# Электростатика-3

Закон Кулона

Напряженность поля

Теорема Остроградского - Гаусса

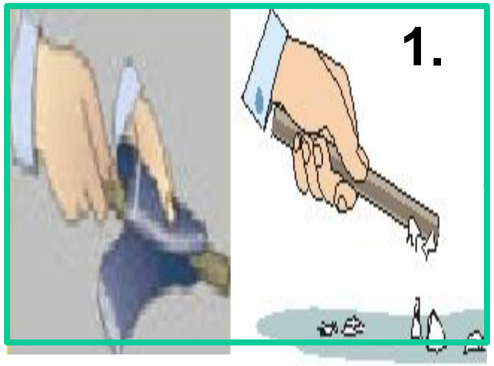
# Электростатика

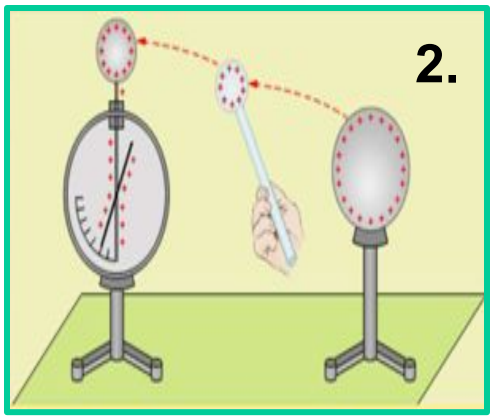


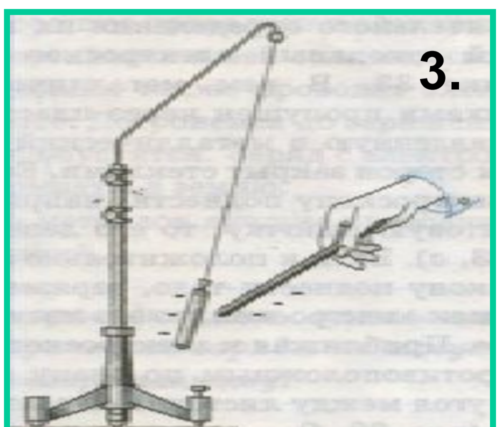
**Электростатика -** **раздел физики, в котором изучаются взаимодействия и свойства систем электрических зарядов, <u>неподвижных</u> относительно выбранной инерциальной системы отсчета**



# Основное понятие электростатики – электрический заряд




**Макроскопические тела электрически нейтральны**

**При определенных условиях макротела можно наэлектризовать, сообщив им заряд:**

1. Электризация трением
2. Электризация соприкосновением
3. Электризация излучением

**В природе имеются микрообъекты, обладающие и массой и зарядом – микрочастицы**

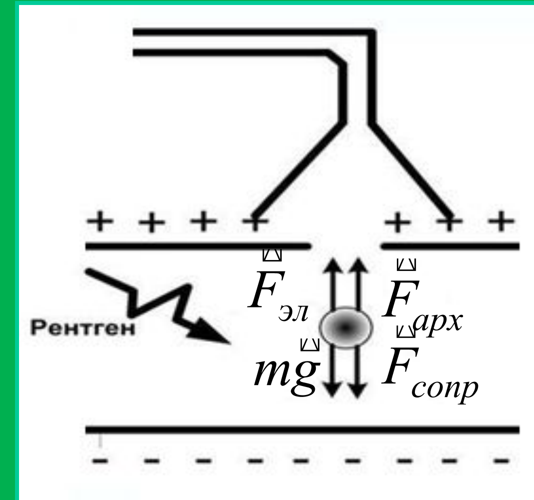
**Заряд - особое свойство материи**

**Процесс взаимодействия между наэлектризованными макрообъектами или между заряженными микрочастицами называется электромагнитным взаимодействием**

**Р. Милликен**
**(1868-1953)**

**В 1913г. измерил элементарный заряд**

**1923г.**




# Свойства электрического заряда

# Наличие у объектов электрического заряда – особое свойство материи

**Электрический заряд — это скалярная физическая величина, определяющая способность тел быть источником электромагнитных полей и принимать участие в электромагнитном взаимодействии**

**Единица измерения заряда в СИ — 1Кулон**

**Заряд 1Кулон – это электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника**

**при силе тока *1А* за время *1с:***

## *СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА*

**Заряд любого тела дискретен**

**Существует элементарный заряд**

**Заряд бывает двух типов:**

**отрицательный (носитель электрон)** ,

**положительный (носитель протон)** .

**Заряд не зависит от скорости движения объекта – *релятивистски инвариантен***

**Закон сохранения зарядов: В замкнутой системе взаимодействующих тел алгебраическая сумма электрических зарядов остается постоянной при любых взаимодействиях в системе :**

**Заряженные тела взаимодействуют между собой:**
**одноименные заряды отталкиваются**
**разноименные - притягиваются**

Ш.О. Кулон
(1736-1806)

# Закон Кулона (1785 г)

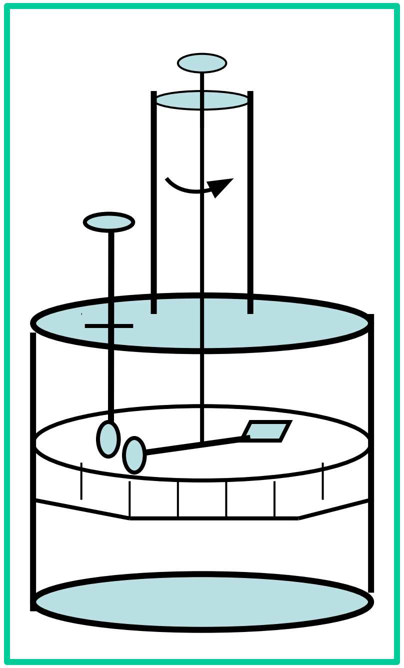


Схема
крутильных весов

## Закон Кулона:

**Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна произведению модулей зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль прямой, соединяющей центры этих зарядов**

**Сила взаимодействия зависит от свойств среды: свойства среды характеризуются относительной диэлектрической проницаемостью**

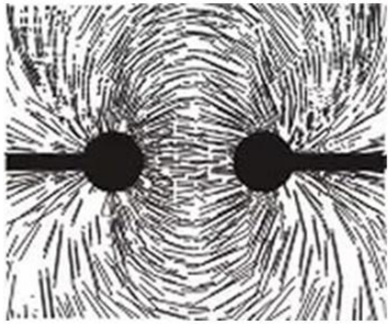
**Заряженные тела взаимодействуют, находясь на расстоянии друг от друга**

**Вокруг заряженных тел возникает электростатическое поле**

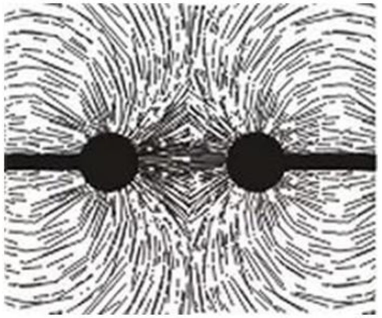
# Электрическое поле

## Вокруг неподвижных заряженных тел возникает электростатическое поле

**Поле – особая форма существования материи, обнаружить поле можно только с помощью специальных приборов**



**Поле разноименных зарядов**



**Поле одноименных заряда**

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ

**Поле *действует с определенной силой* на заряженные объекты, помещенные в поле**

**Силовая характеристика поля – напряженность поля –** $\vec{E} = \dfrac{\vec{F}}{q_0}$

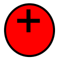
**Поле *изменяет энергию* заряженных объектов, помещенных в поле**

**Энергетическая характеристика – потенципал поля –** $\pm\varphi = \dfrac{\pm\Pi}{+q_0}$

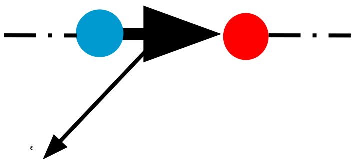
**Между характеристиками электростатического поля существует связь:**

# Модели заряженных тел

## Точечные заряды:



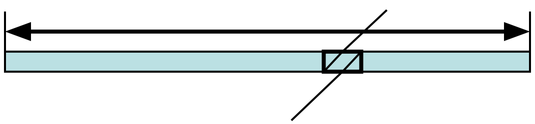

**точечный заряд** – тело, размерами которого можно пренебречь;



**диполь** – система двух равных разноименных точечных зарядов, создающих поле на расстоянии много большем, чем плечо диполя

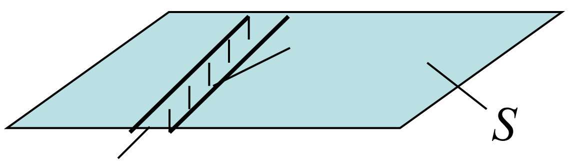
***МОМЕНТ ДИПОЛЯ:***

## Распределенный заряды;



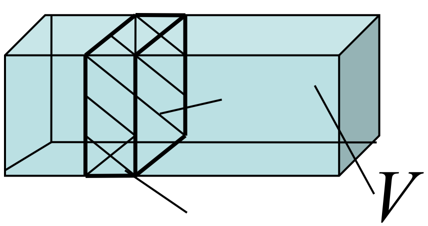
**Заряженная нить:**

***ЛИНЕЙНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДА:***




**Заряженная плоскость:**

***ПОВЕРХНОСТНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДА:***

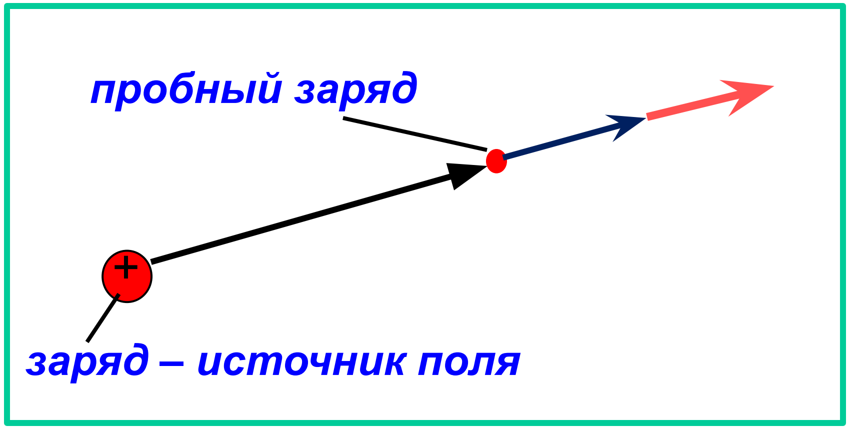



**Заряженное тело:**

***ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДА:***

# Напряженность электрического поля

**Электрическое поле , созданное неподвижными зарядами –**
**электростатическое поле**




**Напряженность электрического поля** равна силе, действующей на единичный точечный заряд, помещенный в точку исследования, и совпадает с этой силой по направлению

**Напряженность поля – векторная величина**

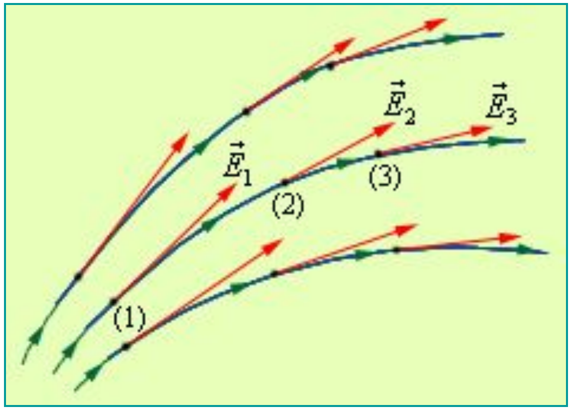
**Напряженность поля – силовая характеристика поля**

**Напряженность определяет силу, действующую со стороны электрического**

**поля на заряды, помещенные в поле:**

**Напряженность поля точечного заряда:**

**Линии напряженности электростатического поля (силовые линии)** – это линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с вектором напряженности поля в той же точке

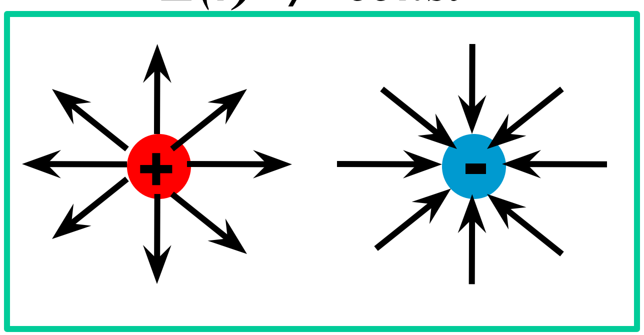



Направление силовых линий совпадает с направлением вектора напряженности

Густота силовых линий определяет величину напряженности в данной области

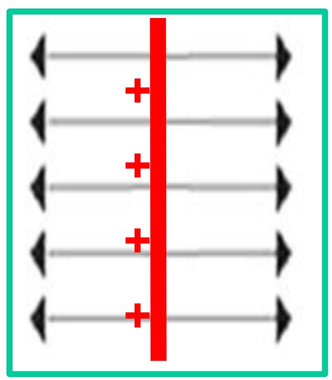
## Графическое изображение электростатических полей

$E(r) \neq const$



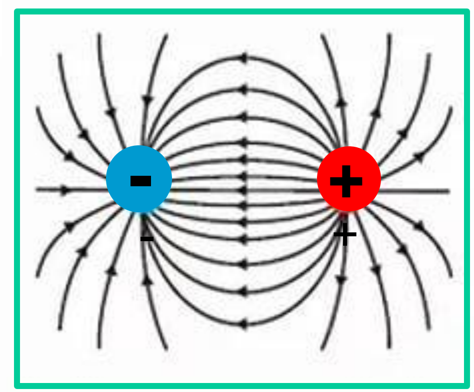
Поле точечного заряда
Неоднородное поле

$E(r) = const$



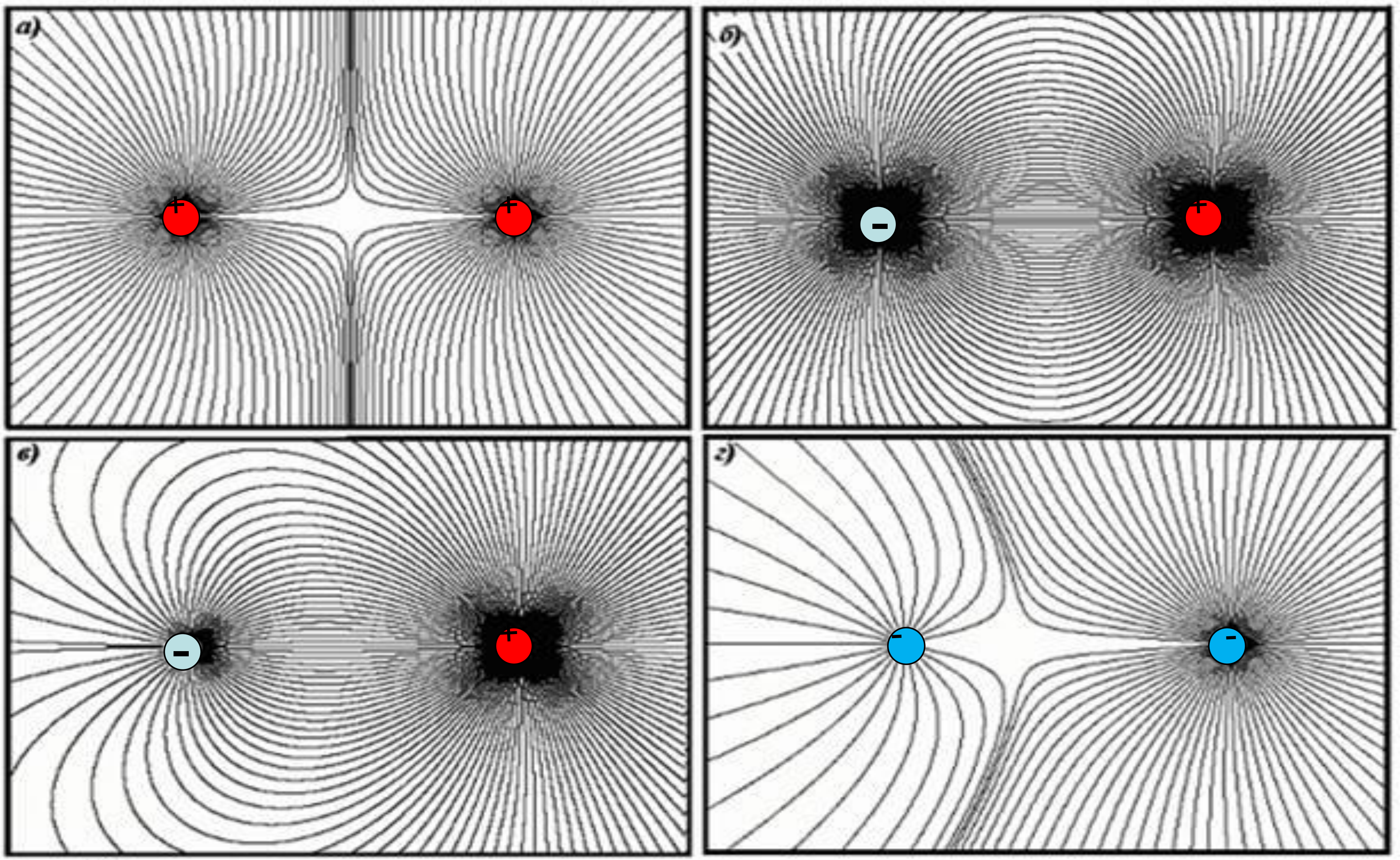
Поле пластины
Однородное поле

$E(r) \neq const$



Поле системы зарядов
Неоднородное поле

# Картина силовых линий электростатического поля



# Напряженность поля системы зарядов
# Принцип суперпозиции полей

## При определении напряженности поля системы зарядов используется принцип суперпозиции полей

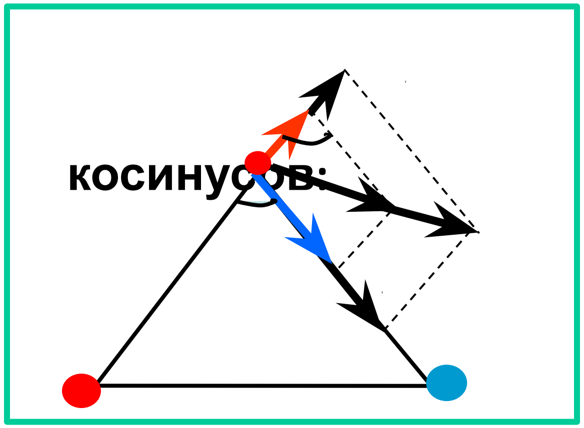
**Результирующая сила, действующая на заряд, из принципа суперпозиции**

**По определению напряженности**

**Для напряженностей справедлив принцип суперпозиции полей:**

**<u>Расчет напряженности для системы точечных зарядов:</u>**

**Из построения сил, действующих состороны зарядов** $q_1$ и $q_2$, **на заряд** $q_0$ **следует:**



**Численное значение определяется по теореме косинусов:**

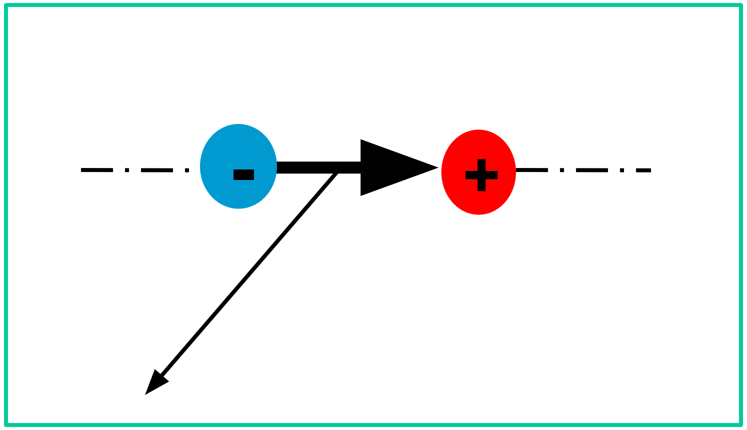
**<u>Расчет напряженности для системы распределенных зарядов:</u>**

**Используют принцип суперпозиции полей с учетом формы и размеров заряженных тел:**

$$E = \int dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int \frac{dq}{\varepsilon r^2}$$

# Электрический диполь

**Электрический диполь** – это система из двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов, расстояние между которыми во много раз меньше расстояний до точек наблюдения



– момент диполя, дипольный момент

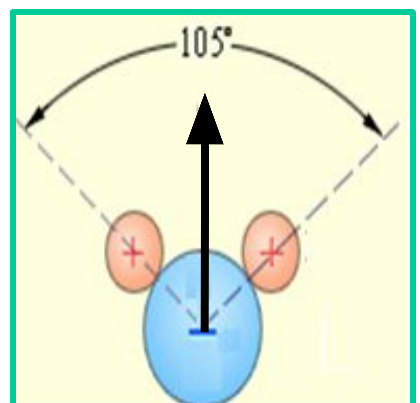
– плечо диполя

– ось диполя

– точка наблюдения

– расстояние от диполя до точки наблюдения

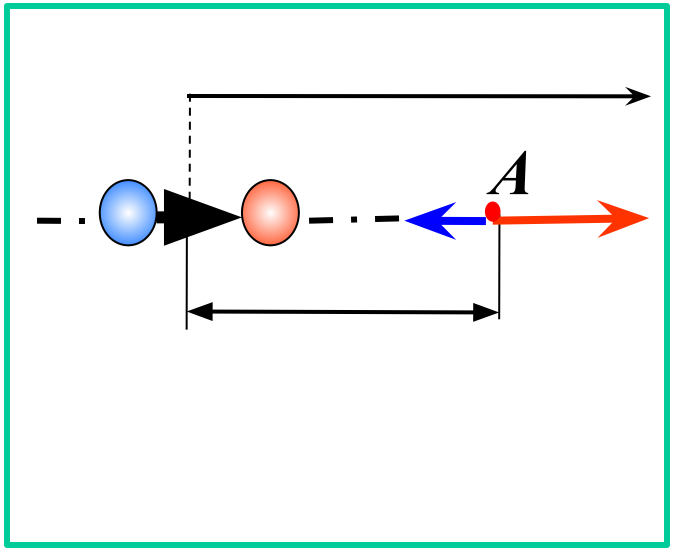
## Дипольный момент молекулы воды



# Поле диполя

## диполя

**Из принципа суперпозиции полей:**



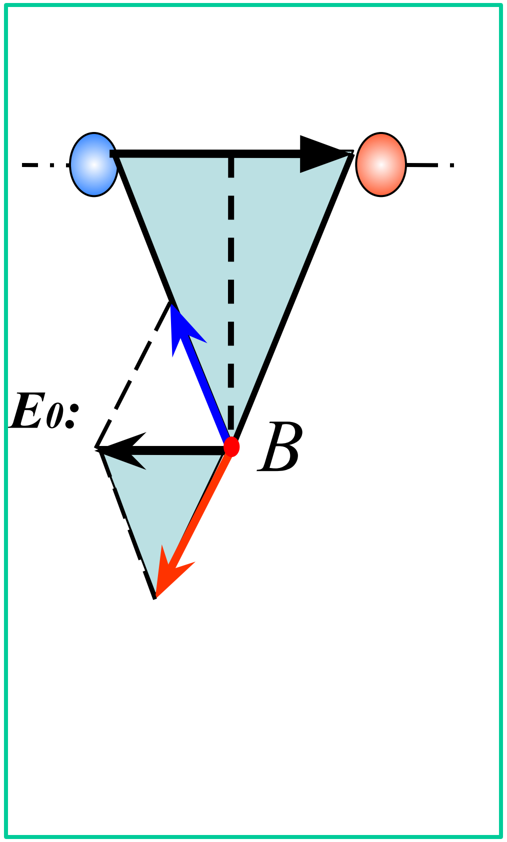

В **проекции на выбранную ось** $r$ **:**

**С учетом закона Кирхгофа:**

**Напряженность поля диполя в точке** $A$**:**

## Напряженность поля диполя в точке *B*, лежащей на перпендикуляре восстановленном к оси диполя из середины плеча диполя

**Из принципа суперпозиции полей:**



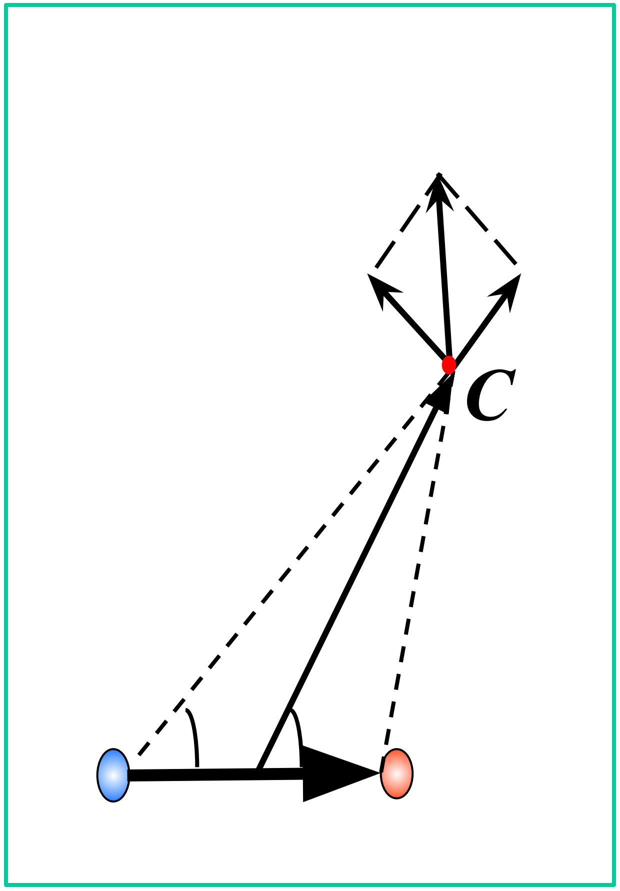

**Точка $B$ равноудалена от обоих зарядов:**

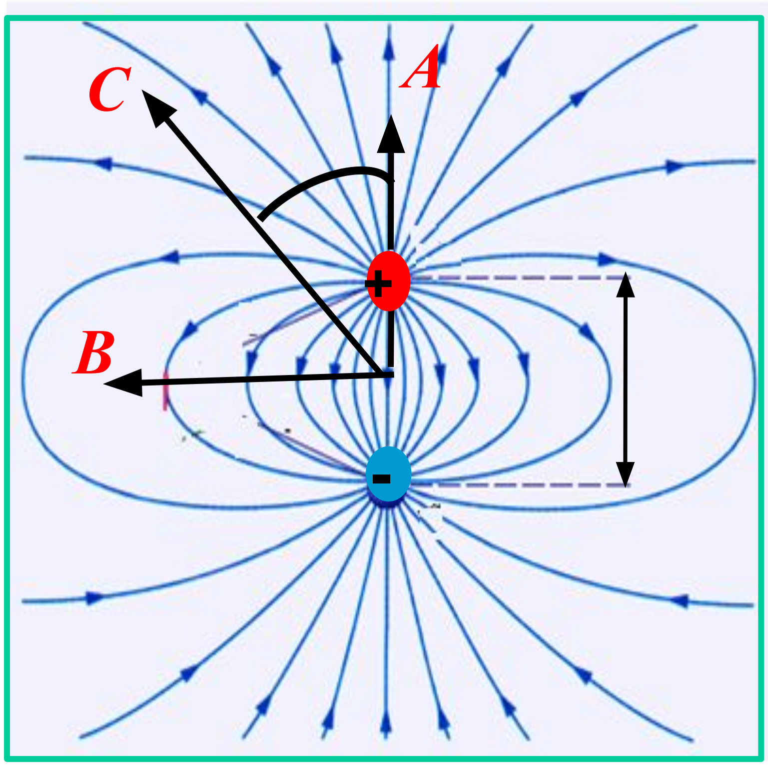
**Из подобия равнобедренных треугольников, опирающихся на плечо диполя $\ell$ и на вектор**

**Напряженность поля диполя в точке $B$:**

$\uparrow\downarrow$

- **Напряженность поля диполя в произвольной точке *C*, лежащей на прямой на расстоянии от середины плеча диполя ( Без вывода)**
-

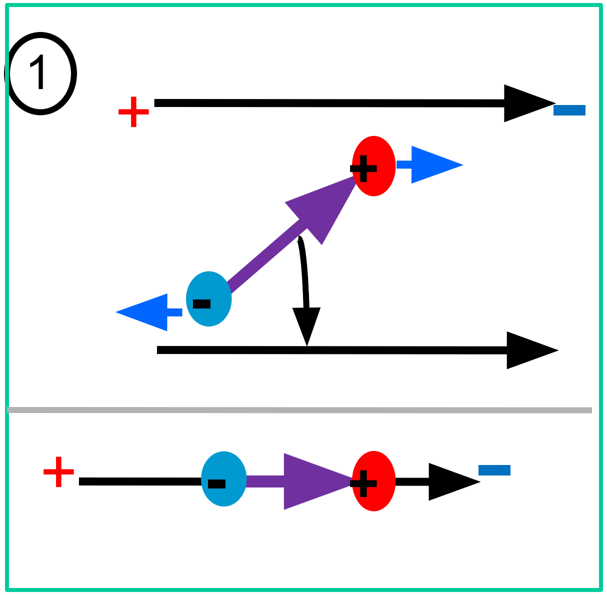




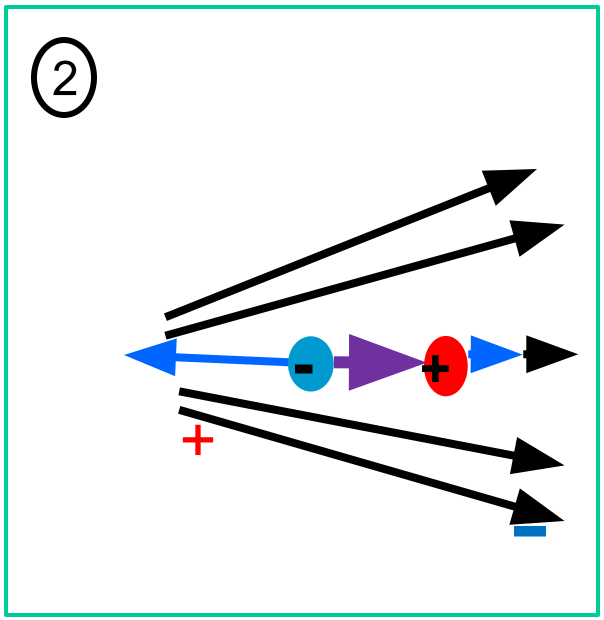

силовые линии поля электрического диполя

- **Напряженность поля диполя зависит от положения точки наблюдения**
- **В любой точке напряженность находится по принципу суперпозиции полей**
- **Для т. $A$ – на оси диполя:**
- **Для т. $B$ – на перпендикуляре к оси диполя, проведенном из середины плеча диполя:**
- **Для т. $C$ – произвольной точки:**

# Диполь в электростатическом поле




В однородном поле диполь разворачивается вдоль силовой линии поля под действием пары сил



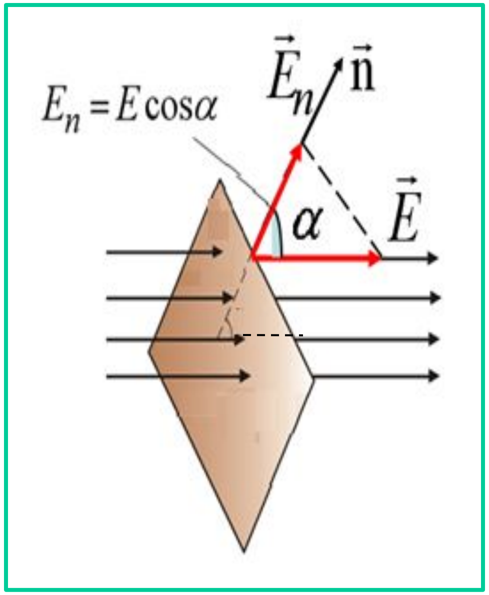

В неоднородном поле диполь, расположенный вдоль силовой линии втягивается в область поля с большей напряженностью

# Поток вектора напряженности электростатического поля

**Поток вектора напряженности** электростатического поля –

это **число силовых линий** , пересекающих площадку,

расположенную перпендикулярно к силовым линиям поля




**Для однородного поля:**

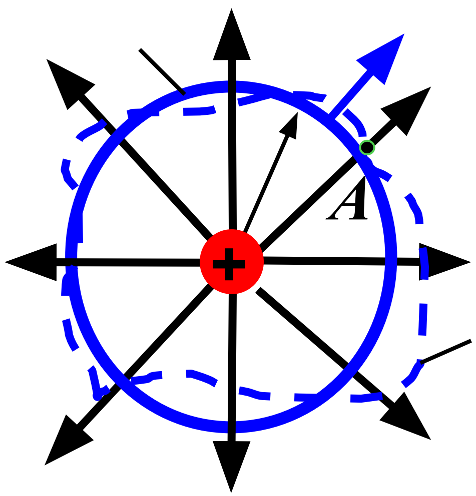
**Для неоднородного поля:**

**Единица измерения потока:**

М.В.ОСТРОГРАДСК ИЙ
(1801-1861)

К.Ф.ГАУСС
(1777–1855)

# Теорема Остроградского - Гаусса




**Рассчитаем поток вектора напряженности поля точечного заряда через замкнутую поверхность**

**Проведем через исследуемую т.$A$ произвольную поверхность**

**Очевидно:**

## Теорема Остроградского – Гаусса:

**Поток вектора напряженности электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, заключенных внутри этой поверхности, деленной на**

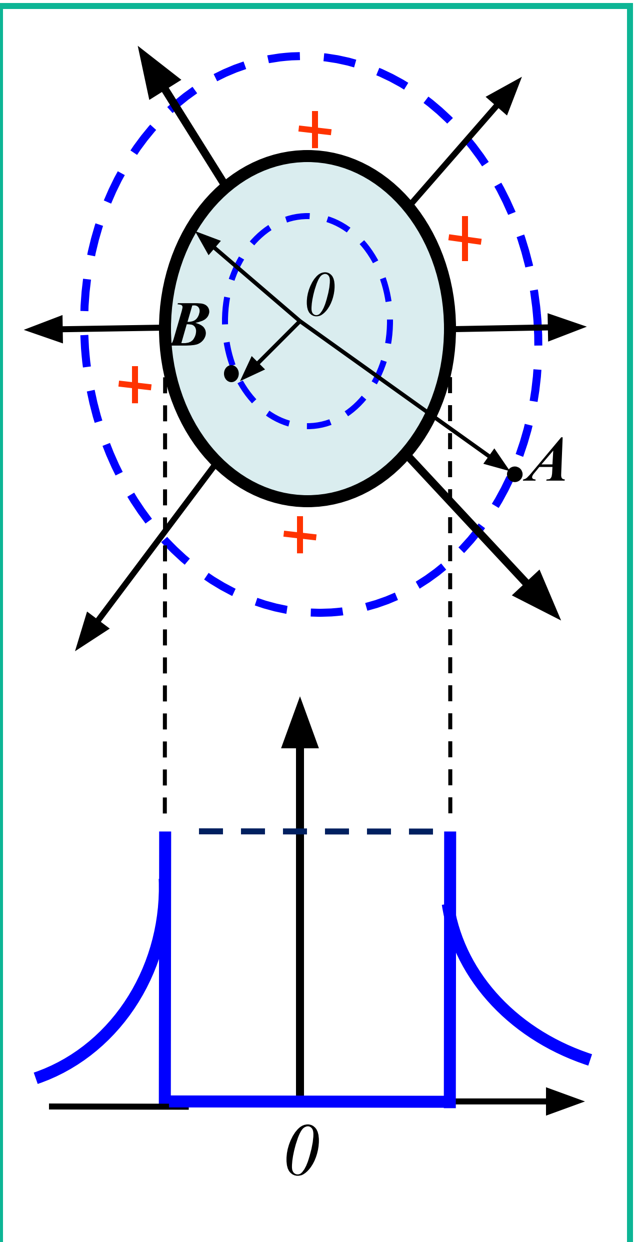
# Теорема Остроградского - Гаусса

- Теорема Остроградского – Гаусса используется для расчета напряженности электрического поля распределенных зарядов (заряженных маротел), если поле этих зарядов обладает симметрией

- Для расчета напряженности исследуемого поля при использовании теоремы Остроградского – Гаусса надо, исходя из симметрии поля, выбрать замкнутую поверхность и вычислить поток силовых линий через эту поверхность
- Найти суммарный заряд внутри этой замкнутой поверхности

# Применение теоремы Остроградского – Гаусса для расчета напряженности некоторых полей

# Напряженность электрического поля заряженной сферы




Сфера радиусом имеет заряд и делит пространство на две области : 1 – вне сферы, 2 – внутри сферы

Выберем произвольно т.$A$ (1 область) и т.$B$ (2 область)

Поле заряда обладает сферической симметрией – проведем через выбранные точки сферы и

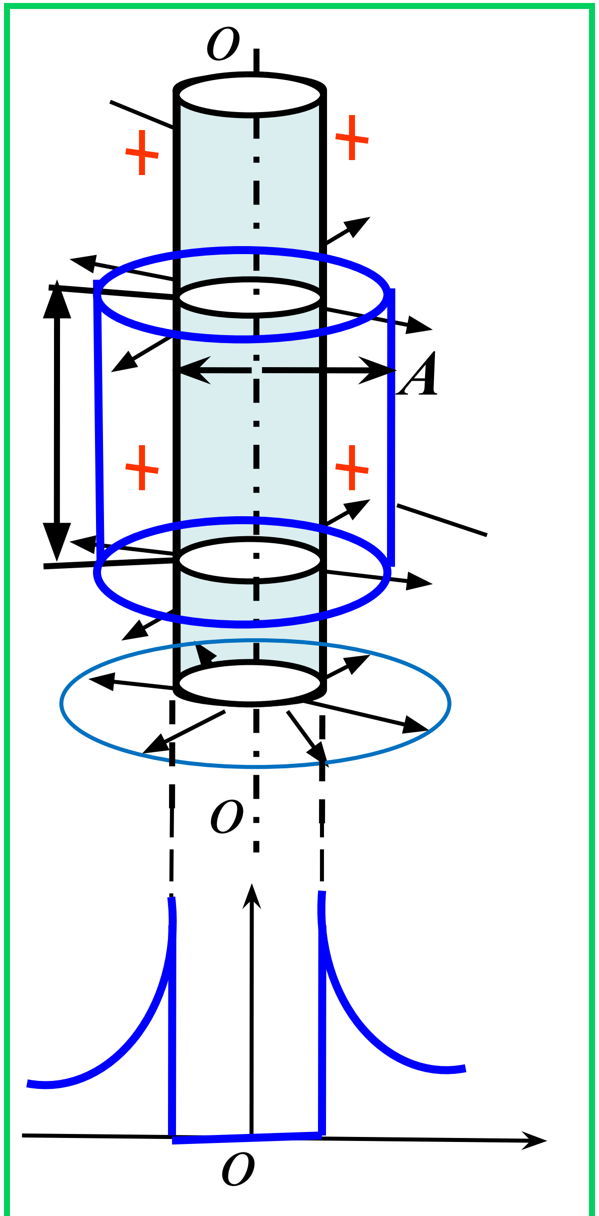
Запишем теорему Остроградского-Гаусса для сферы :

***Напряженность поля в т. $A$:***

Аналогично запишется теорема для сферы :

***Напряженность в т.$B$:***

# Напряженность поля равномерно заряженного бесконечно длинного цилиндра




**Цилиндр радиусом имеет заряд и делит пространство на две области : 1 – вне цилиндра, 2 – внутри цилиндра**

**Поле цилиндра имеет цилиндрическую симметрию: во всех точках образующей цилиндра любого определенного радиуса напряженность поля одинакова**

**Используем** **теорему Остроградского-Гаусса** **для цилиндра:**

**Сложная замкнутая цилиндрическая поверхность состоит из боковой поверхности и двух поверхностей оснований**

$0$

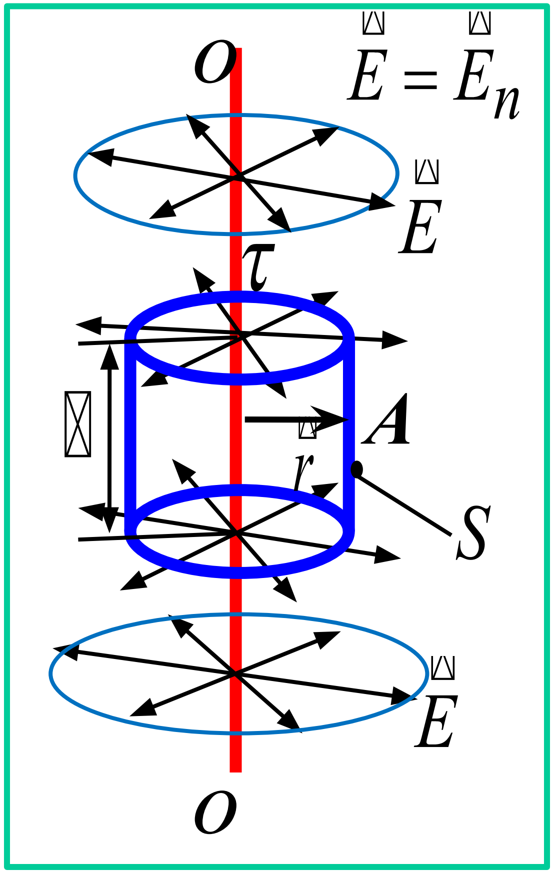
**Поток напряженности через цилиндр , проходящий через т. *A*:**

**Заряд внутри цилиндра определится:**

**Из теоремы Остроградского – Гаусса** **для т.*A*:**

***Напряженность поля цилиндра***

# Напряженность электростатического поля равномерно заряженной бесконечной нити




**Пусть имеем бесконечно длинную заряженную нить с линейной плотностью заряда** $\tau$

**Поле заряженной нити также имеет цилиндрическую симметрию**

**Выберем замкнутую цилиндрическую поверхность** $S$**, радиусом** $r$**, высотой** $\ell$

**Используем** **теорему Остроградского-Гаусса** **для цилиндра** $S$**:**

$$\Phi_E = N_E = \oint_S E_n dS = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

**Сложная замкнутая цилиндрическая поверхность** $S$ **состоит из боковой поверхности** $S_{бок}$ **и двух поверхностей оснований** $S_{осн}$

**Поток напряженности через цилиндр** $S$**, проходящий через т.** $A$**:**

$$\Phi_E = \int_{S_{бок}} E_n dS + 2\underbrace{\int_{S_{осн}} E_n dS}_{0} = E\int_{S_{бок}} dS = E2\pi r\ell \Longrightarrow$$

**Заряд** $q$ **внутри цилиндра определится:**

$$q = \tau\ell \Longrightarrow$$

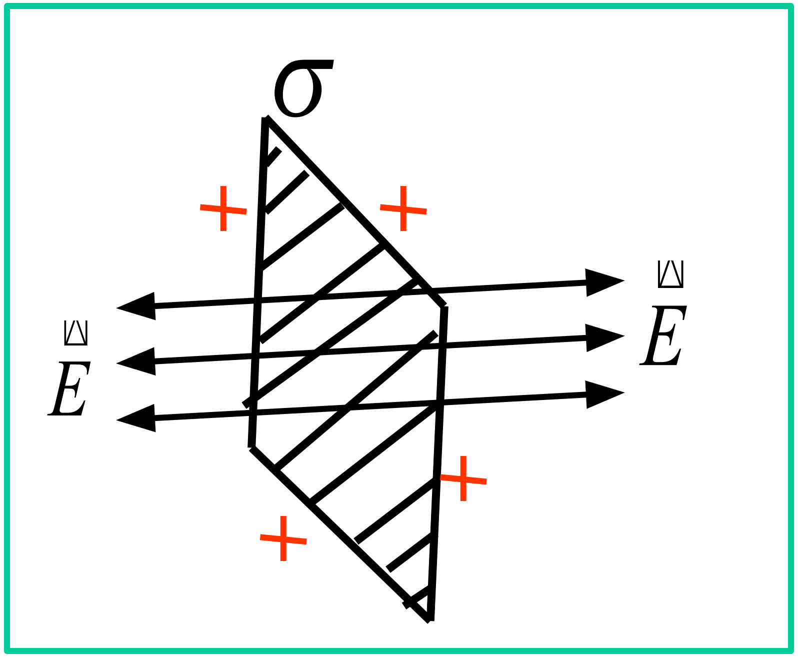
$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = E2\pi r\ell = \tau\ell/\varepsilon_0 \Longrightarrow$$

**Из теоремы Остроградского – Гаусса** **для т.** $A$**:**

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_o\varepsilon r}$$

# Напряженность электростатического поля заряженной пластины

Пусть имеем бесконечную заряженную плоскость с поверхностной плотностью $\sigma$ заряда



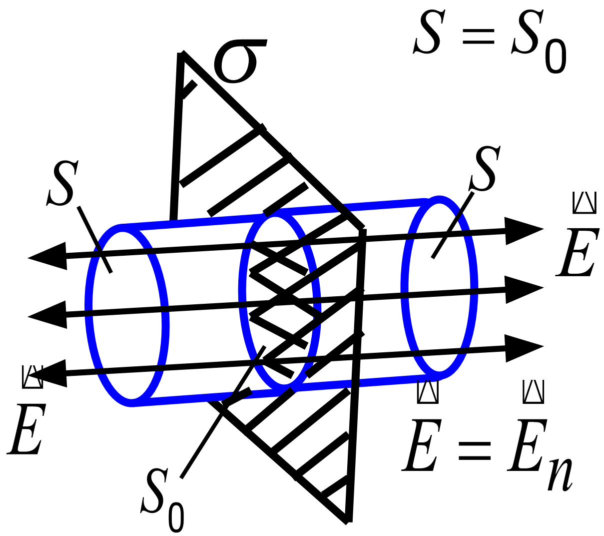

Заряженная плоскость – плоскость симметрии

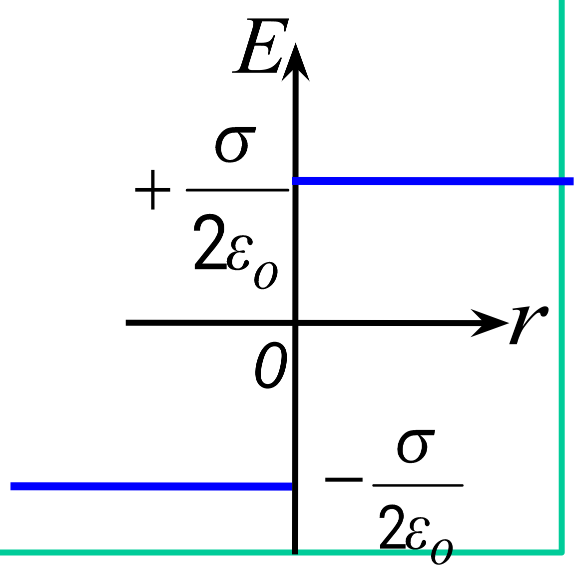
При использовании теаремы Остроградского – Гаусса замкнутую полверхность берем в виде

цилиндра, образующие которого совпадают с силовыми линиями поля, а основания

перпендикулярны к ним

## Напряженность электростатического поля равномерно заряженной плоскости




**Сложная замкнутая цилиндрическая поверхность $S$ состоит из боковой поверхности $S_{бок}$ и двух поверхностей оснований $S_{осн}$**

**Используем** **теорему Остроградского-Гаусса** **для цилиндра:**

$$\Phi_E = N_E = \oint_S E_n dS = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

**Поток напряженности через цилиндр $S$, проходящий через т. $A$:**

$$\Phi_E = N_E = \oint_S E_n dS =$$

$$= \underbrace{\int_{S_{бок}} E_n dS}_{0} + 2\int_{S_{осн}} E_n dS = 2E\int_{S_{осн}} dS = ES \Longrightarrow$$

$$q = \sigma S_0 \Longrightarrow$$

**Заряд $q$ внутри цилиндра $S$ определится:**

**Из теоремы Остроградского – Гаусса** **для т. $A$:**

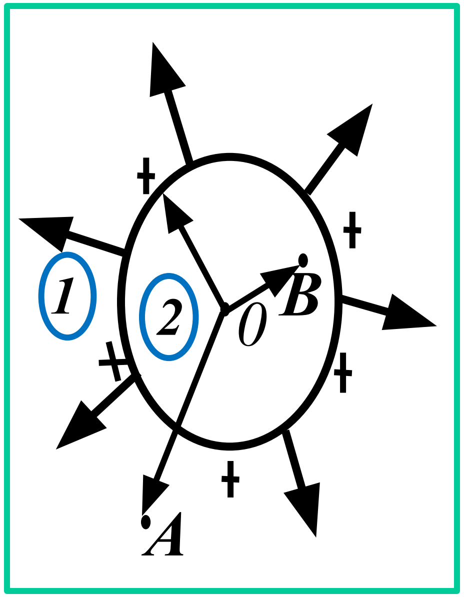
$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = E2S = \sigma S_0/\varepsilon_0 \Longrightarrow$$

***Напряженность поля заряженной плоскости:***

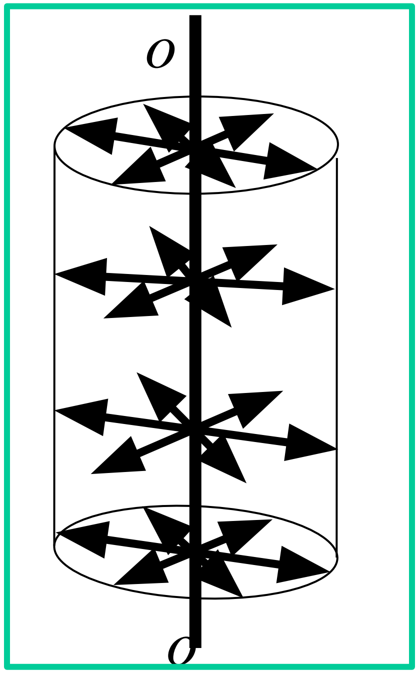
$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_o\varepsilon}$$

**Напряженность поля заряженной бесконечной пластины**

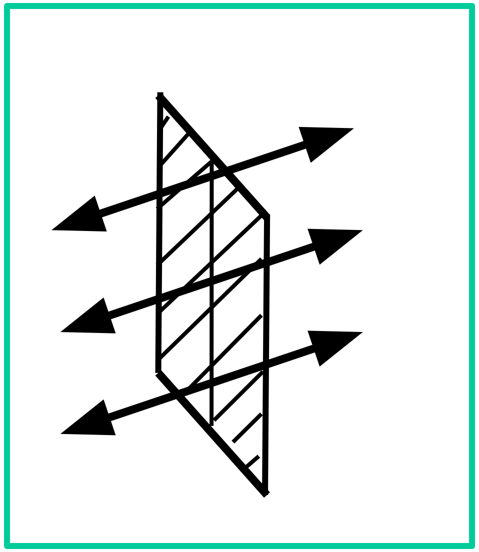
## Напряженность электростатического поля различных конфигураций




Поле заряженной сферы

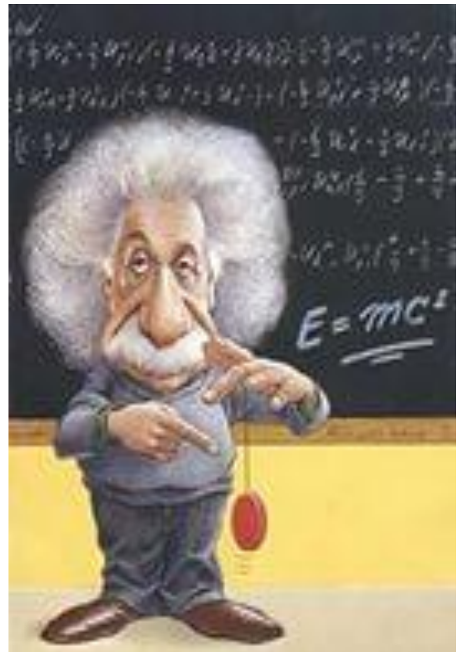



Поле заряженной нити



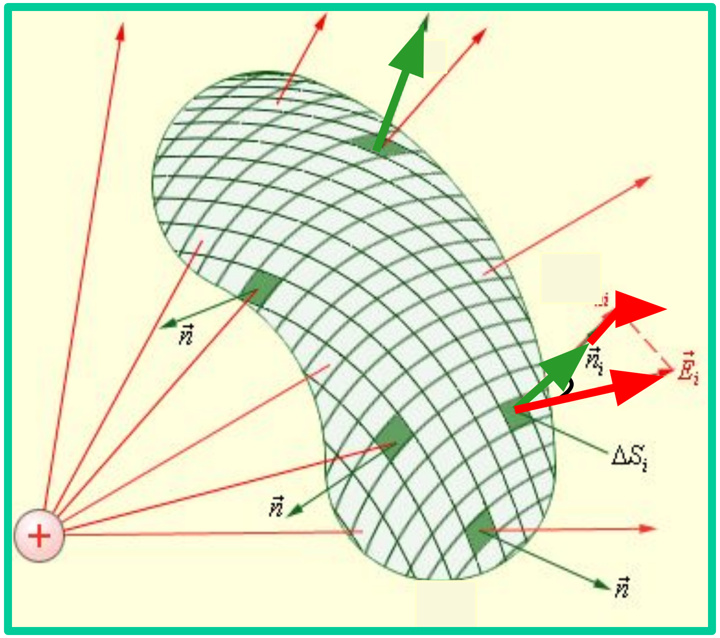
Поле заряженной плоскости

Поле заряженного цилиндра



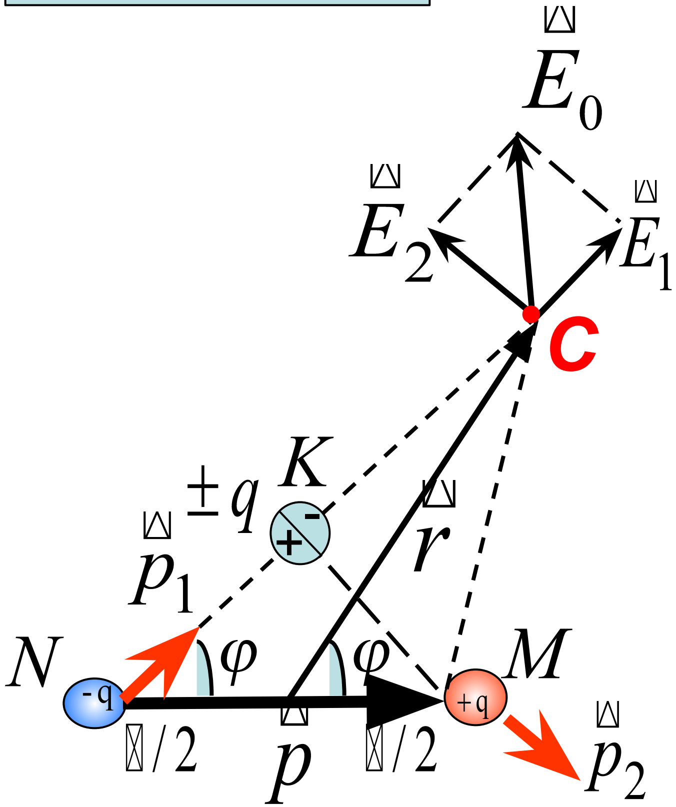

Пока все!

# Поток вектора напряженности электростатического поля через произвольную площадку S




**Поток вектора напряженности** через элементарную площадку численно равен скалярному произведению вектора напряженности на вектор площади

$$\vec{E}_{0C} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$




$$\vec{p}_1 \perp \vec{p}_2 \Longrightarrow \vec{E}_1 \perp \vec{E}_2$$

$$E_{0C} = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\sqrt{3\cos^2\varphi + 1}$$

- **Напряженность поля диполя в произвольной точке $C$,** лежащей на прямой на расстоянии $\vec{r}$ от середины плеча диполя
- Из т.$M$ на направление $NC$ восстановим перпендикуляр $MK$
- В т.$K$ поместим два точечных заряда $+q$ и $-q$
- **Получим два диполя**:

$NK$ - дипольный момент $p_1 = q\ell\cos\varphi = p\cos\varphi$

$KM$ - дипольный момент $p_2 = q\ell\sin\varphi = p\sin\varphi$

**Точка $C$ лежит**:

для первого диполя $NK$ - на оси этого диполя;

для второго диполя $KM$ - на перпендикуляре, восстановленном в средней точке оси

**Напряженность поля диполей в т. $C$**

$$E_1 = \frac{2p_1}{4\pi\varepsilon_0 r^3}; \qquad E_2 = \frac{p_2}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \Longrightarrow$$

$$E_{0C} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{\sqrt{(2p_1)^2 + (p_2)^2}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$