

# Электростатика

**Кузнецов Сергей Иванович**  
доцент кафедры ОФ ЕНМФ ТПУ

# **Тема 2. ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСКОГО-ГАУССА**

**2.1. Силовые линии электростатического поля**

**2.2. Поток вектора напряженности**

**2.3. Теорема Остроградского-Гаусса**

**2.4. Дифференциальная форма теоремы**

**Остроградского-Гаусса**

**2.5. Вычисление электростатических полей с помощью теоремы Остроградского - Гаусса**

**2.5.1. Поле бесконечной однородно заряженной плоскости**

**2.5.2. Поле двух равномерно заряженных плоскостей**

**2.5.3. Поле заряженного бесконечного цилиндра (нити)**

**2.5.4. Поле двух коаксиальных цилиндров с одинаковой линейной плотностью заряда, но разным знаком**

**2.5.5. Поле заряженного пустотелого шара**

**2.5.6. Поле объемного заряженного шара**

# 2.1. Силовые линии электростатического поля

- ◆ Теорема Остроградского-Гаусса, которую мы докажем и обсудим позже, устанавливает связь между электрическими зарядами и электрическим полем. Она представляет собой более общую и более изящную формулировку закона Кулона.



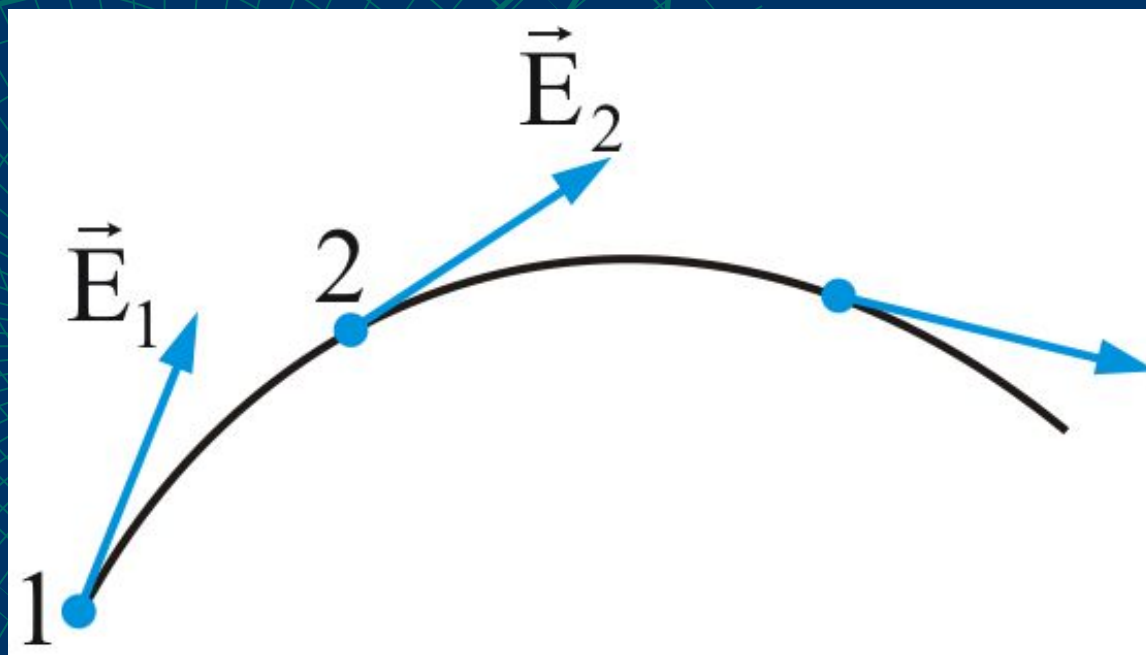
- ◆ **Остроградский Михаил Васильевич (1801 – 1862)**
- ◆ отечественный математик и механик. Учился в Харьковском университете (1816 – 1820), совершенствовал знания в Париже (1822 – 1827).
- ◆ Основные работы в области математического анализа, математической физики, теоретической механики. Решил ряд важных задач гидродинамики, теории теплоты, упругости, баллистики, электростатики, в частности задачу распространения волн на поверхности жидкости (1826 г.). Получил дифференциальное уравнение распространения тепла в твердых телах и жидкостях. Известен теоремой Остроградского-Гаусса в электростатике (1828 г.).



- ◆ **Гаусс Карл Фридрих (1777 – 1855)** немецкий математик, астроном и физик.
- ◆ Исследования посвящены многим разделам физики.
- ◆ В 1832 г. создал абсолютную систему мер (СГС), введя три основных единицы: единицу времени – 1 с, единицу длины – 1 мм, единицу массы – 1 мг.
- ◆ В 1833 г. совместно с В. Вебером построил первый в Германии электромагнитный телеграф.
- ◆ Еще в 1845 г. пришел к мысли о конечной скорости распространения электромагнитных взаимодействий. Изучал земной магнетизм, изобрел в 1837 г. униполярный магнитометр, в 1838 г. – бифилярный. В 1829 г.
- ◆ Сформулировал принцип наименьшего принуждения (принцип Гаусса).
- ◆ Один из первых высказал в 1818 г. предположение о возможности существования неевклидовой геометрии.

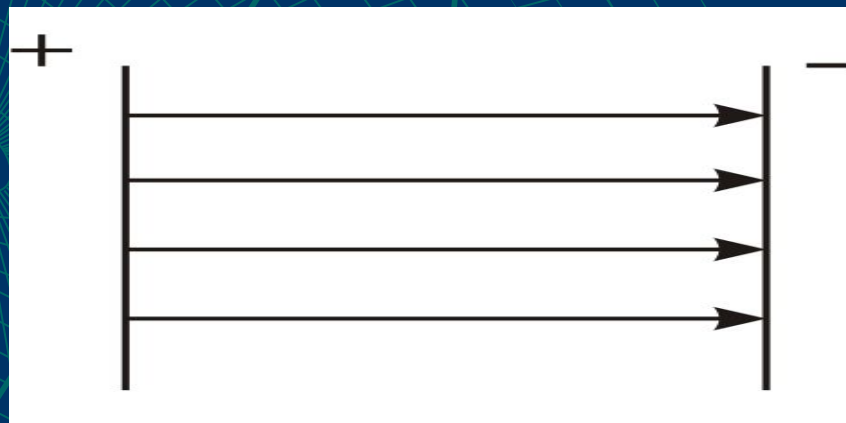
- ◆ Основная ценность теоремы Остроградского-Гаусса состоит в том, что она позволяет *глубже понять природу электростатического поля и устанавливает более общую связь между зарядом и полем.*

- ◆ **СИЛОВЫЕ ЛИНИИ** – ЭТО ЛИНИИ, касательная к которым в любой точке поля совпадает с направлением вектора напряженности



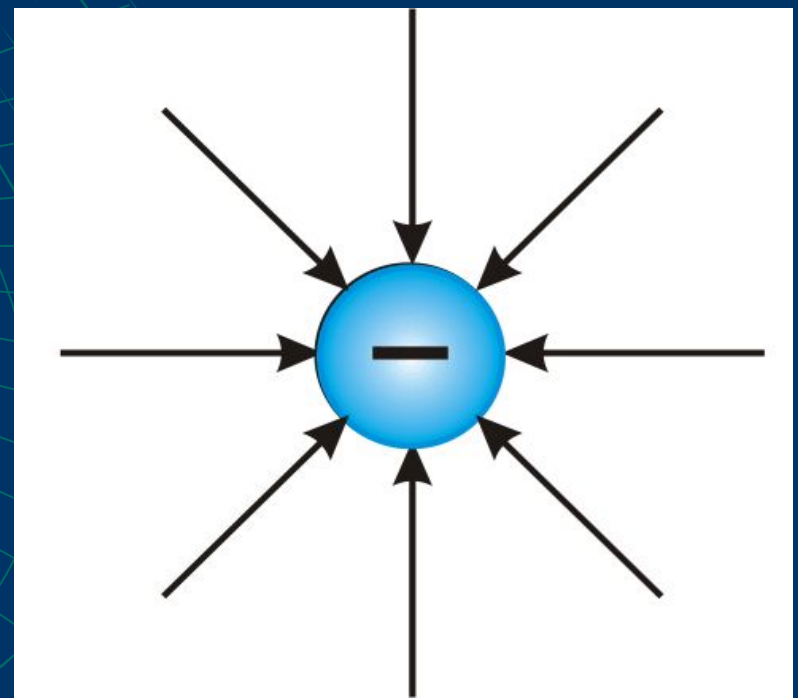
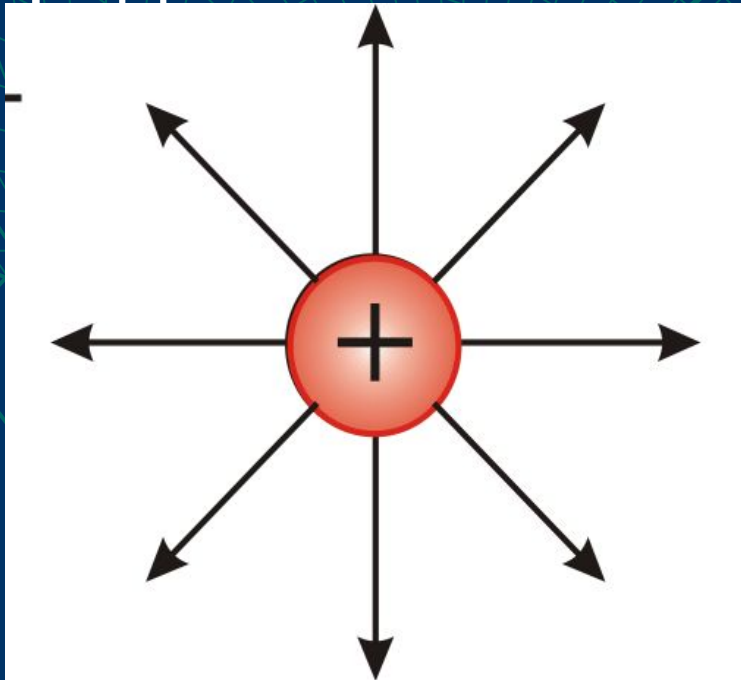
- ◆ **Однородным** называется электростатическое поле, во **всех точках которого напряженность одинакова по величине и направлению**, т.е.

Однородное электростатическое поле изображается параллельными силовыми линиями на равном расстоянии друг от друга

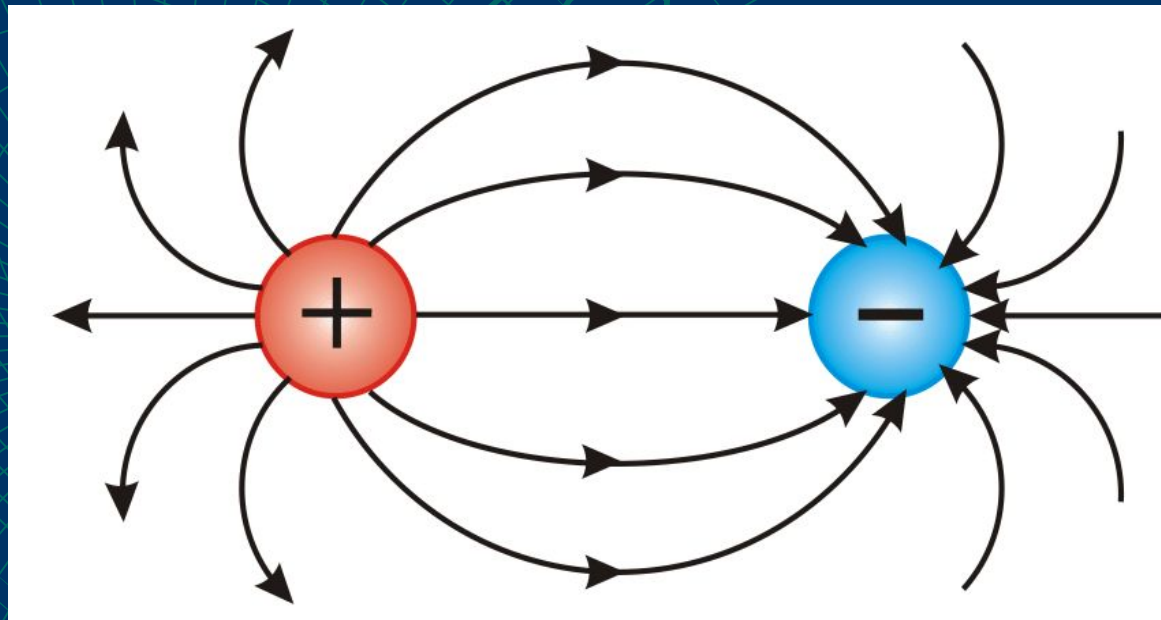


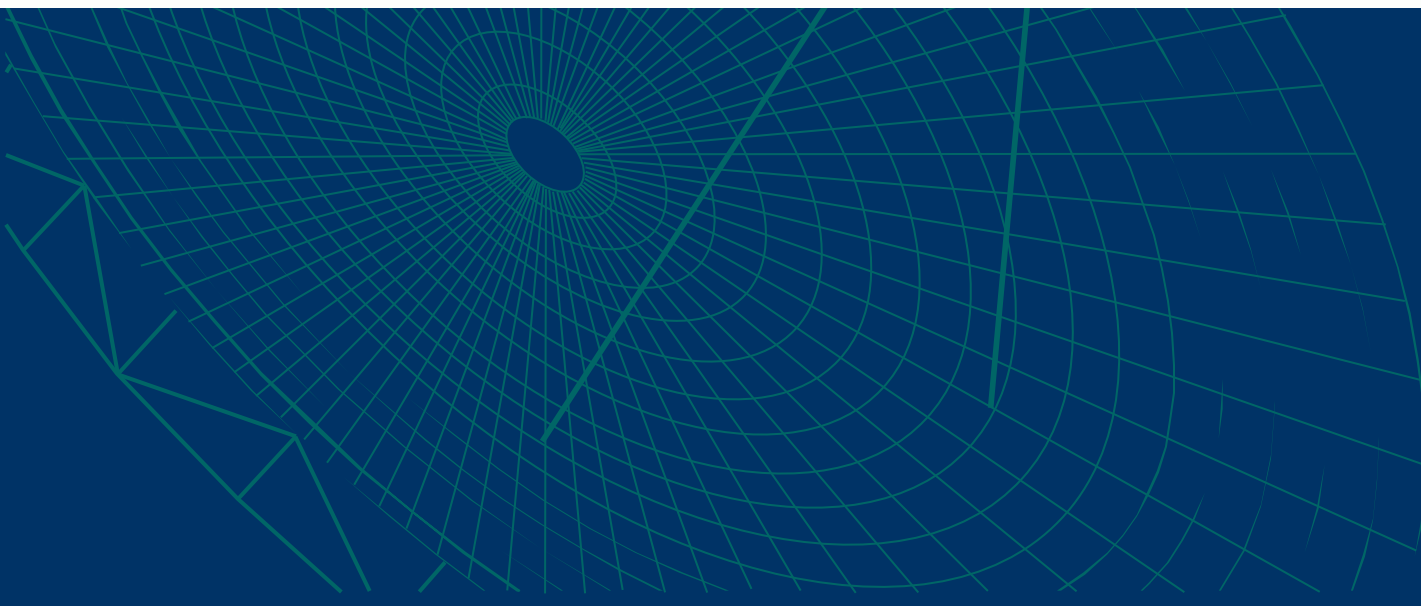
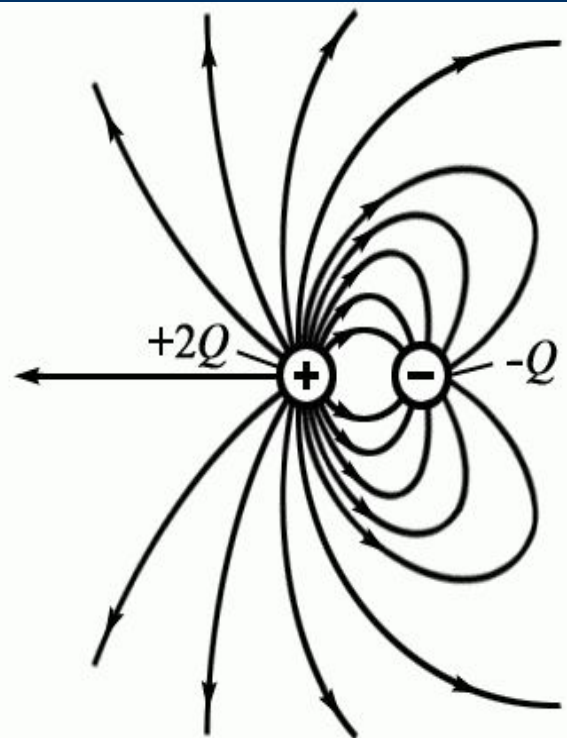
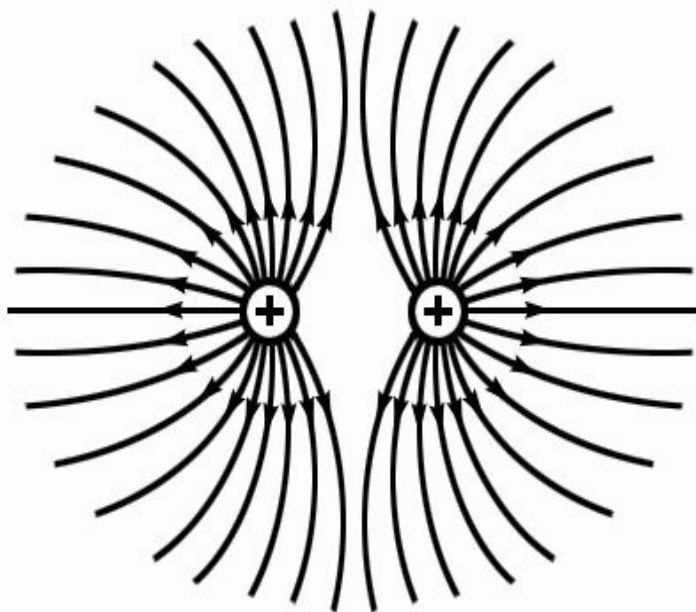
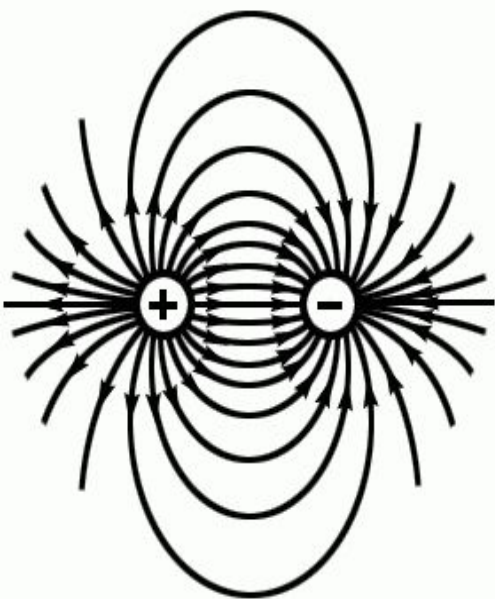


В случае точечного заряда, линии напряженности исходят из положительного заряда и уходят в бесконечность; и из бесконечности входят в отрицательный заряд. Т.к.  $E \sim 1/r^2$ , то густота силовых линий обратно пропорциональна квадрату расстояния от заряда



- ◆ Для системы зарядов, как видим, силовые линии направлены от положительного заряда к отрицательному



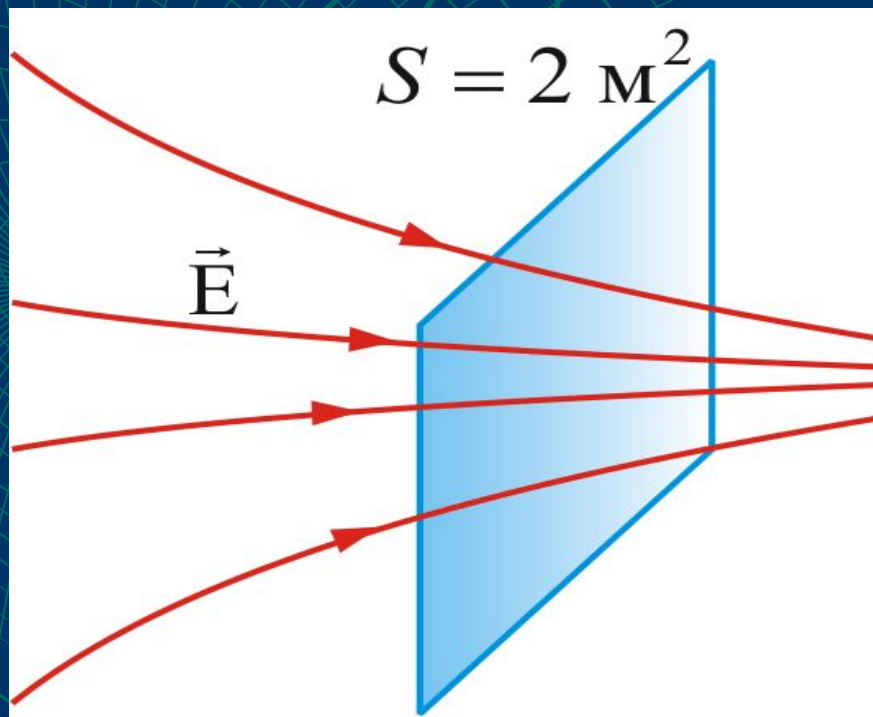


- ◆ Густота силовых линий должна быть такой, чтобы единичную площадку, нормальную к вектору напряженности пересекало такое их число, которое равно модулю вектора напряженности  $|\mathbf{E}|$ , т.е.

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

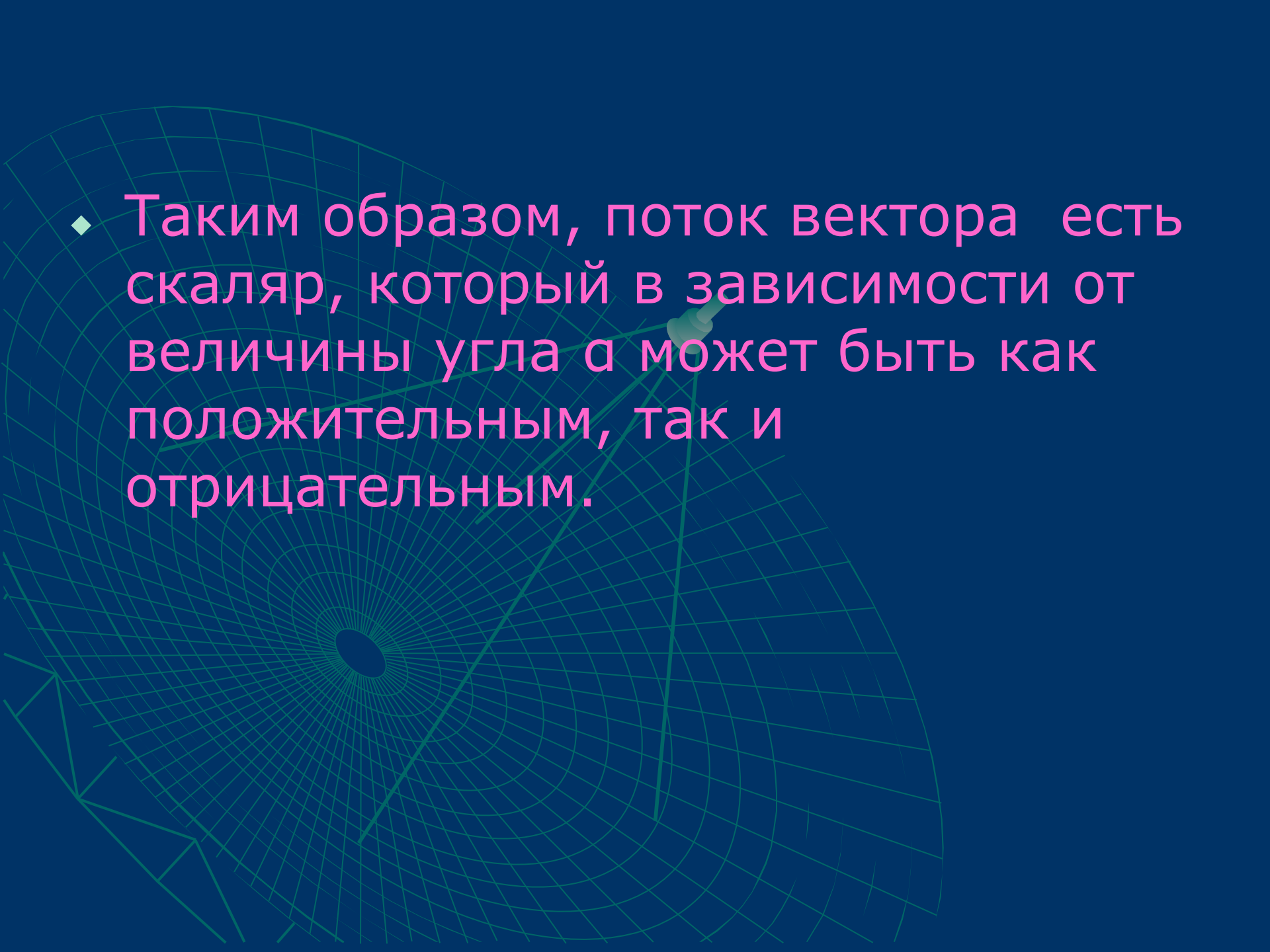
- ◆ если на рисунке выделить площадку  $S = 2 \text{ м}^2$ , то напряженность изображенного поля будет равна

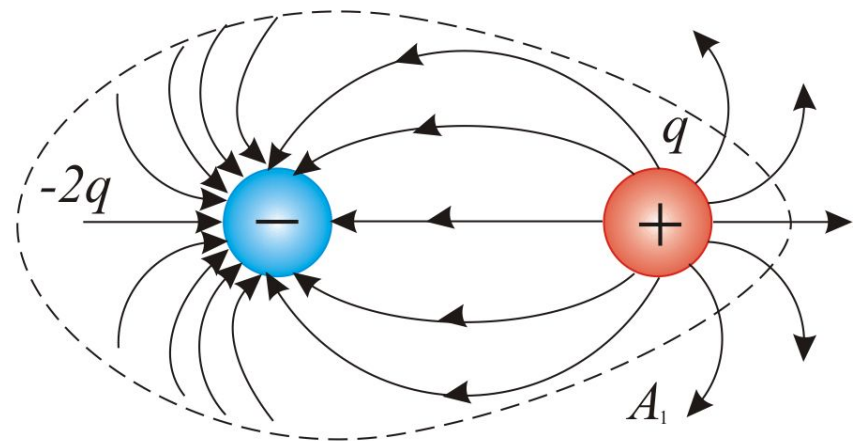
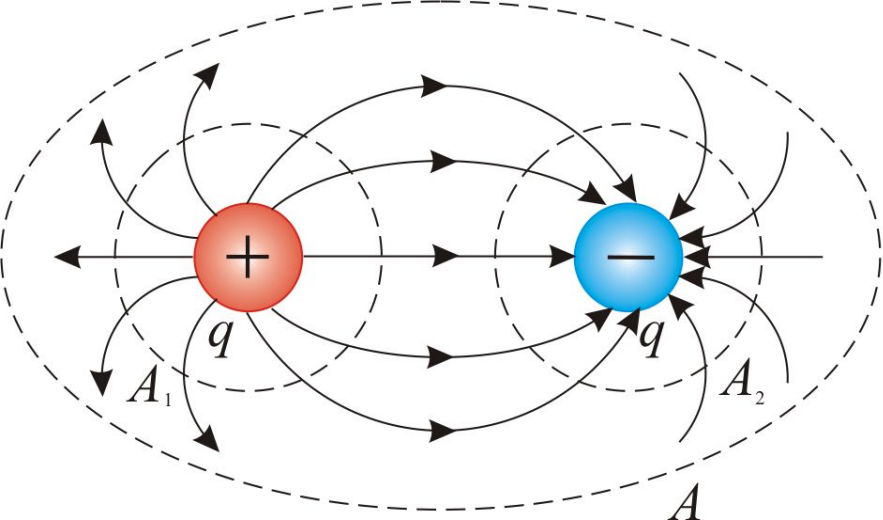
$$|\vec{E}| = \frac{\Phi}{S} = \frac{4}{2} = 2 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$



## 2.2. Поток вектора напряженности

- ◆ Полное число силовых линий, проходящих через поверхность  $S$  называется **поток вектора напряженности**  $\Phi$  через эту поверхность
- ◆ В векторной форме можно записать  $\Phi_E = (\mathbf{E}, \mathbf{S})$  – скалярное произведение двух векторов, где вектор  $\mathbf{S} = \mathbf{n}S$  .

- 
- A polar coordinate grid is shown on a dark blue background. The grid consists of concentric circles and radial lines. A red vector originates from the center and points towards the upper right. A small blue dot is located at the tip of this vector. The text is overlaid on the grid.
- ◆ Таким образом, поток вектора есть скаляр, который в зависимости от величины угла  $\alpha$  может быть как положительным, так и отрицательным.



Для первого рисунка – поверхность  $A_1$  окружает положительный заряд и поток здесь направлен наружу, т.е.  $\Phi_E > 0$ .

Поверхность  $A_2$  – окружает отрицательный заряд, здесь  $\Phi_E < 0$  и направлен внутрь.

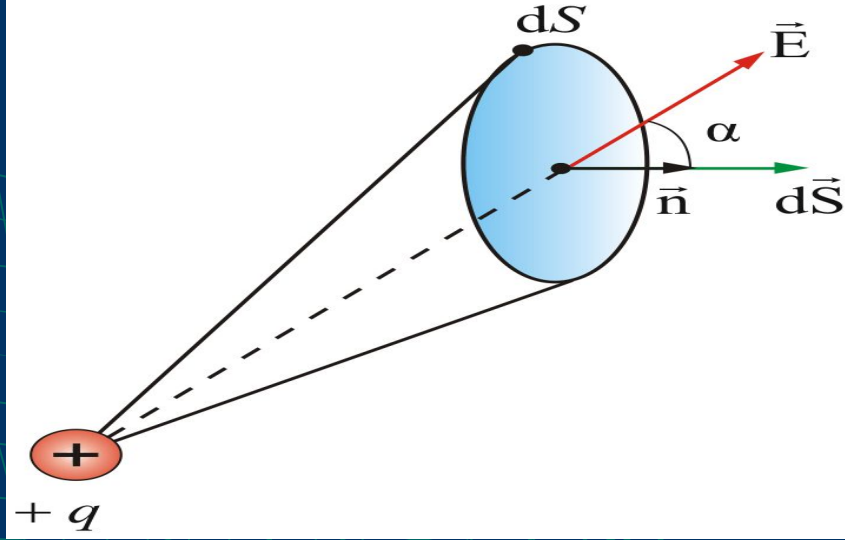
**Общий поток через поверхность  $A$  равен нулю.**

Опишите второй рисунок самостоятельно.



## 2.3. Теорема Остроградского-Гаусса

- ◆ *Итак, по определению, поток вектора напряженности электрического поля равен числу линий напряженности, пересекающих поверхность  $S$ .*

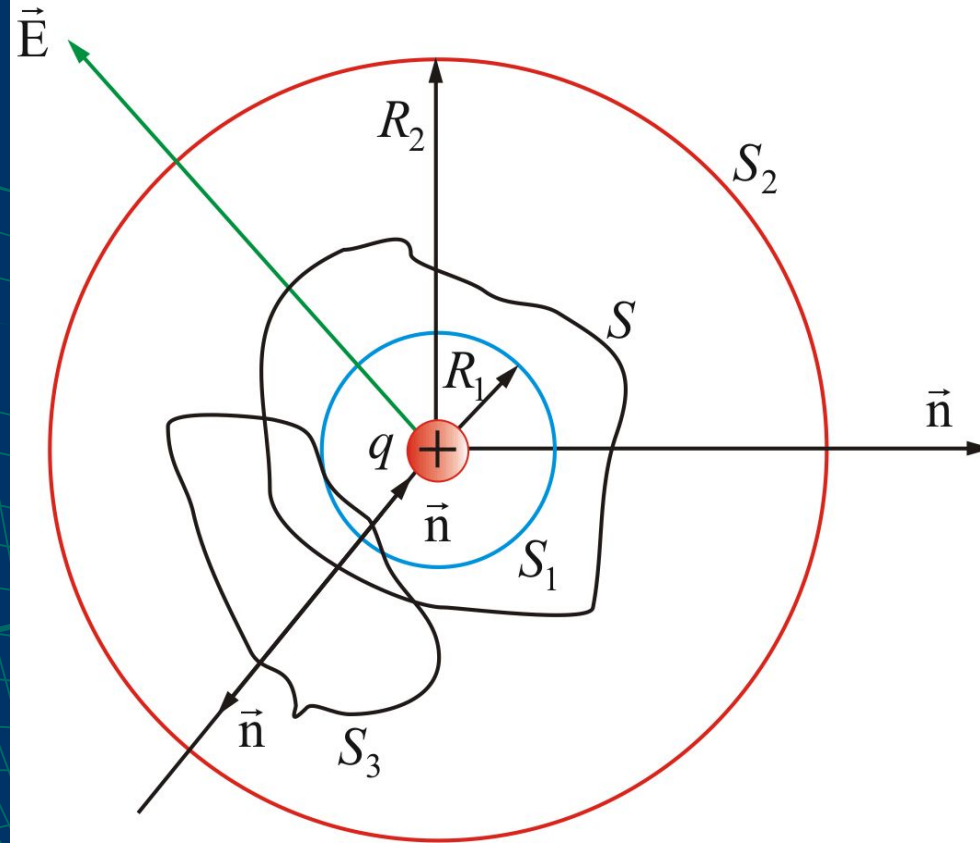


- ♦ поток вектора напряженности через произвольную элементарную площадку  $dS$  будет равен:

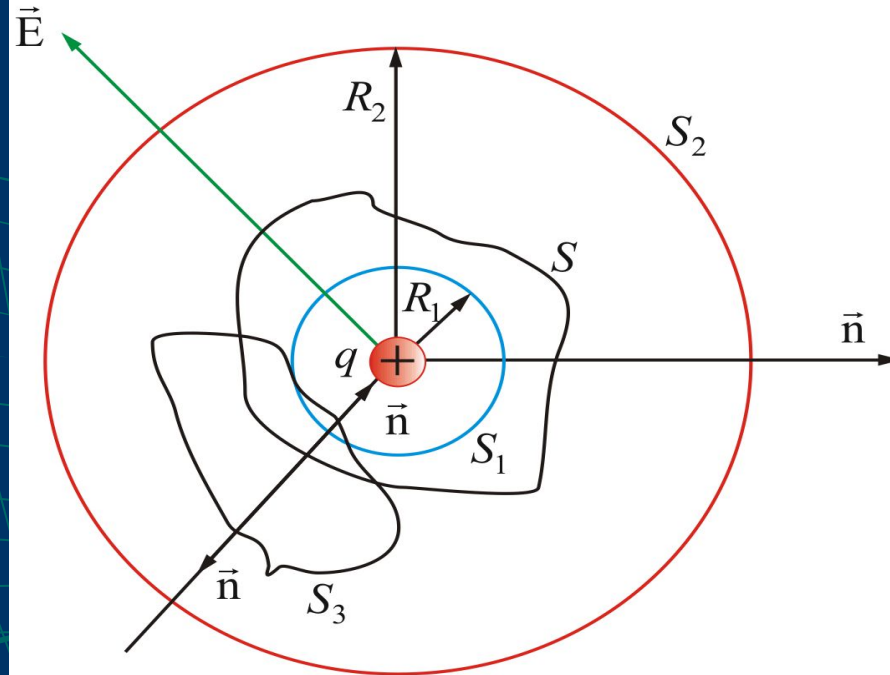
$$d\Phi_E = E dS \cos \alpha = E_n dS.$$

- ♦ Т.е. в однородном поле  $\Phi_E = ES$ .
- ♦ В произвольном электрическом поле

$$\Phi_E = \int_S E_n dS = \int_S \mathbf{E} d\mathbf{S}.$$

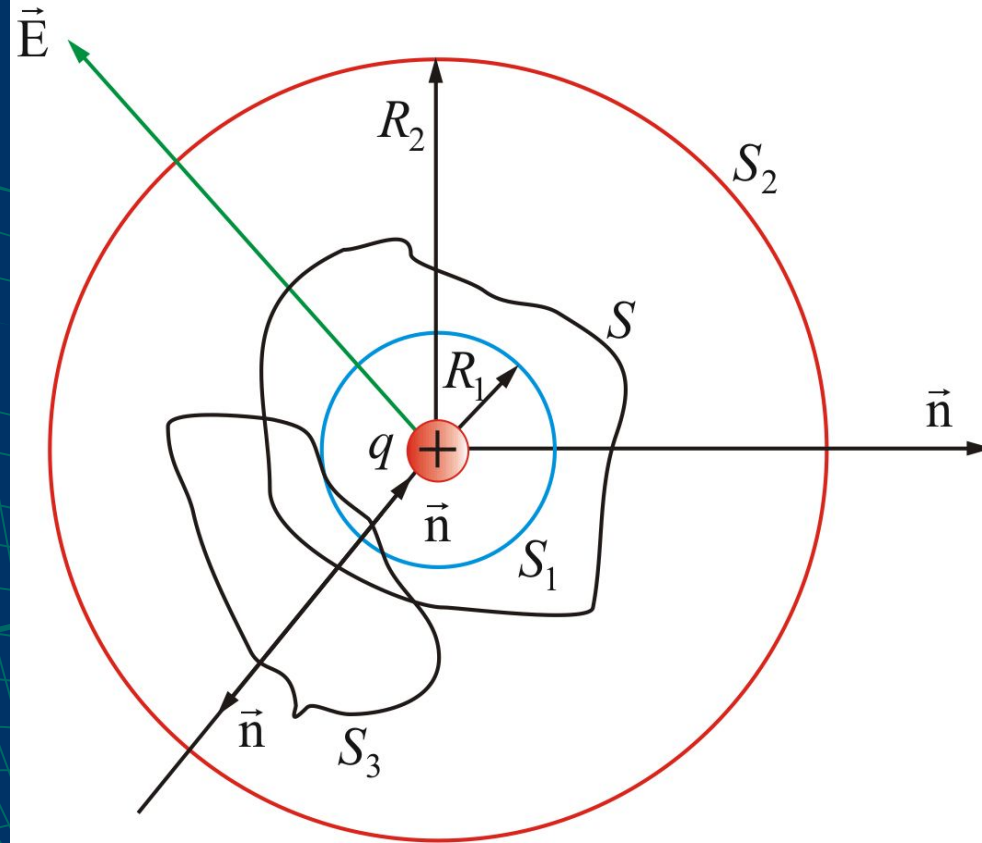


- ◆ Подсчитаем поток вектора  $\vec{E}$  через произвольную замкнутую поверхность  $S$ , окружающую точечный заряд  $q$ .  
Окружим заряд  $q$  сферой  $S_1$ .



- ◆ Центр сферы совпадает с центром заряда. Радиус сферы  $S_1$  равен  $R_1$ .
- ◆ В каждой точке поверхности  $S_1$  проекция  $E$  на направление внешней нормали одинакова и равна

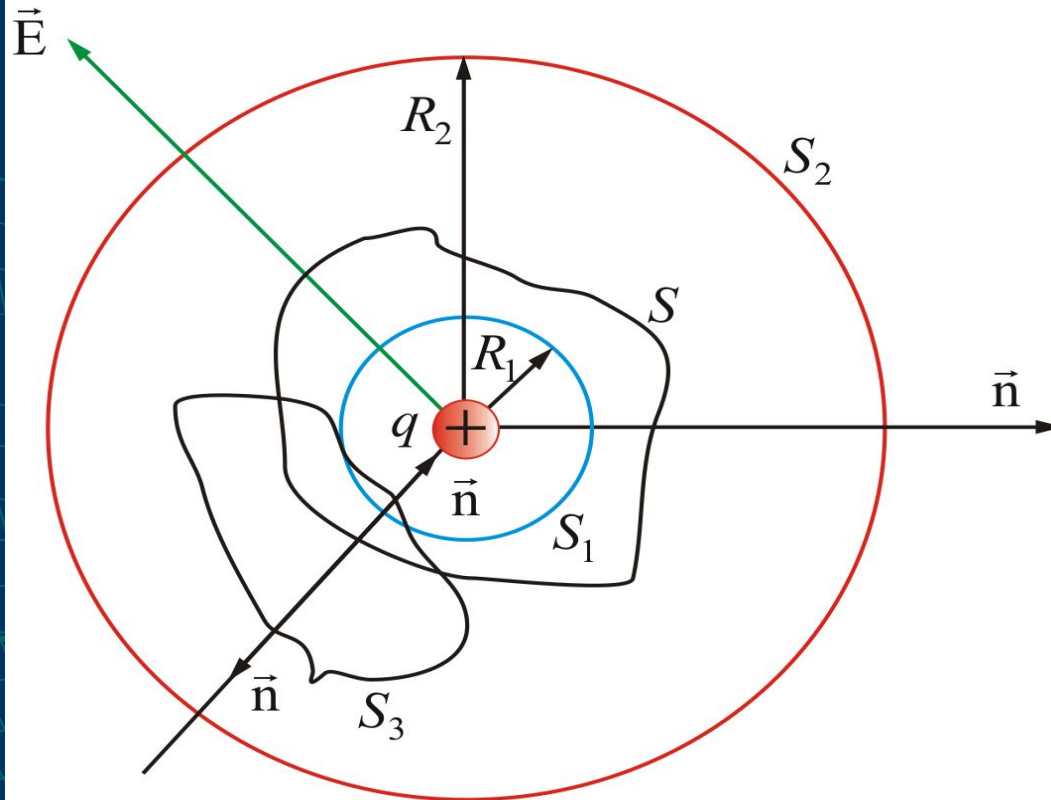
$$E_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R_1^2}.$$



♦ Тогда поток через  $S_1$

$$\Phi_E = \oint_{S_1} E_n dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_1^2} 4\pi R_1^2 = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

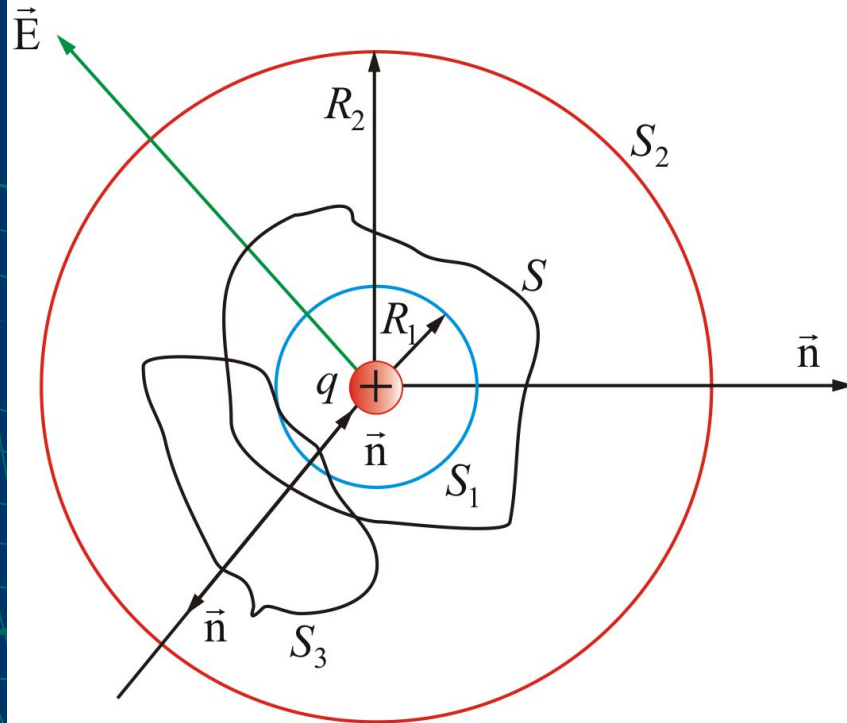
$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}.$$



- ◆ Подсчитаем поток через сферу  $S_2$ , имеющую радиус  $R_2$ :

$$\Phi_E = \oint_{S_2} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_2^2} dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_2^2} 4\pi R_2^2 = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}.$$



- Из непрерывности линии  $\vec{E}$  следует, что поток и через любую произвольную поверхность  $S$  будет равен этой же величине:

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{q}{\epsilon_0}$$

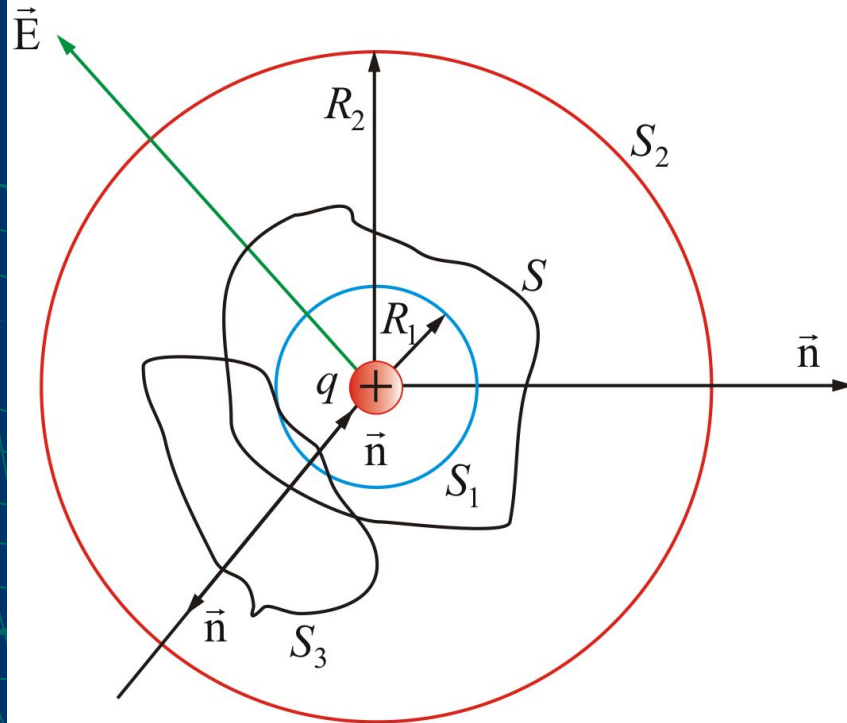
- **теорема Гаусса для одного заряда.**

- ◆ Для любого числа произвольно расположенных зарядов, находящихся внутри поверхности:

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

- ◆ – **теорема Гаусса для нескольких зарядов.**
- ◆ **Поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность в вакууме равен алгебраической сумме всех зарядов, расположенных внутри поверхности, деленной на  $\epsilon_0$ .**





Полный поток проходящий через  $S_3$ , не охватывающую заряд  $q$ , равен нулю:

$$\Phi_3 = 0$$

- ◆ Таким образом, для точечного заряда  $q$ , полный поток через любую замкнутую поверхность  $S$  будет равен:

- ◆  $\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}$  – если заряд расположен внутри замкнутой поверхности;

- ◆  $\Phi_E = 0$  – если заряд расположен вне замкнутой поверхности;

- ◆ этот результат не зависит от формы поверхности, и знак потока совпадает со знаком заряда.

- ◆ Электрические заряды могут быть «размазаны» с некоторой **объемной плотностью** различной в разных местах пространства:  
$$\rho = dq / dV$$
- ◆ Здесь  $dV$  – **физически бесконечно малый объем**, под которым следует понимать такой объем, который с одной стороны достаточно мал, чтобы в пределах его плотность заряда считать одинаковой, а с другой – достаточно велик, чтобы не могла проявиться дискретность заряда, т.е. то, что любой заряд кратен целому числу элементарных зарядов электрона или протона .

- ◆ Суммарный заряд объема  $dV$  будет равен:

$$\sum q_i = \int \rho dV.$$

- ◆ Тогда из теоремы Гаусса можно получить:

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

- ◆ – это ещё одна форма записи **теоремы Остроградского-Гаусса**, если заряд неравномерно распределен по объему.

## 2.4. Дифференциальная форма теоремы Остроградского-Гаусса

- Пусть заряд распределен в пространстве  $\Delta V$ , с объемной плотностью  $\langle \rho \rangle$  Тогда

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{\langle \rho \rangle \Delta V}{\epsilon_0}$$

$$\frac{1}{\Delta V} \oint \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{\langle \rho \rangle}{\epsilon_0}$$

- ◆ Теперь устремим  $\Delta V \rightarrow 0$ , стягивая его к интересующей нас точке. Очевидно, что при этом  $\langle \rho \rangle$  будет стремиться к  $\rho$  в данной точке, т.е.

$$\frac{\langle \rho \rangle}{\epsilon_0} \rightarrow \frac{\rho}{\epsilon_0}.$$

- ◆ Величину, являющуюся пределом отношения  $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$  к  $\Delta V$ , при  $\Delta V \rightarrow 0$ , называют **дивергенцией поля  $\mathbf{E}$**  и обозначается  $\text{div } \mathbf{E}$ .

- ◆ **Дивергенция поля  $E$**

- ◆ 
$$\operatorname{div} E = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \oint E dS \quad (2.4.1)$$

- ◆ Аналогично определяется дивергенция любого другого векторного поля.

- ◆ Из этого определения следует, что *дивергенция является скалярной функцией координат.*

- ◆ В декартовой системе координат

$$\operatorname{div} E = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}.$$

- ◆ Итак,

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}. \quad (2.4.3)$$

- ◆
- ◆ **Это теорема Остроградского-Гаусса в дифференциальной форме.**

- ◆ Написание многих формул упрощается, если ввести векторный дифференциальный оператор  $\nabla$  (Набла)

- ◆  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$ , где  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  – орты осей (единичные векторы).

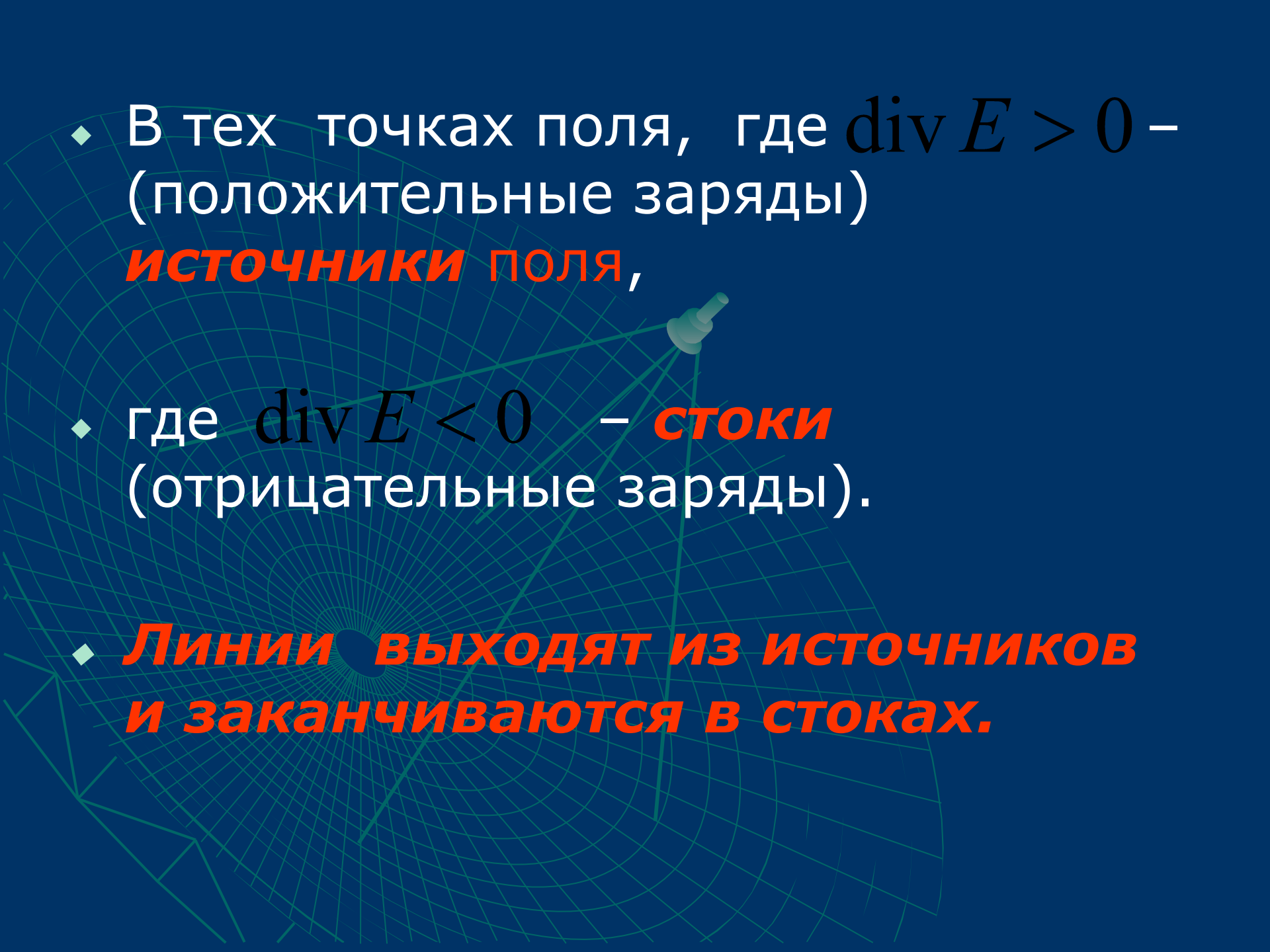


- ◆ Сам по себе оператор смысла не имеет. Он приобретает смысл в сочетании с векторной или скалярной функцией, на которую символично умножается:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \nabla_x E_x + \nabla_y E_y + \nabla_z E_z = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

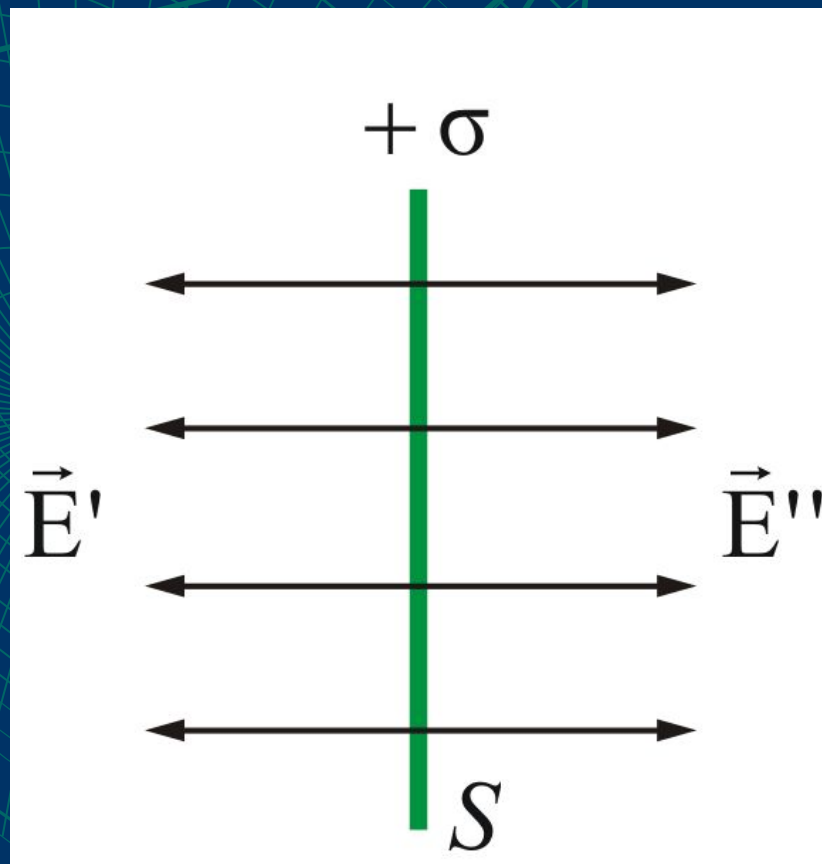
- ◆ **дифференциальная форма теоремы Остроградского-Гаусса.**

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

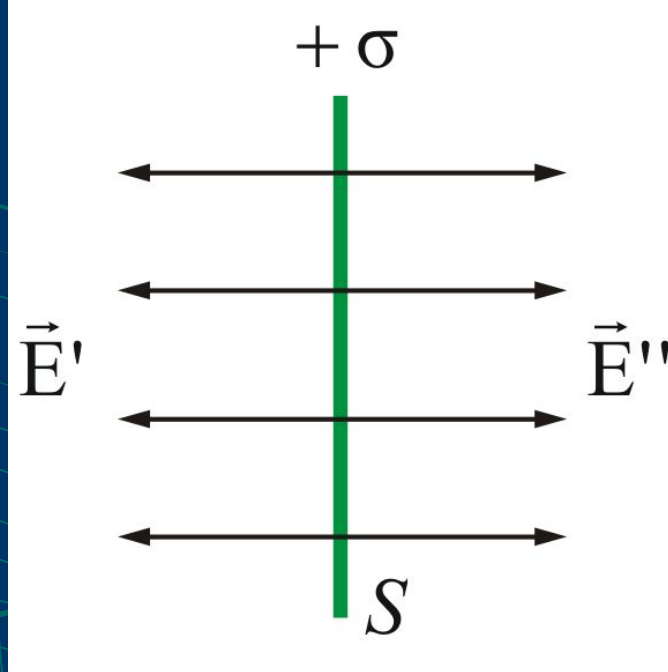
- 
- ◆ В тех точках поля, где  $\text{div } E > 0$  – (положительные заряды) **ИСТОЧНИКИ** поля,
  - ◆ где  $\text{div } E < 0$  – **СТОКИ** (отрицательные заряды).
  - ◆ **Линии выходят из источников и заканчиваются в стоках.**

## 2.5. Вычисление электрических полей с помощью теоремы Остроградского-Гаусса

### 2.5.1. Поле бесконечной однородно заряженной плоскости



$$\sigma = \frac{dq}{dS},$$

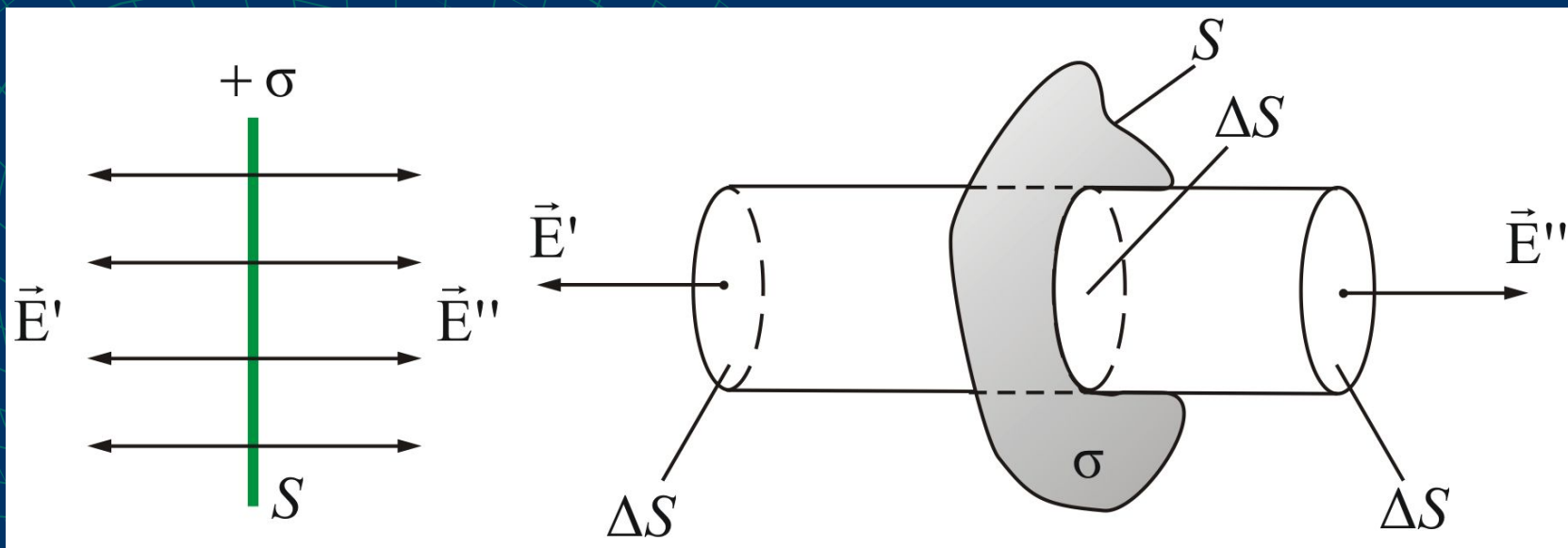


Поверхностная плотность заряда на произвольной плоскости площадью  $S$  определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{dq}{dS},$$

$dq$  – заряд, сосредоточенный на площади  $dS$ ;  
 $dS$  – физически бесконечно малый участок поверхности.

- ◆ Представим себе цилиндр с образующими, перпендикулярными плоскости, и основаниями  $\Delta S$ , расположенными симметрично относительно плоскости



- ◆ Тогда

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

- ◆ Суммарный поток через замкнутую поверхность (цилиндр) будет равна:

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

- ◆ Внутри поверхности заключен заряд. Следовательно, из теоремы Остроградского-Гаусса получим:

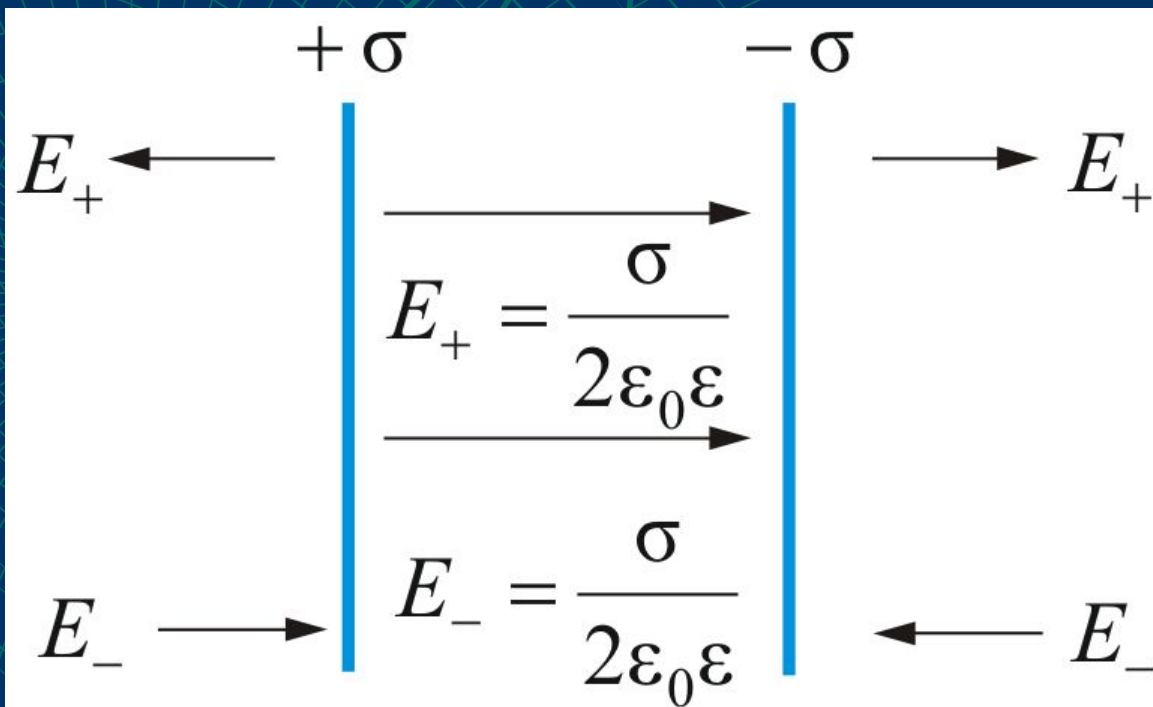
$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} = 2\Delta SE = \sigma\Delta S \frac{1}{\epsilon_0}$$

- ◆ откуда видно, что напряженность поля плоскости  $S$  равна:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (2.5.1)$$

## 2.5.2. Поле двух равномерно заряженных плоскостей

- Пусть две бесконечные плоскости заряжены разноименными зарядами с одинаковой по величине плотностью  $\sigma$



- ◆ **Результирующее поле**, как было сказано выше, находится как суперпозиция полей, создаваемых каждой из плоскостей. Тогда *внутри плоскостей*

$$E = E_+ + E_- \quad \text{отсюда} \quad E = \sigma / \epsilon_0$$

- ◆ **Вне плоскостей напряженность поля**

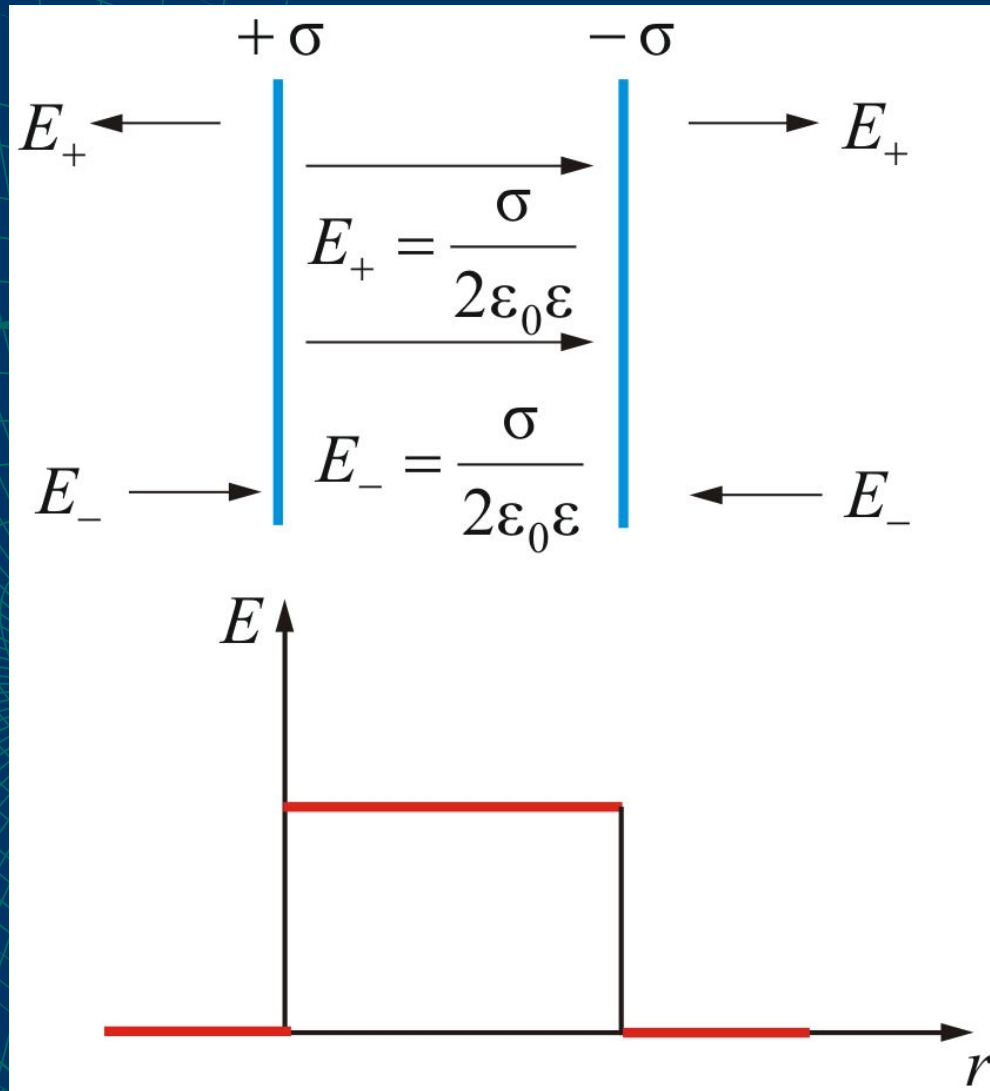
$$E = 0.$$

- ◆ Полученный результат справедлив и для плоскостей конечных размеров, если расстояние между плоскостями гораздо меньше линейных размеров плоскостей (плоский конденсатор).



# ● **Распределение напряженности**

электростатического поля между пластинами конденсатора показано на рисунке:



- ◆ Между пластинами конденсатора действует **сила взаимного притяжения** (на единицу площади пластин):

- ◆ 
$$F_{\text{ед}} = \frac{F}{S} = \frac{S\sigma E}{S}$$
 т.е.

$$F_{\text{ед}} = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0\varepsilon}$$

- ◆ Механические силы, действующие между заряженными телами, называют **пондермоторными**.

- ◆ Сила притяжения между пластинами конденсатора:

$$F = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0},$$

- ◆ где  $S$  – площадь обкладок конденсатора.

- ◆ Т.к. 
$$\sigma = \frac{q}{S} = E\varepsilon_0$$

$$F = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon S} = \frac{\varepsilon_0 E^2 S}{2}$$

- ◆ Это формула для расчета **пондермоторной силы**

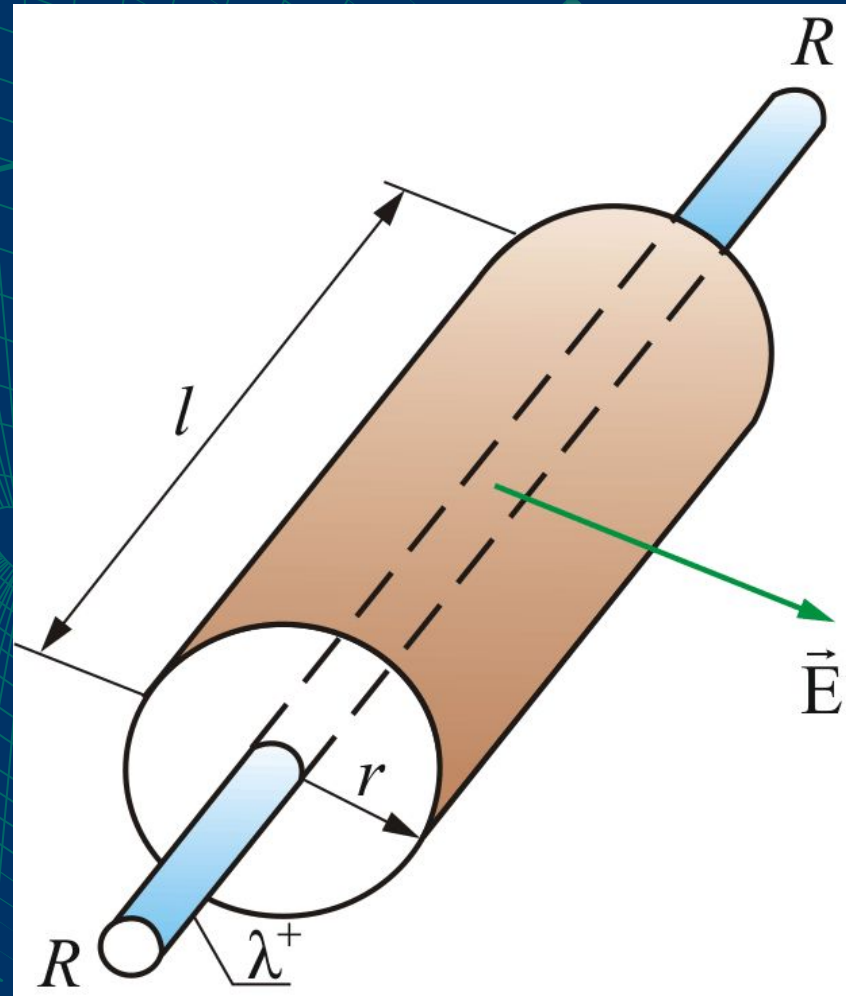
## 2.5.3. Поле заряженного бесконечного цилиндра (нити)

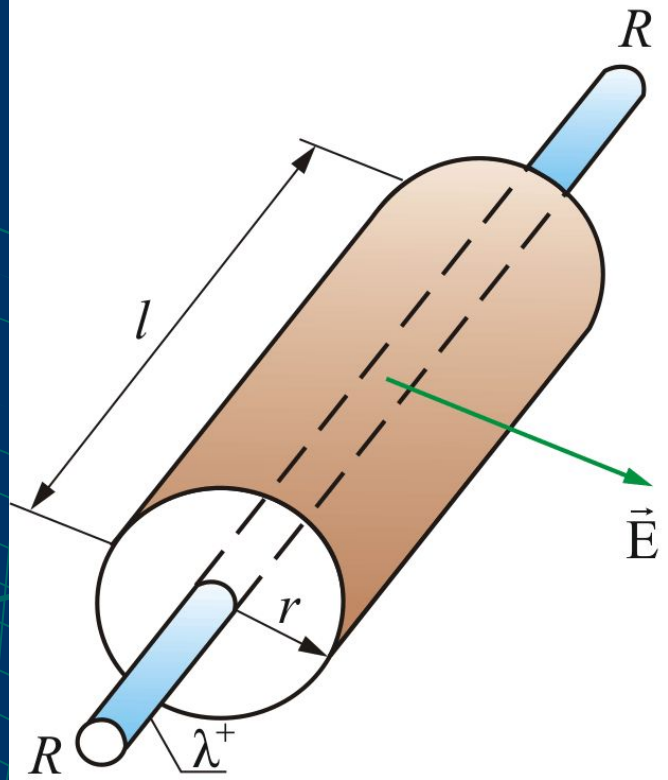
- ◆ Пусть поле создается бесконечной цилиндрической *поверхностью* радиуса  $R$ , заряженной с постоянной линейной плотностью

$$\lambda^+ = \frac{dq}{dl}$$

- ◆ где  $dq$  – заряд, сосредоточенный на отрезке цилиндра

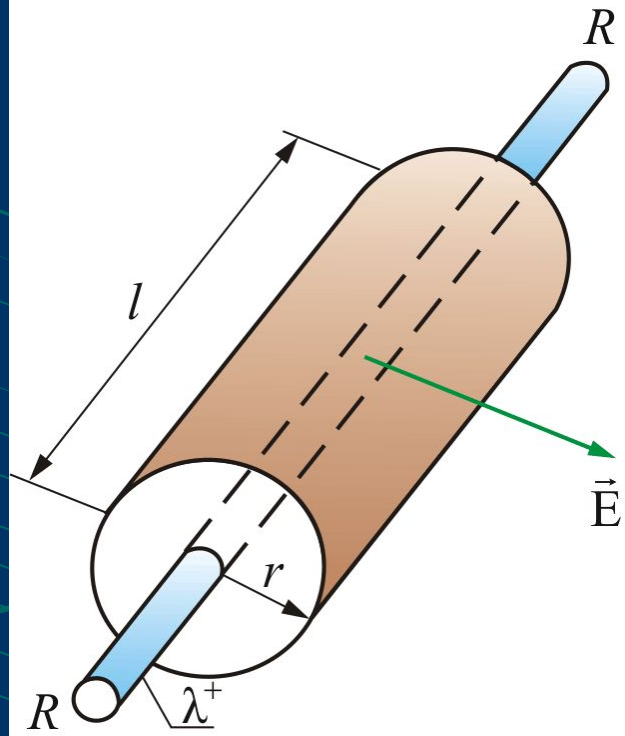
Представим вокруг цилиндра (нити) коаксиальную замкнутую поверхность (цилиндр в цилиндре) радиуса  $r$  и длиной  $l$  (основания цилиндров перпендикулярно оси).





- ◆ Для оснований цилиндров  $E_n = 0$ ,
- ◆ для боковой поверхности  $E_n = E(r)$ ,  
е. зависит от расстояния  $r$ .
- ◆ Следовательно, поток вектора через рассматриваемую поверхность, равен

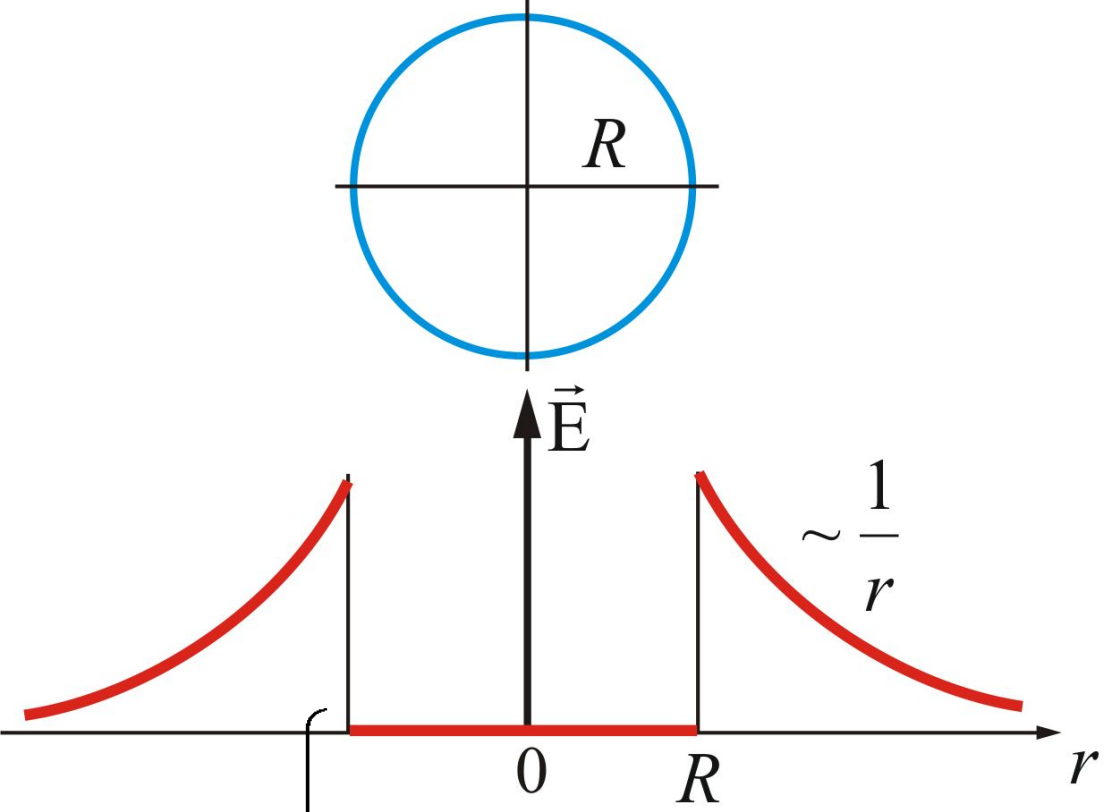
$$\Phi_E = E(r)S = E(r)2\pi r l.$$



- ◆ При  $r \geq R$ , на поверхности будет заряд  $q = \lambda l$ .
- ◆ По теореме Остроградского-Гаусса  $E(r)2\pi r l = \frac{\lambda}{\epsilon_0}$
- ◆ Тогда
 

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \text{ при } r \geq R$$
- ◆ Если  $r < R$ ,  $E(r) = 0$ , т.к. внутри замкнутой поверхности зарядов нет.

- Графически распределение напряженности электростатического поля цилиндра показано на рис



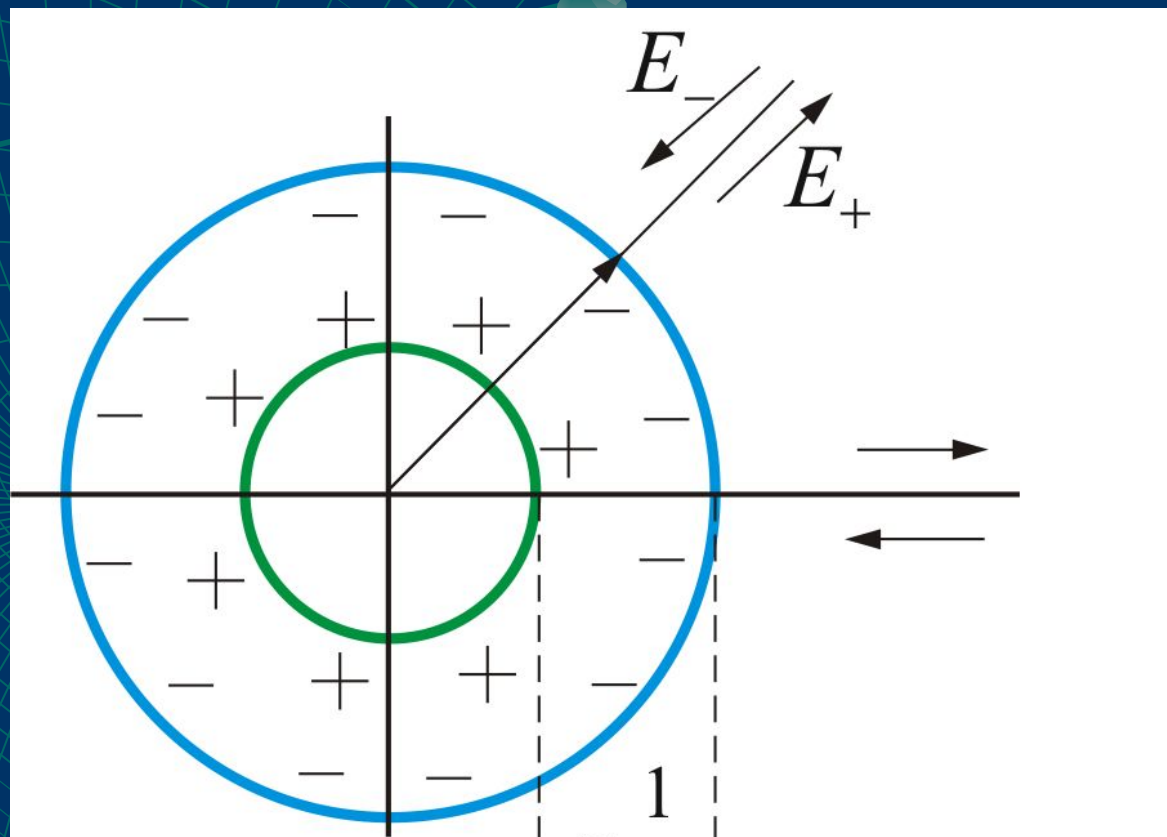
$0$  – внутри цилиндра, т.к. нет зарядов

$$E = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R} \text{ или } \frac{q}{2\pi\epsilon_0 Rl} \text{ на поверхности цилиндра} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \text{ или } \frac{q}{2\pi\epsilon_0 rl} \text{ вне цилиндра} \end{array} \right.$$

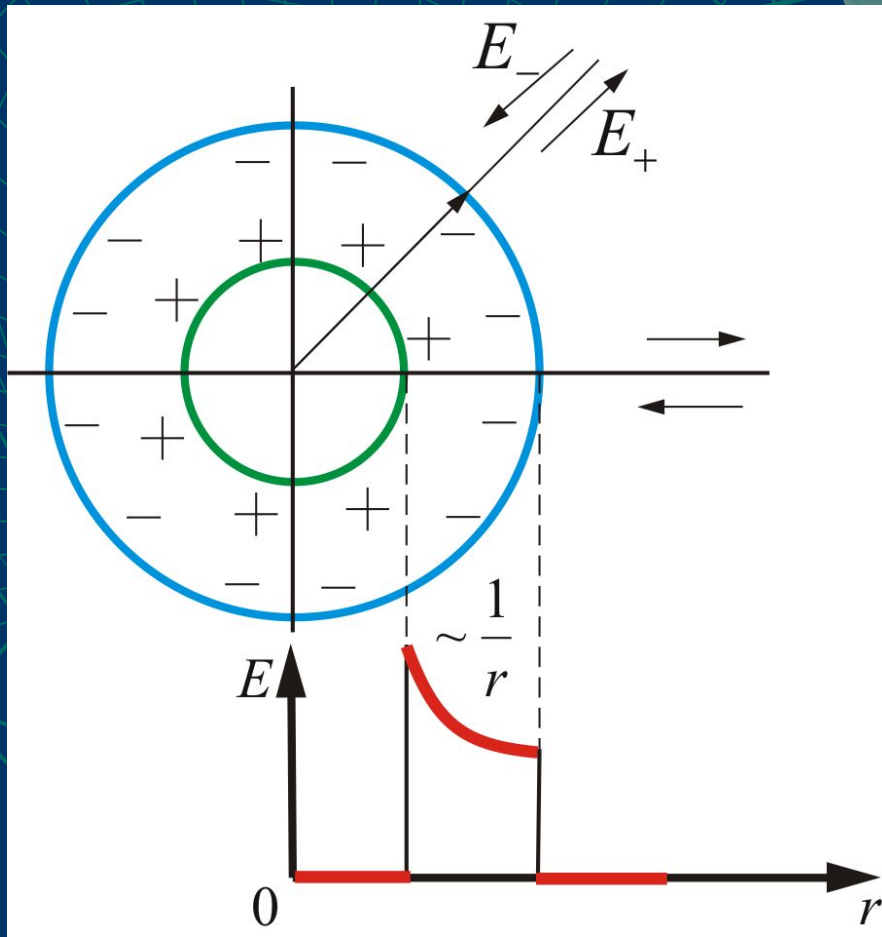


## 2.5.4. Поле двух коаксиальных цилиндров с одинаковой линейной плотностью $\lambda$ , но разным знаком



Внутри меньшего и вне большего цилиндров поле будет отсутствовать  $E = 0$

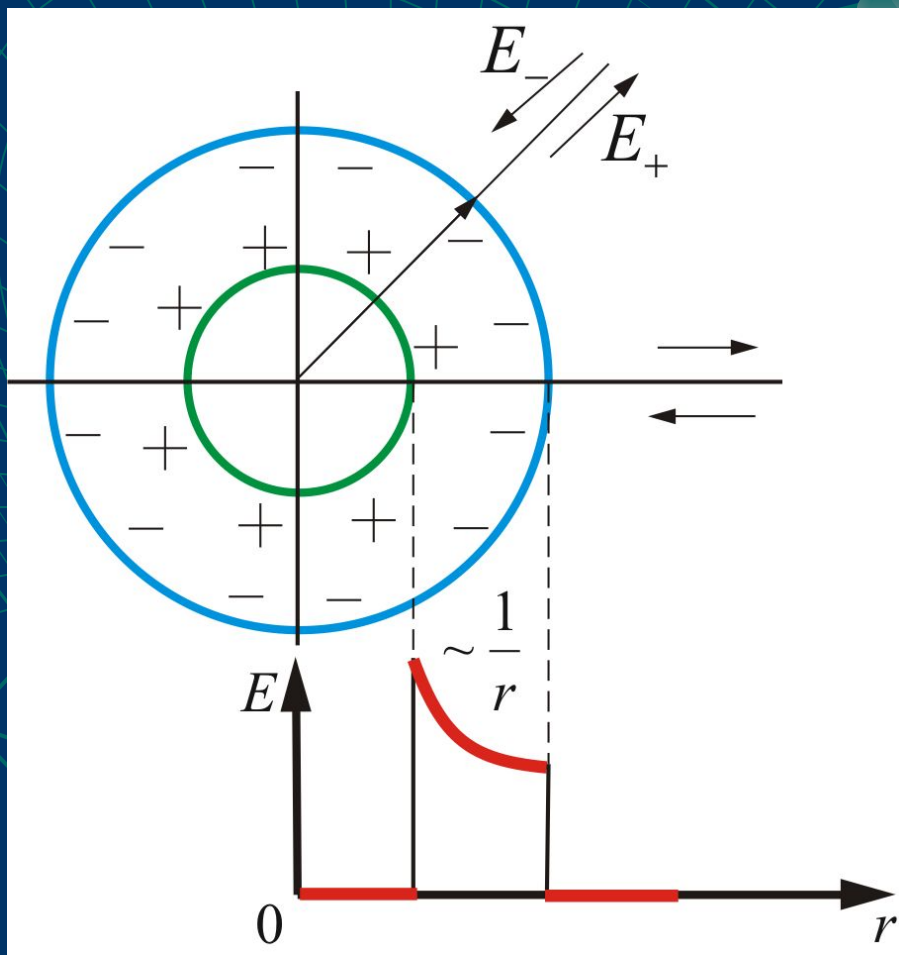
В зазоре между цилиндрами, поле определяется так же, как в п. 2.5.3:



$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$$

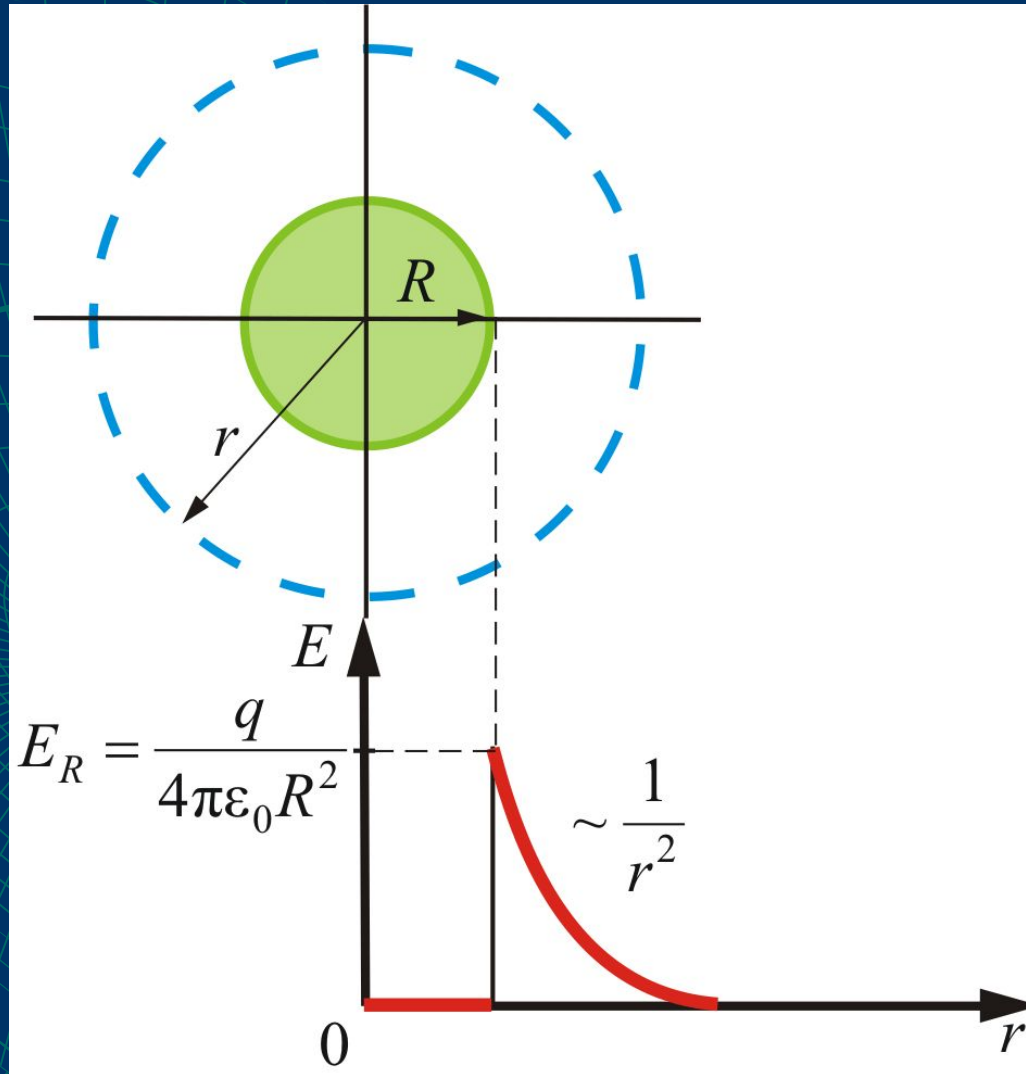
Таким образом для коаксиальных цилиндров  
имеем:

$$E = \begin{cases} 0 & \text{— внутри меньшего и вне большего цилиндров зарядов нет} \\ \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} & \text{— между цилиндрами, когда } R_1 < r < R_2 \end{cases}$$

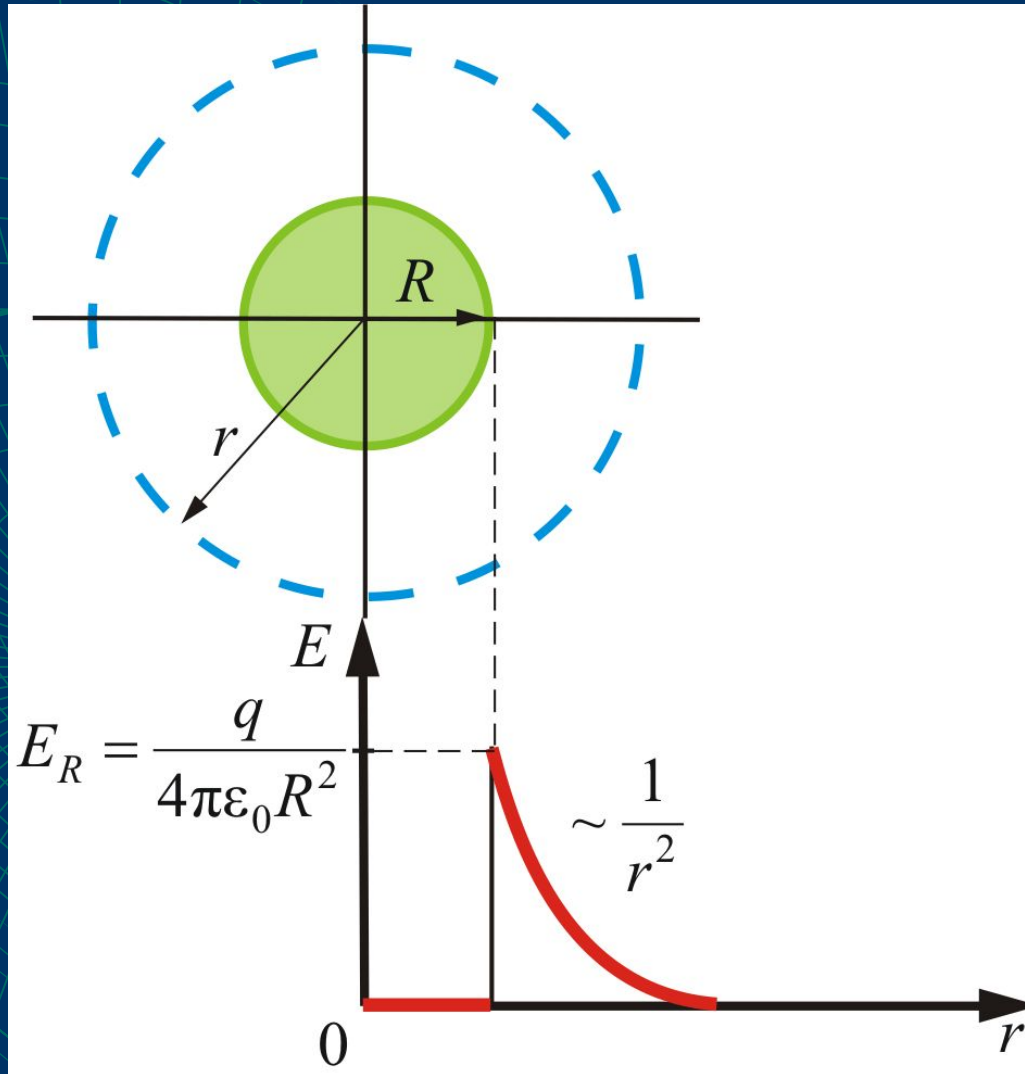


- ◆ Это справедливо и для бесконечно длинного цилиндра, и для цилиндров конечной длины, если зазор между цилиндрами намного меньше длины цилиндров (цилиндрический конденсатор).

## 2.5.5. Поле заряженного пустотелого шара



- ◆ Вообразим вокруг шара – сферу радиуса  $r$  (рис).



- ◆ Если  $r \geq R$ , то внутрь воображаемой сферы попадет весь заряд  $q$ , распределенный по сфере, тогда

$$\Phi_E = E(r)S = E(r)4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

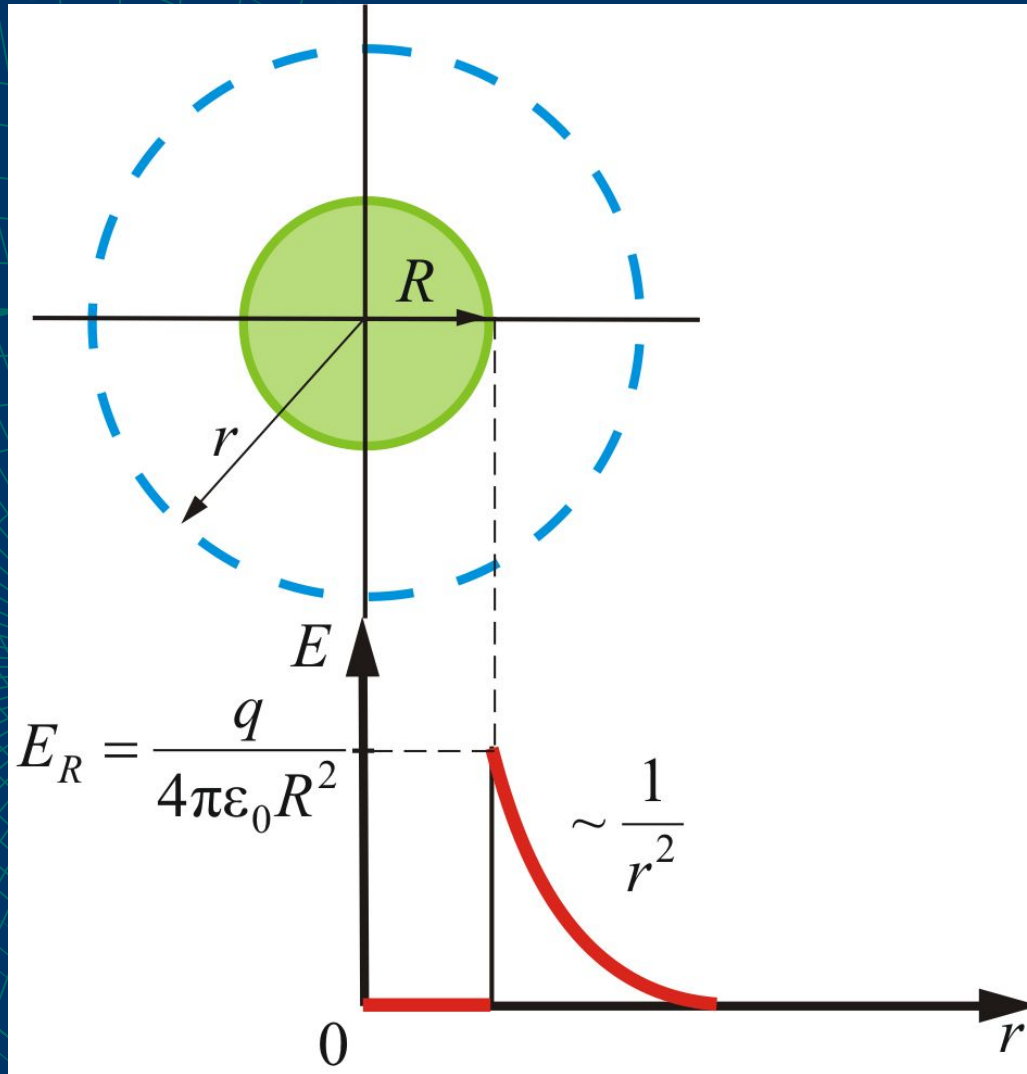
- ◆ откуда **поле вне сферы:**

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

- ◆ **Внутри сферы**, при  $r < R$ , поле будет равно нулю, т.к. там нет зарядов:

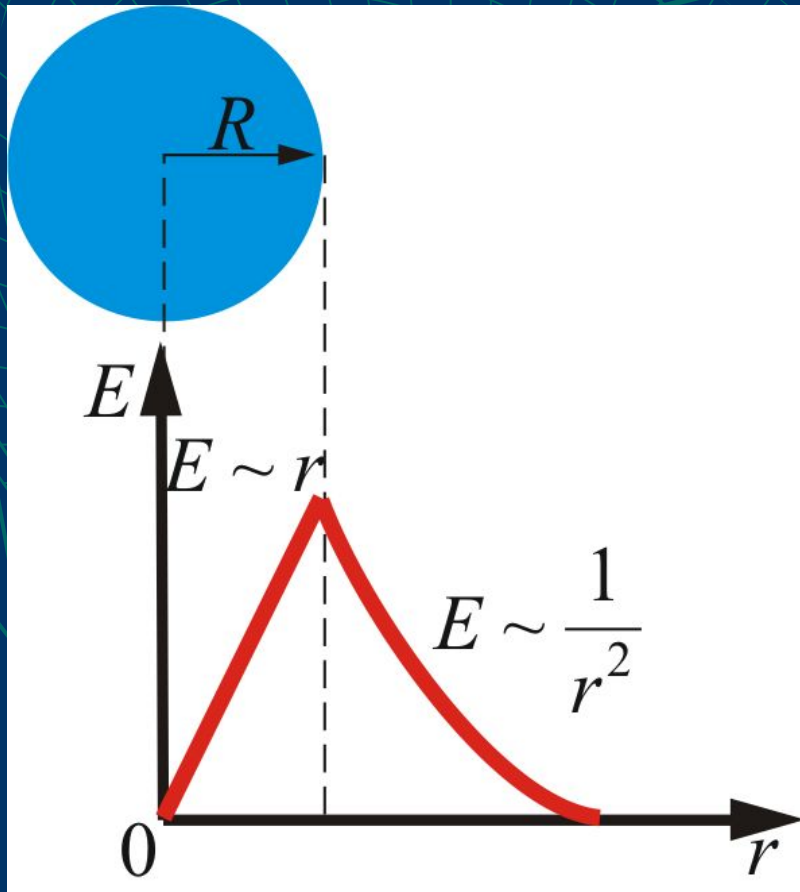
$$E(r) = 0.$$

Как видно, вне сферы поле тождественно полю точечного заряда той же величины, помещенному в центр сферы.



## 2.5.6. Поле объемного заряженного шара

- Для поля **вне шара** радиусом  $R$  получается тот же результат, что и для пустотелой сферы, т.е. справедлива формула:



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



- ◆ **Внутри шара** при  $r < R$ , сферическая поверхность будет содержать в себе заряд, равный

$$q = \rho \frac{4}{3} \pi r^3,$$

- ◆ где  $\rho$  – объемная плотность заряда:  $\rho = \frac{q}{V}$   
объем шара:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

- ◆ Тогда по теореме Остроградского-Гаусса запишем

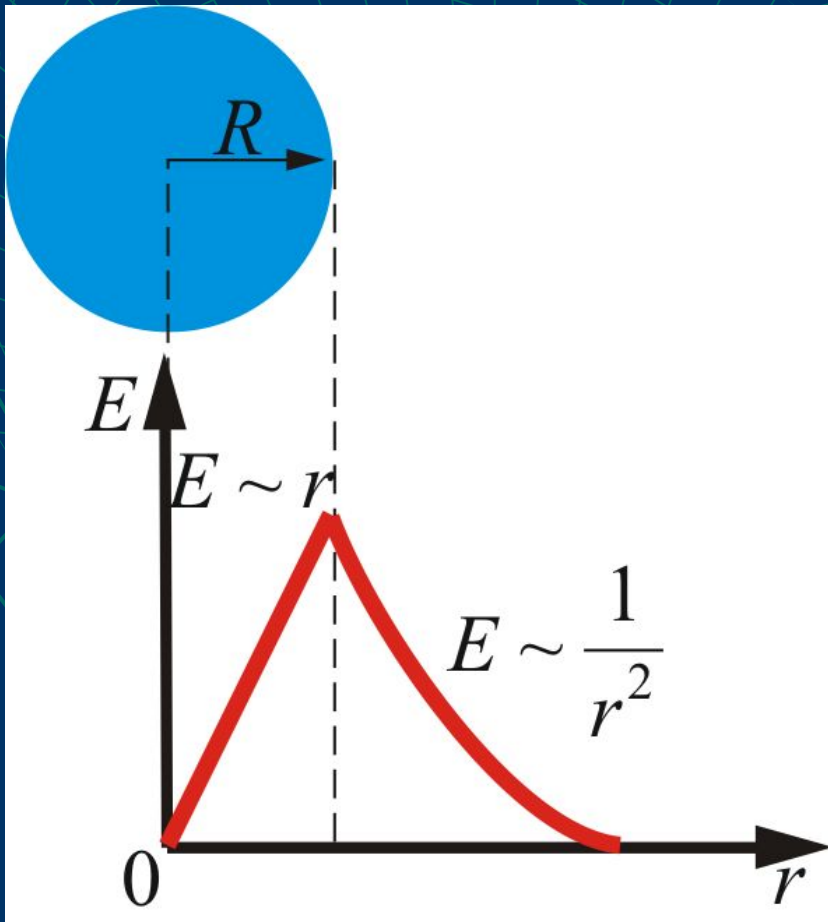
$$\Phi_E = E(r)S = E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \frac{4}{3} \pi r^3$$

- ◆ Т.е. *внутри шара*

$$E(r) = \frac{\rho r}{3\epsilon_0}$$

- ◆ Т.е., *внутри шара* имеем

$$E \sim r.$$



Таким образом, имеем:

поле объемного заряженного шара

$$E = \begin{cases} \frac{qr}{4\pi\epsilon_0 R^3} = \frac{\rho r}{3\epsilon_0} - \text{внутри шара} (r < R) \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} - \text{на поверхности шара} (r = R) \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \text{вне шара} (r > R) \end{cases}$$

Лекція окончена!

