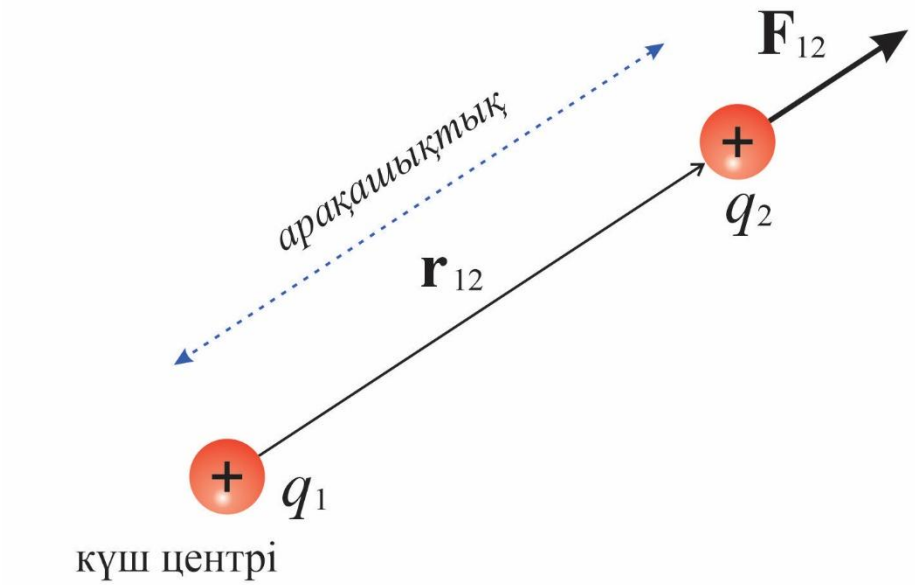
ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Физика-техникалық факультеті

ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ

Профессор Досболаев М.Қ.
merlan@physics.kz

Электр статикалық өріс күшінің жұмысы

Кез-келген центрлік күштердің статикалық өрісі потенциалды немесе консервативті болатыны механика курсынан белгілі. Центрлік күш дегеніміз - дененің кез-келген позициясында әсер ету сызығы күш центрі деп аталатын нүкте арқылы өтетін күш. *Мысалы әсерлесуге түсетін екі нүктелік зарядтың бірі күш центрі. Бұл күш әрқашан зарядтарды қосатын радиус бойымен бағытталған және оның шамасы тек арақашықтыққа тәуелді*



Электр статикалық өріс күшінің жұмысы

Электр статикалық өрістің әсерінен зарядталған денелер қозғалысқа келуі мүмкін. Заряд орын ауыстырған кезде электр өрісінің күші механикалық жұмыс атқарады. Өзара әсерлесетін зарядтар жүйесі потенциалдық энергияға ие. Сондықтан электр статикалық өрісте орналасқан зарядтың да белгілі бір потенциалдық энергиясы болады. Өрістегі зарядтың потенциалдық энергиясын анықтау үшін алдымен зарядты бір нүктеден екінші нүктеге орын ауыстырған кезде электр өрісі атқаратын жұмысты қарастырамыз. Себебі электр статикалық өріс күштерінің жұмысы зарядтың потенциалдық энергиясының өзгерісімен байланысты.

Электр статикалық өріс күшінің жұмысы

Электр өрісіндегі (+Q заряд тудыратын) 1 нүктеден 2-ші нүктеге дейін бірлік оң зарядты қандайда бір траекториямен қозғасақ, онда $\mathrm{d}\vec{l}$ (1 мен 2 нүкте арасындағы элементар жол ұзындығы) орын ауыстырудағы өріс күшінің элементар жұмысы келесідей анықталады:

$$\mathrm{d}A = \vec{F}\mathrm{d}\vec{l} = F\mathrm{d}l\cos\alpha \quad (34)$$

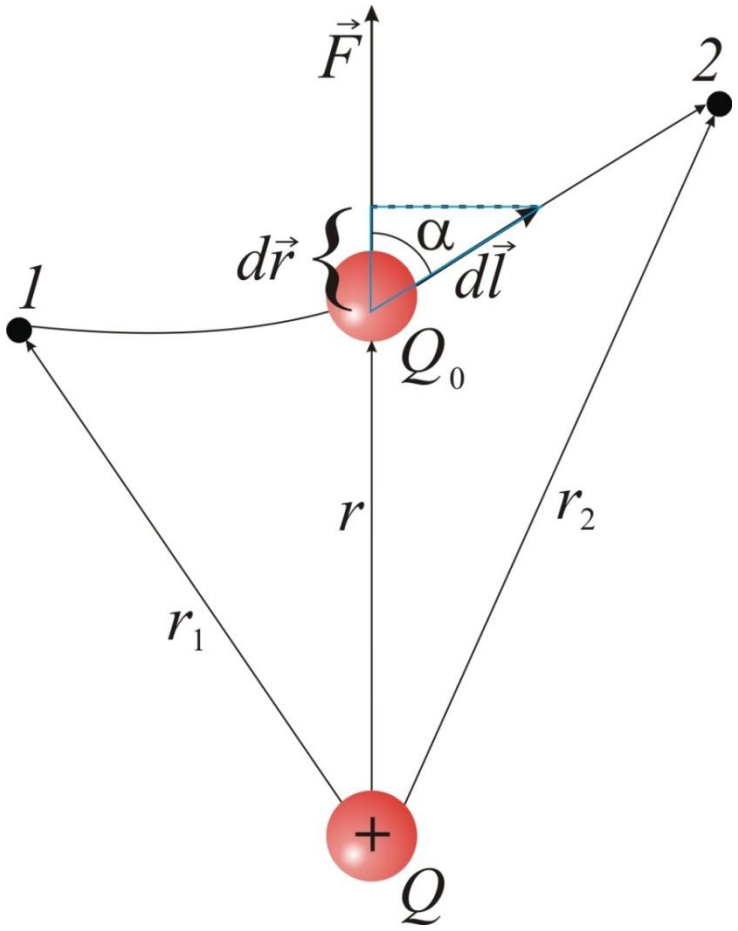
$F = Q_0E$ – *электр статикалық өріс күші*

$$F \cdot \mathrm{d}l\cos\alpha = Q_0E \cdot \mathrm{d}l\cos\alpha \quad (35)$$

$E = k\frac{Q}{r^2}$ – *нүктелік заряд өрісі*; $\quad \mathrm{d}l\cos\alpha = \mathrm{d}r$

$$\mathrm{d}A = k\frac{QQ_0}{r^2}\mathrm{d}r \quad (36)$$

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \mathrm{d}A \quad (37)$$



24 сурет

Электр статикалық өріс күшінің жұмысы

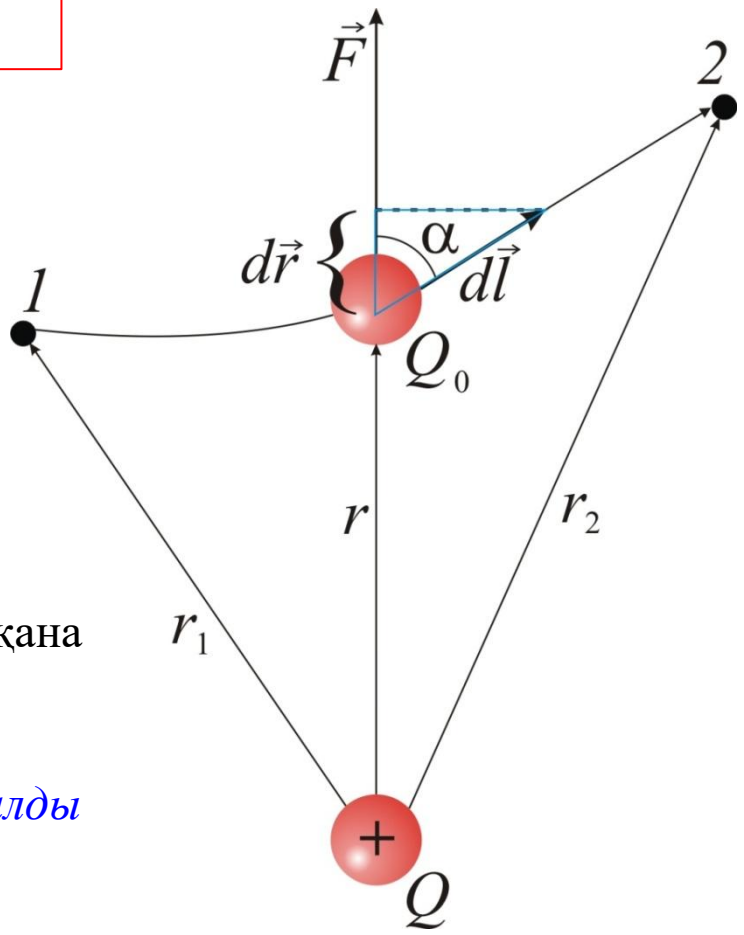
$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \mathrm{d}A = \frac{QQ_0}{4\pi\varepsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2}\mathrm{d}r = \frac{QQ_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (38)$$

Векторлық формада:

$$A_{12} = Q_0 \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \quad (39)$$

A_{12} орын ауыстыру траекториясынан тәуелсіз, тек қана 1 және 2 нүктелердің орнымен анықталады.

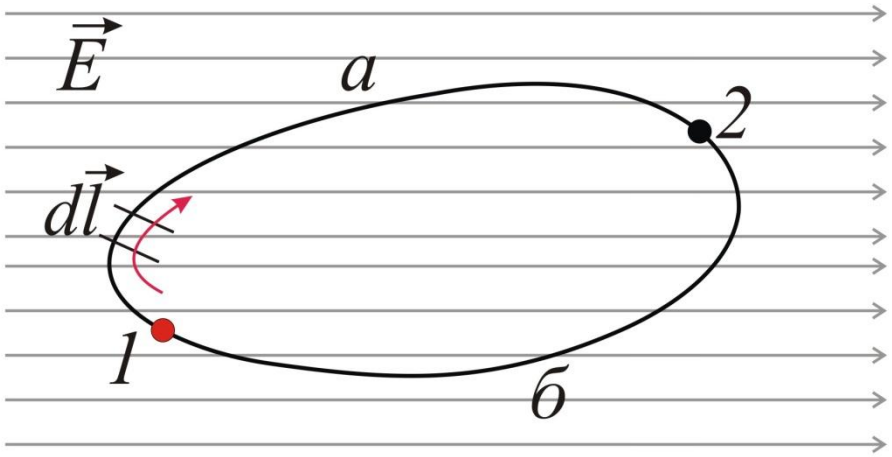
Электр статикалық өріс күші потенциалды (консервативті).



24 сурет

Электр статикалық өріс циркуляциясы туралы теорема

$$\oint \vec{E}\,\mathrm{d}\vec{l} = 0 \quad (40)$$



25 сурет

$$\int_{12}^{(a)} = \int_{12}^{(b)} \qquad \int_{12}^{(b)} = -\int_{21}^{(b)}$$

$$\int_{12}^{(a)} + \int_{21}^{(b)} = \int_{12}^{(a)} - \int_{12}^{(b)} = 0$$

$$\mathrm{rot}\vec{E} = 0 \quad (41)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

Осылайша, кез-келген *электр статикалық өріс* потенциалды болады және оның құйындылығы нөлге тең.

Электр статикалық сүзгі



а



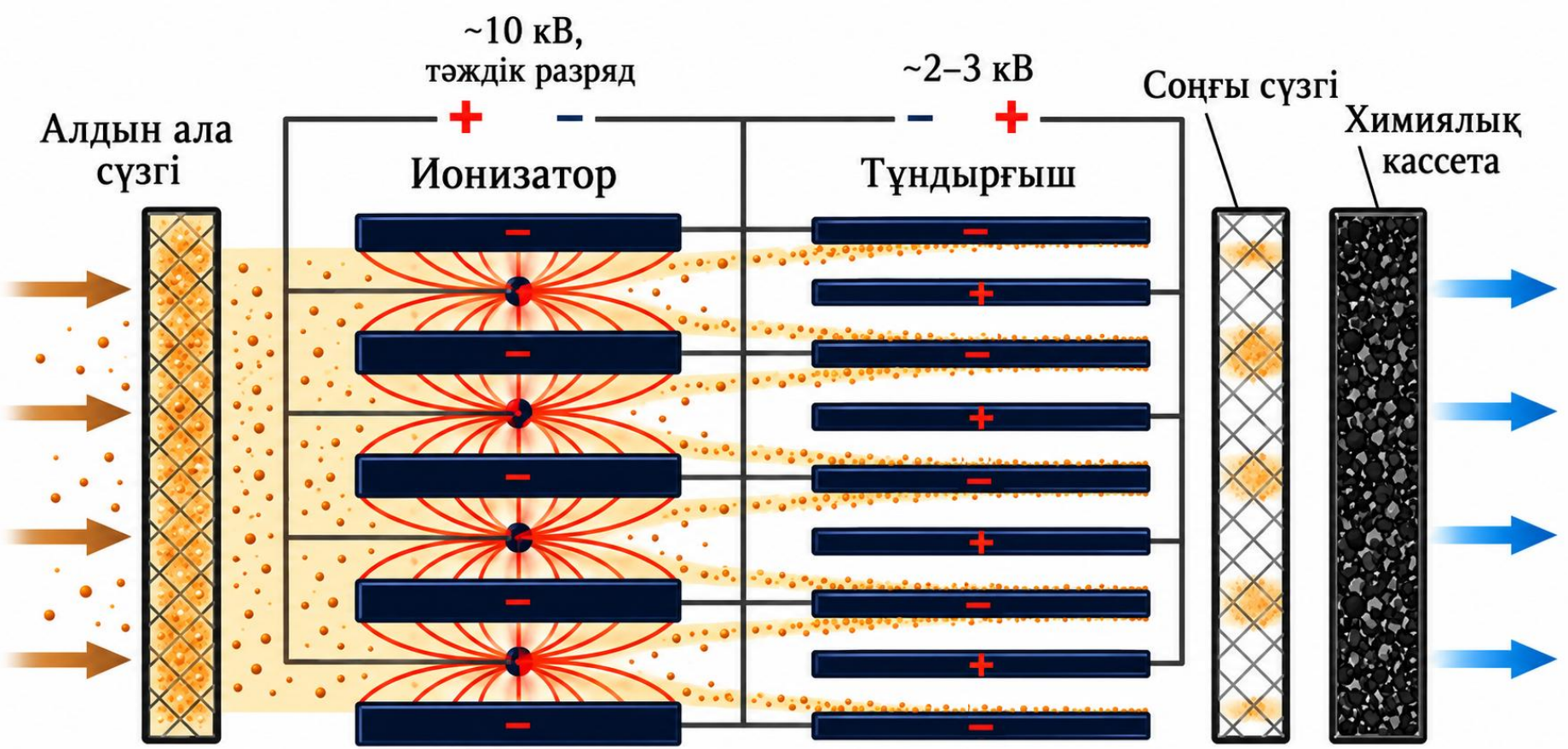
б



в

$d_{\text{шаң}} \approx 0{,}01$ мкм

Электр статикалық сүзгі



В.А. Алешкевич

Электр статикалық сүзгі



а

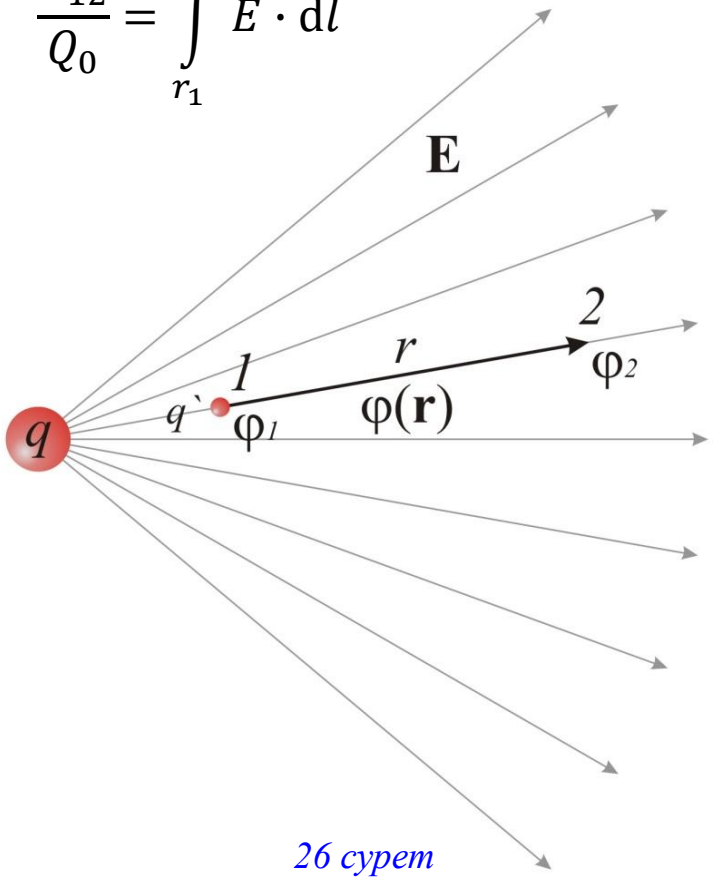


б

Электр статикалық өріс потенциалы

$$A_{12} = Q_0 \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \quad (39)$$

$$\frac{A_{12}}{Q_0} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$



26 сурет

Элементар зарядтың орнын ауыстыруға кететін өріс күшінің жұмысын анықтайтын сызықтық интеграл (39), электр өрісінде координаталардың қандайда бір скаляр функциясы $\varphi(\vec{r})$ бар деген тұжырымға әкеледі және оның *кемуі* келесіні береді:

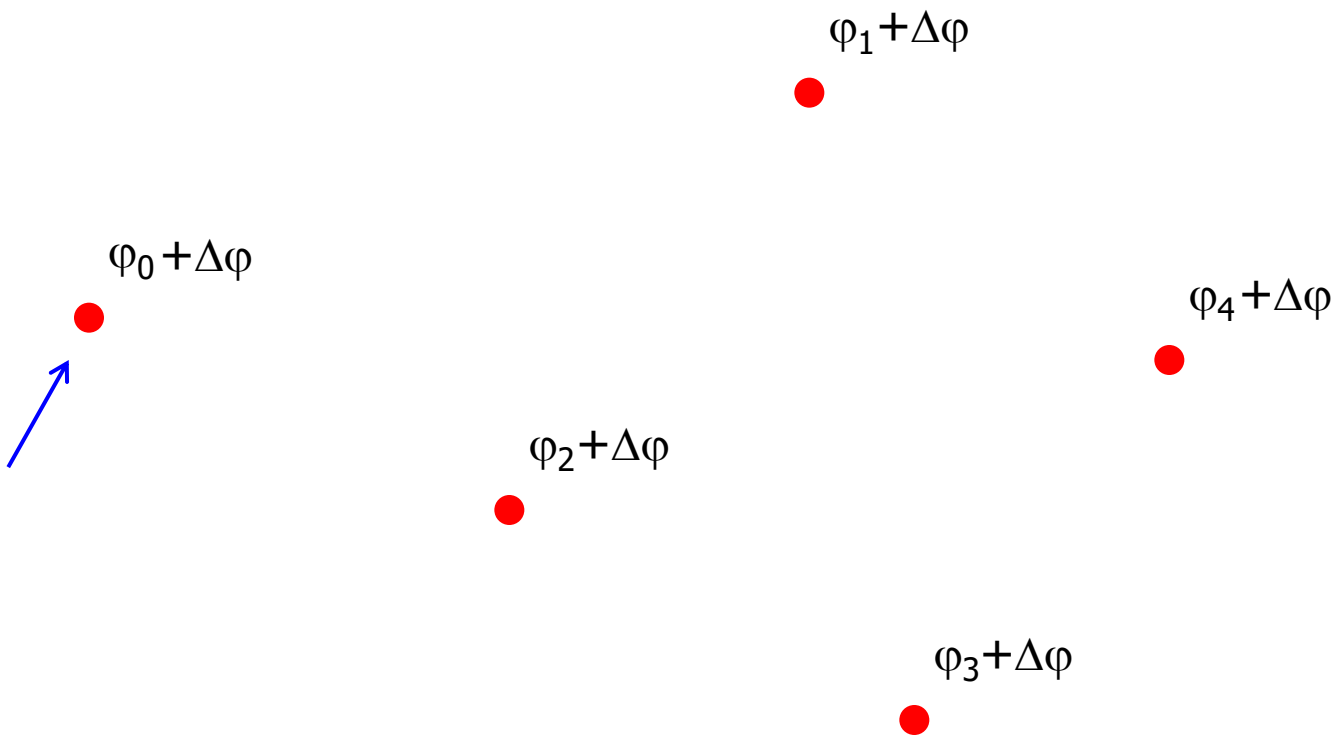
$$\varphi(\vec{r}) = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E}\,\mathrm{d}\vec{l} \quad (42)$$

Өріс потенциалы, координатаның скаляр функциясы

Демек, потенциал электр өрісінің берілген нүктесінде бірлік оң зарядқа қанша потенциалдық энергия сәйкес келетінін көрсетеді.

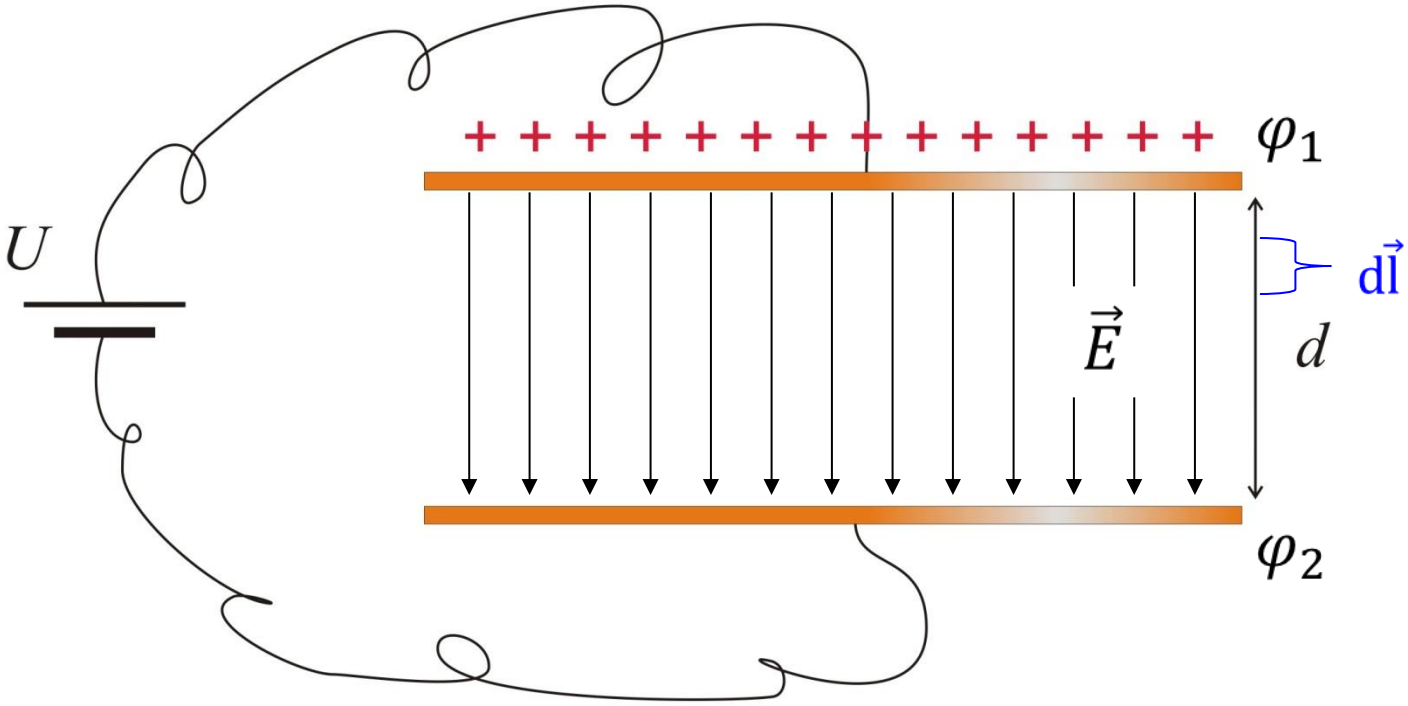
Электр статикалық өріс потенциалы

$$\varphi_0 - \varphi_n = \int_0^n \vec{E}\,\mathrm{d}\vec{l} \quad (42)$$



Электр статикалық өріс потенциалы

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E}\,\mathrm{d}\vec{l} \quad (42)$$



Нүктелік заряд өрісінің потенциалы

(42) формула $\mathrm{d}\vec{l}$ элементар жолдар үшін де жарамды. Олай болса мұндай орын ауыстыру кезіндегі потенциалдың элементар кемуі: (42). Мұндағы минус таңбасы, электр өрісінің бағытымен қозғалған сайын потенциал кемитінін көрсетеді.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \quad (42)$$

потенциалдың элементар ***кемуі***

$$-\mathrm{d}\varphi = \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \quad (43)$$

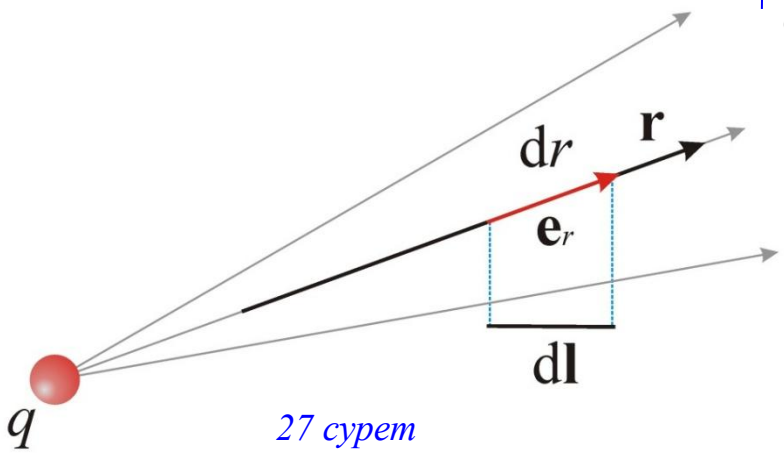
$$\vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\vec{e}_r \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\mathrm{d}r = -\mathrm{d}\left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r} + C\right) = -\mathrm{d}\varphi$$

$$\vec{e}_r \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \mathrm{d}r$$

$$|\vec{e}_r| = 1$$

Интегралдаймыз

$$\mathrm{d}C = 0$$



27 сурет

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r} \quad (44)$$

$\mathrm{d}r - \mathrm{d}\vec{l}$ орын ауыстыруының радиал бағыттағы проекциясы, ал $\vec{e}_r$ – радиал бағыттағы бірлік вектор.

Потенциал үшін суперпозиция принципі

Потенциал скаляр шама. Осы себепті, егер өріс бірнеше зарядтармен туындаған болса, онда олар орналасқан әрбір нүктедегі өріс потенциалдарының алгебралық суммасы толық өріс потенциалын береді:

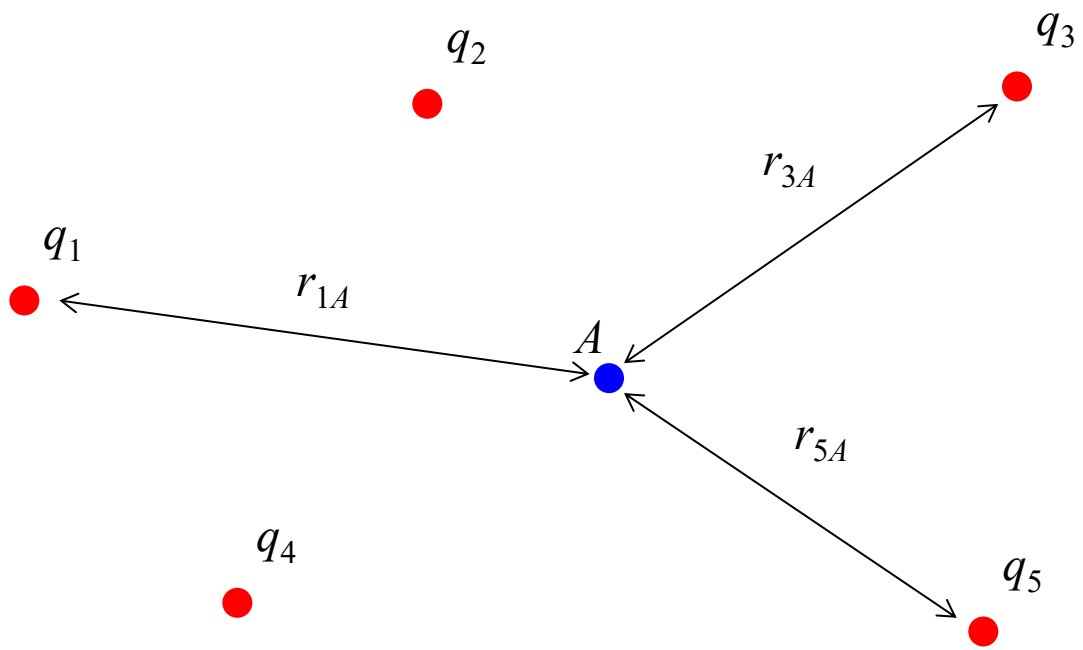
$$\varphi = k\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i} \quad (45)$$

Зарядтар үздіксіз таралған кезде. Мысалы, әрбір $\mathrm{d}V$ элементар көлем $\rho\mathrm{d}V$ нүктелік зарядқа ие болсын, онда потенциал (46) арқылы анықталады:

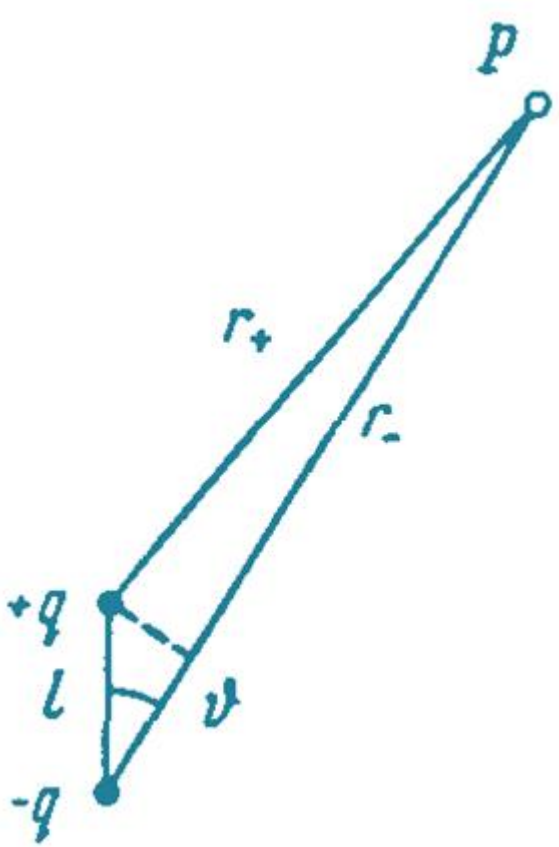
$$\varphi = k\int\frac{\rho\mathrm{d}V}{r} \quad (46)$$

Потенциал үшін суперпозиция принципі

$$\varphi_A = k\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_{iA}} \quad (45)$$



Диполь өрісінің потенциалы



28 сурет

$$\varphi_P = k\left(\frac{q}{r_+} - \frac{q}{r_-}\right) = k\frac{q(r_- - r_+)}{r_- r_+} \quad (46)$$

$$\boldsymbol{r \gg l} \;\rightarrow\; r_- - r_+ = l\cos\vartheta$$

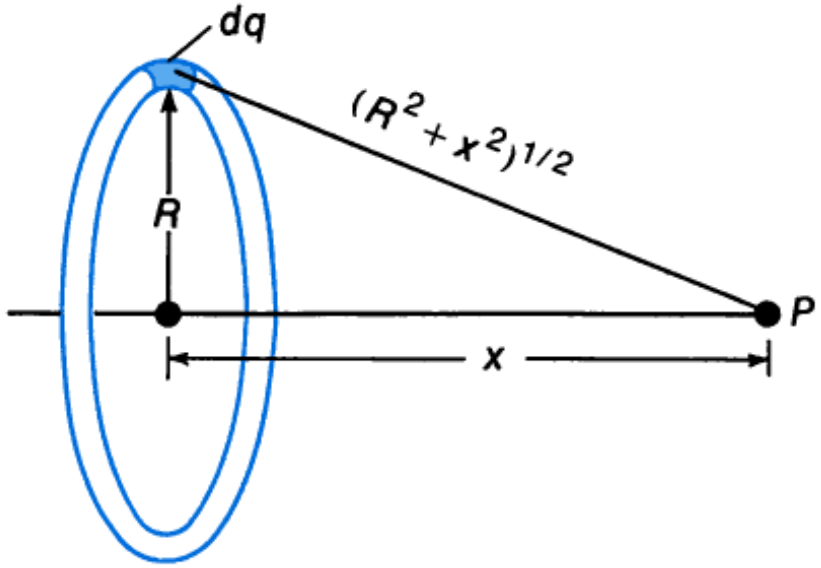
$$r_- r_+ = r^2$$

$$p = ql$$

$$\varphi_P = k\frac{p\cos\vartheta}{r^2} \quad (47)$$

p – дипольдің электрлік моменті

Радиусы R біркелкі зарядталған (Q) жіңішке сақинаның центрінен x қашықтықта орналасқан P нүктесіндегі электр потенциалы



$$\varphi_P = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{dq}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{\left(x^2+R^2\right)^{1/2}}\int dq = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{\left(x^2+R^2\right)^{1/2}}$$

$\vec{E}$ векторы мен потенциал арасындағы байланыс. Осыған дейін бізге мәлім болғандай электр өрісі $\vec{E}(\vec{r})$ векторлық функциясымен толықтай сипатталады. Оны біле отырып өрістің кез-келген нүктесінде орналасқын зарядқа әсер ететін күшті $\vec{F}$ таба аламыз. Осы зарядтардың орын ауыстыруыны жұмсалатын өріс жұмысын A анықтай аламыз.

Ал потенциал бізге не береді?

Ең алдымен осы өріс потенциалын біле отырып электр өрісінің өзін анықтауға болады екен.

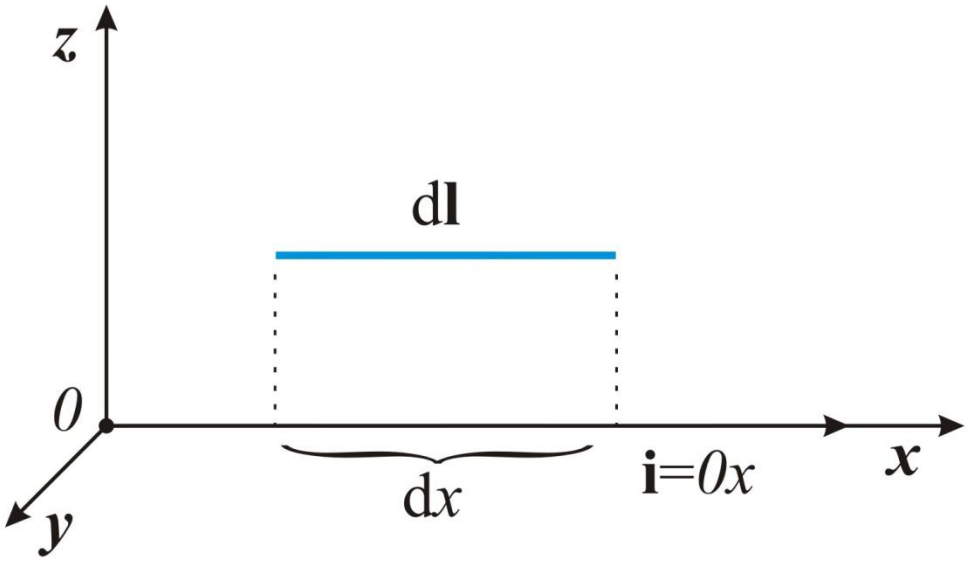
$$\vec{F} = Q_0\vec{E} \qquad A_{12} = Q_0 \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

$\vec{E}$ векторымен потенциал арасындағы байланыс

$$-\mathrm{d}\varphi = \vec{E}\mathrm{d}\vec{l} \quad (43)$$

$$\vec{E}\mathrm{d}\vec{l} = \vec{E}\vec{\imath}\mathrm{d}x = E_x\mathrm{d}x \quad (44)$$

$$\mathrm{d}\vec{l} = \vec{\imath}dx$$



29 сурет

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} \quad (45)$$

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{\mathrm{i}} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{\mathrm{j}} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{\mathrm{k}}\right)$$

$$\vec{E} = -\mathrm{grad}\varphi \quad (46)$$

$$\mathrm{grad}\,\varphi = \nabla\varphi$$

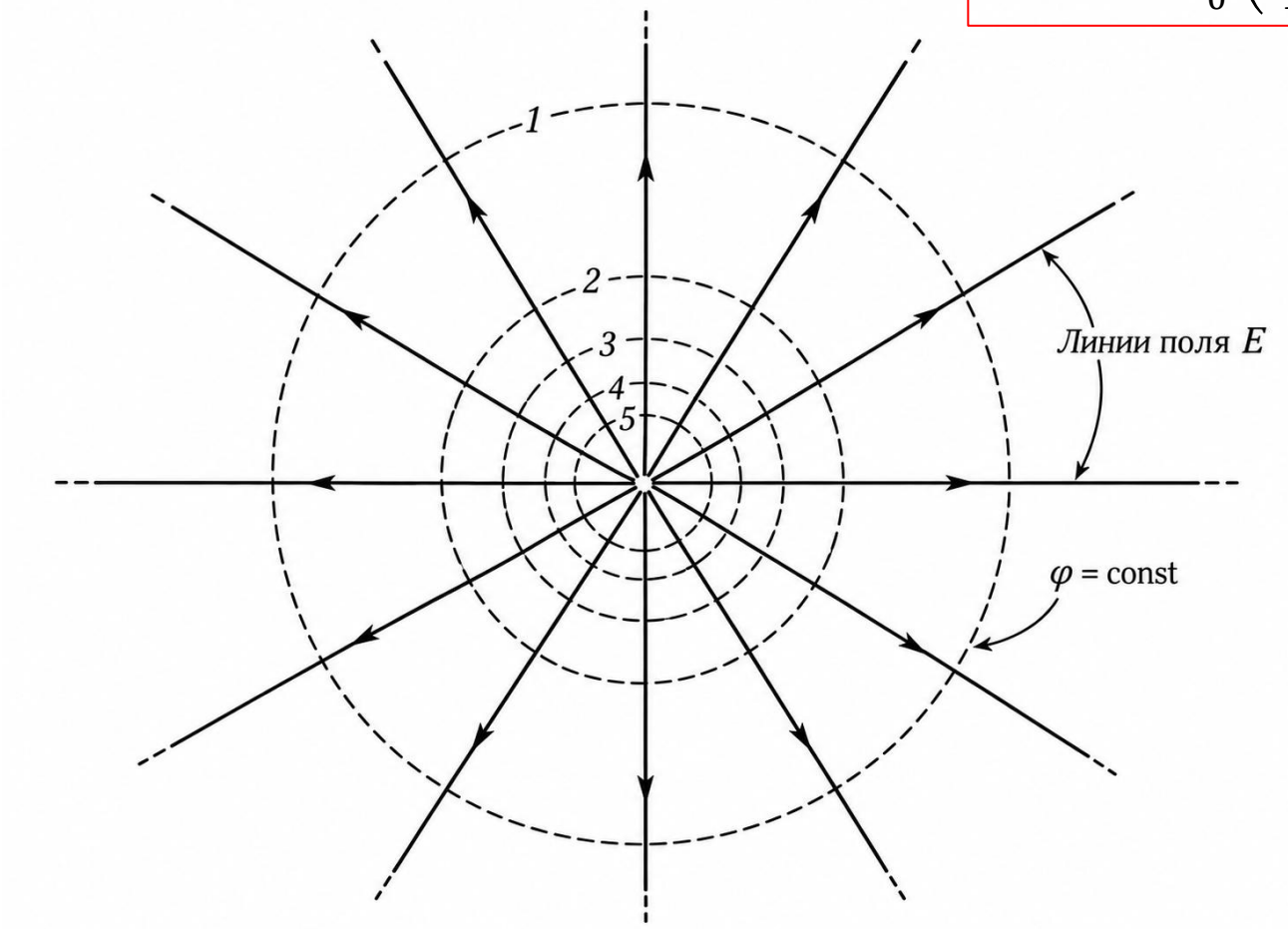
$$\vec{E} = -\nabla\varphi \quad (47)$$

$\vec{\imath} - x$ векторының орты (бірлік вектор); $\mathrm{d}x - x$ координатасының өсімшесі

Нүктелік зарядтың эквипотенциал беттері

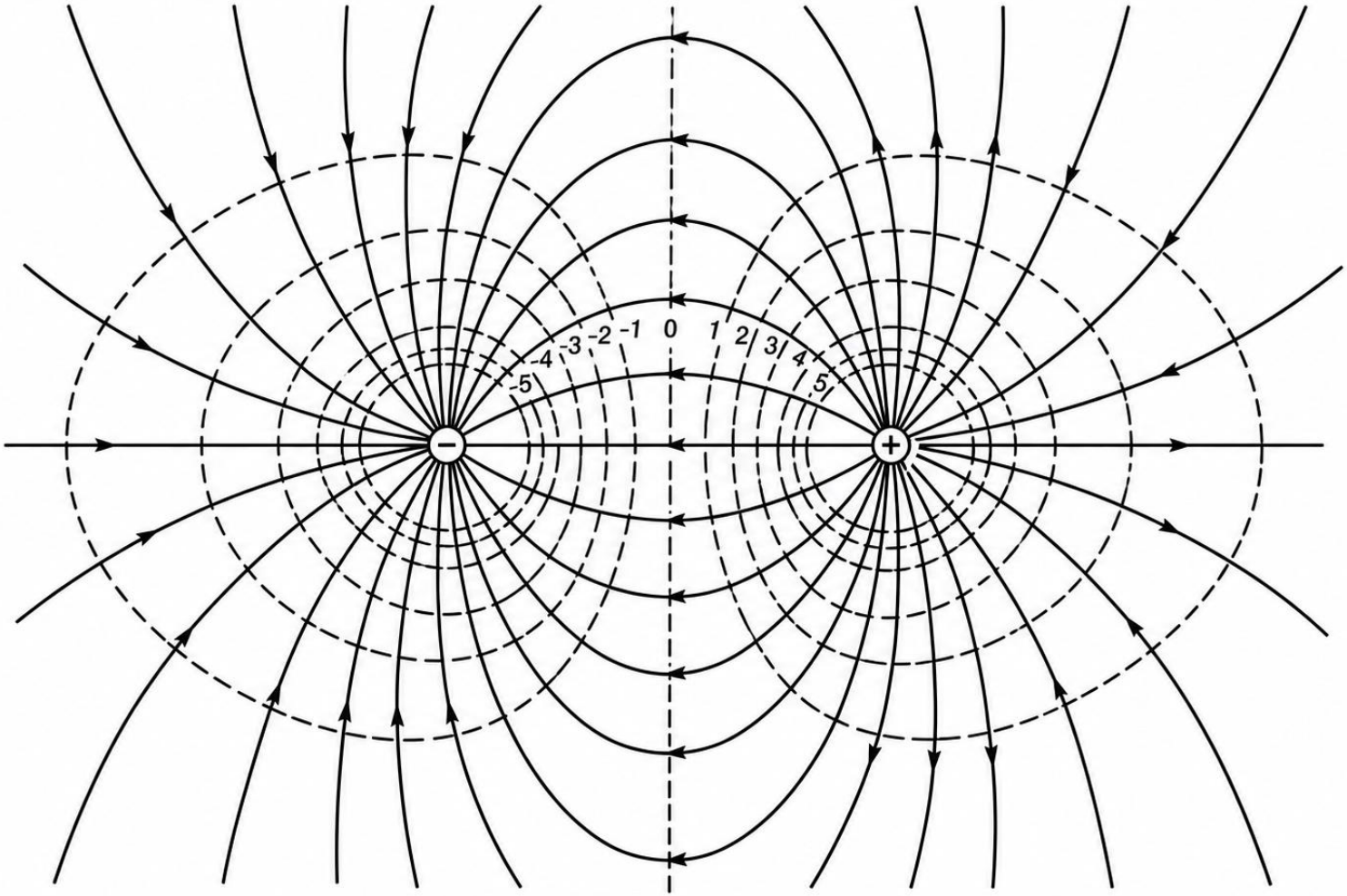
$\varphi(\vec{r}) = const$

$$A_{12} = \frac{QQ_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (38)$$



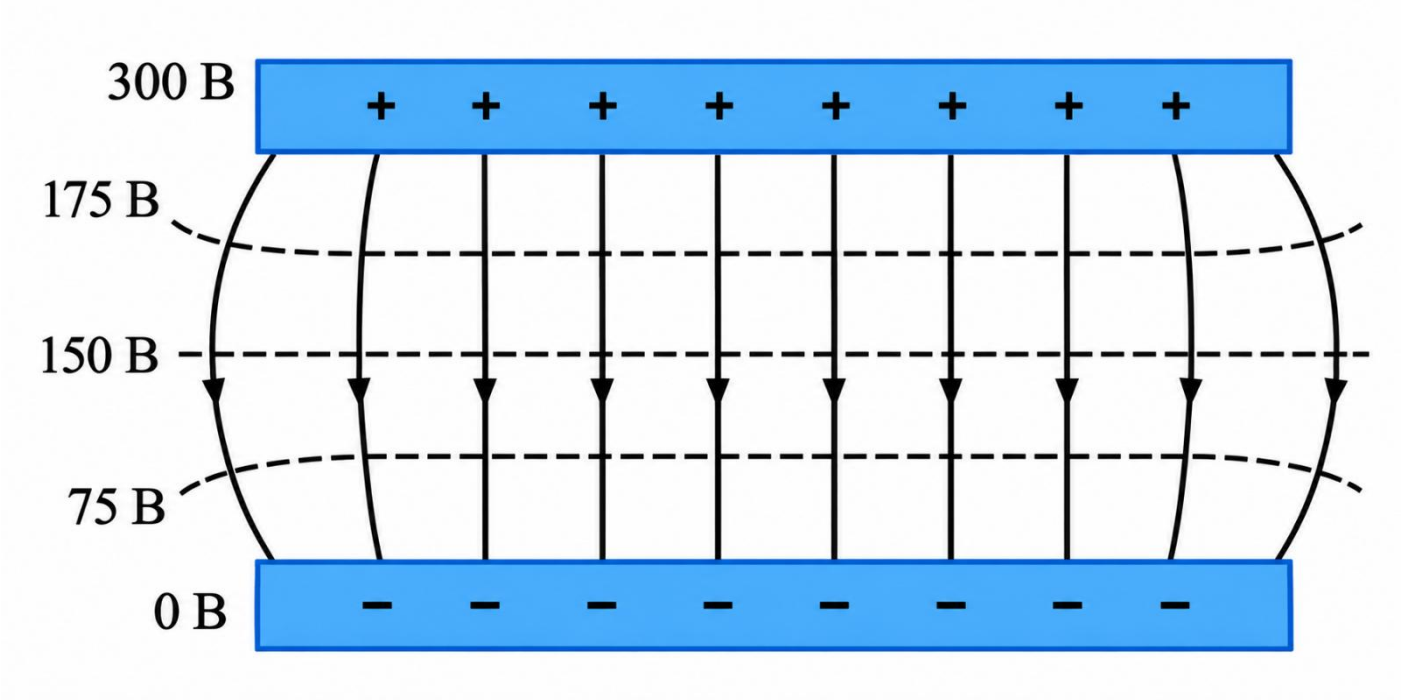
30 сурет. $\varphi_5 - \varphi_4 = \varphi_4 - \varphi_3 = \varphi_3 - \varphi_2 \ldots$

Дипольдің эквипотенциал беттері



31 сурет

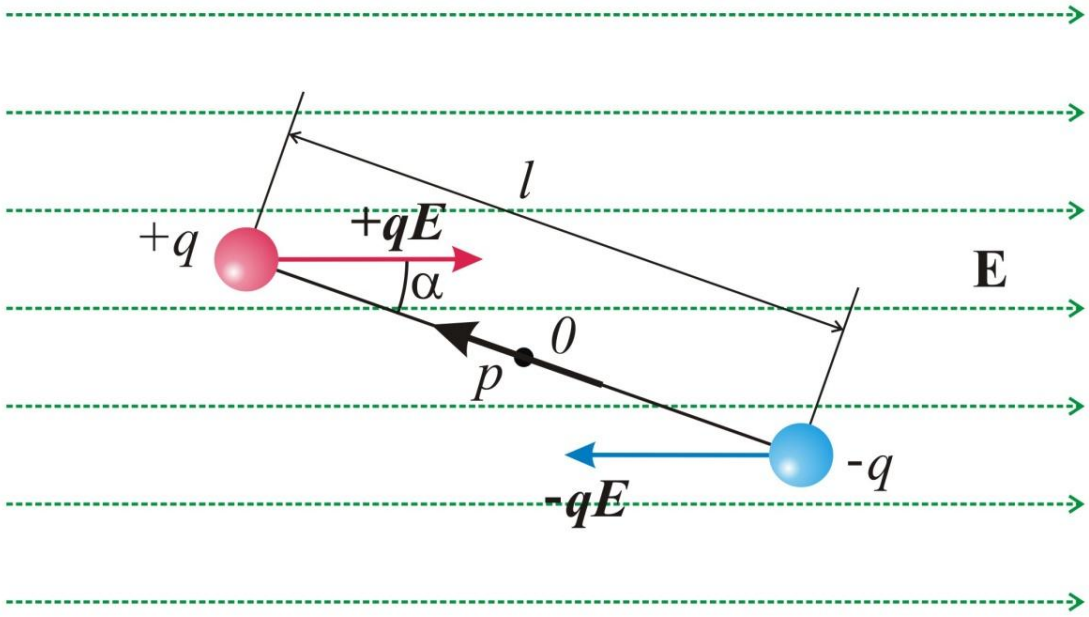
Милликен тәжірибесі үшін эквипотенциал беттері



32 сурет

Біркелкі электр статикалық өрістегі диполь

Дипольге модульдері бойынша тең, ал бағыттары қарама-қарсы $-F$ және $+F$ күштер әсер етеді, осылайша дипольді бұруға тырысады.



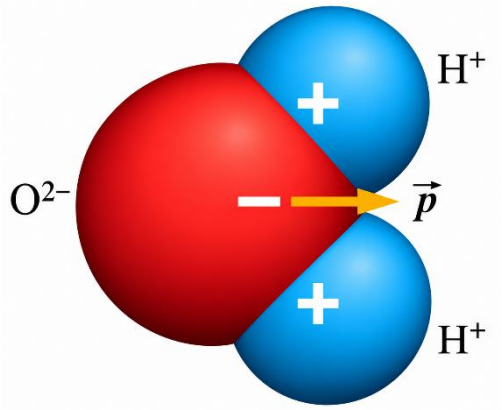
Осы кездегі қорытқы айналдырушы момент:

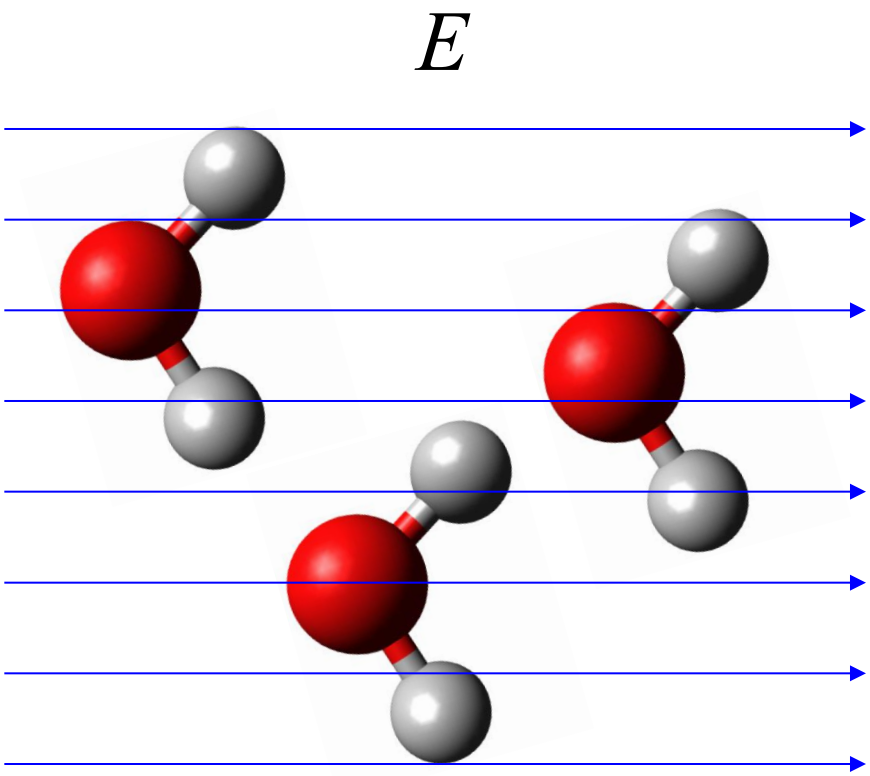
$$M = 2 \cdot F\frac{l}{2}sin\alpha = 2 \cdot qE\frac{l}{2}sin\alpha = qlE\sin\alpha = pE\sin\alpha \quad (47)$$

$$\vec{M} = \vec{p}\times\vec{E} \quad (48)$$

$p = ql$ – дипольдің электрлік моменті

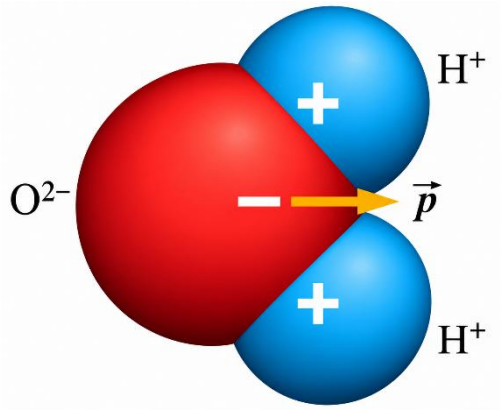
Қысқа толқынды пеште тамақтың қызуы

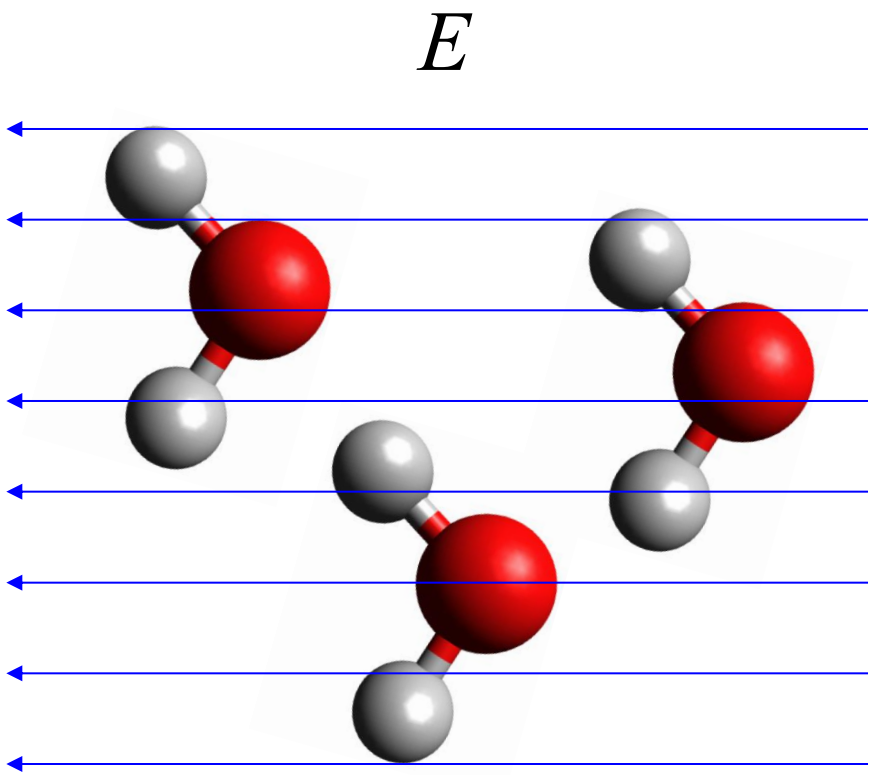




$f = 2{,}45$ ГГц

Қысқа толқынды пеште тамақтың қызуы





$f = 2{,}45$ ГГц