

# ФИЗИКА

## лекция

5

# Электродинамик



**Раздел физики в котором изучается электромагнитное взаимодействие заряженных тел. Изучаются электрические и магнитные поля, создаваемые электрическими зарядами и токами**



# Электростатика

# **Электростатика**

**– раздел электродинамики,  
изучающий взаимодействие  
неподвижных зарядов.  $E=const$**



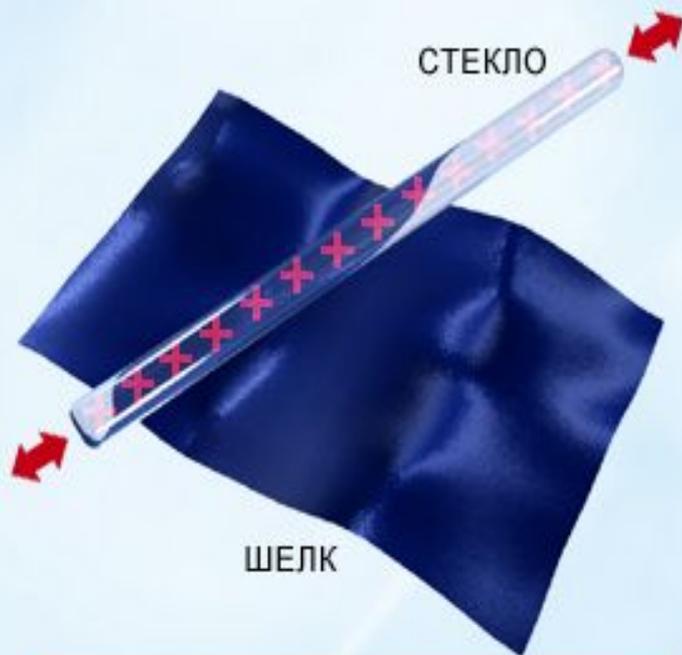
# **Электрическое поле**

- особая форма существования материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между покоящимися или движущимися электрическими зарядами.**
- Все тела в природе можно разделить на проводники**
- ( металлы), диэлектрики (спирт, стекло, дист. вода), полупроводники ( германий).**

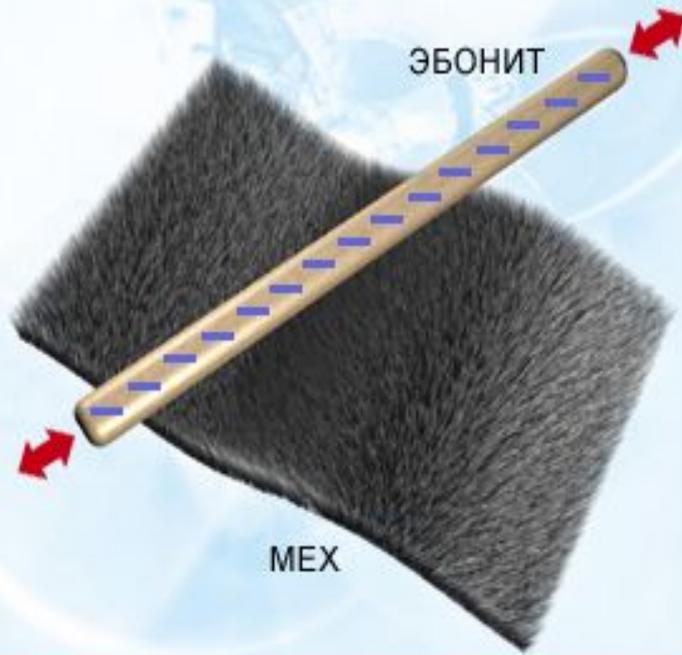
# **Электрический заряд**

**- физическая величина, которая характеризует свойство тел или частиц вступать в электромагнитные взаимодействия и определяющая значения сил и энергий при таких взаимодействиях.**

**В Международной системе СИ за единицу заряда принят кулон (Кл)-заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока в 1А**



**ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ** заряд  
образуется на стекле,  
потертом о шелк



**ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ** заряд  
образуется на эбоните(янтаре),  
потертом о мех

**Элементарный заряд** – минимальный заряд, которым обладают элементарные частицы (  $q$  ).

**Электрон** имеет наименьший существующий в природе отрицательный электрический заряд:

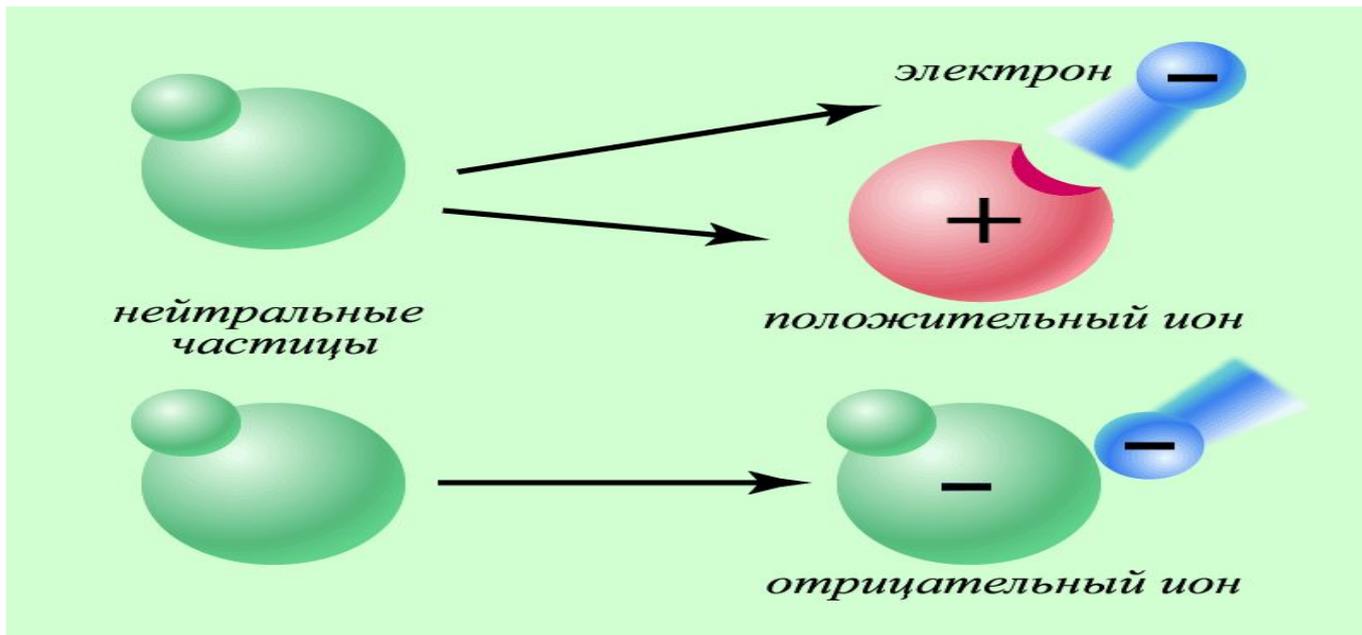
$$q = e = - 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

**Протон и позитрон** (античастица электрона) имеет наименьший положительный электрический заряд:

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

**Точечный заряд** - заряд сосредоточенный на теле, линейные размеры которого значительно меньше расстояния до других заряженных тел.

**Пробный заряд**- небольшой по величине положительный точечный заряд, используемый для обнаружения и исследования электростатического поля,  $q_0$ .

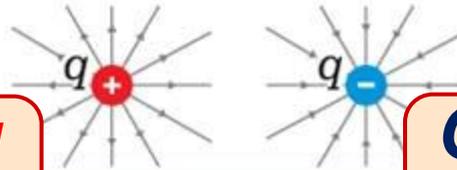


***Q-общий электрический заряд любого тела - алгебраическая сумма всех электрических зарядов, находящихся в этом теле.  $Q=Ne$***   
***Величина заряда, или количество электричества, - избыток электрических зарядов одного знака в каком-либо теле.***

# Свойства электрических зарядов

Электрический заряд существует в двух видах:

**Положительны  
й**



**Отрицательны  
й**

зависит

инвариант

от системы отсчета, т. е. от того, движется он или покоится).

2. Электрический заряд **дискретен**, т. е. заряд любого тела составляет целое кратное элементарного электрического

заряда **e**.  $Q = Ne$

3. Электрический заряд **аддитивен** (заряд любой системы

частиц (тел) равен сумме зарядов частиц (тел), входящих в систему).

4. Электрический заряд замкнутой системы тел **постоянен**.

# Закон сохранения электрического заряда

**- физический закон, в соответствии с которым в замкнутой системе взаимодействующих тел алгебраическая сумма электрических зарядов (полный электрический заряд) остается неизменной при всех взаимодействиях.**

**Заряды могут появляться и исчезать только парами. В целом Вселенная нейтральна**

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$$

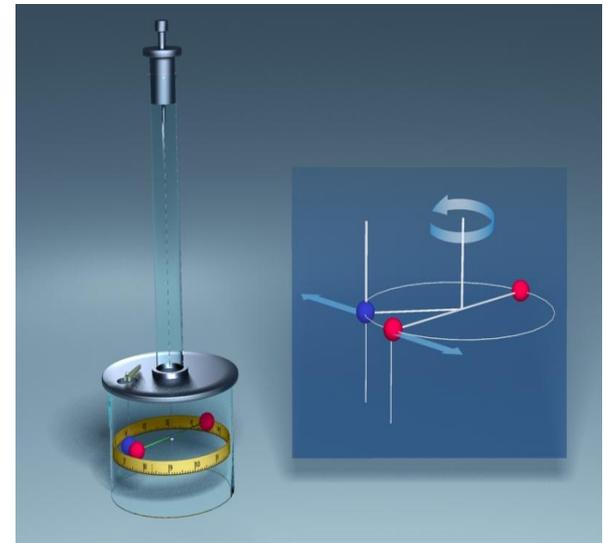
$q_1, q_2, \dots, q_n$  – заряды электрически изолированной системы



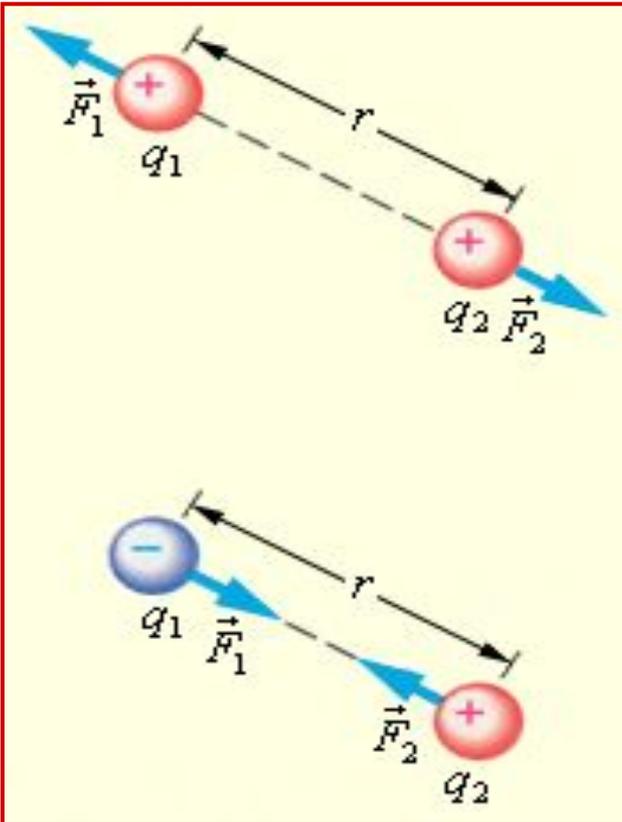
# Закон Кулона

**Закон Кулона** - основной закон электростатики, выражающий зависимость силы взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов от расстояния между ними.

**Дает возможность определить силу (кулоновского) взаимодействия между неподвижными заряженными телами. Справедлив только для точечных зарядов.**



**Два неподвижных точечных заряда в вакууме взаимодействуют с силой прямо пропорциональной произведению величин этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними и направлена вдоль соединяющей их прямой.**



В вакууме

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

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$$

*В веществе*

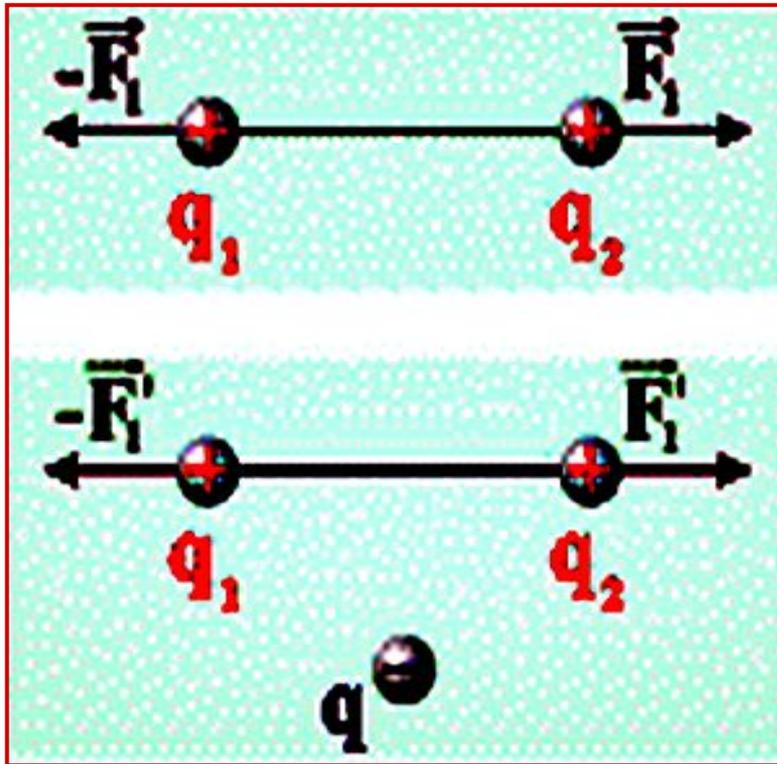
$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$$

**$\epsilon$**  – диэлектрическая  
проницаемость  
среды (безразмерная величина,  
показывающая, во сколько раз сила  
взаимодействия в данной среде  
меньше чем в вакууме).

<b>Вещество</b>	<b><math>\epsilon</math></b>
Вода	81
Керосин	2
Масло	5
Эбонит	2,6
Слюда	7

# Принцип суперпозиции

Опыт показал: сила взаимодействия зарядов  $q_1$  и  $q_2$  не зависит от того, есть ли вблизи третий заряд  $q$ .



$$\vec{F}_1 = \vec{F}'_1$$

Сила взаимодействия

любой

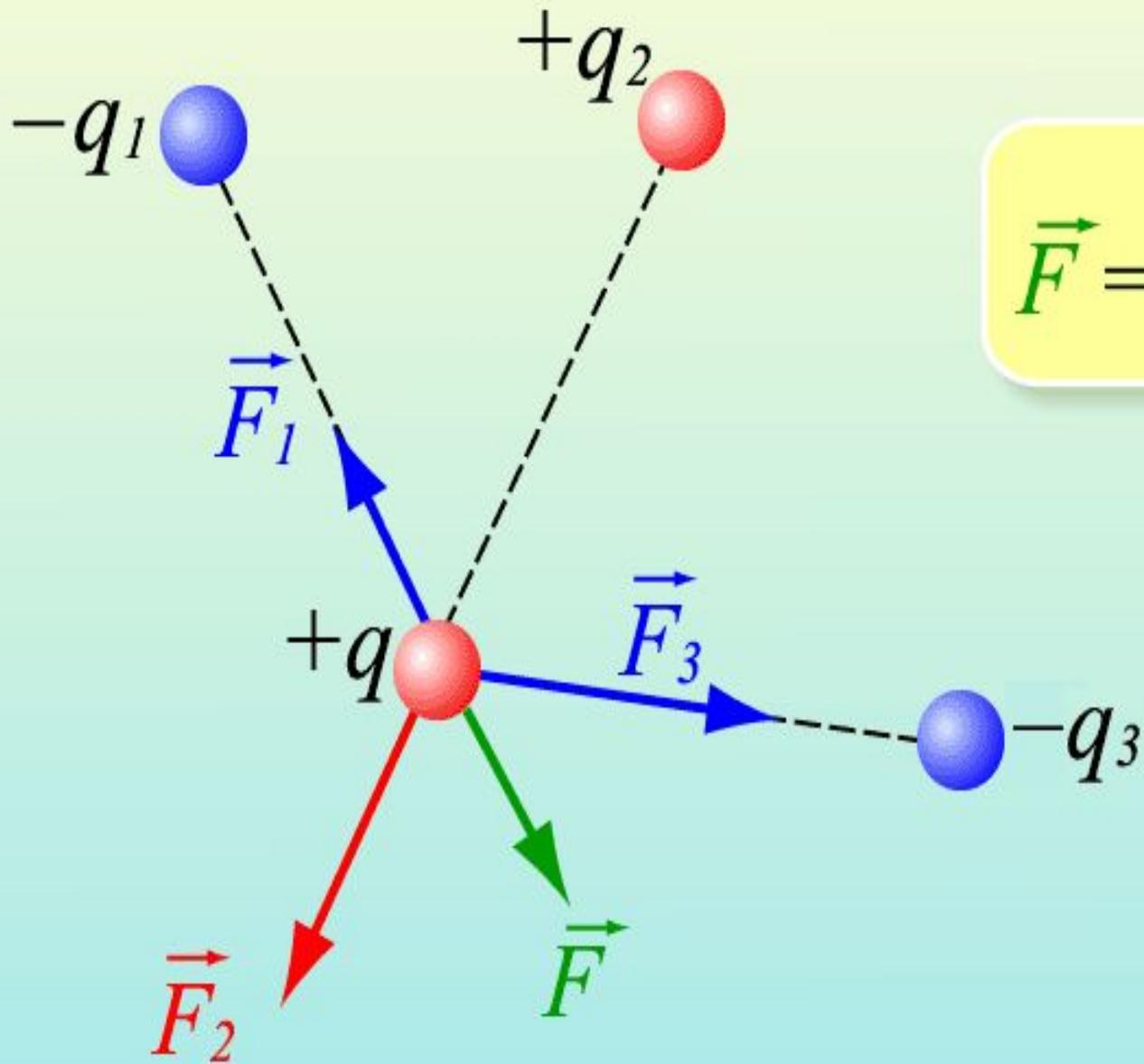
пары из системы

зарядов

не зависит от

присутствия

других зарядов.



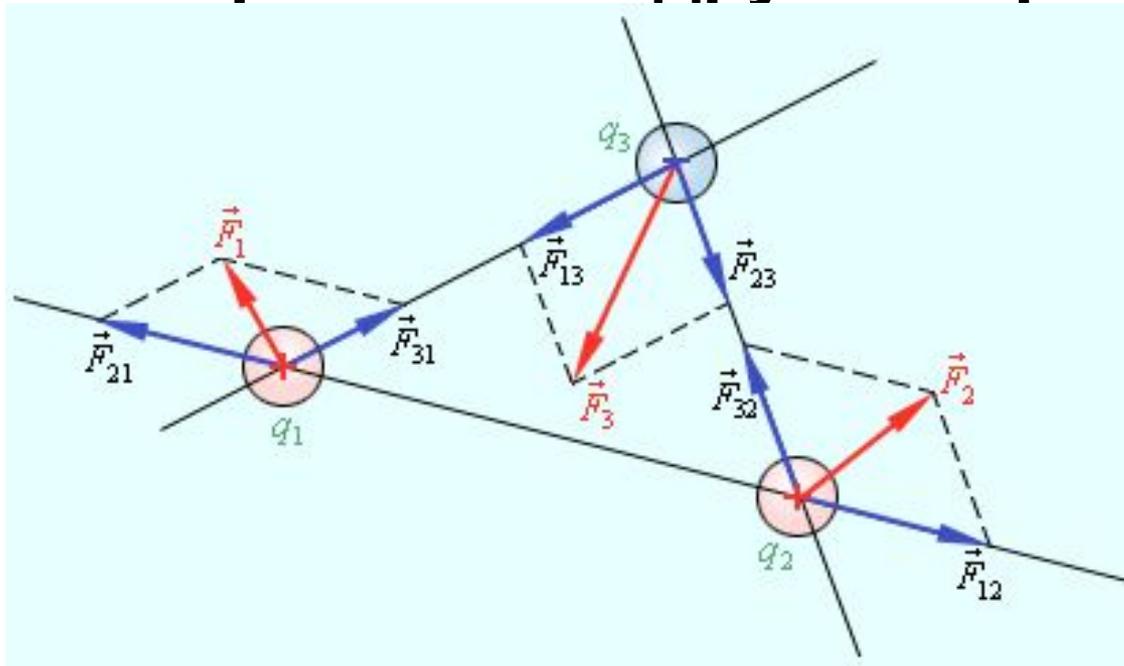
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

Силы кулоновского взаимодействия

подчиняются **принципу**

**суперпозиции:**

Если заряженное тело взаимодействует одновременно с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, действующая на данное тело, равна векторной сумме сил, действующих на это тело со стороны всех других заряженных тел.



$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31};$$

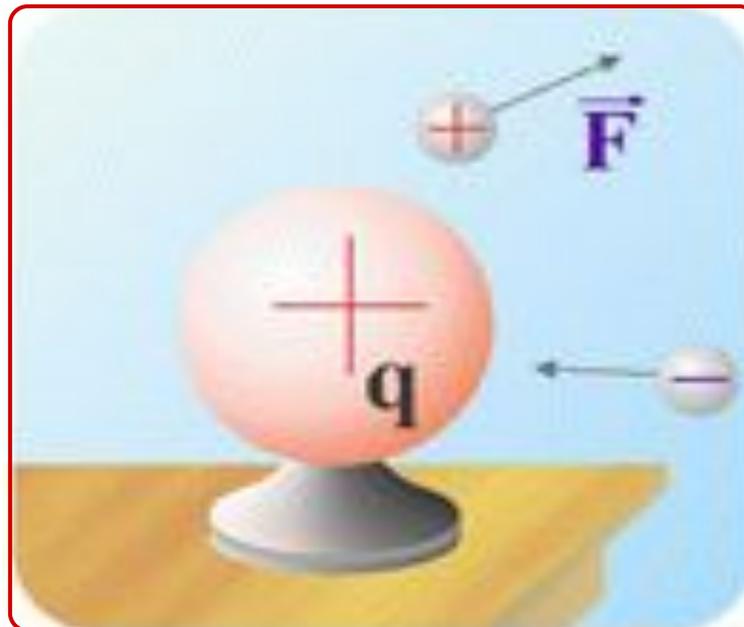
$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23};$$

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{32};$$

**Электрический заряд  $q$  вносит изменение в окружающее пространство.**

**На заряды, внесенные в это пространство, действует сила.**

**Вокруг любого заряда образуется и распространяется электрическое поле.**



**Электростатическое поле  
имеет две характеристики**

- 1. Силовую - ( $E$ ) напряженность  
электрического поля**
- 2. Энергетическую - ( $\phi$ )  
потенциал**

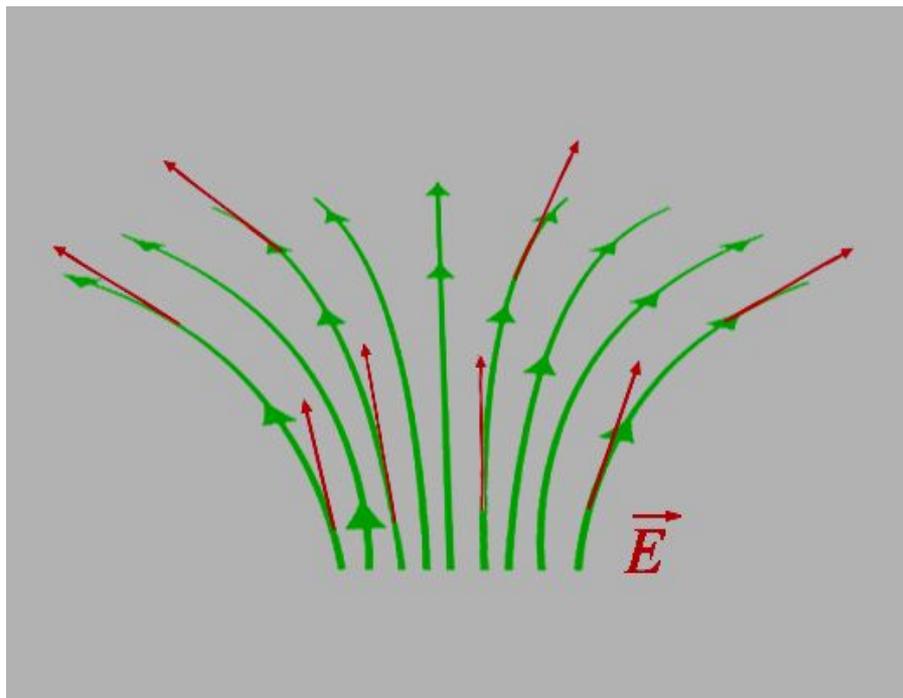
# Напряженность электрического поля

Каждое заряженное тело создает в окружающем пространстве *электрическое поле*. Взаимодействие заряженных тел осуществляется через электрические поля, окружающие заряженные тела.

Электрическое поле, окружающее заряженное тело, можно исследовать с помощью так называемого *пробного заряда* – небольшого по величине точечного заряда, который не вносит заметного перераспределения исследуемых зарядов.

Для количественного определения электрического поля вводится **силовая характеристика** *напряженность электрического поля*.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$



**Напряженность электрического поля  
векторная величина,  
характеризующая  
электрическое поле в заданной  
точке**

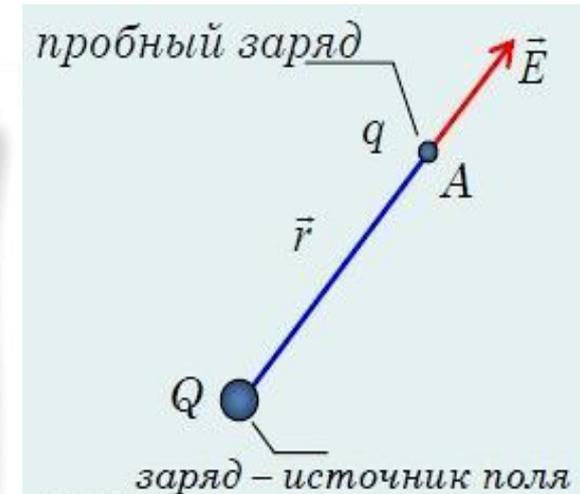
**и определяющая силу, действующую**

## Напряженность электрического поля:

- численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу, к ее заряду;
- совпадает по направлению с силой, действующей на частицу с положительным зарядом.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

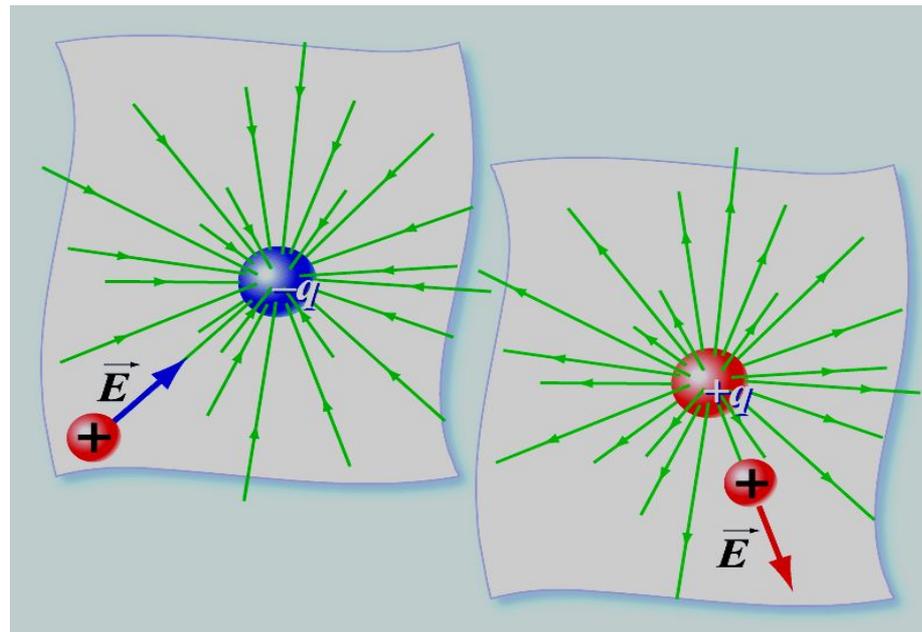
$\vec{E}$  – напряженность электрического поля  
 $\vec{F}$  – сила, с которой поле действует на пробный положительный заряд  
 $q$  – величина этого заряда



Направление вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением вектора силы  $\vec{F}$ , действующей на пробный заряд.

Единица измерения напряженности электрического поля

$$1 \text{ Н / Кл} = 1 \text{ В / м.}$$



$$D = \epsilon_0 \epsilon \bar{E}.$$

поля в различных средах наряду с вектором напряженности электрического поля  $E$  вводится величина – электрическое смещение (электрическая индукция)  $D$ , которая связана с  $E$  соотношением

$$D = \epsilon_0 \epsilon E.$$

Здесь  $\epsilon$  -электрическая проницаемость вещества, характеризующая способность вещества создавать электрическое поле под действием внешнего

# Напряженность электрического поля точечного заряда

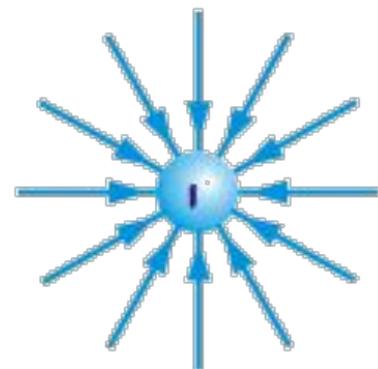
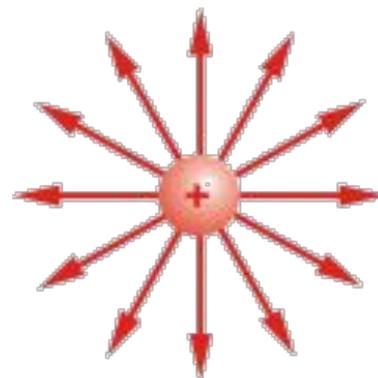
$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$E$  – модуль напряженности поля, созданного точечным зарядом

$q$  – значение точечного заряда

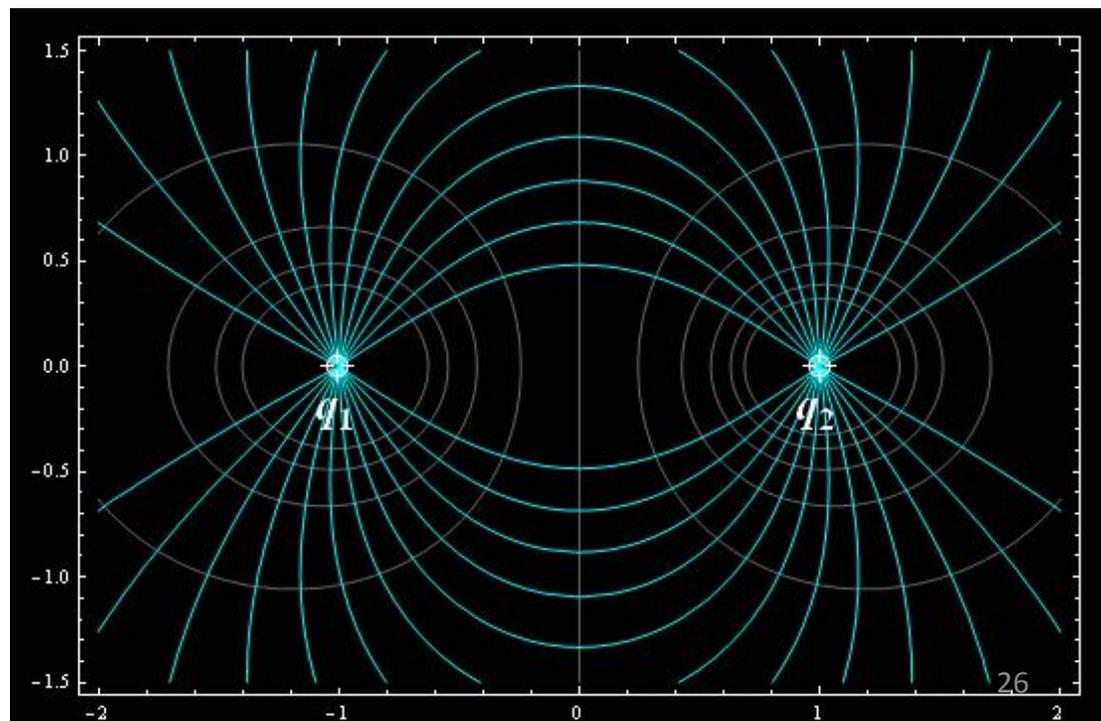
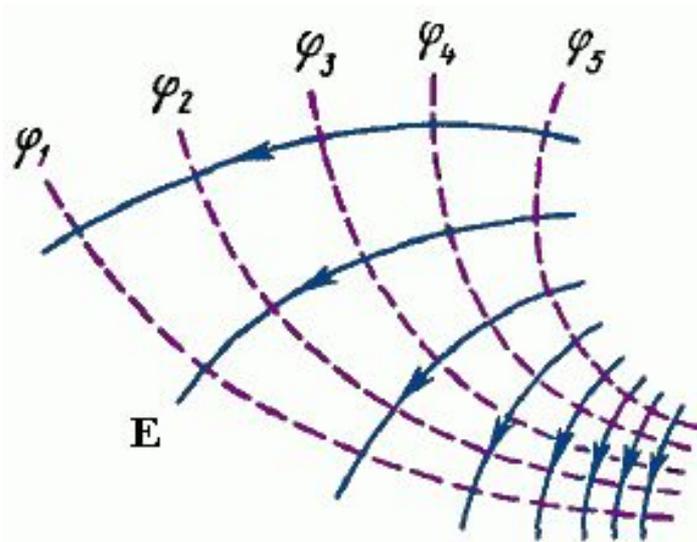
$r$  – расстояние от точечного заряда до исследуемой точки поля

$\epsilon_0$  – постоянная величина, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м



$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2} = k \frac{q}{\epsilon r^2}$$

**Электрическое поле  
изображается на рисунке  
с помощью силовых  
и эквипотенциальных линий.**



# Силловые линии электрического

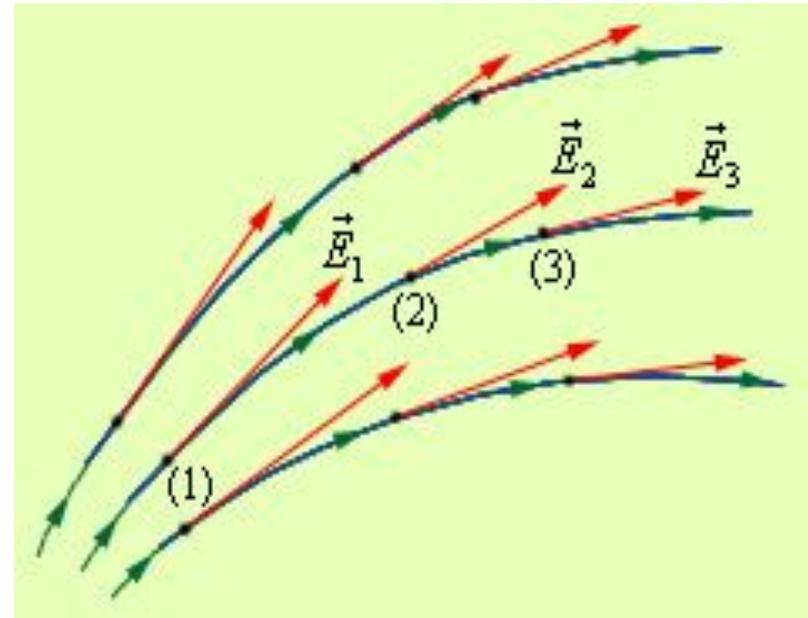
## поля

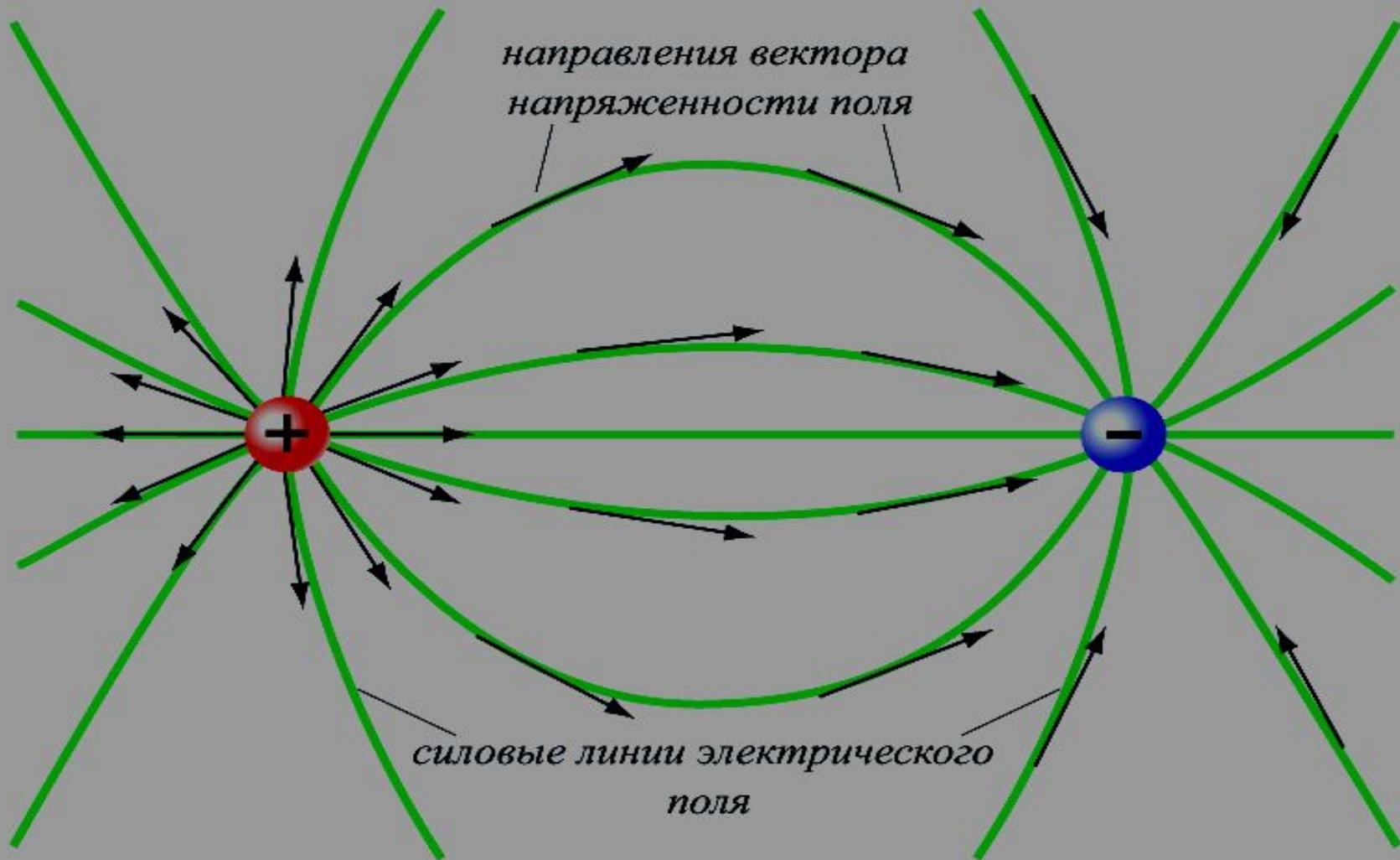
Для наглядного представления электрического поля используют **силловые линии**.



Эти линии проводятся так, чтобы направление вектора в каждой точке совпадало с направлением касательной к силовой линии.

При изображении электрического поля с помощью силовых линий, их густота должна быть пропорциональна модулю вектора напряженности





# • **Свойства силовых линий**

- 1. Силовые линии электрического поля начинаются на положительных зарядах или в бесконечности и заканчиваются на отрицательных зарядах или в бесконечности.**
- 2. Силовые линии электрического поля нигде не пересекаются.**
- 3. Густота проведения силовых линий должна быть такой, чтобы число силовых линий через площадку  $1\text{ м}^2$ , расположенную перпендикулярно к каждой силовой линии, было численно равно значению модуля вектора напряженности в данной точке.**

# Напряженность поля точечного заряда.

## Принцип суперпозиции

В соответствии с законом Кулона, **напряженность электростатического поля**, создаваемого **точечным зарядом  $Q$**  на расстоянии  $r$  от него, равна по модулю

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

Если с помощью пробного заряда исследуется электрическое поле, создаваемое несколькими заряженными телами, то результирующая сила оказывается равной геометрической сумме сил, действующих на пробный заряд со стороны каждого заряженного тела в отдельности.

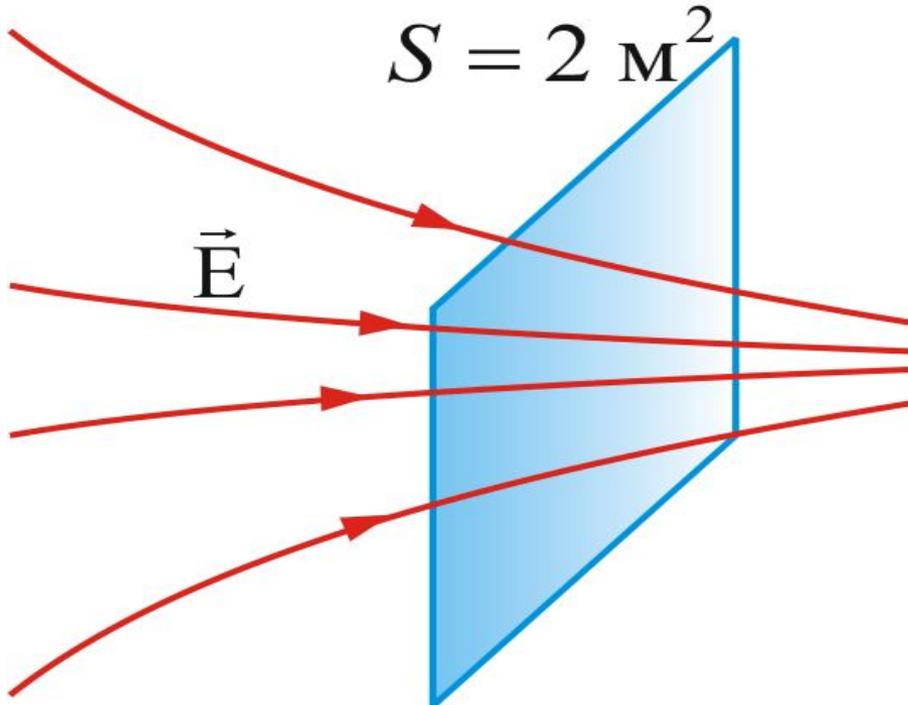
Следовательно, **напряженность электрического поля, создаваемого системой зарядов в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей электрических полей, создаваемых в той же точке зарядами в отдельности:**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

Это свойство электрического поля означает, что поле подчиняется **принципу суперпозиции**.

**Если выделить площадку  $S = 2 \text{ м}^2$ ,  
то напряженность изображенного  
поля будет равна**

$$|\vec{E}| = \frac{\text{число линий}}{S} = \frac{\Phi}{S}.$$

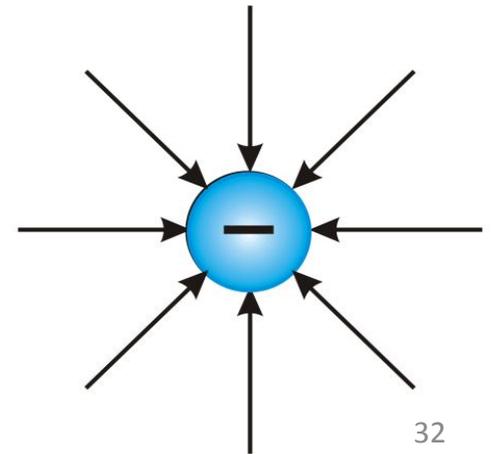
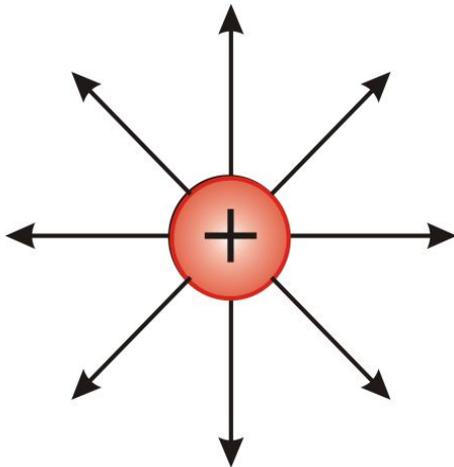


$$|\vec{E}| = \frac{\Phi}{S} = \frac{4}{2} = 2 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

**В случае отдельного точечного заряда, линии напряженности выходят из положительного заряда и уходят в бесконечность, и из бесконечности входят в отрицательный заряд.**

**Т.к.  $E \sim 1/r^2$ ,**

**то густота силовых линий обратно пропорциональна квадрату расстояния от заряда**



**Однородным** называется электростатическое поле, во всех точках которого напряженность одинакова по величине и направлению. Однородное электростатическое поле изображается параллельными силовыми линиями на равном расстоянии друг от друга.



# Принцип суперпозиции (наложения) полей

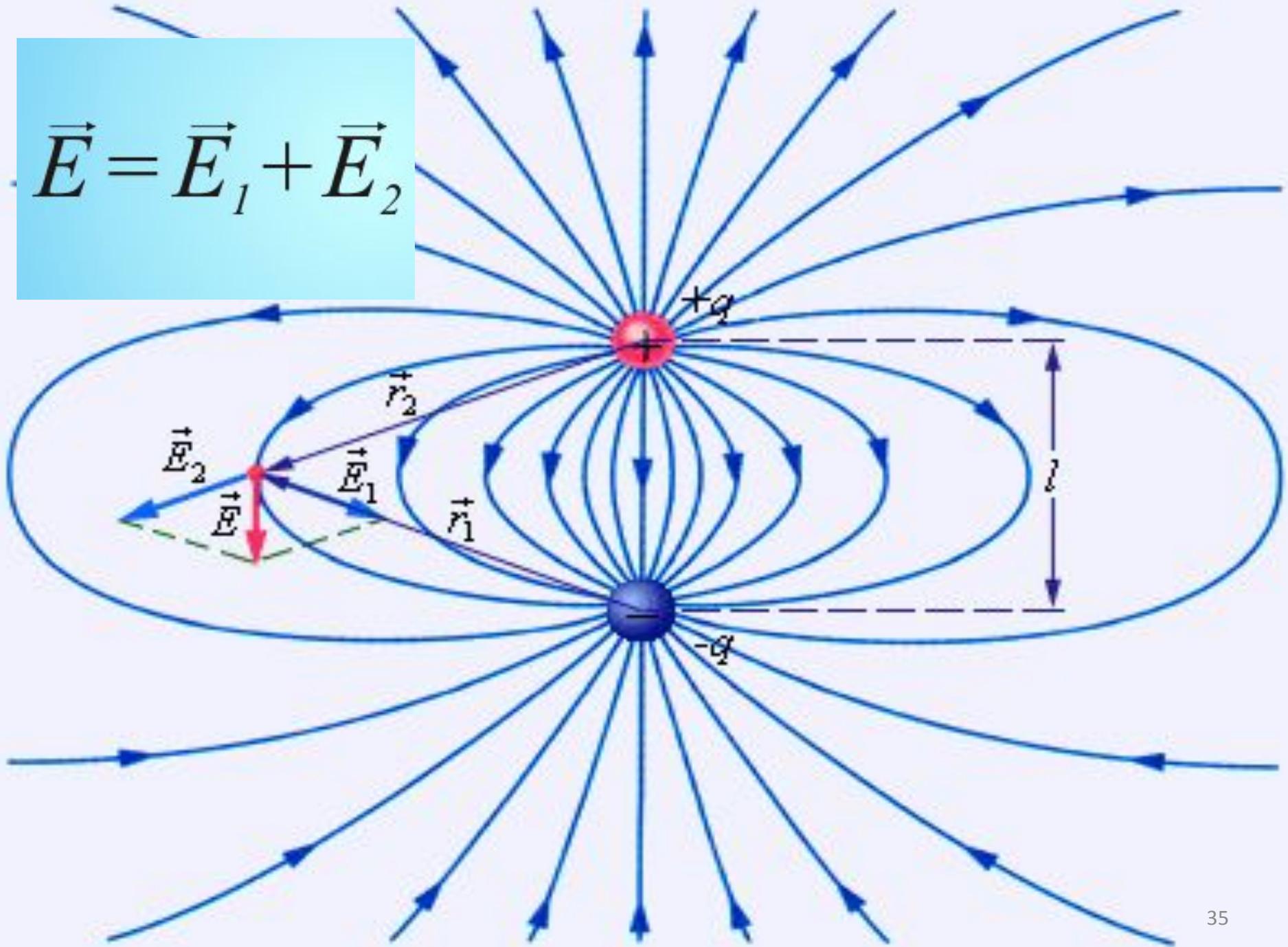
**если поле создается несколькими зарядами,  
то напряженность  $E$  в какой-либо точке поля  
равна векторной сумме напряженностей полей,  
созданных в этой точке каждым зарядом  
в отдельности.**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

$\vec{E}$  – вектор напряженности  
резльтирующего электрического  
поля

$\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$  – векторы напряженностей всех  
электрических полей

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$



## ***Поток вектора напряженности электрического поля $\Phi$***

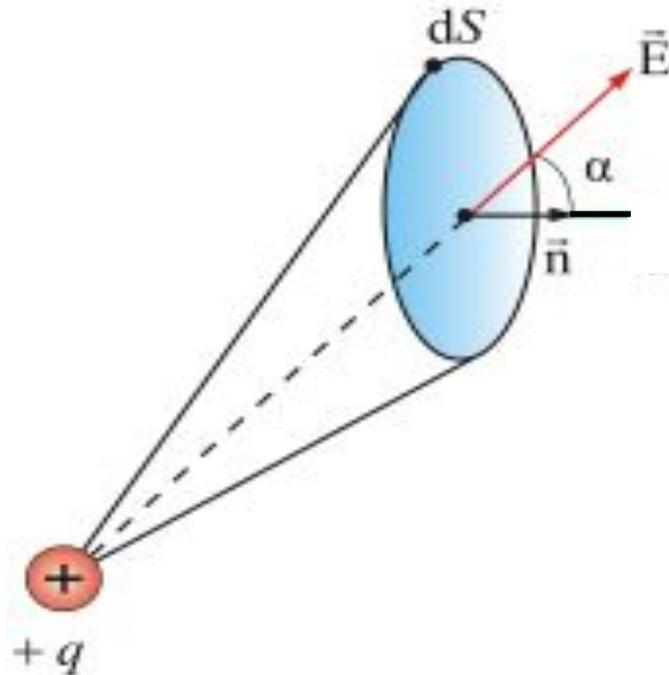
***Число силовых линий сквозь  
площадку  $S$ , перпендикулярную к ним,  
определяет поток вектора сквозь  
эту площадку.***

***Рассмотрим поток вектора  
напряженности электрического поля  
 $E$  сквозь элементарную площадку  $dS$   
( $\Delta S$ ) ( в пределах площадки  $dS$  – поле  
однородное)***

**Поток вектора напряженности  
электрического поля  
через площадку  $dS$  – величина равная**

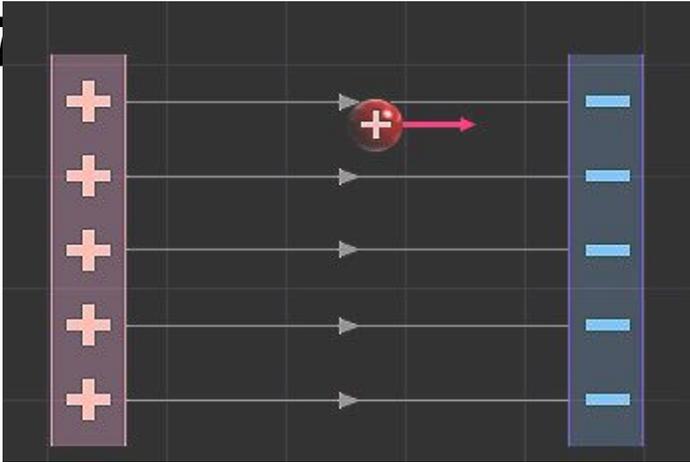
$$d\Phi_E = E dS \cos \alpha = E_n dS$$

$$E_n = E \cdot \cos \alpha$$



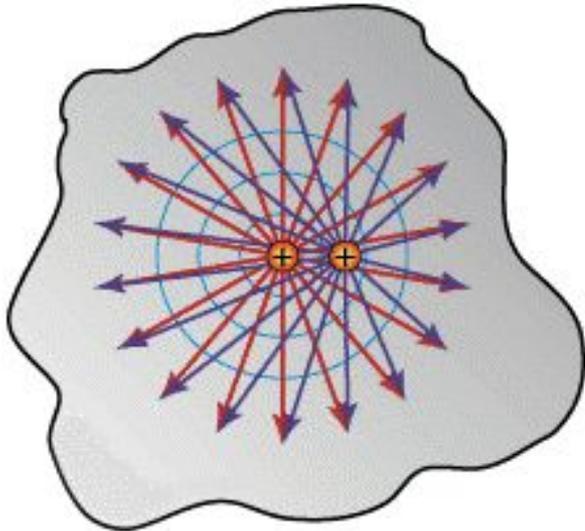
**В однородном**

**п**



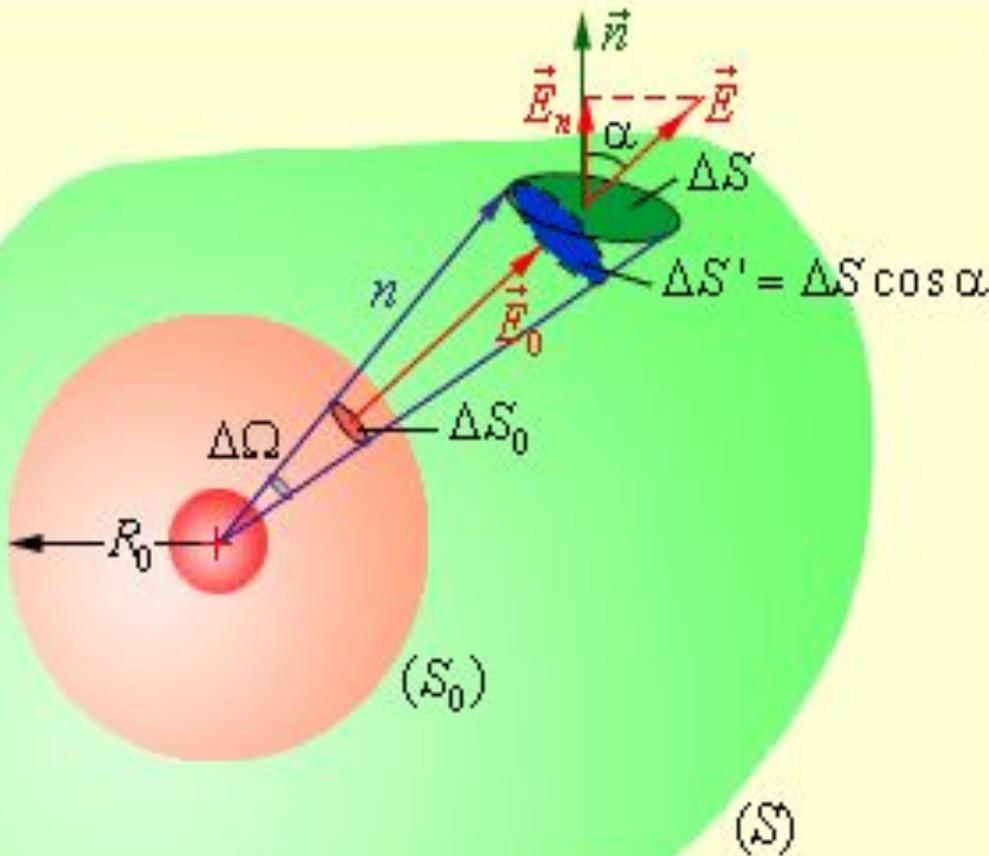
$$\Phi_E = ES.$$

**В произвольном электрическом  
поле**



$$\Phi_E = \int_S E_n dS = \int_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS.$$

**Поток вектора напряжённости  
электрического поля точечного заряда  
через произвольную поверхность  $S$ ,  
окружающую заряд.**



Для произвольной  
поверхности  
площадью  $S$

$$\Phi_E = \int_S E_n dS$$

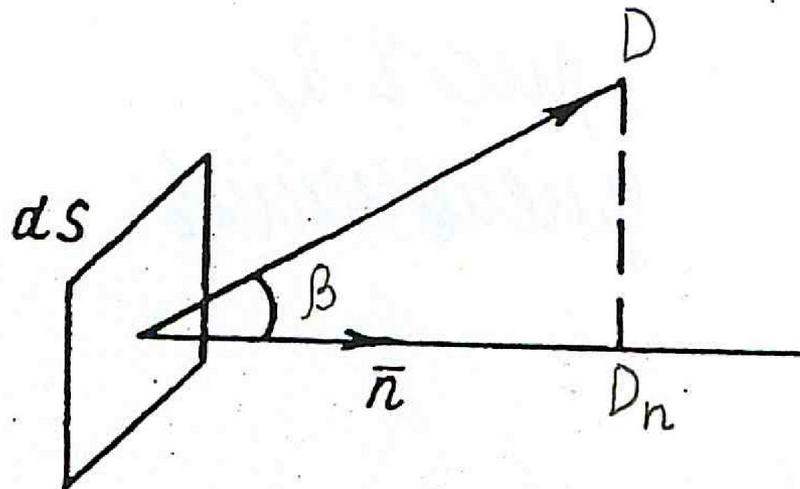
Для произвольной  
замкнутой  
поверхности  
площадью  $S$

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS$$

$$\Phi_D = \int \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS$$

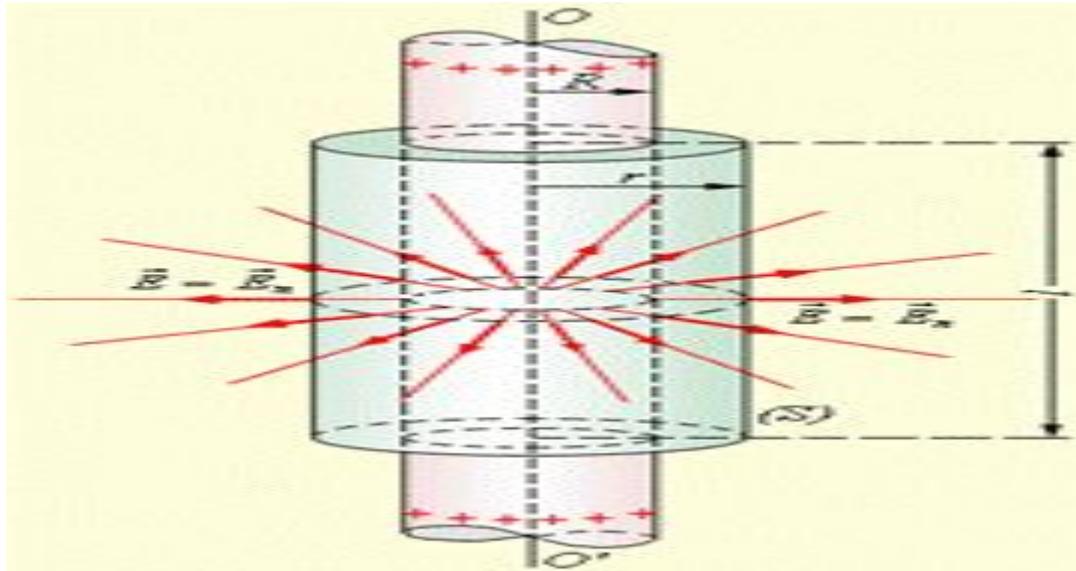
Потоком электрического смещения через элементарную площадку называется произведение модуля электрического смещения на величину элементарной площадки и на косинус угла между  $D$  и  $n$ :

$$\Phi_D = \int \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS$$



# Теорема Остроградского – Гаусса

**Только поле, создаваемое точечным зарядом, не зависит от формы заряда, его размеров. В реальных условиях они играют не последнюю роль.**



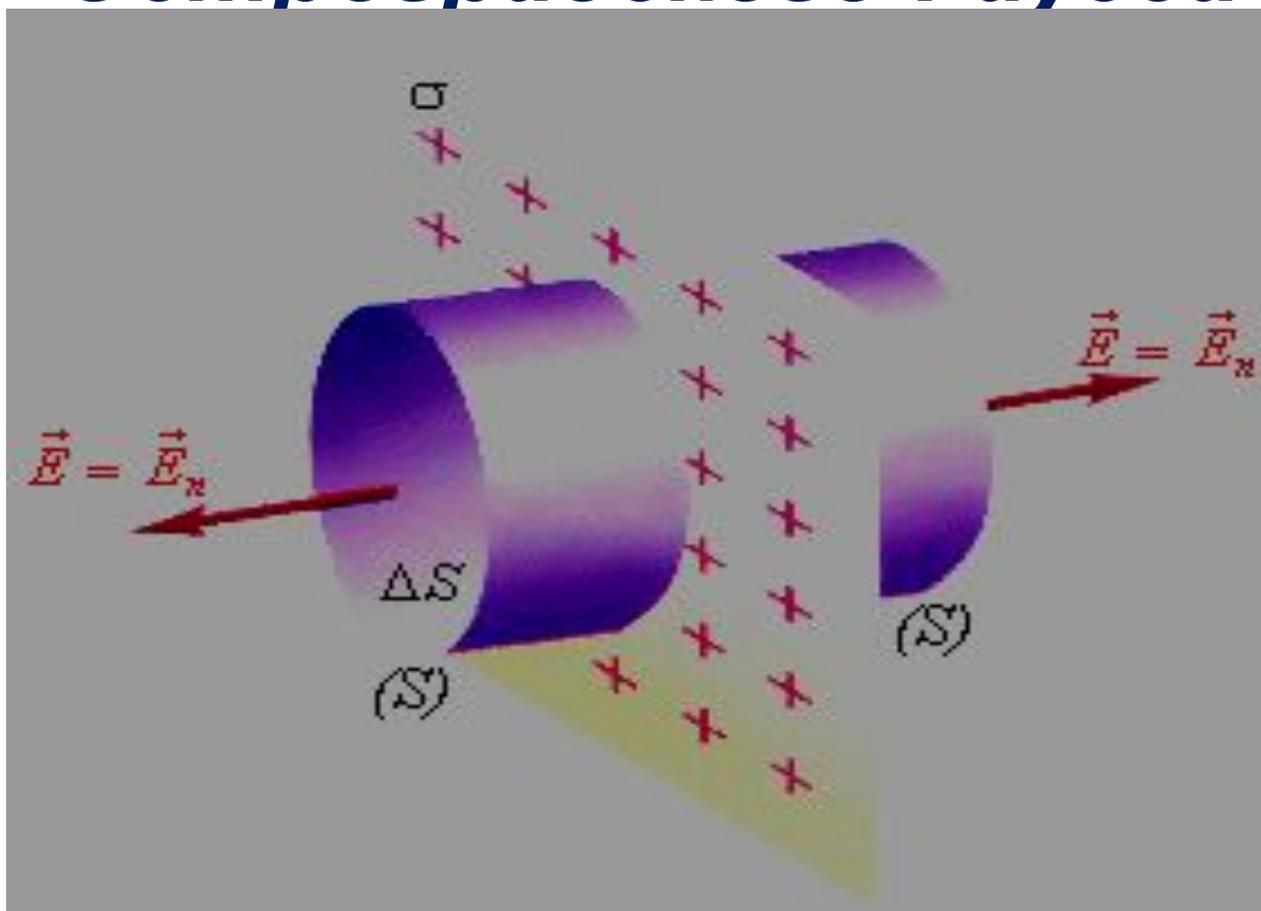
**Поток вектора напряженности  
электрического поля через  
произвольную  
замкнутую поверхность равен  
алгебраической сумме зарядов,  
охваченных  
этой поверхностью, деленной на  
диэлектрическую постоянную  $\epsilon_0$   
( $\epsilon_0 = 8,85 * 10^{-12}$  ф/м)**

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

# **При использовании теоремы Остроградского – Гаусса для расчета электростатических полей нужно:**

- 1. выбрать замкнутую поверхность,  
удобную для данного случая и проходящую  
через рассматриваемую точку;**
- 2. вычислить  $\Phi_E$  через эту замкнутую  
поверхность;**
- 3. вычислить алгебраическую сумму зарядов  
внутри выбранной замкнутой  
поверхности;**
- 4. подставить полученные выражения в  
теорему и вывести формулу, по которой**

# Рассмотрим вычисление напряженностей электрических полей с помощью теоремы Остроградского-Гаусса



*Теорема Остроградского – Гаусса является одной из самых важных в учении об электромагнитном поле, поскольку:*

*1) она устанавливает существование электрического заряда (отличие от нуля потока любого вектора через замкнутую поверхность означает наличие источника этого векторного поля);*

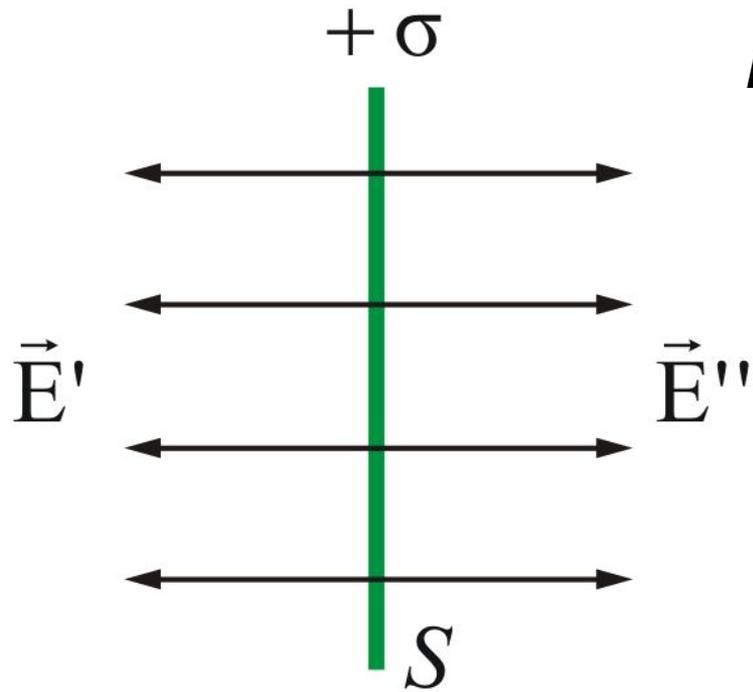
*2) в ней зафиксировано, что электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле;*

*3) в ней отражено, что линии  $\vec{E}$  прерывны, т.е. начинаются на положительных зарядах и кончаются на отрицательных;*

*4) в некоторых случаях она позволяет достаточно просто вычислить электрическое смещение  $D$  и напряженность  $\vec{E}$  электрического поля зарядов.*

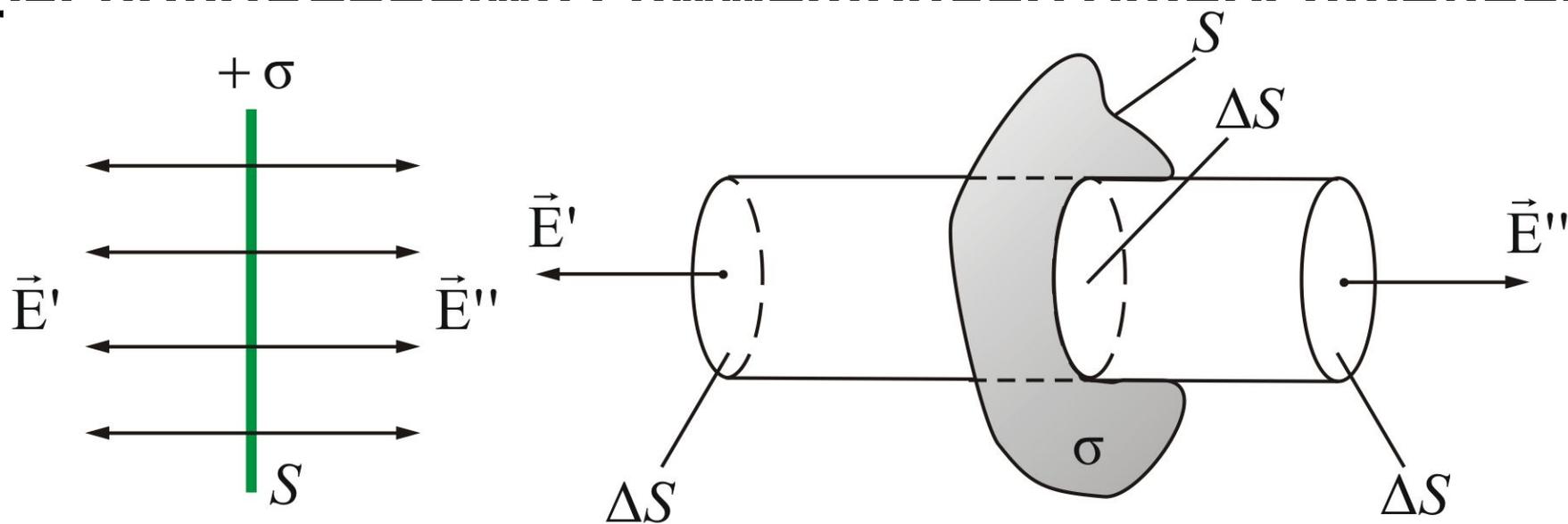
# Поле бесконечной однородно заряженной плоскости

Поверхностная плотность заряда на произвольной плоскости площадью  $S$  определяется по формуле:



$dq$  – заряд, сосредоточенный на площади  $dS$ ;

**В качестве охватывающей поверхности  
возьмем  
цилиндр с образующими, перпендикулярными  
плоскости, и основаниями  $\Delta S$ ,  
расположенными симметрично относительно**



**Тогда**

$$E' = E'' = E.$$

**Суммарный поток через замкнутую поверхность (цилиндр) будет равен:**

$$\Phi_E = 2\Delta SE.$$

**Внутри поверхности заключен заряд.  
Следовательно, из теоремы**

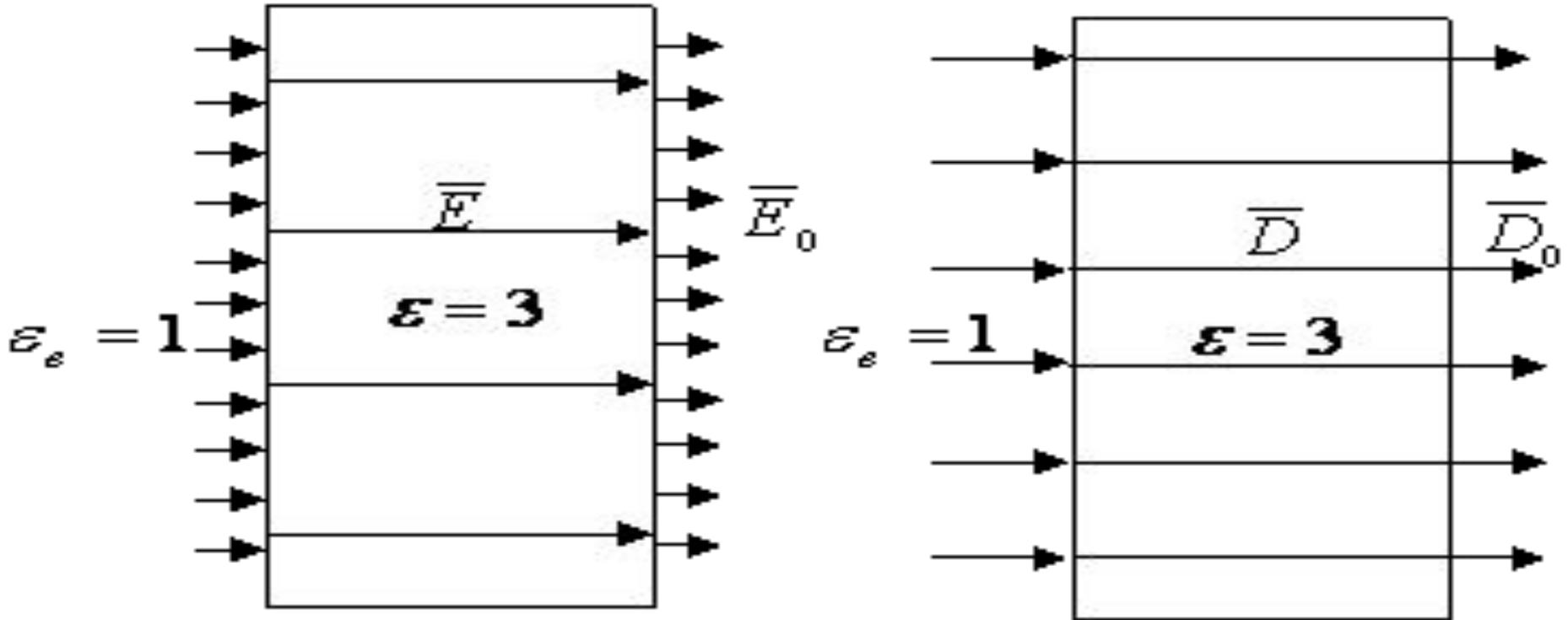
**Остроградского - Гаусса получим:**

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} = 2\Delta SE = \sigma\Delta S \frac{1}{\epsilon_0}$$

**откуда видно, что напряженность поля плоскости  $S$  равна:**

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}.$$

**Электрическое смещение  $\vec{D}$  не зависит от свойств среды на границе двух диэлектриков.**



**Силовые линии вектора  $\vec{E}$  прерываются,  
а силовые линии вектора  $\vec{D}$   
– непрерывны.**

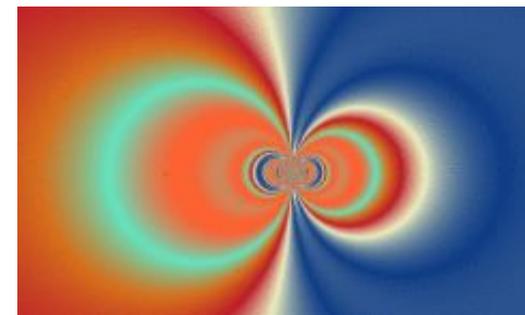
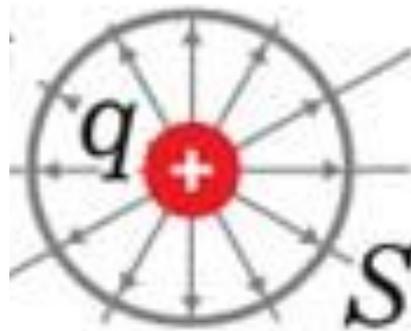
# Теорема Остроградского – Гаусса

~~Поток вектора электрического смещения~~

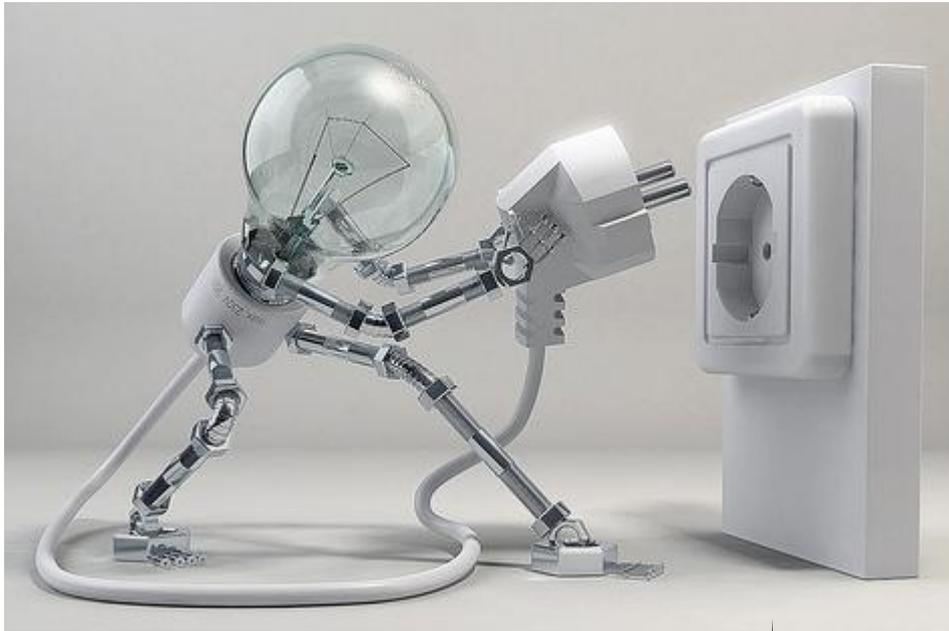
через

произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охваченных этой поверхностью.

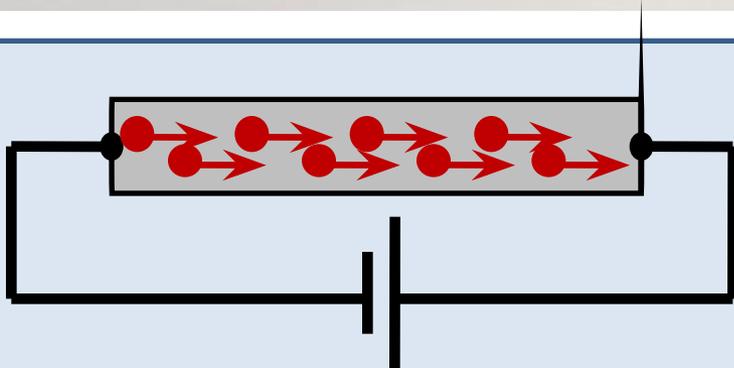
$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum q_i$$



# *Работа сил электрического поля по перемещению заряда*



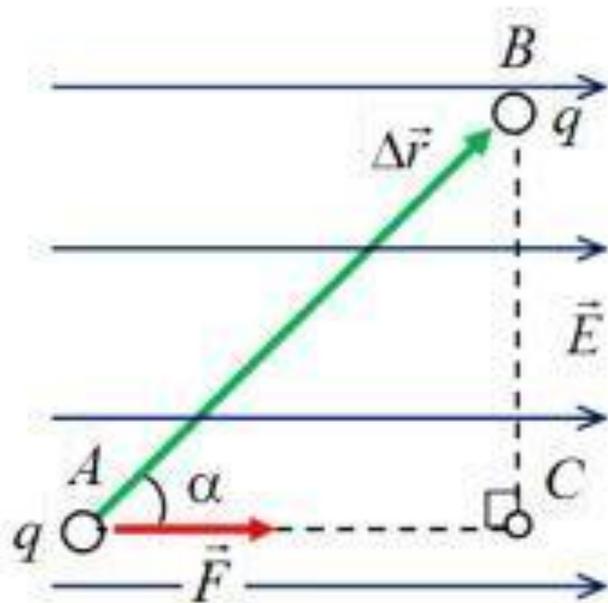
*На всякий заряд,  
находящийся в  
электрическом поле,  
действует сила, и  
поэтому при  
движении заряда в  
поле совершается  
определенная  
работа.*



**1. Рассчитаем работу сил  
однородного электростатического  
поля при перемещении  
положительного заряда  $q$  из**

**ки  $A$  в точку  $B$**

**На заряд  $q$ , помещенный  
в однородное  
электрическое поле с  
напряженностью  $E$ ,  
действует сила**

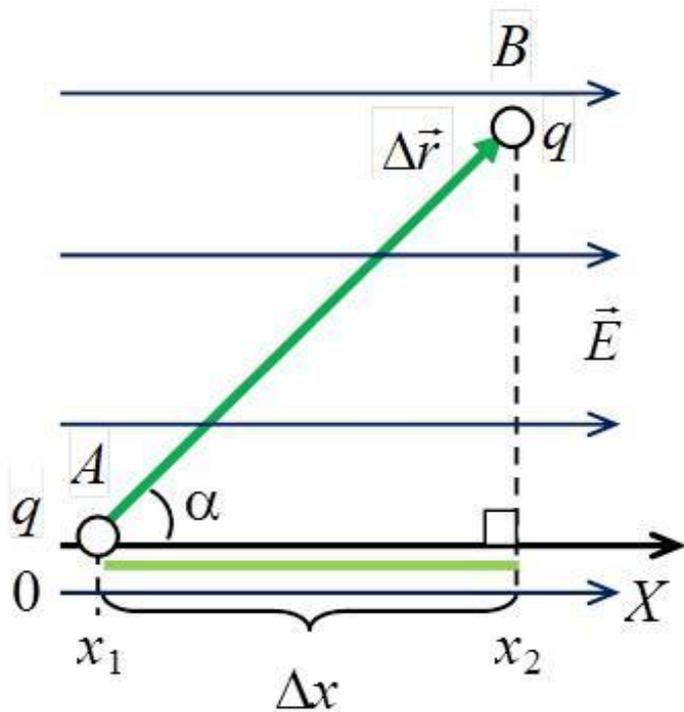


$$\vec{F} = q\vec{E}$$

**Работу поля можно рассчитать по**

**формуле**  
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

$$\Delta r \cos \alpha = AC = x_2 - x_1 = \Delta x$$



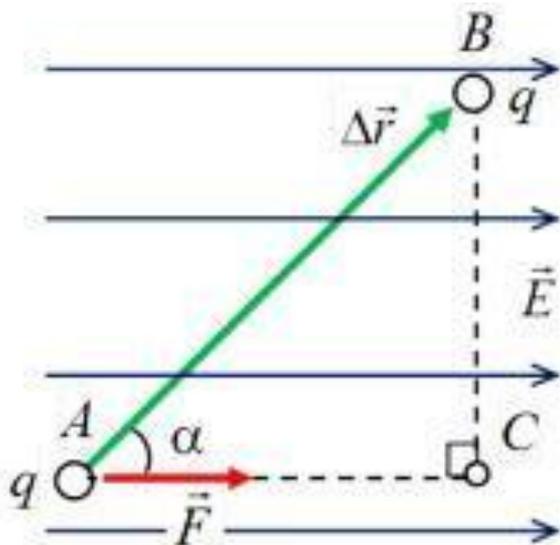
**– проекция  
перемещения на  
силовую линию**

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

*Рассмотрим перемещение заряда  
по траектории ACB .*

*В этом случае работа однородного поля  
может быть представлена как сумма  
работ на участках AC и CB:*

$$\vec{F} = q \vec{E}$$

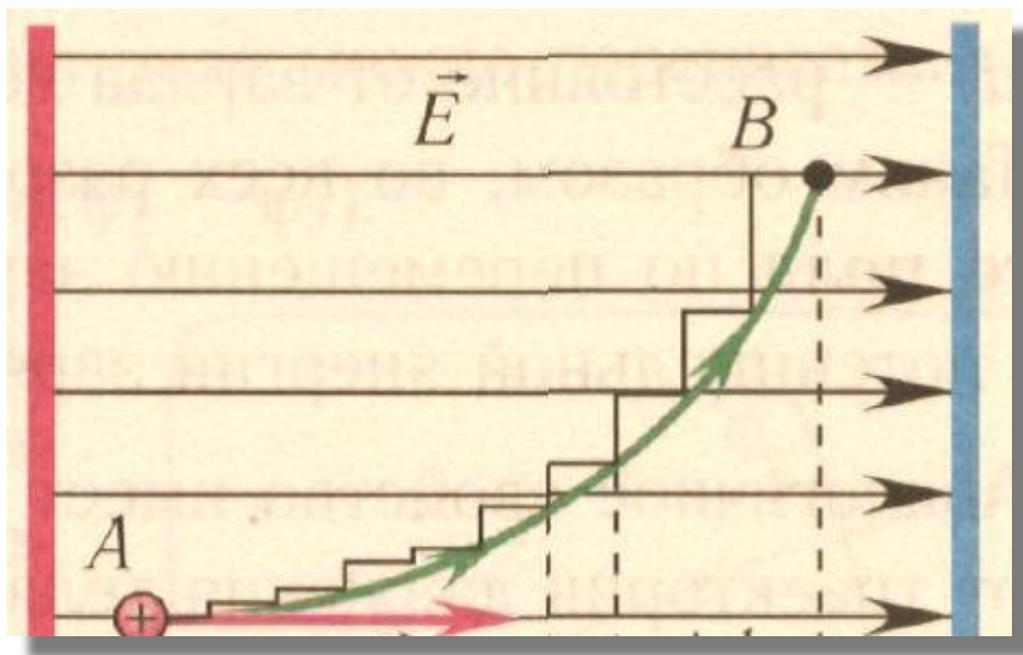


*На участке CB работа равна  
нулю, т.к. перемещение  
перпендикулярно силе.*

*Работа поля такая же, как и  
при перемещении заряда по  
отрезку AB.*

*Работа поля при перемещении заряда между точками АВ по любой траектории будет находиться все по той же формуле*

$$\vec{F} = q\vec{E}$$



**Работа сил электростатического поля не зависит от траектории перемещения, а определяется только положениями начальной (1) и конечной (2) точек.**

**Это означает, что электростатическое поле потенциально, а силы электростатического поля консервативны.**

**Покажем это**

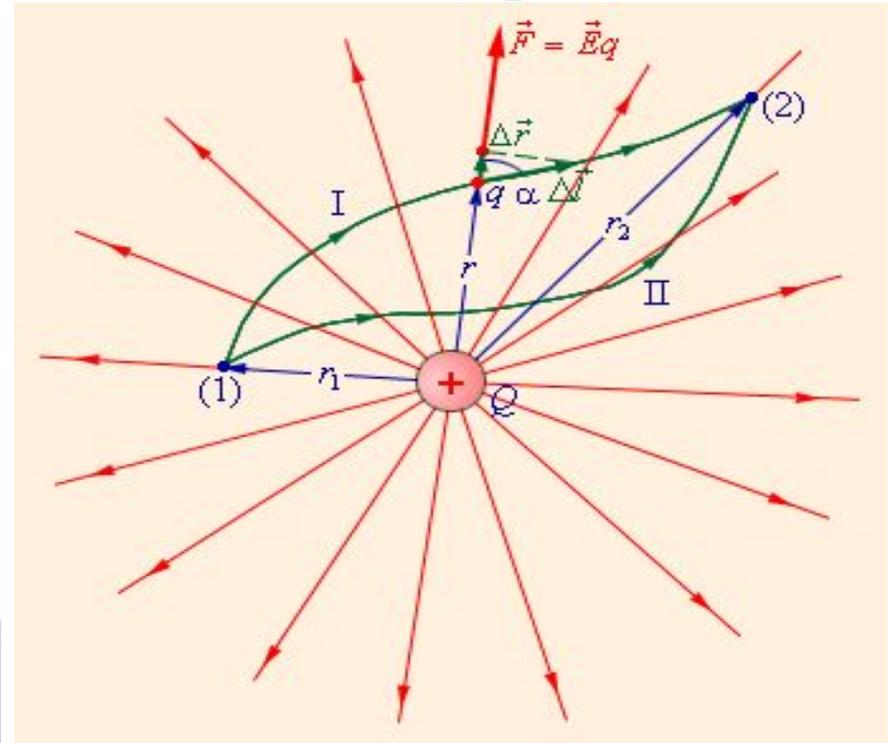
$$A_{1,I,2} = A_{1,II,2}$$

## 2. Работа в электрическом поле точечного заряда

$$\Delta A = F \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha = Eq \Delta l \cos \alpha = E_1 q \Delta l.$$

$$\Delta A = F \Delta l \cos \alpha = Eq \Delta r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} \Delta r.$$

$$A = \int_{r_1}^{r_2} E \cdot q \cdot dr = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$



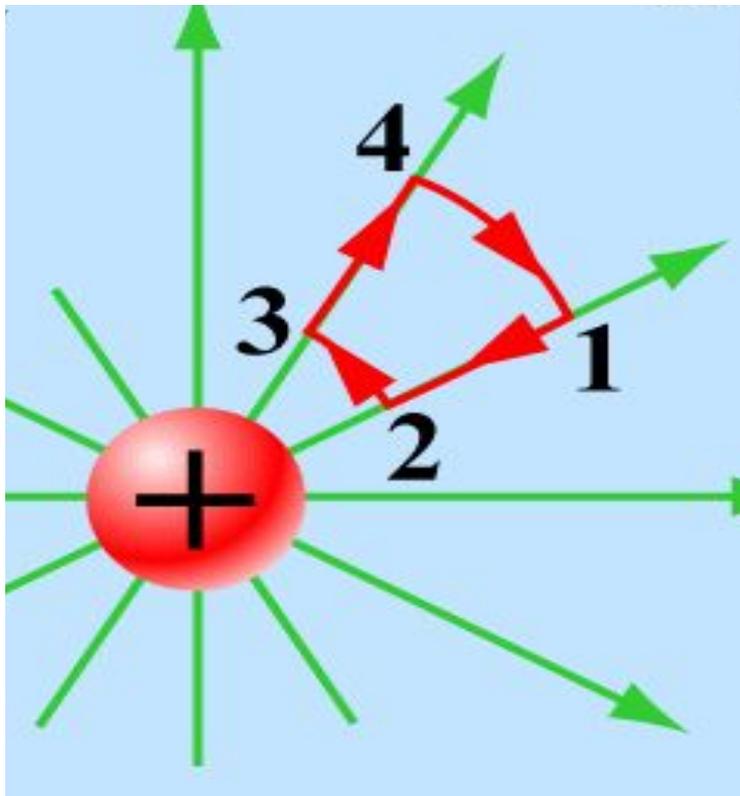
# Электростатическое поле обладает важным свойством:

- 1) Работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории, а определяется только положением начальной и конечной точек и величиной заряда.
- 2) Работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории равна нулю.

Силовые поля, обладающие этим свойством, называют ***потенциальными***

**Работа, совершаемая при перемещении электрического заряда во внешнем электростатическом поле по любому замкнутому пути, равна нулю.**

**Это утверждение справедливо и для неоднородного электростатического поля.**



$$\vec{F} = q\vec{E}$$

# Потенциал

## электрического поля

- Энергетическая характеристика электрического поля.
- Скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии заряда в заданной точке поля к величине этого заряда.
- Потенциал электрического поля измеряется в вольтах.

$$[\varphi] = \frac{[W]}{[q]}$$

$$[V] = \frac{[Дж]}{[Кл]}$$

$$\varphi = \frac{W}{q}$$

**Потенциал равен потенциальной энергией  
единичного положительного заряда,**

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

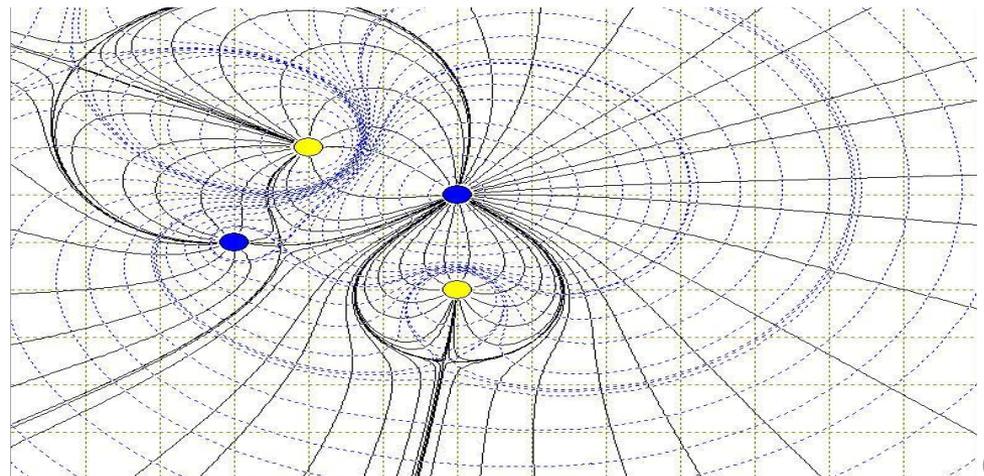
$\varphi$  – потенциал поля в данной точке  
 $W_p$  – энергия заряда в данной точке  
 $q$  – величина заряда

**Знак потенциала  
определяется знаком заряда.**

# Принцип суперпозиции полей

*Если поле создано несколькими зарядами, потенциал в любой точке равен алгебраической сумме потенциалов, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности (с учетом знаков потенциалов).*

$$\varphi = \sum \varphi_i$$



# Потенциальная энергия заряда в электрическом поле. Потенциал

- Потенциальная энергия заряда  $q$ , помещенного в любую точку (1) пространства, относительно фиксированной точки (0) равна работе  $A_{10}$  которую совершит электрическое поле при перемещении заряда  $q$  из точки (1) в точку (0):

$$W_{p1} = A_{10}.$$

- Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении точечного заряда  $q$  из точки (1) в точку (2), равна разности значений потенциальной энергии в этих точках и не зависит от пути перемещения заряда и от выбора точки (0).

$$A_{12} = A_{10} - A_{20} \quad A_{20} = W_{p2} - W_{p0} \quad A_{12} = W_{p1} - W_{p2}$$

Физическую величину, равную отношению потенциальной энергии электрического заряда в электростатическом поле к величине этого заряда, называют потенциалом  $\varphi$  электрического поля:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

**$\Delta\varphi$  -разность потенциалов двух точек электростатического поля – это физическая скалярная величина, определяемая работой, совершаемой кулоновскими силами при перемещении единичного положительного заряда из одной точки в другую.**

**$\varphi$  - потенциал – это работа по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность .**

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$$

- $\varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов электростатического поля
- $A$  – работа электрического поля по перемещению заряда из точки 1 в 2
- $q$  – величина заряда

Потенциал  $\varphi$  является энергетической характеристикой электростатического поля.

Работа  $A_{12}$  по перемещению электрического заряда  $q$  из начальной точки (1) в конечную точку (2) равна произведению заряда на разность потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) начальной и конечной точек:

$$A_{12} = W_{p1} - W_{p2} = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

- В Международной системе единиц (СИ) единицей потенциала является **ВОЛЬТ** (В).  **$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$** .
- Работа в 1 Эв-работа, совершаемая силами поля по перемещению заряда, равного заряду электрона  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл при прохождении  **$\Delta\varphi = 1\text{В}$** .

# **Эквипотенциальные поверхности**

Потенциал  $\varphi$  поля точечного заряда  $Q$  на расстоянии  $r$  от него относительно бесконечно удаленной точки вычисляется следующим образом:

$$\varphi = \varphi_{\infty} = \frac{1}{q} \int_r^{\infty} E dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

Для наглядного представления электрического поля наряду с силовыми линиями используют **эквипотенциальные поверхности**.

Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется **эквипотенциальной поверхностью** или **поверхностью равного потенциала**.

# Связь между напряженностью и потенциалом

$$A = F\Delta x = qE\Delta x$$

**. Работа по перемещению положительного заряда  $q$  из одной точки в другую может быть вычислена как через напряженность**

**поля, так и через потенциал**

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q\Delta\varphi$$

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$$

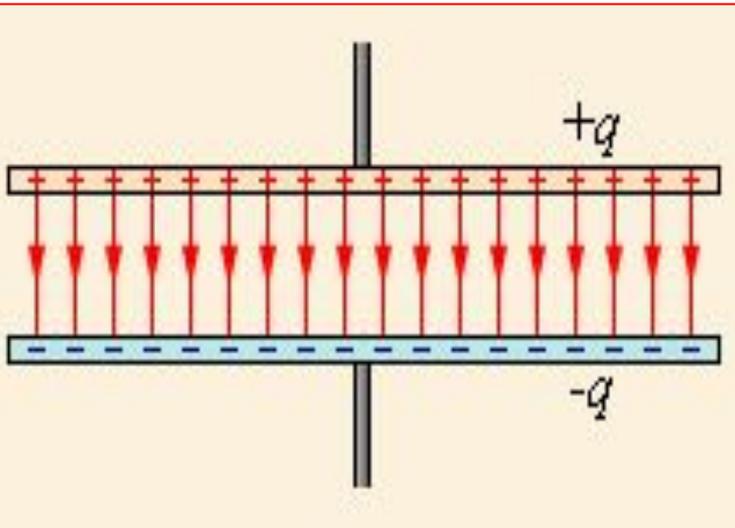
$$E = -grad\varphi$$

$$E = -\frac{d\varphi}{dx}$$

**Знак минус показывает, что вектор напряженности направлен в сторону убывания потенциала.**

# Связь между напряженностью и потенциалом для однородного

поля



$$E = \frac{U}{d}$$

- $E$  – модуль напряженности однородного электрического поля
- $U$  – разность потенциалов между двумя точками, лежащими на силовой линии
- $d$  – расстояние между этими двумя точками

**Однородное электрическое поле**  
**- электрическое поле, напряженность**  
**которого одинакова во всех точках**  
**пространства.**

# Связь между напряженностью и потенциалом. Принцип суперпозиции для потенциалов

Если пробный заряд  $q$  совершил малое перемещение  $\vec{l}$  вдоль силовой линии из точки (1) в точку (2), то можно записать:

$$\Delta A_{12} = qE\Delta l = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q\Delta\varphi,$$

где  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  – изменение потенциала.

Отсюда следует  $E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$ ; ( $\Delta l \rightarrow 0$ ) или  $E = -\frac{d\varphi}{dl}$ .

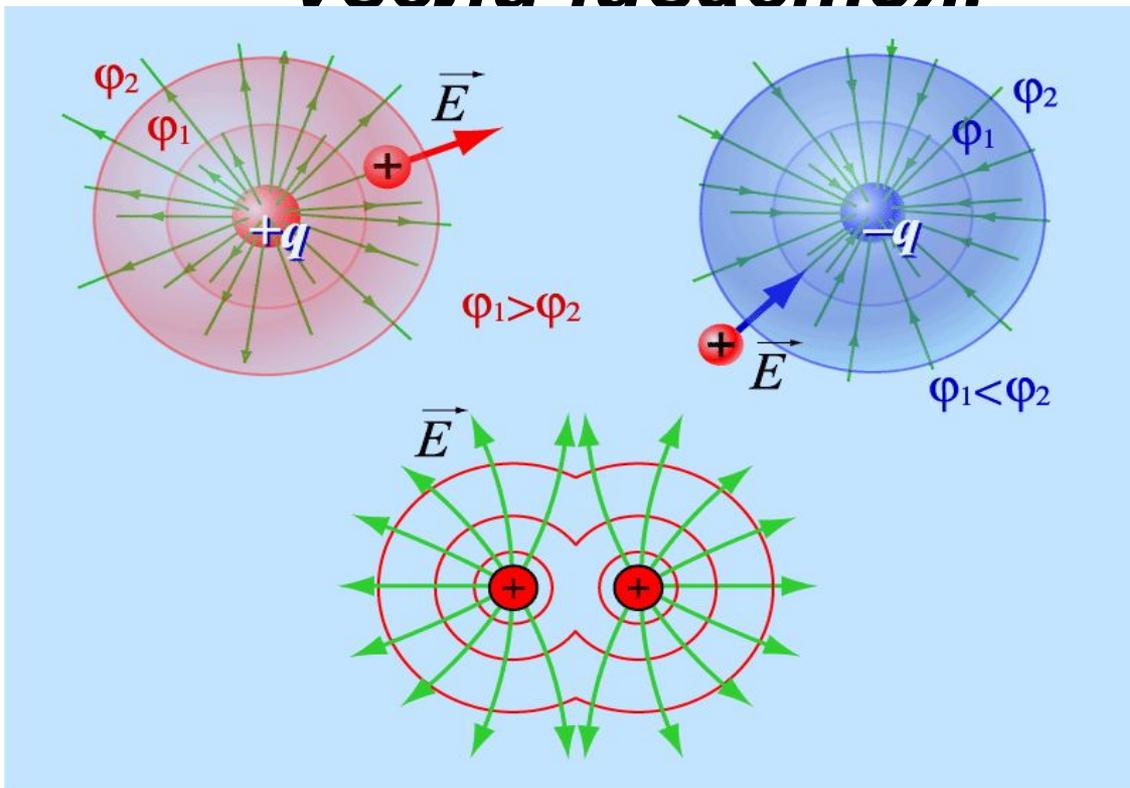
Это соотношение в скалярной форме выражает связь между напряженностью поля и потенциалом. Здесь  $l$  – координата вдоль силовой линии.

Из принципа суперпозиции напряженностей полей, создаваемых электрическими зарядами, следует принцип суперпозиции для потенциалов:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$$

**потенциал поля положительного заряда  
уменьшается при удалении от заряда,  
а потенциал поля отрицательного  
заряда**

**увеличивается.**



**Линии напряженности направлены в сторону  
убывания потенциала.**

# **Эквипотенциальные поверхности**

Потенциал  $\varphi$  поля точечного заряда  $Q$  на расстоянии  $r$  от него относительно бесконечно удаленной точки вычисляется следующим образом:

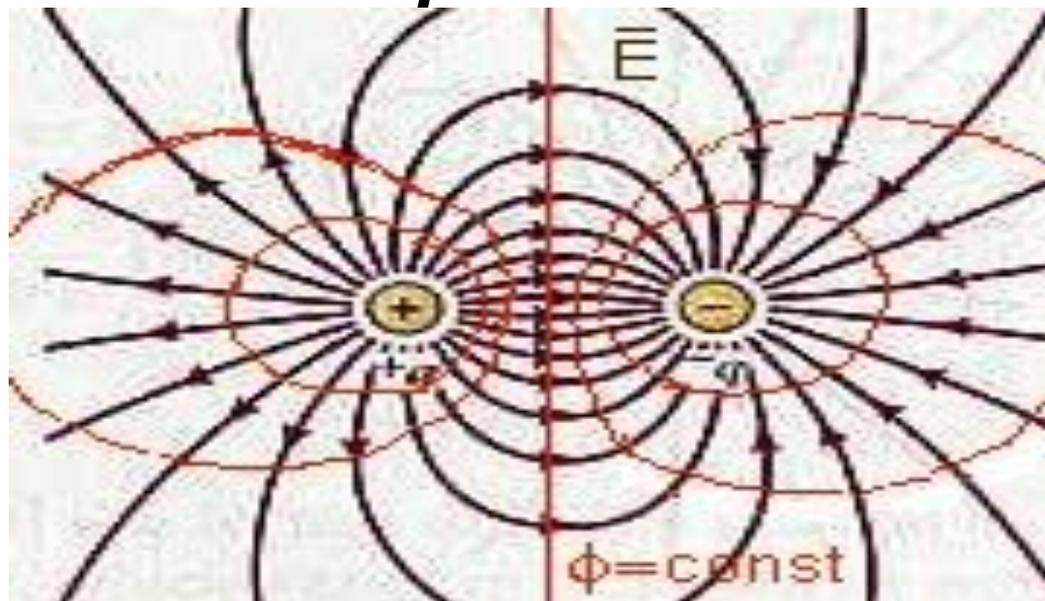
$$\varphi = \varphi_{\infty} = \frac{1}{q} \int_r^{\infty} E dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

Для наглядного представления электрического поля наряду с силовыми линиями используют **эквипотенциальные поверхности**.

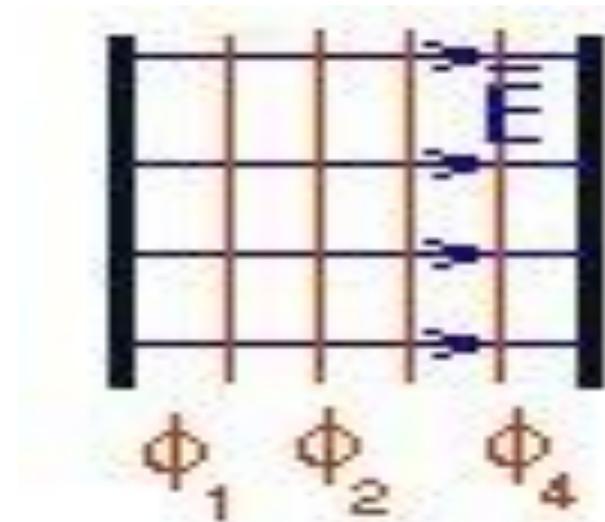
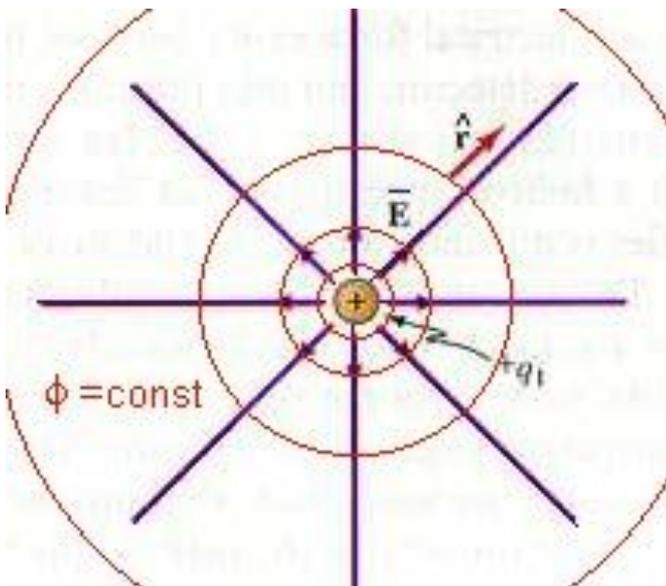
Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется **эквипотенциальной поверхностью** или **поверхностью равного потенциала**.

**Эквипотенциальная  
поверхность- это  
поверхность, во всех точках которой  
потенциал электрического поля имеет  
одинаковое значение.**

**Эквипотенциальные поверхности замкнуты  
и  
не пересекаются.**



**Работа сил электрического поля при любом перемещении заряда по любой эквипотенциальной поверхности равна нулю. Линии напряженности электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальной поверхности.**

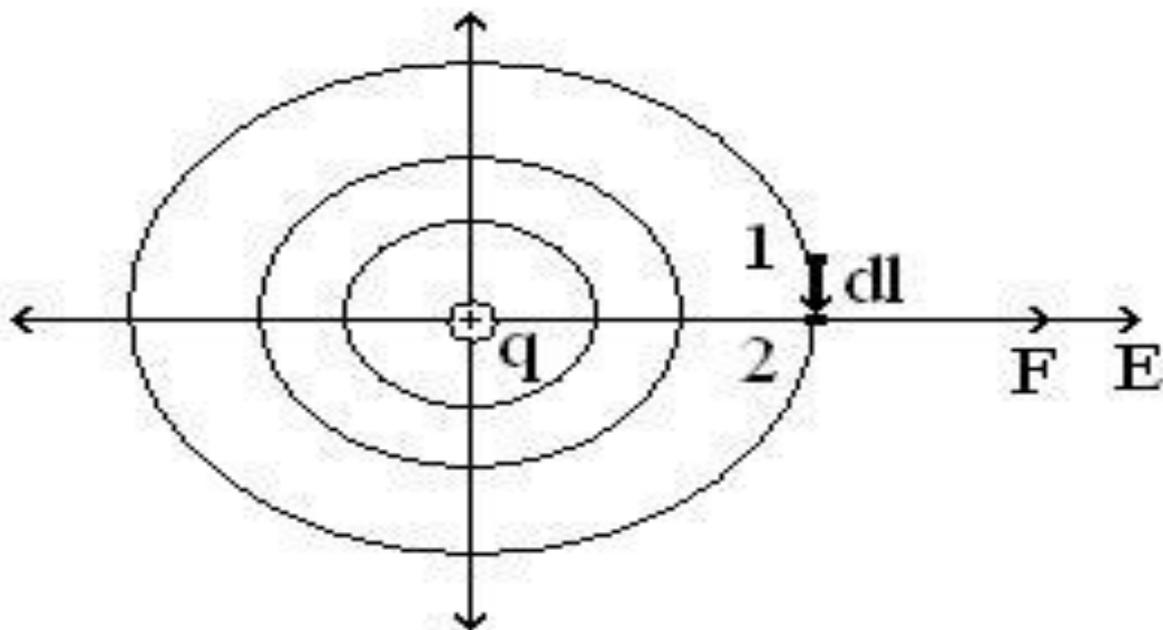


Для графического изображения распределения потенциала электростатического поля, пользуются **ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**- поверхностями, во всех точках которых потенциал имеет одно и то же значение.

Если поле создается точечным зарядом, то его потенциал, согласно формуле .

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

**Таким образом, эквипотенциальные поверхности в данном случае - концентрические сферы и линии напряженности в случае точечного заряда *перпендикулярны* эквипотенциальным поверхностям**



Работа электрического поля по перемещению электрического заряда вдоль эквипотенциальной поверхности равна

$$dA = q_0 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$$

т.к. поверхность эквипотенциальная, то

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{l} = E \cdot q_0 \cdot \cos \alpha = 0$$

где угол  $\alpha$  – угол между действующей электрической силой  $F$  и перемещением  $l$  (вдоль эквипотенциальной поверхности). ,

следовательно

***линии напряженности всегда нормальны к эквипотенциальным поверхностям.***

Эквипотенциальных поверхностей вокруг каждого заряда и каждой системы зарядов можно провести бесчисленное множество.

Однако их обычно проводят так, чтобы разности потенциалов между любыми двумя соседними эквипотенциальными поверхностями были одинаковы.

Тогда густота эквипотенциальных поверхностей наглядно характеризует напряженность поля в разных точках.

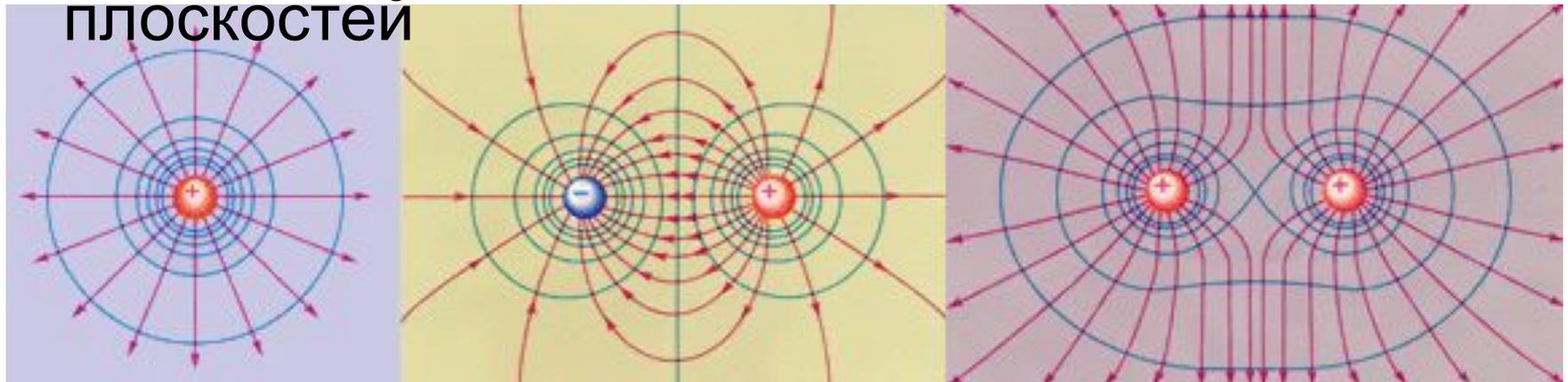
Там, где эти поверхности расположены гуще, напряженность поля больше.

**Силовые линии** электрического поля всегда **перпендикулярны** **эквипотенциальным поверхностям**.

Эквипотенциальные поверхности кулоновского поля точечного заряда – концентрические сферы.

В случае однородного поля эквипотенциальные поверхности представляют собой систему параллельных

плоскостей



# ***Электроемкость***

потенциал уединенного проводника пропорционален находящемуся на нем заряду:  $q = C\varphi$

- Коэффициент пропорциональности  $C$ , показывающий, какой по величине электрический заряд нужно сообщить проводнику, чтобы потенциал его поверхности равнялся 1В - *называется электроемкостью уединенного проводника*,  $C = q / \varphi$ .

За единицу емкости принимается *фарад*,  $[C] = \Phi$ .

- Это емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда в 1 Кл.
- Емкостью в 1 Ф обладал бы уединенный шар радиусом, в 1500 раз большим радиуса Земли.

емкость плоского конденсатора с площадью обкладки  $S$  и расстоянием  $d$  между обкладками  $C_{пл\ конд} = \epsilon_0 \epsilon S/d$

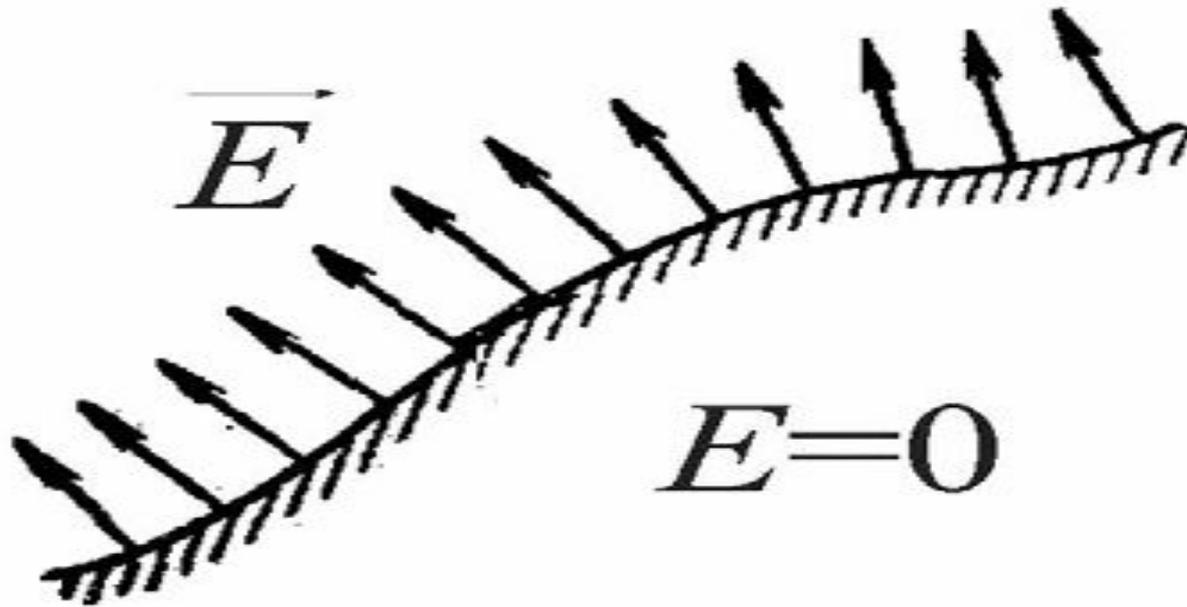
емкость шара радиусом  $R$ , погруженного в безграничный однородный и изотропный диэлектрик с проницаемостью  $\epsilon$ :

$$C_{шара} = 4\pi \epsilon_0 \epsilon R.$$

# ***Проводники в электростатическом поле***

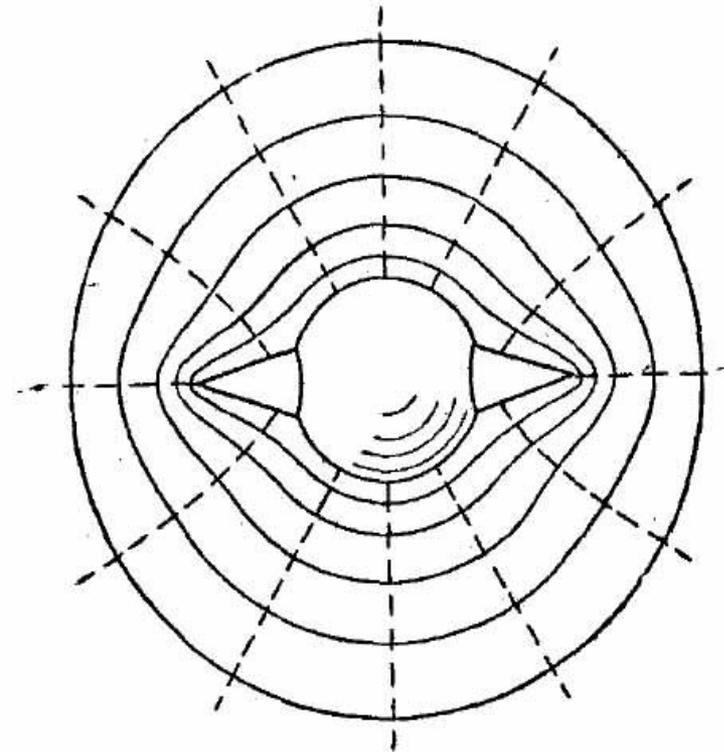
- ***Условия равновесия зарядов на проводнике***
- 1) напряженность поля внутри проводника
- должна быть равна нулю:
- 2) напряженность поля на поверхности проводника должна в каждой точке быть направлена по нормали к поверхности:

Первое условие означает, что потенциал внутри проводника должен быть постоянным. Из второго условия следует, что в случае равновесия зарядов поверхность проводника является эквипотенциальной



На больших расстояниях от заряженного проводника любой формы эквипотенциальные поверхности имеют характерную для поля точечного заряда форму сферы

Плотность заряда растёт с увеличением положительной кривизны (выпуклости) поверхности и убывает с увеличением отрицательной кривизны (вогнутости). Особенно велика бывает плотность заряда на остриях.



Индуцированные заряды располагаются на внешней поверхности проводника.

- Если внутри проводника имеется полость, то при равновесном распределении индуцированных зарядов поле внутри нее равно нулю. На этом основывается электростатическая защита.
- Когда какой-то прибор хотят защитить от воздействия внешних полей, его окружают проводящим экраном. Внешнее поле внутри экрана компенсируется возникающими на его поверхности индуцированными зарядами.

# **Энергия электрического поля**

- Постоянные поля и обуславливающие их заряды не могут существовать независимо друг от друга.
- Энергия заряженного проводника локализована в окружающем его электростатическом поле и распределена в нем с различной объемной плотностью.

$$w = dW/dV = E^2 \epsilon_0 \epsilon / 2 = ED \epsilon_0 \epsilon / 2 = D^2 \epsilon_0 \epsilon / 2 \epsilon_0 \epsilon$$

