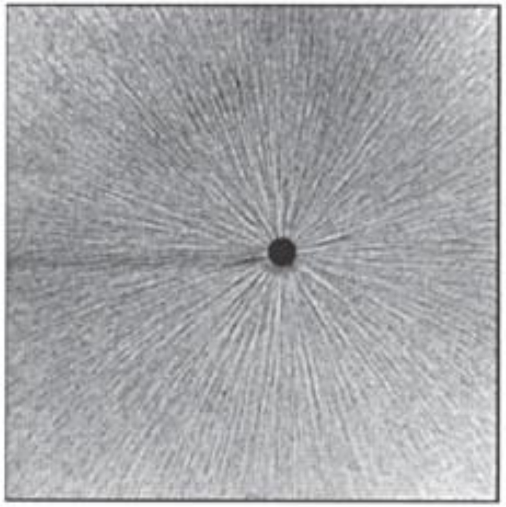


Proprietà delle linee di forza del campo elettrico è che le linee di forza escono dalle cariche positive ed entrano in quelle negative

Campo Elettrico generato da una carica puntiforme







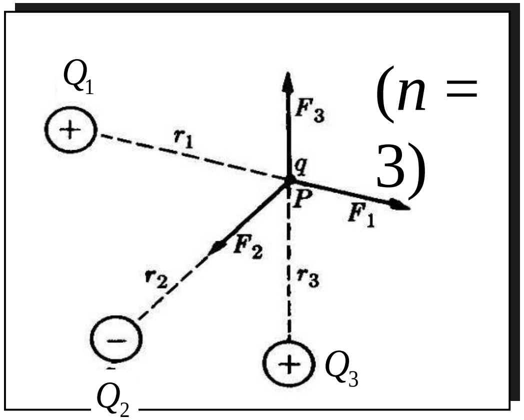
Forza di Coulomb esercitata dalla carica q su una carica di prova q_0

$$F_{q_0} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2}$$

Campo Elettrico

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \vec{e}_r$$

Verso delle linee di forza radiale:
entrante per carica negativa
uscente per carica positiva

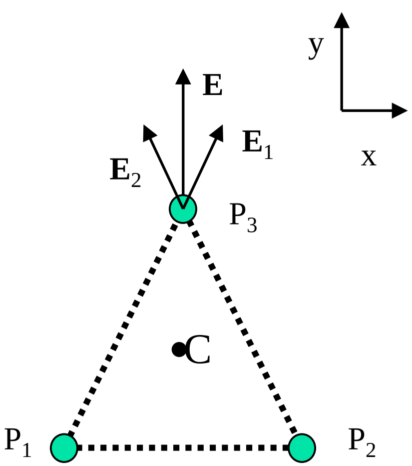


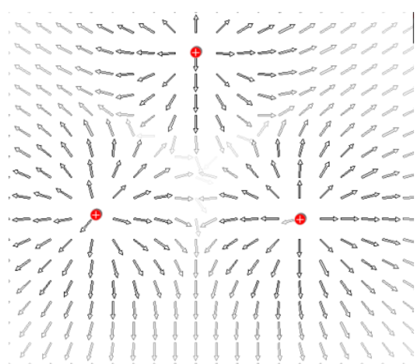
In caso di n cariche Q_i

$$\vec{E} = \frac{\left(\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3\right)}{q} = \frac{\vec{F}}{q}$$

ESEMPIO

Tre cariche positive eguali Q_1=Q_2=Q_3=Q sono fisse nei vertici di un triangolo equilatero di lato l.





$$E_1 = E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{l^2}$$

$$E = E_{1y} + E_{2y} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q\cos 30}{l^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q\sqrt{3}}{l^2}$$

$$\vec{F}_3 = Q_3\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q^2\sqrt{3}}{l^2}\hat{u}_y$$

$$\vec{E}_C = 0$$

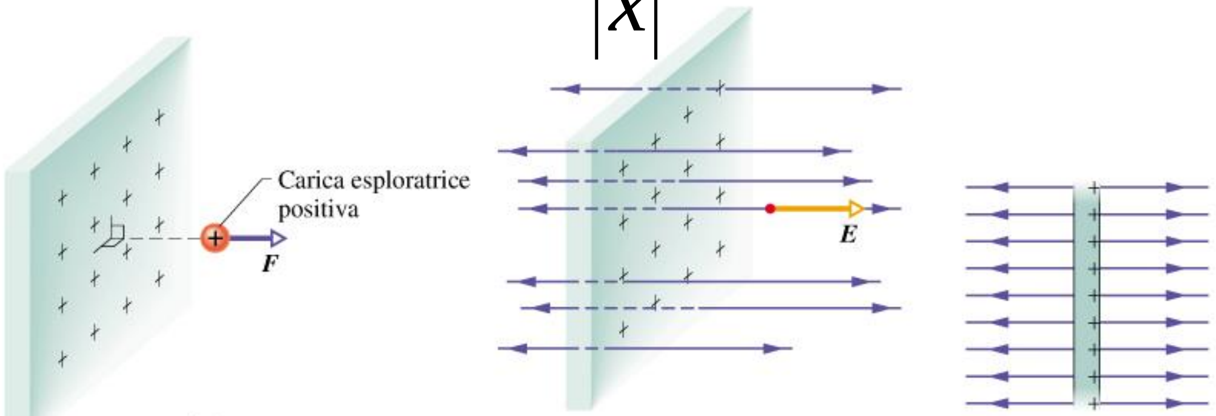
Altri Esempi di Campi Elettrici

Alcuni valori di campo elettrico

Campo	Valore (N/C)
Sulla superficie di un nucleo di uranio	$3 \cdot 10^{21}$
In un atomo di idrogeno, a un raggio di $5.29 \cdot 10^{-11}$ m	$5 \cdot 10^{11}$
Minimo valore per la scarica elettrica in aria	$3 \cdot 10^{6}$
Sul rullo carico di una fotocopiatrice	10^{5}
Vicino a un pettine di plastica caricato	10^{3}
Nella bassa atmosfera	10^{2}
All'interno di un filo di rame in circuiti elettrici domestici	10^{-2}

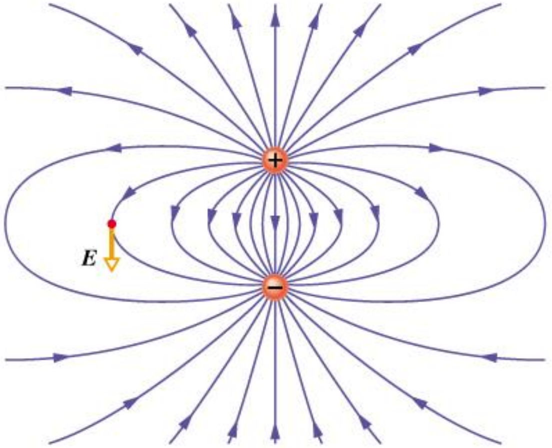
Lamina carica uniformemente

$$\vec{E} = E \frac{x}{|x|} \vec{r}$$



(a) (b) (c)

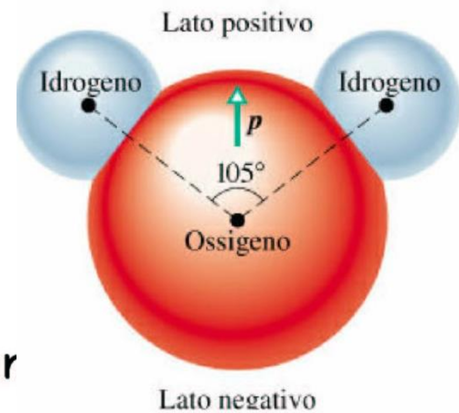
Dipolo Elettrico

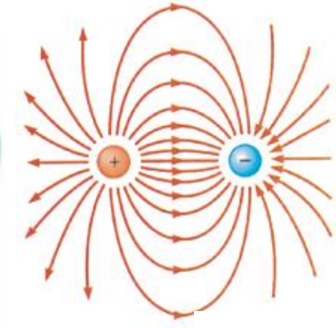


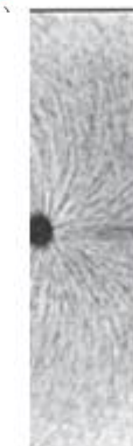
due cariche dello stesso valore ma segno opposto

Dipolo elettrico

Un ***dipolo elettrico*** è composto da due cariche di segno opposto, poste ad una distanza d (e' un caso importante perché in Natura esistono molte situazioni paragonabili ad un dipolo). Il campo E di un dipolo in un punto lontano z dal centro del dipolo:







$$E = E_+ + E_- = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{q}{r_+^2}-\frac{q}{r_-^2}\right) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{q}{(z-\frac{d}{2})^2}-\frac{q}{(z+\frac{d}{2})^2}\right) \cong$$

$z \gg d$

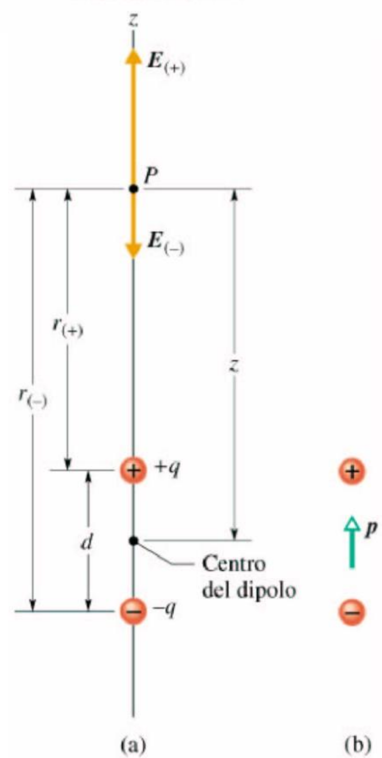
$$E \cong \frac{q}{4\pi\varepsilon_o z^2}\left[\left(1+\frac{2d}{2z}\right)-\left(1-\frac{2d}{2z}\right)\right]=$$

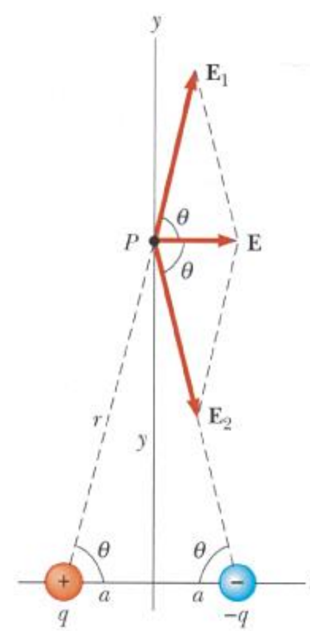
$$=\frac{q}{4\pi\varepsilon_o}\frac{2d}{z^3}$$

$$E=\frac{1}{2\pi\varepsilon_o}\frac{p}{z^3}, \qquad p=qd$$

Campo di dipolo elettrico

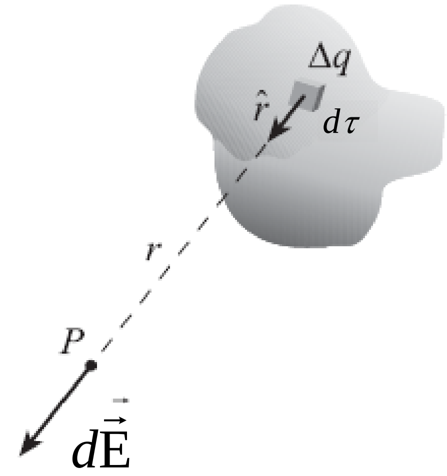
Momento di dipolo





$$\rho\,(\mathrm{x,y,z}) = \frac{dq}{d\tau} \qquad Q = \int_\tau \rho\,(\mathrm{x,y,z})\,d\tau$$

$$d\vec{E} = \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\,\hat{u}_r$$



Il campo ***E*** nel punto ***P*** si ottiene scomponendo la distribuzione di carica di densità uniforme in volumetti dτ ed applicando il principio di sovrapposizione

$$\vec{E}(P) = \int_\Sigma d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\int_\Sigma \frac{dq}{r^2}\,\hat{u}_r = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\int_\Sigma \rho\,\frac{d\tau}{r^2}\,\hat{u}_r$$

Se la densità è uniforme (corpo omogeneo) $\vec{E}(P) = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_o}\,\rho\displaystyle\int_\Sigma \frac{d\tau}{r^2}\,\hat{u}_r$

Campo Elettrico generato da carica lineare

Se la carica q non è puntiforme ?

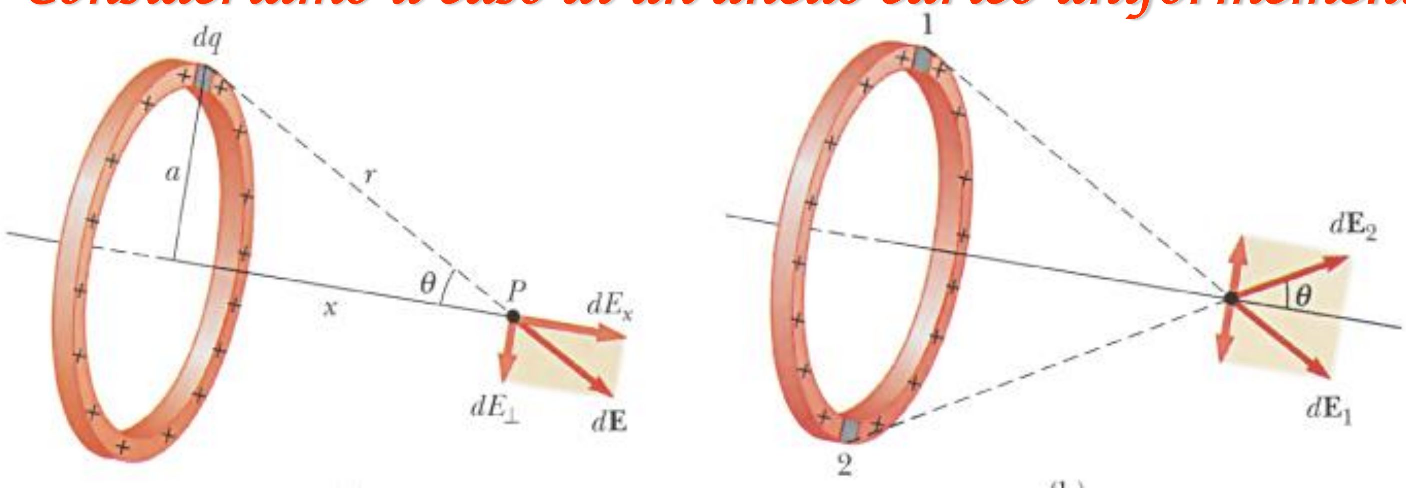
Consideriamo il caso unidimensionale

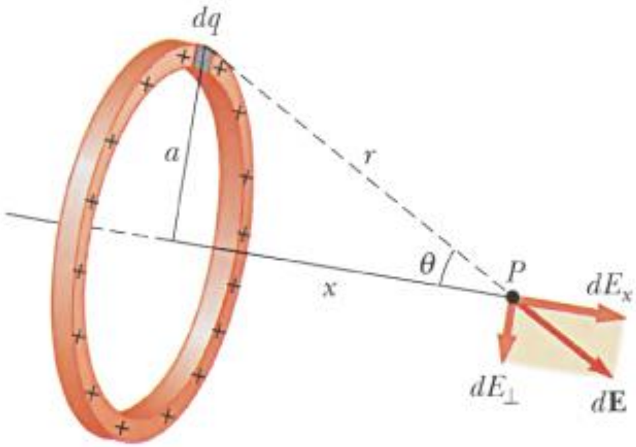
Uso il ***PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE*** *esteso a un continuo di cariche infinitesime puntiformi*

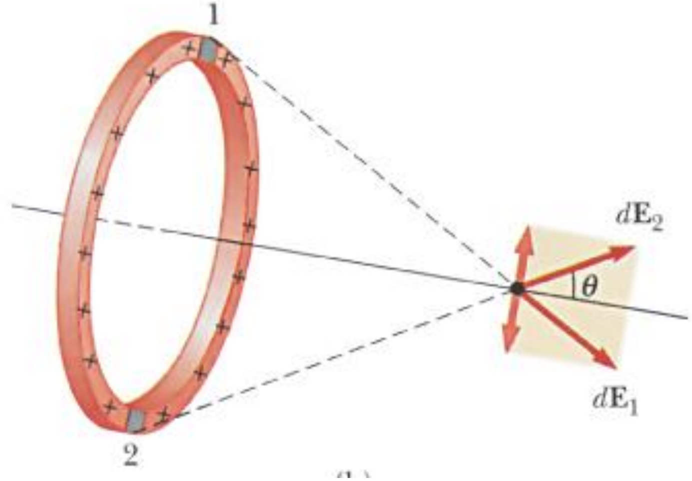
Se si hanno n particelle cariche, la forza totale che si esercita su ogni singola carica è pari alla somma delle forze esercitate singolarmente dalle altre (n-1) cariche elettriche, lo stesso vale per il campo Elettrico

$$E_{tot} = \int dE = \int E(dq)$$

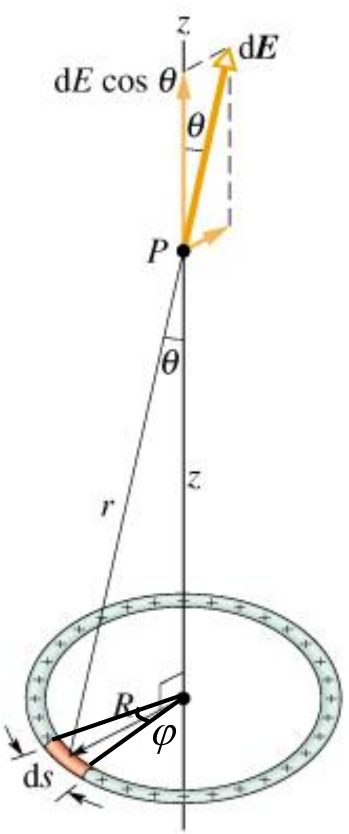
Consideriamo il caso di un anello carico uniformemente







Calcoliamo il Campo Elettrico in un punto giacente sull'asse dell'anello



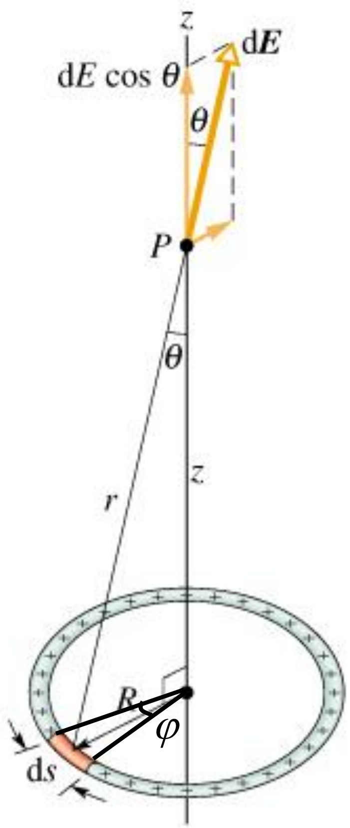
$$ds = R d\varphi \qquad e \qquad dq = \frac{Q}{2\pi R} ds$$

ora $$\frac{Q}{2\pi R} = \lambda \ (costante)$$ Carica per unità di lunghezza

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2} = \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{R^2 + z^2}$$

Poiché solo la componente del campo lungo z si conserva, calcolo dE_z

$$dE_z = dE\cos\theta = \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0}\frac{z}{r}\frac{1}{R^2 + z^2}$$



quindi $$E=\int_{anello} dE=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{z\lambda ds}{\left(z^2+R^2\right)^{\frac{3}{2}}}=$$

$$=\frac{z\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{\left(z^2+R^2\right)^{\frac{3}{2}}}\int_0^{2\pi}Rd\varphi=$$

$$=\frac{z\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\pi R}{\left(z^2+R^2\right)^{\frac{3}{2}}}=$$

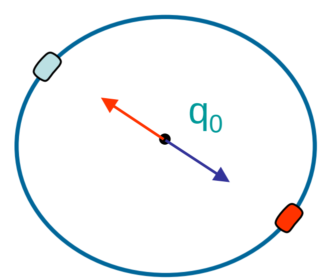
$\lambda \, 2\pi R \rightarrow Q_{TOT}$

$$\boxed{E=\frac{Q\cdot z}{4\pi\varepsilon_0\left(z^2+R^2\right)^{\frac{3}{2}}}}=$$

Se $z^2 \gg \mathcal{R}^2$ $$\boxed{E\approx\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 z^2}}$$

Ovvero da lontano un anello sembra un punto

Se $z=0$ $\rightarrow$ $E=0$

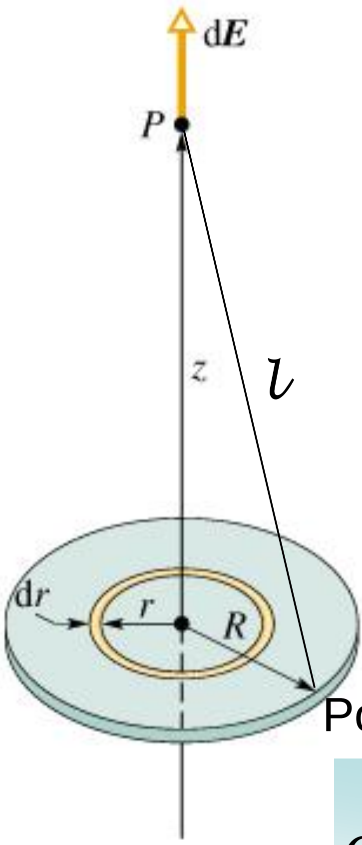


Simmetrie

Campo Elettrico generato da carica planare

Se la carica q è distribuita bidimensionalmente?

Consideriamo il caso di un disco carico uniformemente e calcoliamo il campo in un punto sul suo asse



Uso il ***PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE*** *esteso a un continuo di anelli (corone circolari) infinitesimi carichi*

$$S = \pi \cdot R^2 \quad e \quad \frac{Q}{\pi R^2} = \sigma \; (costante)$$

Carica per unità di area

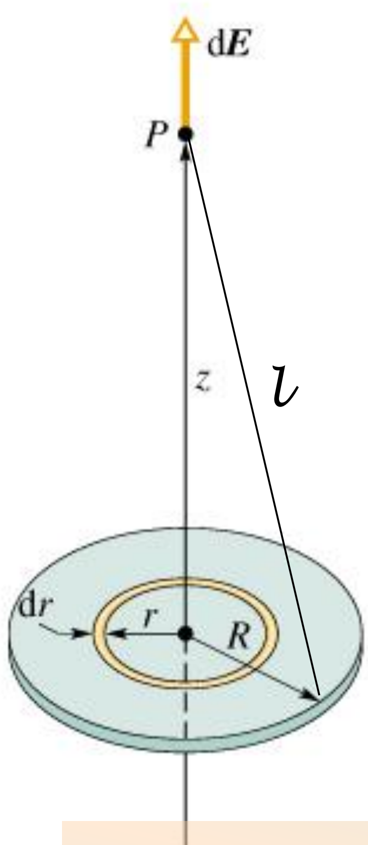
$$ds = 2\pi R dr \qquad e \qquad dq = \sigma \cdot ds$$

ora

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{d^2} = \frac{\sigma \cdot dS}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r^2+z^2}$$

Poiché solo la componente del campo lungo z si conserva, calcolo dE_z

$$dE_z = dE\cos\theta = \frac{\sigma \cdot dS}{4\pi\varepsilon_0}\frac{z}{l}\frac{1}{r^2+z^2} = \frac{\sigma \cdot dS}{4\pi\varepsilon_0}\frac{z}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$



$$dE_z = dE\cos\theta = \frac{\sigma\cdot dS}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{z}{l}\,\frac{1}{r^2+z^2} = \frac{\sigma\cdot dS}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{z}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$= \frac{\sigma\cdot 2\pi\, r\, dr}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{z}{\left(R^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Integrando si ha:

Cambio di variabile

$$E = \int dE = \int_0^R \frac{\sigma\cdot z}{4\varepsilon_0}\,\frac{dr^2}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$E = \left[\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\,\frac{(-z)}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}}\right]_0^R = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\left[1-\frac{z}{\sqrt{z^2+R^2}}\right]$$

Se il disco è "grande"

$z \ll R$

$$E \approx \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

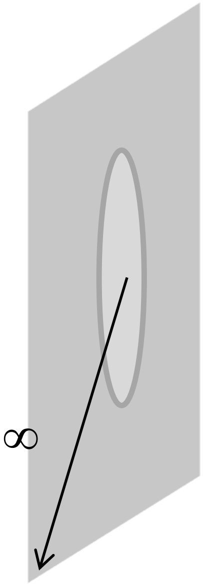
Costante ! → Corrisponde ad avere un **piano infinito**

$q_{tot} \to \infty$

Distribuzioni piane di cariche: piano infinito

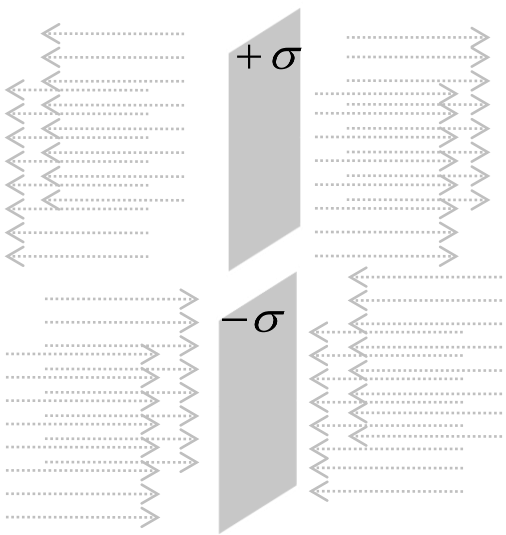
$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

$$R \rightarrow \infty \qquad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\left[1 - \underbrace{\cancel{\frac{z}{\sqrt{z^2+R^2}}}}_{=0}\right] \qquad \vec{E} = \pm\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\hat{u}_\perp$$

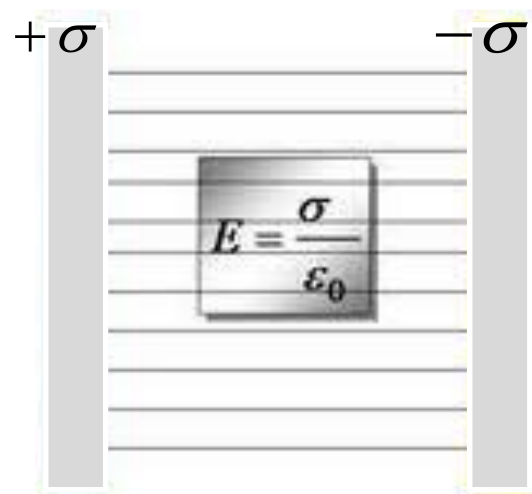


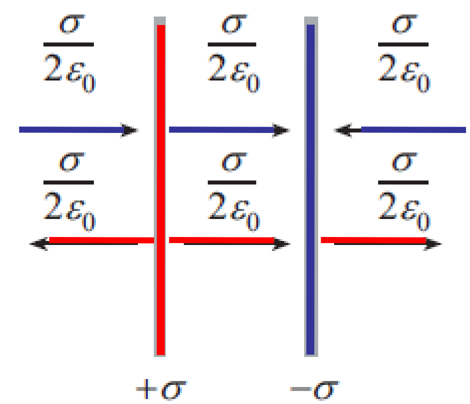
$R \rightarrow \infty$

Campo uniforme e perpendicolare al piano.



Un caso particolare



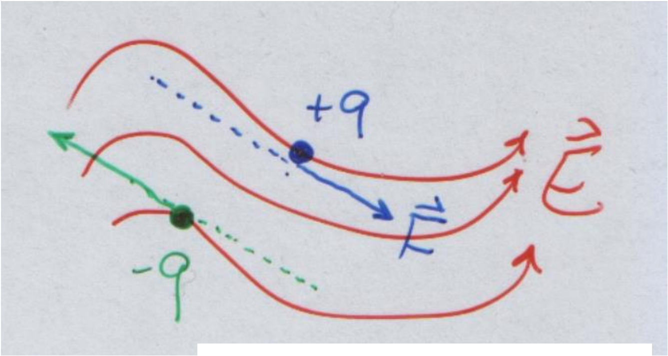


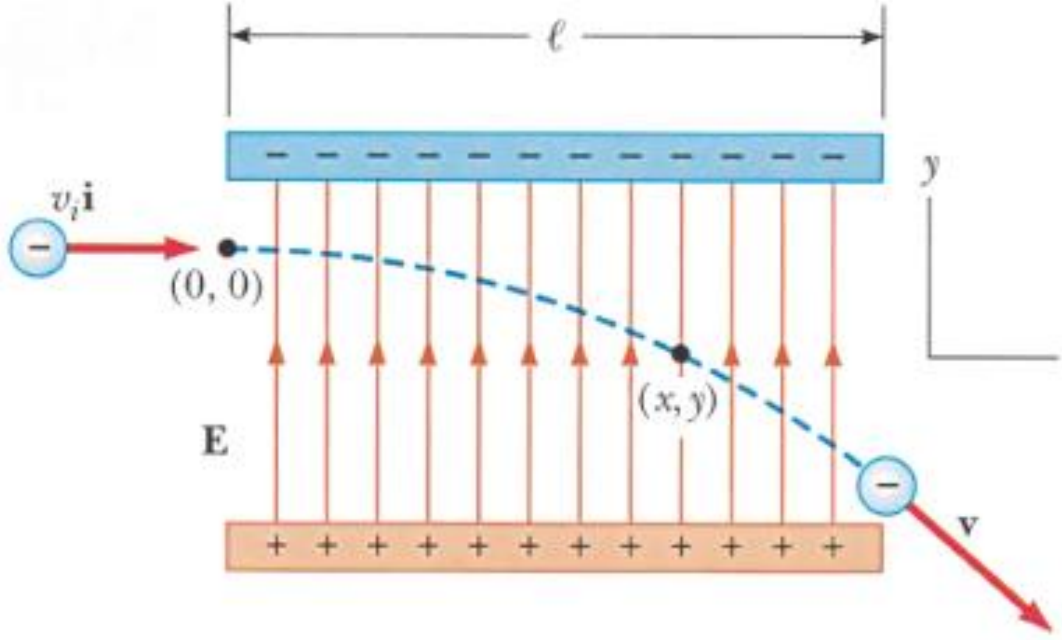
Carica puntiforme in un Campo Elettrico

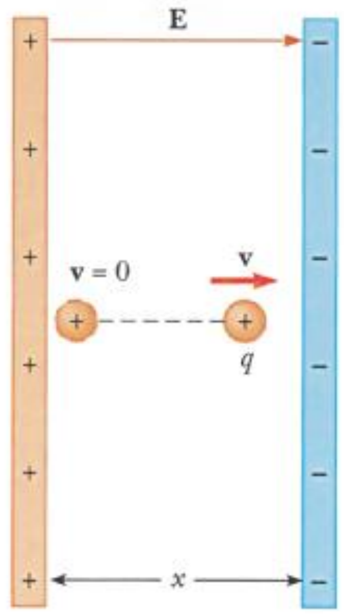
*Allorché una carica puntiforme **q** si trova in una regione di spazio dove è presente un campo elettrico essa subisce una forza pari a:*

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

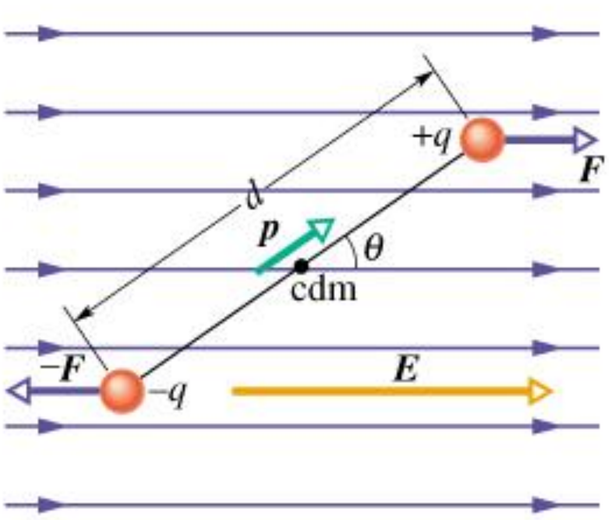
Perciò cariche di segno opposto subiscono forze di direzioni opposte







Dipolo elettrico in un Campo Elettrico



(a)

Supponiamo che il campo elettrico sia isotropo e costante, come nel caso del piano infinito

*Sulle due cariche agiscono due forze aventi la stessa intensità ma verso opposto dando luogo ad una coppia di forze e quindi un **Momento** che porta ad una rotazione del dipolo*

(b)

$$\tau = -F\frac{d}{2}\sin\theta - F\frac{d}{2}\sin\theta = -q\,d\cdot E\sin\theta$$

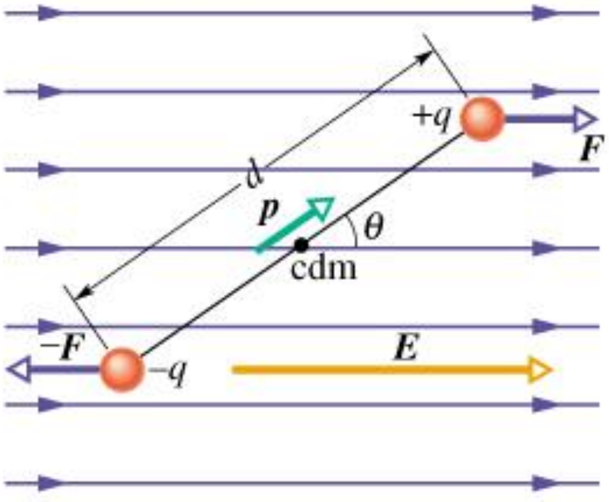
$$\boxed{\vec{\tau} = \vec{p}\times\vec{E}}$$

In forma vettoriale

Se il dipolo è allineato con il campo si ha l'equilibrio

θ = 0 Equilibrio Stabile

θ = 180° Equilibrio Instabile



(a)

(b)

Ma mentre ruota viene svolto un lavoro:

$$L = \int \tau \cdot d\theta$$

Calcolo il lavoro nel caso in cui si sposti a partire da un angolo di 90°

Dunque $\Delta U = U(\theta) - \cancelto{0}{U\left(\frac{\pi}{2}\right)}$

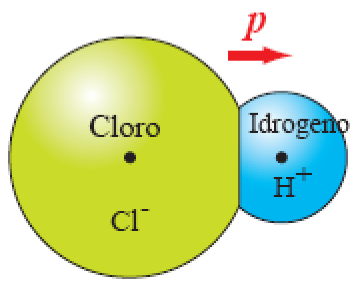
$$U(\theta) = -\int \tau \cdot d\theta = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\theta} p \cdot E \sin\theta \cdot d\theta$$

$$U(\theta) = -p \cdot E \cos\theta = -\vec{p} \bullet \vec{E}$$

Quindi $\boxed{U(\theta) = -p \cdot E \quad per\ \theta = 0}$ **Valore minimo (Equilibrio stabile)**

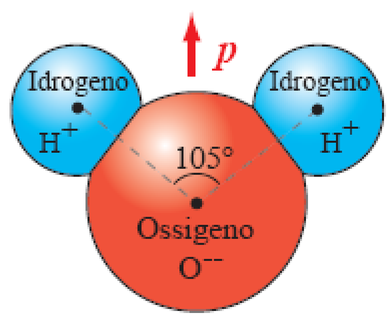
$\boxed{U(\theta) = p \cdot E \quad per\ \theta = \pi}$ **Valore massimo (Equilibrio instabile)**

Momento di dipolo di alcune molecole



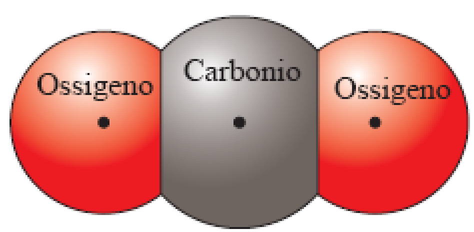
Acido cloridrico

$p = 3.6\ 10^{-30}\ Cm$



Acqua

$p = 6.2\ 10^{-30}\ Cm$



Anidride carbonica

$p = 0\ \ Cm$