FISICA II

Lez. 2 – Campo Elettrico

Prof. Giovanni Mettivier

Prof. Giovanni Mettivier, PhD

Dipartimento Scienze Fisiche

Università di Napoli “Federico II”

Compl. Univ. Monte S.Angelo

Via Cintia, I-80126, Napoli

mettivier@na.infn.it

+39-081-676137

Informazioni utili

Sito web: http://www.docenti.unina.it/mettivier

Bisogna effettuare l'iscrizione al corso…
Sarà possibile scaricare tutto il materiale del corso

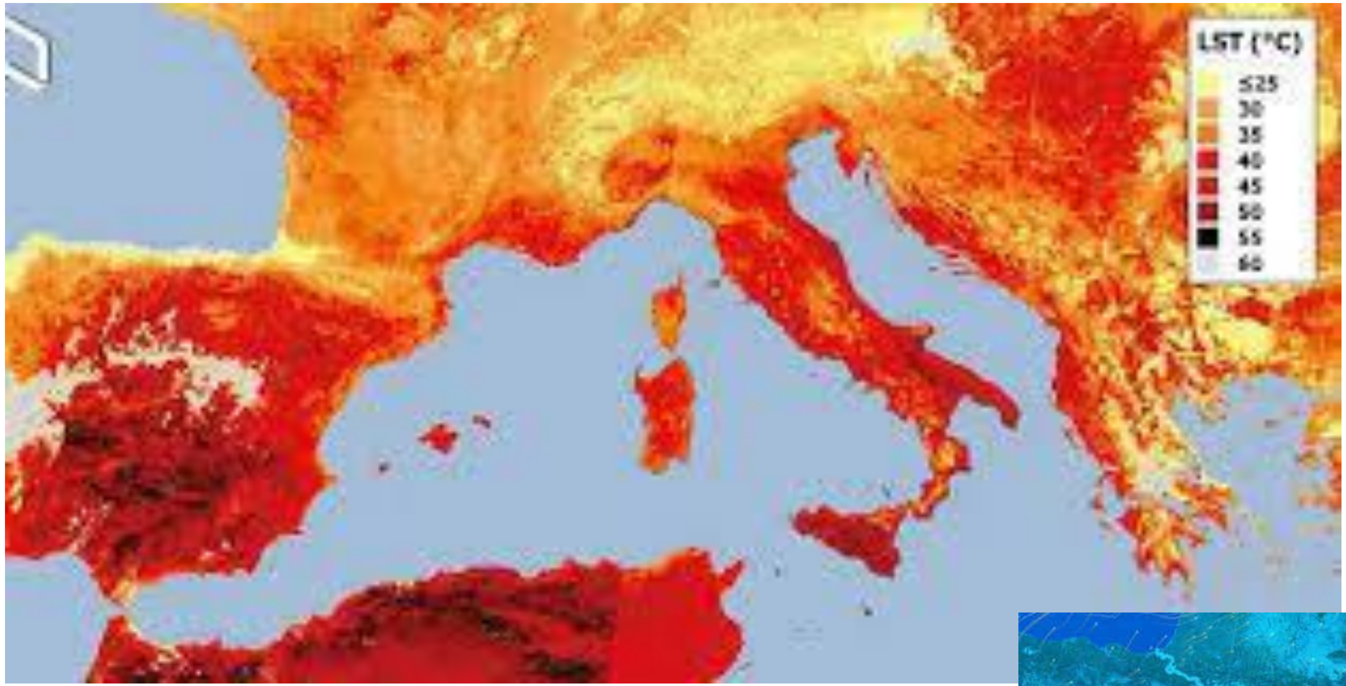
Tel. 081 676137
Mail. mettivier@na.infn.it

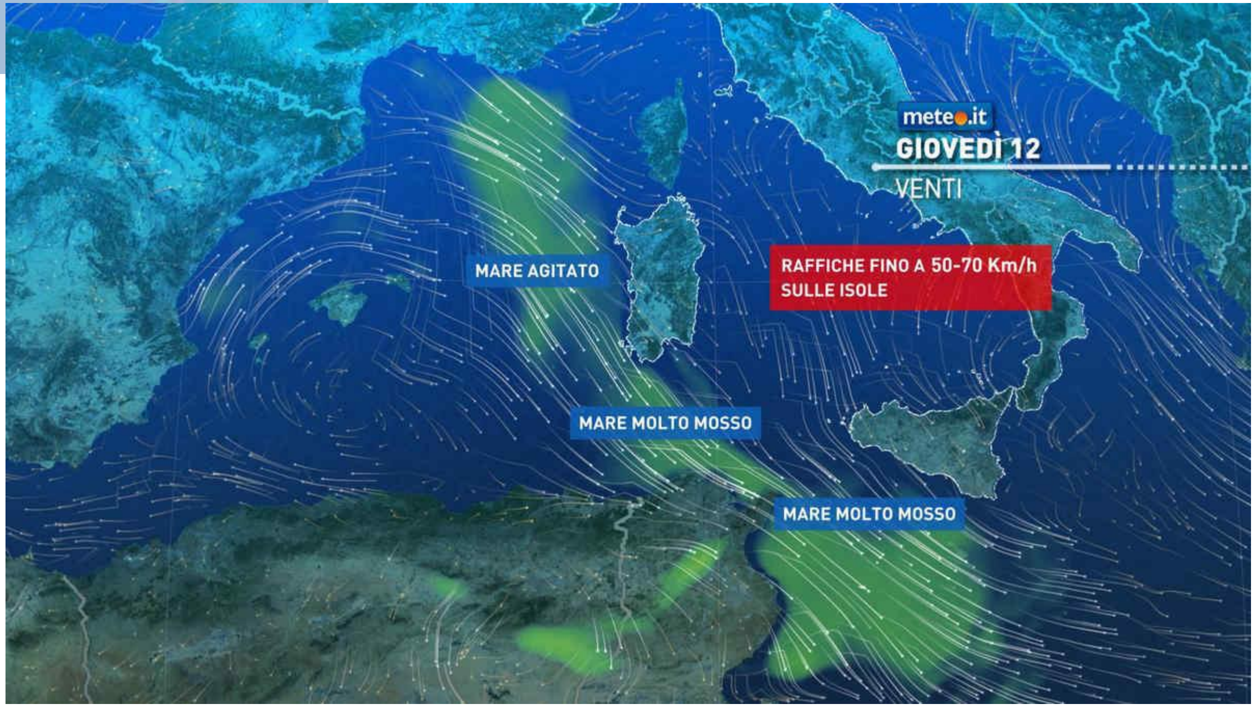
Testo consigliato:
Fisica per Scienze ed Ingegneria, V ed., vol. 2, Jewett & Serway, EdiSES

Obiettivi di apprendimento

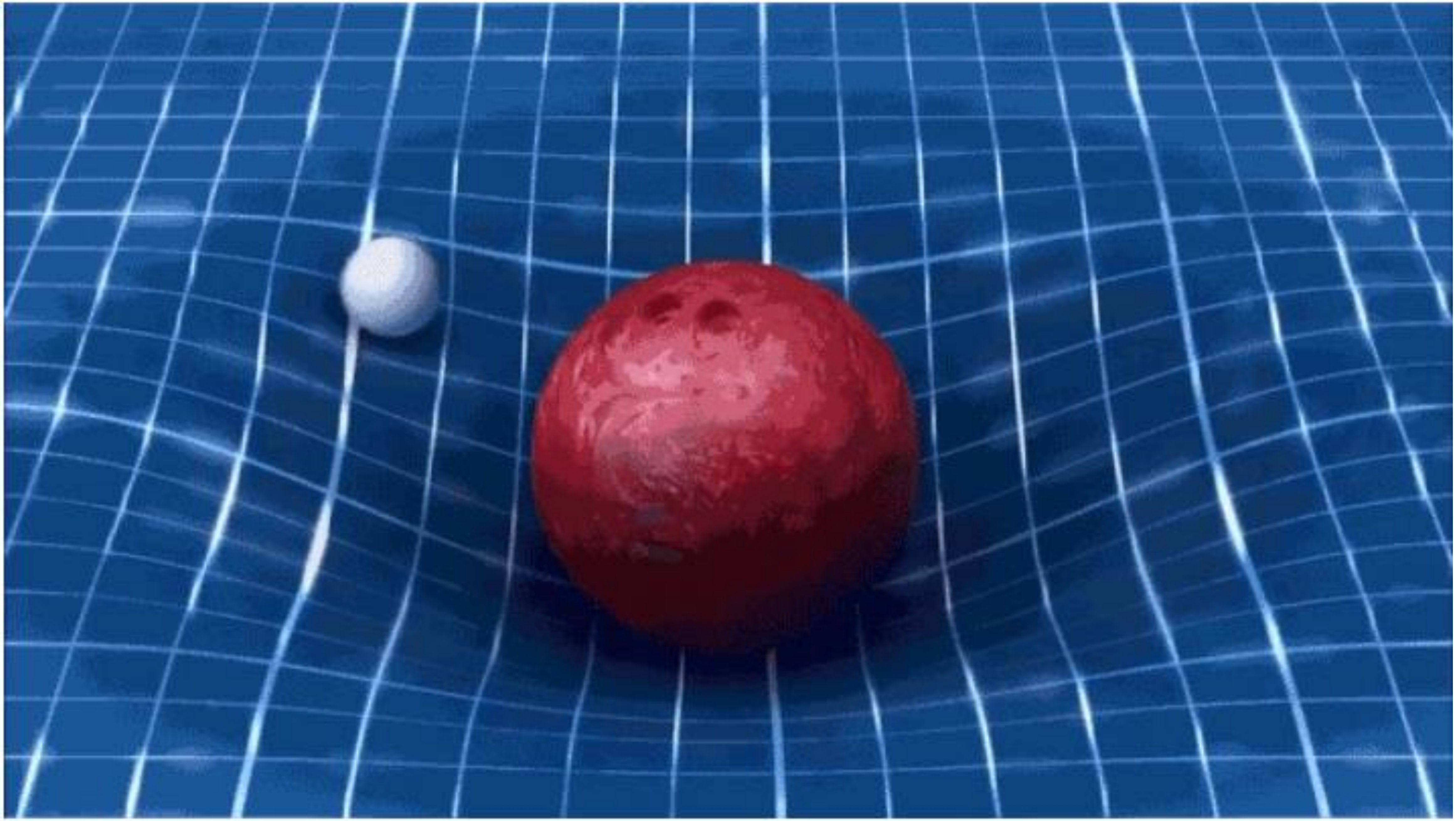
- Capire come in ogni punto dello spazio attorno a una particella carica questa stabilisce un campo elettrico ***E***, una grandezza vettoriale caratterizzata da modulo, direzione e verso.
- Rendersi conto che il campo elettrico ***E*** può spiegare come mai una particella carica può esercitare una forza elettrostatica ***F*** su una seconda particella anche se esse non sono in contatto.
- Spiegare come una piccola carica positiva di prova venga utilizzata (in modo astratto) per misurare il campo elettrico in qualsiasi punto dato.

Componenti di un vettore





Concetto di campo

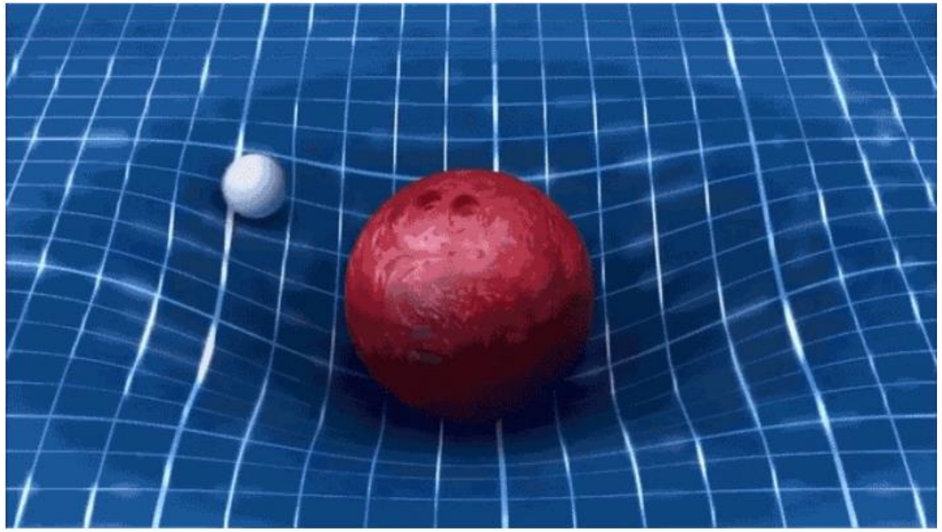


Concetto di campo

Le forze di campo possono agire attraverso lo spazio, producendo un effetto senza bisogno di un contatto fisico diretto fra i corpi. Questo tipo di interazione può essere modellizzato in due fasi:

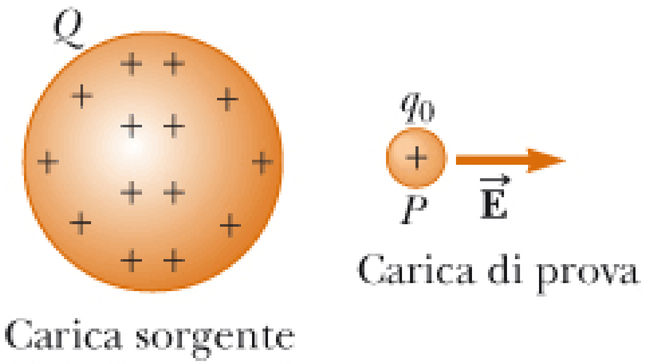
- una particella che agisce da **sorgente** genera un campo
- una particella carica che interagisce con tale campo è soggetta ad una forza.

Seguendo l'approccio in termini di campo, si dice che esiste un campo elettrico nella regione di spazio che circonda una carica elettrica, detta **carica sorgente**. Un'altra carica – detta **carica di prova** – quando entra nella regione di spazio sede del campo elettrico, subisce una forza elettrica.



Un **campo elettrico** in un punto dello spazio può essere definito in funzione della forza elettrica agente su una **carica di prova** q_0 posta in quel punto. Per convenzione, *una particella di prova trasporta sempre una carica elettrica positiva*. Con questa convenzione, introduciamo il vettore campo elettrico $\boldsymbol{E}$ in un punto dello spazio definito come la forza elettrica $\boldsymbol{F_e}$ agente su una carica di prova posta in quel punto diviso per la carica q_0 della particella di prova:

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}_e}{q_0}$$



Nel SI il vettore ***E*** si misura in newton su coulomb (N/C).

La presenza della carica di prova non è necessaria affinché esista il campo. La carica di prova serve semplicemente a *rivelare* il campo elettrico.

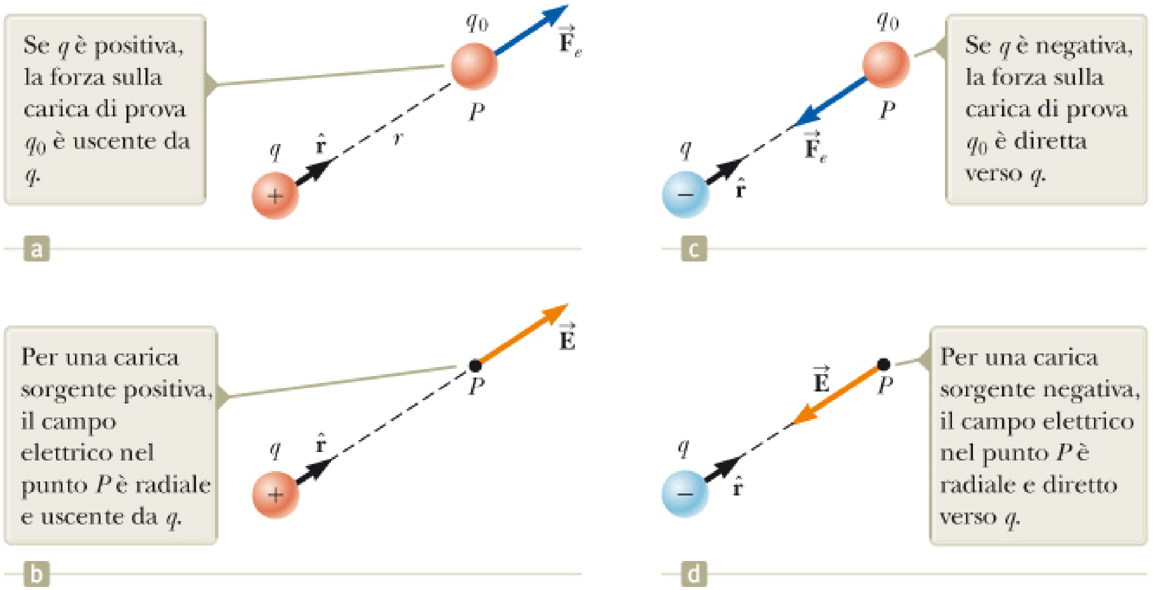
Quindi, un campo elettrico esiste in un punto se una particella carica di prova posta a riposo in quel punto subisce una forza elettrica.

Poiché la forza è un vettore, il campo elettrico è pure un vettore.
Chiamiamo **sorgente** la o le particelle che creano il campo.
Il campo elettrico della particella sorgente è presente indipendentemente che si introduca oppure no una particella di prova nel campo. La particella di prova si usa solo per misurare la forza e quindi rivelare l'esistenza del campo e valutarne l'intensità.
Dobbiamo assumere che *la carica di prova* q_0 *sia piccola abbastanza da non perturbare la distribuzione di carica responsabile del campo elettrico*.

Il vettore ***E*** ha le unità SI di newton su coulomb *(N/C)*, analoghe alle unità *N/kg* per il campo gravitazionale. La direzione orientata di ***E*** è la stessa di quella di $\boldsymbol{F}_e$ poiché abbiamo usato la convenzione della carica positiva per la particella di prova.

Una volta noto il campo elettrico in un punto dello spazio, la forza su qualsiasi particella con carica q posta in quel punto si può calcolare come

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



Consideriamo una carica puntiforme q posta a distanza r da una carica di prova q_o. In base alla legge di Coulomb, la forza che si esercita sulla carica di prova da parte di *q* è

$$\vec{F}_e = k_e \frac{q q_0}{r^2} \hat{r}$$

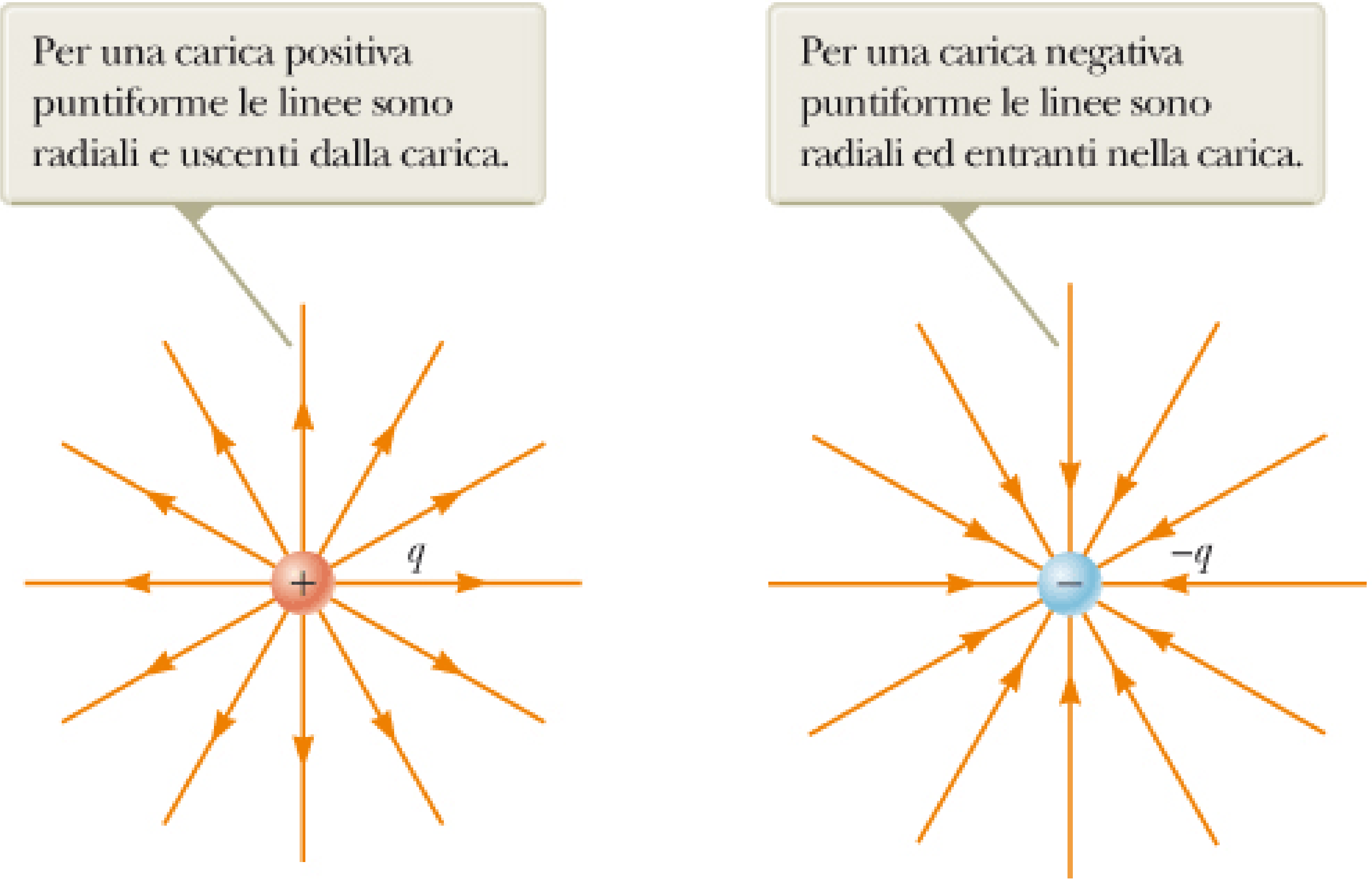
Troviamo che il campo elettrico creato da *q* in un punto *P*, che è la posizione di q_o, è

$$\vec{E} = \frac{F_e}{q_0} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

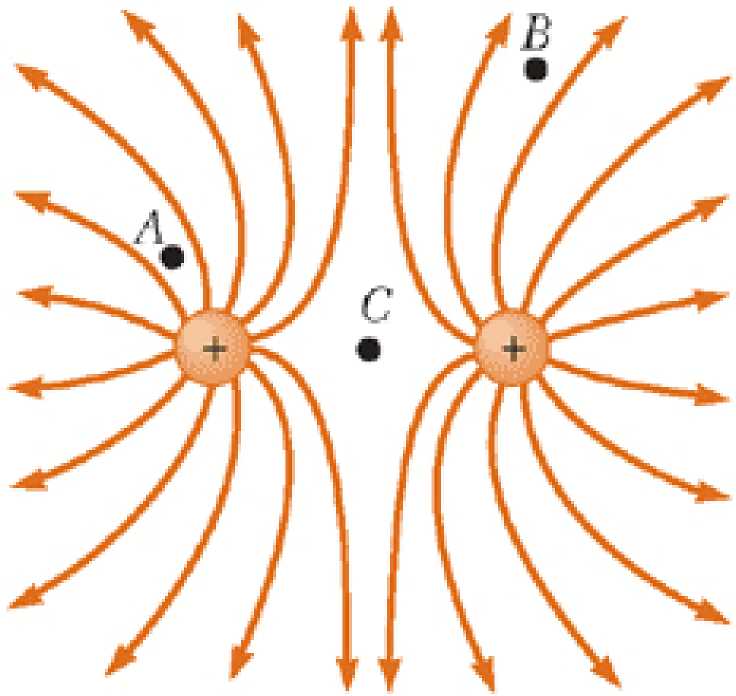
Il campo elettrico totale in un dato punto nello spazio, generato da un insieme di particelle cariche, è uguale alla somma vettoriale dei campi elettrici in quel punto generati da tutte le particelle.

$$\vec{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

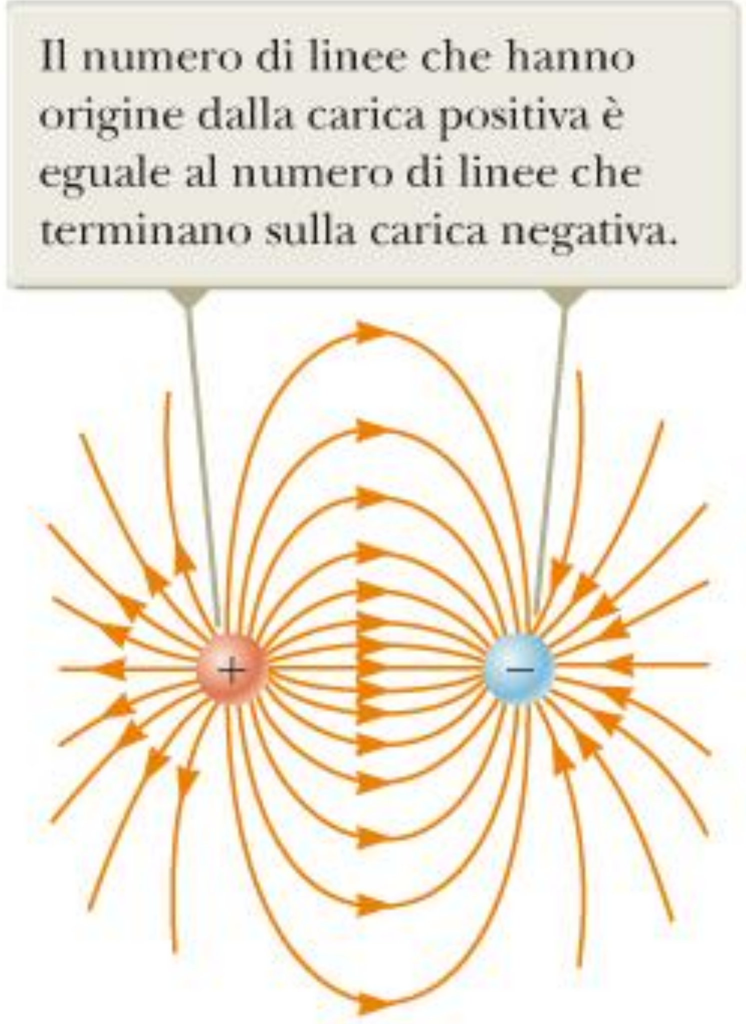
Linee di campo elettrico



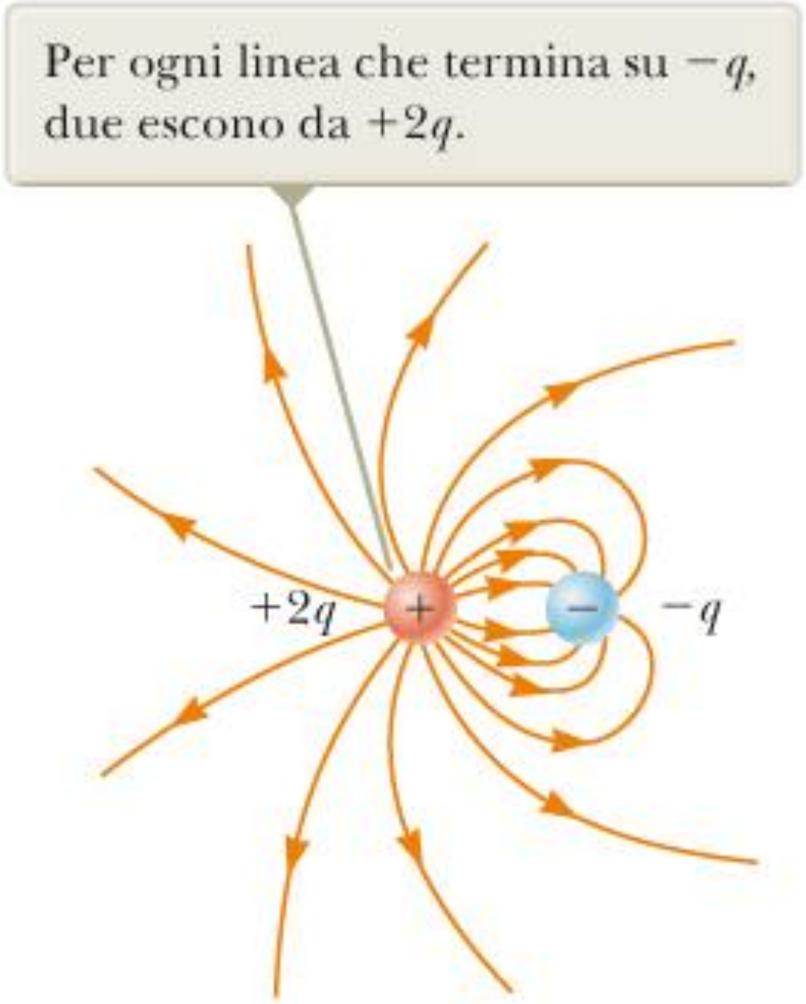
Linee di campo elettrico



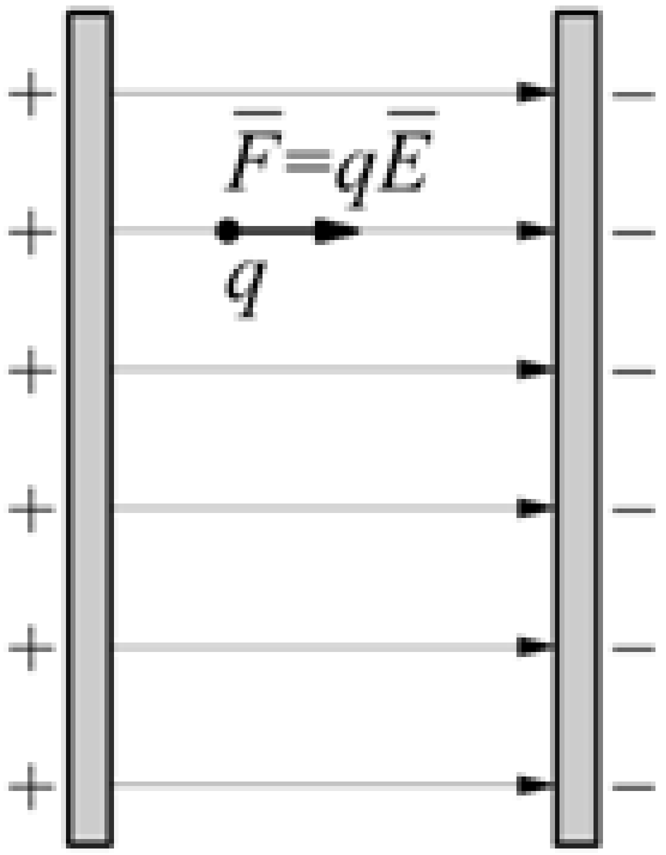
(a)



Linee di campo elettrico



Linee di campo elettrico



La fig. illustra una porzione di una lamina piana non conduttrice di estensione infinita, su cui è uniformemente distribuita una carica positiva. Provando con la carica esplorativa in qualunque punto da entrambi i lati, si riconosce come la forze elettrostatica sia sempre diretta perpendicolarmente al piano e abbia verso uscente da esso. La direzione perpendicolare è intuibile: la forza esercitata sulla carica esploratrice da ogni punto della superficie carica si può accoppiare con analoga ed equivalente forza esercitata sulla medesima da un altro punto della superficie simmetrico al primo. Tal che la risultante di tale coppia ha sempre direzione perpendicolare al piano della superficie stessa; e il verso di tutte le risultanti è sempre uscente dal piano. Di conseguenza il vettore campo elettrico somma di tali risultanti, nonché la linea di campo passante per il punto di collocazione della carica esploratrice, sono sempre diretti perpendicolarmente e orientati con verso uscente,

Essendo la carica uniforme, tali devono essere le linee di campo. Un campo siffatto è detto campo elettrico uniforme, volendo significare che in tutti i punto del campo il vettore campo elettrico ha sempre stesso modulo, direzione e verso.

Idee chiave

- Ogni particella carica instaura un campo elettrico (quantità vettoriale) nello spazio circostante. Se si colloca una seconda particella carica in un punto di quello spazio, essa subisce una forza elettrostatica in funzione del modulo, della direzione e del verso che il vettore campo elettrico presenta in quel punto.
- Il ***campo elettrico E*** in un punto viene definito in rapporto alla forza elettrostatica ***F*** che verrebbe esercitata in quel punto su una carica esplorativa di prova q_0 di segno positivo li collocata.

Obiettivi di apprendimento

- Disegnare un dipolo elettrico, le sue cariche (intensità e segno), l'asse del dipolo e la direzione del momento di dipolo.
- Trovare la direzione del campo elettrico in qualsiasi punto sull'asse del dipolo, anche nel segmento compreso tra le cariche.
- Illustrare come l'equazione del campo elettrico generato da un dipolo possa ricavarsi dalle equazioni che descrivono il campo dovuto a ciascuna delle due cariche che costituiscono il dipolo.
- Saper confrontare come diminuisce l'intensità di campo elettrico allontanandosi e allontanandosi da una particella, riconoscendo quale delle due intensità decresce più rapidamente.
- Applicare la relazione che intercorre tra il modulo *p* del momento dipolare, la distanza *d* tra le due cariche e il modulo *q* di ciascuna carica.
- Applicare, per un punto lontano giacente sull'asse dipolare, la relazione che intercorre tra l'intensità di campo elettrico ***E***, la distanza *z* dal centro del dipolo e il modulo ***p*** del momento dipolare, o al suo posto il prodotto tra l'intensità di carica *q* e la separazione d tra le due cariche.

Esempio

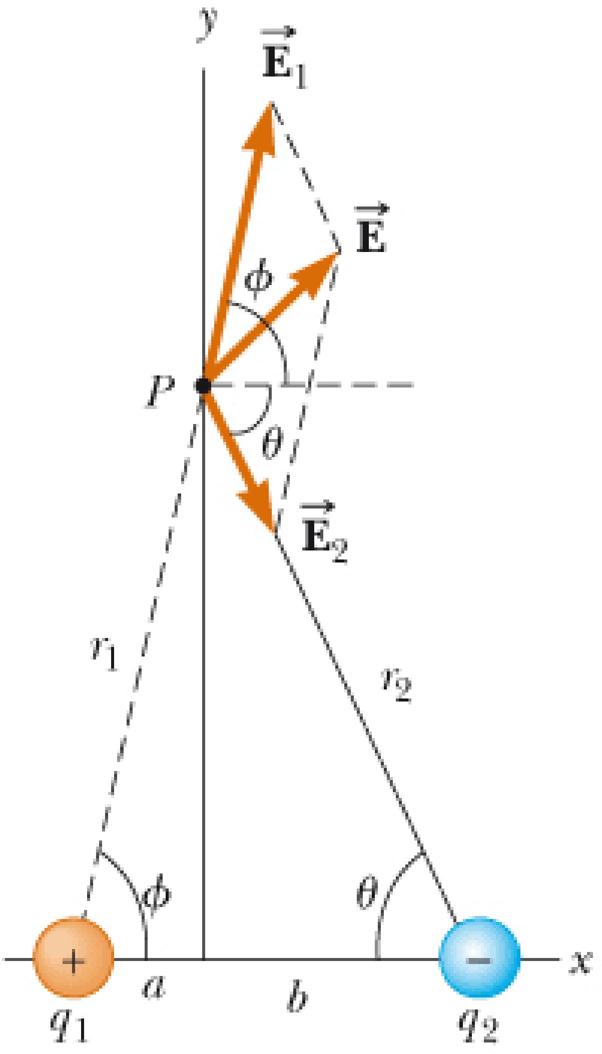
Le cariche q_1 e q_2, come mostrate in fig., si trovano sull'asse x, rispettivamente a distanza a e b dall'origine.
(a) Si trovino le componenti del campo elettrico risultante nel punto P sull'asse y.

$$E_1 = k_e \frac{|q_1|}{r_1^2} = k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2}$$

$$E_2 = k_e \frac{|q_2|}{r_2^2} = k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2}$$

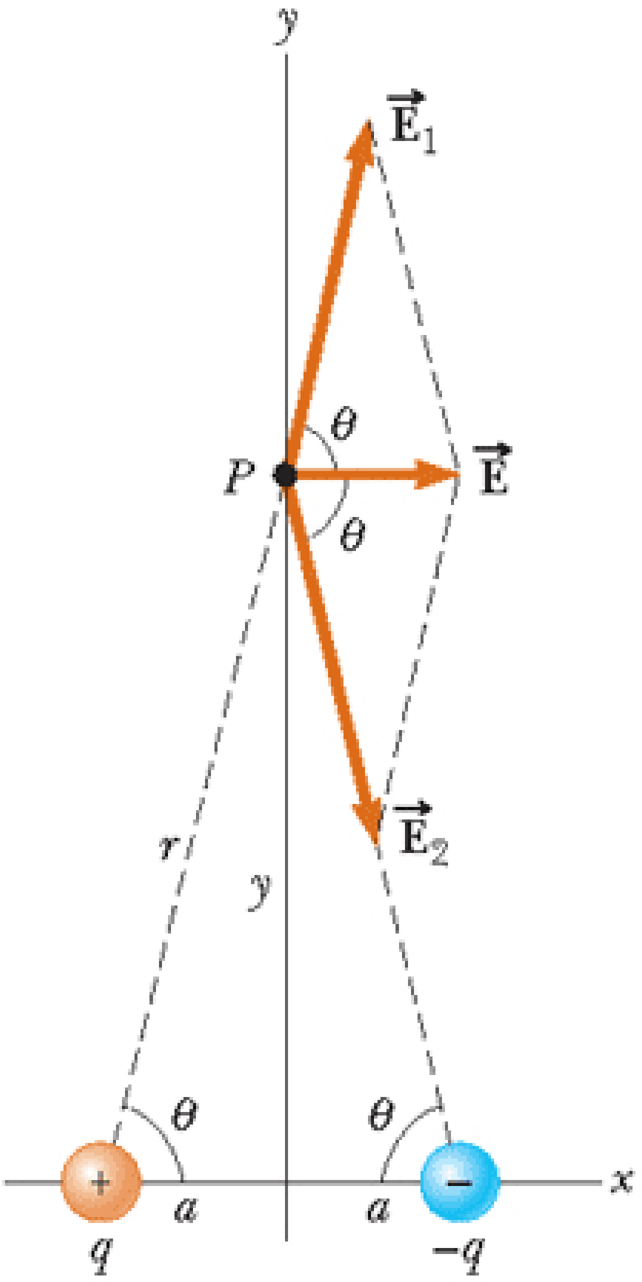
$$\overrightarrow{E_1} = k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2} cos\phi \hat{\imath} + k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2} sin\phi \hat{\jmath}$$

$$\overrightarrow{E_2} = k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2} cos\theta \hat{\imath} - k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2} sin\theta \hat{\jmath}$$



Dipolo elettrico

Un **dipolo elettrico** è costituito da una carica puntiforme positiva *q* e una carica puntiforme negativa –*q* separate da una distanza *2a*, come in Fig. Come vedremo gli atomi neutri e le molecole, quando sono posti in un campo elettrico esterno, si comportano come dipoli. Inoltre, molte molecole, sono dipoli permanenti.



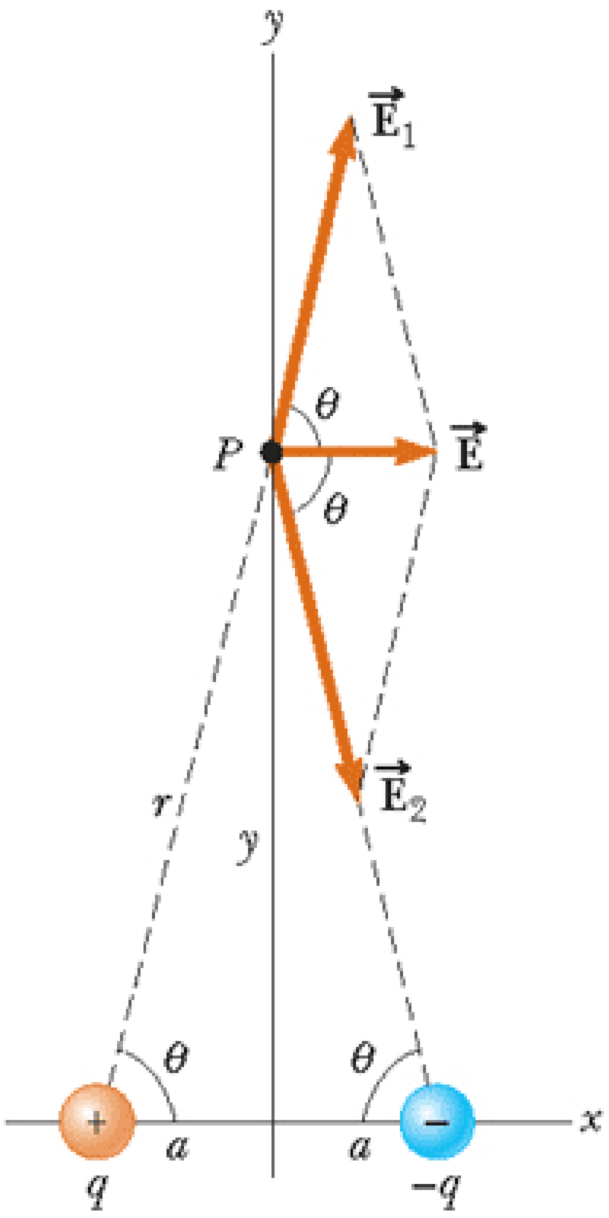
Esempio

(b) Si calcoli il campo elettrico nel punto *P* nel caso particolare in cui $|q_1|=|q_2|$ e $a = b$.

$$E_1 = E_2 = k_e \frac{q}{r^2} = k_e \frac{q}{y^2 + a^2}$$

$$E = 2k_e \frac{q}{y^2 + a^2} \cos\theta =$$

$$= 2k_e \frac{q}{y^2 + a^2} \frac{a}{\left(y^2 + a^2\right)^{1/2}} = k_e \frac{2qa}{\left(y^2 + a^2\right)^{3/2}}$$



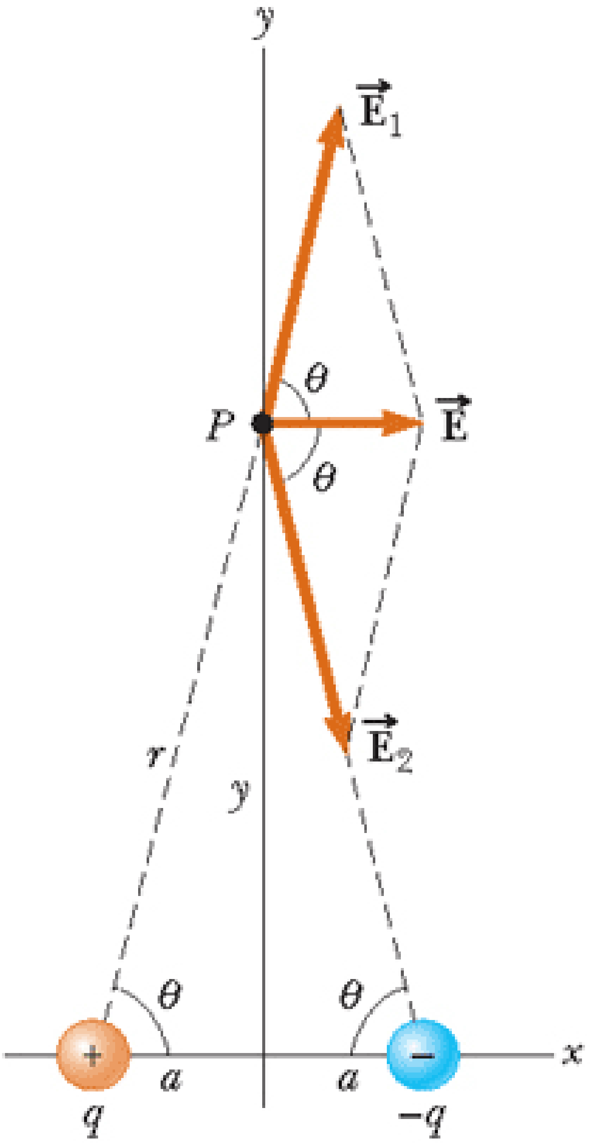
Esempio

(c) Trovare il campo elettrico nei punti *y* >> *a* lontani dal dipolo.

$$E \approx k_e \frac{2qa}{y^3}$$

Il prodotto 2qa viene chiamato *momento di dipolo elettrico, p*

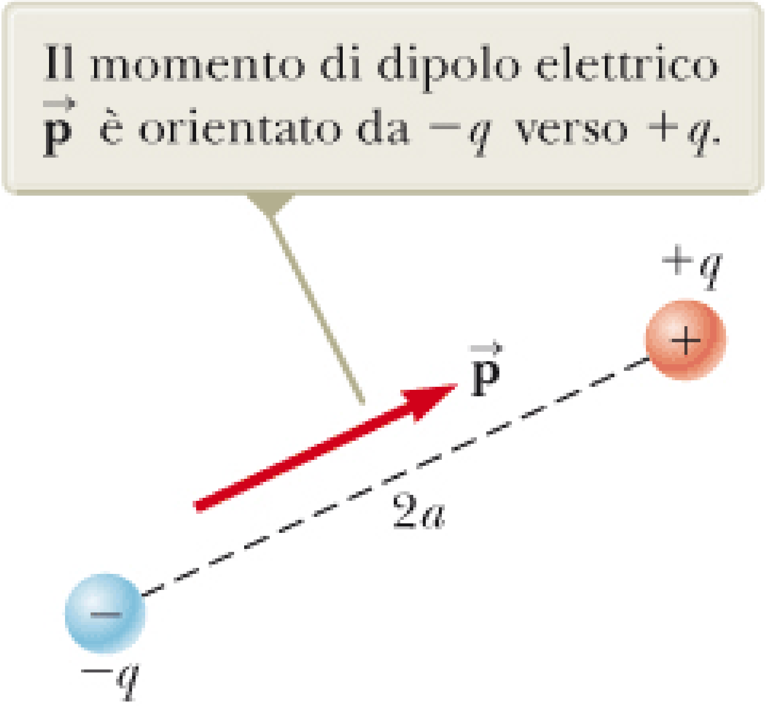
$$E \approx k_e \frac{p}{y^3}$$



Momento di dipolo

Si definisce **momento di dipolo elettrico** di questa configurazione il vettore $\vec{p}$ che ha la direzione della retta congiungente le cariche, il verso da $-q$ a $+q$ e modulo

$$p \equiv 2aq$$



Idee chiave

- Il dipolo elettrico è costituito da una coppia di cariche puntiformi aventi stessa intensità q ma segno opposto, separate da una distanza a, relativamente piccola.
- Il momento di dipolo elettrico $\boldsymbol{p}$ ha modulo $2qa$, direzione coincidente con l'asse su cui giacciono le sue cariche e verso orientato dalla carica negativa a quella positiva.
- Il modulo del campo elettrico che si sperimenta in un punto sull'asse dipolare molto lontano dal dipolo stesso è una funzione del prodotto qa, ovvero del modulo p del dipolo del momento angolare.
- A causa della dipendenza da $1/y^3$, l'intensità del campo dovuto a un dipolo decresce con la distanza più rapidamente di quanto avvenga nel caso di una corrispondente carica singola, in cui dipende da $1/r^2$.

- Trovare per una distribuzione uniforme di cariche, la densità di carica lineare λ lunga una linea, la densità di carica superficiale σ su una superficie e la densità di carica volumica ρ in un volume.
- Trovare per una carica uniformemente distribuita lungo una linea, il campo elettrico netto in un dato punto vicino alla linea, spezzettando la distribuzione in elementi di carica *dq* e poi sommando con un'integrazione tutti i vettori di campo *dE* generati da ogni elemento nel punto desiderato.
- Spiegare l'utilità della considerazioni di simmetria per semplificare il calcolo del campo elettrico in un punto vicino a una distribuzione di carica lineare uniforme.

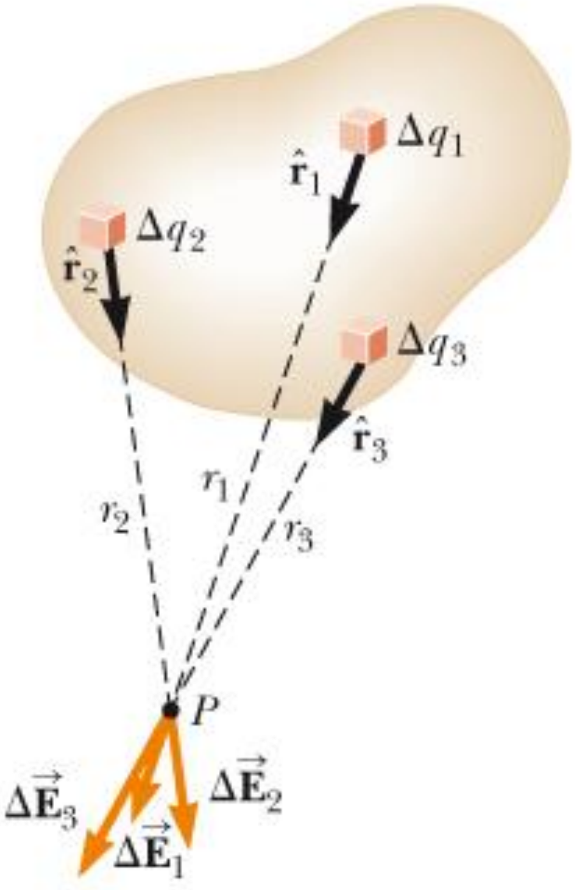
In molti casi abbiamo a che fare con una distribuzione continua di carica invece che con una distribuzione discreta.
Per prima cosa si divide la distribuzione di carica in piccoli elementi, ognuno dei quali, contiene una piccola carica Δq.

Il campo elettrico in *P* prodotto da un elemento di carica Δq è

$$\Delta\vec{E} = k_e \frac{\Delta q}{r^2}\hat{r}$$

Il campo elettrico totale, dovuto a tutti gli elementi della distribuzione di carica è approssimativamente

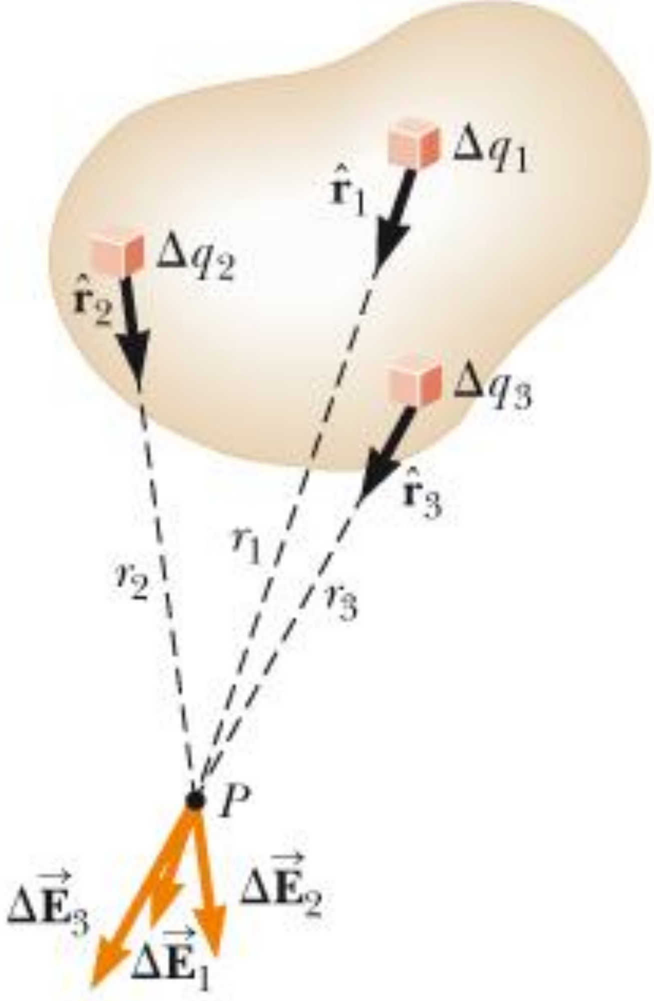
$$\vec{E} \approx k_e \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2}\hat{r}_i$$



Distribuzione di carica

Poiché la distribuzione di cariche può essere approssimata con una distribuzione continua, il campo totale per $\Delta q \to 0$, diventa

$$\vec{E} = k_e \lim_{\Delta q_i \to 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$



Distribuzione di carica

Per questi calcoli è conveniente utilizzare il concetto di **densità di carica** secondo le seguenti notazioni:

- Se una carica *Q* è uniformemente distribuita in un volume *V*, la **densità volumetrica di carica**, ρ, è definita come

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

  L'unità di misura è C/m^3

- Se una carica *Q* è uniformemente distribuita su una superficie *A*, la **densità superficiale di carica**, σ, è definita come

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

  L'unità di misura è C/m^2

- Se una carica *Q* è uniformemente distribuita lungo una linea di lunghezza *l*, la **densità lineare di carica**, λ, è definita come

$$\lambda = \frac{Q}{l}$$

  L'unità di misura è *C/m*

Esercizio

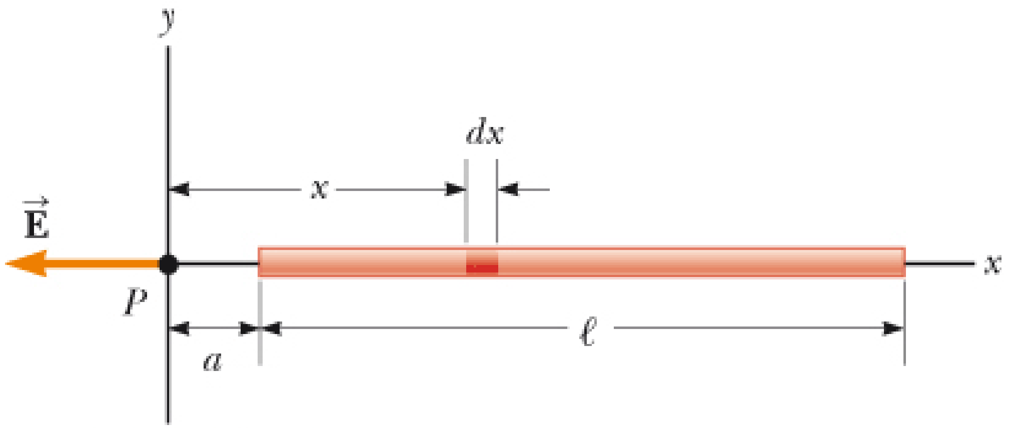
Una bacchetta di lunghezza *l* porta una carica totale *Q* positiva uniformemente distribuita con densità λ. Si calcoli il campo elettrico in un punto *P* lungo la retta su cui giace la bacchetta ad una distanza *a* da un'estremità.

$$dE = k_e \frac{dq}{x^2} = k_e \frac{\lambda dx}{x^2}$$

$$E = \int_a^{l+a} k_e \lambda \frac{dx}{x^2}$$

$$E = k_e \lambda \int_a^{l+a} \frac{dx}{x^2} = k_e \lambda \left[-\frac{1}{x} \right]_a^{l+a}$$

$$E = k_e \frac{Q}{l} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{l+a} \right) = \frac{k_e Q}{a(l+a)}$$



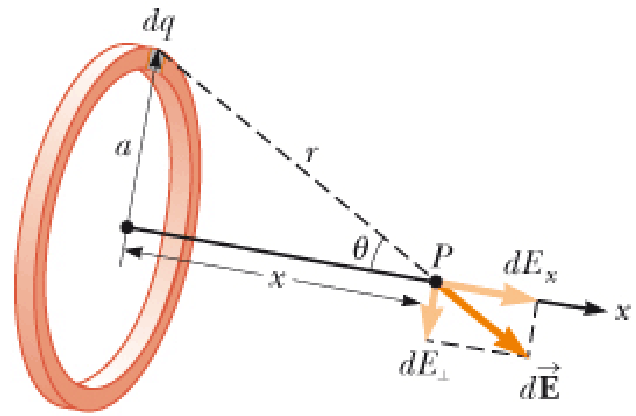
Esercizio

Un anello di raggio *a* ha una carica positiva *Q* uniformemente distribuita. Si calcoli il campo elettrico lungo l'asse dell'anello in un punto *P* a distanza *x* dal centro dell'anello.

$$dE_x = k_e \frac{dq}{r^2} cos\theta = k_e \frac{dq}{a^2 + x^2} cos\theta$$

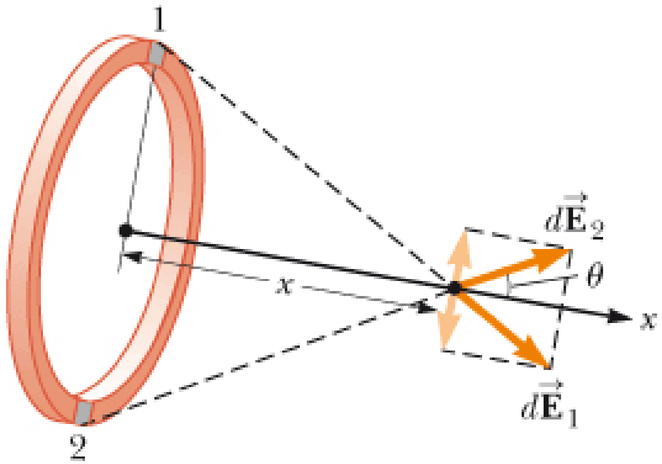
$$cos\theta = \frac{x}{r} = \frac{x}{(a^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$dE_x = k_e \frac{dq}{a^2 + x^2} \left[\frac{x}{(a^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}} \right] = \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} dq$$



$$E_x = \int \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} dq = \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \int dq$$

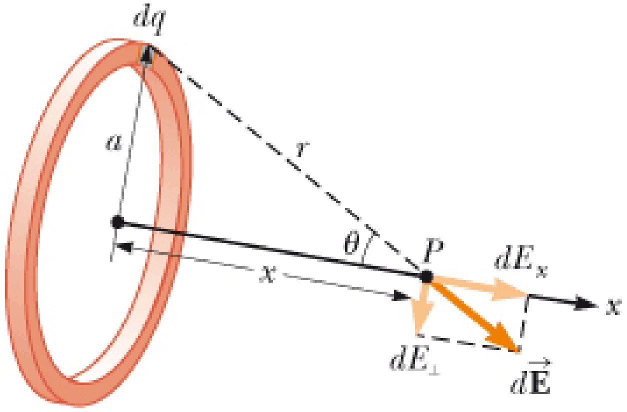
$$E = \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} Q$$



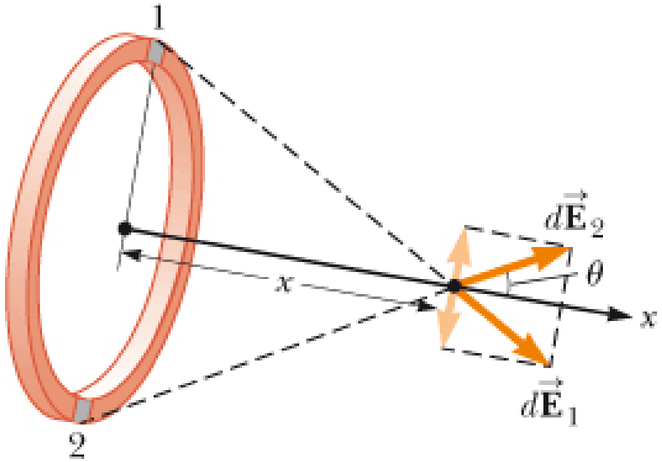
Esercizio

Per un punto dell'asse centrale talmente lontano da essere $z \gg R$, l'espressione z^2+R^2 si può approssimare a z^2. Abbiamo allora:

$$E = \frac{k_e x}{(a^2+x^2)^{\frac{3}{2}}} Q$$



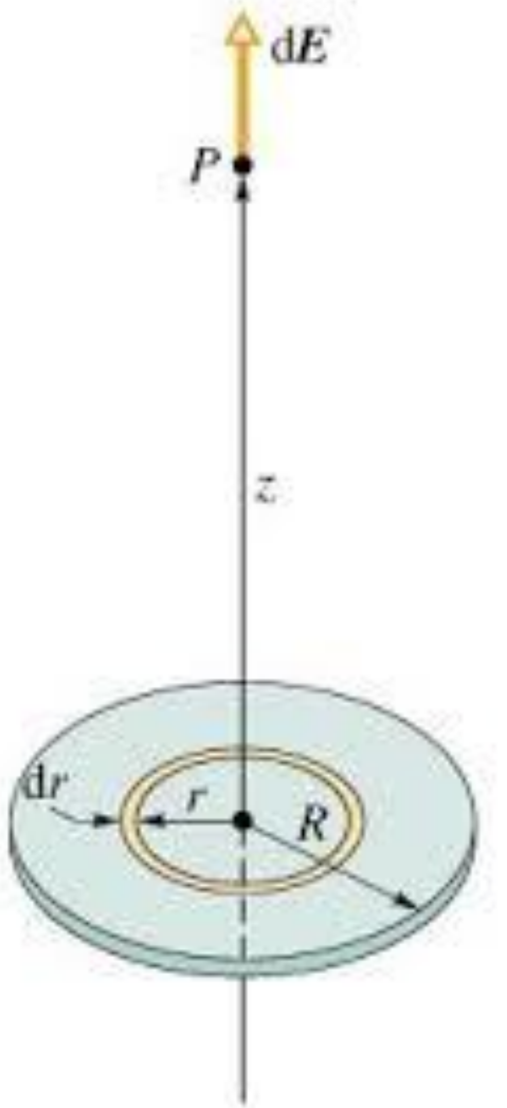
$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{x^2}$$



Campo elettrico generato da un disco carico

Isoliamo mentalmente sul disco un anello concentrico di raggio $r<R$, nel quale possiamo scegliere un elemento di carica dq. Il suo contributo elementare al campo elettrico $d\mathbf{E}$ nel punto P è dato in modulo da

$$dE = \frac{dqz}{4\pi\varepsilon_0(z^2 + r^2)^{3/2}}$$



Qui il vettore campo elettrico è diretto come l'asse z.
Per trovare il campo elettrico totale netto che sussiste in P ci basta ora integrare dal centro del disco, ove $r=0$, fino al suo margine $r=R$, in modo da sommare i contributo di tutti gli anelli elementari sull'intera superficie del disco. La variabile dell'integrazione è dunque r. Introduciamo questa variabile nell'equazione sostituendo a dq la sua espressione in funzione in funzione di dr.

$$dq = \sigma dA = \sigma(2\pi r dr)$$

Dopo qualche semplificazione possiamo scrivere l'integrale come

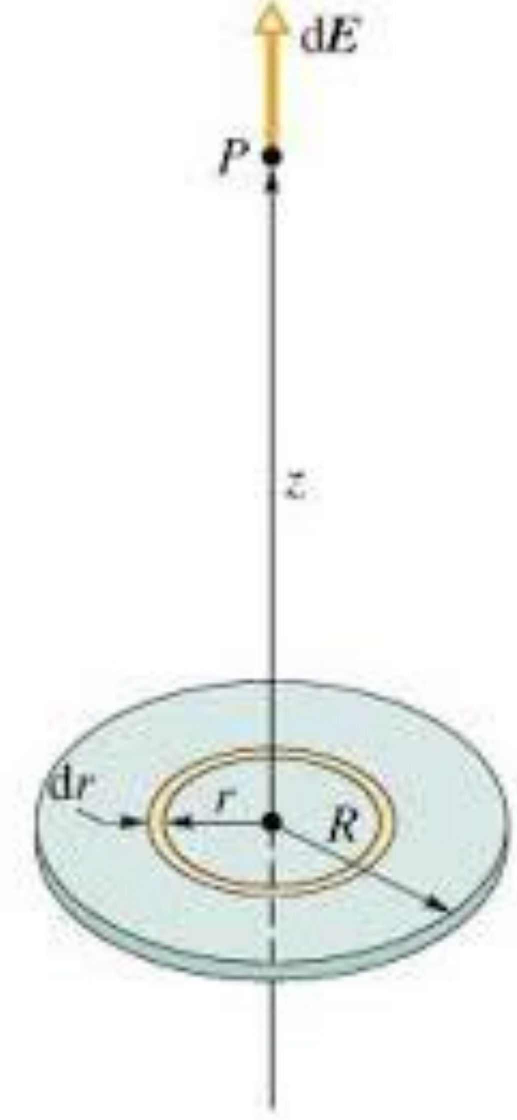
$$E = \int dE = \frac{\sigma z}{2\varepsilon_0}\int_0^R (z^2+r^2)^{3/2}(2r)dr$$

La soluzione di questo integrale è

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

Con qualche passaggio si ottiene

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



Obiettivi di apprendimento

- Applicare, per una particella che si trovi in un campo elettrico esterno (un campo generato da altre cariche) la relazione che intercorre tra il campo elettrico ***E*** esistente in quel punto, la carica *q* della particella e la forza elettrostatica ***F*** agente sulla particella, nonché identificare la relazione tra la direzione del campo e quello della forza, a seconda che la carica della particella sia positiva o negativa.
- Indicare, disegnando un dipolo elettrico immerso in un campo elettrico esterno, le direzioni ed i versi del campo, del momento di dipolo e delle forze elettrostatiche agenti sulle due estremità del dipolo, nonché il senso in cui tende a ruotare il dipolo e l'intensità della forza risultante su di esso.
- Esprimere il momento torcente che agisce su un dipolo elettrico situato in un campo elettrico esterno mediante il prodotto vettoriale tra il vettore momento del dipolo e il vettore campo elettrico sia calcolandone modulo e angolo di direzione sia in notazione coi versori
- Spiegare il procedimento di Millikan per misurare la carica elementare.

Forza elettrica

Quando una particella di carica q e massa m è posta in un campo elettrico ***E***, la forza elettrica che agisce sulla carica è data da $\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}$. Se questa è l'unica forza agente sulla particella

$$\vec{F}_e = q\vec{E} = m\vec{a}$$

L'accelerazione della particella è quindi data da

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$$

Se ***E*** è uniforme e la particella è libera di muoversi, la forza elettrica sulla particella è costante e possiamo applicare il modello della particella con accelerazione costante.

Esercizio

Una gocciolina d'acqua di massa *3 x 10⁻¹²* *kg* si trova in aria, vicino al terreno, durante un temporale. Un campo elettrico atmosferico pari a *6 x 10³ N/C* è diretto verticalmente verso il basso, in prossimità della gocciolina d'acqua. La gocciolina rimane sospesa nell'aria. Quando vale la carica elettrica della gocciolina?

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_e - F_g = 0$$

$$q(-E) - mg = 0$$

$$q = -\frac{mg}{E} = -\frac{(3 \times 10^{-12} kg)\left(9.8\ \frac{m}{s^2}\right)}{6 \times 10^3\,\frac{N}{C}} = -4.9 \times 10^{-15} C$$

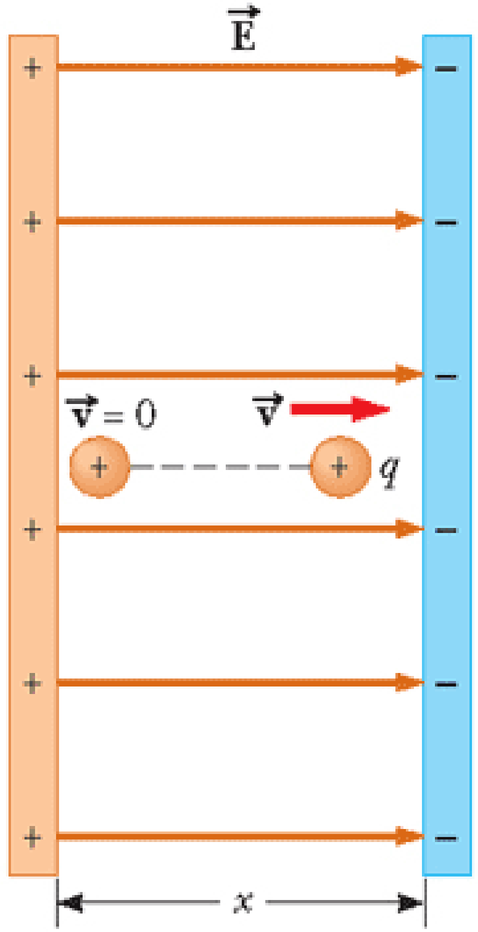
Una carica positiva puntiforme q di massa m è lasciata libera in quiete in un campo elettrico uniforme ***E***, diretto lungo l'asse *x*. Descrivere il suo moto.

$$x_f = x_i + v_i t + \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}at^2 = \frac{qE}{2m}t^2$$

$$v_f = v_i + at = at = \frac{qE}{m}t$$

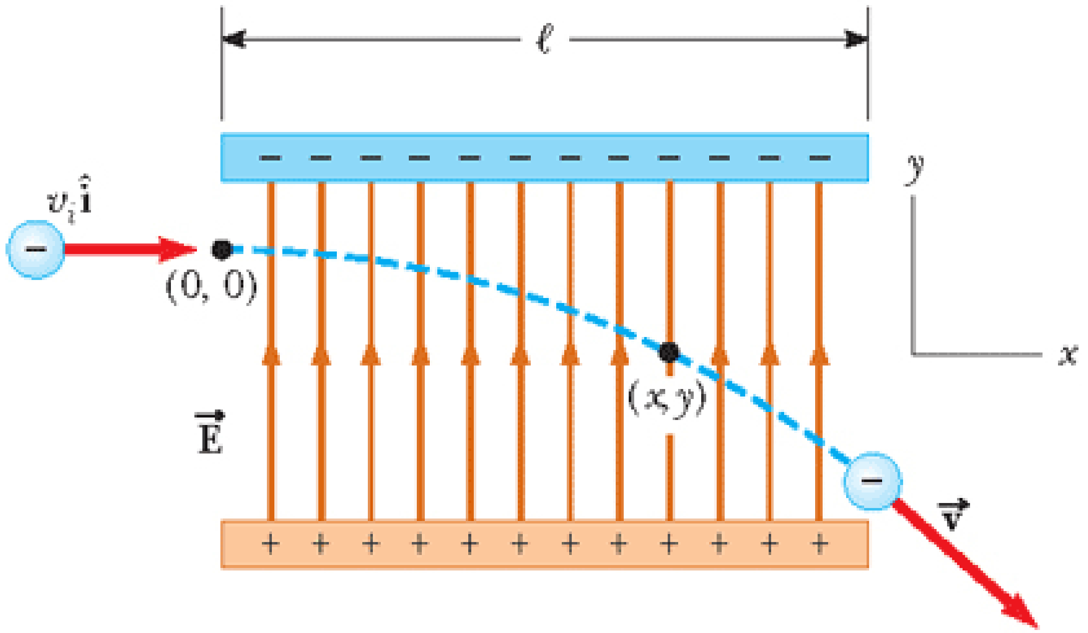
$$v_f^2 = v_i^2 + 2a\left(x_f - x_i\right) = 2ax_f = \left(\frac{2qE}{m}\right)x_f$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{2qE}{m}\right)x = qEx$$



Il campo elettrico, nello spazio racchiuso tra due piastre metalliche cariche di segno opposto è approssimativamente uniforme. Supponiamo che un elettrone di carica –*e* venga sparato orizzontalmente in questo campo con una velocità iniziale v_i. Poiché il campo elettrico ***E*** è nel verso positivo di *y*, l'accelerazione dell'elettrone è nel verso negativo di *y*, ovvero

$$\vec{a} = -\frac{eE}{m_e}\hat{\jmath} = -3.51 \times 10^{13} m/s^2$$



Moto di particelle cariche in un campo uniforme

Poiché l'accelerazione è costante, possiamo applicare le equazioni della cinematica con $v_{xi} = v_i$ e $v_{yi} = 0$. Al tempo t, le componenti della sua velocità sono

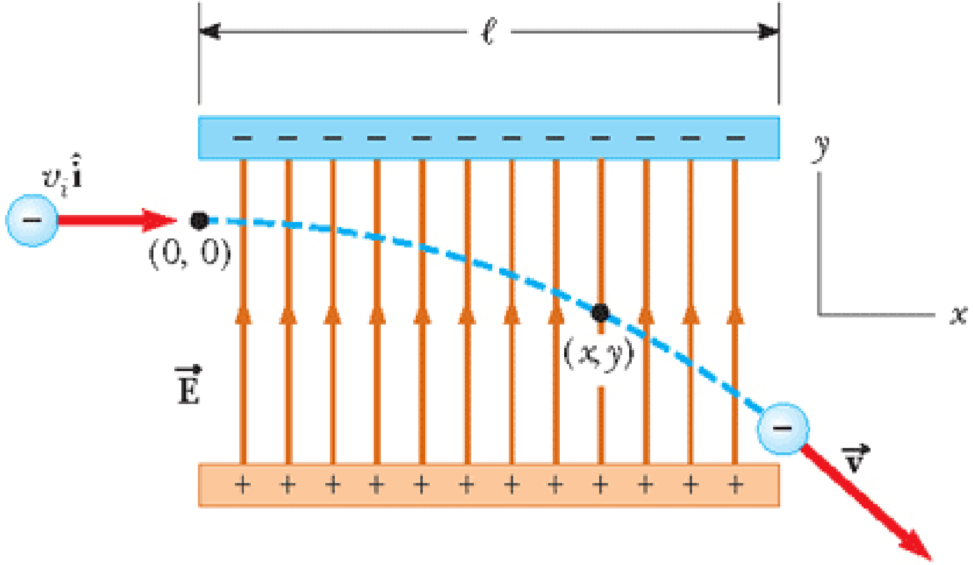
$$v_x = v_i = \text{costante}$$

$$v_y = a_y t = -\frac{eE}{m_e} t$$

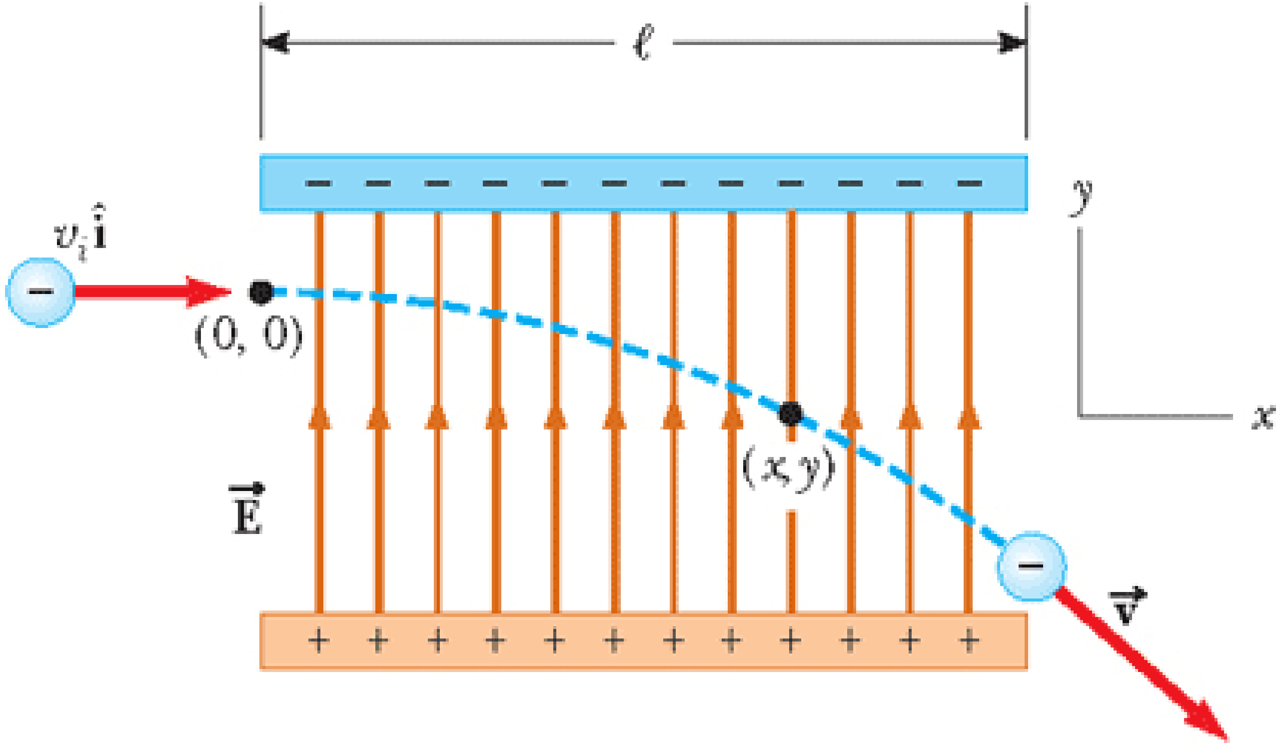
Le sue coordinate in funzione del tempo t sono

$$x_f = v_i t$$

$$y_f = \frac{1}{2} a_y t^2 = -\frac{1}{2}\frac{eE}{m_e} t^2$$



Sostituendo il valore $t = x_f/v_i$, vediamo che y_f è proporzionale a x_f^2. Quindi la traiettoria è una parabola. La traiettoria dell'elettrone in un campo elettrico uniforme ***E*** sotto l'azione di una forza costante di modulo qE ha la stessa forma di quella di una particella in un campo gravitazionale uniforme g sotto l'azione di una forza costante mg.



Esercizio

Un elettrone entra in una regione di campo uniforme, con $v_i = 3 \times 10^6\ m/s$ e $E = 200\ N/C$. La lunghezza orizzontale delle piastre è $l = 0.1\ m$.

a) Trovare l'accelerazione dell'elettrone nel campo elettrico.

$$\vec{a} = -\frac{eE}{m_e}\hat{j} = -\frac{\left(1.6x10^{-19}C\right)\left(200N/C\right)}{9.11x10^{-31}kg}\hat{j} = -3.51x10^{13}\hat{j}m/s^2$$

b) Trovare il tempo impiegato dall'elettrone per attraversare il campo elettrico.

$$\Delta t = \frac{l}{v_i} = \frac{0.1m}{3x10^6 m/s} = 3.33x10^{-8}s$$

c) Qual è lo spostamento verticale Δy dell'elettrone dopo che ha attraversato tutta la regione di campo elettrico?

$$\Delta y = y_f - y_i = \frac{1}{2}a_y t^2$$
$$= -\frac{1}{2}(3.51x10^{13}m/s)(3.33x10^{-8}s)^2$$
$$= -0.0195m = -1.95cm$$

Idee chiave

- Quando una particella di carica *q* si trova in un campo elettrico ***E***, su di essa agisce una forza elettrostatica ***F***

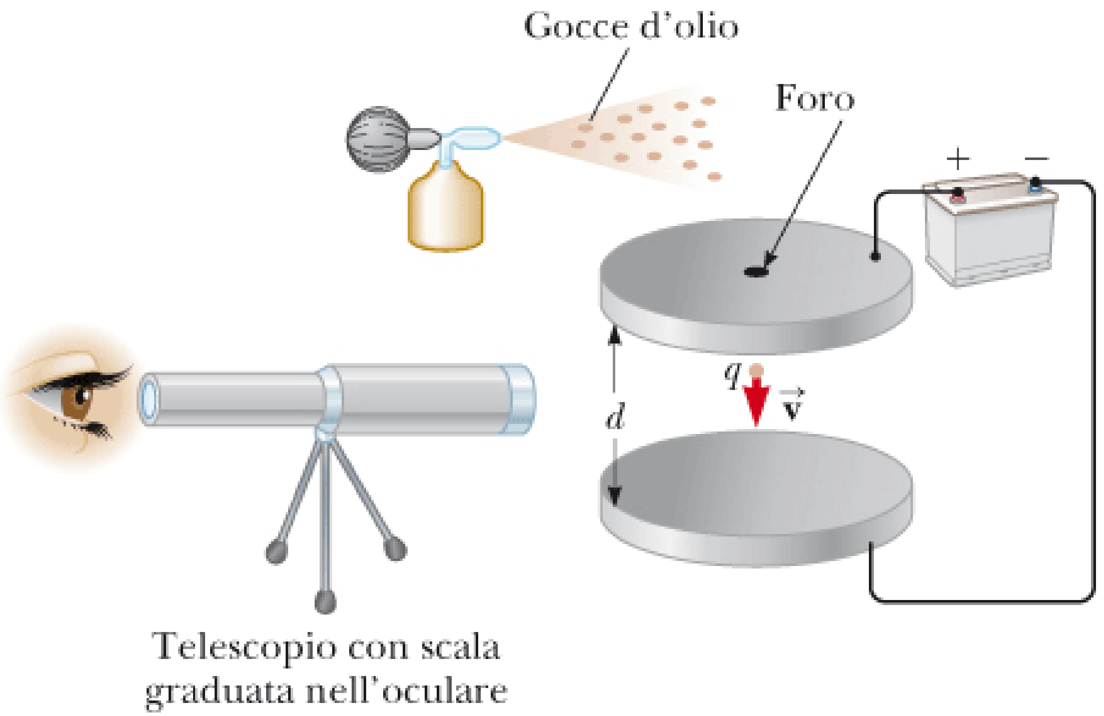
$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

- La direzione della forza è la medesima di quella del vettore campo elettrico in quel punto e il verso è concorde a quest'ultimo se la carica *q* è positiva; viceversa se è discorde.

Esperimento di Millikan

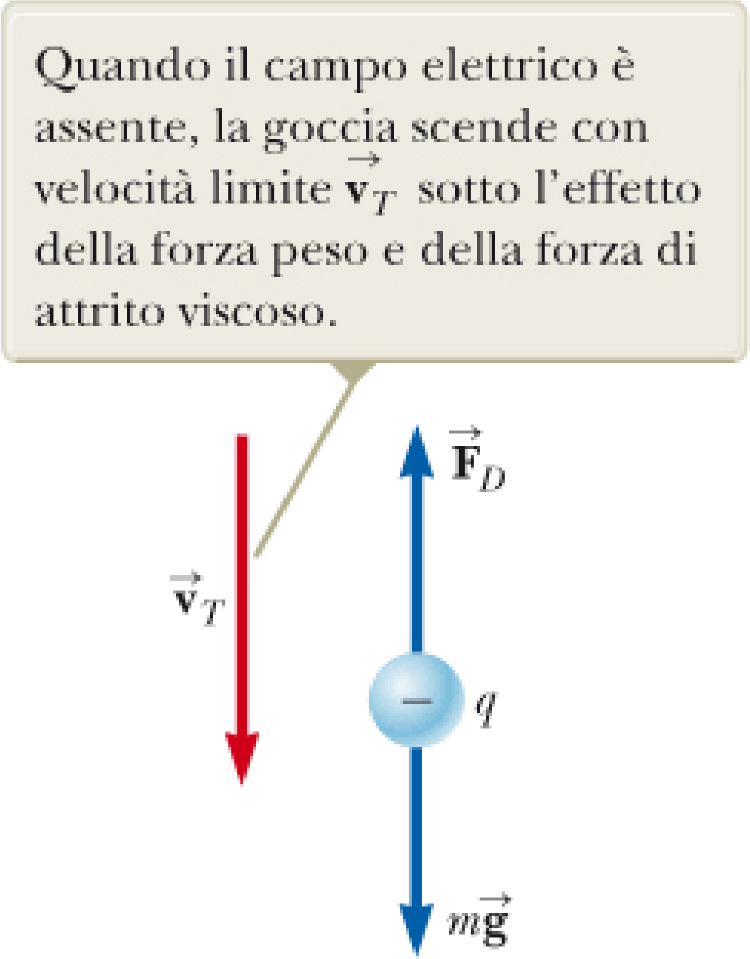
Nel periodo dal 1909 al 1913 R. Millikan eseguì una serie brillante di esperimenti nei quali misurò *e*, la carica elementare dell'elettrone, e dimostrò la natura quantizzata della carica. Il suo apparato (fig.) è costituito da due piastre metalliche parallele. Delle gocce d'olio prodotte con uno spruzzatore vengono fatte passate attraverso un forellino sula piastra superiore. Millikan usò i raggi X per ionizzare l'aria nella camera, in modo che gli elettroni liberati potessero attaccarsi alle goccioline d'olio, che così diventavano cariche negativamente.

Un fascio di luce orizzontale illumina le gocce d'olio che vengono osservate con un telescopio che ha un asse longitudinale perpendicolare al fascio di luce. Le gocce osservate in questo modo appaiono come stelle brillanti su un fondo nero e la velocità con cui ciascuna di esse cade può essere misurata.



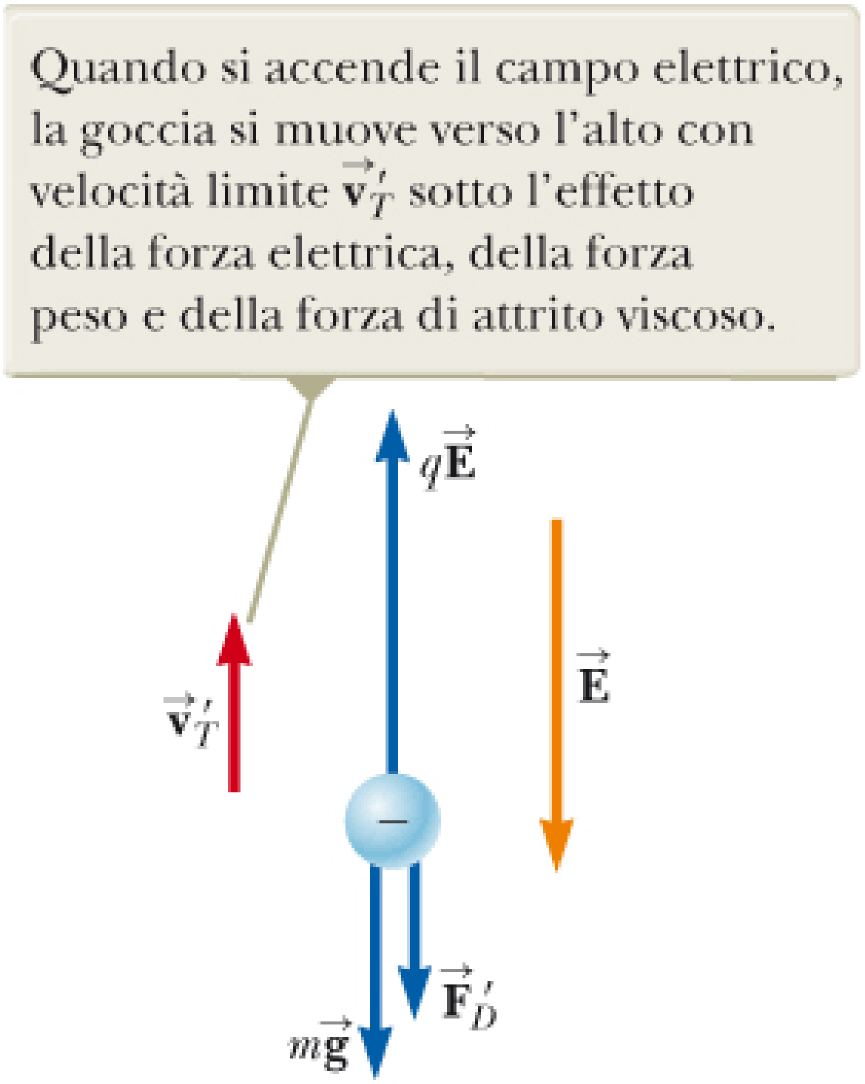
Esperimento di Millikan

Supponiamo di osservare una goccia di massa *m* che trasporta una carica *q* negativa. Se non c'è campo elettrico tra le piastre, le due forze che agiscono sulla goccia sono la forza di gravità $m\mathbf{g}$ agente verso il basso e la forza di attrito viscoso $\mathbf{F}_D$ agente verso l'alto . La forza di attrito viscoso è proporzionale alla velocità della goccia. Quando la goccia raggiunge la sua velocità limite v_P le due forze si bilanciano $(mg=F_D)$.



Esperimento di Millikan

Creiamo ora un campo elettrico tra le piastre. Poiché q è negativa ed $\mathbf{E}$ punta verso il basso, la forza elettrica punta verso l'alto. Se questa forza è abbastanza grande, la goccia si muoverà verso l'alto e di conseguenza la forza di attrito viscoso $\boldsymbol{F'}_D$ sarà diretta verso il basso. Quando la forza elettrica verso l'alto $q\mathbf{E}$ è equilibrata dalla risultante della forza peso e dalla forza di attrito verso il basso $\boldsymbol{F'}_D$, la goccia raggiungerà una nuova velocità limite v'_T diretta verso l'alto.



Momento di dipolo

Facciamo ora l'ipotesi che il dipolo elettrico si trovi in un campo elettrico uniforme esterno ***E*** e che formi con esso un angolo θ.

Ognuna delle cariche è considerata come una particella immersa in un campo elettrico. Le forze agenti sulle due cariche hanno lo stesso modulo ma verso opposto. La forza totale sul dipolo è quindi zero. Le due forze esercitano, però, un momento sul dipolo.

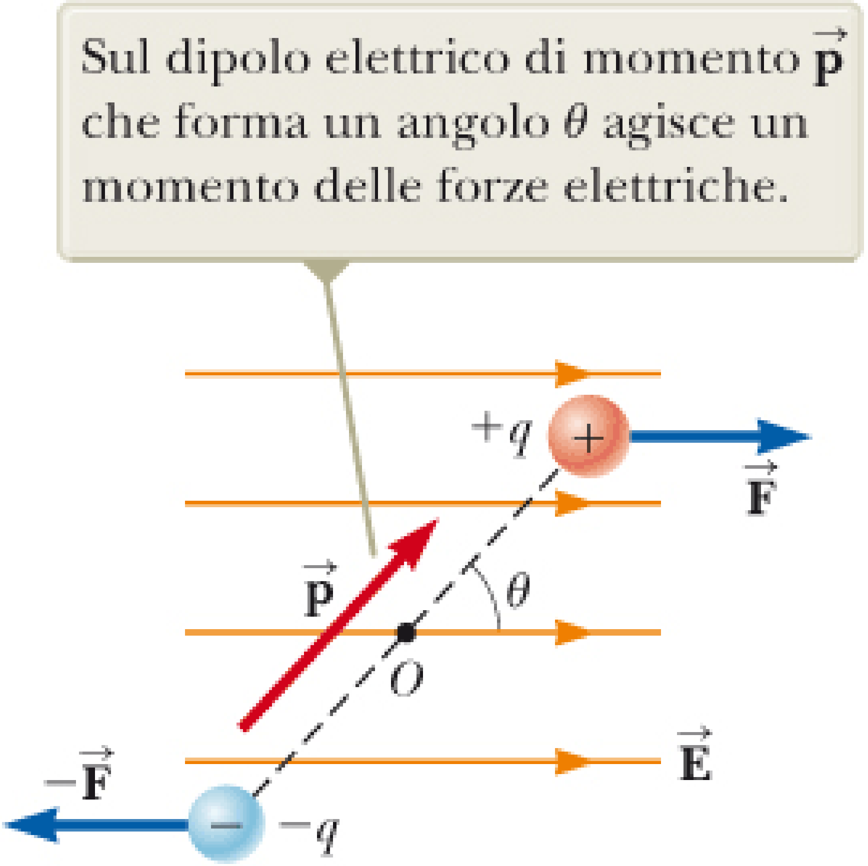
Come risultato, il dipolo tende a ruotare per allineare il suo vettore ***p*** con il campo. Il momento della forza agente sulla carica positiva, ha modulo $Fa\sin\theta$.

Questo momento tende a produrre una rotazione in senso orario. Il momento della forza sulla carica negativa rispetto a *O* ha anch'esso modulo $Fa\sin\theta$ e tende a produrre una rotazione in senso orario. Il momento totale rispetto a *O* è quindi

$$\tau = 2Fa\sin\theta$$

Essendo $F=qE$ e $p=2aq$, possiamo esprimere τ come

$$\tau = 2aqE\sin\theta = pE\sin\theta$$



E' conveniente esprimere il momento in forma vettoriale come prodotto vettoriale dei vettori **p** ed **E**

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