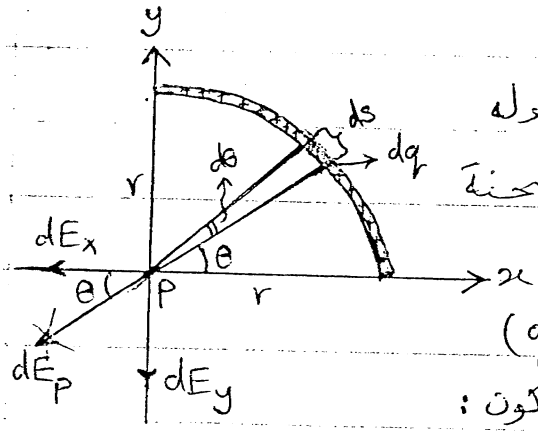
« إيجاد المجال الكهربائي لتوزيع شحني متصل »

- تمرين ① : سلك شحني على شكل ربع دائرة نصف قطرها (r) يحمل شحنة كهربائية (q) موزعة توزيع منتظم أوجد محصلة المجال الكهربائي في نقطة (P) التي تمثل مركز الدائرة كما في الشكل الموضح أدناه .



- الحل :

نأخذ جزء من السلك طوله (ds) يحتوي على جزء من الشحنة قيمتها (dq) وأن هذه الشحنة بدلالة الشحنة الكلية (q) ونصف قطر ربع الدائرة تكون :

$$\lambda = \frac{q}{S} = \frac{dq}{ds} \Rightarrow \lambda = \frac{q}{\left(\frac{2\pi r}{4}\right)} = \frac{dq}{ds}$$

$$\lambda = \frac{2q}{\pi r} = \frac{dq}{ds}$$

$$dq = \frac{2q}{\pi r}\, ds \longrightarrow (1)$$

وبذلك يكون المجال الكهربائي الجزئي لهذا الجزء من الشحنة عند النقطة (P) يساوي :

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dq}{r^2} \quad (N/C) \longrightarrow (2)$$

بتعويض (1) في (2) نجد أن :

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2q}{\pi r^3}\, ds \longrightarrow (3)$$

وبدلالة جزء من الزاوية (dθ) فإن جزء من القوس (ds) يكون كالتالي :

$$ds = r\, d\theta$$

وبذلك تكون المعادلة (3) على الصورة التالية :

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2q}{\pi r^2} \cdot r\,d\theta$$

أي أن :

$$dE = \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}\, d\theta$$

يحلل هذا المجال (dE) إلى مركبتين إحداهما على المحور السيني (dE_x) والثانية على المحور الصادي (dE_y). أي أن :

$$dE_x = dE\cos\theta$$

$$= \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}\cos\theta\, d\theta$$

أي أن :

$$E_x = \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}\int_0^{\pi/2} \cos\theta\, d\theta$$

$$E_x = \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}\Big[\sin\theta\Big]_0^{\pi/2}$$

$$\therefore E_x = \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}$$

وكذلك المركبة التي على المحور الصادي تكون :

$$dE_y = dE\sin\theta$$

$$= \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}\sin\theta\, d\theta$$

أي أن :

$$E_y = \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}\int_0^{\pi/2} \sin\theta\, d\theta$$

وبالتالي :

$$\therefore E_y = \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}$$

وعليه فإن المحصلة لشدة هذا المجال الكهربائي عند النقطة (P) يكون :

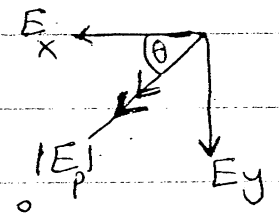
$$E_p = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

$$\therefore E_p = \frac{\sqrt{2}\,q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2} \quad (N/C)$$

واتجاهها

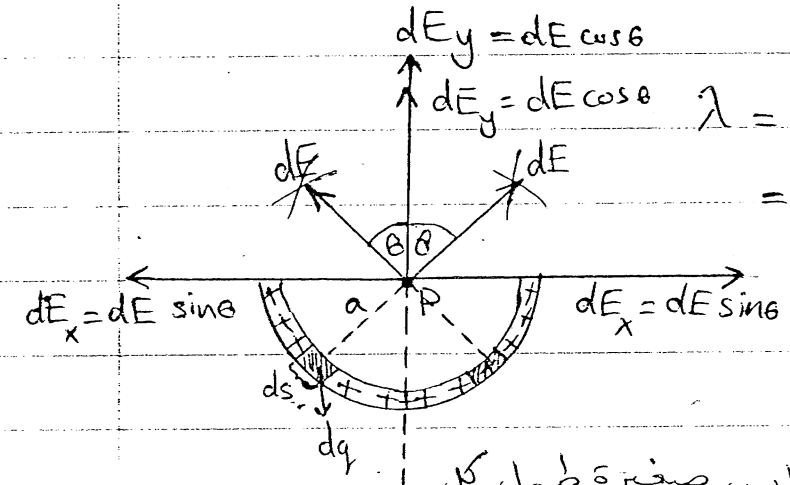
$$\tan\theta = \frac{E_y}{E_x} = 1$$

$$\theta = \tan^{-1}(1) = 45^\circ$$



$$\therefore |E|_P = \frac{\sqrt{2}\, q}{2\pi^2 \epsilon_0 r^2} \angle 225^\circ$$

- تمرين ② : في الشكل، أوجد المجال الكهربائي لنصف الحلقة التي في الشكل عند مركزها، إذا كان نصف قطرها (a)، وعليها شحنة كثافتها الطولية (λ).



- الحل :

$$\lambda = \frac{q}{} = \frac{dq}{} = \frac{S_q}{(\frac{2\pi a}{2})} = \frac{ds\, dq}{ds}$$

$$dq = \lambda\, ds$$

$$= \frac{q}{\pi a}\, ds$$

نقسم نصف الحلقة إلى أقواس صغيرة طول كل منها (ds) كما في الشكل، ويكون على كل (ds) شحنة كهربائية مقدارها ($\lambda\, ds$)، فيكون المجال الناتج عنها :

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda\, ds}{a^2} \quad ; \quad dq = \lambda\, ds$$

ونلاحظ من التماثل أن المركبة الأفقية للمجال تتلاشى، أي ($E_x = 0$)

أما المركبة العمودية (dE_y) فهي :

$$dE_y = dE\cos\theta$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda ds}{a^2}\cos\theta \quad ; ds = a\, d\theta$$

$$E_y = \int dE_y = \int dE\cos\theta$$

أي أن :

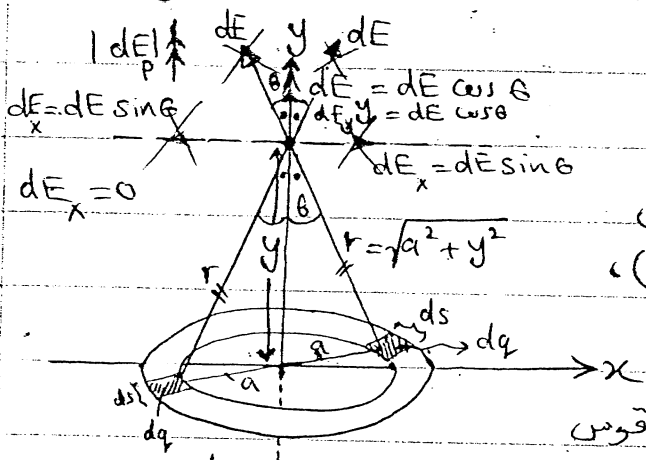
$$E_y = \frac{\lambda\, a}{4\pi\epsilon_0 a^2}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\cos\theta\, d\theta$$

$$= \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}\left[\sin\theta\right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}\left[1-(-1)\right]$$

$$|E_P| = E_y = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a}$$

- تمرين ③ : في الشكل، حلقة رقيقة قطرها (2a) موزعة عليها شحنة مقدارها (q) بانتظام. أوجد المجال الكهربائي عند نقطة على محورها تبعد مسافة (y) من مركزها.

- الحل :



تقسم الحلقة إلى أقواس صغيرة طول كل منها (ds)، و(ds) تبعد مسافة (r) عن نقطة المجال (P)، وكل قوس صغير عليه شحنة كتافتها الطولية (λ) بحيث :

$$\lambda = \frac{q}{s} = \frac{dq}{ds}$$

$$\lambda = \frac{q}{2\pi a} = \frac{dq}{ds} \Rightarrow dq = \lambda\, ds$$

فيكون المجال الناتج عن (ds) :-

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{\lambda ds}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\cdot\frac{\lambda ds}{(a^2+y^2)}$$

ومن التماثل نرى أن المركبة الأفقية تتلاشى، بينما المركبة العمودية :

$$dE_y = dE\cos\theta \quad ; \quad \cos\theta = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{a^2+y^2}}$$

$$\int dE_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0}\frac{y}{(a^2+y^2)^{3/2}}\oint ds \quad ,$$ تكامل $(\oint ds)$ هو محيط الحلقة أي $(2\pi a)$

$$E_y = E_p = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0}\frac{y}{(a^2+y^2)^{3/2}}(2\pi a)$$

ولكن: $\Leftarrow \quad \lambda = \frac{q}{S} = \frac{q}{2\pi a}$

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q\,y}{2\pi a\,(a^2+y^2)^{3/2}}(2\pi a)$$

$$\therefore E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{y\,q}{(a^2+y^2)^{3/2}}$$

* لاحظ أنه في مركز الحلقة يكون المجال صفراً.

* ولاحظ أيضاً أنه عندما تكون نقطة المجال بعيدة جداً، أي أن $(y \gg a)$، فإن:

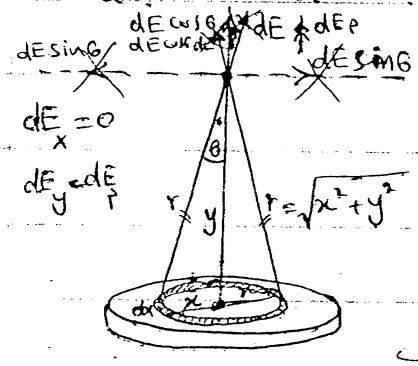
$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\cdot\frac{yq}{y^{3/2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\cdot\frac{q}{y^2}$$

$\Leftarrow$ أي أن:

الشحنة التي على الحلقة تبدو وكأنها في مركز الحلقة.

• تمرين ④: قرص دائري نصف قطره (a) عليه شحنة سطحية كثافتها السطحية (σ). أوجد المجال الكهربائي عند نقطة على محوره.

• الحل:



نجاد المجال الكهربائي عند النقطة (P) التي تبعد مسافة (y) عن مركز القرص، نقسم القرص إلى حلقات صغيرة، نصف قطر كل منها (x) وسمكها (dx)، فيكون مقدار الشحنة على كل حلقة:

$$dq = \sigma\,(2\pi x\,dx)$$

ويكون المجال الناتج (dE) عن الحلقة الواحدة:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{dq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{\sigma(2\pi x\,dx)}{(x^2+y^2)}$$

ومن تماثل المسألة نلاحظ أن المركبة الأفقية للمجال تتلاشى، وتبقى فقط المركبة العمودية (dE_y)، أي أن:

$$dE_y = dE\cos\theta \Rightarrow E_y = \int dE_y = \int dE\cos\theta = E_p$$

$$\cos\theta = y/r$$: (dE) وبالتعويض عن

$$E_p = E_y = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}\int_0^a \frac{x}{x^2+y^2}\frac{y}{(x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}dx$$

$$= \frac{\sigma y}{2\epsilon_0}\int_0^a \frac{x}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}dx$$

$$= \frac{\sigma y}{2\epsilon_0}\left[-\frac{1}{(x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}\right]_0^a$$

$$= \frac{\sigma y}{2\epsilon_0}\left[-\frac{1}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{(0+y^2)^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$= \frac{\sigma y}{2\epsilon_0}\left[\frac{1}{y} - \frac{1}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}\right]$$

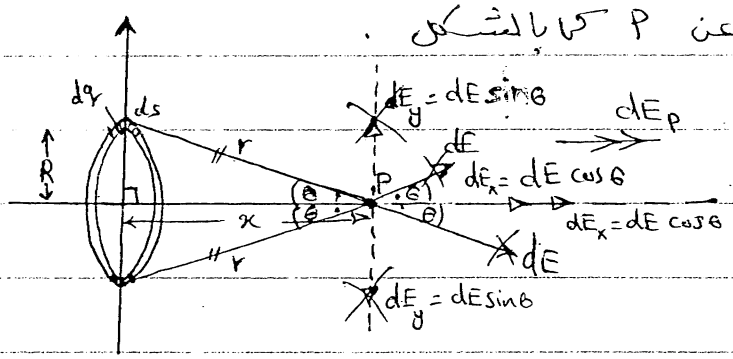
$$= \frac{\sigma}{2\epsilon_0}\left[\frac{y}{y} - \frac{y}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$|E_p| = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}\left[1 - \frac{y}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}\right]$$

وعندما تكون $(a \gg y)$، أي أن النقطة المراد إيجاد المجال الكهربي عندها قريبة جداً من القرص تكون:

$$E_p = E_y = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

• تمرين ⑤ : أوجد E عند P كما بالشكل .



$dE_y = 0$;

$dE_p = dE_x$

• الحل :

$$dE = k\frac{dq}{r^2} \quad ; \quad \lambda = \frac{q}{S} = \frac{dq}{ds}$$

$$\lambda = \frac{q}{2\pi R} = \frac{dq}{ds}$$

$$\Rightarrow dq = \frac{q}{2\pi R}\, ds$$

$$dE = k\frac{q}{2\pi R}\frac{1}{r^2}\, ds \quad ; \quad r = \sqrt{R^2+x^2}$$

$$dE_y = 0 \quad ; \quad dE_x = dE\cos\theta = dE_p \; ; \; \cos\theta = \frac{x}{r}$$

$$\therefore \int dE_p = \int dE_x = k\frac{q}{2\pi R}\frac{x}{(R^2+x^2)^{\frac{3}{2}}}\oint ds$$

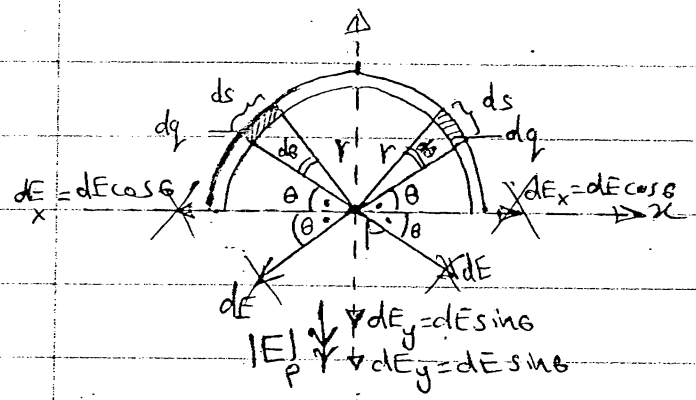
$$E_p = E_x = k\frac{q}{2\pi R}\frac{x}{(R^2+x^2)^{3/2}}(2\pi R)$$

$$\therefore E_p = k\frac{qx}{(x^2+R^2)^{3/2}}$$

• تمرين ⑥ : سلك سُحني على شكل نصف دائرة نصف قطرها (R) يحمل شحنة كهربائية (q) موزعة توزيعاً منتظماً . أوجد محصلة المجال الكهربائي في نقطة (P) التي تمثل مركز الدائرة

(19)

كما بالشكل.



• الحل :

$$dE = k\frac{dq}{r^2}$$

$$\lambda = \frac{q}{s} = \frac{dq}{ds}$$

$$\therefore \lambda = \frac{q}{(\frac{2\pi r}{2})} = \frac{dq}{ds}$$

$$dq = \frac{q}{\pi r}\,ds$$

$$= \frac{q}{\pi r}(r\,d\theta)$$

$$\therefore dq = \frac{q}{\pi}\,d\theta$$

$$dE_x = 0$$

$$dE_y = dE\sin\theta = dE_p$$

$$\int dE_y = k\frac{q}{\pi r^2}\int_0^{\pi}\sin\theta\,d\theta$$

$$E_y = E_p = k\frac{q}{\pi r^2}\left[-\cos\theta\right]_0^{\pi}$$

$$= k\frac{q}{\pi r^2}(-\cos\pi + \cos 0)$$

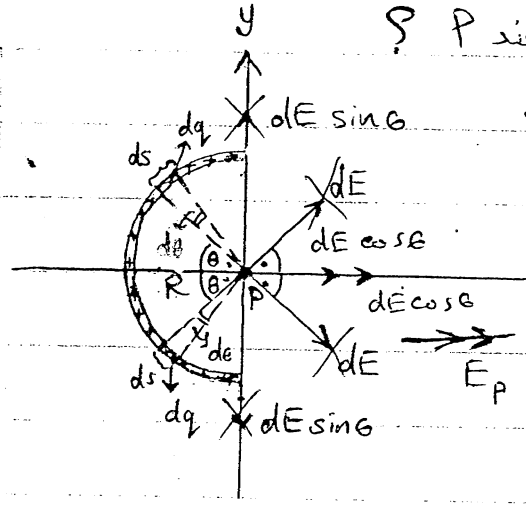
($-\cos\pi$: $\cos\pi = -1$, $+$; $\cos 0 = 1$)

$$\therefore E_p = 2k\frac{q}{\pi r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\cdot\frac{2q}{\pi r^2}$$

$$\therefore E_p = \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 r^2}$$

• تمرين (7) : أوجد المجال الكهربائي عند P ؟

• الحل :



$$\because dE = k\frac{dq}{R^2} \qquad \because \lambda = \frac{q}{S} = \frac{dq}{ds}$$

$$\therefore \lambda = \frac{q}{\frac{1}{2}(2\pi R)} = \frac{dq}{R\,d\theta}$$

$$\Rightarrow dq = \frac{q}{\pi}\,d\theta$$

$$\therefore dE = k\frac{q}{\pi R^2}\,d\theta$$

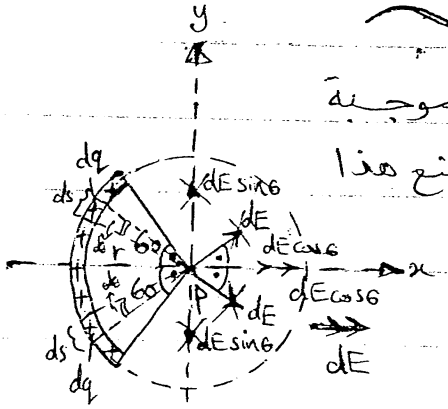
$$dE_y = 0$$

$$\int dE_x = \int dE_p = \int dE\cos\theta = k\frac{q}{\pi R^2}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta\,d\theta$$

$$E_x = E_p = k\frac{q}{\pi R^2}\left[\sin\theta\right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = k\frac{q}{\pi R^2}\left(\sin\frac{\pi}{2} + \sin\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\therefore E_p = 2k\frac{q}{\pi R^2}$$

• تمرين (8) : سلك مشحون بشحنة موجبة موزعة بانتظام، ثني ليصنع هذا الشكل. أوجد المجال الكهربائي عند النقطة (P) ؟



• الحل :

$$dE = k\frac{dq}{r^2}$$

$$\lambda = \frac{q}{S} = \frac{dq}{ds} \Rightarrow dq = \lambda\,ds$$

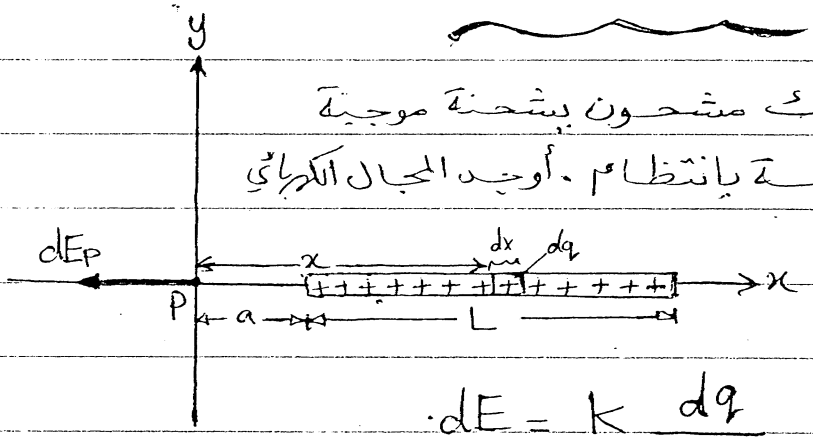
$$dE = k\frac{\lambda\,ds}{r^2} \quad ; \quad ds = r\,d\theta$$

$$dE_y = 0 \quad ; \quad dE_x = dE\cos\theta = dE_p$$

$$\int dE_x = \int dE_p = K 2\lambda r \int_0^{60} \frac{\cos\theta \, d\theta}{r^2}$$

$$E_x = E_p = 2K \frac{\lambda}{r} \left[\sin\theta\right]_0^{60} = 2K \frac{\lambda}{r} (\sin 60 - \sin 0)$$

$$\therefore E_p = K \frac{\lambda}{r} \frac{\sqrt{3}}{2} = K \frac{\sqrt{3}\lambda}{r}$$



- تمرين (9): سلك مشحون بشحنة موجبة موزعة بانتظام. أوجد المجال الكهربائي عند النقطة (P)؟
- الحل:

$$dE = K \frac{dq}{x^2} \; ; \; dq = \lambda \, dx$$

$$\int dE_p = \int_a^{a+L} K \frac{\lambda \, dx}{x^2}$$

$$E_p = K\lambda \int_a^{a+L} \frac{dx}{x^2}$$

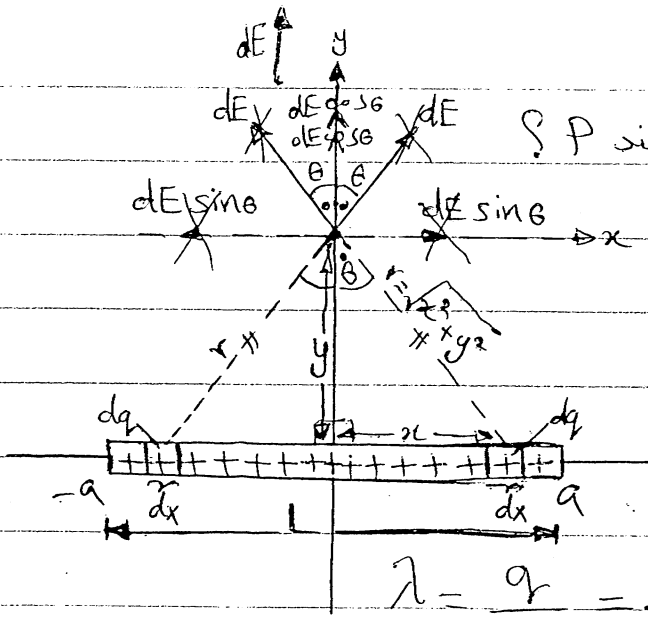
$$= K\lambda \int_a^{a+L} x^{-2} \, dx$$

$$= K\lambda \left[\frac{-1}{x}\right]_a^{a+L}$$

$$E_p = K\lambda \left[\frac{-1}{a+L} + \frac{1}{a}\right] = K\lambda \left(\frac{-a + a + L}{a(a+L)}\right)$$

$$E_p = K \frac{\lambda L}{a(a+L)} \; ; \; \lambda = \frac{q}{L} \Rightarrow E_p = K \frac{qK}{Ka(a+L)}$$

$$E_p = K \frac{L}{a(a+L)} \frac{q}{}$$



- عزيزي (10) : أوجد E عند P ؟
- الحل : $\because dE = k\frac{dq}{r^2}$

$$r = \sqrt{x^2+y^2}$$

$$\lambda = \frac{q}{L} = \frac{dq}{dx} \Rightarrow dq = \lambda\, dx$$

$$dE_x = 0$$

$$dE_y = dE\cos\theta = dE_p \quad ; \cos\theta = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}$$

$$= k\frac{\lambda}{(x^2+y^2)}\frac{y}{(x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}\,dx$$

$$\int dE_p = \int k\frac{\lambda y}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}\,dx$$

$$\therefore E_p = k\lambda y\int_{-a}^{a}\frac{dx}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}} = k\lambda y\left\{\frac{1}{y^2}\left[\frac{x}{(x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}\right]_{-a}^{a}\right\}$$

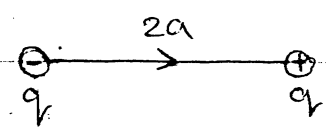
$$= k\frac{\lambda}{y}\left[\frac{a}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{a}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$= k\frac{\lambda}{y}\frac{2a}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}} \quad ; \lambda = \frac{q}{L} = \frac{q}{2a}$$

$$\therefore E_p = k\frac{q}{2ay}\frac{2a}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}} = k\frac{q}{(a^2+y^2)^{\frac{1}{2}}}$$

ثنائي القطب في مجال كهربائي (A Dipole in an Electric Field)

يتكون ثنائي القطب الكهربائي (Electric Dipole) من شحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في الإشارة $(\pm q)$ بينهما مسافة صغيرة جداً $(2a)$ مقارنة بالمسافة التي يُراد عندها إيجاد المجال الكهربائي الناتج عن ثنائي القطب «بُعد نقطة المجال».

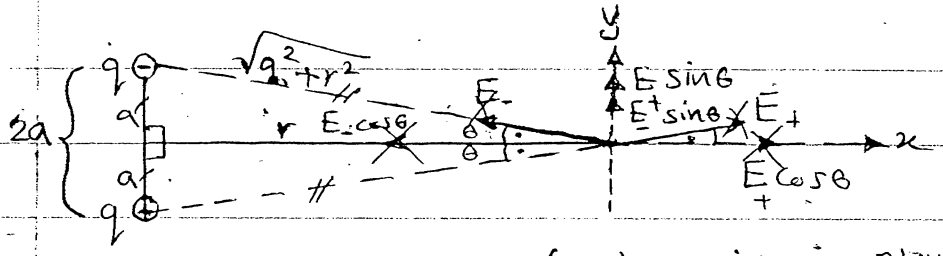


ويُعرّف عزم ثنائي القطب (dipole moment) والذي يُرمز له بالرمز $(\vec{P})$ على أنه حاصل ضرب أي من مقدار الشحنتين والمسافة بينهما، أي أن:

$$\vec{P} = 2a\,q$$

وعزم ثنائي القطب $(\vec{P})$ كمية فيزيائية متجهة، واتجاهه من الشحنة السالبة إلى الشحنة الموجبة ووحداته: (C.m).

- مثال ①: أوجد المجال الكهربائي الناشئ عن ثنائي القطب الكهربائي عند نقطة تقع على المنصف العمودي للمسافة بين الشحنتين؟



- الحل:

المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة $(+q)$:

$$E_+ = K\frac{q}{(a^2+r^2)}$$

المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة $(-q)$:

$$E_- = K\frac{q}{(a^2+r^2)}$$

وهما متساويتان في المقدار، واتجاههما كما بالشكل أعلاه. ومحصلة المجالين هو الجمع الاتجاهي لهما:

$$E = E_+ + E_-$$

نلاحظ أن المركبتين الأفقيتين تتلاشيان، بينما المركبتان العموديتان يعزز بعضهما بعضاً، ومجموعهما يساوي:

$$E_x = 0 \quad , \quad E_y = E_+\sin\theta + E_-\sin\theta$$

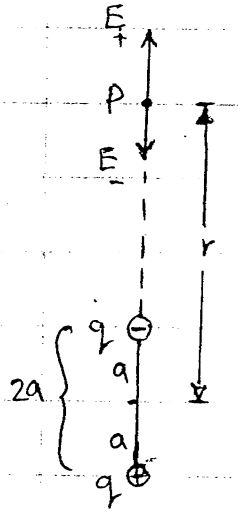
$$E_y = E_p = 2E\sin\theta = 2K\frac{q}{(a^2+r^2)}\frac{a}{\sqrt{a^2+r^2}}$$

$$E_y = E_p = K\frac{2aq}{(a^2+r^2)^{\frac{3}{2}}} \quad ; \quad P = 2aq$$

$$E_y = E_p = K\frac{P}{(a^2+r^2)^{\frac{3}{2}}} \quad ; \quad r >> a$$

$$E_p = K\frac{P}{(0+r^2)^{\frac{3}{2}}} = K\frac{P}{r^3}$$

- مثال ③ : أوجد المجال الكهربائي لثنائي الوقب عند نقطة على محوره تبعد مسافة (r) من منتصفه ؟



- الحل :

$$E_- = K\frac{q}{(r-a)^2}$$

$$E_+ = K\frac{q}{(r+a)^2}$$

$$|E_p| = |E_- - E_+|$$

$$= \left[K\frac{q}{(r-a)^2} - K\frac{q}{(r+a)^2}\right]$$

$$= Kq\left[\frac{1}{(r-a)^2} - \frac{1}{(r+a)^2}\right]$$

$$= Kq\left[\frac{(r+a)^2-(r-a)^2}{(r-a)^2(r+a)^2}\right]$$

$$= Kq\left[\frac{r^2+2ra+a^2-r^2+2ra-a^2}{(r^2-a^2)^2}\right]$$

$$= Kq\frac{4ra}{(r^2-a^2)^2} \quad ; \quad P = (2a)q$$

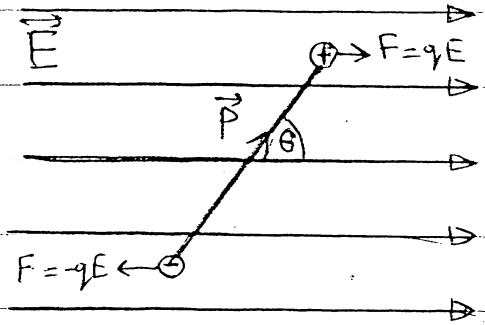
$$= K\frac{2rP}{(r^2-a^2)^2} \quad ; \quad r >> a$$

$$\therefore E_p = K \frac{2xP}{r^{1+3}}$$

$$= K \frac{2P}{r^3}$$

ثنائي القطب في مجال كهربائي : A Dipole in an Electric Field

عندما يوضع ثنائي القطب في مجال كهربائي منتظم $(\vec{E})$ بحيث يصنع عزم ثنائي القطب مع اتجاه المجال زاوية مقدارها (θ)، فإن المجال الكهربائي سيؤثر على الشحنة $(+q)$ بقوة مقدارها $(\vec{F} = q\vec{E})$، وعلى الشحنة $(-q)$ بقوة مقدارها $(\vec{F} = -q\vec{E})$، أي أن القوتين متساويتان في المقدار ومتضادتان في الاتجاه، وحيث أن خط تأثير القوة ليس واحداً، فإن عزم القوتين الكهربائيتين يُعطى بالعلاقة:



$\vec{\tau} =$ "عزم الدوران" $= \vec{F} \times 2a$

وهو الضرب الاتجاهي للقوة $(\vec{F})$ والمسافة بين القوتين $(2a)$. أي المسافة بين الشحنتين ووحداته $(N.m)$.

ويمكن كتابة المعادلة الأخيرة كالآتي:

$$\vec{\tau} = q\vec{E} \times 2a = (2aq)E \sin\theta$$

وحيث أن $(\vec{P} = 2aq)$ فإن:

$$\tau = PE \sin\theta$$

والتي يمكن إعادة كتابتها كحاصل ضرب اتجاهي بين المتجهين $(\vec{P})$، $(\vec{E})$ كالآتي:

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

وواضح أن عزم القوة يكون أكبر ما يمكن عندما تكون $(\theta = 90°)$، أي أن:

$$\tau = PE \sin 90° = PE$$

وأصغر ما يمكن عندما يكون $(\theta = 270°)$ أي أن:

$$\tau = PE \sin 270° = -PE$$

ويكون عزم القوة صفراً عندما تكون ($\theta = 0^\circ$) .

فإذا أزاحت القوة الكهربائية ثنائي القطب إزاحة زاوية ($-d\theta$)

فإن الشغل المبذول يكون:

$$dW = \tau(-d\theta)$$

ويكون الشغل المبذول الكلي لإزاحة القطب من زاوية ابتدائية (θ_0) إلى زاوية نهائية (θ):

$$W = \int dW = -\int_{\theta_0}^{\theta} \tau \, d\theta$$

$$W = -\int_{\theta_0}^{\theta} PE \sin\theta \, d\theta = -PE\left[(-\cos\theta)\right]_{\theta_0}^{\theta}$$

$$= PE\,(\cos\theta - \cos\theta_0)$$

فإذا كانت الزاوية ($\theta_0 = 90^\circ$) فإن المعادلة الأخيرة تصبح:

$$W = PE\cos\theta$$

أي أن: الشغل المبذول هو الضرب العددي للمتجهين ($\vec{P}$) و($\vec{E}$) أو:

$$W = \vec{P}\cdot\vec{E}$$

ووجود هذا الشغل يعني أن هناك طاقة وضع U مخزنة في النظام المكون من ثنائي القطب والمجال الكهربائي مقدارها يساوي الشغل المبذول، أي أن:

$$U = \vec{P}\cdot\vec{E}$$

- مثال: وُضع ثنائي قطب شحنته ($\pm 2.5\ \mu C$) والمسافة بين الشحنتين ($0.1\ mm$) في مجال كهربائي شدته ($4\times10^{10}\ N/C$) بحيث يصنع ثنائي القطب مع المجال زاوية مقدارها (50°). أوجد مقدار طاقة الوضع المخزنة في النظام.

- الحل:

$$U = \vec{P}\cdot\vec{E}$$

$$= (2q)\,E\cos\theta$$

$$= (0.1\times10^{-3})(2.5\times10^{-6})(4\times10^{10})\cos 50$$

$$\therefore U = 6.427\ J$$