Лекция 1 (2021-2022)

Учебники

Трофимова Т.И. **Курс физики**.
Савельев И.В. **Курс физики**. 3-тома
Том 2. Электричество· Колебания и волны· Волновая оптика.
Сивухин Д.В. **Общий курс физики**. Том III. Электричество

Иродов И.Е. **Электромагнетизм**. Основные законы
Огурцов А.Н. **Лекции по физике** (Интернет)

Задачники

Трофимова Т.И. «Сборник задач по курсу ФИЗИКИ для втузов»

Задачники (*решение некоторых задач есть в ответах*)

Волькенштейн В.С. «Сборник задач по общему курсу физики»
Иродов И.Е. «Сборник задач по общей физике»
Савельев И.В. «Сборник вопросов и задач по общей физики»
Сборник задач по общему курсу физики. В 5 кн. Кн. 1. «Механика»

Задачники с примерами решений задач.

Трофимова Т.И., Фирсов А.В. «Курс физики. Задачи и решения».
Чертов А.Г., Воробьев А.А. «Задачник по физике»

Электростатика

1. Введение

Электростатика - раздел учения об электричестве, изучающий взаимодействие неподвижных электрических зарядов.

Электрический заряд - это внутреннее свойство тел или частиц, характеризующее их способность к электромагнитным взаимодействиям.

Единица электрического заряда - кулон (Кл) – электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 ампер за время 1 сек, т.е. производная единица системы СИ.

Это большая единица. Два точечных заряда в один кулон каждый, удаленные друг от друга на расстояние 1 км, взаимодействовали бы с силой 9000 Н.

Точечный электрический заряд – физическая модель - заряженное тело, форма и размеры которого несущественны в данной задаче.

Элементарный (минимальный) электрический заряд

$$e=1,6\cdot 10^{-19}\ Кл\ .$$

Носители элементарных зарядов

$$m_e = 9,11\times 10^{-31}\ кг$$

$$m_p = 1,67\times 10^{-27}\ кг$$

Фундаментальные свойства электрического заряда :

-***положителен*** **или** ***отрицателен.*** Одноименные заряды отталкиваются, разноименные - притягиваются.

-***инвариантен -*** одинаков во всех системах отсчета, т.е. заряда не зависит от системы отсчета и от того движется заряд или покоится.

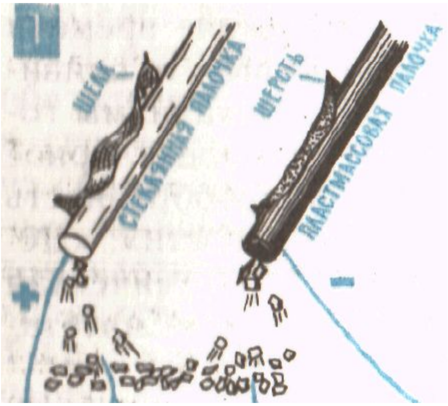
- ***дискретен -*** заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда

- ***аддитивен*** - заряд любой системы тел равен сумме зарядов тел.

Все тела способны **электризоваться**, т.е. приобретать электрический заряд.

Процесс электризации - разделение зарядов, т.е. на одном из тел (части тела) появляется избыток положительного заряда, а на (или другой части тела) – избыток отрицательного заряда.

Электризация может осуществляться: **соприкосновением - при трении** или **электростатической индукцией.**



Принято считать!!!
При трении шелка о стеклянную палочку возникают **«+»-заряды**

При трении шерсти о пластмассовую палочку возникают **«-»-заряды**

Закон сохранения электрического заряда

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри данной системы.

P.S. Замкнутая система – это система не обменивается зарядами с внешними телами.

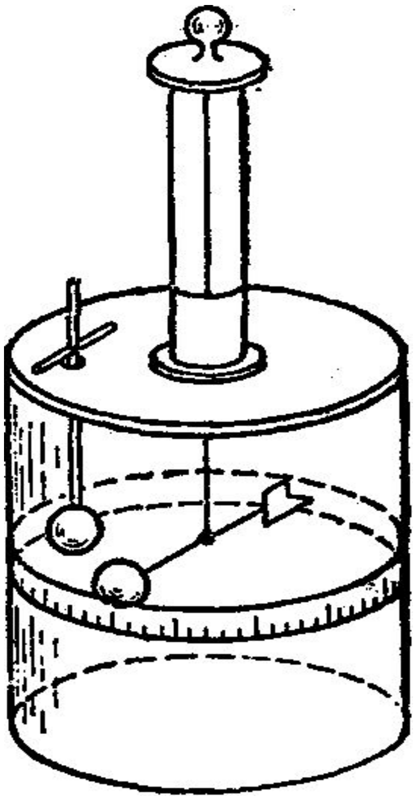
Любое тело можно представить как совокупность точечных зарядов.
Если размеры этих зарядов устремить к нулю, то будем иметь дело с плотностью.

В этом случае заряды *распределены в заряженном теле непрерывно.*
Пользуются понятиями ***линейной*** (например, в случае заряженного тонкого стержня) *,* ***поверхностной*** (например, в случае заряженной пластины) *и* ***объемной*** *(например, куб, шар) плотностей зарядов,* соответственно*:*

$$\lambda = \frac{dq}{dl}, \quad \sigma = \frac{dq}{dS}, \quad \rho = \frac{dq}{dV}$$

2. ЗАКОН КУЛОНА

Экспериментальный Закон взаимодействия точечных зарядов -Кулон 1785 г.



Крутильные весы Кулона.

На закрепленной одним концом в головке прибора упругой нити был подвешен за середину горизонтально расположенный изолирующий стержень.

На конце стержня укреплялся металлический шарик, уравновешенный противовесом на другом конце стержня.

По закручиванию нити измерялась сила взаимодействия несущего заряд шарика на коромысле с точно таким неподвижным заряженным шариком.

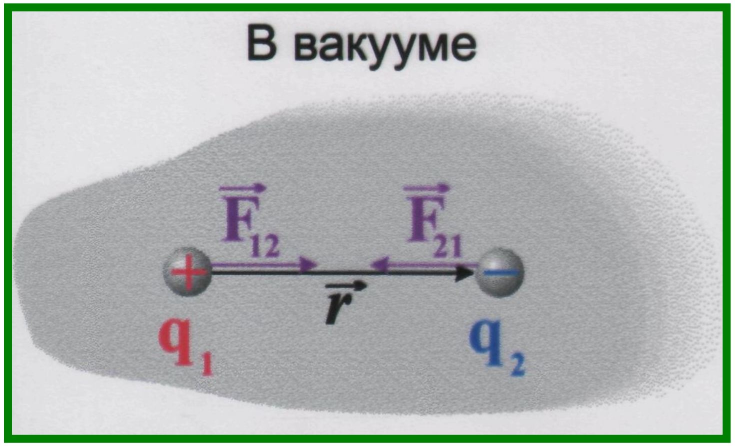
Поворотом головки можно было изменять расстояние между шариками.

При проведении опыта Кулон исходил из того, что **при касании к заряженному металлическому шарику точно такого же незаряженного шарика заряд распределяется между шариками поровну.**

Так он имел возможность определять относительные заряды шариков.

Закон Кулона: сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, *находящимися в вакууме,* пропорциональна зарядам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Сила направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, т.е. является центральной, и для разноименных зарядов F<0 (притяжение), для одноименных зарядов F>0 (отталкивание).



$$F = F_{12} = F_{21} = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

k – коэффициент пропорциональности;

$$k = \frac{Н \quad м}{Кл\,\varepsilon_0} = 9\cdot 10^{9}\,\frac{\cdot \quad ^{2}}{^{2}}$$

ε_0 – электрическая постоянная (фундаментальная физическая величина)

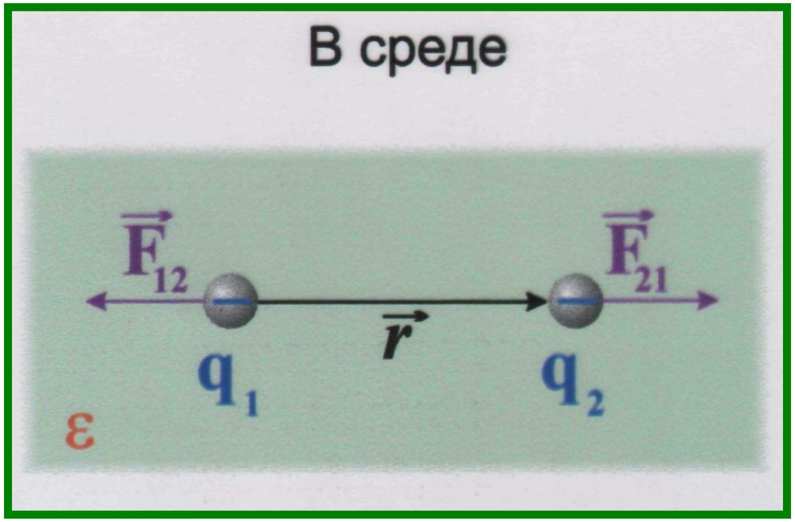
$\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot 10^{-12}\,\frac{Кл^2}{Н\cdot м^2}$ или $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot 10^{-12}\,\frac{Ф}{м}$

где **Ф** (фарада) - единица электрической емкости.

Векторная форма закона Кулона взаимодействующих зарядов в вакууме

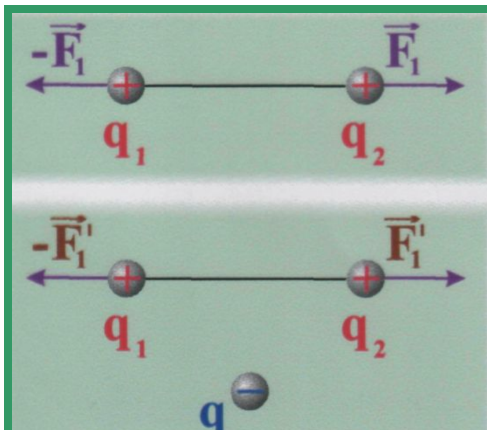
$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\frac{\vec{r}_{12}}{r}$$

Опыт показал, что всегда $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$.
независимо есть ли вблизи 3-ий заряд или нет



$$F_e = F_{12} = F_{21} = k\frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2}$$

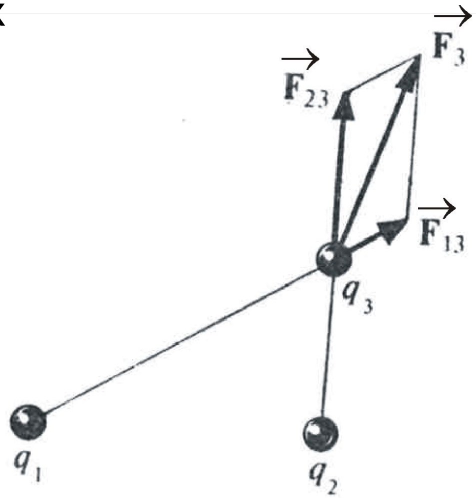
ε - диэлектрическая проницаемость среды - безразмерная величина, показывающая во сколько раз сила взаимодействия ***F*** между зарядами в данной среде меньше их силы взаимодействия F_0 в вакууме

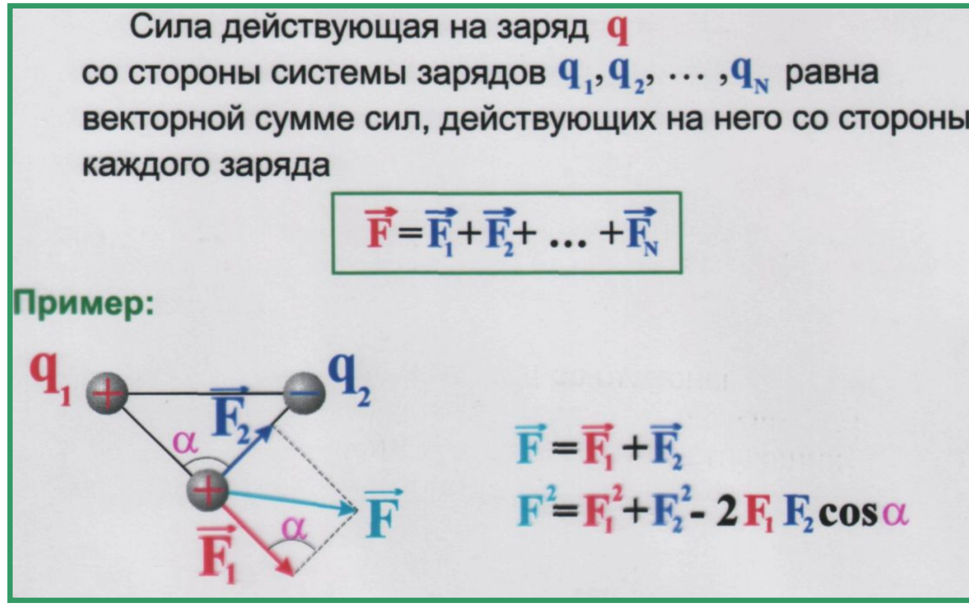


Опыт показал -
сила взаимодействия
зарядов q_1 и q_2
не зависит от того,
- есть ли вблизи
них третий заряд q

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

На 3- заряд, находящийся в вблизи двух других зарядов всегда действует сила, представляющая **векторную сумму** этих двух





Сила действующая на заряд q со стороны системы зарядов $q_1, q_2, \dots, q_N$ равна векторной сумме сил, действующих на него со стороны каждого заряда

$$\boxed{\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N}$$

Пример:

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

$$F^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2 F_1 F_2 \cos\alpha$$

Это сформулирован принцип суперпозиции сил

3. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Согласно современным представлениям:

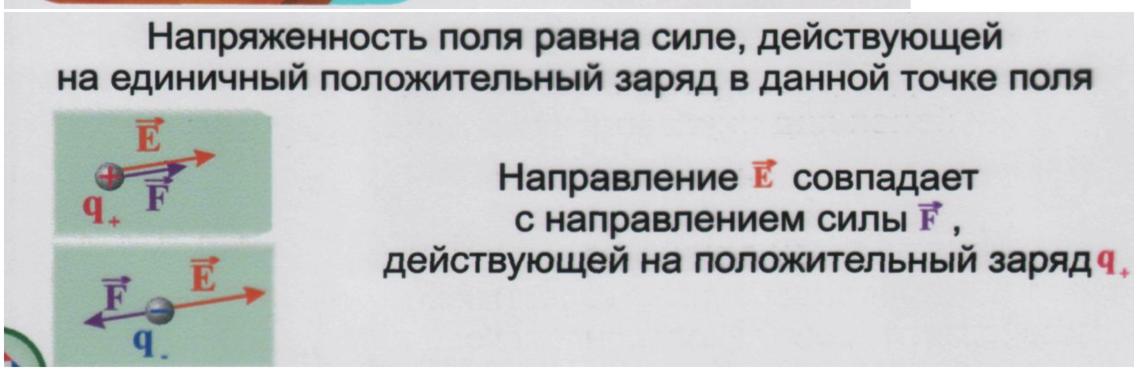
Взаимодействие **неподвижных зарядов** осуществляется электростатическим полем. Заряд возбуждает в окружающем его пространстве электрическое поле. ..

На помещенный в какую-либо его точку заряд $q_{пробный}$ действует сила. Величина силы, действующей на заряд, будет характеризовать «интенсивность» поля.

Эта силовая характеристика поля– **напряженность электрического поля.** Она является векторная величина и определяется как:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} \Rightarrow \vec{E} = \frac{1}{4\ \varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\vec{e}_r$$

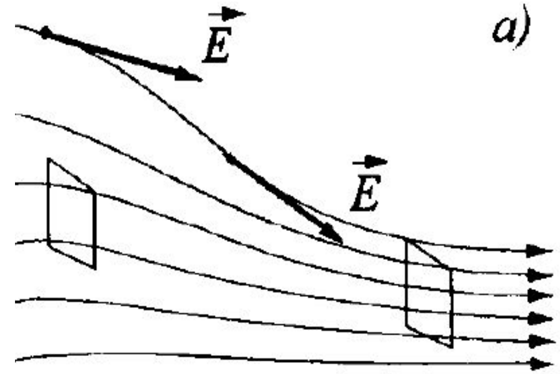
Красный цвет – это вектор !!!



$\vec{E} = \sum \vec{E}_i$ - принцип суперпозиции полей, т.е. наложения электрических полей

Принцип позволяет рассчитать электростатические поля любой системы неподвижных зарядов, представив ее в виде совокупности точечных зарядов. Сложение векторных полей это геометрическое сложение полей должны учитывать и направление.

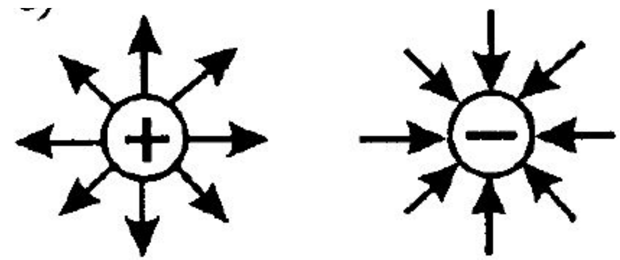
Графически напряженность электростатического поля представляется в виде – **линий напряженности** **(силовых линий)**



Они направлены по направлению вектора ***E***, касательные к ним в каждой точке совпадают с направлением вектора ***E***.

Линии напряженности могут иллюстрировать не только направление ***E***, но и его значение для этого линии проводят с определенной густотой.

Вектор напряженности поля: положительного заряда направлен во внешнее пространство; **отрицательного заряда** направлен к заряду



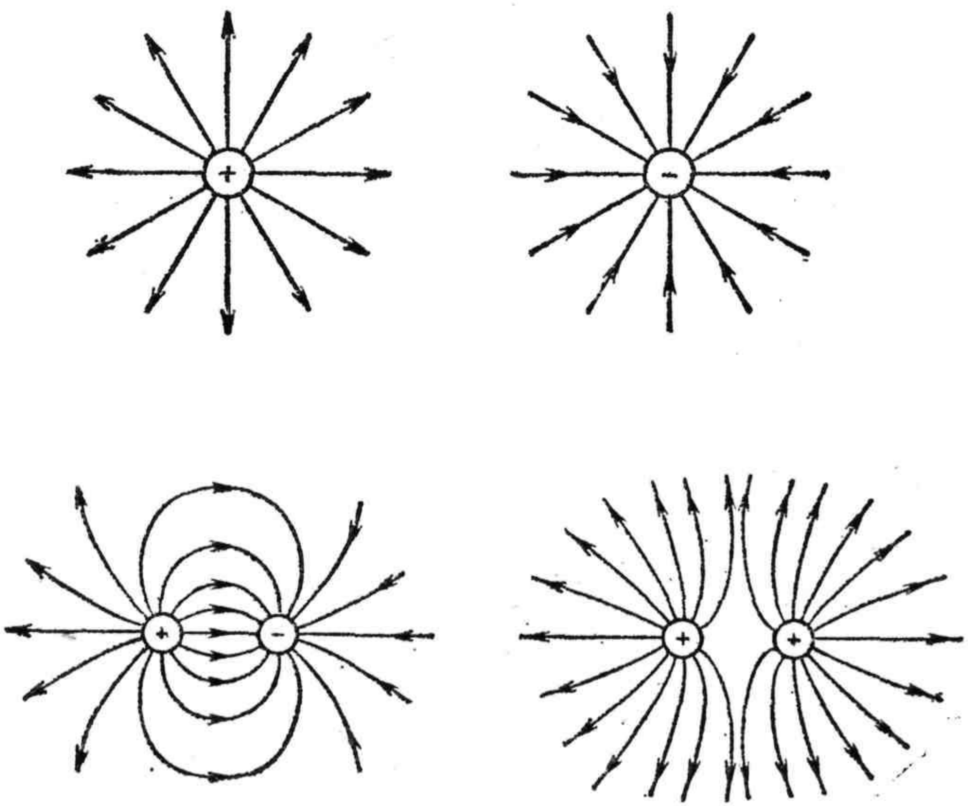
Для однородного поля линии напряженности параллельны вектору напряженности (вектор Е постоянен по модулю и направлению).

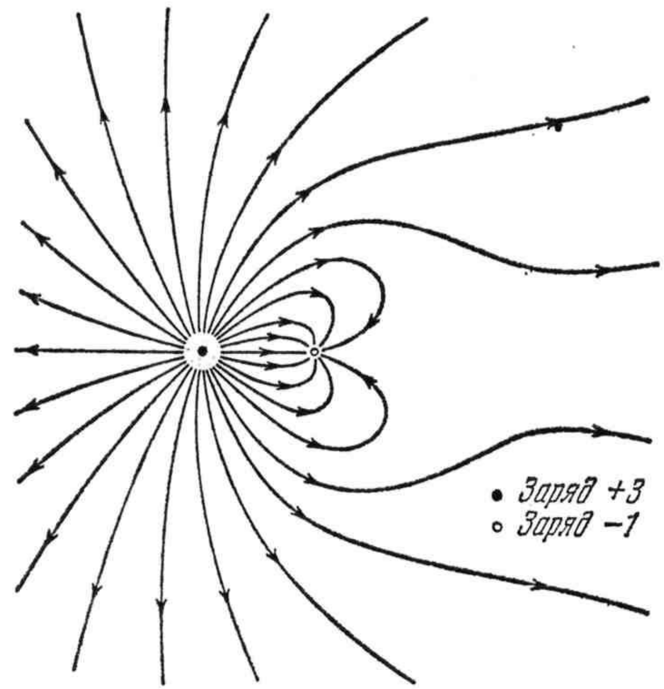
В пространства ***E*** имеет одно направление (принцип суперпозиции), следовательно, **линии напряженности никогда не пересекаются.**

густота линий отражает соотношение напряженностей электростатического поля

Число линий напряженности пронизывающих единицу площади поверхности, перпендикулярную линиям напряженности, должно быть равно модулю вектора напряженности ***E.***

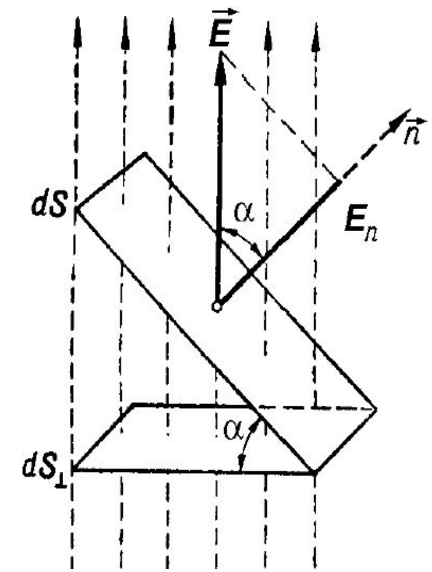
Иллюстрации:





4. Поток вектора напряженности

<u>***Элементарным потоком вектора напряженности***</u> через элементарную площадку *dS* называется скалярная величина:



$$\Phi_E = \left(\vec{E} \cdot d\vec{S}\right) = E\ dS\ \cos\alpha = E \cdot \cos\alpha\, dS = E_n\, dS$$

$\vec{E}$ – вектор напряженности электростатического поля;

E_n –проекция вектора $\vec{E}$ на нормаль $\vec{n}$ к площад ке dS.

$d\vec{S}$ - вектор, модуль которго равен dS, а направление совпадает с направлением нормали $\vec{n}$ к площадке.

Значок "d " означает предельно малую величины, соответсствующей физической величины dS-площади,

$d\Phi$ – вектора напряженности, и представляет дифференциал, позволяющий эту величину интегрировать.

Поток вектора через произвольную конечную поверхность представляется:

$$\boldsymbol{\Phi_E = \int_S E \cdot cos\alpha \cdot dS = \int_S E_n \cdot dS = \int_S \left(\vec{E}\, d\vec{S}\right)}$$

Поток вектора ***E*** сквозь произвольную **замкнутую** поверхность S

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S \vec{E}\, \overrightarrow{dS}$$

1) Что означает dS, $d\Phi_E$?

Знак d - означает дифференциал, т.е. бесконечно малое значение, соответствующей физической величины.

Если $y = y(x)$, то можно ввести понятие производной $y' = \dfrac{dy}{dx}$.

Производная вводится как $y' = \lim\limits_{x \to 0} \dfrac{\Delta y}{\Delta x} = \dfrac{dy}{dx}$; $\Delta y, \Delta x$ – конечные значения функции и ее аргумента, соответственно. Здесь d - также означает дифференциал.

<u>Аналогия в физике</u>. Положение точки в пространстве задается радиусом - вектором $\vec{r}$.

Быстрота изменения ее положения в пространстве называется скоростью.

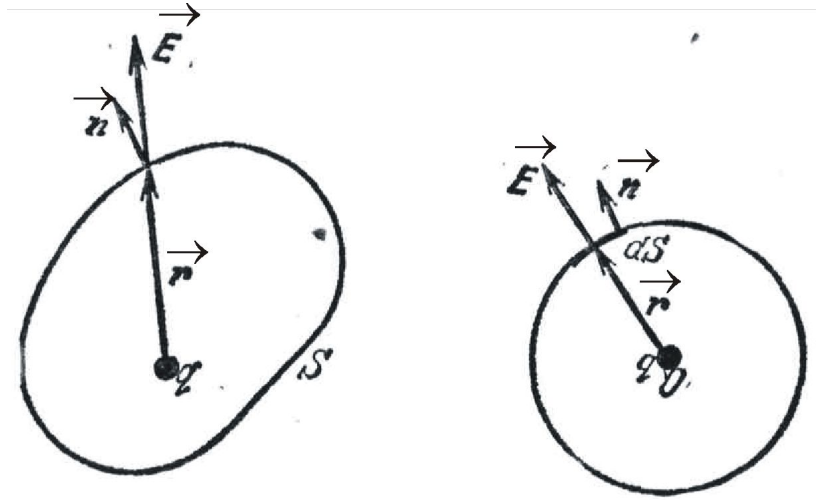
Мгновенная скорость определяется как $\vec{\upsilon} = \vec{r}\,' = \lim\limits_{t \to 0} \dfrac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \dfrac{d\vec{r}}{dt}$.

2) В физике принято считать **площадь вектором**, его направление, как вектора, есть нормаль к площадке, поэтому $d\vec{S}$.

3) Записать $d\Phi_E = \left(\vec{E} \cdot d\vec{S}\right) = E\,dS\cos\alpha = \underbrace{E\cos\alpha}_{E_n} \cdot dS = E_n\,dS$

скалярное произведение двух векторов.

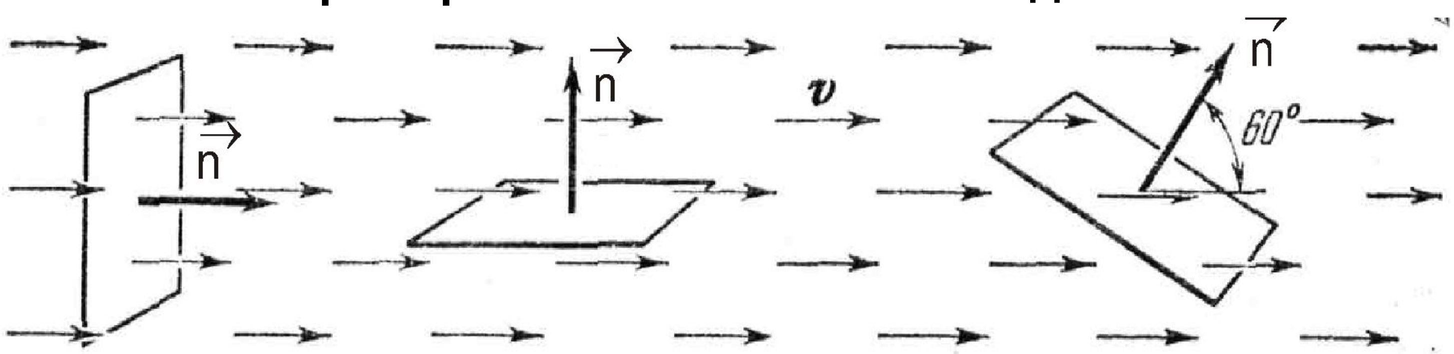
За **положительную нормаль** к поверхности $\boldsymbol{S}$ принимают внешнее направление, т.е. наружу.



Поток вектора напряженности является **скалярной величиной** и складывается алгебраически, в отличие векторов напряженности электрического поля.

Последние складываются от геометрически

Пример-аналогия с потоком жидкости

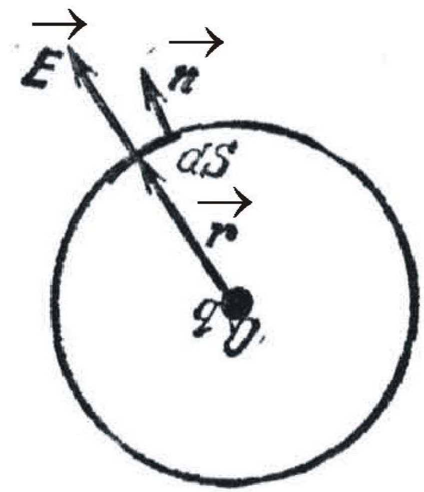


Поток = vn Поток = 0 Поток = vn cos 60°

5. Теорема Гаусса

Эта теорема определяет **поток вектора напряженности электрического поля** через произвольную замкнутую поверхность.

Случай №1 . Поток вектора напряженности ***E*** через сферическую поверхность радиуса ***r***, охватывающую точечный заряд +***q***, находящийся в ее центре равен:



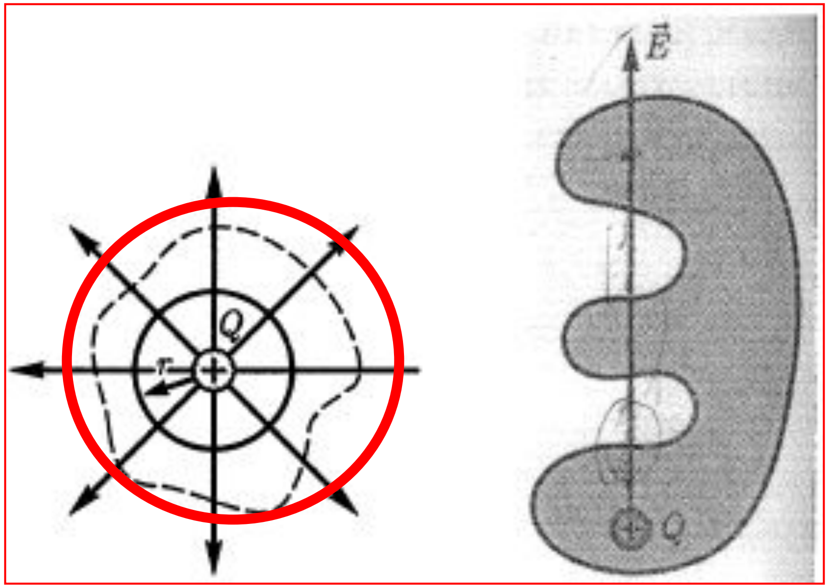
$$\Phi_E = \oint_S E \cdot dS = \oint_S \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\frac{q}{} dS =$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\oint_S dS = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\frac{q}{} 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

Данный рисунок изображение шара на плоскости

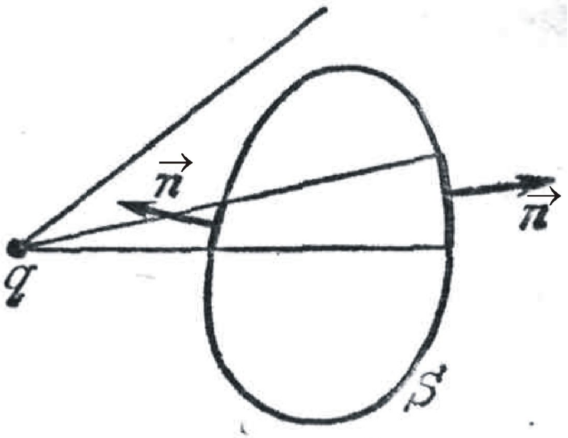
Это выражение справедливо *для любой замкнутой поверхности,* охватывающей заряд.

Действительно, если окружить сферу произвольной замкнутой поверхностью (см.рис.) , то каждая линия напряженности, пронизывающая сферу, пройдет и сквозь эту поверхность.



Нечетное число пересечений при вычислении потока в конечном счете сводится к одному пересечению, так как поток считается **положительным,** если линии напряженности выходят из поверхности, и **отрицательным** для линий, входящих в поверхность.

Если замкнутая поверхность не охватывает заряда, то поток сквозь нее равен нулю, так как число линий напряженности, входящих в поверхность, равно числу линий напряженности, выходящих из нее.



Теорема Гаусса *для электростатического поля в вакууме, поток вектора напряженности электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленных на* ***ε_0*****.**

В общем случае произвольной поверхности, окружающей ***n*** зарядов:

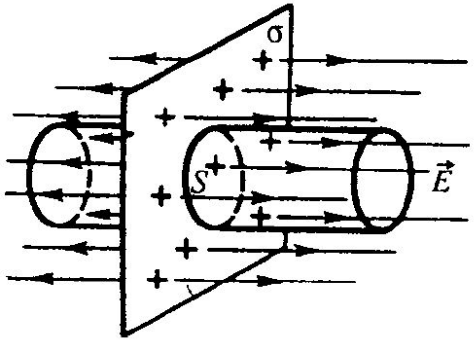
$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S \left(\sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i \right) \cdot \overrightarrow{dS} = \sum_{i=1}^{n} \oint_S \vec{E}_i \overrightarrow{dS} = \sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{n} q_i$$

Для заряда распределенного в пространстве с объемной плотностью теорема Гаусса:

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV$$

6. Применения теоремы Гаусса

1. ***Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости:*** $+\sigma = dq/dS$.



Мысленно представим, что плоскость пронизывает замкнутый цилиндр и заключенный в нем заряд равен: $q = \sigma S_{КРУГ}$.

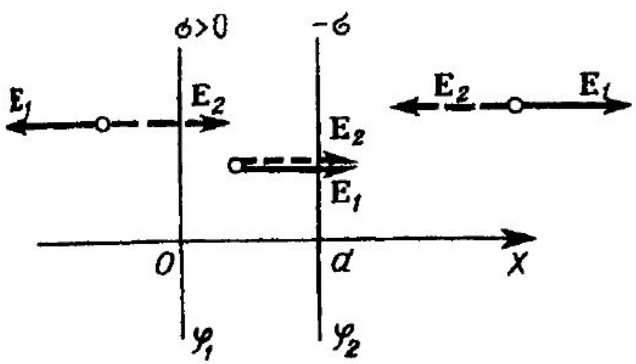
Полный поток напряженности поля, создаваемого этими зарядами, в обе стороны от поверхности, и проходящий через поверхность цилиндра равен: $\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} = \vec{E} \cdot 2S_{КРУГ}$

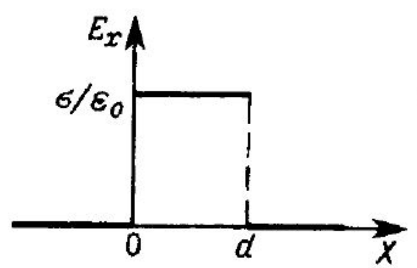
Используем теорему Гаусса - полный поток через замкнутую поверхность равен: $\vec{E} \cdot 2S_{КРУГ} = \dfrac{\sigma \cdot S_{КРУГ}}{\varepsilon_0}$

или $E = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}$

Видно ***E*** не зависит от длины цилиндра и <u>напряженность поля на любых расстояниях одинакова по модулю</u>. Поле - *однородно.*

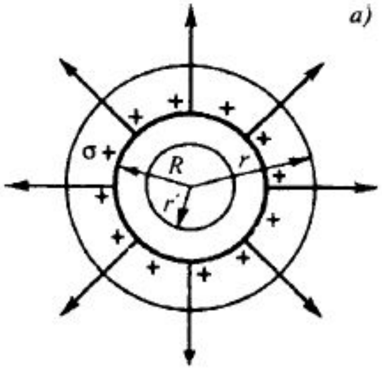
2. ***Поле двух бесконечных параллельных разноименно заряженных плоскостей с равными по абсолютному значению поверхнос. плотность зарядов σ > 0 и - σ.***





$E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$

Поле между плоскостями однородное



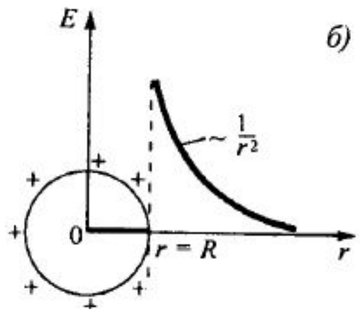
3. *Поле равномерно заряженной сферической поверхности R- радиус сферы*

$$\sigma = \frac{q}{4\pi R^2}$$

В качестве Гауссовой поверхности берем сферу радиуса r имеющую общий центр с заряженной сферой.

Напряженность. Если $r > R$, то весь заряд в сфере:

$$4\pi r^2 E = \frac{q}{\varepsilon_0}, \text{ откуда } \quad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2} = \frac{\sigma R^2}{\varepsilon_0 r^2}, \quad (r \ge R)$$



Если $r < R$, в сфере заряда нет: $E = 0$

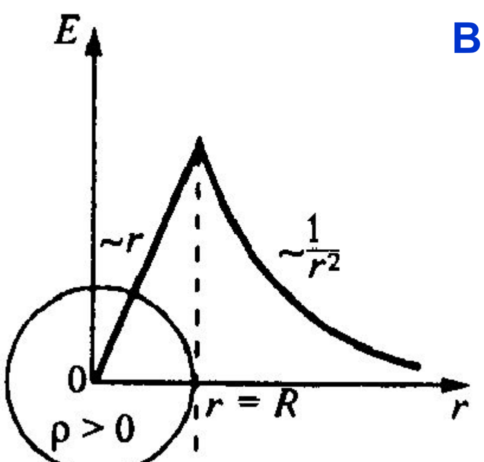
---

4. *Поле равномерно объемно заряженного шара R- радиус шара*

$$\rho = \frac{q}{V} = \frac{q}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

Вне шара $r > R$ $\quad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2},$

На поверхности шара $r = R$ $\quad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R^2} = \frac{\rho R}{3\varepsilon_0},$



Внутри шара $r < R$. Заряд $\quad q = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$

Согласно теореме Гаусса:

$$4\pi r^2 E = \frac{q}{\varepsilon_0} = \frac{4\pi r^3 \rho}{3\varepsilon_0} \quad E = \frac{qr}{4\pi\varepsilon_0 R^3} = \frac{\rho r}{3\varepsilon_0},$$