Problemi di Fisica

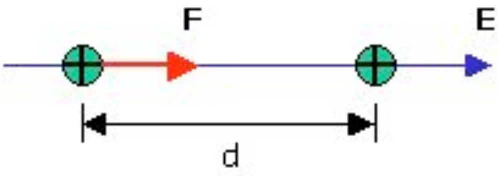
ELETTROMAGNETISMO

Moto di cariche elettriche in campi elettrici

PROBLEMA

Uno ione positivo di massa $m=9{,}0\cdot 10^{-26}$ kg e carica $q=3{,}2\cdot 10^{-19}$ C, partendo da fermo, si muove lungo una linea di forza di un campo elettrico uniforme per un tratto di lunghezza $d=1{,}6$ cm. Sapendo che l'intensità del campo elettrico è $E=1{,}0\cdot 10^{3}$ V/m, calcolare il tempo impiegato dallo ione per percorrere la distanza d.

SOLUZIONE



La forza alla quale è soggetto lo ione positivo ha modulo:

$$F = qE = 3{,}2\cdot 10^{-19}\cdot 1{,}0\cdot 10^{3} = 3{,}2\cdot 10^{-16}\ \text{N}$$

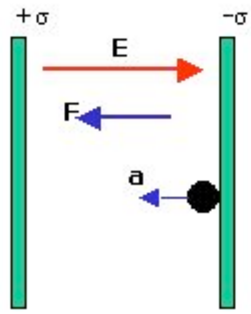
Per il 2° principio della dinamica, l'accelerazione subita dallo ione è:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{3{,}2\cdot 10^{-16}}{9{,}0\cdot 10^{-26}} = 0{,}36\cdot 10^{10}\ \text{m}/\text{s}^2$$

Dalla legge del moto rettilineo uniformemente accelerato ricaviamo il tempo impiegato dallo ione per percorrere la distanza d:

$$d = \frac{1}{2}at^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2d}{a}} = \sqrt{\frac{2\cdot 1{,}6\cdot 10^{-2}}{0{,}36\cdot 10^{10}}} = 3{,}0\cdot 10^{-6}\ \text{s}$$

PROBLEMA



Tra due lastre caricate di segno opposto esiste un campo elettrico uniforme. Un elettrone viene lasciato libero sulla superficie della lastra carica negativamente e colpisce la superficie della lastra opposta, a distanza di 20 cm, in un tempo $t=1{,}5\cdot 10^{-8}$ s. Calcolare il campo elettrico tra le due armature.

SOLUZIONE

Per definizione il campo elettrico è dato da:

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

ed è diretto dall'armatura positiva a quella negativa.
Mentre la forza **F=m a** è diretta nel verso opposto in quanto la carica su cui agisce è un elettrone ($e=1{,}602\cdot 10^{-19}$C; $m=9{,}108\cdot 10^{-31}$kg), ossia una carica di segno negativo.
Pertanto, essendo un moto uniformemente accelerato (con $a<0$), dalla legge del moto ricaviamo l'accelerazione:

$$s = \frac{1}{2}at^2 \Rightarrow a = \frac{2s}{t^2} = \frac{2\cdot 0{,}2}{(1{,}5\cdot 10^{-8})^2} = 0{,}18\cdot 10^{16}\,\text{m}/\text{s}^2$$

per cui:

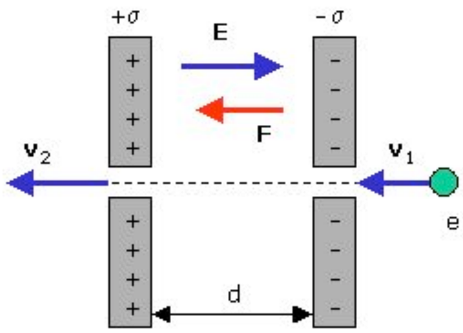
$$F = 9{,}108 \cdot 10^{-31} \cdot 0{,}18 \cdot 10^{16} = 1{,}64 \cdot 10^{-15} N$$

Infine, il campo elettrico tra le due armature sarà:

$$E = \frac{1{,}64 \cdot 10^{-15}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}} = 1{,}02 \cdot 10^{4} N / C$$

PROBLEMA

Un elettrone ($m=9{,}1\cdot10^{-31}$ kg; $e=1{,}6\cdot10^{-19}$ C), passando attraverso due fenditure praticate sulle armature di un condensatore piano e distanti d = 1,0 cm, transita nella regione in cui ha sede il campo elettrico con velocità iniziale $v_1=1{,}0\cdot10^5$ m/s e fuoriesce dal campo con velocità finale $v_2=9{,}0\cdot10^5$ m/s. Calcolare l'intensità del campo elettrico.



SOLUZIONE

Nella regione attraversata dall'elettrone possiamo assumere costante il campo elettrico, nell'ipotesi che le dimensioni delle due fenditure siano trascurabili rispetto alle dimensioni delle armature del condensatore
Grazie al teorema dell' energia cinetica calcoliamo il lavoro compiuto sull'elettrone dalle forze del campo elettrico:

$$L = \Delta E_c = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m \cdot \left(v_2^2 - v_1^2\right) = \frac{1}{2} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot \left[(9{,}0 \cdot 10^5)^2 - (1{,}0 \cdot 10^5)^2\right] = 364 \cdot 10^{-21} J$$

Dalla definizione di lavoro ricaviamo la forza che agisce sulla particella:

$$L = F \cdot d \Rightarrow F = \frac{L}{d} = \frac{364 \cdot 10^{-21}}{1{,}0 \cdot 10^{-2}} = 364 \cdot 10^{-19} N$$

Infine, determiniamo il campo elettrico attraverso la sua definizione:

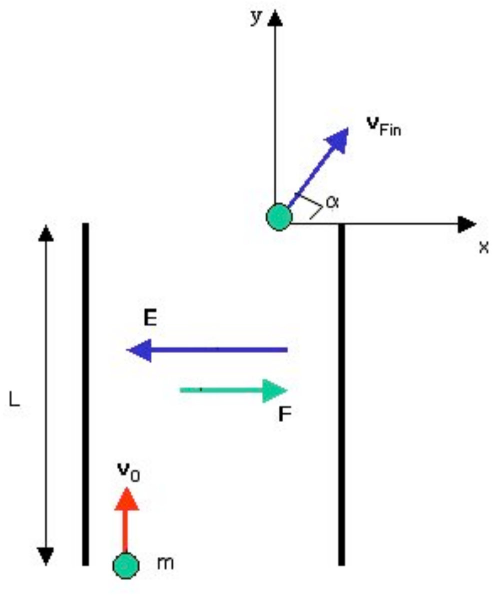
$$E = \frac{F}{e} = \frac{364 \cdot 10^{-19}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 228 N / C$$

PROBLEMA

Un condensatore piano ha un campo elettrico $E=10^4$ V/m e una lunghezza L=5 cm. Un elettrone entra tra le armature con una velocità $v_0=10^7$ m/s ortogonale ad **E**. Calcolare l'angolo di deflessione all'uscita del condensatore ed il modulo della velocità (trascurare gli effetti al bordo).

SOLUZIONE

Dalla definizione di campo elettrico ricaviamo che la forza elettrostatica che agisce sull'elettrone è data da:



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

per cui **F** ha la stessa direzione di **E** ma verso opposto in quanto la carica q è negativa. Pertanto **F** agisce perpendicolarmente alla velocità iniziale dell'elettrone $\mathbf{v}_0$ e lo devia verso destra.

Il moto dell'elettrone in queste condizioni è paragonabile a quello di un proiettile, cioè costituito da due moti indipendenti:

moto rettilineo uniforme lungo l'asse y

$$y = v_{0y} \cdot t \qquad (1)$$

moto uniformemente accelerato lungo l'asse x

$$v_x = a \cdot t \qquad (2)$$

Ricavando il tempo t dalla (1): $t = \frac{L}{v_{0y}}$ e sostituendolo nella (2) otteniamo la componente x della velocità:

$$v_x = a \cdot \frac{L}{v_{0y}} = \frac{F}{m} \cdot \frac{L}{v_{0y}} = \frac{e \cdot E}{m} \cdot \frac{L}{v_{0y}} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4}{9{,}11 \cdot 10^{-31}} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-2}}{10^7} = 8{,}8 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

dove $a = \frac{F}{m}$ (2° principio della dinamica).

Pertanto il modulo della velocità e l'angolo di deflessione sono dati da:

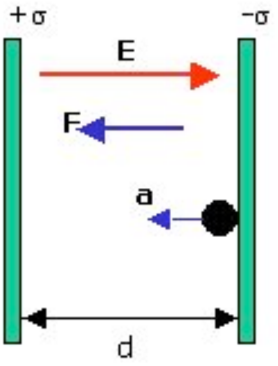
$$v_{Fin} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(8{,}8 \cdot 10^6)^2 + (10^7)^2} = 1{,}33 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

$$tg\alpha = \frac{v_y}{v_x} = \frac{10^7}{8{,}8 \cdot 10^6} = 1{,}14 \Rightarrow \alpha = 48{,}7°$$

PROBLEMA

Un elettrone, emesso da un elettrodo (catodo) con energia cinetica nulla, viene accelerato verso un secondo elettrodo (anodo) mantenuto a una d.d.p. V=1000 V rispetto al primo. Sapendo che la distanza fra i due elettrodi è d=0,40 m e che il campo elettrico è uniforme, determinare: 1) l'accelerazione dell'elettrone; 2) la sua velocità quando raggiunge l'anodo; 3) la distanza dall'anodo in cui l'energia cinetica e l'energia potenziale dell'elettrone sono uguali.

SOLUZIONE



1. La forza che accelera l'elettrone è quella esercitata su di esso dal campo elettrico nel quale si muove:

$$F = eE = e\frac{V}{d}$$

L'accelerazione dell'elettrone, per il 2° principio della dinamica, è dunque:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eV}{md} = \frac{1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot 1000}{9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot 0{,}40} = 4{,}39 \cdot 10^{14}\ m/s^2$$

2. Per il calcolo della velocità v dell'elettrone giunto sull'anodo, osservando che la sua energia potenziale iniziale U = eV viene convertita interamente in energia cinetica, per il principio di conservazione dell' energia si ha:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad \text{da cui segue:} \quad v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot 1000}{9{,}11 \cdot 10^{-31}}} = 1{,}87 \cdot 10^7\, m/s$$

3. Osserviamo che il potenziale elettrico V(x) a distanza x dall'anodo, ponendo V(x) = 0 per x=0, è dato da:

$$V(x) = E\ x = \frac{V}{d}x$$

Pertanto l'energia potenziale dell'elettrone a distanza x dall'anodo è:

$$U(x) = eV(x) = \frac{eVx}{d} \quad (1)$$

Per il principio di conservazione dell'energia la somma dell'energia potenziale U(x) e dell'energia cinetica $E_C(x)$, possedute dall'elettrone in moto verso l'anodo a distanza x da questo, è pari alla sua energia potenziale iniziale, cioè:

$$U(x) + E_C(x) = eV$$

Per trovare la distanza dall'anodo del punto in cui l'energia cinetica e quella potenziale sono uguali, dobbiamo imporre:

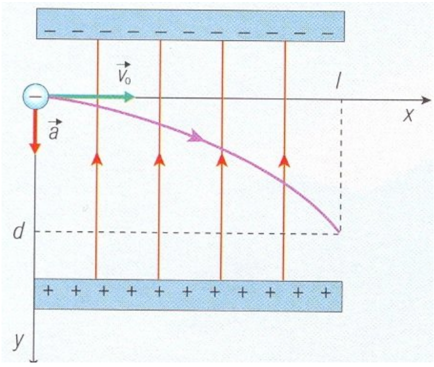
$$U(x) + E_C(x) = 2U(x) = eV \quad \text{da cui, per la (1), segue:} \quad 2\frac{eVx}{d} = eV$$

Otteniamo così:

$$x = \frac{d}{2} = \frac{0{,}40}{2} = 0{,}20\,m = 20\,cm$$

PROBLEMA

Un elettrone entra fra le placche di un oscillografo a raggi catodici con energia cinetica $E_C=2{,}50\cdot10^3$ eV, diretto perpendicolarmente al campo elettrico. L' intensità del campo $E=1{,}40\cdot10^4$ N/C e la lunghezza delle placche è L=1,60 cm. Determinare la traiettoria dell'elettrone e la sua deflessione all'uscita dalle placche.



SOLUZIONE

La conoscenza dell'energia cinetica E_C ci permette di esprimere in funzione di parametri noti il modulo V_0 della velocità iniziale dell'elettrone. Indicando con $m=9{,}109\cdot10^{-31}$ kg la massa dell'elettrone abbiamo infatti:

$$E_C = \frac{1}{2}mv_0^2 \qquad \text{da cui: } v_0 = \sqrt{\frac{2E_C}{m}} \quad (1)$$

Per lo studio del moto fissiamo il sistema cartesiano rappresentato in figura, con l'asse x diretto come la velocità iniziale v_0 e l'asse y diretto in verso opposto al campo elettrico **E** esistente fra le placche, cioè orientato come l'accelerazione **a:**

$$\vec{a} = -\frac{\vec{F}}{m} = -\frac{e\vec{E}}{m}$$

dove: $e = 1{,}602\cdot10^{-19}$ C la carica dell'elettrone.
Mentre continua a muoversi di moto rettilineo uniforme lungo l'asse x con velocità v_0, l'elettrone si muove di moto uniformemente accelerato lungo l'asse y, con componente y della velocità iniziale nulla e componente y dell'accelerazione pari a:

$$a_y = \frac{eE}{m}$$

Il moto risultante è un moto parabolico come quello di un proiettile lanciato orizzontalmente nel campo gravitazionale terrestre.
Le equazioni orarie dei due moti sono:

$$\begin{cases} x = v_o t \\ y = \frac{1}{2}at^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = v_o t \\ y = \frac{1}{2}\frac{eE}{m}t^2 \end{cases}$$

Eliminando il tempo t da queste due equazioni, otteniamo l'equazione della traiettoria:

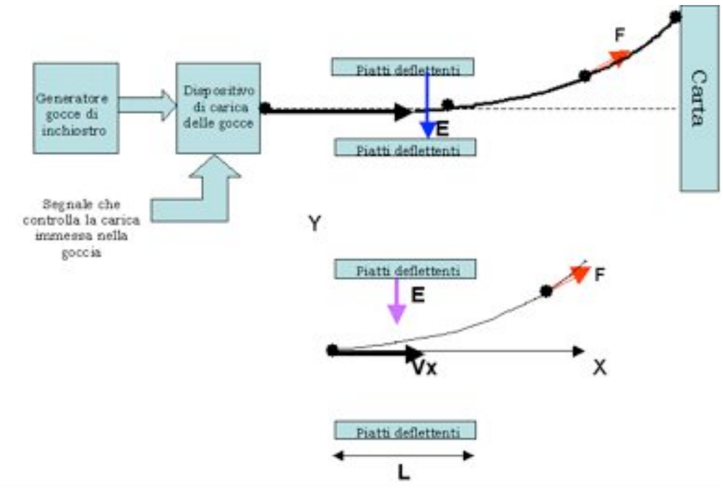
$$y = \frac{eE}{2mv_0^2}x^2$$

che consiste in una parabola con l'asse coincidente con l'asse y. La deflessione d dell'elettrone all'uscita dalle placche è il valore di y che corrisponde a x = L. Tenendo anche conto della (1) otteniamo:

$$d = \frac{eEL^2}{4E_C} = \frac{1{,}602\cdot10^{-19}\cdot(1{,}60\cdot10^{-2})^2}{4\cdot2{,}50\cdot10^3\cdot1{,}602\cdot10^{-19}} = 3{,}58\cdot10^{-4}\text{ m} \qquad \text{dove: } 1\text{ eV} = 1{,}602\cdot10^{-19}\text{ J}$$

PROBLEMA

Determinare il punto nel quale una goccia carica d'inchiostro tocca il foglio di carta. I dati del problema sono: $m=1{,}3 \cdot 10^{-10}$ kg $Q= -1{,}5 \cdot 10^{-13}$ C $V_x=18$ m/s $L=1{,}6$ cm $E=1{,}4 \cdot 10^{6}$ N/C



SOLUZIONE

La goccia viene caricata negativamente nell'apposito dispositivo ed entra con una velocità V_x tra i piatti deflettenti, dove viene deflessa verso l'alto dalla presenza del campo elettrico E diretto verso il basso, infatti:

$$F = Q \cdot E = -1{,}5 \cdot 10^{-13} \cdot 1{,}4 \cdot 10^{6} = -2{,}1 \cdot 10^{-7}\ \text{N}$$

La presenza di F, grazie al secondo principio della dinamica, comporta una accelerazione anch'essa verso l'alto:

$$F = m \cdot a_y \Rightarrow a_y = \frac{F}{m} = \frac{-2{,}1 \cdot 10^{-7}}{1{,}3 \cdot 10^{-10}} = -1{,}6 \cdot 10^{3}\,m/s^2$$

Pertanto:
lungo l'asse X il moto della goccia è rettilineo uniforme, per cui la legge del moto è:

$$1)\quad L = V_x \cdot t$$

lungo l'asse Y il moto è uniformemente accelerato, per cui la legge del moto è:

$$2)\quad y = \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

Ricavando t dalla 1):

$$t = \frac{L}{V_x} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-2}}{18} = 0{,}09 \cdot 10^{-2}\,s$$

E sostituendola nella 2), otteniamo il punto nel quale la goccia tocca il foglio di carta:

$$y = \frac{1}{2} \cdot 9{,}8 \cdot (0{,}09 \cdot 10^{-2})^2 = 6{,}5 \cdot 10^{-5} = 0{,}65\text{mm}$$

PROBLEMA

Una sfera conduttrice di raggio r = 10 cm inizialmente con velocità v_0=1 m/s, entra in una regione di spazio dove è presente un campo elettrostatico uniforme E=100 V/m. Calcolare il tempo che la sfera impiega a fermarsi se la sua massa è m=10 g e la sua densità superficiale σ = 10^{-6} C/m^2

SOLUZIONE

Si tratta di un moto uniformemente accelerato, per cui vale la seguente legge:

$$(1) \quad v = v_0 - at$$

Sapendo che:

$$a = \frac{F}{m} \qquad F = q \cdot E \qquad q = 4\pi r^2 \sigma$$

la (1) diventa:

$$v = v_0 - \frac{F}{m}t = v_0 - \frac{qE}{m}t = v_0 - \frac{4\pi r^2 \sigma E}{m}t$$

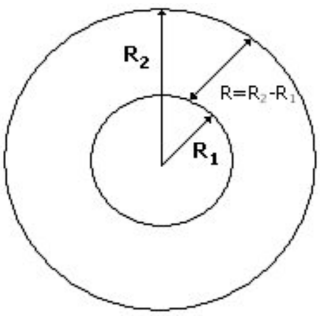
da cui ricaviamo l'incognita tempo, tenendo presente che v = 0 (la sfera si ferma dopo un tempo t):

$$t = \frac{mv_0}{4\pi r^2 \sigma E} = \frac{0{,}01 \cdot 1}{4\pi \cdot 0{,}1^2 \cdot 10^{-6} \cdot 100} = 796s$$

PROBLEMA

Due gusci sferici conduttori concentrici hanno raggi R_1 = 0,145 m e R_2 = 0,207 m. La sfera interna reca una carica Q_1 = -6,00·10^{-8} C. Un elettrone (e = 1,602·10^{-19}C; m = 9,108·10^{-31}kg) sfugge dalla sfera interna con velocità trascurabile. Supponendo che tra le due sfere ci sia il vuoto, calcolare con quale velocità l'elettrone colpisce la sfera esterna.

SOLUZIONE



La sfera interna genera un campo elettrico pari a:

$$E_1 = K \cdot \frac{Q_1}{R_1^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{6{,}00 \cdot 10^{-8}}{0{,}145^2} = 25714 N/C$$

per cui sull'elettrone che sfugge dalla superficie della sfera interna agirà una forza pari a:

$$F_e = q \cdot E = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 25714 = 4{,}1 \cdot 10^{-15}\ N$$

con una conseguente accelerazione, per la 2ª legge della dinamica, data da:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{4{,}1 \cdot 10^{-15}}{9{,}108 \cdot 10^{-31}} = 0{,}45 \cdot 10^{16}\, m/s^2$$

In un moto accelerato, la velocità è legata all'accelerazione dalla relazione:

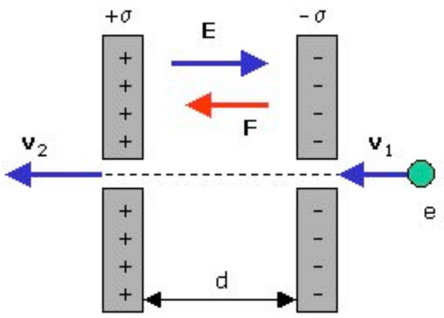
$$v = \sqrt{2as}$$

per cui, nel nostro caso, la velocità con la quale l'elettrone colpisce la sfera esterna è:

$$v = \sqrt{2a \cdot (R_2 - R_1)} = \sqrt{2 \cdot 0{,}45 \cdot 10^{16} \cdot (0{,}207 - 0{,}145)} = 0{,}24 \cdot 10^{8}\, m/s$$

PROBLEMA

Due superfici piane distano tra loro d = 0,5 cm e portano ciascuna una carica elettrica di densità superficiale pari a $+\sigma$ e $-\sigma$. Un elettrone le attraversa perpendicolarmente (si trascuri la deviazione subita dall'elettrone). L'elettrone oltrepassa la superficie carica negativamente con velocità $v_1 = 1{,}0 \cdot 10^5$ m/s e quella carica positivamente con velocità $v_2 = 1{,}0 \cdot 10^6$ m/s.



- Calcolare il valore della densità superficiale σ
- Cosa succede all'elettrone se entra dalla parte della superficie carica positivamente?
- Spiegare cosa succede se al posto dell'elettrone poniamo un protone.

SOLUZIONE

1. Dalla definizione di campo elettrico ricaviamo che la forza elettrostatica che agisce sull'elettrone è data da:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (1)$$

per cui F ha la stessa direzione di E ma verso opposto in quanto la carica q è negativa.

La densità superficiale è data come formula inversa del campo elettrico di un condensatore piano:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \Rightarrow \sigma = E \cdot \varepsilon_0$$

Ma il campo elettrico non è noto, per cui dalla (1) si ricava che:

$$E = \frac{F}{e}$$

pertanto il problema si riduce al calcolo della forza elettrica che agisce sull'elettrone.

Dal 2° principio della dinamica sappiamo che:

$$F = m \cdot a$$

dove l'accelerazione viene calcolata attraverso l'utilizzo delle leggi che regolano il moto uniformemente accelerato:

$$\begin{cases} a = \dfrac{v_2 - v_1}{t} \\ d = v_1 t + \dfrac{1}{2} a t^2 \end{cases}$$

Il sistema ottenuto è così costituito da due equazioni in altrettante incognite *a* e *t*, pertanto:

$$\begin{cases} a = \dfrac{v_2 - v_1}{t} \\ d = v_1 t + \dfrac{1}{2} \cdot \dfrac{v_2 - v_1}{\cancel{t}} \cdot t^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = \dfrac{v_2 - v_1}{t} \\ 2d = 2v_1 t + v_2 t - v_1 t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = \dfrac{v_2 - v_1}{t} \\ v_1 t + v_2 t = 2d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = \dfrac{v_2 - v_1}{t} \\ (v_1 + v_2)t = 2d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = \dfrac{v_2 - v_1}{t} \\ t = \dfrac{2d}{v_1 + v_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = \dfrac{1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^5}{9{,}1 \cdot 10^{-9}} = 0{,}1 \cdot 10^{15} m/s^2 \\ t = \dfrac{2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^5 + 1 \cdot 10^6} = 9{,}1 \cdot 10^{-9} s = 9{,}1 ns \end{cases}$$

Nota l'accelerazione, siamo in grado di calcolare la forza elettrica F, il campo elettrico E e quindi la densità superficiale σ:

$$F = m \cdot a = 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 0{,}1 \cdot 10^{15} = 0{,}9 \cdot 10^{-16} N$$

$$E = \frac{F}{e} = \frac{0{,}9 \cdot 10^{-16}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 0{,}56 \cdot 10^3 N/C$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 = 0{,}56 \cdot 10^3 \cdot 8{,}86 \cdot 10^{-12} = 5 \cdot 10^{-9} C/m^2 = 5nC/m^2$$

In maniera alternativa, e più convincente, possiamo calcolare la forza che agisce sulla carica attraverso l'utilizzo del teorema dell'energia cinetica, che stabilisce:
la variazione di energia cinetica della particella è uguale al lavoro compiuto dalle forze del campo sulla particella:

$$L = \Delta E_c = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m \cdot \left(v_2^2 - v_1^2\right) = \frac{1}{2} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot \left[(10^6)^2 - (10^5)^2\right] = 4{,}5 \cdot 10^{-19} J$$

Dalla definizione di lavoro ricaviamo la forza che agisce sulla particella:

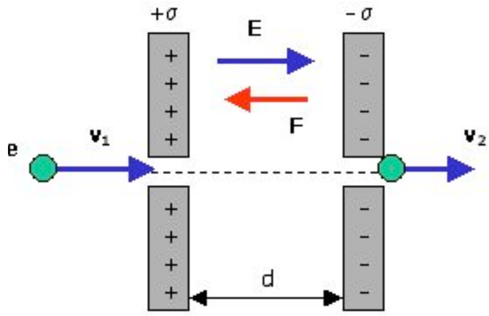
$$L = F \cdot d \Rightarrow F = \frac{L}{d} = \frac{4{,}5 \cdot 10^{-19}}{0{,}5 \cdot 10^{-2}} = 9 \cdot 10^{-17} N$$

per cui possiamo calcolare il campo elettrico e quindi la densità di carica superficiale:

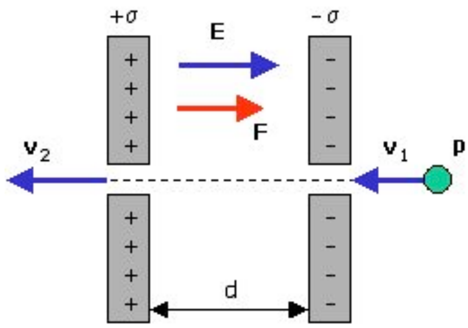
$$E = \frac{F}{e} = \frac{9 \cdot 10^{-17}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,56 \cdot 10^{3} N/C$$

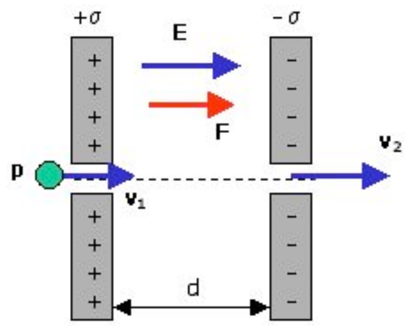
$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 = 0,56 \cdot 10^{3} \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} = 5 \cdot 10^{-9} C/m^2 = 5nC/m^2$$

2. Se l'elettrone entra dalla parte della superficie carica positivamente, sempre in base alla legge (1), avremo che la particella, essendo carica negativamente, sarà sottoposta ad una forza che avrà verso opposto al campo elettrico, per cui subirà un rallentamento.



3. Se al posto dell'elettrone poniamo un protone, in base alla legge (1), avremo che la particella, essendo carica positivamente, subirà una decelerazione se entrerà dalla parte della superficie carica negativamente (vedi figura), e una accelerazione se entrerà dalla parte della superficie carica positivamente (vedi figura).





I calcoli da eseguire al punto 2. e al punto 3. sono gli stessi di quelli eseguiti al punto 1.

PROBLEMA

Una particella $q=+7,2x10^{-5}C$ e massa m=10g si muove, all'interno di un campo elettrico uniforme, tra due punti distanti d=10m. La differenza di potenziale tra i due punti è $\Delta V=24x10^{3}V$. Calcolare il tempo impiegato dalla carica a coprire la distanza.

SOLUZIONE

E' un moto uniformemente accelerato:

$$d = \frac{1}{2}at^2$$

Per il 2° principio della dinamica:

$$F = ma \Rightarrow a = \frac{F}{m} \xrightarrow{F=qE;\ E=\Delta V/d} a = \frac{q\Delta V}{md}$$

Quindi:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}} = \sqrt{\frac{2dm}{Eq}} = \sqrt{\frac{2dmd}{\Delta V\, q}} = \sqrt{\frac{2d^2m}{\Delta V\, q}} = \sqrt{\frac{2 \times (10\ \mathrm{m})^2 \times (10 \times 10^{-3}\ \mathrm{kg})}{(24 \times 10^3\ \mathrm{V}) \times (7{,}2 \times 10^{-5}\ \mathrm{C})}} =$$

$$= 1{,}1 \sqrt{\frac{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg}}{\frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{C}}\mathrm{C}}} = 1{,}1 \sqrt{\frac{\mathrm{m} \cdot \mathrm{kg}}{\mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}} = 1{,}1\ \mathrm{s}$$