Civilittee
اللجنة الأكاديمية لقسم الهندسة المدنية
www.Civilittee.com

فيرست

فيزياء 2

Physics 2

chapter 23: Electric fields ① static electricity الساكنة
{* $q = Ne$} ② Mobile المتحركة

* Types of electrical Materials:

① conductor (موصل): Al, Au, Ag, Ni, Fe, Cu ...

يسمح بمرور التيار الكهربائي داخله بسهولة لاحتوائه على الكترونات حرة.

② insulators (عازل): glass, rubber, plastic, (dry wood)

لا يسمح بمرور التيار بسهولة لذلك يستخدم لمنع تسرب الكهرباء وحماية المعدات

③ Semiconductors (شبه موصل): C, Si, Ge, GaAs

توصيله الكهربائي متوسط ليس موصل قوي مثل النحاس وليس عازل قوي مثل البلاستيك

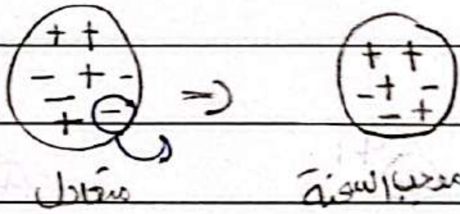
يعني الوسط في توصيله.

تجاذب ⇐ attraction

تنافر ⇐ repulsion.

* الحركة دائمًا تكون للشحنات السالبة.

* عشان اخلي جسم مشحون بشحنة موجبة بعمل على إزالة شحنات سالبة منه.

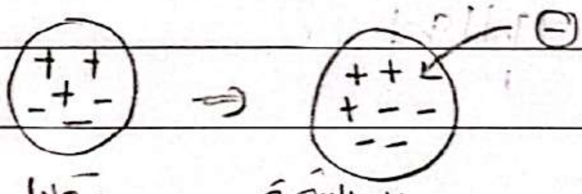


متعادل موجب الشحنة

pos − neg

$4-3=+1$

* عشان اخلي جسم مشحون بشحنة سالبة بضيف شحنة سالبة عليه.



متعادل سالب الشحنة

pos − neg

$3-4=-1$

* لما يحكيلي انه الجسم positively charged هاد يعني الجسم فيه شحنات موجبة وسالبة بس الموجب أكثر.

charge for the object. $q = N(e) \rightarrow -1.6 \times 10^{-19}$

$\hookrightarrow N = \pm 0, \pm 1, \pm 2 \ldots$

ع مابصير العدد يكون مثلا نص او ربع شحنة .

\+ Columb's laws:

1. experimental law
2. point charges (only) $\Rightarrow$ لأنه المسافة بينهم كبيرة جداً مقارنة
3. Two point charges (only). مع الابعاد في تعبر كانها نقطة

$|q_1| = [-5\mu C, 3\mu C] \rightarrow$ 5 value أكبر

$\hookrightarrow$ value without sign

$(|q_1| \propto F) \quad \left(F \propto \frac{1}{r^2}\right)$

value

$F = (K_e) \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$

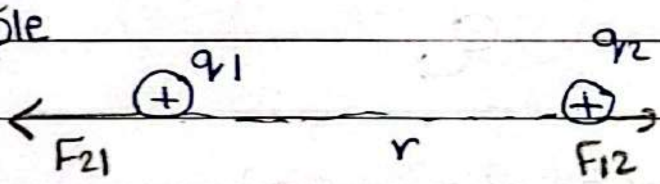
$\downarrow$

$\frac{N \cdot m^2}{C^2}$

$K_e = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \rightarrow$ السماحية الكهربائية .

علاقة عكسية

Example



⊕ القوة المؤثرة على الشحنة تكون على نفس الخط الواصل بينهم .

* $\vec{F} = K_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} (\hat{r})$ ع متجه الوحدة $\rightarrow$ حسب الشحنة اذا كانت موجبة او سالبة .

$|\vec{F}|$ = magnitude

$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}|$ ✓ $\quad \vec{F}_{21} \neq \vec{F}_{12}$

$|\vec{F}_{12}| = -|\vec{F}_{21}|$ X $\quad \vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ ✓

* Electric field (field vector) $\vec{E}$

$\{ \vec{E} = (\vec{F}/q) * \hat{r} \}$

test charge
very small +
positive ⊕

$\{ F = qE \}$

* $\vec{F}$ & $\vec{E}$ with the same direction if q is ⊕

يعني الشحنة الموجبة اتجاهها

* $\vec{F}$ & $\vec{E}$ with the opposite direction if q is ⊖

باتجاه المجال والسالبة
عكس اتجاه المجال .

$$\{ \vec{E} = \frac{k_e q}{r^2} \hat{r} \quad (N/C) \}$$

* Electric field lines :

⊛ دائماً خطوط المجال طالعة من ⊕ داخلة من السالبة .

⊛ عدد الخطوط يعبر عن مقدار الشحنة

⊛ لا تكون الشحنة غير مشحونة (F=0)

حساب النسبة بينهم

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$F = ma$

$qE = ma \rightarrow a = \frac{qE}{m}$ (التسارع)

* $\vec{E}$ of a continous charge distribution :

$$dE = \frac{k_e \, dq}{r^2} \Rightarrow \int dE = \int \frac{k_e \, dq}{r^2}$$

جزء منه

$$E = k_e \int \frac{dq}{r^2} \quad \#$$

① volume (sphere) $\Rightarrow$ $\rho = \frac{Q}{V}$

$V = \frac{4}{3}\pi r^3$ ↳ volume charge density

② surface (area) $\Rightarrow$ $\sigma = \frac{Q}{A}$

$A \rightarrow$ ① cylinder $= 2\pi r h$

② sphere $= 4\pi r^2$

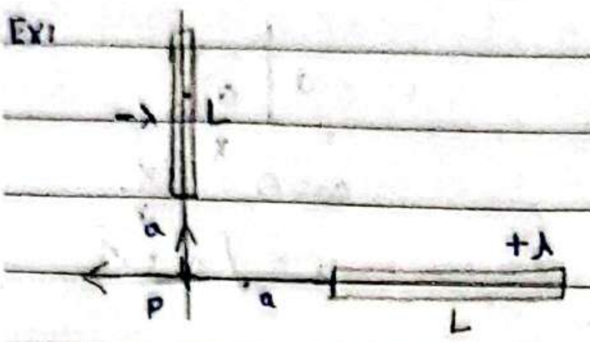
③ circle $= \pi r^2$

③ wire (line / length) $\Rightarrow$ $\lambda = \frac{Q}{L}$

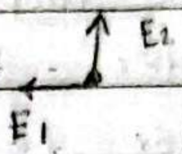
$$E = k_e \lambda \frac{L}{a^2 + aL} \Rightarrow E = k_e \frac{Q}{a^2 + aL}$$

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

Ex:



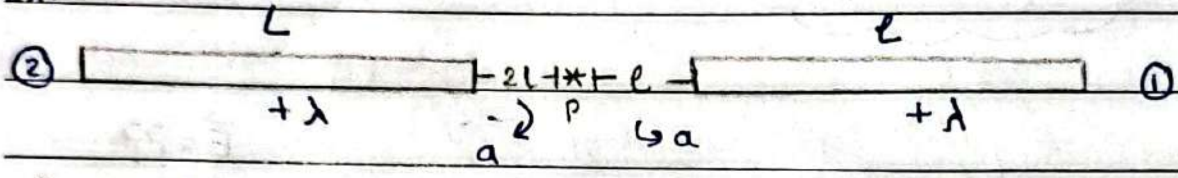
$\vec{E} = ?$



$E_1 = \frac{k_e Q}{a^2+aL} \rightarrow \lambda L$ $\qquad$ $E_2 = \frac{k_e \lambda L}{a^2+aL}$

$E_{total} = E_1 + E_2 \Rightarrow \vec{E} = -\vec{E}_1 \hat{i} + \vec{E}_2 j$

Ex:



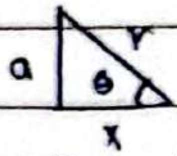
$\vec{E}_{total} = ??$

$E_1 = \frac{k_e \lambda L}{a(a+L)} = \frac{k_e \lambda \cancel{L}}{\cancel{L}(L+L)} = \frac{k_e \lambda}{2L}$

$E_2 = \frac{k_e \lambda L}{a(a+L)} = \frac{k_e \lambda \cancel{L}}{2\cancel{L}(2L+L)} = \frac{k_e \lambda}{6L}$

$\vec{E}_{total} = -\frac{k_e \lambda}{2L}\hat{i} + \frac{k_e \lambda}{6L}\hat{i} = -\frac{k_e \lambda}{3L} i$

+ charge ring:



$dE_x = dE_x \cos\theta$ $\qquad \cos\theta = \frac{x}{r}$

$dE_x = dE_x \left(\frac{x}{r}\right)$ $\qquad r = \sqrt{a^2 + x^2}$

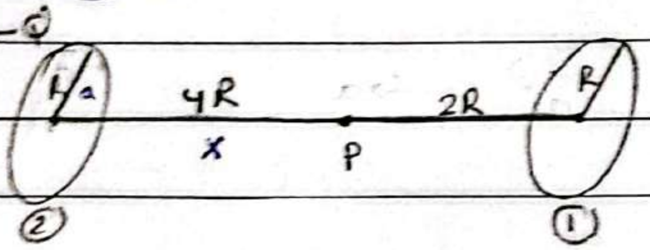
$dE = k_e \frac{dq}{r^2} \left(\frac{x}{r}\right)$

$$\int dE = k_e \frac{dq\, x}{r^3} = \int k_e \frac{dq\, x}{(a^2+x^2)^{3/2}}$$

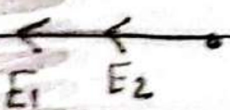
$$E = \frac{k_e\, x Q}{(a^2+x^2)^{3/2}}$$

$Q \Rightarrow$ هنا لا ترتبط بالمسافة

Ex:



$\vec{E}_{total} = ??$



$$E_1 = \frac{k_e\, x Q}{(a^2+x^2)^{3/2}} = \frac{k_e (2R)(Q)}{(R^2+4R^2)^{3/2}} = \frac{k_e\, 2RQ}{(5R^2)^{3/2}}$$

$$E_2 = \frac{k_e\, x Q}{(a^2+x^2)^{3/2}} = \frac{k_e (4R)(Q)}{(R^2+16R^2)^{3/2}} = \frac{k_e (4RQ)}{(17R^2)^{3/2}}$$

$\vec{E}_{tot} = -\vec{E}_1 i - \vec{E}_2 i$

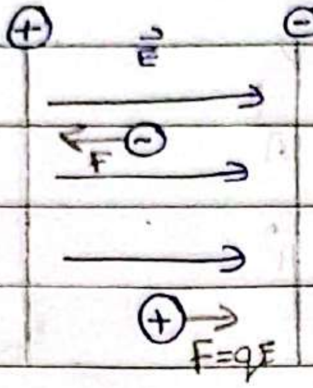
Arc

α = radian

$L = \alpha R$

$$E = \frac{2 k_e \lambda \sin(\alpha/2)}{R}$$

* Motion of a charge in a uniform electric fields:



$\vec{a} \to$ مع اتجاه القوة

$\vec{E}$ is uniform ($\vec{E}$ = costant)

$\vec{F} = m\vec{a}$

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

($\vec{E}$ const) شرط

1. $v_f = v_i + at$
2. $v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x$
3. $\Delta x = vt + \frac{1}{2} at^2$

+q

$\vec{a}$ and F in the same direction of $\vec{E}$

−q

$\vec{a}$ and F in the opposite direction of $\vec{E}$.

(23.10) ⇒ Lec23 notes

(23.11) ⇒ سلايدات

① $q = Ne$

② $F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$

③ $\vec{E} = \left(\frac{\vec{F}}{q}\right) \cdot \hat{r}$

④ $\vec{F} = q\vec{E}$

⑤ $\vec{E} = \frac{k_e q}{r^2} \hat{r}$

⑥ $\frac{q_1}{q_2} = \frac{N_1}{N_2}$

⑦ $\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$

⑧ $E = k_e \int \frac{dq}{r^2}$

⑨ $E = k_e \frac{\lambda l}{a^2 + al}$

⑩ $E = \frac{k_e\, x\, Q}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$

⑪ $E = \frac{2 k_e \lambda \sin(\alpha/2)}{R}$

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

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

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

$\Rightarrow$ $\vec{E}$ const

$v_f = v_i + at$

$v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x$

$\Delta x = vt + \frac{1}{2}at^2$

chapter (24)

Electric flux : عدد خطوط المجال التي تخترق سطحاً عمودياً عليه .

$\Phi_E = EA$

$= \vec{E}\cdot\vec{A} = EA\cos\theta$

⟵ في حال كان المجال منتظم

$\Phi_E = \int \vec{E}\cdot d\vec{A}$

⟵ في حال كان المجال غير منتظم

$\Phi_E = \oint \vec{E}\cdot d\vec{A}$

⟵ التكامل على سطح مغلق

(*) اي جسم مغلق + مفرغ (يعني ما فيه شحنات + منتظم أو غير منتظم الشكل) عليه مجال كهربائي منتظم $[\Sigma\Phi_E = zero]$ ⟵ جسم مغلق مغمور بمجال كهربائي منتظم $\Phi_{net}=0$

(*) اذا كانت الشحنة غير نقطية + توصيل منتظم

$q_{in} = \int \rho\, dV$ volume

$q_{in} = \int \lambda\, dl$ line

$q_{in} = \int \sigma\, dA$ surface

} for continous charge distribution

(*) عدد الخطوط الخارجة من السطح أكبر من عدد الخطوط الداخلة اذا $\Phi > 0$

$\Phi > 0$ ($+4\mu c$, $-3\mu c$)

- الشحنة الموجبة الخطوط خارجة

- الشحنة السالبة الخطوط داخلة .

(*) عدد الخطوط الخارجة من السطح أصغر من عدد الخطوط الداخلة اذا $\Phi < 0$

$\Phi < 0$ ($+5\mu c$, $-6\mu c$)

$\Phi = \vec{E}\cdot\vec{A} = |E||A|\cos\theta$

scalar Quantity

vector

يعمل زاوية 90 مع السطح

↳ angle between A and E

* sphere → كرة
* Hemi-sphere → نصف كرة

* $\phi = zero$
  ↳ $\vec{E} = 0$
  or $\vec{A} = 0$
  or $\theta = 90 \rightarrow \cos 90 = 0$

* $\phi = Max = EA$
  ↳ $\theta = 0 \rightarrow \cos 0 = 1$

$[\phi = \pm \text{ or } 0]$ scalar

⊖	⊕	zero
$\cos\theta = -1$	$\cos\theta = 1$	$\cos\theta = 0$
$\theta = 180$	$\theta = 0$	$\theta = 90$

(الوحدة)

$$\phi = \frac{N}{C} \cdot m^2$$

Gauss's law :

Gaussian surface :-

① closed ② virtual وهمي

داخل سطح غاوس

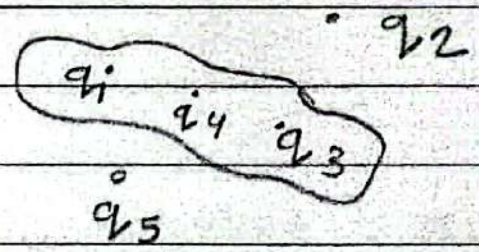
$$\phi = \frac{\Sigma q_{in}}{\epsilon_0}$$

↳ $\epsilon_0 \rightarrow 8.8 \times 10^{-12}$

flux over the surface.

$$\phi = \frac{\Sigma q_{in}}{\epsilon_0}$$ بعوض الشحنة

$$= \frac{q_1 + q_3 + q_4}{\epsilon_0}$$



ϕ through the surface

$$EA\cos\theta = \frac{\Sigma q_{in}}{\epsilon_0} \Rightarrow \vec{E} \cdot \vec{A} = \frac{\Sigma q_{in}}{\epsilon_0}$$

(closed integral) ⇒ $\boxed{\oint \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}}$ → Gauss's law

insulator
symmetric
charge distribution

conductor
(no charge inside)
charge will be on
the surface only

④ الكرة ممكن تكون ① conductor

② insulator

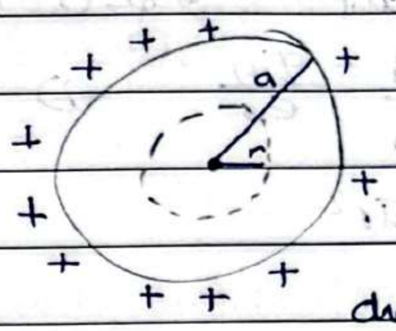
③ shell.

① conducting sphere

find E

⇒ $r<a$

$$\oint \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{\overbrace{q_{in}}^{\text{zero}}}{\epsilon_0}$$



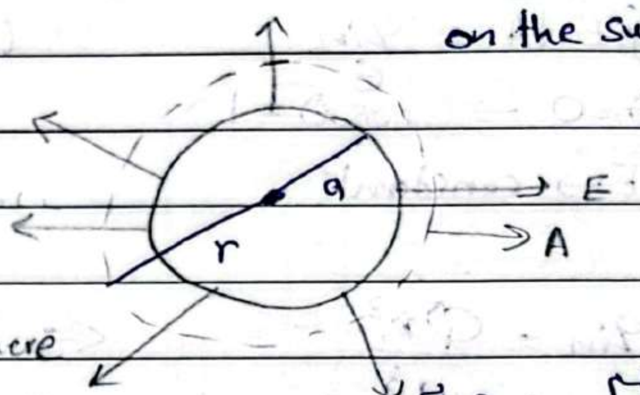
charge only on the surface

① $\oint \vec{E}\, d\vec{A} = 0 \rightarrow \boxed{E=0}$

⇒ $r>a$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

$E\,dA\cos\theta$



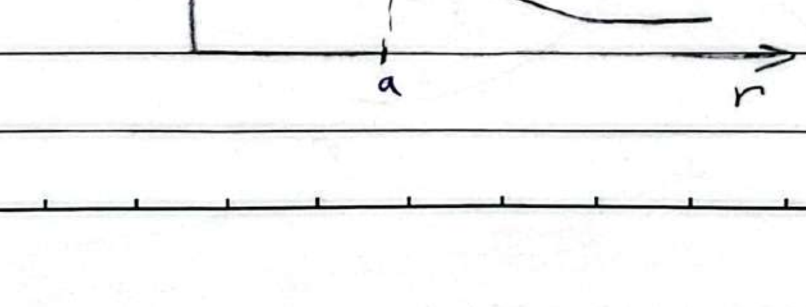
E is constant on Gaussian sphere

السبب انه كل النقاط على غاوس الهم كل البعد عن الشحنة.

* $\vec{E}$ & A ⇒ $\theta = 0$ منتظم

② $E \oint dA \rightarrow 4\pi r^2$

$q_{inside} = Q \Rightarrow \boxed{E = k_e \frac{Q}{r^2}}$ → sphere or point charge



توزيع منتظم الشحنة.

① insulator, continous charge distribution

$\Rightarrow r>a$ الفرق انه الشحنة مش موجودة بس على السطح.

$\oint \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$

$E \to$ constant , $\theta = 0$, $q_{in} = Q$

$E \underbrace{\int dA}_{4\pi r^2} = \frac{q_{in} \to Q}{\epsilon_0} \Rightarrow \left[E = k_e \frac{Q}{r^2} \right]$

$\Rightarrow r<a$ (سطح غاوس بحتوي على جزء من الشحنة)

$\oint \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon}$

$\theta = 0 \to \cos\theta = 1$

$E \to$ constant

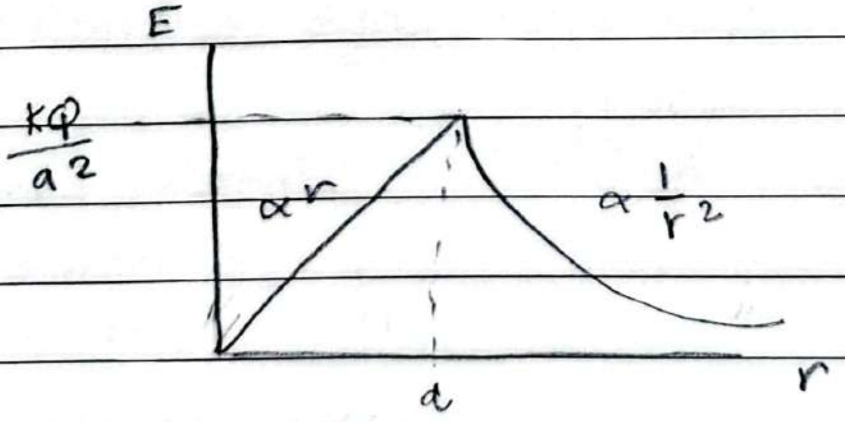
$\rho = \frac{Q}{V}$

$\frac{Q}{V} = \frac{q_{in}}{V \to}$ لغاوس

$q_{in} = \frac{Q r^3}{a^3} \Leftarrow \underbrace{\frac{Q_{total}}{\frac{4}{3}\pi a^3}}_{\text{للكرة}} = \underbrace{\frac{q_{in}}{\frac{4}{3}\pi r^3}}_{\text{لسطح غاوس}}$

$E \oint \underbrace{d\vec{A}}_{\downarrow} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$

$E(4\pi \cancel{r^2}) = \frac{Q \cancel{r^3}}{a^3 \epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qr}{a^3} = k_e \frac{Qr}{a^3}$

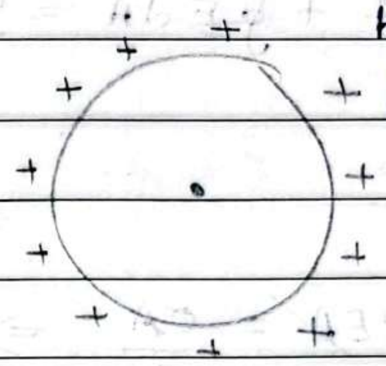


③ Shell (conductor or insulator)

ع الشحنة دائماً موجودة على السطح.

$\Rightarrow$ $r > a$

$$\left[E = K\frac{Q}{r^2}\right]$$

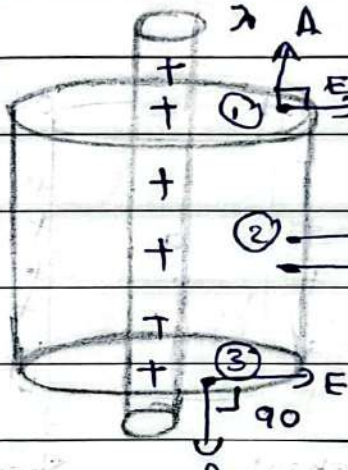


$r < a \rightarrow q_{in} = 0$

$\Rightarrow$ $[E = 0]$

* cylindrical symmetric charge distribution

٣ اسطح



Area1 + A2 + A3

$$\cancel{\oint \vec{E}\,d\vec{A}} + \oint \vec{E}\,d\vec{A} + \cancel{\oint \vec{E}\,d\vec{A}}$$

$$A_2 = \oint \vec{E}\,d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E}\oint d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \rightarrow \lambda = \frac{Q}{L} = \frac{q_{in}}{l}$$

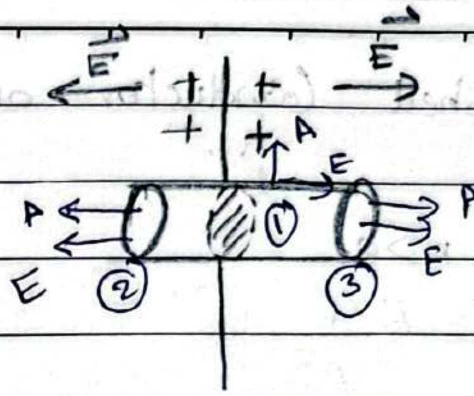
$$\boxed{q_{in} = \lambda L}$$

$$\vec{E}\oint d\vec{A} = \frac{\lambda L}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E}(2\pi r l) = \frac{\lambda l}{\epsilon_0} \Rightarrow \vec{E} = \frac{1}{2 * 2\pi\epsilon}\,\frac{\lambda}{r} * 2$$

$$\left[\vec{E} = K_e \frac{2\lambda}{r}\right] \#$$

*(plane / sheet)



$\cancel{A_1} + A_2 + A_3$

$$\oint \vec{E}\, d\vec{A} + \oint \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E}\oint d\vec{A} + \vec{E}\oint d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

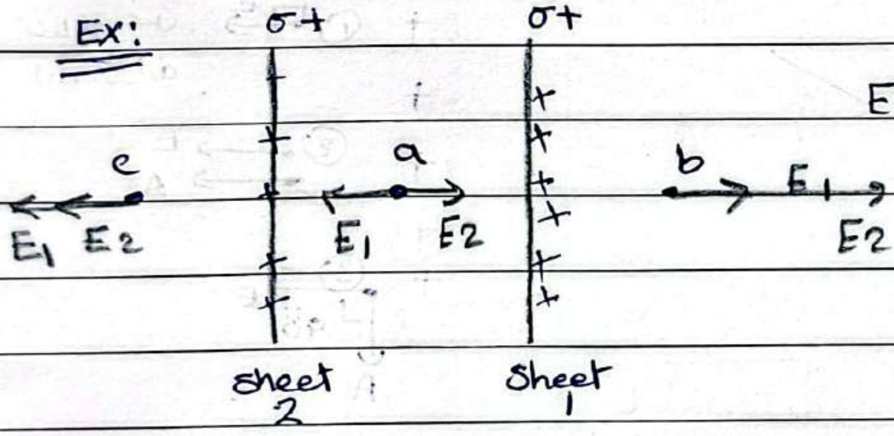
↳ $2E\cancel{A} = \frac{\sigma \cancel{A}}{\epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

$\sigma = \frac{q_{in}}{A}$

$q_{in} = \sigma A$

↳ independent on r

Ex:

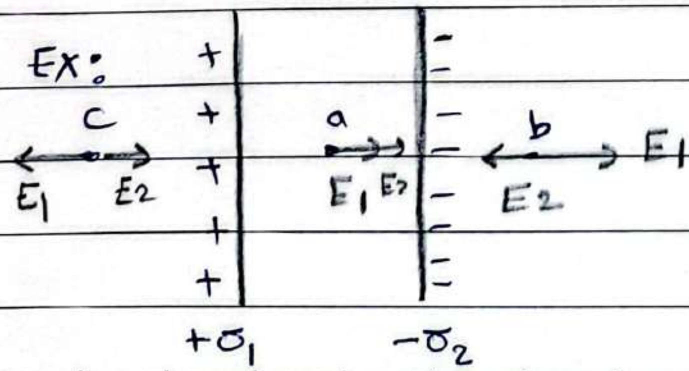


E = ??

$$E_a = E_2 - E_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \text{zero}$$

$$E_{b/c} = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Ex:

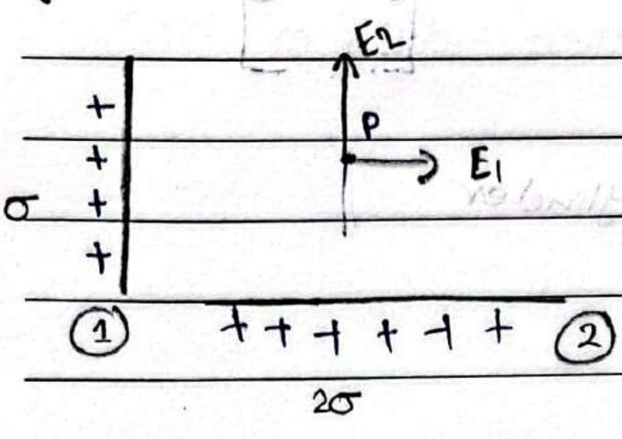


$$E_a = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$E_{b/c} = E_1 - E_2 = \text{zero}$$

$(1m = 100\,cm)$

(Extra)

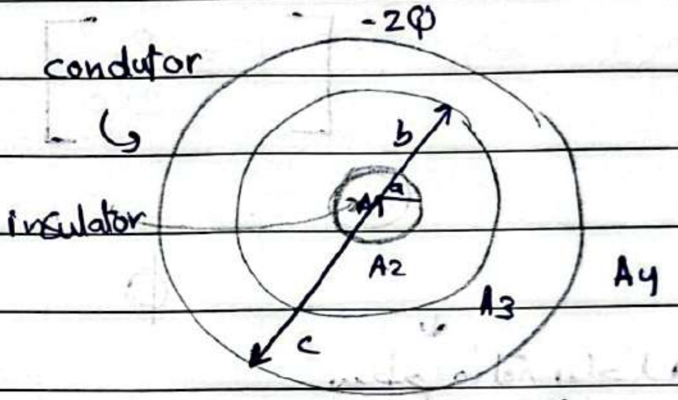


$$\vec{E}_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} i$$

$$\vec{E}_2 = \frac{2\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} j$$

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} i + \frac{\sigma}{\epsilon_0} j$$

Example (24.7) :



① $r < a$

$\hookrightarrow E = ke \frac{Q r}{a^3}$

② $r < b$

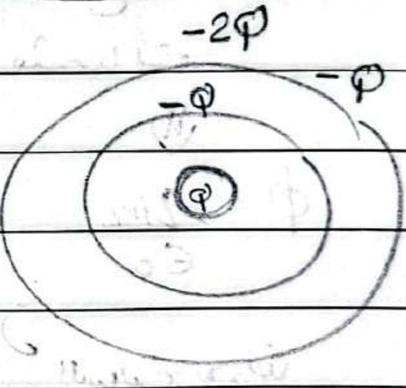
$\hookrightarrow E = ke \frac{Q}{r^2}$

③ $b < r < c$

$\hookrightarrow E = 0 \rightarrow q_{in} = 0$

④ $r > c$ $\quad q_{in} = Q - 2Q = -Q$

$E = \ominus\, ke \frac{Q}{r^2}$



total $= q_{inner} + q_{outer}$

$= -Q + -Q = -2Q$ ✓

* conducting infinit cylinder

$r>a$ $\quad \left[E = \frac{\sigma a}{\epsilon_0 r}\right]$ $\qquad r<a \rightarrow \left[E = 0\right]$

* non- conducting infinit cylinder

$r>a \Rightarrow \left[E = \frac{a^2 \rho}{2r\epsilon_0}\right]$

$r<a \Rightarrow \left[E = \frac{\rho r}{2\epsilon_0}\right]$

ϕ

سطح مغلق بداخله شحنات

$\Downarrow$

$\phi = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$

السالب بعوض

سطح منتظم خترقه مجال منتظم

$\Downarrow$

$\phi = \vec{E} \cdot \vec{A}$

$= EA\cos\theta$

chapter 25

Electric potential:

$W = F d$

$W = \vec{F} \cdot d\vec{s}$ (مسافة صغيرة)

$dW = \vec{E} q \cdot d\vec{s}$

اذا كانت الحركة بسبب electric field

$W = \int_A^B q\vec{E} \cdot d\vec{s}$

$= q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$

$\Delta K = -\Delta U \Rightarrow \Delta K + \Delta U = 0$

في حال كان النظام ما في فقد للطاقة .

$W = \Delta K$

$W = -\Delta U$

* $\Delta U_{a \to b} = -q \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s}$ (potential energy)

$E\, ds \cos\theta$

* $V = \frac{U}{q} = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s}$ (Electric potential)

[الوحدة] volt = J/C

وحدة ثانية لل (E.) → $\frac{V}{m}$

$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \Rightarrow \Delta U = \Delta V q$

جاي من

$\Delta V_{a \to b} = -Ed\cos\theta$

$E = \frac{-V}{d}$

↳ with E → V decrease

↳ opposite of E → V increase

$\cos\theta = 1$

$\theta = 0$

$\cos\theta = -1$

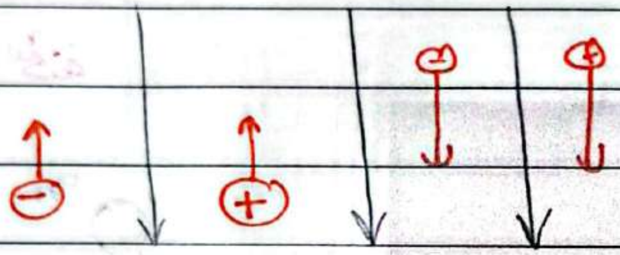
$\theta = 180$

Electron volt $= e \cdot V = 1.6 \times 10^{-19}$ J

$(\vec{E})$ is a measure of the rate of change of (V) with respect to position.

$$E = \frac{V}{d}$$

(25.2) uniform electric field.



$+$
- with E → U decrease
- opposite $\vec{E}$ → U increase

$-$
- with E → U increase
- opposite $\vec{E}$ → U decrease.

$$\Delta V_{AB} = V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

$$\left[\Delta U = q\,\Delta V = -qEd\cos\theta\right]$$

(25.3)

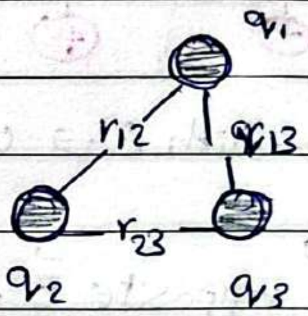
* Electric field due to point charge :

$$\Delta V_{AB} = V_B - V_A = -\int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

$$\vec{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r} \Rightarrow V = k_e q \left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right]$$

$$U = k \frac{q_1 q_2}{r} = q \Delta V$$

* $$U = k_e \left[\frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}} \dots \right]$$ لأكثر من شحنة



$$V = k_e \sum \frac{q_i}{r_i}$$

* $$V = k_e \left[\frac{q_1}{r_1} + \dots \right]$$

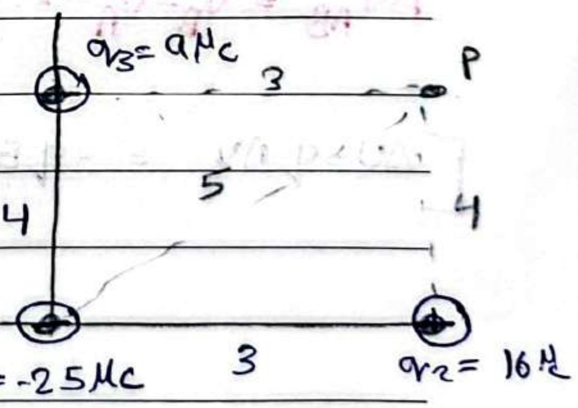
$$[\, V_\infty = U_\infty = 0 \,]$$

* لونقلت شحنة من نقطة لنقطة ثابتة .

$$U_{a \to b} = q V_{ab} = q (V_b - V_a) .$$

Ex :

$$V_p = k_e \left[\frac{9 \times 10^{-6}}{3} + \frac{16 \times 10^{-6}}{4} + \frac{-25 \times 10^{-6}}{5} \right]$$



$$U = q V_P$$

لازم نقل $\bar{e}$

$$= -1.6 \times 10^{-19} \; V_P$$

في حال طلب الشغل

$$. (W = -\Delta U)$$

(U)

↳ - electric energy stored in the system

- energy stored in the system

- what is the work Required to assemble change in the figure

- potential energy.

Equipotential surface

↳ surface withe same (V)

(25.4) Obtaining E from V:

$E_x = -\frac{dV}{dx}$, $E_y = -\frac{dV}{dy}$, $E_z = -\frac{dV}{dz}$

$\left[\vec{E} = E_x i + E_y j + E_z K\right]$

Ex $V = 3x^2y + yz + xz^2$ find $|E|$ at $(1,0,1)$

$\frac{dV}{dx} = -(6xy + z^2) = -1$

$\frac{dV}{dy} = -(3x^2+z) = -4$

$\frac{dV}{dz} = -(y+2xz) = -2$

$\vec{E} = -i - 4j - 2K \Rightarrow |E| = \sqrt{1+16+4} = \sqrt{21}$ N/C

Ex $V(x,y) = \frac{1}{x^2y^3}$ find $\vec{E}$ at $(1,1)$.

$-\frac{dV}{dx} = -\left(\frac{2}{x^3y^3}\right) = -2$ $\therefore \vec{E} = -2i - 3j$

$-\frac{dV}{dy} = -\left(\frac{3}{x^2y^4}\right) = -3$

[electric potential → V
potential energy → U]

$\Delta K + \Delta U = 0$ [$W = -\Delta U$]

→ $\Delta V = V_B - V_A$

→ $= Ed\cos\theta$

* $U = q\Delta V = -qEd\cos\theta = -qEd$

* $\Delta U = q\Delta V$

→ $V = -Ed$

→ $V_{A\to B} = -\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{s}$

* $U_{A\to B} = -\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{s}$.

→ $V = k_e\left[\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \cdots\right]$

* $U = k_e\left[\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}} \cdots\right]$

$\vec{E} = E_x\hat{i} + E_y\hat{j} + E_z\hat{k}$

$\hookrightarrow -\frac{dV}{dx}$ $\hookrightarrow -\frac{dV}{dy}$ $\hookrightarrow -\frac{dV}{dz}$