

**Лекция 2. Кулон заңы. Кулон заңының дұрыстығын тәжірибе жүзінде тексеру. Кулон заңын өріс ұғымы арқылы сипаттау. Электр өрісі. Электр өрісінің кернеулігі. Тәуелсіздік принципі.**

### **1. Кулон заңы.**

Электростатиканың негізгі мақсаты – кеңістіктегі зарядтар жүйесінің таралып орналасу заңдылықтарын біле отырып, олардың электр өрісін анықтау. Бұл мақсатқа электростатиканың негізгі заңдарын – Кулон заңын, тәуелсіздік принципін қолдану арқылы жетуге болады.

Нүктелік деп аталатын зарядтардың өз ара әсер күші бағынатын заңды 1785 жылы Кулон анықтаған. Нүктелік заряд, сызықтық өлшемдері өзара әсерлесетін басқа зарядталған денелерге дейінгі ара-қашықтықпен салыстырғанда өте аз, денеге шоғырланған заряд. Нүктелік зарядта материалдық нүкте секілді физикалық абстрактілі.

Өз тәжірибесінде Кулон гравитациялық тұрақтыны анықтауға арналған Кавендиш пайдаланған таразыға ұқсас иірілмелі таразыны қолданды. Таяқшаның бір ұшына кішкене металл шар бекітті, ал екінші ұшына оны теңгеріп тұратын жүк ілді. Жіптің жоғарғы ұшын оның ширатылу бұрышын анықтауға арналған бөліктері бар шкалаға бекітті. Ыдыстығынындағы саңылау арқылы дәл сондай басқа сынақ шар енгізді. Содан соң шарларға оң заряд берді және олар бір-бірімен өзара әрекеттесті. Ал

олардың әрекеттесу күшінің шамасын жіптің ширатылу бұрышына қарап анықтады. Өлшемдері электрленген шардың өлшемдерімен бірдей, заряды жоқ үшінші шардың көмегімен Кулон алдыңғысының зарядын тең екіге бөлді. Осылайша, Кулон тәжірибелерін қорыта келе, шарлардың өзара әрекеттесу күші олардың арақашықтығының квадратына кері, ал шарлардың зарядтарының көбейтіндісіне пропорционал екенін анықтады. Әрі, олардың әрекеттесу күші әр ортада әртүрлі екенін байқап, ортаның диэлектрлік өтімділігі деген шама енгізді. Ол әр ортада әртүрлі мәнге ие. Оған қоса, Кулон электр тұрақтысы деген шаманы енгізді.

Өзінің тәжірибесінің нәтижесінде Кулон мынадай қорытындыға келді: «Тыныштықта тұрған  $q_1$  және  $q_2$  нүктелік зарядтар зарядтардың көбейтіндісіне тура пропорционал, ал арақашықтықтарының квадратына кері пропорционал күшпен бір-біріне тартылады не тебіледі»:

$$\vec{F}_2 = k_1 \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \cdot \vec{r}_{21} \quad (1)$$

мұндағы  $q_1, q_2$  – зарядтардың шамасын және таңбасын көрсететін скалярлар,  $r_{21}$  –  $q_1$  зарядынан  $q_2$  зарядына қарай бағытталған вектор,  $\vec{F}_2$  –  $q_2$  зарядына әсер ететін күш,  $|\vec{r}_{21}| = r$ . Тәжірибе жүзінде тыныштықтағы екі нүктелік зарядтардың арасындағы әсерлесу күшінің шамасы зарядтар орналасқан ортаның қасиетіне тәуелді екендігі дәлелденді. Ал (1)- теңдігіндегі  $k_1$  коэффициенті ортаның қасиетіне байланысты. Екінші жағынан кез-келген физикалық заңдылықтардағы коэффициенттер сияқты  $k_1$  коэффициенті де заңға кіретін шамалардың өлшем бірліктеріне тәуелді болады. Сондықтан,

$k_1$  коэффициентін

$$k_1 = \frac{k}{\varepsilon'} \quad (2)$$

түрінде берген дұрыс. Мұнда  $\varepsilon'$  - ортаның абсолют диэлектрик өтімділігі.  $k$  коэффициенті  $F, q_1, q_2, r$  шамаларының өлшем бірліктеріне байланысты. Егер бұлар да бір өлшем бірліктер жүйесіне алынса,  $k = 1$  болады. Ортаның абсолют диэлектрик өтімділігі  $\varepsilon'$  өлшем бірліктер жүйесіне тәуелді. Сондықтан, өлшем бірліктер жүйесіне тәуелсіз

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

өрнегімен анықталатын ортаның салыстырмалы диэлектрик өтімділігімен ( $\varepsilon$ ) пайдаланады. Мұнда  $\varepsilon_0$  - вакуумның абсолют диэлектрик өтімділігі. Вакуум үшін  $\varepsilon = 1$ . Сонымен,

$$k_1 = \frac{k}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \quad (4)$$

(4) қатынасын пайдаланып, Кулон заңын

$$F = \frac{k}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{21}}{r} \quad (5)$$

түріне келтіреміз. Егер Кулон заңындағы барлық шамалар бір өлшем бірліктер жүйесінде берілсе,  $k = 1$  болып, Кулон заңы былай жазылады:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 r^2} \quad (6)$$

Егер зарядтар вакуумда орналасса,  $\varepsilon = 1$  болып,

$$F_0 = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon_0 r^2} \quad (7)$$

теңдігі орындалады немесе

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F} \quad (8)$$

болады. Яғни, ортаның диэлектрик өтімділігі  $\varepsilon$  зарядтардың ортадағы

*өзара әсерлесу күші вакуумдағы әсерлесу күшімен салыстырғанда қанша есе кемитіндігін көрсетеді.*

Кулон заңын өмірде пайдалануға ыңғайлы түрде жазуға мүмкіндік беретін СИ өлшем бірліктер жүйесінде былай жазылады:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1q_2}{r^2} \quad (9)$$

*Яғни, СИ өлшем бірліктер жүйесінде вакуумның  $\varepsilon_0$  абсолюттік диэлектрик өтімділігінің өлшем бірлігі  $4\pi$  есе көбейеді, яғни оның шамасы  $4\pi$  есе азаяды:*

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon'_0}{4\pi} \quad (10)$$

мұндағы  $\varepsilon_0$  – вакуумның электр тұрақтысы. Оның шамасы  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м тең.

## **2. Кулон заңының дұрыстығын әртүрлі қашықтықтар үшін тәжірибе жүзінде тексеру**

Кулон заңының орындалуын тексерудің әдісін алғаш рет ұсынған ағылшынның дарынды физигі Генри Кавендиш. Г. Кавендиш тәжірибесін 1772 жылы жасаған. Тәжірибе нәтижесін ашық баспада жария етпегендіктен, Кавендиштің ғылыми жұмыстарының деректері замандастарына белгісіз болды. Г.Кавендиш тыныштықтығы нүктелік екі зарядтардың бір-бірімен әсерлесу күші олардың арақашықтығының квадратына кері пропорционал болатындығын екі пайызға дейінгі (2%) дәлдікпен дәлелдейді. Тек 1785жылы ғана, Г.Кавендиш тәжірибесінен 13 жыл өткен соң, Ш.С.Кулон

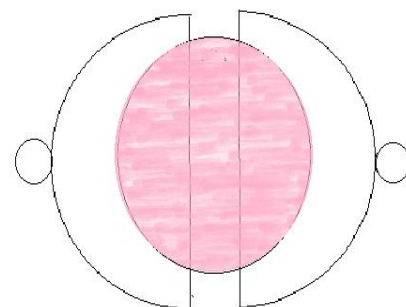
зарядталған нүктелік денелердің әсерлесу күшін тікелей өлшеу арқылы Кулон заңының дұрыстығын дәлелдеді.

Кавендиш нүктелік зарядтардың өзара әсерлесу күші арақашықтыққа байланысты

$$F = \text{const}/r^{2+\alpha} \quad (1)$$

заңдылығымен өзгереді деп есептеп, тәжірибе арқылы  $\alpha$ -ның мәнін анықтаған. Егер күш арақашықтықтың квадратына кері пропорционал, яғни  $\alpha = 0$  болса, заряд өткізгіш шардың тек бетінде ғана орналасуы керек, оның ішінде ешқандай заряд болмауы керек. Ал егер  $\alpha \neq 0$  болса, яғни зарядтардың өзара әсерлесуі Кулон заңымен анықталмаса, онда заряд шар көлемінде таралуы керек.

Кавендиш әдісін былай жүзеге асыруға болады. Өткізгіш шарға тығыз, толық қапталатын екі жарты өткізгіш сфера беттерді кигізіп, сыртқы сфера бетті зарядтайды (суреттен). Содан соң сыртқы екі жарты сфера беттерді шардан



аластатады. Егер Кулон заңы дұрыс болса, жүйеге берілген зарядтар толық аластатылған жарты сфералармен бірге кетіп, орнында қалған шарда заряд қалмайды. Ал, егер Кулон заңы орындалмайтын болса, зарядтың біраз бөлігі шарда қалуы керек. Сонымен шарда қалған зарядтың шамасын өлшеу арқылы Кулон заңының дұрыстығы туралы ақырғы тұжырым жасалады.

Г. Кавендиш тәжірибе жасау нәтижесінде  $|\alpha| \leq 0.02$  болатындығын

дәлелдеді. Шамамен Кавендиш тәжірибесінен 100 жыл өткен соң Максвелл бұл тәжірибені жетілдіріп қайталап,  $|\alpha| \leq 5 \cdot 10^{-5}$  теңсіздігі орындалатындығын тағайындады. 1971 жылы физиктер Кавендиш әдісін одан әрі жетілдірі нәтижесінде  $|\alpha| \leq |2,7 \pm 3,1| \cdot 10^{-16}$  болатындығына көз жеткізді.

Бұл тәжірибелердің нәтижесінде Кулон заңы бірнеше миллиметр мен ондаған сантиметр араларында жататын арақашықтықтар үшін өте жоғары дәлдікпен орындалатындығын дәлелдеді.

Сонымен қатар, Кулон заңының үлкен арақашықтықтар үшін дұрыстығын, біріншіден зарядталған бөлшектердің өзара әсерлесуі кванттық бөлшектермен алмасулары арқылы іске асатындығына, екіншіден, осы кванттық бөлшектердің қасиеттерінің ерекшеліктеріне сүйеніп тексерді. Зарядталған бөлшектердің әсерлесу заңдылығы осы әсерлесуді қамтамасыз етіп тұрған кванттық бөлшектердің жекелеген қасиетіне, мысалы, тыныштық массасына байланысты.

Физикадағы кейінгі деректер бойынша электромагниттік әсерлесу зарядтардың бір-бірімен, фотондармен алмасулары арқылы жүзеге асады. Сондықтан бұл әсерлесудің Кулон заңымен анықталатын – анықталмайтындығын фотонның тыныштық массасының нөлге тең, не тең еместігіне байланысты.

Кез-келген бөлшектің әрі корпускулалық, әрі толқындық қасиеті бар. Фотонның энергиясы оның жиілігі және массасы арқылы  $E_\phi = h\omega, E_\phi =$

$m_{\phi}c^2$  өрнектерімен анықталады. Мұнда  $h, m_{\phi}$  – Планк тұрақтысы, фотонның массасы. Фотонның бұл массасы  $m_{\phi}$ , оның тыныштық массасынан үлкен болу керек, әрине ол фотонда болса. Ал электромагниттік толқынның ұзындығы шексіз үлкен мән қабылдаса, фотонның массасы нөлге ұмтылып, ол қамтамасыз етіп тұрған әсерлесуді Кулон заңы жақсы сипаттайды.

Сонымен, *Кулон заңы  $10^7$  м арақашықтығына дейін өте үлкен дәлдікпен дұрыс екендігі дәлелденген.*

Кулон заңының өте жақын арақашықтықтар үшін дұрыстығын элементар бөлшектердің өзара әсерлерін зерттеуге арналған Резерфорд тәжірибелері негізінде дәлелденген. Бұл тәжірибелер нәтижесіне сүйеніп, Кулон заңы  $10^{-15}$  м тең арақашықтыққа дейін дұрыс болатындығы тағайындалды.

### **3. Кулон заңының өріс ұғымы арқылы сипаттау**

Зарядтардың әсерлерінің *бір-біріне берілу табиғаты* туралы негізгі екі көзқарас бар: бірінші- *алыстан әрекеттесу*, екінші – *жақыннан әрекеттесу*. Фарадей еңбектеріне дейін Кулон заңы *алыстан әрекеттесу* көзқарасы тұрғысынан түсіндірілді. Бұл көзқарас бойынша *зарядтар бір-бірімен ешқандай дәнекерсіз, материялық ортаның көмегінсіз әсерлеседі. Әсер бір зарядтан екінші зарядқа қас-қағымда, лезде беріледі.*

XXI ғасырдың бірінші жартысында зарядталған денелердің арасында

әрекеттесудің пайда болу табиғаты туралы *жақыннан әрекеттесу* деп аталатын екінші көзқарас пайда болды. Бұл көзқарас бойынша зарядталған бір дененің екінші зарядталған денеге әсері дәнекер арқылы - *материялық орта* арқылы беріледі. Дәнекер ортаның табиғаты туралы, алғашқыда, әр түрлі пікірлер болды. Мысалы, Фарадей бойынша, дәнекер ортаның қызметін кеңістікті толтырып тұрған *«әлемдік эфир»* атқарады. Бұл көзқарас бойынша күш зарядтың өзі орналасқан жердегі ортамен әсерлесу нәтижесінде пайда болып, ортаның қасиеттерінің негізінде келесі зарядқа дейін таралады.

Максвелл электромагниттік әсерлесуді «әлемдік эфирдегі» созылу, сығылу, ығысу т.б. құбылыстарының жиынтығын сипаттайтын теңдеулерді шешу арқылы табуға тырысты.

Кейіннен Максвелл дәнекер материалық ортаның күйін  $\vec{E}, \vec{D}, \vec{H}, \vec{B}$  векторларымен сипаттап, осы векторлардың уақыт және координат бойынша өзгерістерін анықтайтын теңдеулерді – *Максвелл теңдеулерін* жазды.

Максвелл ілімі бойынша, зарядталған денелердің бір-біріне әсері электромагниттік өріс арқылы беріледі. Өріс кеңістікте уақыт бойынша атом, ядро, молекула сияқты тәуелсіз өмір сүреді. Өріс материяның бір түрі. Оның импульсі, энергиясы сияқты сипаттамалары бар.

#### **4. Электр өрісі**

**Электр өрісі** – электр зарядтары өзара әсерлесетін материяның түрі. Электр



өрісін заряд туғызады. Қозғалмайтын заряд өрісін – **электростатикалық** деп атайды. Электр өрісін өлшеуіш құралдармен байқауға болады. Осы сыншы зарядты электр өрісіне қойған кезде оң зарядтардың кеңістіктегі орнына және мәніне ешбір өзгеріс енгізбеу керек. Осыған қандайда бір  $F$  күші әсер етсін делік. Осы күштің сынақ зарядқа қатынасының векторлық шамасы **электр өрісінің кернеулігі** деп аталды.

Зарядтардың арасындағы әсер электр өрісі арқылы жүзеге асырылады. Кез-келген заряд өзінің айналасында кеңістіктің қасиетін өзгертеді - онда электр өрісін туғызады. Берілген жерде өрістің барын анықтау үшін ол жерге зарядталған денені орналастырып, ол электр күштерінің әсерін байқай ма жоқ па соны анықтаймыз.

Сөйтіп, электр өрісін біліп, зерттеу үшін белгілі бір “сынақ” зарядты пайдалану керек.

$$E = \frac{f}{q_{\text{сын}}} - \text{бұл векторлық шаманы берілген нүктедегі (яғни сынақ } q_{\text{сын}}$$

зарядтың  $f$  күштің әсеріне ұшырайтын нүктедегі) *электр өрісінің кернеулігі* деп атайды.

Электр өрісінің кернеулігінің өлшем бірлігі: **Ньютон бөлінген Кулон (Н/Кл)**.

$q_1$  заряды тарапынан  $q_2$  зарядына әсер ететін күш  $\vec{F}_{12}$ ,  $q_2$  заряды тарапынан  $q_1$  зарядына әсер ететін күш  $\vec{F}_{21}$  болсын. Сонда Кулон заңы бойынша? Бұл күштер үшін

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} q_2, \quad (1)$$

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_2}{r_{21}^2} \frac{\vec{r}_{21}}{r_{21}} q_1, \quad (2)$$

өрнектерін аламыз .

Бұл өрнектер физикалық мағыналары жағынан әртүрлі. (1) өрнек  $q_2$  зарядына әсер ететін, ал (2) өрнек  $q_2$  зарядына әсер ететін күштерді, яғни кеңістіктің әртүрлі нүктелеріндегі күштерді анықтайды. Бірақ олардың пайда болуларының физикалық себептері бірдей.  $q_1$  және  $q_2$  зарядтары кеңістікте кернеуліктері  $\vec{E}_1$  және  $\vec{E}_2$  – ге тең электр өрістерін тудырады. Кернеулік – кеңістіктің әр нүктесінде тек бір ғана бағытта бағыттталатын жергілікті шама. *Өрістің нүктесіндегі кернеулігі сол нүктеге орналастырылған бірлік оң зарядқа әсер ететін күш.*

Бір зарядтың екінші зарядқа әсерін екі сатыға бөлуге болады:

1) Нүктелік  $q$  заряды кеңістікте кернеулігі

$$\vec{E}(\vec{r}) = k \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}, \quad (3)$$

өрнегімен анықталатын өріс тудырады.  $\vec{r}$  - өріс көзі болатын зарядтан кернеулігі анықталатын нүктеге дейін жүргізілген радиус векторы.

2) Өріске ендірілген  $q$  нүктелік зарядына өріс тарапынан

$$\vec{F} = q \vec{E} \quad (4)$$

өрнегімен анықталатын күш әсер етеді.

## 5. Электр өрісінің тәуелсіздік (суперпозиция) принципі

Қозғалмайтын  $N$  нүктелік зарядтардан тұратын электрлік жүйені қарастырайық. Тәжірибелер көрсеткендей, зарядтар жүйесіндегі бір зарядқа әсер ететін қорытқы күш оның әрбір жеке зарядпен әсерлесу күштерінің геометриялық қосындысына тең болады

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i,$$

мұндағы:  $\vec{F}_i = q\vec{E}_i$  екенін ескерсек, алатынымыз:

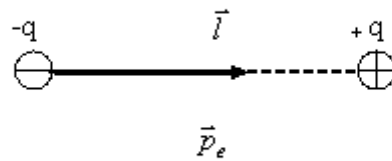
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_N.$$

Бұл алынған формула электр өрісінің суперпозиция принципін өрнектейді.

*Қозғалмайтын  $N$  зарядтан тұратын электрлік жүйенің тудыратын қорытқы электр өрісінің кернеулігі жеке зарядтар тудыратын электр өрістерінің кернеуліктерінің геометриялық (векторлық) қосындысына тең болады.*

## 6. Электрлік диполь

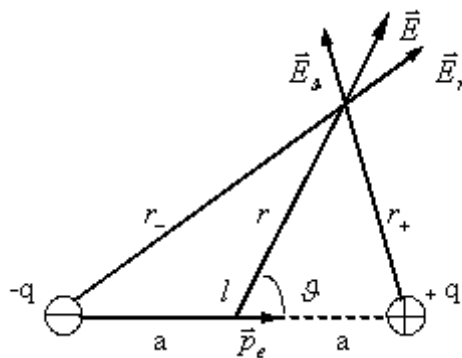
Бір-бірінен  $l$  қашықтықта орналасқан шамалары бірдей және таңбалары қарама-қарсы екі зарядтан тұратын электрлік жүйені электрлік диполь деп атайды.



Электрлік дипольді сандық сипаттау үшін дипольдік момент немесе электрлік момент деп аталатын физикалық векторлық шама енгізілген.

$$\vec{p}_e = q \cdot \vec{l}$$

Электрлік дипольдің берілген нүктедегі электр өрісінің потенциалын анықтайық.



$a$  қашықтығының  $r$  мен салыстырғанда аз екендігін ескерсек

$$r_+ = r - a \cos \theta,$$

$$r_- = r + a \cos \theta.$$

Электр өрісінің суперпозиция принципі бойынша:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{r_- - r_+}{r_- \cdot r_+} \right) = \frac{q2a \cos \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

мұндағы:  $r_- \cdot r_+ \approx r^2$      $2a = l$ .

Электрлік дипольдің электр өрісінің потенциалы келесі өрнекпен анықталады:

$$\varphi = \frac{ql \cos \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{p_e \cos \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Енді электрлік дипольдің электр өрісінің кернеулігін анықтайық. Берілген нүктедегі дипольдің тудыратын электр өрісінің кернеулігін екі құрамаға жіктеуге болады:

$$\vec{E} = \vec{E}_r + \vec{E}_\vartheta.$$

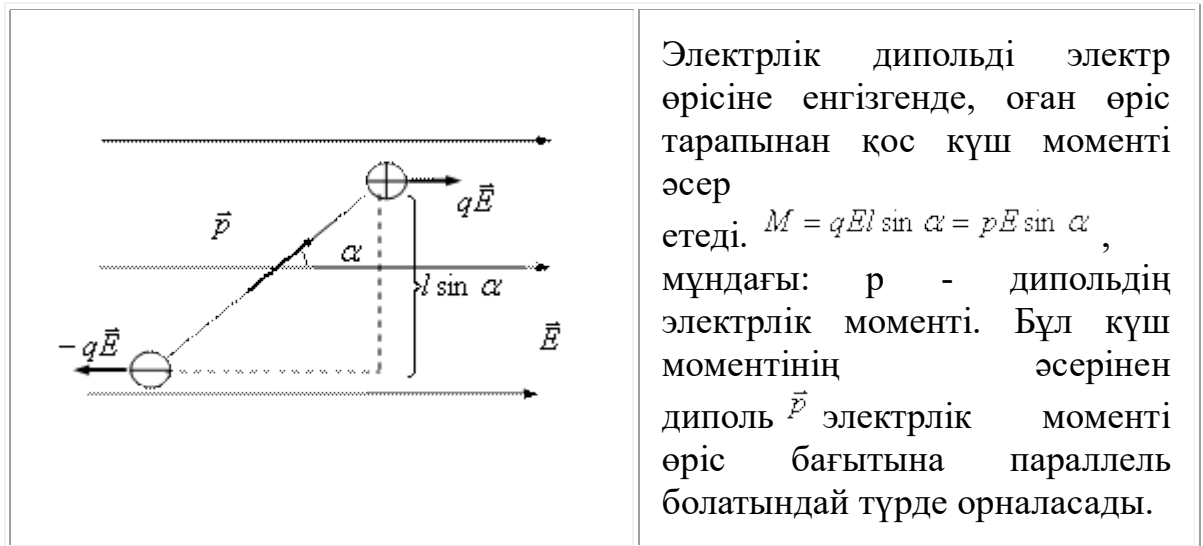
$$E_r = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{2p_e \cos \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^3},$$

$$E_\vartheta = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} = \frac{p_e \sin \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^3},$$

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_\vartheta^2} = \sqrt{\left( \frac{2p_e \cos \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^3} \right)^2 + \left( \frac{2p_e \sin \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^3} \right)^2} = \frac{p_e}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \vartheta}.$$

Электрлік дипольдің электр өрісінің кернеулігі келесі өрнекпен анықталады:

$$E = \frac{p_e}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \vartheta}.$$



Сыртқы электр өрісіндегі дипольдің потенциалдық энергиясы:

$$W_p = -qEl \cos \alpha = -pE \cos \alpha$$

**Қорытынды:**

- Кулон заңын тәжірибе жүзінде ең алғаш зерттеген ағылшын ғалымы Кавендиш. 1785 жылы ғана Кавендиш тәжірибелерінен 13 жыл өткен соң ғана Ш.Кулон ашқан;
- зарядталған денелер бір-бірімен электромагниттік өріс арқылы әсерлеседі;
- электромагниттік өріс кеңістікте уақыт бойынша өмір сүреді;
- кернеулік – өрістің нүктесіне орналастырылған бірлік оң зарядқа әсер ететін күш;
- кернеулік – өріс нүктесінің қасиетін сипаттайтын жергілікті шама.
- бір-бірінен арақашықтығы кеңістіктің зерттеліп отырған нүктеге

дейінгі арақашықтықпен салыстырғанда өте аз болатын әр аттас екі нүктелік зарядтардың жиынтығын диполь дейді.