الفصل الثاني

المجال الكهربائي المستقر في الفراغ

Electrostatic Field in Vacuum

2-1 تمهيد

المجال الكهربائي المستقر: هو المجال المتولد من الشحنات الساكنة وذلك بدلالة تأثر شحنة كهربائية (هي شحنة الاختبار) بعدد من الشحنات القريبة منها والموجودة جميعها في الفراغ.

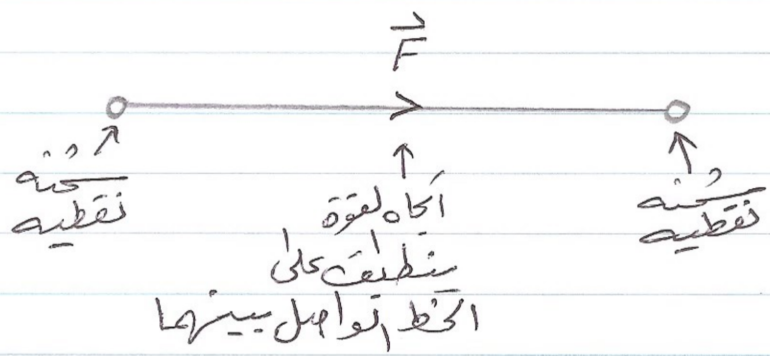
* سوف تقتصر دراستنا في هذا الفصل على المجال الكهربائي المستقر فقط.

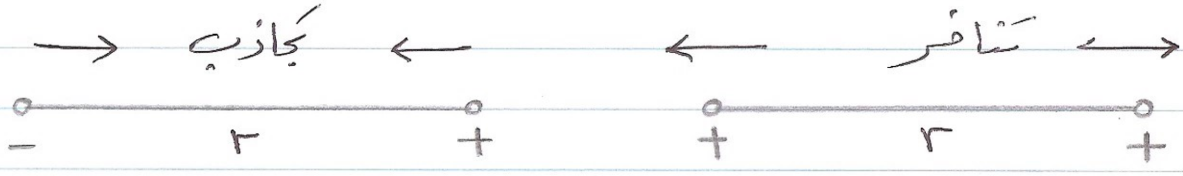
المجال الكهربائي
- المستقر ← يعتمد على الموقع ولا يعتمد على الزمن
- الديناميكي ← يعتمد على الموقع والزمن

ملاحظة حول المصطلحات مستقر ؟
مثلاً شحنة مستقرة ؟
شحنة ساكنة ؟

2-2 قانون كولوم Coulomb's Law

نص قانون كولوم : أن القوة بين شحنتين نقطيتين ساكنتين تتناسب طرديا مع حاصل ضرب هاتين الشحنتين وعكسياً مع مربع المسافة بينهما ويكون خط تأثير تلك القوة على استقامة الخط الواصل بين تلك الشحنتين ، وتكون قوة تجاذب اذا كانت الشحنتين مختلفتين وقوة تنافر اذا كانت الشحنات متشابهه .





صيغة قانون كولوم الرياضية :

$$\vec{F} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{e}_r \quad --- (1)$$

$\vec{F}$ تمثل القوة بين الشحنتين .

Q_1 ، Q_2 مقدار الشحنتين النقطيتين

r المسافة بين الشحنات

$\vec{e}_r$ وحدة المتجه باتجاه $\vec{r}$.

اما الثابت k بوحدات النظام العالمي (SI units) فيعطى كما يلي

$$k = 9\times10^{9}\ \frac{N\cdot m^2}{C^2} \quad \text{---(2)}$$

كذلك يمكن أن يكتب كالآتي :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad \text{-----(3)}$$

حيث أن ϵ_0 تمثل سماحية الفراغ (Permittivity of vaccum)

~~3-2~~ 2-3 شدة المجال الكهربائي

The electric field intensity

المجال الكهربائي : هو الحيز الذي تظهر فيه آثار القوة الكهربائية على الشحنات الساكنة الموجودة في ذلك الحيز .

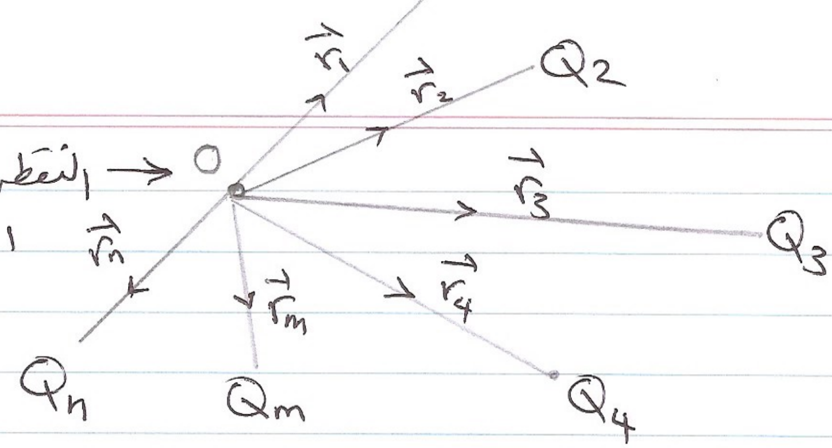
شدة المجال الكهربائي : تعرف شدة المجال الكهربائي في نقطة ما بأنها القوة المؤثرة على وحدة الشحنات في تلك النقطة .

∴ وعليه تكون شدة المجال لشحنة نقطية Q في نقطة تبعد عنها مسافة r باستخدام العلاقة (1) كالآتي

$$\vec{E} = k\,\frac{Q}{r^2}\,\vec{e}_r \quad \text{---(4)}$$

أما في حالة وجود عدد من الشحنات النقطية مثل Q_1 ، Q_2 ، Q_3 ، Q_4 ، Q_5 ، . . . . Q_n والتي تبعد بالمسافات r_1 ، r_2 ، r_3 ، . . . r_n عن النقطة المراد حساب شدة المجال فيها وكما يتضح من الشكل الآتي :

النقطة المراد حساب شدة المجال الكهربائي فيها



أن محصلة شدة المجال هي المجموع الاتجاهي لشدة مجال كل الشحنات النقطية

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_m + \cdots + \vec{E}_n \quad ---(5) \Leftarrow$$ جمع متجهي

اما اذا كانت الشحنة موزعة توزيعاً حجمياً، سطحياً او طولياً فاننا نستخدم طريقة التكامل لايجاد شدة المجال وكالآتي:

$$\vec{E} = k\int \frac{dQ}{r^2}\,\vec{e}_r \quad ---(6)$$

حيث تعتمد dQ على نوعية توزيع الشحنة

اولاً: في حالة التوزيع الطولي $dQ = \lambda\, dl$ .....(7)

λ هي كثافة الشحنة الطولية على ذلك الجسم.

dl جزء تفاضلي من طول ذلك الجسم l.

ثانياً: في حالة التوزيع السطحي $dQ = \sigma\, ds$ ---(8)

σ تمثل كثافة الشحنة السطحية على ذلك الجسم.

ds جزء متناهي في الصغر من ذلك السطح S.

ثالثاً: في حالة التوزيع الحجمي $dQ = \rho\, d\tau$ .....(9)

ρ كثافة الشحنة الحجمية في ذلك الحجم

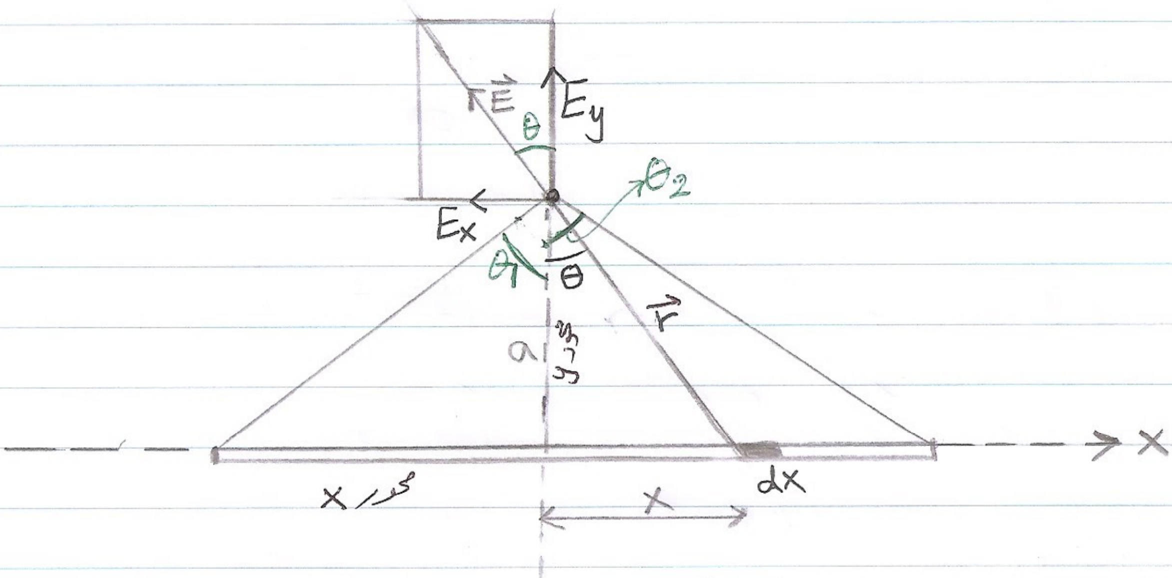
$d\tau$ جزء متناهي في الصغر من ذلك الحجم τ.

Ex 1.

جد شدة المجال خارج سلك مشحون بصورة منتظمة كثافة شحنته الطولية λ .

الحل : نفرض أن السلك وضع على امتداد المحور x

نفرض أن المطلوب ايجاد شدة المجال في نقطة $P \Longleftarrow P(x,y)$



ملاحظة : الزوايا θ_1 و θ_2 مرتبطة ببداية السلك ونهايته

$$\because \vec{E} = k \int \frac{dQ}{r^2}\, \vec{e}_r \Rightarrow$$ في حالة التوزيع الطولي $dQ = \lambda\, dl.$

في الشكل واضح أن $dQ = \lambda\, dx$

$$\therefore \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda\, dx}{r^2}\, \vec{e}_r \Rightarrow E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda\, dx}{r^2}$$

حيث أن

$$\vec{E} = \vec{i}\, E_x + \vec{j}\, E_y$$

و

$$\vec{r} = \vec{i}\, x + \vec{j}\, y \Rightarrow r^2 = x^2 + y^2 = x^2 + a^2$$

مركبات المجال هي

$$E_x = E \sin\theta$$
$$E_y = E \cos\theta$$

واعتماداً على الشكل

$$x = r\sin\theta$$
$$y = r\cos\theta$$

$$\therefore E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int \frac{\lambda\, dx}{r^2}\sin\theta$$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int \frac{\lambda\, dx}{r^2}\cos\theta$$

التكامل يعتمد على عدة متغيرات وهي $\cos\theta$ و r و x :
و لجعل الكل اسهل يمكن أن نستبدل كل من r و x بالزاوية θ

$$\frac{x}{y} = \frac{r\sin\theta}{r\cos\theta} = \tan\theta \Rightarrow \therefore x = y\tan\theta$$

$$\because y = a \qquad \therefore x = a\tan\theta \;,\; dx = a\sec^2\theta\, d\theta$$

$$\because r = \frac{x}{\sin\theta} = \frac{a\tan\theta}{\sin\theta} = \frac{a\,\cancel{\frac{\sin\theta}{\cos\theta}}}{\cancel{\sin\theta}} = a\frac{1}{\cos\theta}$$

$$\therefore r = a\sec\theta$$

$$\therefore E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda a\sec^2\theta\, d\theta}{a^2\sec^2\theta}\sin\theta$$

$$\therefore E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{\lambda}{a}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\sin\theta\, d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}(-\cos\theta)\Big|_{\theta_1}^{\theta_2}$$

$$= \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}\left[-\cos\theta_2 - (-\cos\theta_1)\right]$$

$$\therefore E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{\lambda a\sec^2\theta\, d\theta}{a^2\sec^2\theta}\cos\theta$$

$$E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\cos\theta\, d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}\sin\theta\Big|_{\theta_1}^{\theta_2}$$

$$\therefore E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

الآن نناقش الحالة التي تكون فيها النقطة p واقعة على العمود المنصف للسلك المشحون.

وقوع p على العمود المنصف للسلك يعني أن $\theta_2 = \theta_1 = \theta$

$$\theta_1 = -\theta_2 = \theta$$

$$\therefore \theta_1 = \theta \text{ and } \theta_2 = -\theta$$

ملاحظة

$$\therefore E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}(\cos\theta - \cos(-\theta)) \quad ; \quad \because \cos(\theta) = \cos(-\theta)$$

لأن دالة cos زوجية

$$\therefore E_x = 0$$

ملاحظة:

$$E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a}(\sin(-\theta) - \sin\theta) \quad ; \quad \sin(-\theta) = -\sin\theta$$

لأن دالة sin فردية

$$\therefore E_y = \frac{-\lambda}{2\pi\epsilon_0 a}\sin\theta$$

الآن / واجب / نناقش الحالة التي يكون فيها السلك طويل جداً بالمقارنة مع المسافة العمودية a

في هذه الحالة تكون $\theta_1 = -\frac{\pi}{2}$, $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$

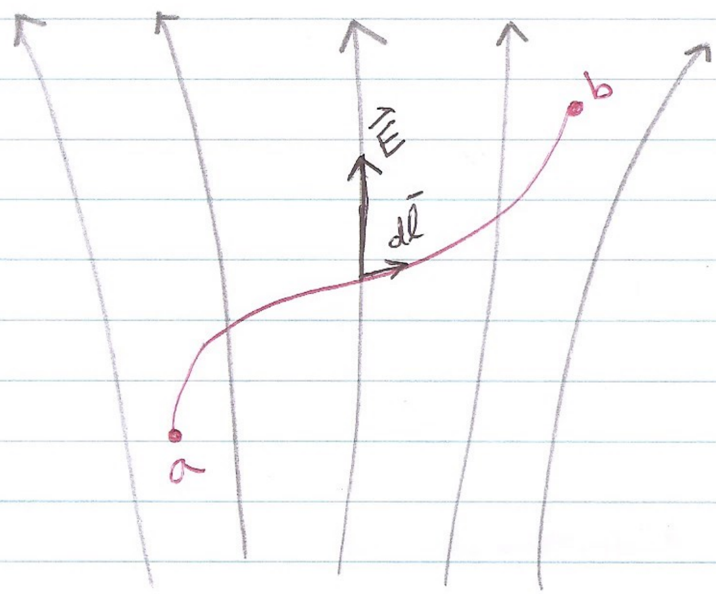
واجب: اعد المثال اعلاه فقط اعتبر السلك المشحون موضوع على امتداد المحور y .

Electric Potential الجهد الكهربائي 2-4

أذا أزيحت شحنة مقدارها Q في مجال كهربائي $\vec{E}$ ، بحيث لا يؤثر وجودها على شكل المجال او مقداره ، ازاحة تفاضلية مقدارها $d\vec{l}$ من النقطة a الى النقطة b وبدون أن تتغير طاقتها فأنه الشغل المنجز عليها يساوي

كمية عددية ← $$W = -\int_a^b Q\,\vec{E}\cdot d\vec{l} \quad --- (10)$$

والأشارة السالبة تعني أن الشغل قد أنجز ضد المجال $\vec{E}$.



الشكل (1)

اما اذا كانت حركة الشحنة على مسار مغلق فيكون الشغل المنجز مساوي الى :

$$W = -\oint Q\vec{E}\cdot d\vec{l} \quad --- (11)$$

مسار مغلق ←

ومهما كان شكل الجسم وكذلك ومهما كانت عدد الشحنات النقطية المستقرة ، علمنا أنه نستنتج ان الشغل المنجز على الشحنات الواقعة في مجال كهربائي اذا حركت في طريق مغلق يساوي صفراً بحيث أن :

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = 0 \quad --- (12)$$

وهذا يعني أن المجال الكهربائي المستقر هو مجال محافظ
وباستخدام نظرية ستوكس (الفصل الاول معادلة ( ))
نحصل على

$$\therefore \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

مبرهنة ستوكس

$$\oint_C \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int_S (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \cdot d\vec{S}$$

$$\therefore \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad --- 13$$

العلاقة (13) لا تصح الا في حالة كون المجال الكهربائي مجال مستقر لا يتغير مع الزمن.

وبما أن $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \Phi = 0$ (راجع الفصل الأول)

إذن علينا أن نعرف المجال على انه الانحدار لدالة عددية مثل Φ

$$\therefore \vec{E} = -\vec{\nabla} \Phi \quad --- (14)$$

خصائص الدالة $\Phi(x,y,z)$: ١- دالة مستمرة
٢- وحيدة القيمة ← ملاحظة ؟
٣- الدالة Φ تمثل الجهد الكهربائي
٤- الأشارة السالبة في العلاقة (14) تدل على أن اتجاه المجال الكهربائي يشير الى النقصان في الجهد.

الآن لو ضربنا العلاقة (14) ضرب عددي ب $d\vec{l}$ نحصل على

$$\underbrace{\vec{E} \cdot d\vec{l}}_{} = \underbrace{-\vec{\nabla}\Phi \cdot d\vec{l}}_{-d\Phi} \quad --- 15$$

يمثل الشغل المنجز من قبل مجال كهربائي $\vec{E}$ لأزاحة وحدة الشحنات ازاحة تفاضلية مقدارها $d\vec{l}$

∴ الشغل المبذول لنقل وحدة الشحنات من النقطة (a) الى النقطة (b) :

$$\int_a^b \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_a^b d\phi = -(\phi_b - \phi_a) \quad ---16$$

اي أن فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين a و b هو مقدار الشغل المبذول لنقل وحدة الشحنات من النقطة a الى النقطة b .

* وعندما يكون $\int_a^b \vec{E}\cdot d\vec{l} = 0$ فأن $\phi_a = \phi_b$ وهذا يعني أن فرق الجهد بين النقطتين يساوي صفر .

** اذا كان لدينا سطح جميع نقاطه متساوي بالجهد يقال ان هذا السطح سطح تساوي الجهد . وتكون سطوح تساوي الجهد لشحنة نقطية سطوحاً كروية متمركزة حول تلك الشحنة النقطية كمركز لها .

2-5 قانون كاوس Gauss's Law

لحساب شدة المجال الكهربائي المستقر في اي نقطة في الفراغ والناتج عن وجود شحنة او شحنات نقطية نستخدم قانون كولوم . أما اذا كان توزيع الشحنة معقداً فأن شدة المجال في تلك النقطة لايمكن حسابها بسهولة بأستخدام قانون كولوم ، في مثل هذه الحالات نستخدم قانون كاوس .

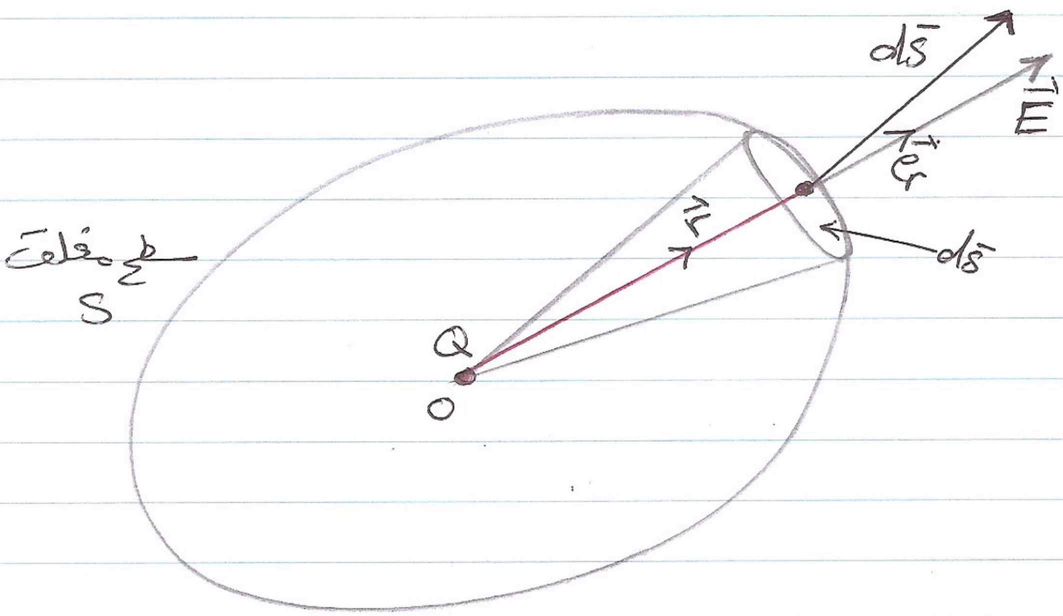
نص قانون كاوس : أن عدد خطوط الفيض الكهربائي التي تقطع اي سطح مغلق (مهما كان شكله) يساوي الشحنة التي يحتويها هذا السطح المغلق مقسومة على ϵ_0 (ثابت سماحية الفراغ) وتعطى صيغته الرياضية بمايلي :

$$\oint_s \vec{E}\cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad ---(17)$$

شدة المجال في اي نقطة على السطح المغلق

جزء تفاضلي من السطح المغلق

ولكي نثبت هذه العلاقة نتصور الفيض الكهربائي خلال سطح مغلق S يحتوي على شحنة نقطية مقدارها Q في نقطة O كما في الشكل (2)



الشكل (2)

ولحساب $\vec{E}$ في أي نقطة على هذا السطح المغلق

$$\vec{E} = k\frac{Q}{r^2}\,\vec{e}_r$$

ومقدار الفيض الكهربائي خلال سطح تفاضلي مقداره $d\vec{s}$ في اي نقطة على السطح المغلق هو :

$$\vec{E}\cdot d\vec{s} = k\frac{Q}{r^2}\,\vec{e}_r\cdot d\vec{s} \quad \text{--- } 18$$

$\vec{e}_r \cdot d\vec{s}$ ← يمثل مسقط المتجه $d\vec{s}$ على سطح الكرة التي نصف قطرها $\vec{r}$ ومركزها O ومقداره هو ds' .

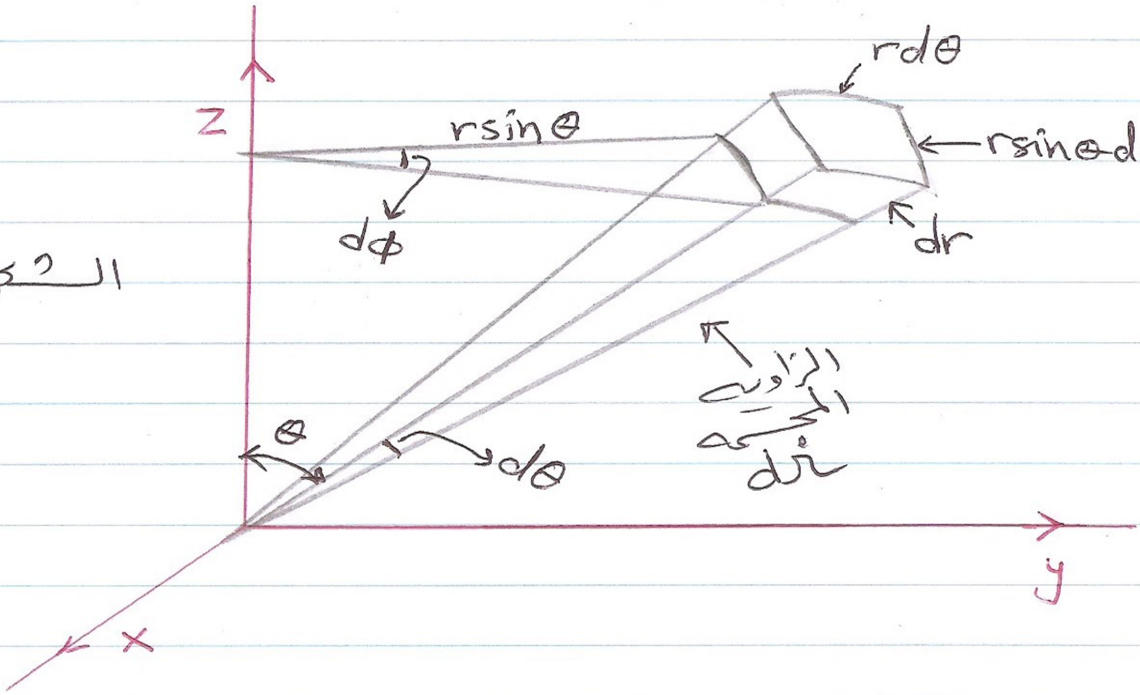
$$\therefore \vec{E}\cdot d\vec{s} = kQ\frac{ds'}{r^2} \quad \text{--- } (19)$$

$\frac{ds'}{r^2}$ هو الزاوية المجسمة $d\Omega$ التي يقع رأسها في نقطة O

$$\therefore \vec{E}\cdot d\vec{s} = kQ\,d\Omega \quad \text{--- } 20$$

وبالاستفادة من الشكل التالي :

الشكل (3)



$$\oint d\Omega = \oint \frac{ds'}{r^2} = \oint \frac{r^2 \sin\theta\, d\theta\, d\phi}{r^2}$$

$$= \underbrace{\int_0^{\pi} \sin\theta\, d\theta}_{2} \underbrace{\int_0^{2\pi} d\phi}_{2\pi} = 4\pi \quad --- 21$$

$$\therefore \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} Q\, 4\pi = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

قانون كاوس $\therefore$ $\boxed{\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{E_0}}$ ---- 22 $\Rightarrow$ الصيغة التكاملية لقانون كاوس

ملاحظة : وفقاً للعلاقة (22) أن مقدار الفيض الكهربائي لا يعتمد على موقع Q وإذا كان هذا السطح المغلق يحتوي على أي عدد من الشحنات النقطية فإننا يمكن أن نتبع نفس الطريقة السابقة في استخراج الفيض لكل شحنة من الشحنات على حدة ويكون الفيض الكلي هو مجموع الفيض الخاص بهذه الشحنات .

الآن يمكن ايجاد $\vec{\nabla}\cdot\vec{E}$ وذلك بالاستفادة من :

مبرهنة كاوس $\Leftarrow$ $\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = \int_{\tau} \vec{\nabla}\cdot\vec{E}\, d\tau \;\therefore$

بالاستفادة من العلاقة (9) $\Leftarrow$ $\int_{\tau} \vec{\nabla}\cdot\vec{E}\, d\tau = \int_{\tau} \frac{\rho\, d\tau}{\epsilon_0} \;\therefore$ الطرف الأيمن من المبرهنة

$$= \frac{1}{\epsilon_0}\int_{\tau} \rho\, d\tau$$

$$\therefore \int_{\tau} \vec{\nabla}\cdot\vec{E}\, d\tau = \frac{1}{\epsilon_0}\int_{\tau} \rho\, d\tau \quad \text{---- (23)} \;\therefore$$

وبرفع التكامل من الطرفين نحصل على

$$\therefore \boxed{\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{--- } 24}$$

الصيغة التفاضلية لقانون كاوس

كثافة الشحنة ρ في العلاقة (24) تصح للشحنات المقيدة والحرة .

—

6-2- معادلة بوازان ومعادلة لابلاس

Poisson's Equation and Laplace's Equation

من المعادلة (14) --- $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$ نعوض $\vec{E}$ في العلاقة (24):

$$-\vec{\nabla}\cdot\vec{\nabla}\phi = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\therefore\ -\nabla^2\phi = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad --- 25 \Leftarrow$$ معادلة بوازان

وهي معادلة تفاضلية

هذه المعادلة يمكن حلها لايجاد ϕ وذلك عندما تكون ρ معروفة وكذلك بمعرفة الشروط الحدودية.

وهنالك حالة خاصة من معادلة بوازان وهي

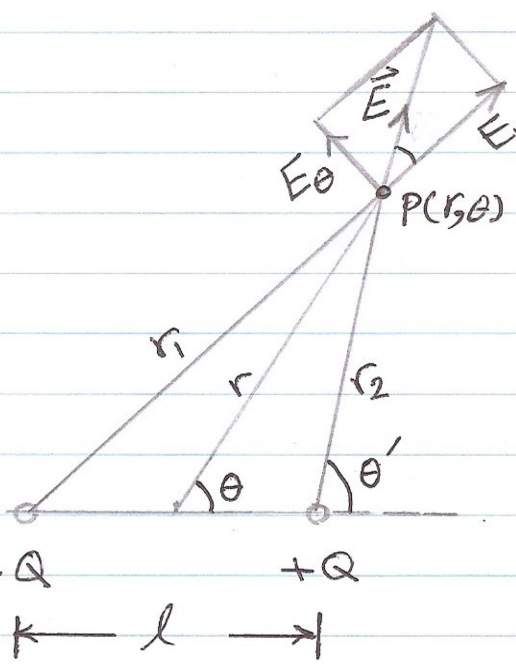
$$\nabla^2\phi = 0 \quad --- 26 \Leftarrow$$ معادلة لابلاس

ويمكن استخدام معادلة لابلاس لحساب الجهد ϕ في المناطق الخالية من الشحنات وهي من المعادلات الاساسية في موضوع الكهربائية المستقرة.

The Electric Dipole ثنائي القطب الكهربائي 2-7

ثنائي القطب الكهربائي : هو عبارة عن شحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في الإشارة $+Q$ و $-Q$ تفصل بينهما ازاحة صغيرة مقدارها l .

ثنائي القطب المثالي : هو ثنائي القطب التي تكون فيه المسافة l صغيرة جداً بالمقارنة مع المسافة التي تبعد بها النقطة P المراد حساب شدة المجال فيها (او الجهد) عن مركز ثنائي القطب. ومركز ثنائي القطب هو منتصف المسافة بين الشحنتين (انظر الشكل (4)) .



الشكل (4)

لحساب الجهد في اي نقطة $P(r,\theta)$ تبعد بمسافة r من مركز ثنائي القطب ، وسوف نعتبر كل من الشحنتين $+Q$ و $-Q$ كشحنتين نقطيتين :

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r_2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r_1} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{(r_1-r_2)}{r_1 r_2} \quad \text{..... 27}$$

وبما أن :

$$r_1^2 = r_2^2 + l^2 + 2r_2 l\cos\theta' \quad \text{---(28)}$$

$$\therefore r_1^2 - r_2^2 = l(l + 2r_2\cos\theta')$$

$$r_1 - r_2 = \frac{l(l + 2r_2\cos\theta')}{r_1 + r_2} \quad \text{---} \; 29$$

$$\therefore \phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{l(l + 2r_2\cos\theta')}{r_1 r_2 (r_1 + r_2)} \quad \text{---} \; 30$$

الجهد الكهربائي عند النقطة $p(r, \theta)$

ولثنائي القطب المثالي :

لدينا $r >> l$ وعليه فأن

$r_1 = r_2 = r$ and $\theta = \theta'$

$$\therefore \phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(l^2 + 2lr\cos\theta)}{r r (r + r)} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{2lr\cos\theta}{2r^3}$$

وبما ان $r >> l$ $\therefore$ نهمل $l^2 \Rightarrow zero$

$$\therefore \phi = \frac{l \cdot Q\cos\theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{----} \; 31$$

ونعرف عزم ثنائي القطب $p = Ql$ ويكون وحدة قياسه هي $C \cdot m$ (كولوم . متر) وهو كمية اتجاهية

$$\phi = \frac{p\cos\theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{---} \; 32$$

ولو أخذنا الاتجاه بنظر الاعتبار : (حيث يعتبر الاتجاه الموجب للعزم من الشحنة السالبة الى الشحنة الموجبة)

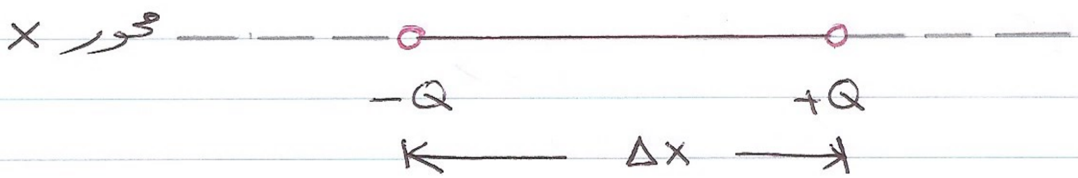
يمكن أن نكتب ϕ كالآتي :

$$\phi = \frac{\vec{p} \cdot \vec{e}_r}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{----} \; 33$$

بملاحظة العلاقة (33) نجد أن جهد ثنائي القطب متناسب عكسياً مع مربع المسافة r .

القوة المؤثرة على ثنائي قطب في مجال كهربائي

نفرض أن ثنائي القطب يكون باتجاه الاحداثي السيني x وأن طول ثنائي القطب صغير جداً ويساوي Δx



فتكون المجال عند الشحنة $(-Q)$ تساوي E_x

= = = = $(+Q)$ تساوي $E_x + \Delta E_x$ أو

$E_x + \left(\frac{dE_x}{dx}\right)\Delta x$

∴ القوة المؤثرة على الشحنة السالبة هي $-E_x Q$

= = = = الموجبة هي $Q\left[E_x + \left(\frac{dE_x}{dx}\right)\Delta x\right]$

محصلة هذه القوى على محور x هي كالآتي :

$$\cancel{-QE_x} + \cancel{QE_x} + Q\frac{dE_x}{dx}\Delta x$$

∴ مركبة القوة باتجاه x هي

$$F_x = Q\frac{dE_x}{dx}\Delta x \quad --\ 34$$

وبما أن $P = Q\Delta x \Rightarrow$ العزم

$$\therefore F_x = P\frac{dE_x}{dx} \quad ----\ 35$$

واذا كان لكل من ثنائي القطب والمجال الكهربائي مركبات في الاتجاهات الثلاثة x و y و z فان

$$F_x = P_x \frac{dE_x}{dx}$$ مركبة القوة باتجاه المحور x

$$F_y = P_y \frac{dE_y}{dy}$$ ---- (36) مركبة القوة باتجاه المحور y

$$F_z = P_z \frac{dE_z}{dz}$$ مركبة القوة باتجاه المحور z

وعندما يكون المجال الكهربائي $\vec{E}$ منتظم فان

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{dE_y}{dy} = \frac{dE_z}{dz} = 0$$

وهذا يعني أن $F_x = F_y = F_z = 0$

∴ عندما يكون المجال الكهربائي منتظم فان القوة تكون مساوية للصفر.

واجب: اعتبر ثنائي القطب متجهاً باتجاه الاحداثي y، جد صيغة القوة المؤثرة على ثنائي قطب في مجال كهربائي غير منتظم.
ناقش الحالة التي يكون فيها المجال الكهربائي منتظماً.