Ф И З И К А

Механика.
ТермодинамикаТермодинамика и молекулярная физикаТермодинамика и молекулярная физика (или статистическая физика).

ЭлектричествоЭлектричество и магнетизм.

Оптика (или теория волн).
Атомная физикаАтомная физика (или квантовая физика).
Ядерная физика.

Модуль2

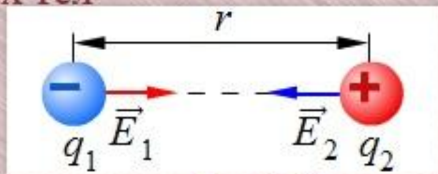
Электростатика и
постоянный ток;
Электромагнетизм.

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



$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

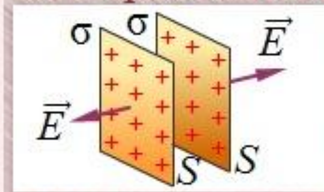
$\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная

1.3. Напряжённость электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \qquad E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r}$$

2. Напряжённость поля

2.1. Заряженные плоскости



Одноимённо заряженные: Между: $E = 0$ Вне: $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$

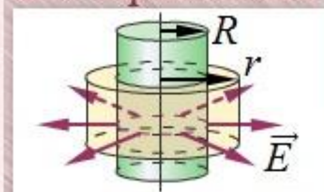
Разноимённо заряженные: Между: $E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$ Вне: $E = 0$

2.2. Заряженный шар (сфера)

Снаружи $E = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$, $(r > R)$

Внутри $\begin{cases} E = 0 \text{ (сфера)} \\ E = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R^3} r \text{ (шар)} \end{cases}$

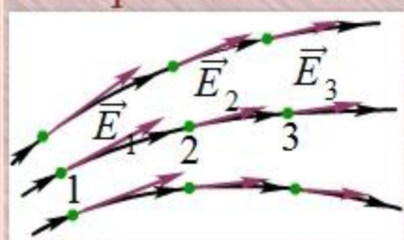
2.3. Заряженный цилиндр



Вне цилиндра $E = \dfrac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 r} = \dfrac{\rho R^2}{2\varepsilon_0 r}$

Внутри $\begin{cases} E = 0 \text{ (полый)} \\ E = \dfrac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 r} = \dfrac{\rho r}{2\varepsilon_0} \text{ (сплошной)} \end{cases}$

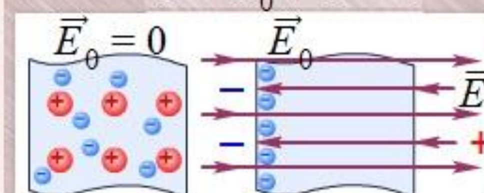
3.1. Силовые линии электрического поля



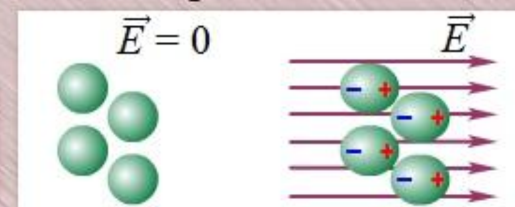
3.2. Силовое поле электрического диполя

4.1. Проводники в электростатическом поле

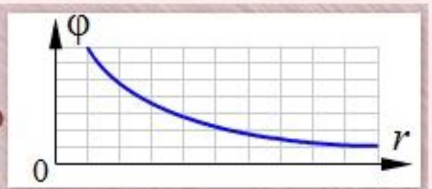
$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$



4.2. Поляризация вещества



5. Потенциал электрического поля сферического заряда

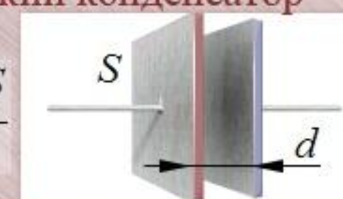


6. Энергия электрического поля

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

7. Плоский конденсатор

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}$$



- *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×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*.**

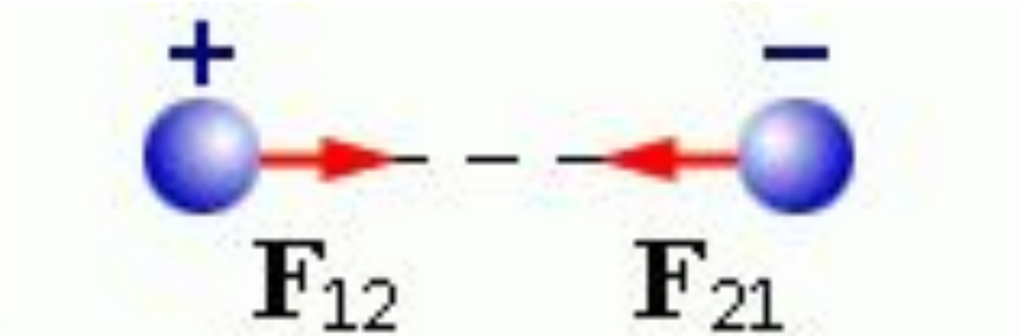
Следовательно,

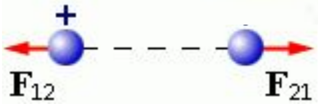
***энергия электростатического взаимодействия –* потенциальная энергия.**

- 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_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий от системы единиц.

- В системе СИ единица заряда
  1 Кл = 1А * 1с

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^{9} \ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

- 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 $1\,\text{Кл} = 6{,}25 \cdot 10^{18}\,e.$

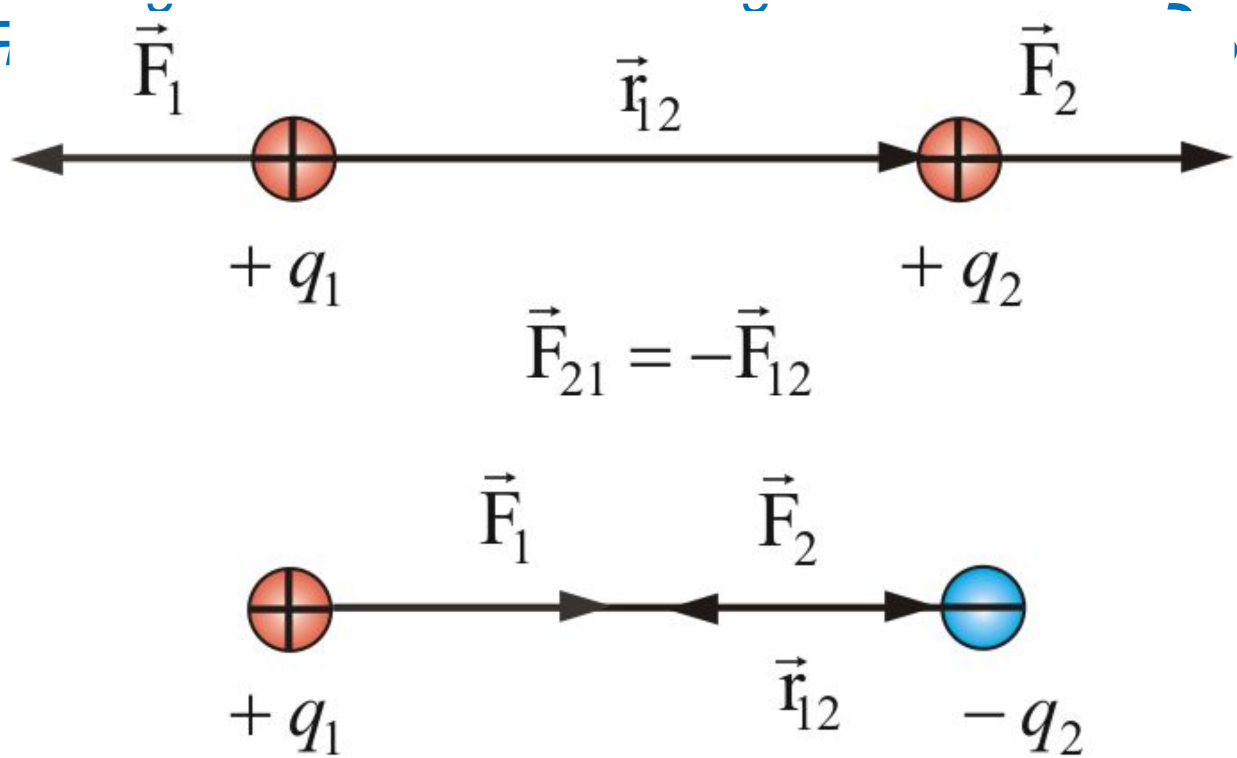
- Поскольку элементарный заряд мал, мы как бы не замечаем его дискретности (заряду 1 мкКл соответствует ~ 10^{13} электронов).

- 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 пря*



- 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 дальнодействия* – 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* **<u>пробный</u> <u>заряд</u>** *q′ , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда, называемое* ***напряженностью электростатического поля,*** т.е.

$$E = \frac{F}{q'} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

Силовая характеристикой поля –

напряженность электростатического поля:

$$E = \frac{F}{q'} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

q' - **пробный заряд**

- Напряженность в векторной форме

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\frac{\vec{r}}{r}$$

- 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

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

- размерность напряженности:

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

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***

$$\vec{F} = \sum_k \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q q_k}{r_k^2} \frac{\vec{r}_k}{r_k} = \sum_k \vec{F}_k$$

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

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

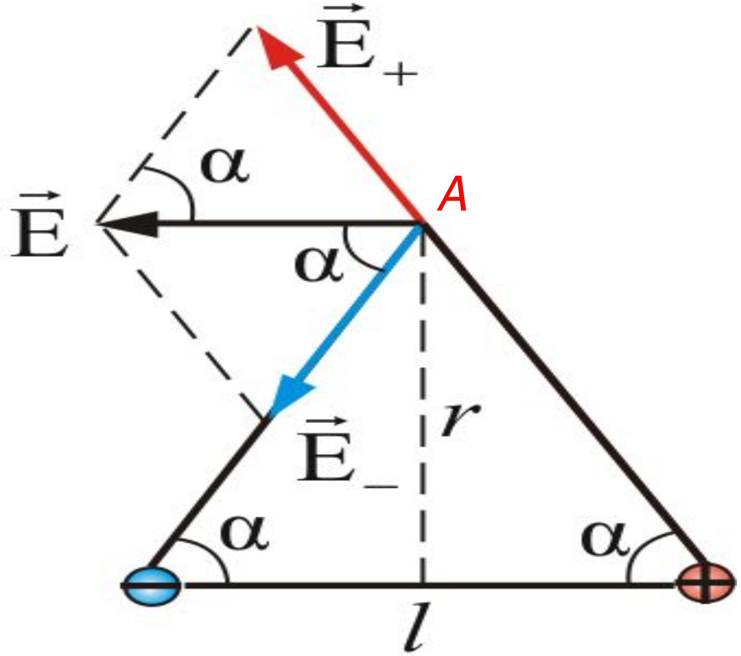
- Это соотношение выражает принцип наложения или ***суперпозиции электрических полей*** и представляет важное свойство электрического поля.

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.***

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

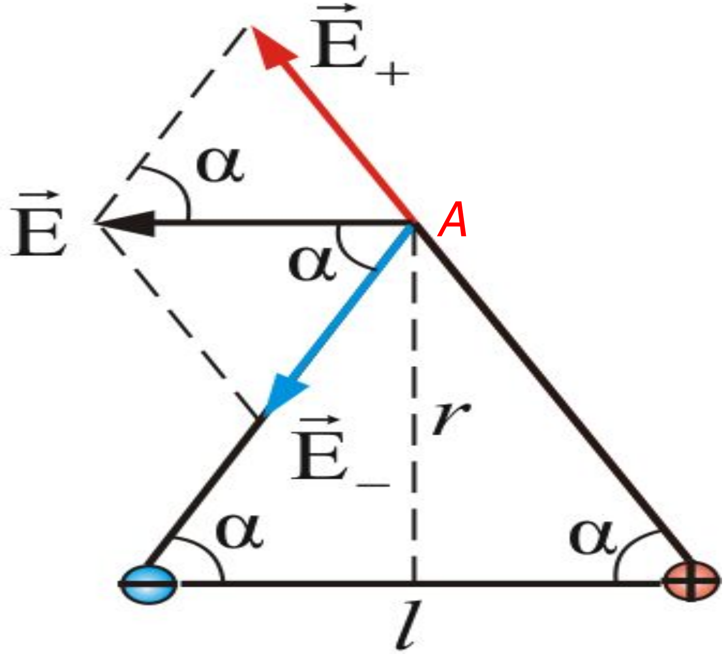
Пример 1



- $$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots = \sum_k \vec{E}_k$$ т. е. $$\vec{E} = \sum_k \vec{E}_k$$

- $$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- \qquad \left|\vec{E}_+\right| = \left|\vec{E}_-\right| \qquad E = 2E_+ \cos\alpha$$

задача симметрична



- В данном случае:

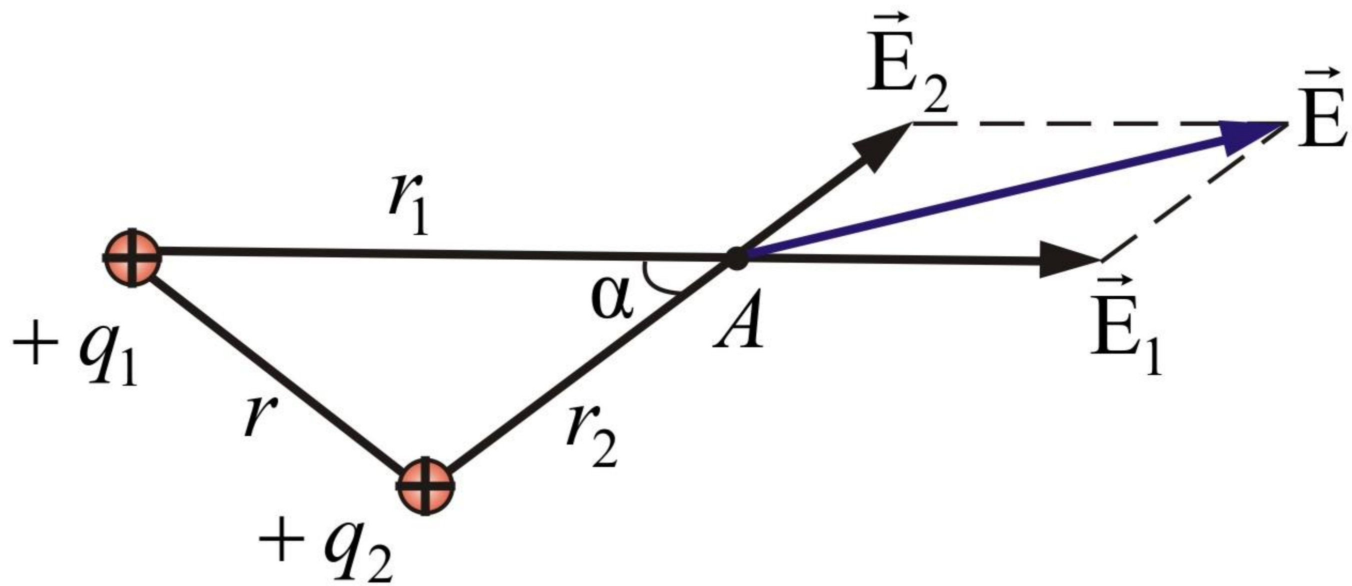
$$\cos\alpha = \frac{l}{2\sqrt{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)}}$$

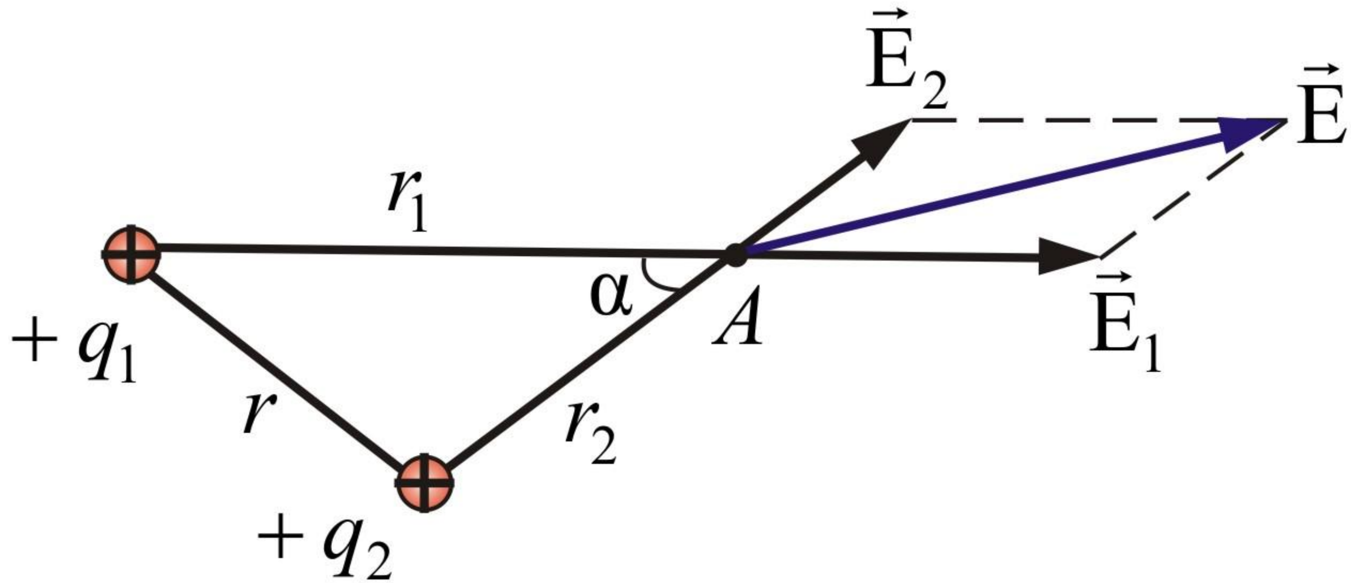
$$E_- = E_+ = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(r^2 + \frac{l^2}{4})}$$

Следовательно,

$$\boxed{E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}.}$$

- 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





$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2} \qquad E_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}$$

Воспользуемся теоремой косинусов:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\alpha} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} + \frac{2q_1q_2}{r_1^2r_2^2}\cos\alpha},$$

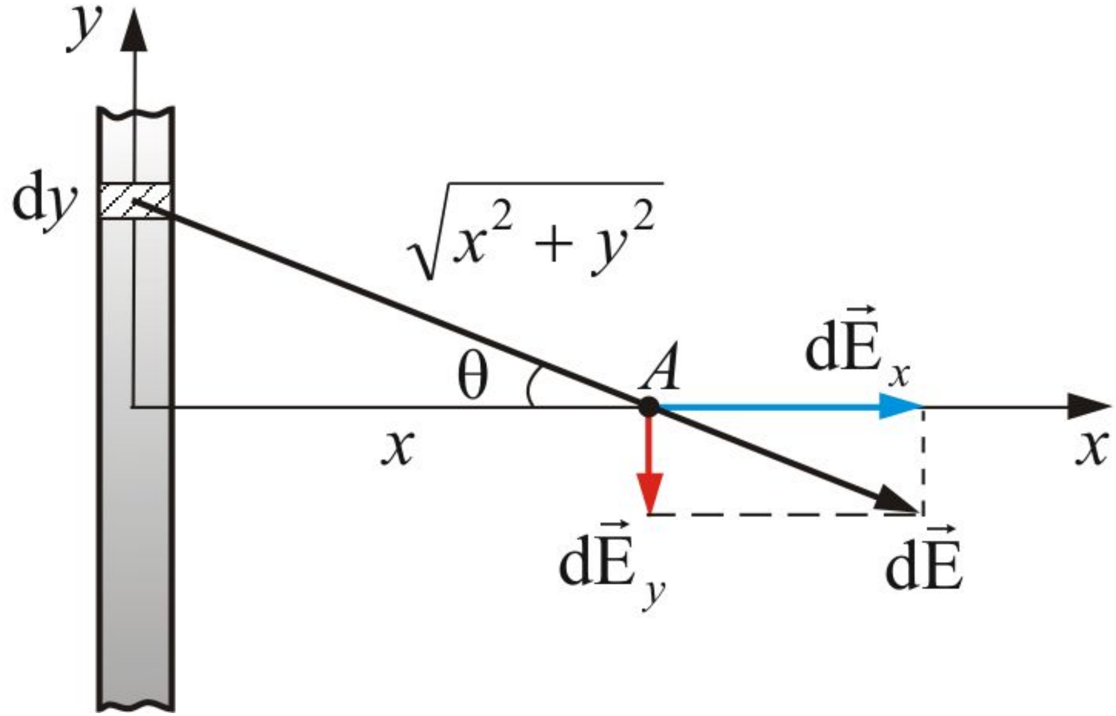
где $\cos\alpha = \dfrac{r^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1r_2}.$

- 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:

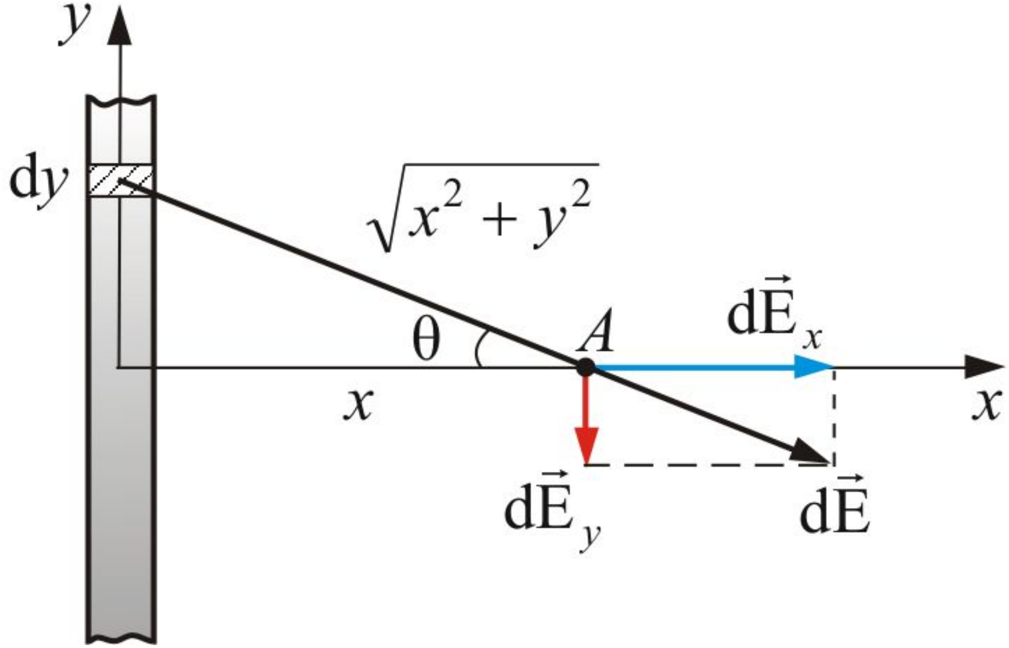
$$\vec{E} = \int d\vec{E},$$

- 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:***
- $\lambda = \mathrm{d}q / \mathrm{d}l$ – линейная плотность заряда, измеряется в Кл/м;
- $\sigma = \mathrm{d}q / \mathrm{d}S$ - поверхностная плотность заряда измеряется в Кл/м^2;
- $\rho = \mathrm{d}q / \mathrm{d}V$ – объемная плотность заряда, измеряется в Кл/м^3.

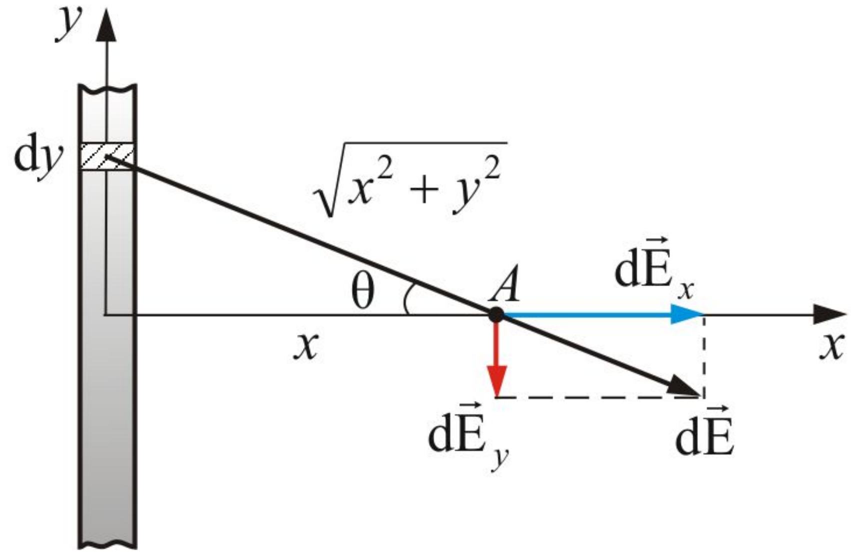


- Определим напряженность электрического поля в точке *A* на расстоянии *x* от бесконечно длинного, линейного, равномерно распределенного заряда.
- λ – заряд, приходящийся на единицу длины.



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

$$\mathrm{d}E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda \mathrm{d}y}{(x^2 + y^2)}.$$



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

$$dE_x = dE\cos\theta; \qquad dE_y = dE\sin\theta.$$

- 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 $E = E_x = \int \mathrm{d}E\cos\theta = \dfrac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\int \dfrac{\cos\theta\,\mathrm{d}y}{x^2 + y^2}$

- Теперь выразим y через θ. Т.к. $y = x\,\mathrm{tg}\theta,$

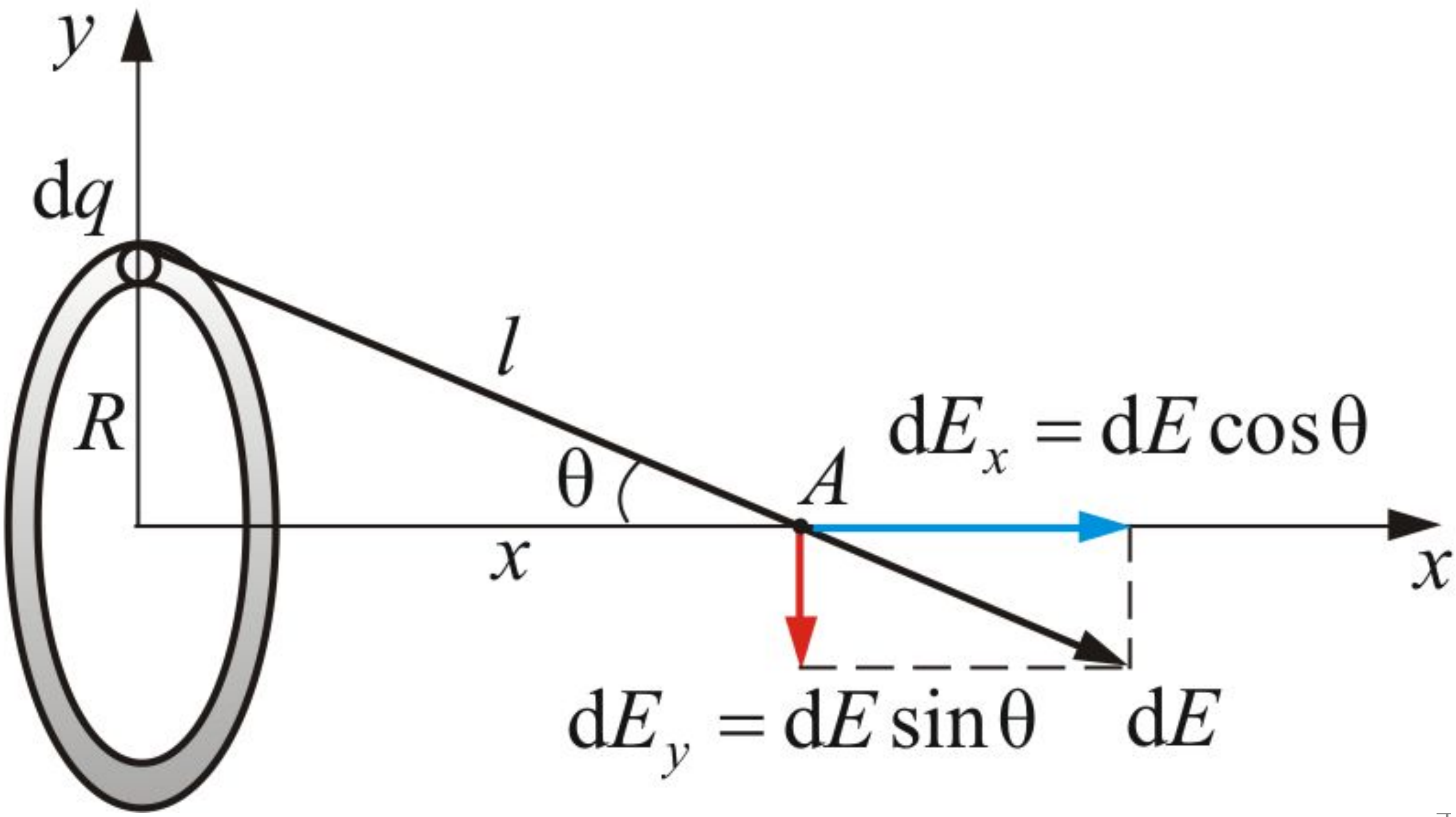
- То $\mathrm{d}y = x\mathrm{d}\theta / \cos^2\theta \qquad (x^2 + y^2) = x^2 / \cos^2\theta$

$$\boxed{E = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{x}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta\,\mathrm{d}\theta = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 x}.}$$

$$\boxed{E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 x}.}$$

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

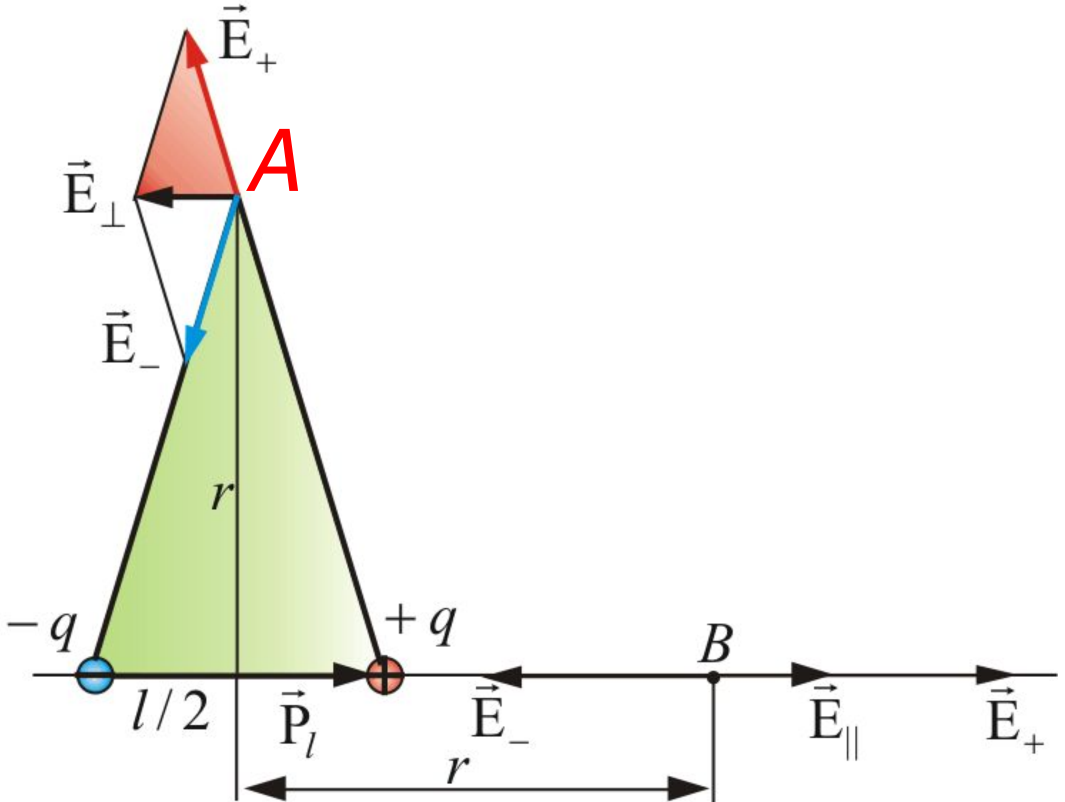
- по тонкому кольцу радиуса *R* равномерно распределен заряд *q*. Определить *E* в точке *A*



Электростатическое поле диполя

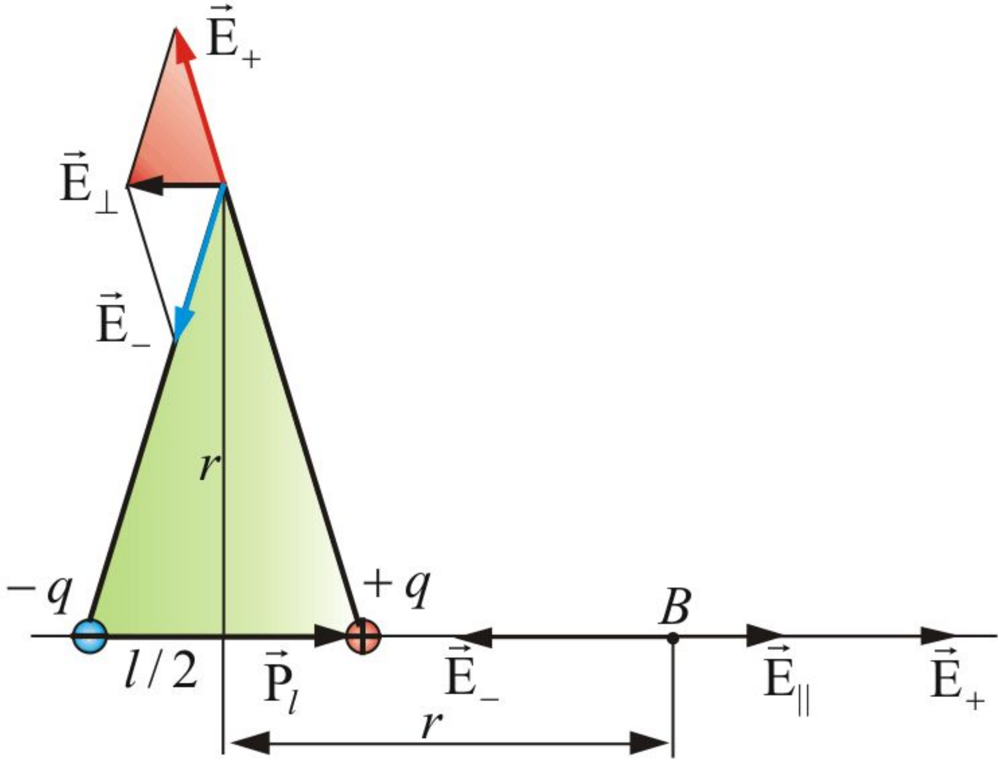
- ***Электрическим диполем* называется система двух одинаковых по величине, но разноименных точечных зарядов, расстояние между которыми значи – тельно меньше расстояния до тех точек, в которых определяется поле системы**

- ***Плечо диполя* – *вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и численно равный расстоянию между зарядами.***



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

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2} \approx \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \quad \text{т.к.} \quad l << r$$



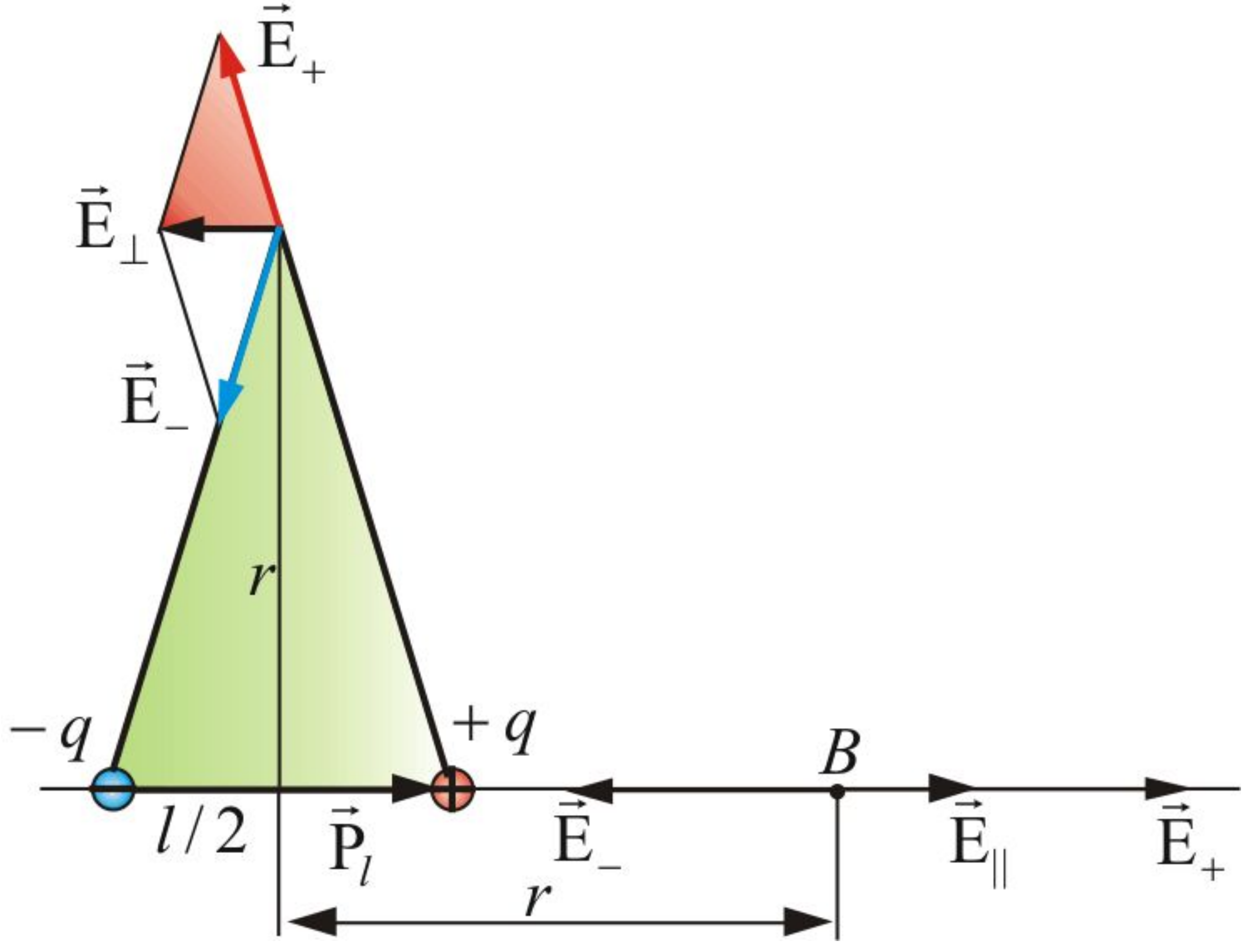
- Из подобия заштрихованных треугольников можно записать:

$$\frac{E_\perp}{E_+} = \frac{l}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{l}{r}$$

отсюда $E_\perp = E_+ \frac{l}{r} = \frac{ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$

- Обозначим вектор: $\vec{P} = q\vec{l}$ – ***электрический момент диполя*** (или *дипольный момент) – произведение положительного заряда диполя на плечо* $\vec{l}$.
- Направление $\vec{P}$ совпадает с направлением $\vec{l}$, т.е. от отрицательного заряда к положительному.
- Тогда, учитывая что $ql = P$, получим:

$$E_{\perp} = \frac{P}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$ или $$\vec{E}_{\perp} = \frac{-\vec{P}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$



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

$$E_\parallel = \frac{2ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \quad \text{или} \quad \vec{E}_\parallel = \frac{2\vec{P}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}.$$

$$\vec{E} = \frac{-\vec{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}.$$

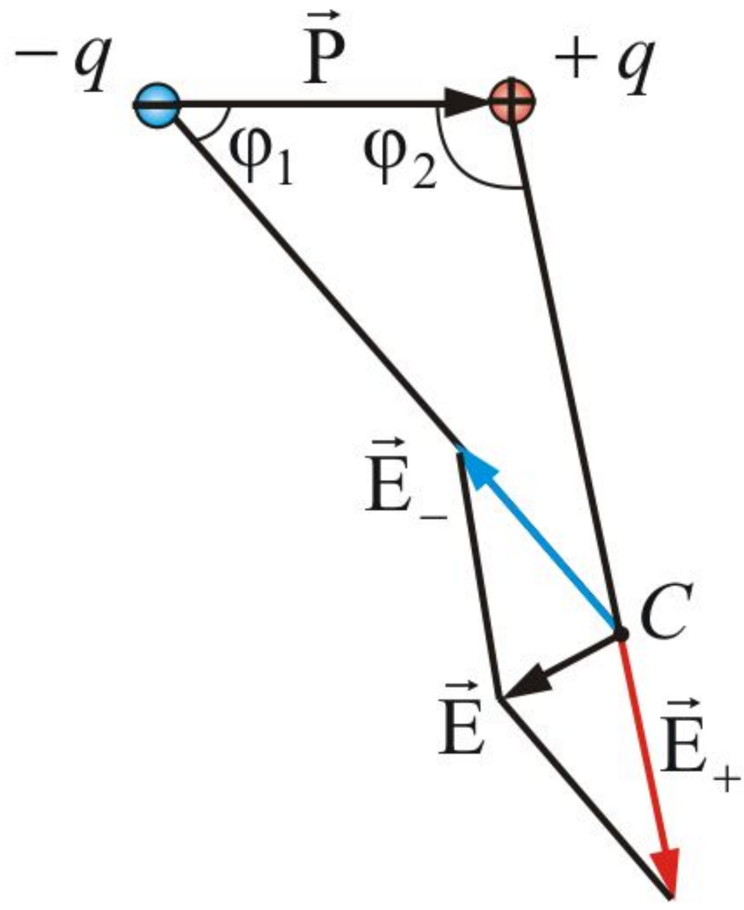
Поле в точках A_1 и A_2 отличается в два раза (по модулю). Направлено в противоположные стороны.

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*

$$\boxed{E = \frac{P}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\sqrt{3\cos^2\varphi + 1},}$$

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



При :

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\pi}{2}, \quad E_1 = \frac{P}{4\pi\varepsilon_0 r^3};$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = 0, \quad E_2 = \frac{2P}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

- 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).