

Ф И З И К А

Механика.

Термодинамика Термодинамика и
молекулярная физика Термодинамика и
молекулярная физика (или статистическая
физика).

Электричество Электричество и магнетизм.

Оптика (или теория волн).

Атомная физика Атомная физика (или
квантовая физика).

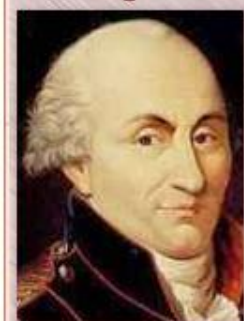
Ядерная физика.

Модуль2
Электростатика и
постоянный ток;
Электромагнетизм.

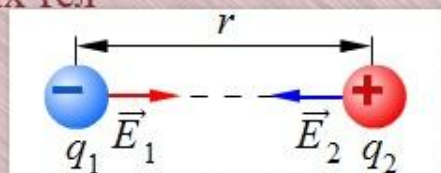
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

1.1 Электрический заряд – это физическая величина, характеризующая свойство тел или частиц вступать в электрическое взаимодействие

1.2. Закон Кулона для точечных заряженных тел



Ш. Кулон



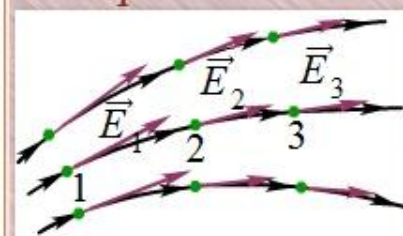
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная

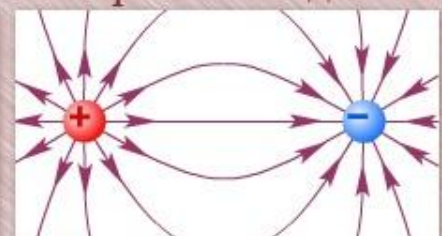
1.3. Напряжённость электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad E = \frac{\Delta\phi}{\Delta r}$$

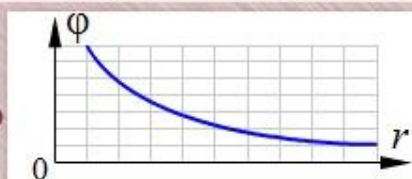
3.1. Силовые линии электрического поля



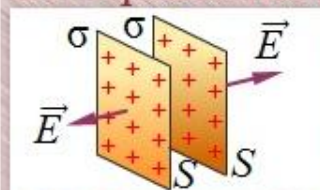
3.2. Силовое поле электрического диполя



5. Потенциал электрического поля сферического заряда



2.1. Заряженные плоскости



Одноимённо заряженные
Разноимённо заряженные

Между: $E = 0$ Вне: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$
Между: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ Вне: $E = 0$

2.2. Заряженный шар (сфера)



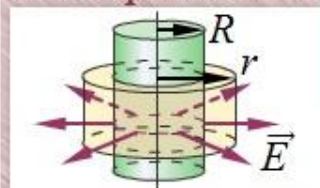
Снаружи

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}, (r > R)$$

Внутри

$$\begin{cases} E = 0 \text{ (сфера)} \\ E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^3} r \text{ (шар)} \end{cases}$$

2.3. Заряженный цилиндр



Вне цилиндра

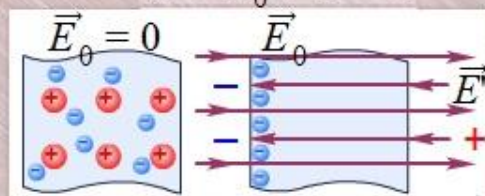
$$E = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{\rho R^2}{2\epsilon_0 r}$$

Внутри

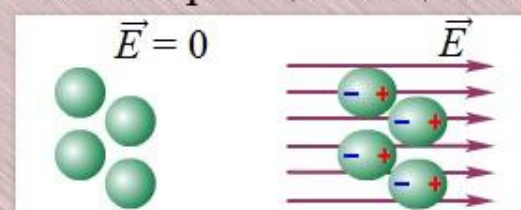
$$\begin{cases} E = 0 \text{ (полый)} \\ E = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{\rho r}{2\epsilon_0} \text{ (сплошной)} \end{cases}$$

4.1. Проводники в электростатическом поле

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$$



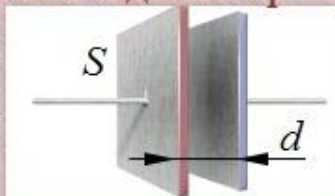
4.2. Поляризация вещества



6. Энергия электрического поля

$$W_e = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$$

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$$



- *Электрические заряды не существуют сами по себе, а являются внутренними свойствами элементарных частиц – электронов, протонов и др.*
- Опытным путем в 1914 г. американский физик **Р. Милликен** показал что электрический заряд дискретен. Заряд ***q*** любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда : $q = n \cdot e$.

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Закон сохранения заряда – один из фундаментальных законов природы, сформулированный в 1747 г. Б. Франклином и подтвержденный в 1843 г. М. Фарадеем: *алгебраическая сумма зарядов, возникающих при любом электрическом процессе на всех телах, участвующих в процессе равна нулю.*

Суммарный электрический заряд замкнутой системы не изменяется.

***Электростатика – раздел,
изучающий статические
(неподвижные) заряды и связанные с
ними электрические поля.***

Перемещение зарядов либо отсутствует, либо происходит так медленно, что возникающие при движении зарядов магнитные поля ничтожны.

***Сила взаимодействия между
зарядами определяется
только их взаимным
расположением.***

Следовательно,

***энергия
электростатического
взаимодействия –
потенциальная энергия.***

- Несмотря на обилие различных веществ в природе, существуют только

два вида электрических зарядов:

заряды подобные тем, которые возникают на *стекле, потертом о шелк* –

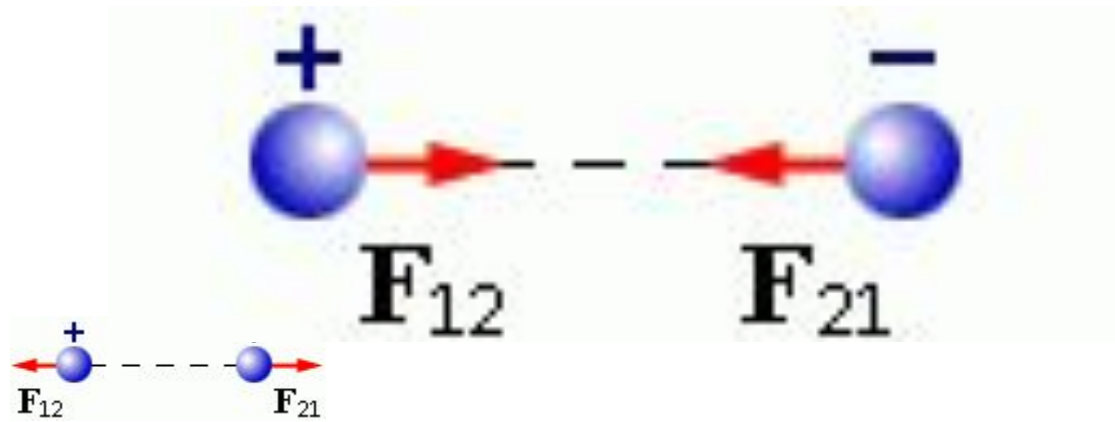
положительные

заряды, подобные тем, которые появляются на *янтаре, потертом о мех* -
отрицательные

- Назвал их так

Бенджамин Франклин в 1746 г.

Известно, что *одноименные заряды
отталкиваются,
разноименные – притягиваются.*



Обратный эффект

- Если поднести заряженное тело (с любым зарядом) к легкому – незаряженному, то между ними будет притяжение – *явление электризации* легкого тела *через влияние*.
- На ближайшем к заряженному телу конце появляются заряды противоположного знака (индуцированные заряды) это явление **называется**
- ***электростатической индукцией.***

- Таким образом, всякий *процесс заряжения есть процесс разделения зарядов.*
- Сумма зарядов не изменяется, заряды только перераспределяются.

Закон Кулона

- **сила взаимодействия точечных зарядов в вакууме пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.**

$$F = k_0 \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

$$F = k_o \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

- здесь k_o – коэффициент пропорциональности, зависящий от системы единиц.

- В системе СИ единица заряда
 $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

- где ϵ_0 – электрическая постоянная;
- 4π здесь выражают сферическую симметрию закона Кулона.

- **Электрическая постоянная** относится к числу *фундаментальных физических констант* и равна

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

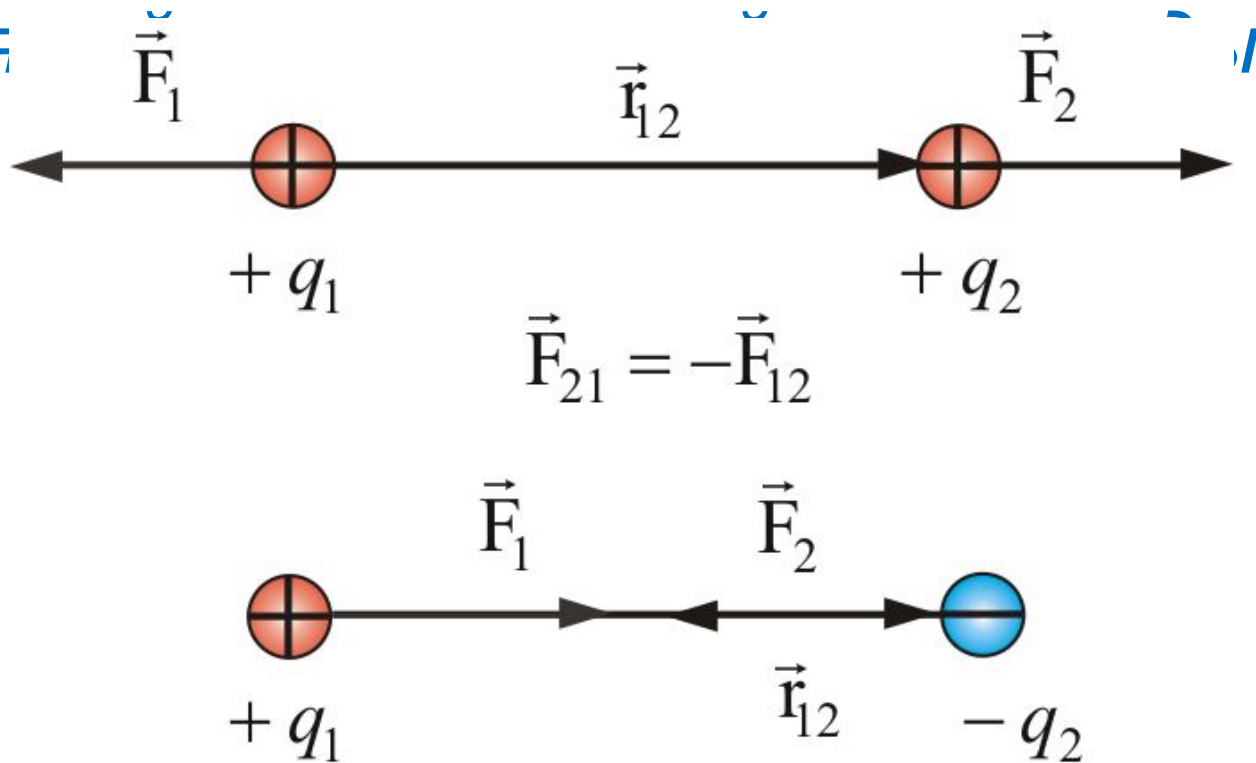
- Элементарный заряд в СИ: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$
- Отсюда следует, что $1 \text{ Кл} = 6,25 \cdot 10^{18} e.$
- Поскольку элементарный заряд мал, мы как бы не замечаем его дискретности (заряду 1 мкКл соответствует $\sim 10^{13}$ электронов).

- В векторной форме **закон Кулона** выглядит так:

$$\vec{F}_2 = k_0 \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} = -\vec{F}_1$$

- где F_1 – сила, действующая на заряд q_1
- F_2 – сила, действующая на заряд q_2
- r - единичный вектор, направленный от положительного заряда к отрицательному.

- В электростатике взаимодействие зарядов подчиняется **третьему закону Ньютона**: силы взаимодействия между зарядами равны по величине и направлены противоположно друг другу вдоль прямой, соединяющей заряды



- Если заряды не точечные, то в такой форме закон Кулона не годится – нужно разбить заряженное тело на элементарные части и проинтегрировать по объему.
- **Вся совокупность фактов говорит, что закон Кулона справедлив при $10^7 - 10^{-15}$ м**
- Внутри ядра действуют уже другие законы, не кулоновские силы.

Электростатическое поле в вакууме. Напряженность электростатического поля

- Почему заряды взаимодействуют?
- Имелет место борьба двух теорий:
- *теория дальногодействия* – Ньютон, Ампер
- *теория близкодействия* – Фарадей, Максвелл и т.д.
- Для электростатического поля справедливы обе эти теории.

- **Вокруг заряда всегда есть электрическое поле**, основное свойство которого заключается в том, что на всякий другой заряд, помещенный в это поле, действует сила.
- **Электрические и магнитные** поля – частный случай более общего – **электромагнитного поля** (ЭМП).
- Они могут порождать друг друга, превращаться друг в друга.
- Если заряды не движутся, то магнитное поле не возникает.

- ***ЭМП – есть не абстракция, а объективная реальность – форма существования материи, обладающая определенными физическими свойствами, которые мы можем измерить.***
- Не существует статических электрических полей, не связанных с зарядами, как не существует «голых», не окруженных полем зарядов.

- **Силовой характеристикой поля,** создаваемого зарядом q является отношение силы, действующей на пробный заряд q' , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда, называемое **напряженностью электростатического поля**, т.е.

$$E = \frac{F}{q'} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

**Силовая характеристикой поля –
напряженность
электростатического поля:**

$$E = \frac{F}{q'} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

q' - пробный заряд

- Напряженность в векторной форме

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

- здесь r – расстояние от заряда до точки, где мы изучаем это поле.

- Тогда $\vec{F} = q' \vec{E}$

- **Вектор напряженности электростатического поля** равен силе, действующей в данной точке на помещенный в нее пробный единичный положительный заряд.
- Из данного определения следует, что напряженность может быть выражена как – ньютон на кулон (Н/Кл).
- **1 Н/Кл – напряженность такого поля, которое на точечный заряд 1 Кл действует с силой в 1 Н.**

- В СИ

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

- размерность напряженности:

$$[E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \text{ или } \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Сложение электростатических полей.

Принцип суперпозиции

- *Если поле создается несколькими точечными зарядами, то на пробный заряд q' действует со стороны заряда q_k такая сила, как если бы других зарядов не было.*

- Результирующая сила определится выражением:

$$\vec{F} = \sum_k \vec{F}_k$$

- это принцип суперпозиции или независимости действия сил

$$\vec{F} = \sum_k \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_k}{r_k^2} \frac{\vec{r}_k}{r_k} = \sum_k \vec{F}_k$$

- т.к. $\vec{F} = q' \vec{E}$ то $\vec{E}$ – **резльтирующая напряженность** поля в точке, где расположен пробный заряд, так же **подчиняется принципу суперпозиции:**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum \vec{E}_k.$$

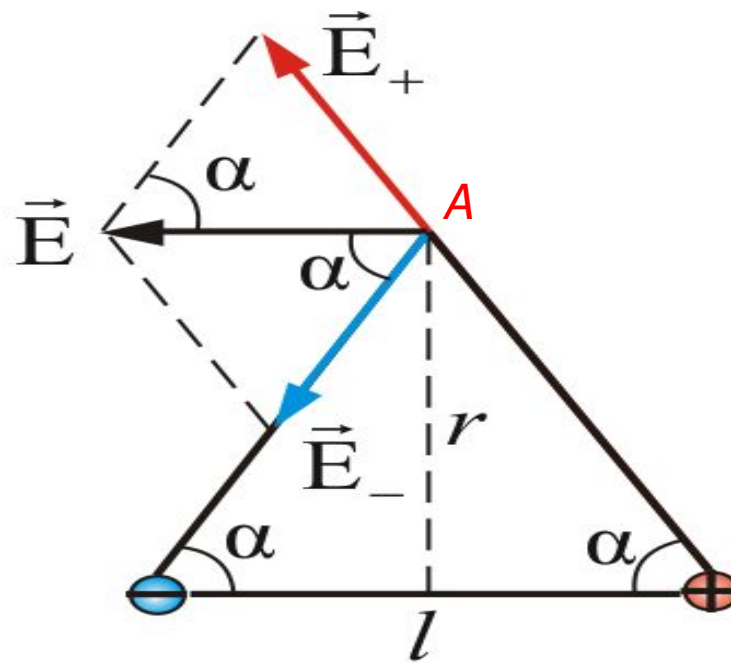
- Это соотношение выражает **принцип наложения или суперпозиции электрических полей** и представляет важное свойство электрического поля.

Принцип наложения или суперпозиции электрических полей:

- Напряженность результирующего поля, системы точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в данной точке каждым из них в отдельности.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum_k \vec{E}_k.$$

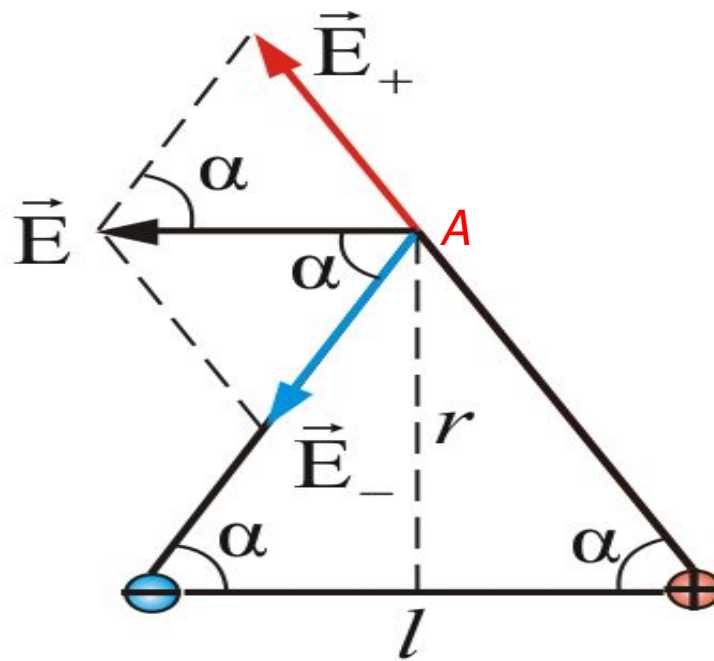
Пример 1



$$\bullet \quad \vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots = \sum_k \vec{E}_k \quad \text{т. е.} \quad \vec{E} = \sum_k \vec{E}_k$$

$$\bullet \quad \vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- \quad |\vec{E}_+| = |\vec{E}_-| \quad E = 2E_+ \cos \alpha$$

задача симметрична



- В данном случае:

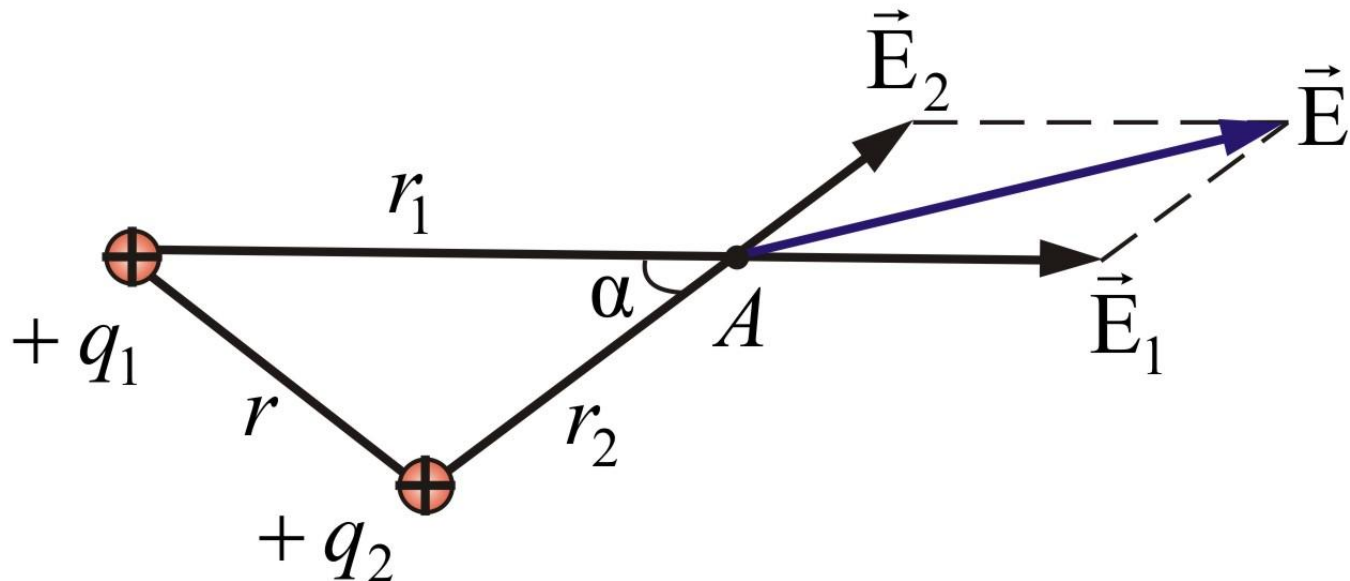
$$E_- = E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)}$$

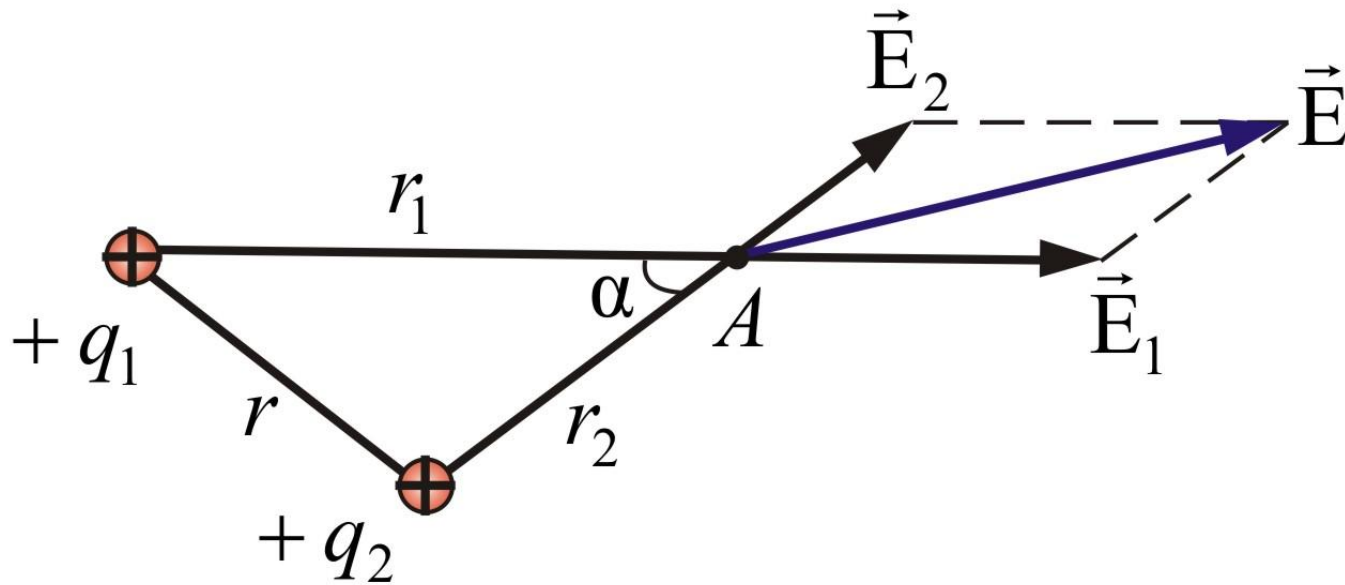
$$\cos \alpha = \frac{l}{2\sqrt{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)}}$$

Следовательно,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

- Рассмотрим другой пример. Найдем напряженность электростатического поля E , создаваемую двумя положительными зарядами q_1 и q_2 в точке A , находящейся на расстоянии r_1 от первого и r_2 от второго зарядов





$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}$$

$$E_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}$$

Воспользуемся теоремой косинусов:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos\alpha} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} + \frac{2q_1q_2}{r_1^2 r_2^2} \cos\alpha},$$

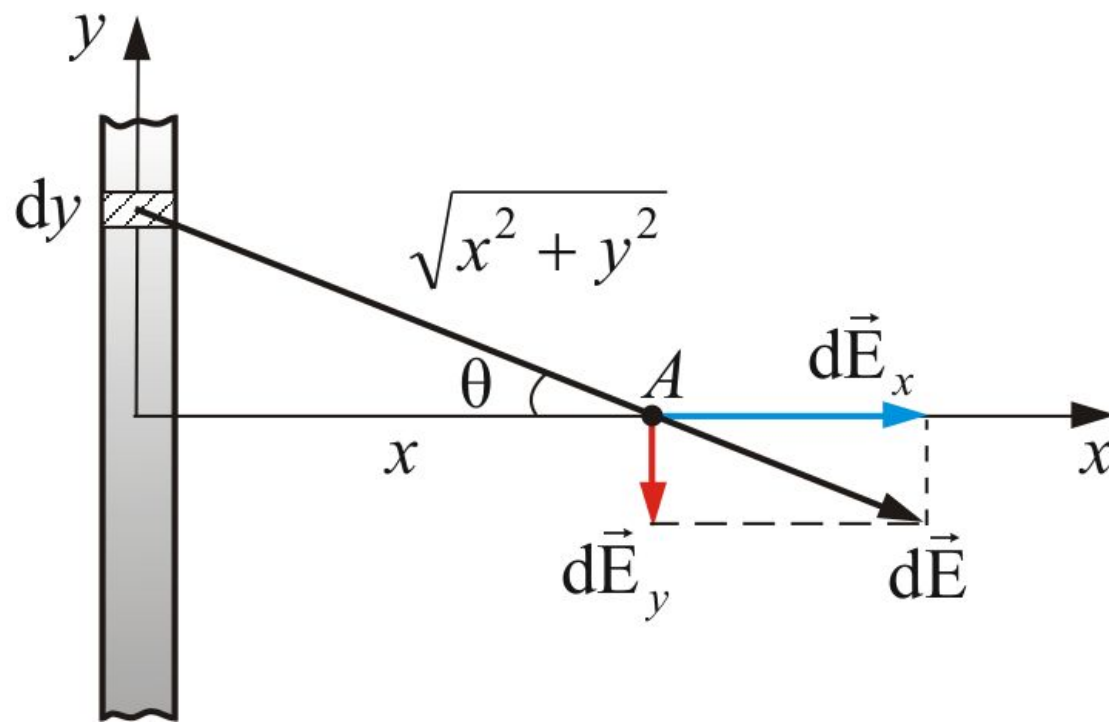
где $\cos\alpha = \frac{r^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}$.

- Если поле создается *не точечными зарядами*, то используют обычный в таких случаях прием. Тело разбивают на бесконечно малые элементы и определяют напряженность поля, создаваемого каждым элементом, затем интегрируют по всему телу:

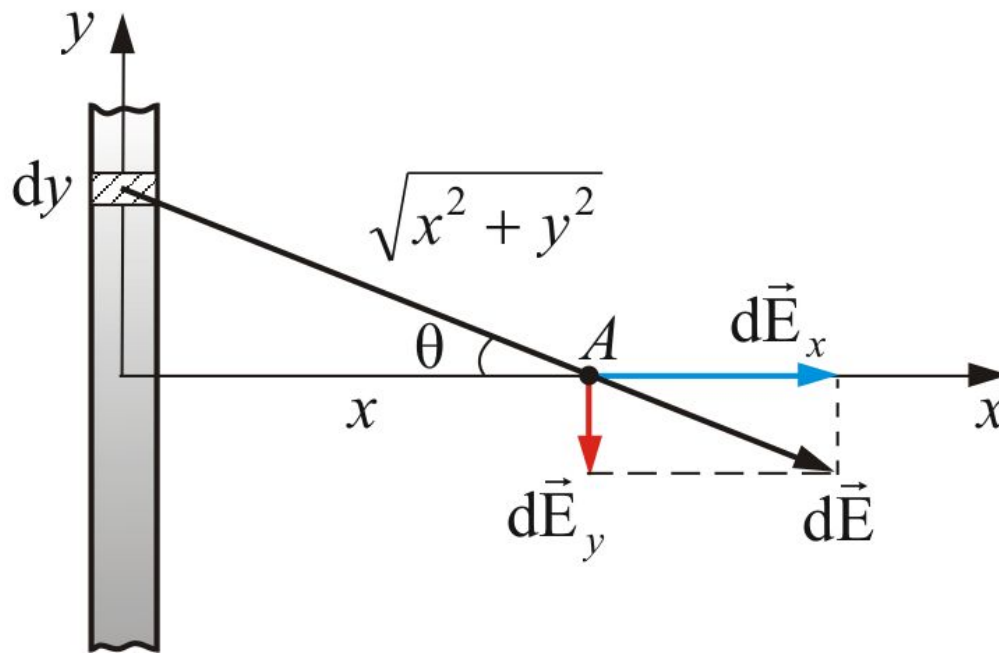
$$\vec{E} = \int d\vec{E},$$

- где $d\vec{E}$ – напряженность поля, обусловленная заряженным элементом. Интеграл может быть линейным, по площади или по объему в зависимости от формы тела.

- Для решения подобных задач пользуются соответствующими значениями **плотности заряда**:
- $\lambda = dq / dl$ – **линейная плотность заряда**, измеряется в Кл/м;
- $\sigma = dq / dS$ – **поверхностная плотность заряда** измеряется в Кл/м²;
- $\rho = dq / dV$ – **объемная плотность заряда**, измеряется в Кл/м³.

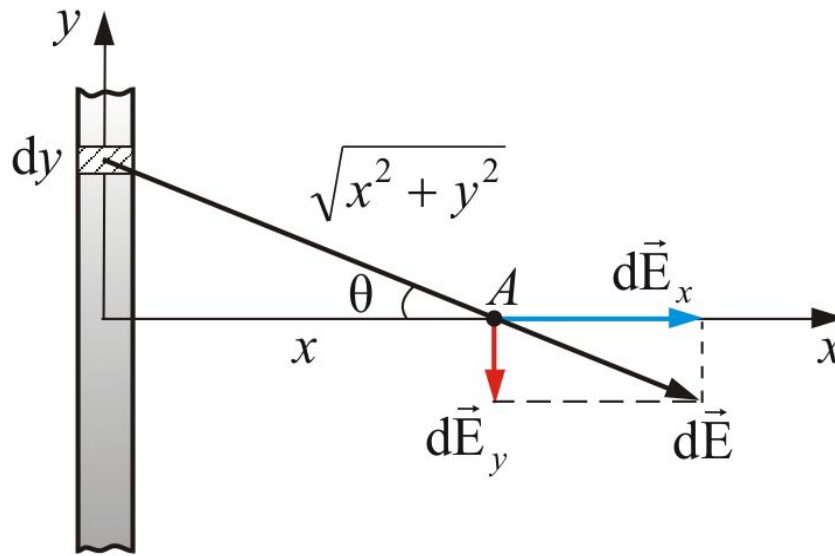


- Определим напряженность электрического поля в точке A на расстоянии x от бесконечно длинного, линейного, равномерно распределенного заряда.
- λ – заряд, приходящийся на единицу длины.



- Считаем, что x – мало по сравнению с длиной проводника. Элемент длины dy , несет заряд $dq = dy \lambda$. Создаваемая этим элементом напряженность электрического поля в точке A :

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}}.$$



- Вектор $d\vec{E}$ имеет проекции dE_x и dE_y причем

$$dE_x = dE \cos \theta; \quad dE_y = dE \sin \theta.$$
- Т.к. проводник бесконечно длинный, а задача симметричная, то y – компонента вектора $d\vec{E}$ обратится в ноль (скомпенсируется), т.е. .

$$E_y = \int dE \sin \theta = 0$$

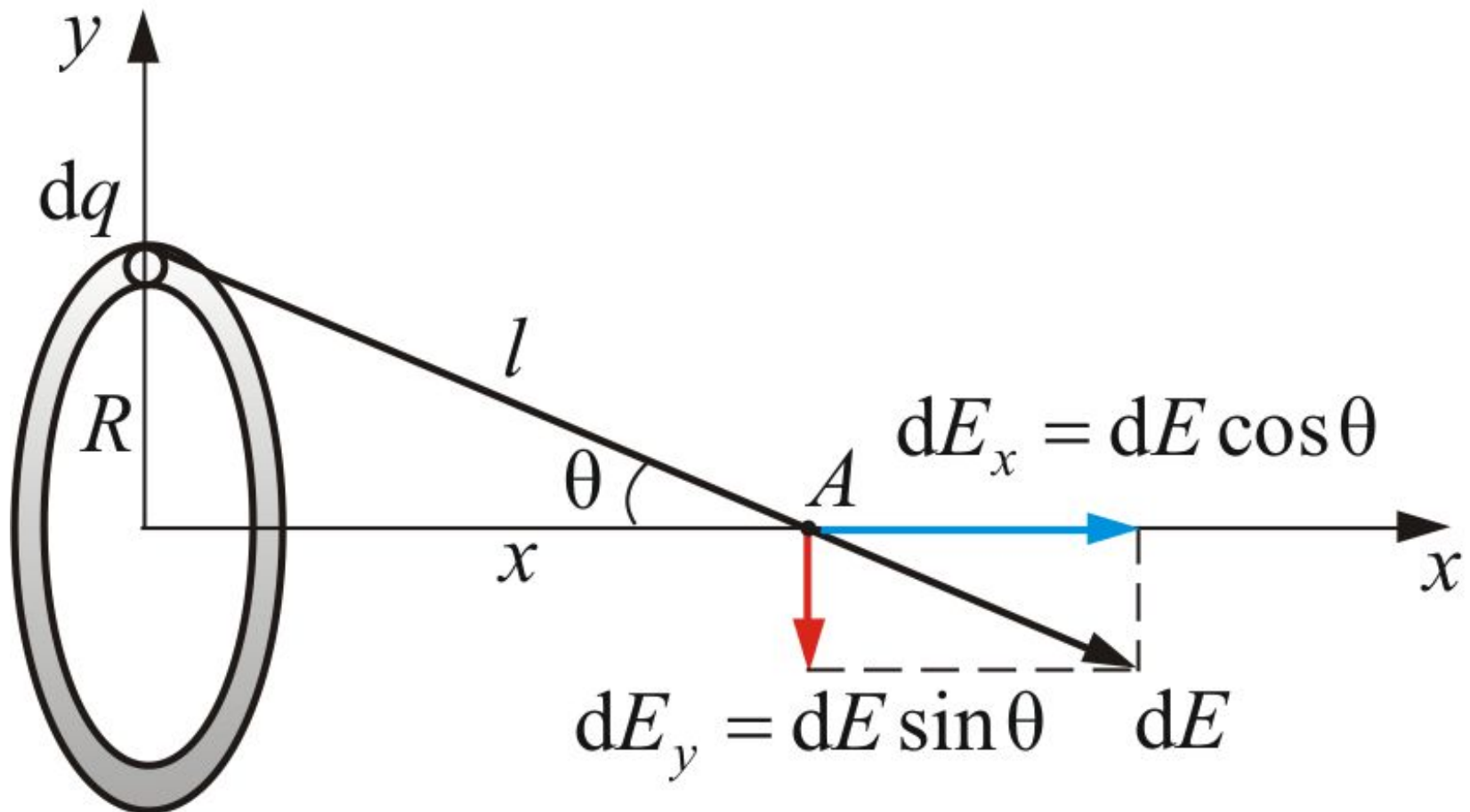
- Тогда $E = E_x = \int dE \cos \theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\cos \theta dy}{x^2 + y^2}$
- Теперь выразим y через θ . Т.к. $y = x \operatorname{tg} \theta$,
- То $dy = x d\theta / \cos^2 \theta$ $(x^2 + y^2) = x^2 / \cos^2 \theta$

$$E = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{x} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta d\theta = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 x}.$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 x}.$$

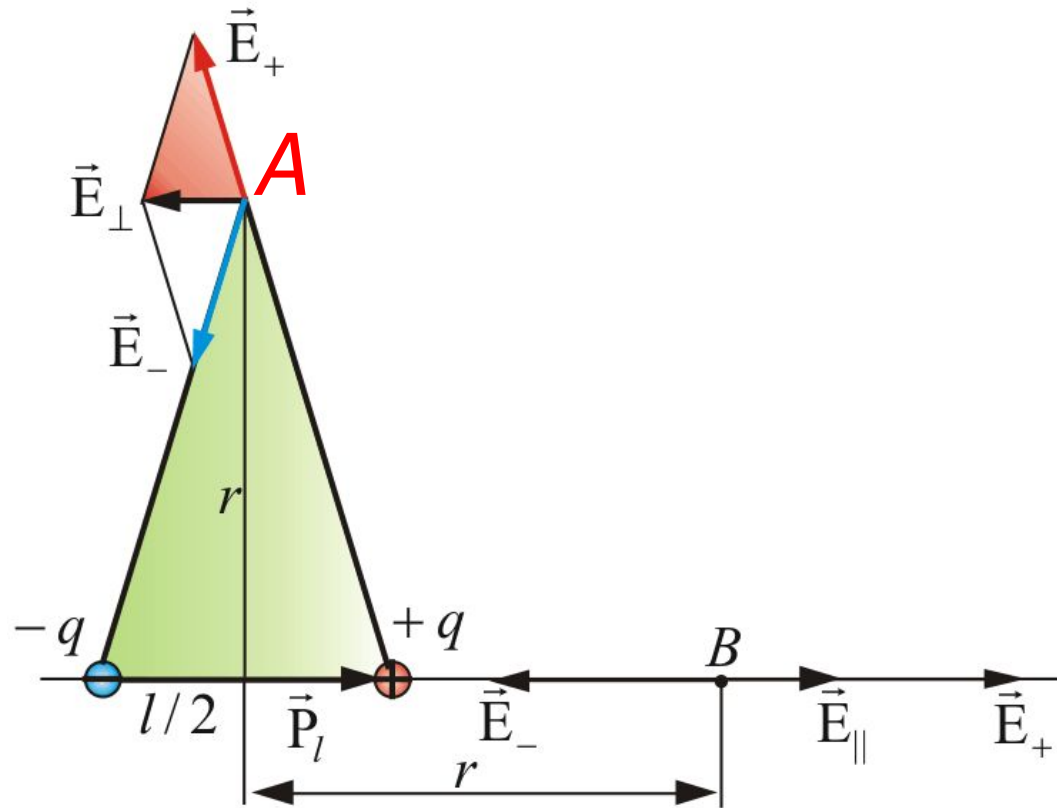
- *Напряженность электрического поля линейно распределенных зарядов изменяется обратно пропорционально расстоянию до заряда.*

- по тонкому кольцу радиуса R равномерно распределен заряд q . Определить E в точке A



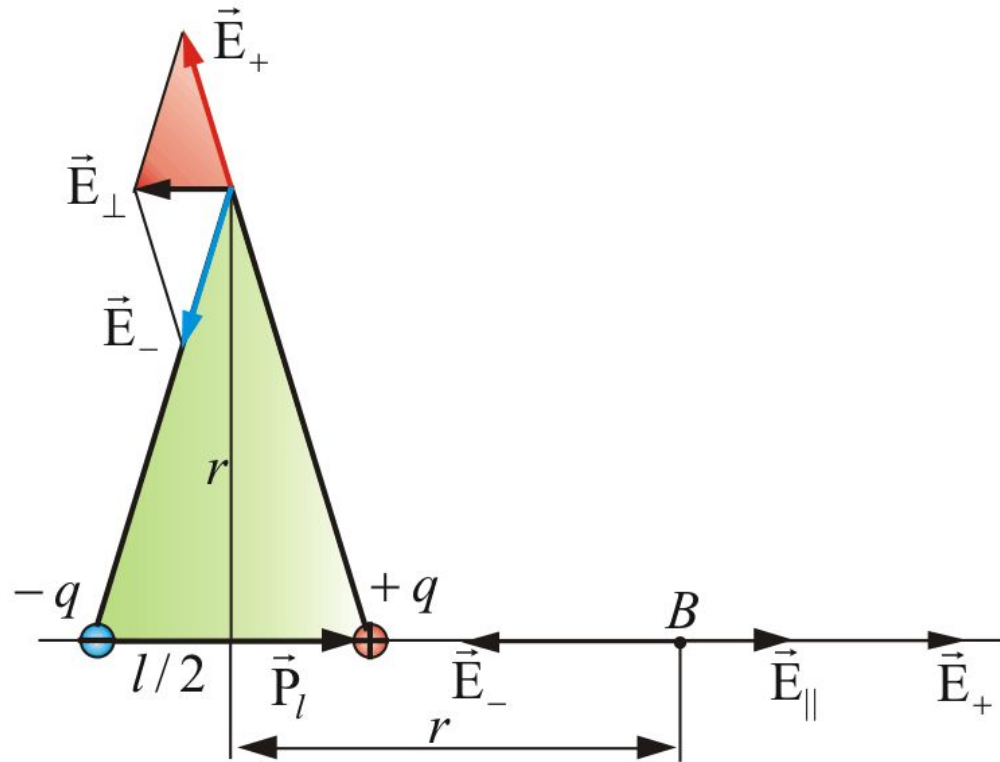
Электростатическое поле диполя

- **Электрическим диполем** называется система двух одинаковых по величине, но разноименных точечных зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния до тех точек, в которых определяется поле системы
- **Плечо диполя** – вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и численно равный расстоянию между зарядами.



- Пример 1. Найдем $E_\perp$ в точке A на прямой, проходящей через центр диполя и перпендикулярной к оси.

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{т.к. } l \ll r$$



- Из подобия заштрихованных треугольников можно записать:

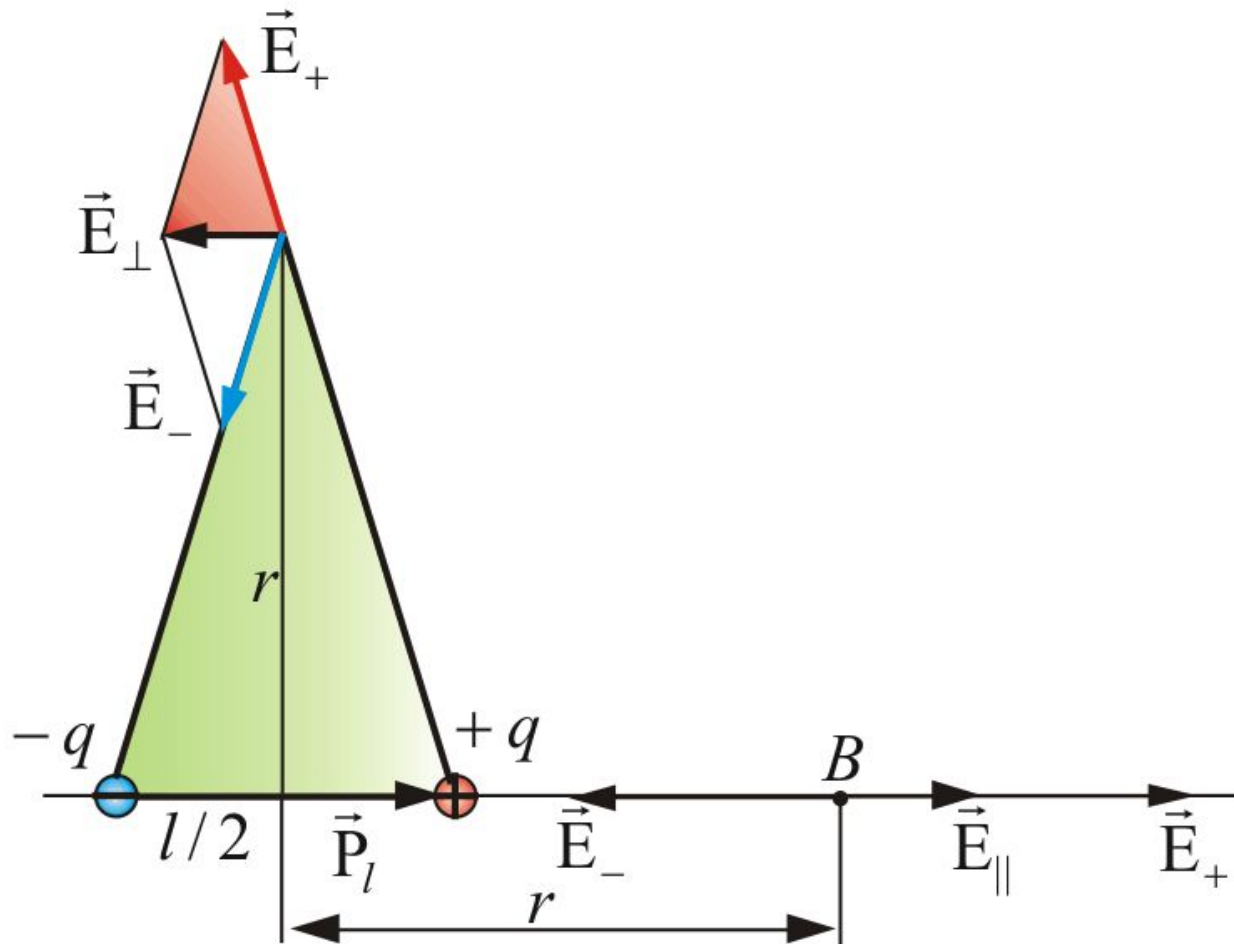
$$\frac{E_\perp}{E_+} = \frac{l}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{l}{r} \quad \text{отсюда} \quad E_\perp = E_+ \frac{l}{r} = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

- Обозначим вектор: $\vec{P} = q\vec{l}$ – **электрический момент диполя** (или **дипольный момент**) – произведение **положительного заряда диполя на плечо**.

- Направление $\vec{P}$ совпадает с направлением $\vec{l}$, т.е. от отрицательного заряда к положительному.

- Тогда, учитывая что $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$, получим:

$$E_{\perp} = \frac{P}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad \text{или} \quad \vec{E}_{\perp} = \frac{-\vec{P}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$



- Пример 2. На оси диполя, в точке B :

$$E_{\parallel} = \frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad \text{или} \quad \vec{E}_{\parallel} = \frac{2\vec{P}}{4\pi\epsilon_0 r^3}.$$

$$\vec{E} = \frac{-\vec{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3}.$$

Поле в точках A_1 и A_2 отличается в два раза (по модулю). Направлено в противоположные стороны.

Напряженность поля диполя убывает обратно пропорционально кубу расстояния от диполя до точки наблюдения, т.е. быстрее, чем поле точечного заряда.

- **Пример 3.** В произвольной точке C

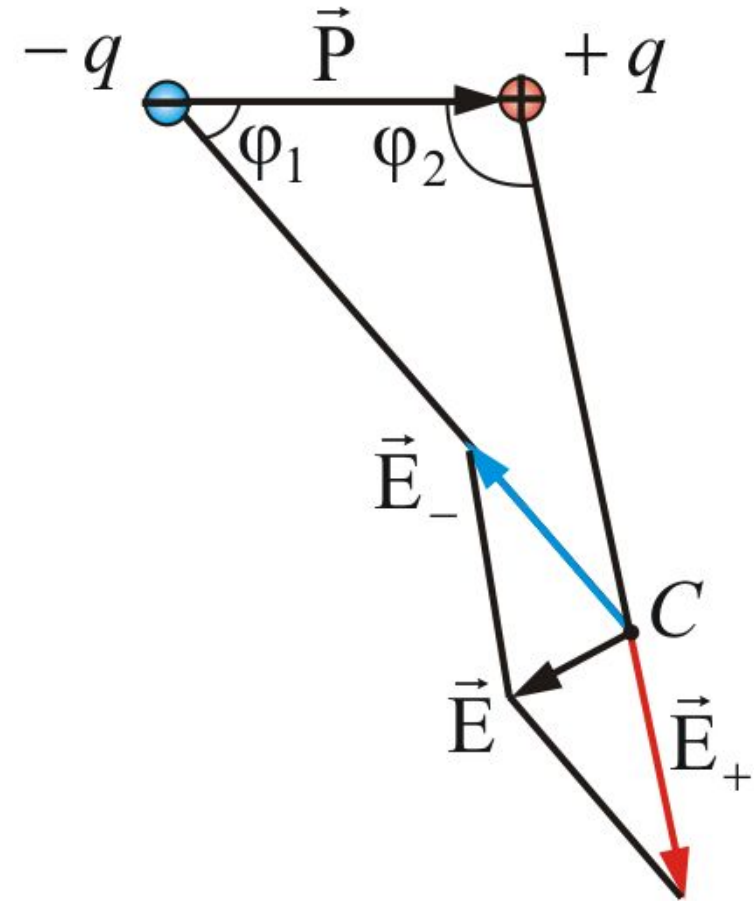
$$E = \frac{P}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{3\cos^2 \varphi + 1},$$

где $\varphi \approx \varphi_1 \approx \varphi_2$

При :

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\pi}{2}, \quad E_1 = \frac{P}{4\pi\epsilon_0 r^3};$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = 0, \quad E_2 = \frac{2P}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$



- 
- The background of the slide features a visualization of the electric field of a dipole. It consists of numerous yellow and orange contour lines that form a series of nested loops, symmetric about a central point. The lines are more densely packed near the center and spread out as they move away from it, illustrating the characteristic dipole field pattern.
- Электрическое поле диполя.

- Из приведенных примеров видно, что *напряженность электрического поля системы зарядов равна геометрической сумме напряженностей полей каждого из зарядов в отдельности* (принцип суперпозиции).