



Электростатика

Кузнецов Сергей Иванович

доцент кафедры

ОФ ЕНМФ ТПУ



**Кузнецов Сергей Иванович
доцент кафедры
общей физики ТПУ**

Ф И З И К А

Часть 2

**Электростатика и
постоянный ток;
Электромагнетизм.**

18 лекций

9 практических занятий

9 лабораторных занятий

2 теоретических коллоквиума

6 индивидуальных заданий

экзамен

Литература

1. Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков
ФИЗИКА, Ч.2. Электричество и магнетизм.
2. И.В. Савельев, КУРС ФИЗИКИ Ч.2;
3. А.А. Детлаф, Б.М.Яворский КУРС
ФИЗИКИ.
- 4.Т.И. Трофимова. Курс физики.
5. Фейнмановские лекции по физике

6. С.И. Кузнецов. Электростатика.
7. С.И. Кузнецов. Электромагнетизм.

О курсе общей физики

ЛИТЕРАТУРА

Ю.И.Тюрин, И.П.Чернов, Ю.Ю.Крючков

Физика

часть 2

Электричество и магнетизм



О курсе общей физики

ЛИТЕРАТУРА

Ю.И.Тюрин, В.В.Ларионов, И.П.Чернов

Физика

СБОРНИК ЗАДАЧ

(с решениями)

часть 2

Электричество и магнетизм



О курсе общей физики

ЛИТЕРАТУРА

В.В. Ларионов, В.И. Веретельник,
Ю.И.Тюрин, И.П.Чернов

Физический практикум

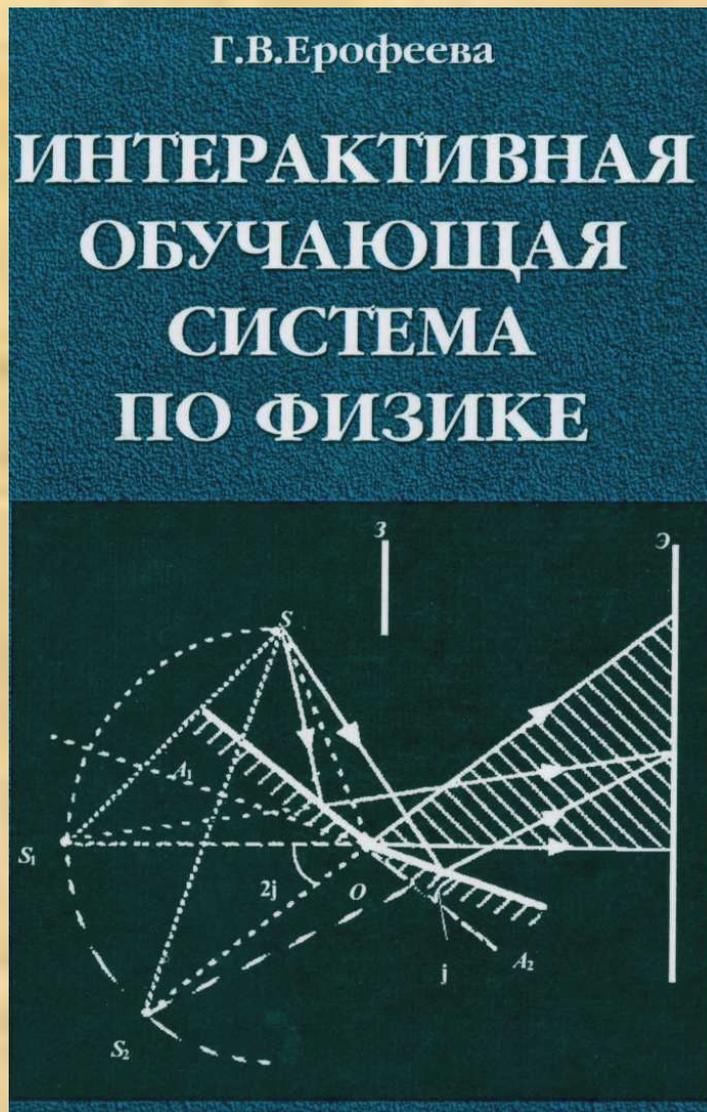
часть 2

Электричество и магнетизм
Колебания и волны



О курсе общей физики

ЛИТЕРАТУРА



О курсе общей физики

РЕЙТИНГ

II семестр

Посещение лекции – 5 баллов; $17 \times 5 = 85$

Посещение практики – 10 баллов; $8 \times 10 = 80$

Выполненная и сданная в срок (на следующем занятии) лабораторная работа - 15 баллов;

$$(6 \times 20) + (1 \times 5) = 125$$

ИДЗ (если сдано в срок), $80 + 80 = 160$

коллоквиум (максимум) – $2 \times 110 = 220$ баллов;

Компьютерная практика $6 \times 30 = 180$

Каждый вопрос экзамена – 50 баллов; $3 \times 50 = 150$

ИТОГО: 1000 баллов

О курсе общей физики

РЕЙТИНГ

«отлично» - **951** балл и выше

«хорошо» - **851 - 950** баллов

«удовлетворительно» - **751 - 850** баллов

Студенты, сдавшие в срок **ИДЗ**,
выполнившие каждую компьютерную
практику на **20** и более баллов и
посетившие все практические занятия -
освобождаются на экзамене от решения
задач !!!

О курсе общей физики

БОНУС

Участие в олимпиаде по физике

Место	Физика – предмет	Физика - профиль
I	100	150
II	75	125
III	50	100
IV -X	25	75
Участие	5	25

О курсе общей физики

БОНУС

- 20** баллов за каждую задачу, если ИДЗ сдано за две недели до назначенного срока. Но за каждую неправильно решенную задачу !!!отнимается 40 баллов !!!
- 15** балла за каждую задачу, если ИДЗ сдано за одну неделю до назначенного срока. Но за каждую неправильно решенную задачу !!!отнимается 30 баллов!!!
- 10** балла за каждую задачу, если ИДЗ сдано в срок. Но за каждую неправильно решенную задачу !!!отнимается 20 баллов!!!
- 5** балла за каждую задачу, если ИДЗ сдано на неделю позже назначенного срока.
- 0** – баллов, если ИДЗ сдано на две и более недели позже назначенного срока, но задание считается сданным.

О курсе общей физики

БОНУС

25 баллов за реферат, написанный студентом на предложенную им самим или преподавателем тему.

За любую полезную для преподавателя работу, связанную с физикой, студент получает баллы по договорённости

Тема 1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

1.1. Электрический заряд. Закон сохранения
заряда

1.2. Взаимодействие электрических зарядов в
вакууме. Закон Кулона

1.3. Электростатическое поле. Напряженность
поля

1.4. Сложение электростатических полей.
Принцип суперпозиции

1.5. Электростатическое поле диполя

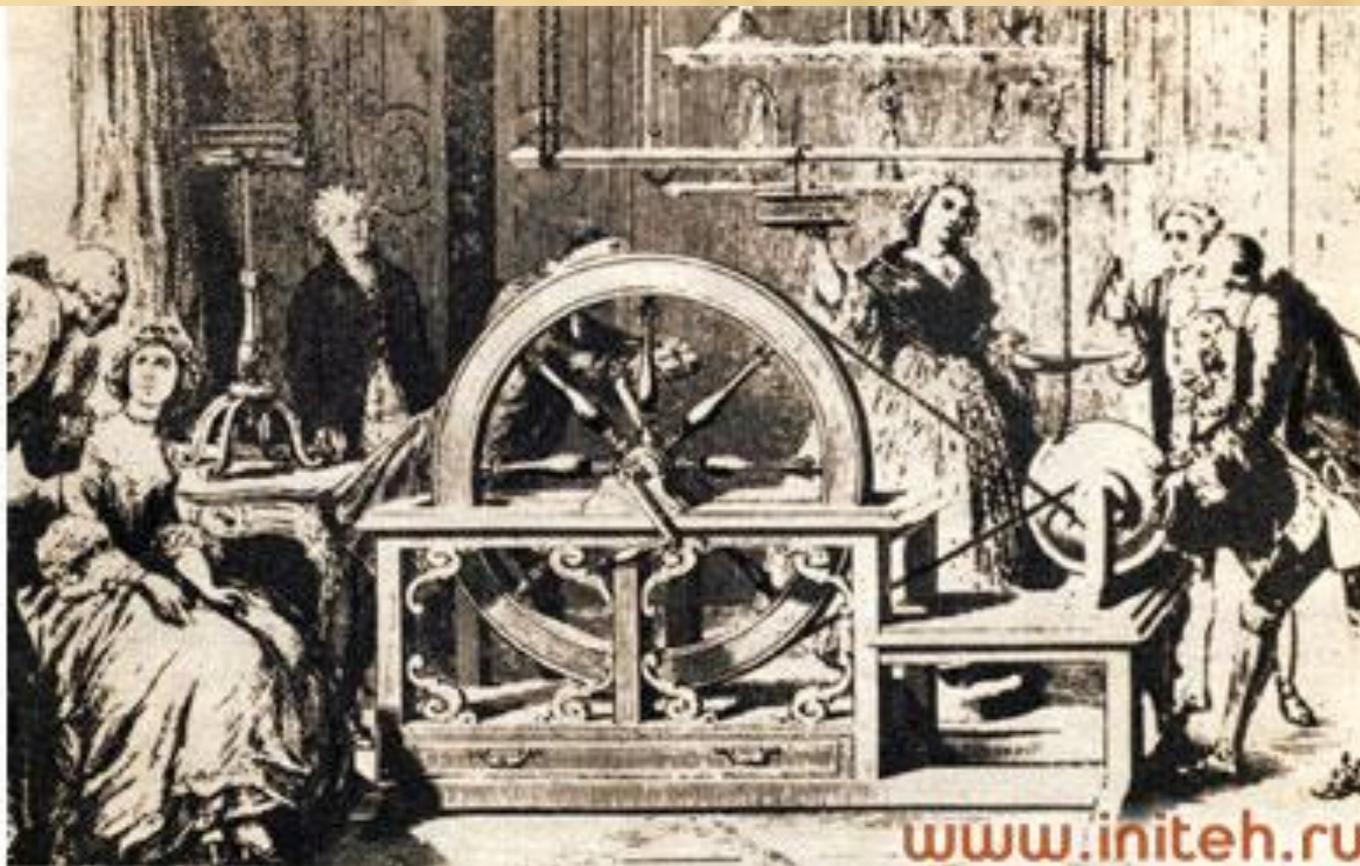
1.6. Взаимодействие диполей



Бенджамин Франклин
Benjamin Franklin
1706 - 1790

Первыми известными человеку проявлениями "животного электричества" были разряды электрических рыб. Электрического сома изображали еще на древнеегипетских гробницах, а "электротерапию" с помощью этих рыб рекомендовал Гален (130-200 годы нашей эры), проходивший врачебную практику на гладиаторских боях в Древнем Риме.

В 1746-54 гг. Франклин объяснил действие лейденской банки, построил первый плоский конденсатор, состоящий из двух параллельных металлических пластин, разделенных стеклянной прослойкой, изобрел в 1750 г. молниеотвод, доказал в 1753 г. электрическую природу молнии (опыт с воздушным змеем) и тождественность земного и атмосферного электричества. В 1750 г. он разработал теорию электрических явлений – так называемую "унитарную теорию", согласно которой электричество представляет особую тонкую жидкость, пронизывающую все тела.



Важное место в истории науки об электричестве принадлежит немецкому бургомистру Герике, весившему триста фунтов. Он изобрел электрическую машину: круг из серы, вращающийся на оси. Экспериментатор подносил руку к вращающемуся кругу, и таким образом машина получала электрический заряд.

Первые опыты по передаче электричества на расстояние

Благодаря работам Грея (Англия, 1701-1770 гг.), опыты по передаче электричества на расстояние вышли за пределы помещения. Для электризации использовались стеклянные трубки. Для передачи электрических зарядов – бечевки, а позднее - шелковые шнуры. Сообщение телам "электрической силы" Грей проверял с помощью пушинки, которая могла притягиваться к телу.

Для обнаружения малого заряда Грей пользовался длинным куском тонкой нити, подвешенным к концу палки.

31 мая 1729 г. Грей, стоя на балконе, передал электричество вверх по шесту длиной 5,5 м. В успешно проведенных в **1729 г. опытах длина линии (веревки) доходила до 233 м, а в **1730** г. - до 270 м. Линии держались на 15 отрезках шелковых шнурков, натянутых в горизонтальной плоскости между деревянными стойками.**

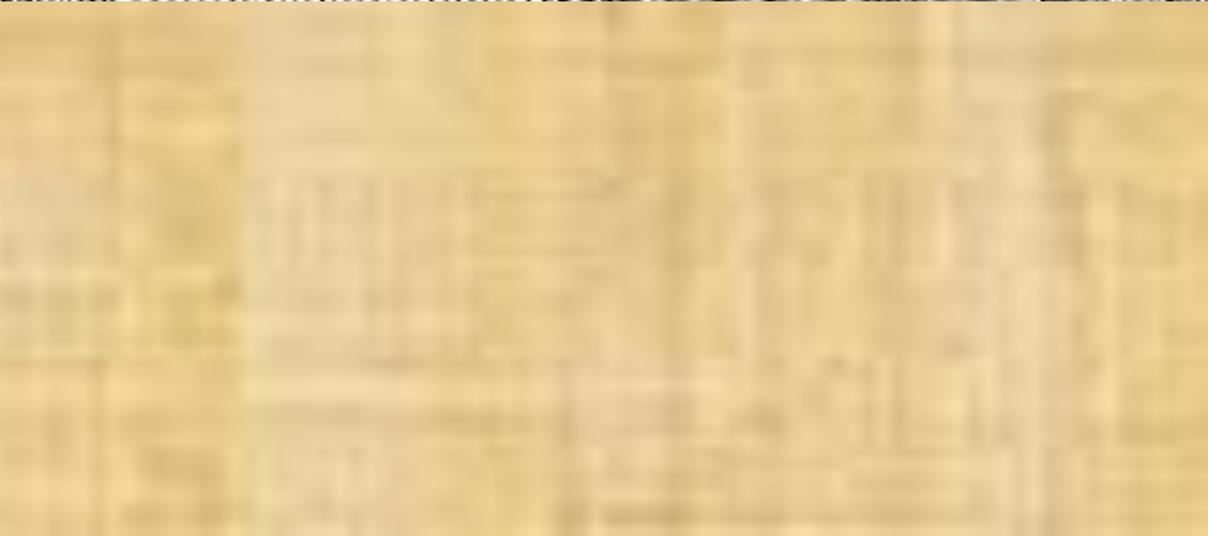
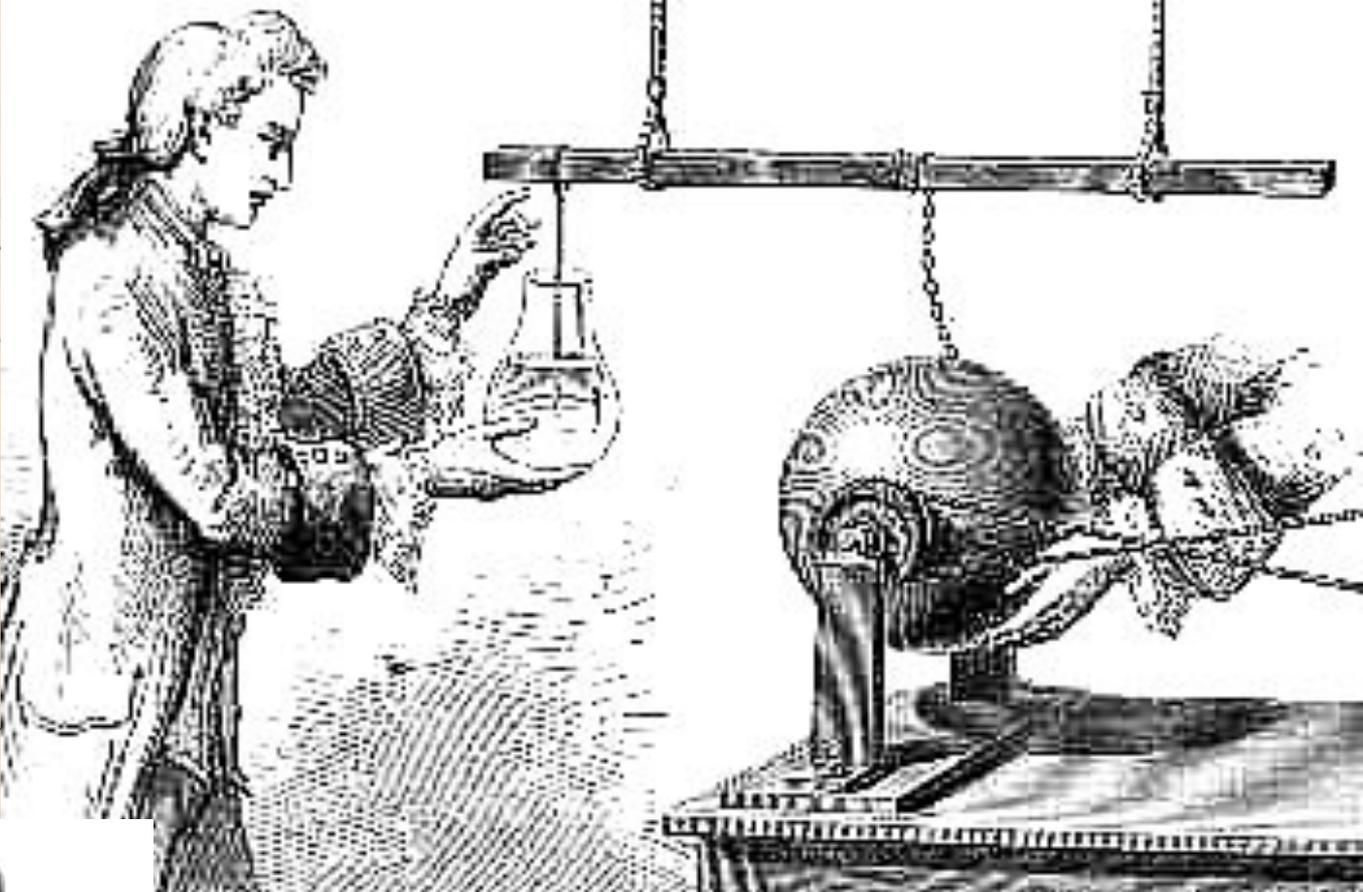
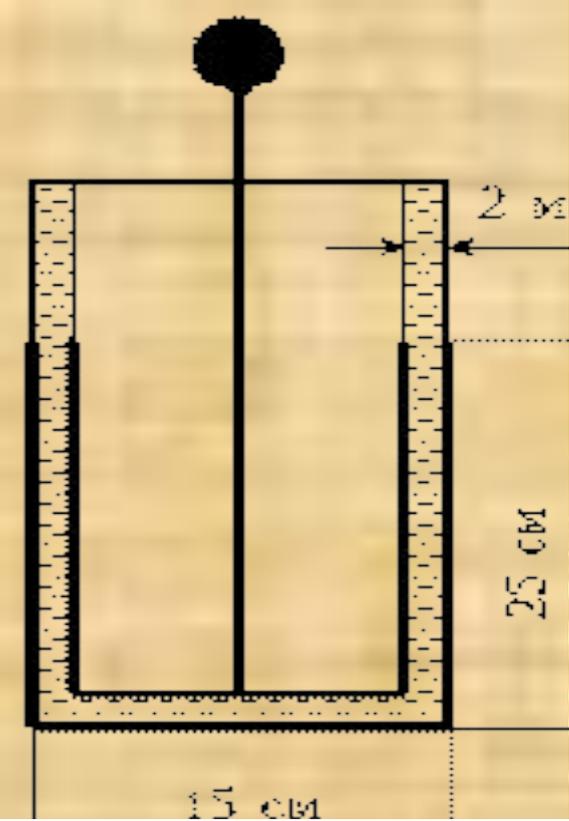
«Мушенброкова машина», или лейденская банка

Лейденская банка была изобретена в 1745 г. независимо голландским профессором Питером Ван Мушенброком (1692-1761 гг.) и немецким прелатом Эвальдом Георгом фон Клейстом. Диэлектриком в этом конденсаторе служило стекло сосуда, а обкладками - вода в сосуде и ладонь экспериментатора, которая держала сосуд. Выводом внутренней обкладки служил металлический проводник, пропущенный в сосуд и погруженный в воду. В 1746 г. появились различные модификации лейденской банки. Лейденская банка позволяла накапливать и хранить сравнительно большие заряды, порядка микрокулона.

«Зная, что стекло не проводит электричества, Мушенброк взял стеклянную банку (колбу), наполненную водой, опустил в нее медную проволоку, висевшую на кондукторе электрической машины и, взяв банку в правую руку, попросил своего помощника вращать шар машины. При этом он правильно предположил, что заряды, поступавшие с кондуктора, будут накапливаться в стеклянной банке. После того, как, по его мнению, в банке накопилось достаточное количество зарядов, он решил левой рукой отсоединить медную проволоку. При этом он ощутил сильный удар, ему показалось, что пришел конец. В письме к Реомюру в Париж (1746 г.) он писал, что этот "новый и страшный опыт советую самим никак не повторять" и что "ради короны Франции" он не согласится подвергнуться "столь ужасному сотрясению"»

Изобретение лейденской банки ознаменовалось ее разрядом через тело экспериментатора. Вскоре стали проводить опыты с разрядом лейденской банки через цепочку людей, взявшихся за руки.

Иногда соседние люди соединялись через металлические стержни. В Версале под Парижем в присутствии короля аббат Нолле демонстрировал электрический удар одновременно 240 человек, взявшихся за руки. О своих опытах Нолле доложил Парижской академии наук весной 1746 г.





**Лейденская банка
из Королевского
шотландского
музея в Эдинбурге**

- *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 : $q = n \times e$.

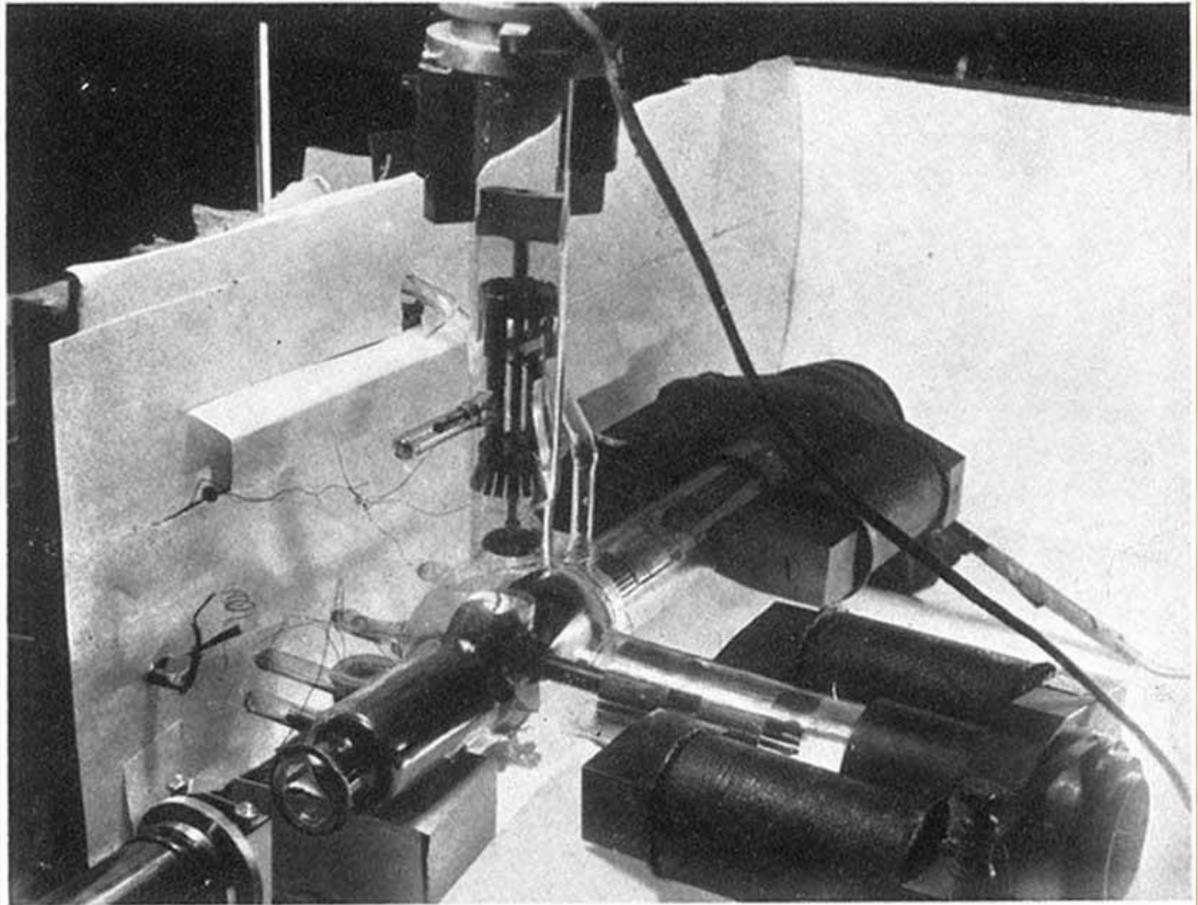
$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

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.



1868 г. - 1953 г.



Фотография установки Р. Милликена (1916г.)

Самые красивые физические эксперименты в истории человечества:

№9. Эксперимент американского физика, лауреата Нобелевской премии Роберта Милликена, благодаря которому был измерен заряд электрона.

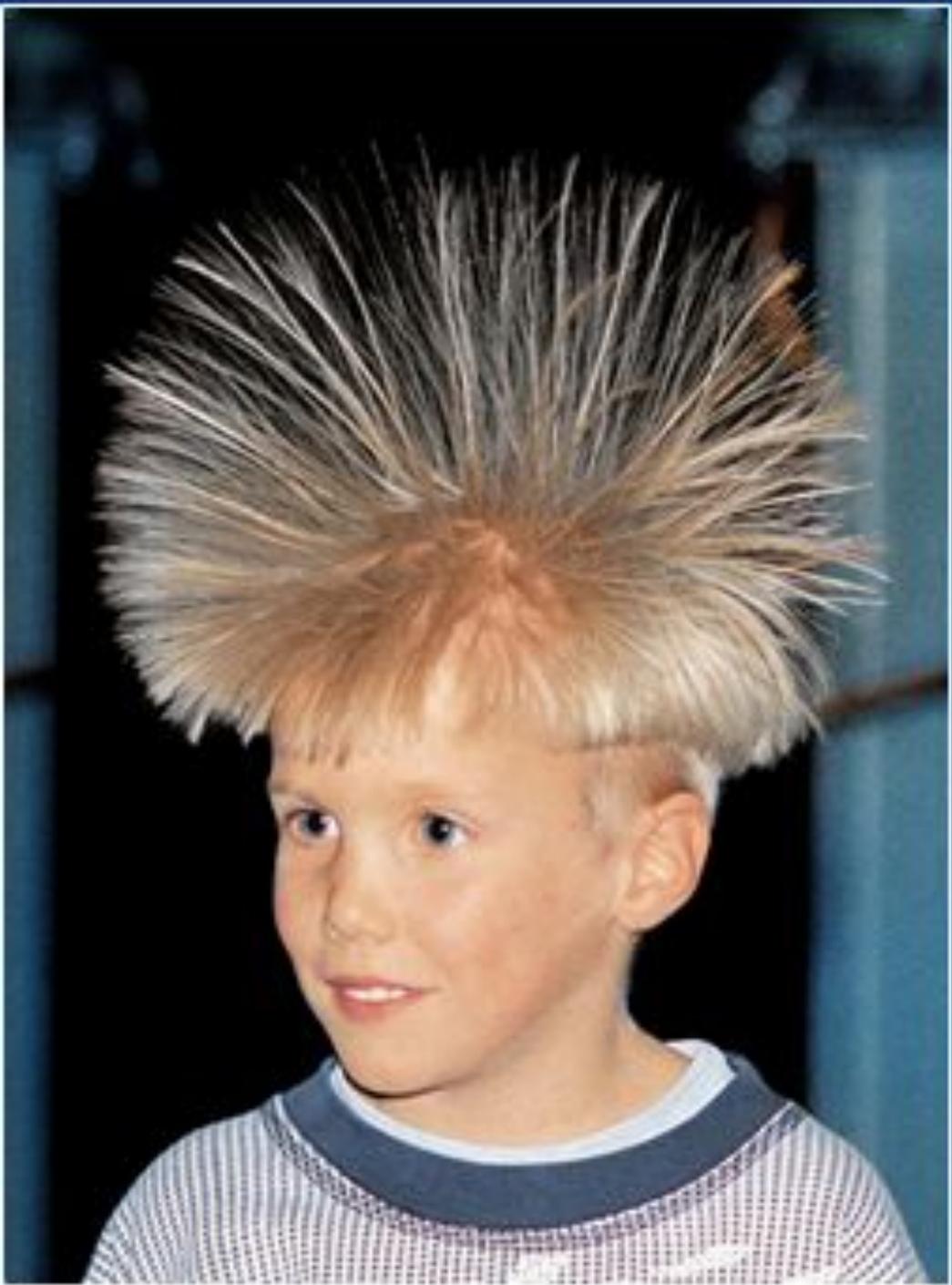
Английский физик Уилсон попытался определить величину заряда электрона, исследуя влияние электрического поля на заряженное облако паров эфира. Но его вычисления были неточными, поскольку Уилсону не удалось придумать метод, который позволил бы провести все измерения на отдельной капельке.

Милликен усовершенствовал экспериментальную установку Уилсона. При включенном поле между пластинами капелька медленно двигалась вверх под действием электрического притяжения. При выключенном поле она опускалась под действием гравитации. Включая и выключая поле, М. мог изучать каждую из взвешенных между пластинами капелек в течение 45 секунд, после чего они испарялись.

К 1909 г. М. удалось определить, что заряд любой капельки всегда был целым кратным фундаментальной величине. Это было убедительным доказательством того, что электроны представляли собой фундаментальные частицы с одинаковыми зарядом и массой.

Заменив капельки воды каплями практически нелетучего масла, он получил возможность увеличить продолжительность наблюдений до 4,5 часа.

В 1913 г., исключив один за другим возможные источники погрешностей, М. опубликовал свое первое окончательное значение заряда электрона. Полученное значение продержалось более 70 лет.



Частным случаем электродинамики является **электростатика**, представляющая собой **учение о взаимодействии электрических зарядов.**

Основу электростатики составляют:

- **закон сохранения заряда;**
- **закон Кулона;**
- **принцип суперпозиции полей.**

1.1. Электрический заряд

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:

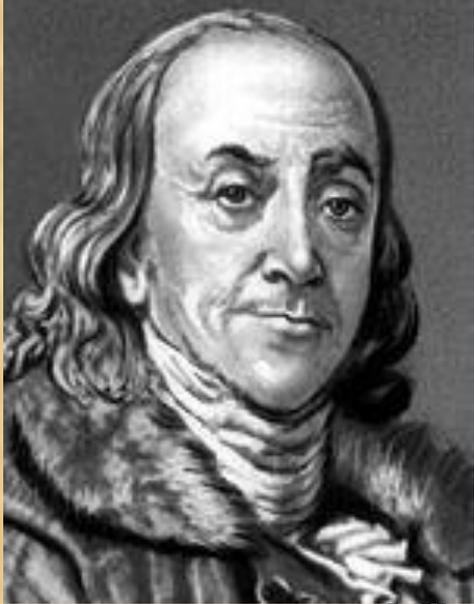
заряды подобные тем, которые возникают на *стекле, потертом о шелк* –

положительные

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

- Назвал их так

Бенджамин Франклин в 1746 г.

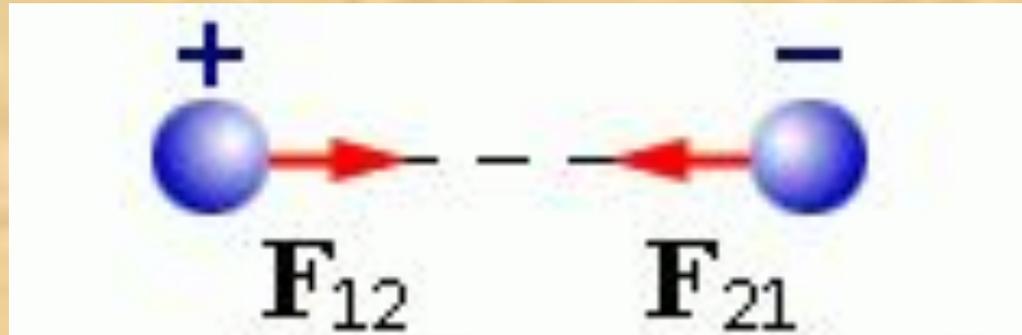


Франклин Бенджамин (1706 – 1790)

американский физик, политический и общественный деятель.

Основные работы в области электричества. Объяснил действие Лейденской банки, построил первый плоский конденсатор. Изобрел молниеотвод, доказал электрическую природу молнии и тождественность земного и атмосферного электричества. Разработал теорию электрических явлений – так называемую «унитарную теорию». Работы относятся также к теплопроводности тел, к распространению звука в воде и воздухе и т.п. Является автором ряда технических изобретений.

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.

- Отсюда следует **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 всегда равна нулю.**

Закон сохранения заряда

- *суммарный электрический заряд замкнутой системы не изменяется.*

- *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** :

$$q = \pm ne$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

где n – целое число.

- **Электрон** и **протон** являются соответственно носителями элементарных отрицательного и положительного зарядов.

- Например, наша Земля имеет отрицательный заряд
- $6 * 10^5$ Кл

это установлено по измерению напряженности электростатического поля в атмосфере Земли.

- Большой вклад в исследование явлений электростатики внес знаменитый французский ученый
- **Ш. Кулон.**
- В 1785 г. он экспериментально установил закон взаимодействия *неподвижных точечных* электрических зарядов.



- **Кулон Шарль Огюстен**

(1736 – 1806) – французский физик и военный инженер.

Работы относятся к электричеству, магнетизму, прикладной механике. Сформулировал законы трения, качения и скольжения. Установил законы упругого кручения. Исходя из этого в 1784 г. Кулон построил прибор для измерения силы – крутильные весы и с помощью их открыл основной закон электростатики – закон взаимодействия электрических зарядов на расстоянии, названный в последствии его именем.

1.2. Взаимодействие электрических зарядов в вакууме.

- **Точечным зарядом** (q) называется заряженное тело, размеры которого пренебрежительно малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которым оно взаимодействует.

Закон Кулона

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

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

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

- здесь k_0 – 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

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

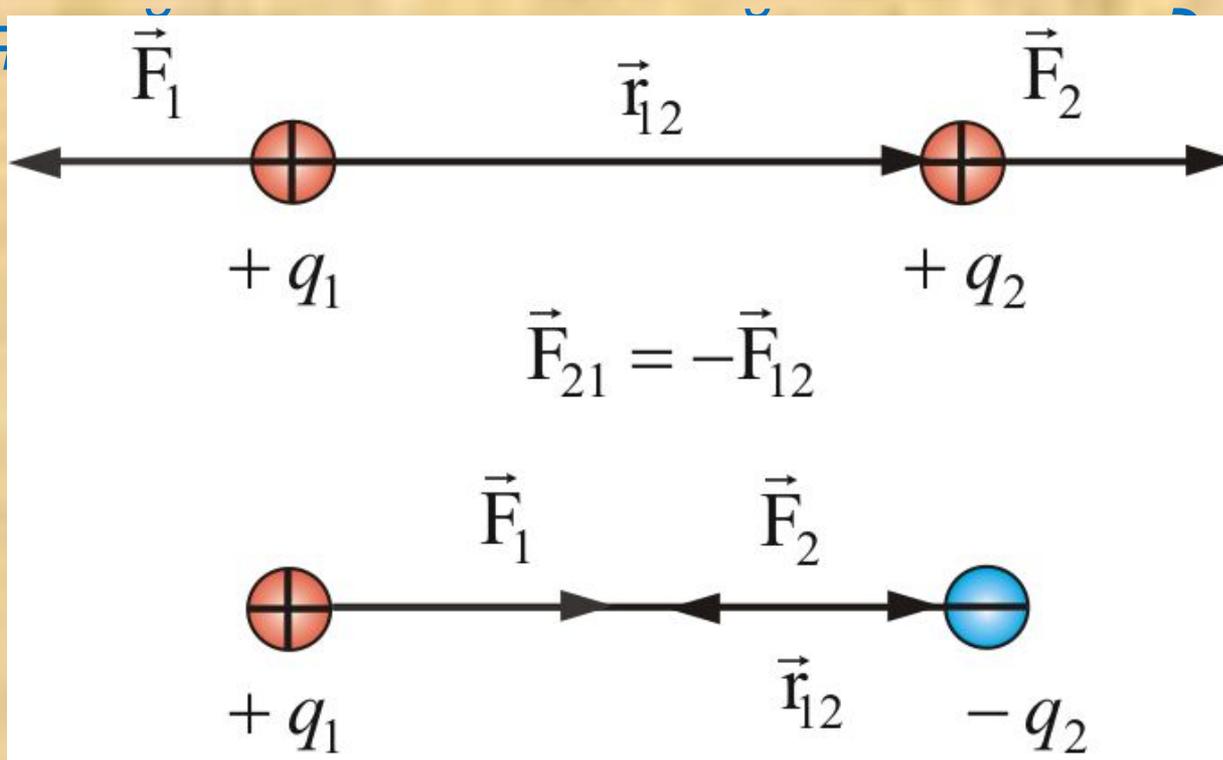
- Элементарный заряд в СИ: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.
- Отсюда следует, что $1 \text{ Кл} = 6,25 \cdot 10^{18} e$.
- Поскольку элементарный заряд мал, мы как бы не замечаем его дискретности (заряду 1 мкКл соответствует $\sim 10^{13}$ электронов).

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

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

- 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



- Если заряды не точечные, то в такой форме закон Кулона не годится – нужно разбить заряженное тело на элементарные заряды 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.

Закон Кулона в основных чертах подобен закону всемирного тяготения Ньютона, в соответствии с которым все тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению их масс, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними и направленной вдоль прямой, соединяющей эти тела.

При всей внешней схожести формулировок этих законов между ними имеются серьезные различия.

Качественное различие

заключаются в том, что заряженные тела притягиваются или отталкиваются — в зависимости от знаков их зарядов, тогда как между массами существует только гравитационное притяжение.

Однако более существенным обстоятельством является количественный аспект, а именно: сила электростатического отталкивания двух электронов превышает силу их гравитационного притяжения в миллионы миллиардов миллиардов миллиардов раз.

- Сила кулоновского притяжения между электроном и протоном в атоме водорода в 10^{39} раз больше их гравитационного взаимодействия.

1.3. Электростатическое поле в вакууме.

Напряженность электростатического поля

- Почему заряды взаимодействуют?
- Имелет место борьба двух теорий:
- *теория дальнегодействия* – Ньютон, Ампер
- *теория ближнегодействия* – 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 характеристика 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:

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

1.4. 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} – **результатирующая напряженность** поля в точке, где расположен пробный заряд, так же **подчиняется принципу суперпозиции:**

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

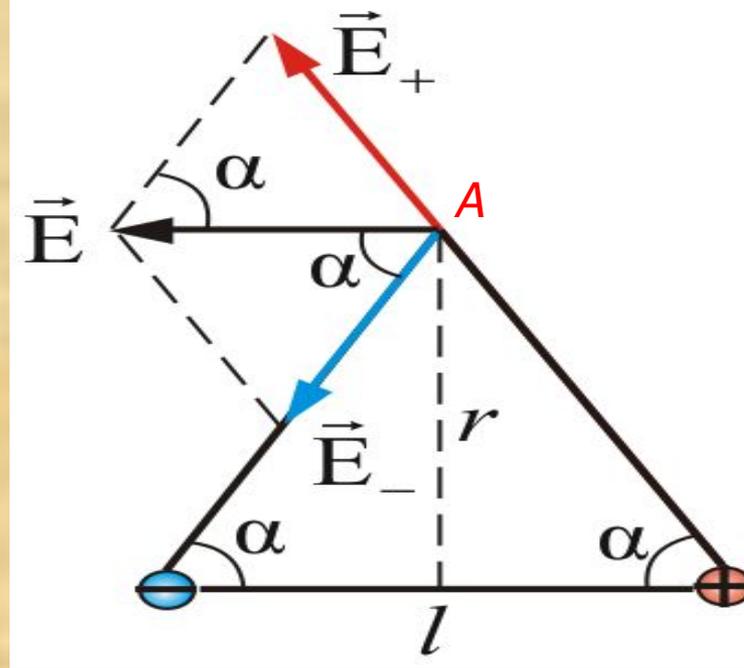
- Это соотношение выражает **принцип наложения или суперпозиции электрических полей** и представляет важное свойство электрического поля.

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.**

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

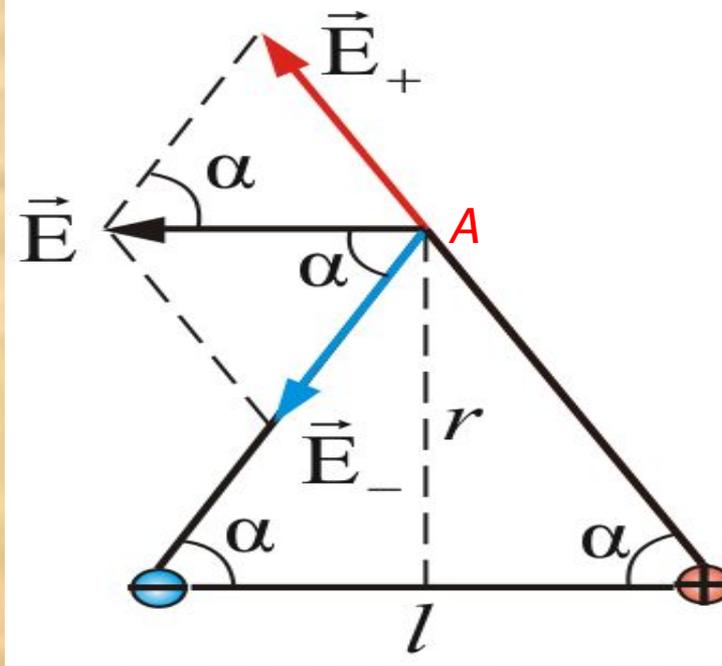
Пример 1



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

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

задача симметрична



- В данном случае:

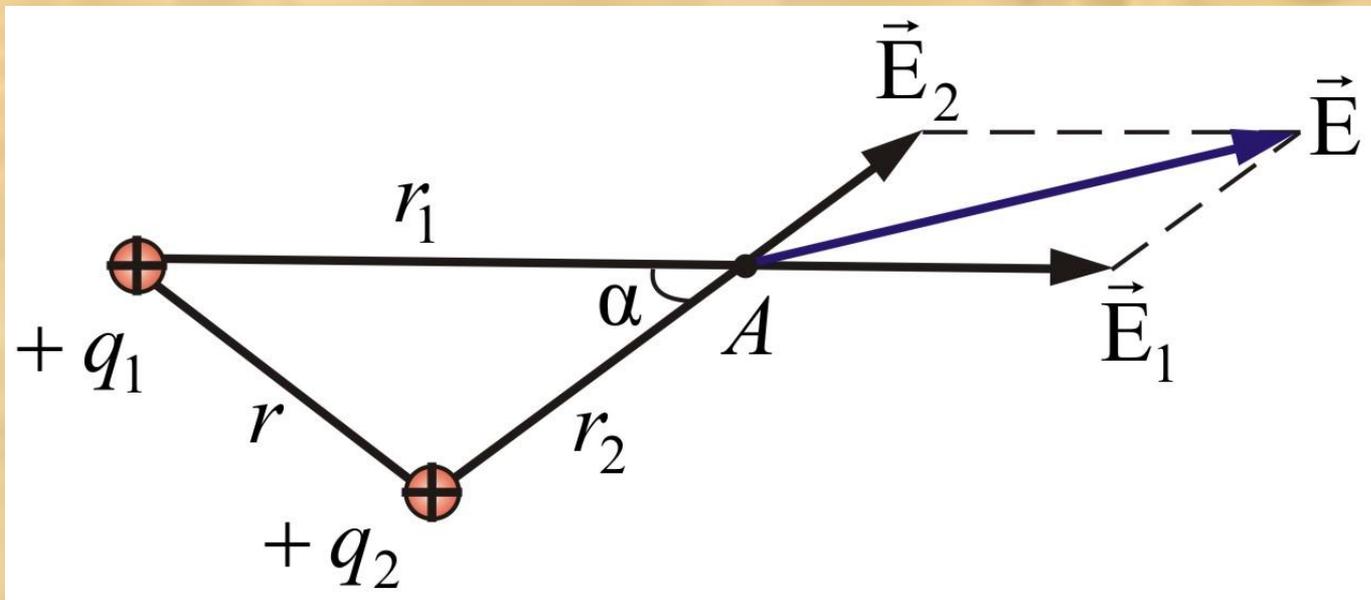
$$E_- = E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)}$$

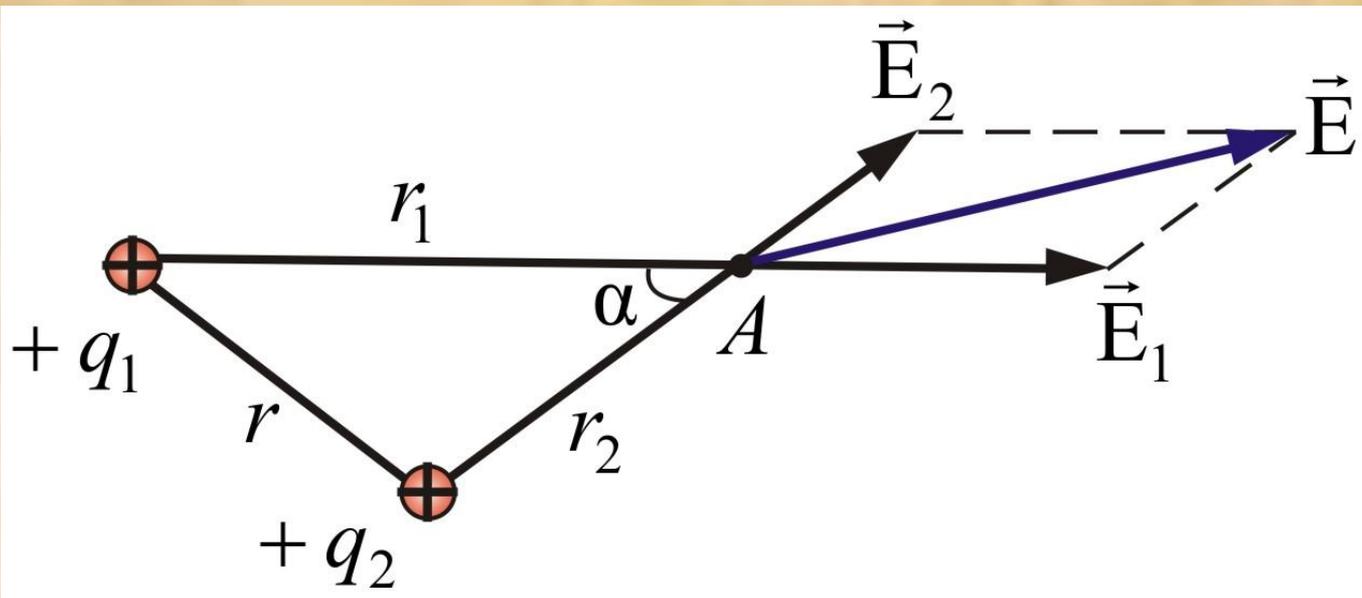
$$\cos \alpha = \frac{l}{2\sqrt{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)}}$$

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:

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

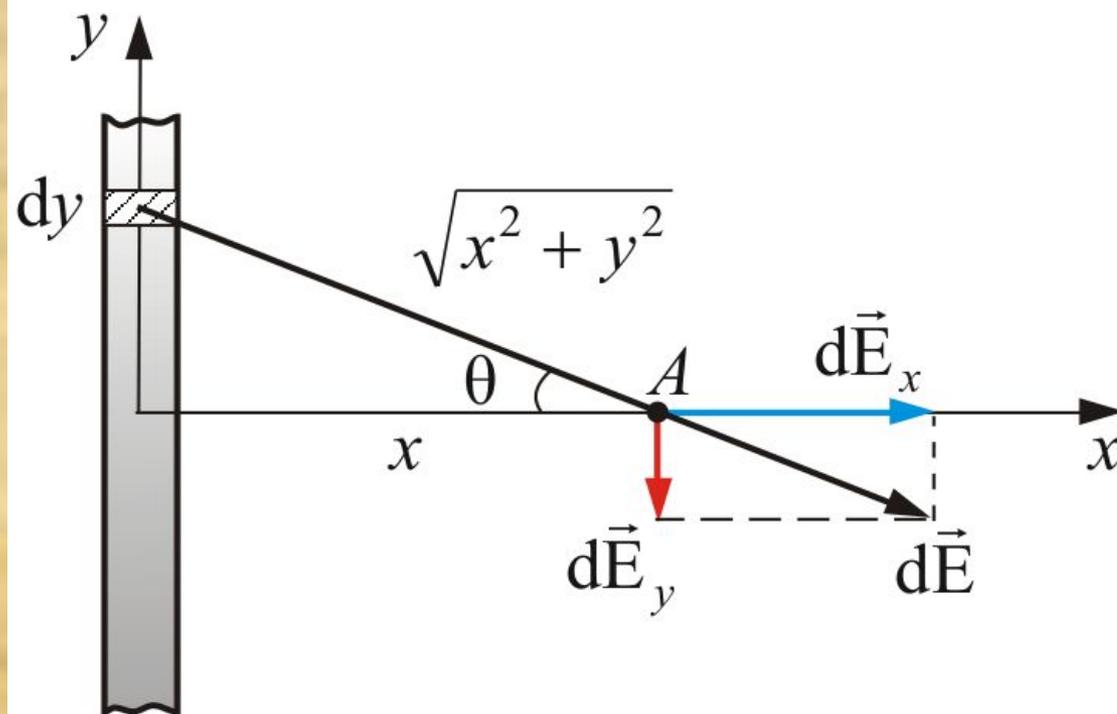
где $\cos\alpha = \frac{r^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}$.

- 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:

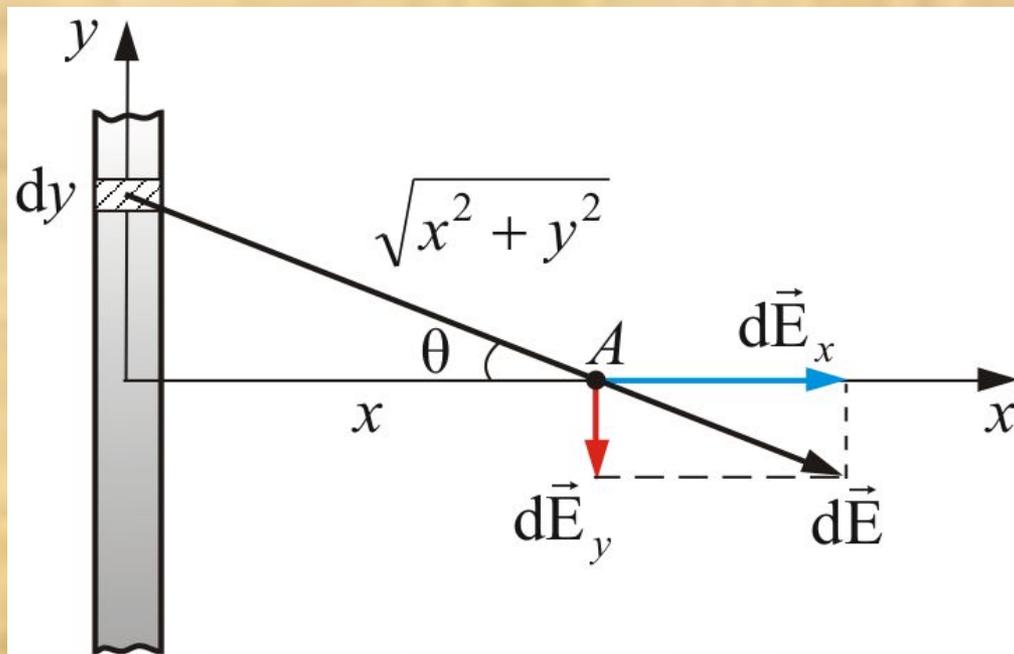
$$\vec{E} = \int d\vec{E},$$

- 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.

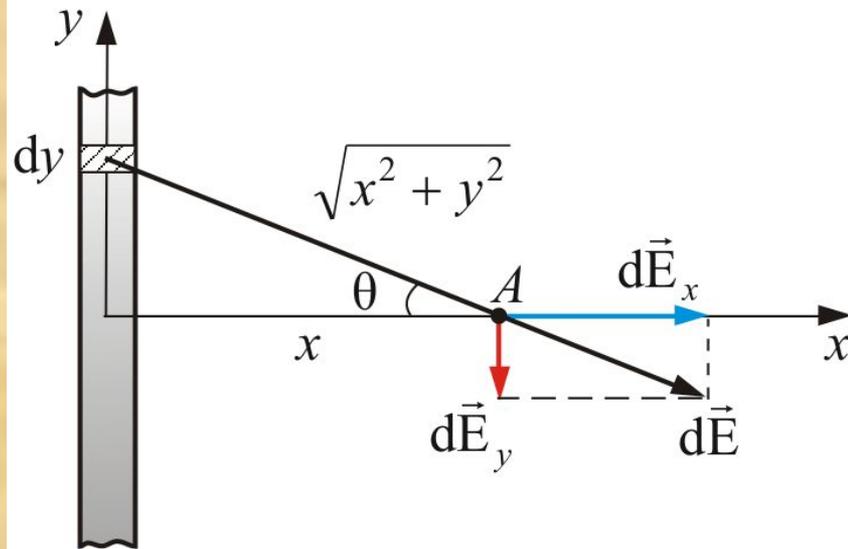


- Определим напряженность электрического поля в точке A на расстоянии x от бесконечно длинного, линейного, равномерно распределенного заряда.
- λ – заряд, приходящийся на единицу длины.



- 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 (скомпенсирруется), 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 $dy = x d\theta / \cos^2 \theta$ $(x^2 + y^2) = x^2 / \cos^2 \theta$

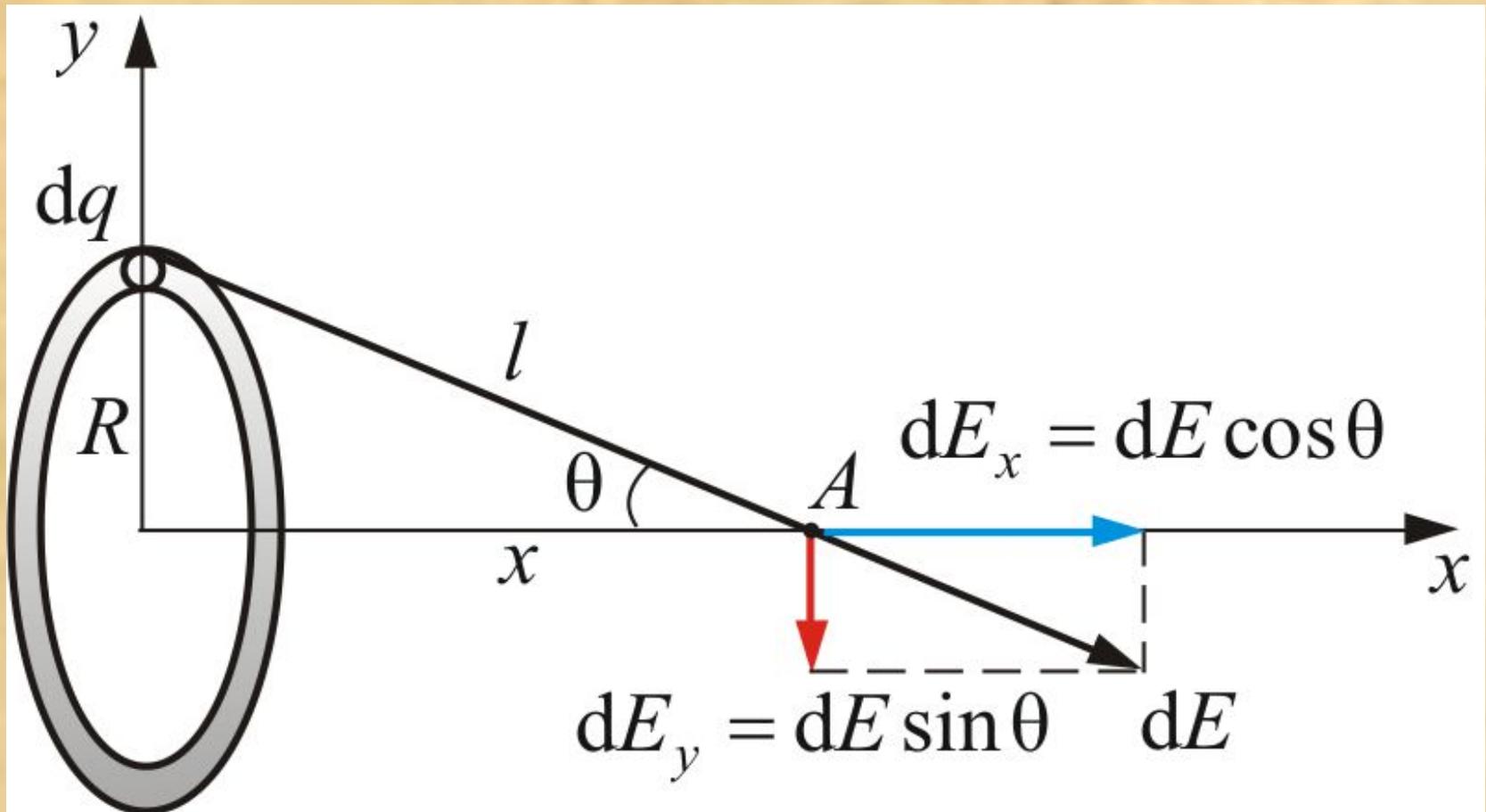
$$E = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{x} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 x}.$$

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

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

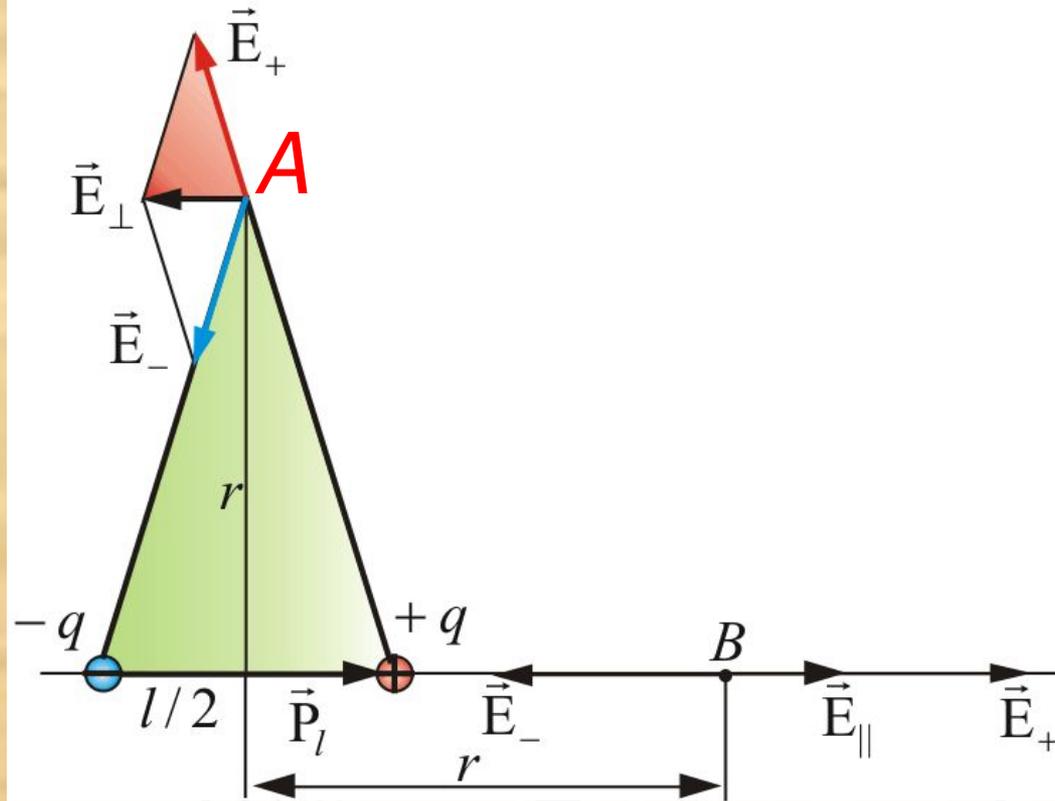
- **Разобрать самостоятельно! :**

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



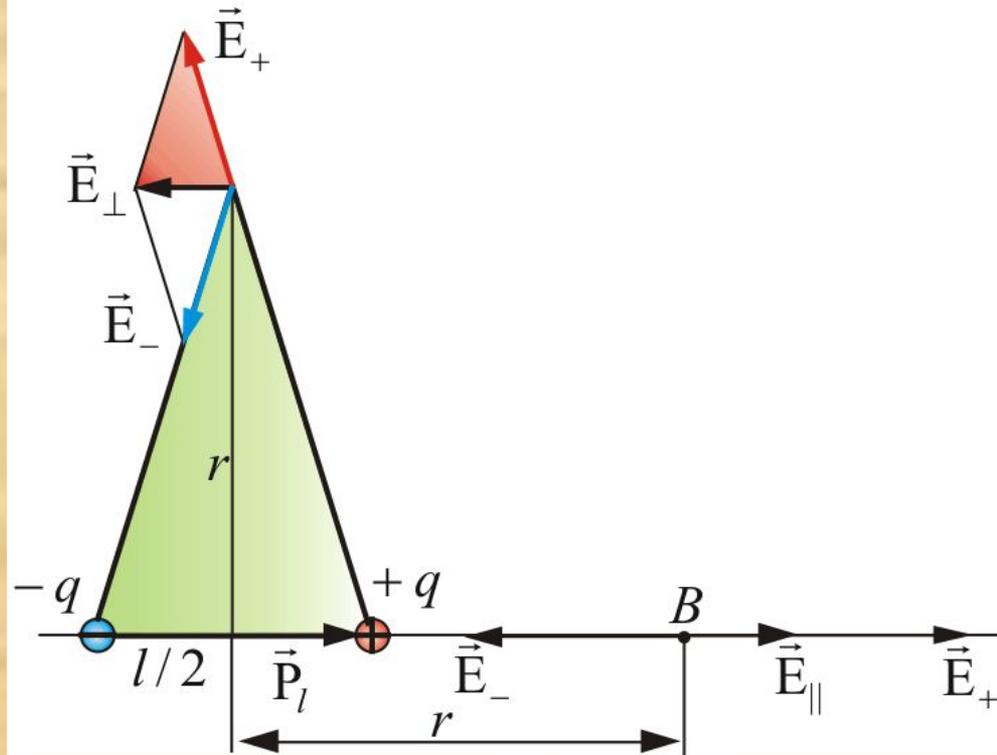
1.5. Электростатическое поле диполя

- **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:

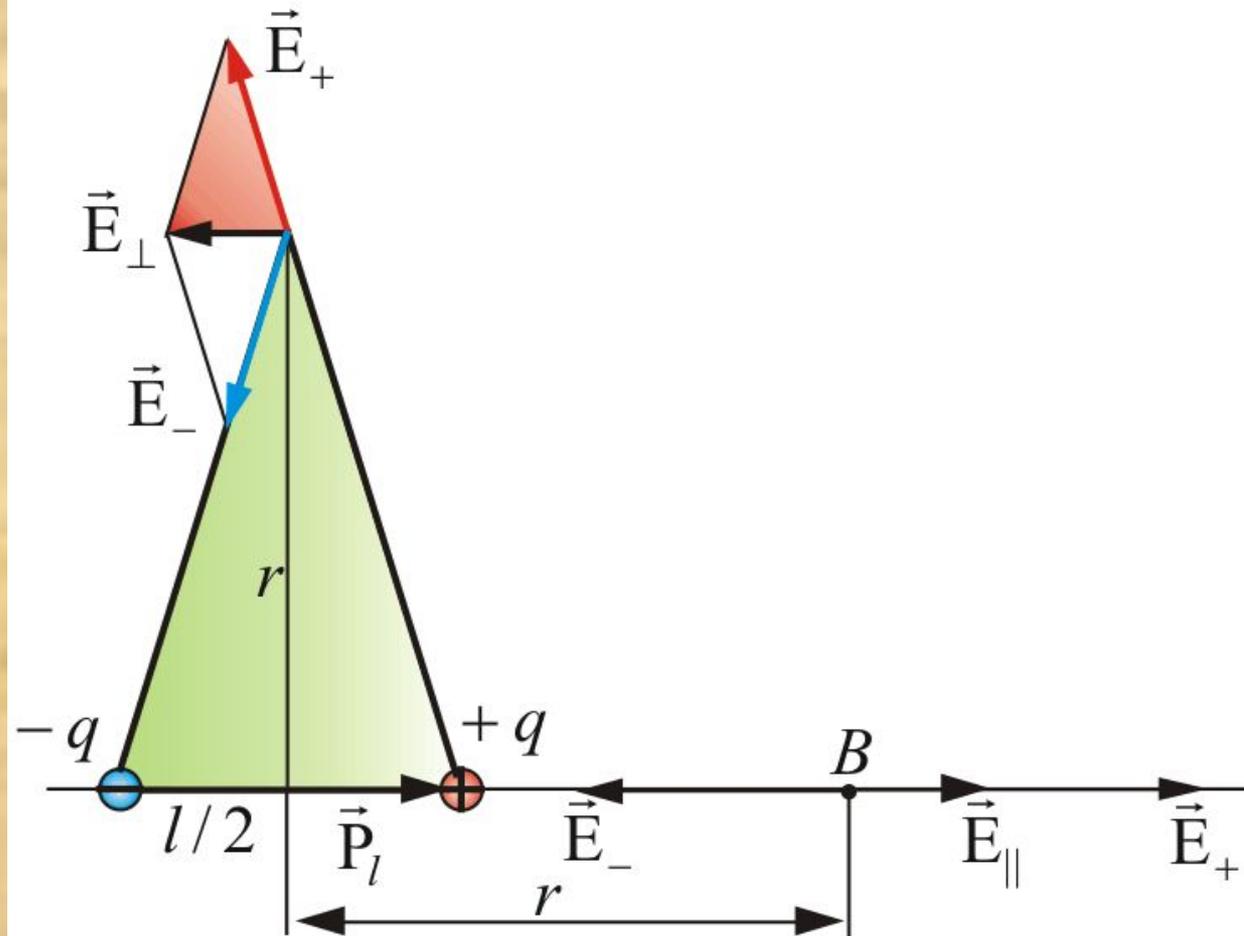
$$\frac{E_\perp}{E_+} = \frac{l}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{l}{r} \quad \text{отсюда} \quad E_\perp = E_+ \frac{l}{r} = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

- 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 $\vec{E}_{\perp} = \frac{\vec{P}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$, 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 :

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

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

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

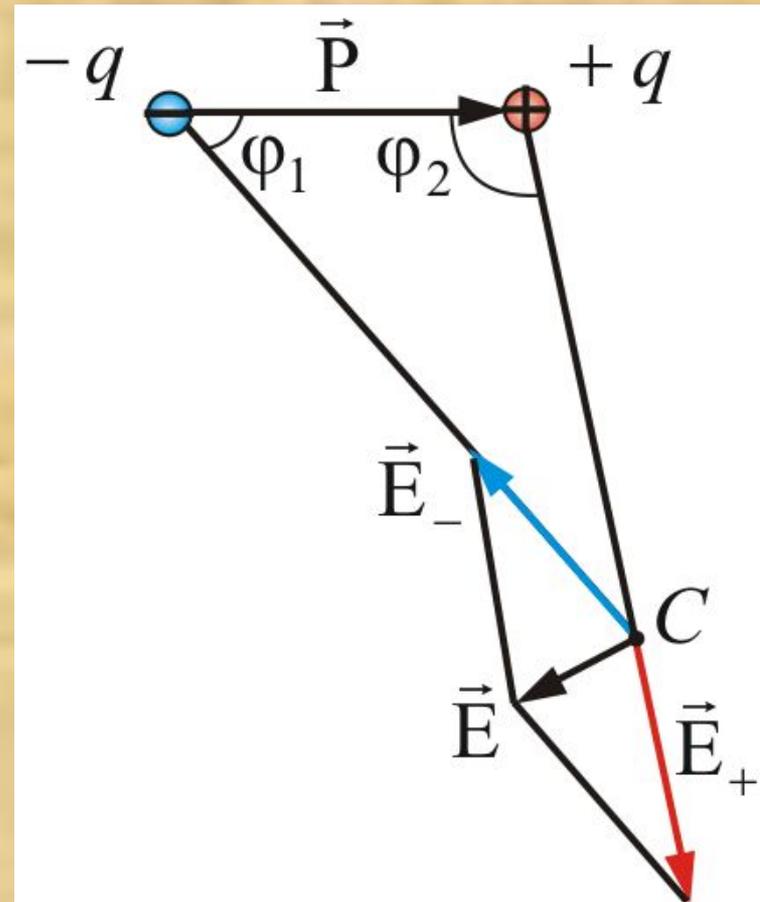
$$E = \frac{P}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{3 \cos^2 \varphi + 1},$$

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 image displays the electric field lines of a dipole. The field lines are represented by numerous thin, yellowish-gold lines that originate from a central point and curve outwards, forming a characteristic dipole pattern. The lines are more densely packed near the center and become more spread out as they move away. The background is a dark, textured brown color. In the lower-left quadrant, there is a bullet point followed by the text "Электрическое поле диполя." in a black, sans-serif font.
- 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).

