

Электростатика

Электродинамика – раздел физики,
изучающий взаимодействие
заряженных частиц посредством
электромагнитного поля

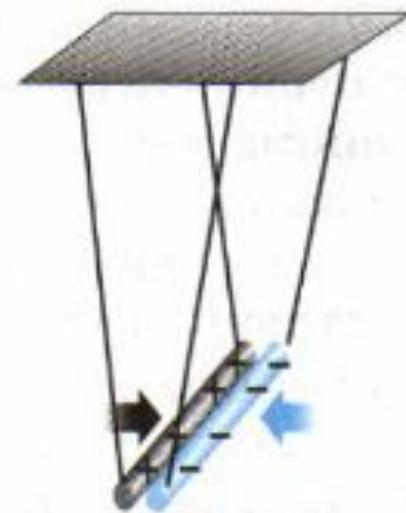
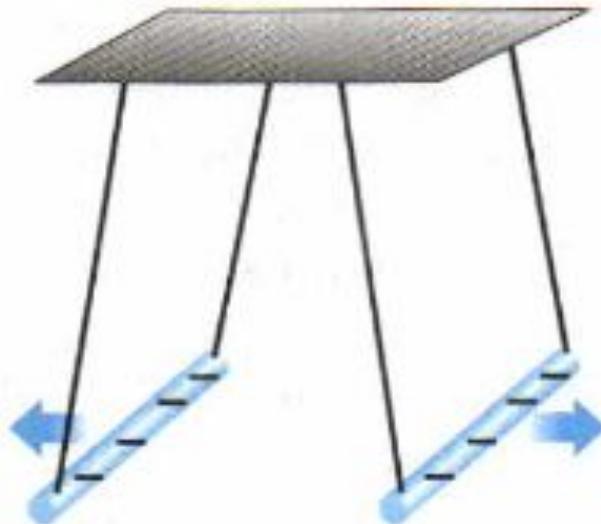
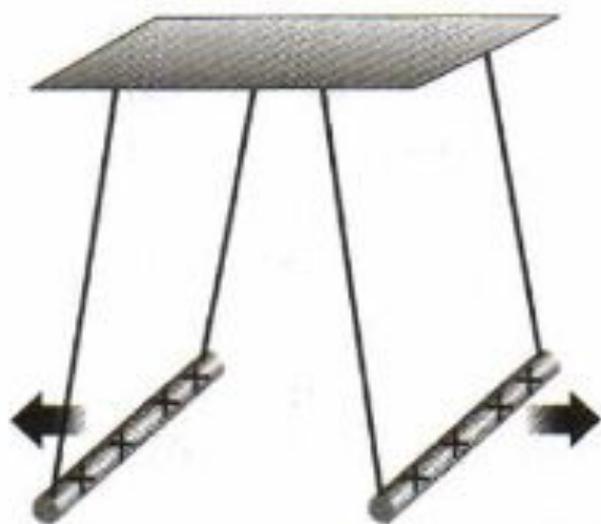


Электростатика изучает
взаимодействие неподвижных
зарядов

Электрический заряд

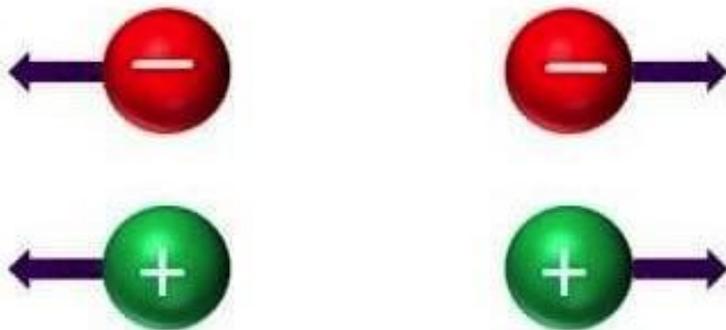
- Физическая величина, определяющая силу электромагнитного взаимодействия
- Единица измерения электрического заряда – кулон (Кл)
- $1\text{Кл} = 1\text{А} \cdot 1\text{с}$
- Носители зарядов:
 1. элементарные частицы
 2. атомы
 3. молекулы
 4. макроскопические тела

Виды электрических зарядов



Одноимённые заряды

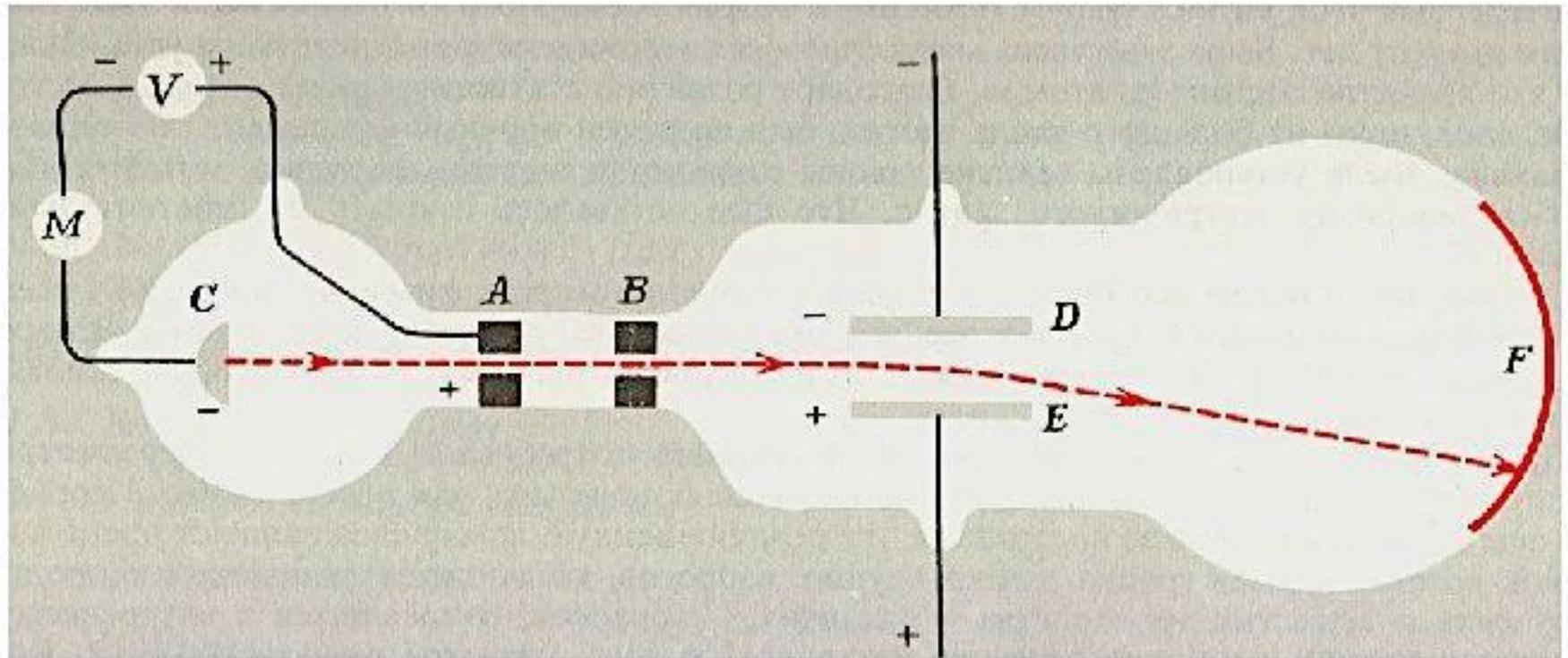
Разноимённые заряды



Отталкивание

Притяжение

Открытие электрона 1897 год, Дж. Дж. Томсон



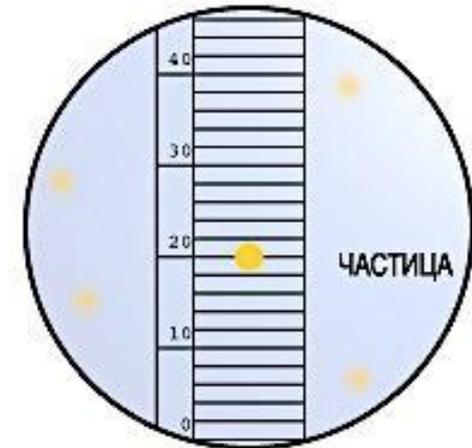
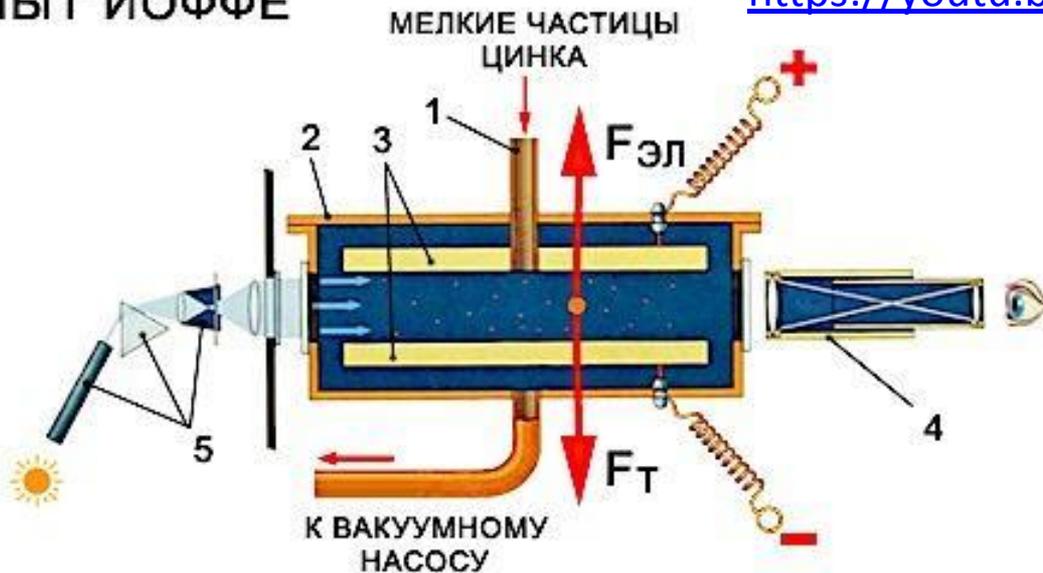
1904 г. : Дж. Дж. Томсон: атом - нейтральная система - из заряженного шара с зарядом $+Ze$, внутри Z отрицательно заряженных электронов.
Размер атома $\sim 10^{-8}$ см. **Нобелевская премия по физике 1906 г.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

ОПЫТ ИОФФЕ

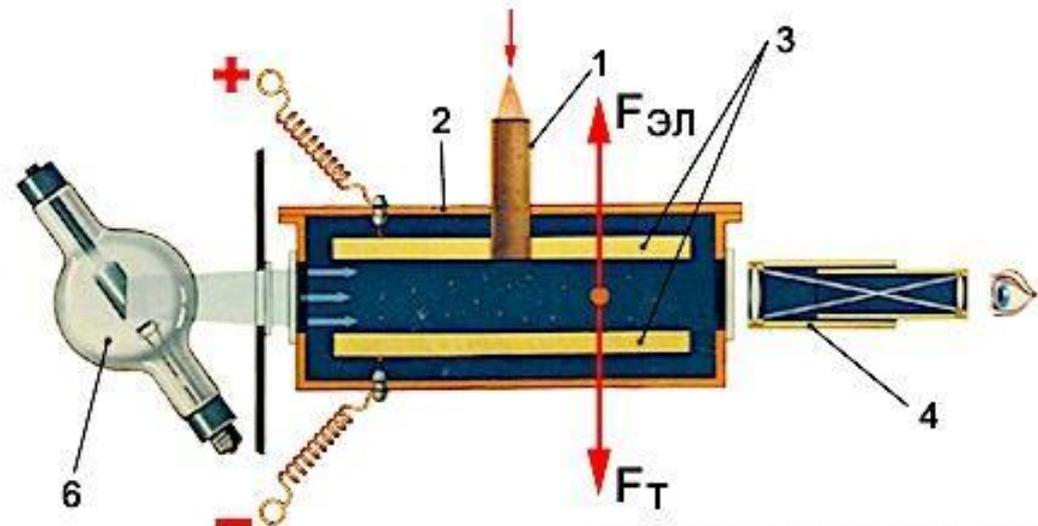
https://youtu.be/gY3_E-7CCqk

ЗАРЯЖЕННАЯ
ЧАСТИЦА В
ПОЛЕ ЗРЕНИЯ
МИКРОСКОПА



- 1 Трубка
- 2 Камера
- 3 Заряженные металлические пластины
- 4 Микроскоп
- 5 Устройство для получения ультрафиолетового излучения
- 6 Устройство для получения рентгеновского излучения
- 7 Заряженная частица в поле зрения микроскопа

МЕЛКИЕ ЧАСТИЦЫ
МАСЛА



ОПЫТ МИЛЛИКЕНА

Квантование заряда

- Электрон $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = -e$
- Протон $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = e$
- $Q = n e$ – электрический заряд тела пропорционален элементарному электрическому заряду (эл. заряд квантован/ дискретен)

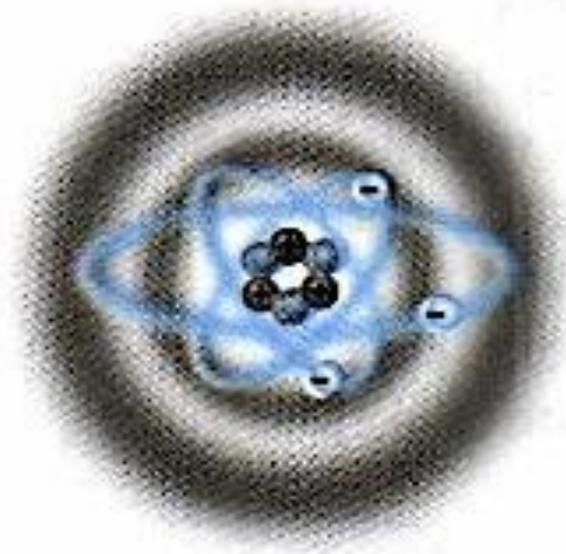
Элементарный электрический заряд



Ионизация вещества

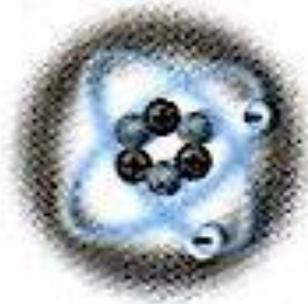
**Атом
лития**

3 протона
3 электрона



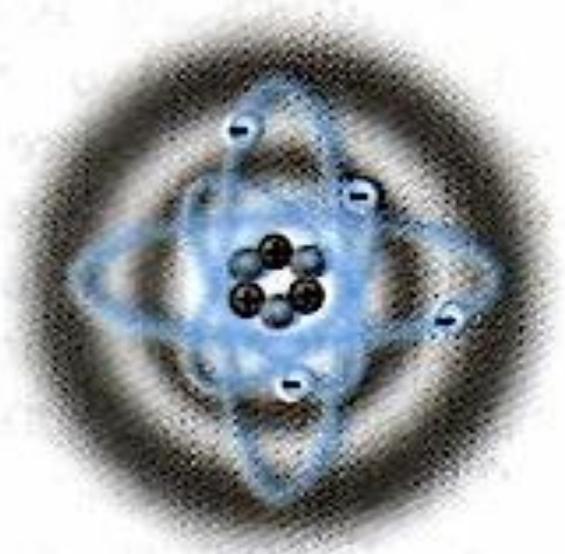
**Положительн
ый ион лития**

3 протона
2 электрона



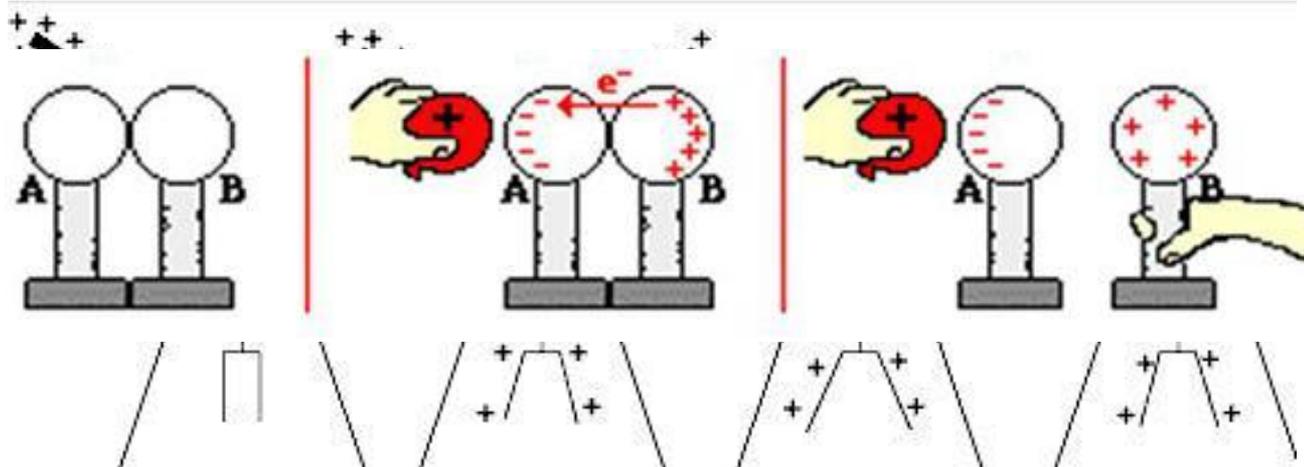
**Отрицательн
ый ион лития**

3 протона
4 электрона

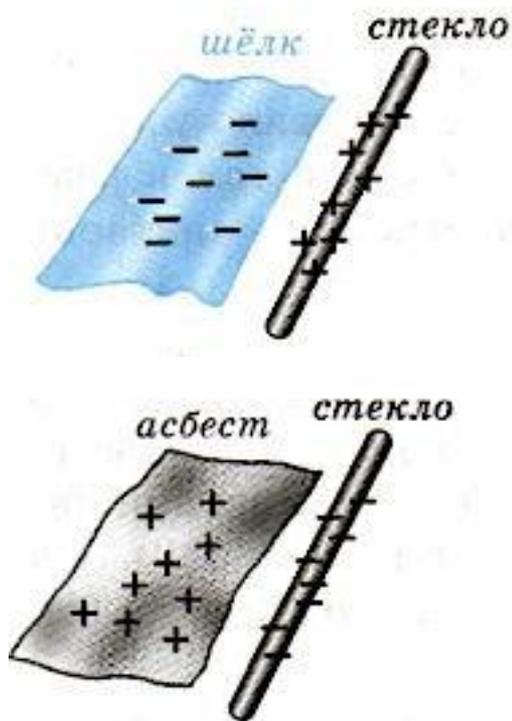
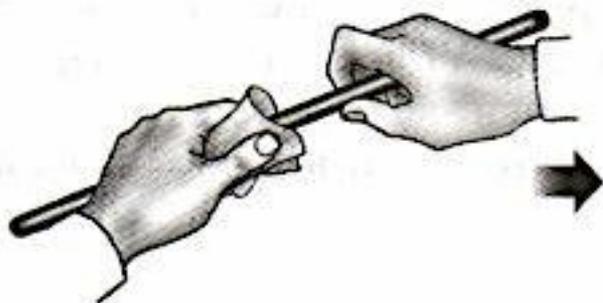


Электризация

- Нагревание
- Облучение
- Соприкосновение (трение, удар)
- Электростатическая индукция



Электризация трением



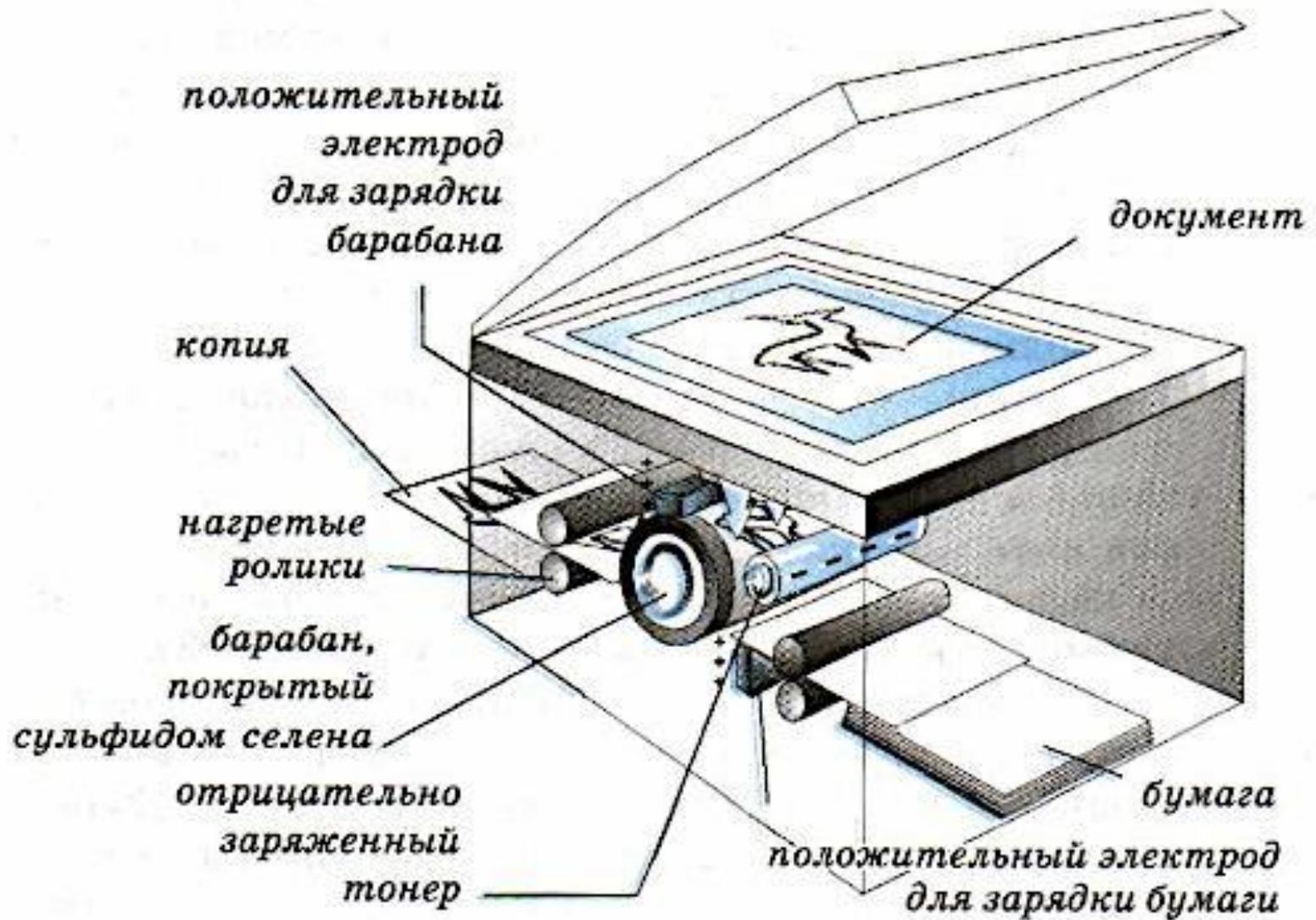
Причина – различие энергии связи электронов с атомом в различных веществах

Энергия связи электрона с атомом вещества

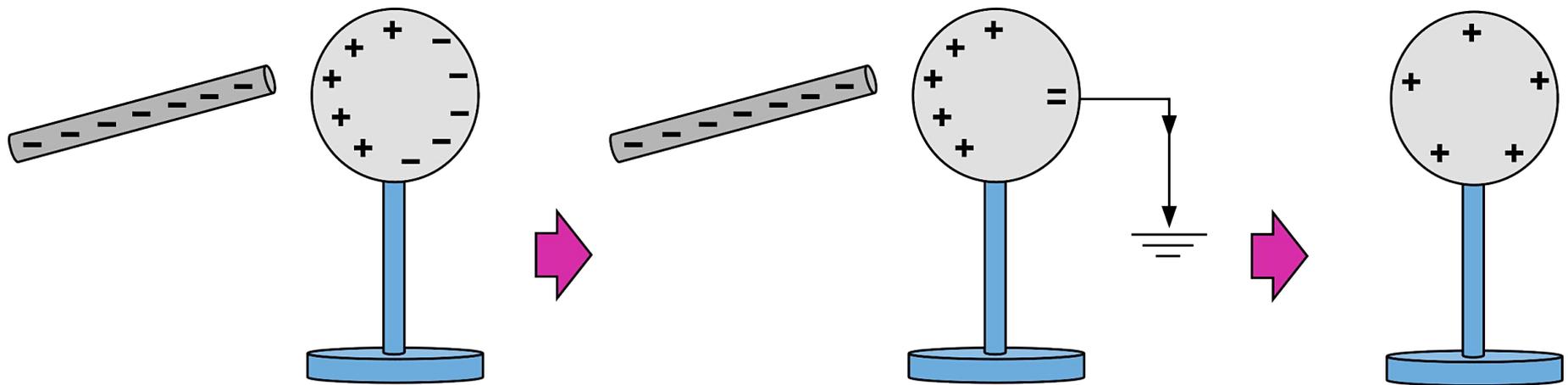
Вещество

- Асбест
- Мех (кролика)
- Стекло
- Слюда
- Шерсть
- Кварц
- Мех (кошки)
- Шёлк
- Кожа человека, алюминий
- Хлопок
- Дерево
- Янтарь
- Медь, латунь
- Резина
- Сера
- Целлулоид
- Каучук

Электризация облучением



Электростатическая индукция

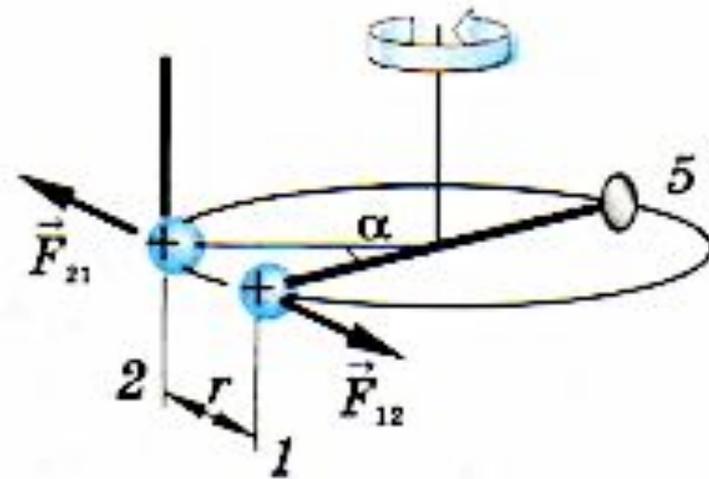
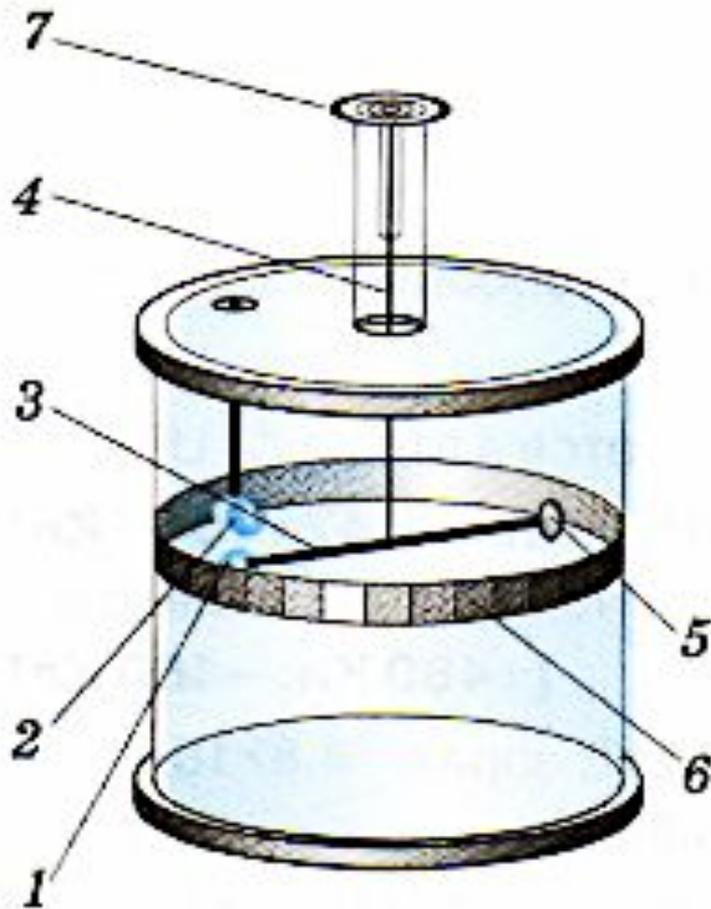


- <https://youtu.be/DGeH-Huf9uc>

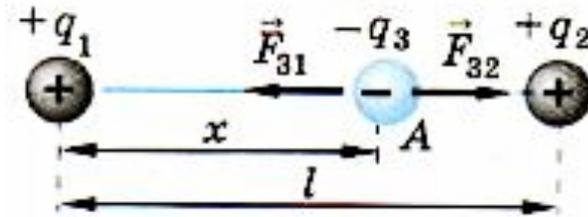
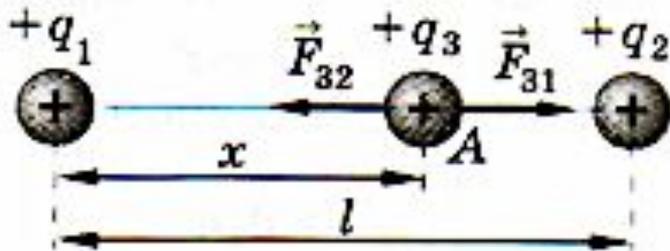
Закон сохранения заряда

- Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы постоянна
- $Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = \text{const}$

Закон Кулона



Равновесие статических зарядов



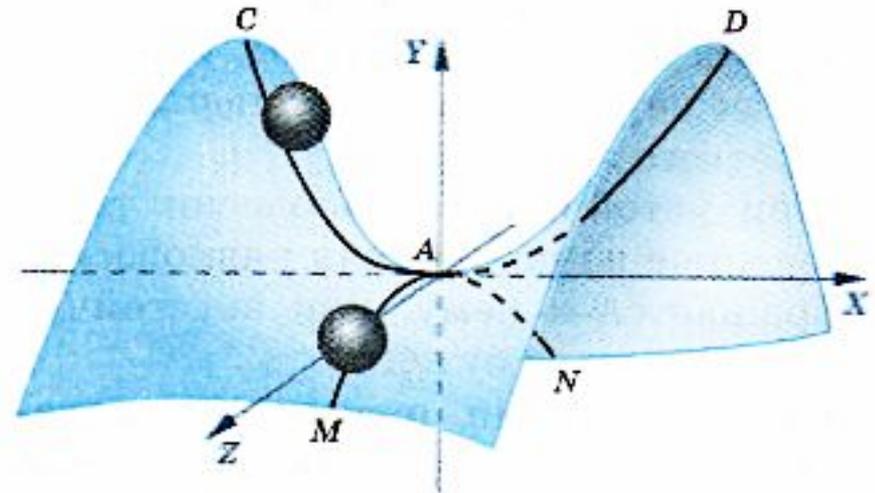
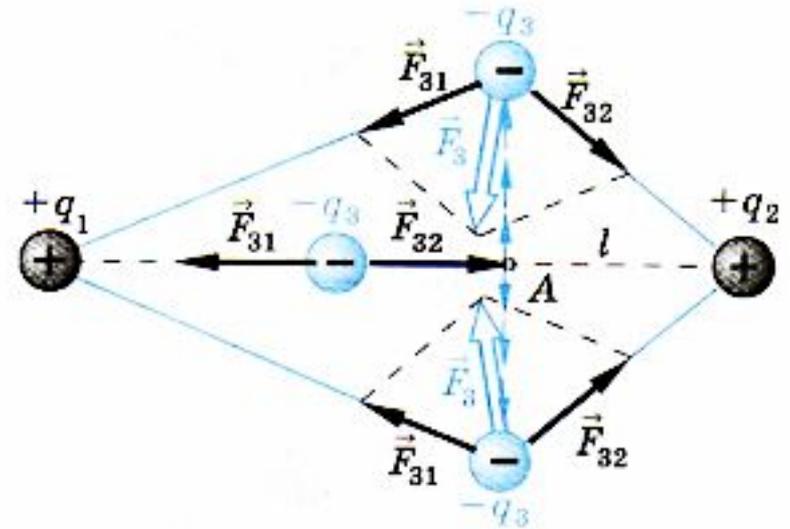
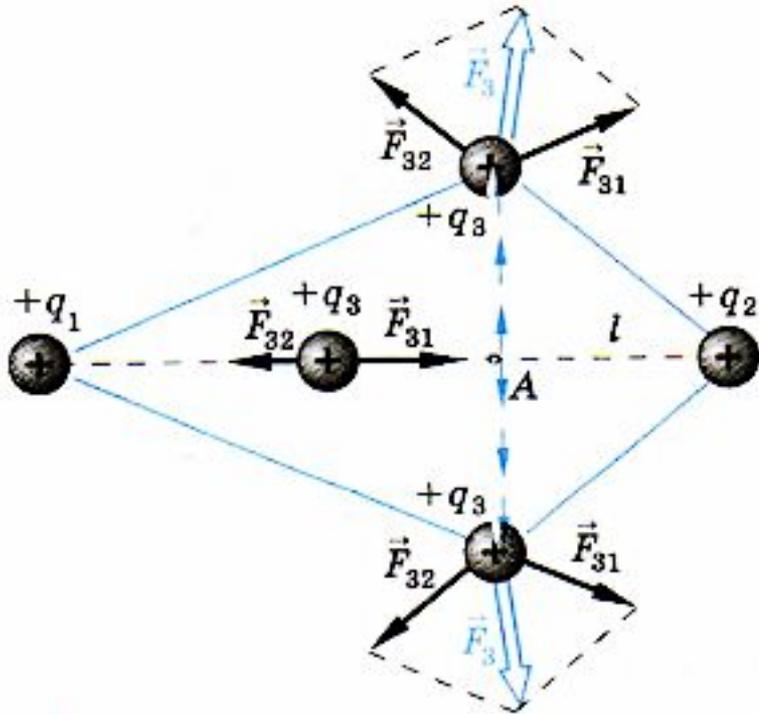
$$k \frac{q_3 q_1}{x^2} = k \frac{q_3 q_2}{(l-x)^2} \quad F_{31} = F_{32}$$

$$(\sqrt{q_2} x)^2 - (\sqrt{q_1})^2 (l-x)^2 = 0.$$

$$(\sqrt{q_2} x - \sqrt{q_1} (l-x)) (\sqrt{q_2} x + \sqrt{q_1} (l-x)) = 0$$

$$x_1 = l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}}, \quad x_2 = l \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} - \sqrt{q_2}}$$

Устойчивость равновесия зарядов



**Равновесие
статических
зарядов
неустойчиво**

Электростатическое поле

- Особая форма материи, осуществляющая взаимодействие неподвижных зарядов
- Источник поля – электрический заряд
- Скорость распространения $c=3 \cdot 10^8$ м/с
- Обнаруживается по силовому действию на внесённый в поле электрический заряд

Напряжённость электростатического поля



$$F_{q_0} = k \frac{Qq_0}{r^2}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{q_0}}{q_0}$$

Напряжённость электростатического поля – векторная физическая величина, равная отношению силы Кулона, с которой поле действует на пробный положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда

$$E = \text{Н/Кл}$$

Напряжённость электростатического поля

$$F_{q_0} = k \frac{Qq_0}{r^2}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{q_0}}{q_0}$$

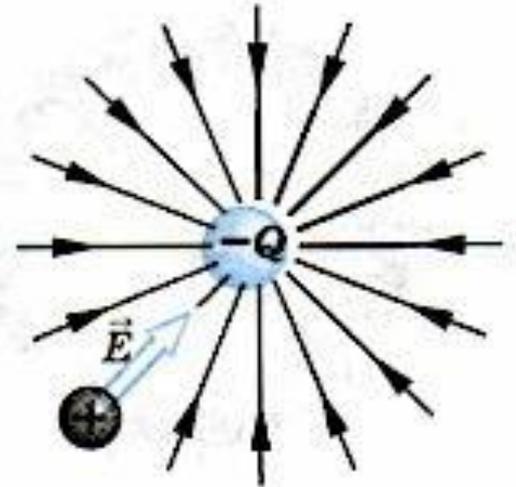
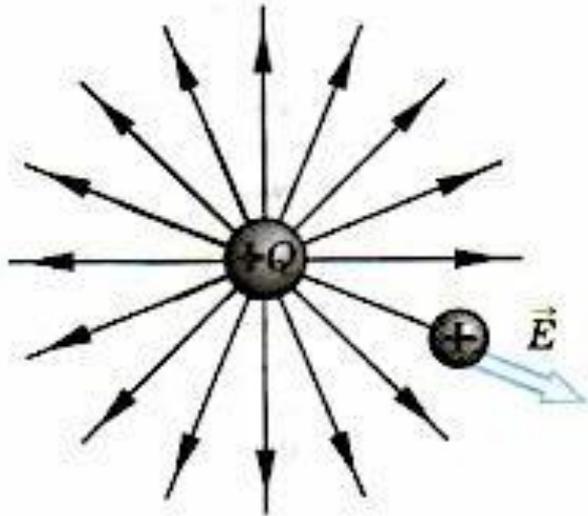
$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

Направление вектора напряжённости совпадает с направлением силы Кулона, действующей на единичный положительный заряд, помещённый в данную точку поля



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

Графическое изображение электростатического поля



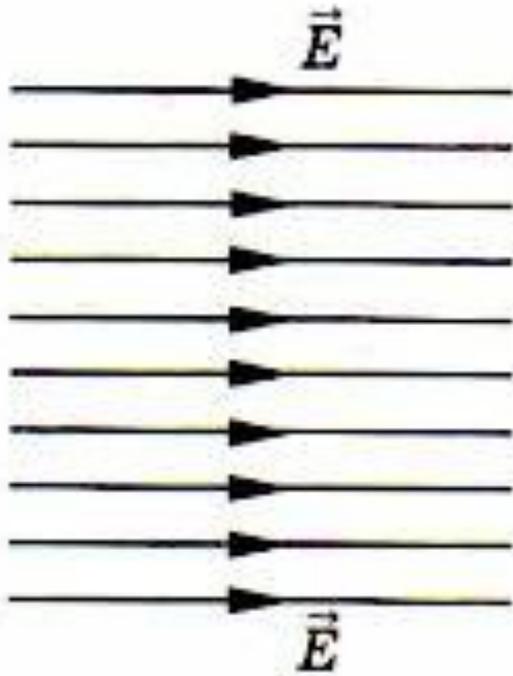
- Линии напряжённости – линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с вектором напряжённости электростатического поля в данной точке.

Свойства линий напряжённости

- Линии напряжённости не пересекаются
- Начинаются на + заряде или в бесконечности
- Заканчиваются на – заряде или в бесконечности
- Модуль напряжённости пропорционален степени сгущения линий напряжённости

$$E \sim \frac{N}{S}$$

Однородное электростатическое поле



Электрическое поле, векторы напряжённости которого одинаковы во всех точках пространства, называется однородным.
 $E = const$

Напряжённость поля системы зарядов

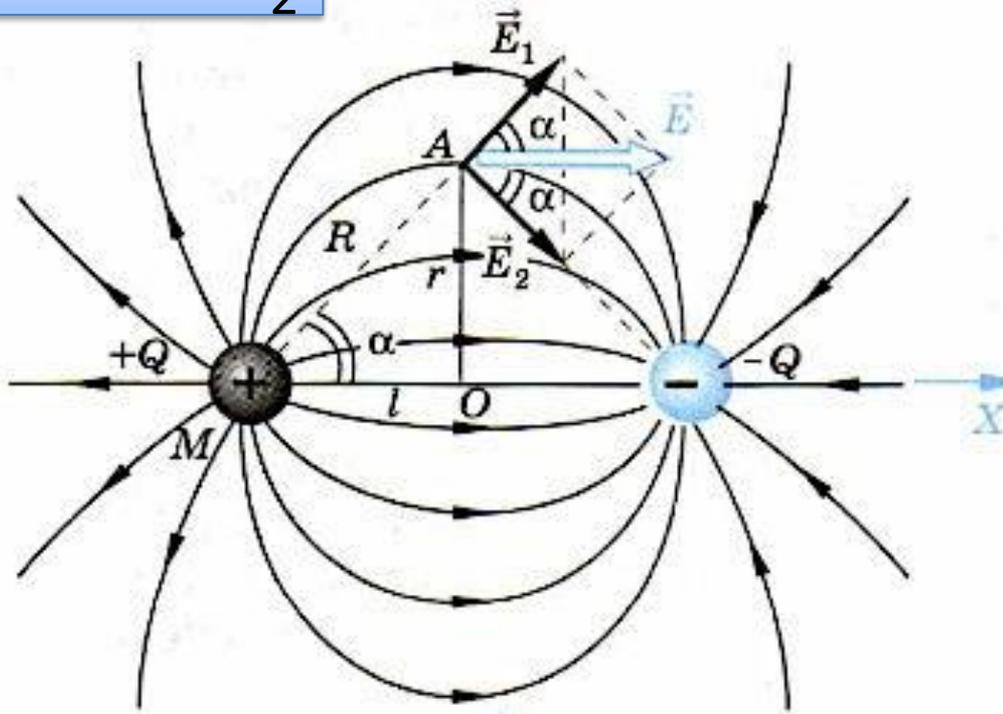
Принцип суперпозиции электростатических полей:

Напряжённость поля системы зарядов в данной точке равна геометрической сумме напряжённостей полей, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности

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

Электрическое поле диполя

HCl, CuCl₂



$$E_1 = E_2 = \frac{kQ}{R^2}$$

$$R^2 = r^2 + (l/2)^2$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2, \quad E_x = E_{1x} + E_{2x}$$

$$E_{1x} = E_{2x} = E_1 \cos \alpha$$

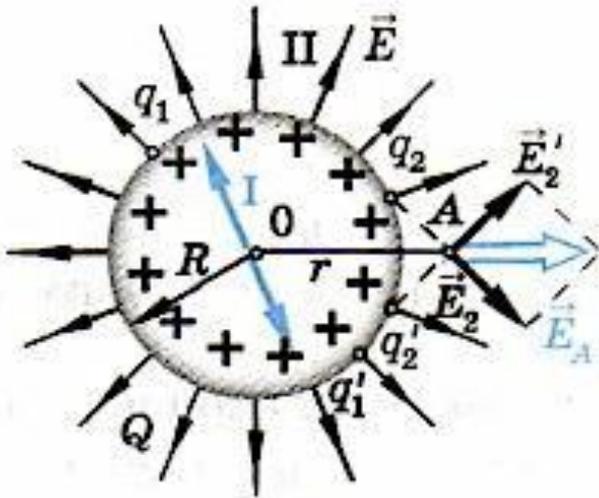
$$\cos \alpha = \frac{l/2}{R} = \frac{l/2}{\sqrt{r^2 + (l/2)^2}}$$

$$r \gg l$$

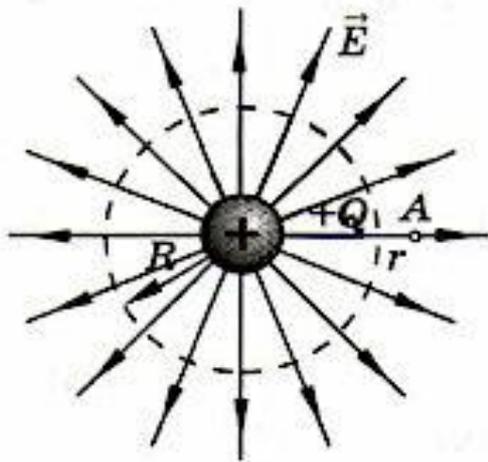
$$E \approx k \frac{Ql}{r^3}$$

$$E = k \frac{Ql}{(r^2 + (l/2)^2)^{3/2}}$$

Электростатическое поле заряженной сферы



- Внутри заряженной сферы
электростатическое поле
отсутствует $E = 0$

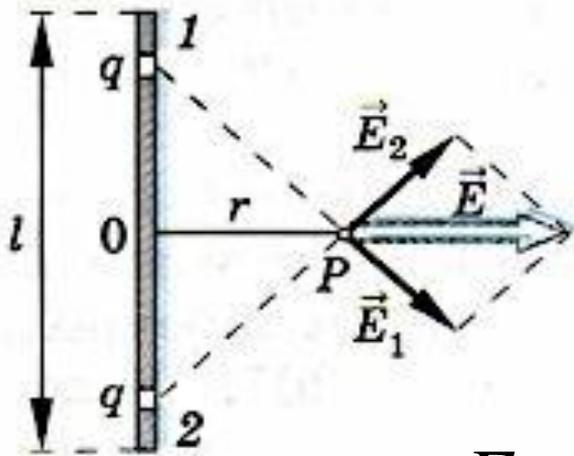


- Электростатическое поле,
созданное заряженной
сферой, сосредоточено
вне сферы $E = k \frac{Q}{r^2}$

$$r \geq R$$

Электрическое поле заряженной плоскости

- Поверхностная плотность заряда



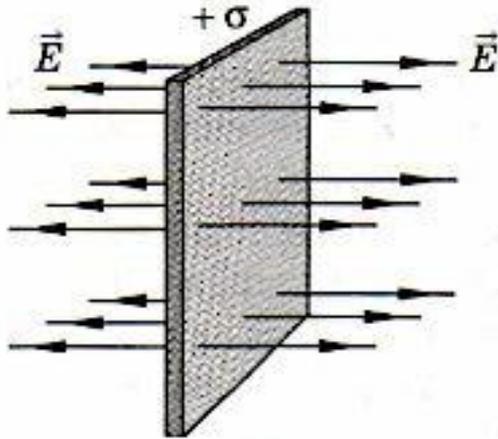
$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

$$E \cong \frac{N}{2S}$$

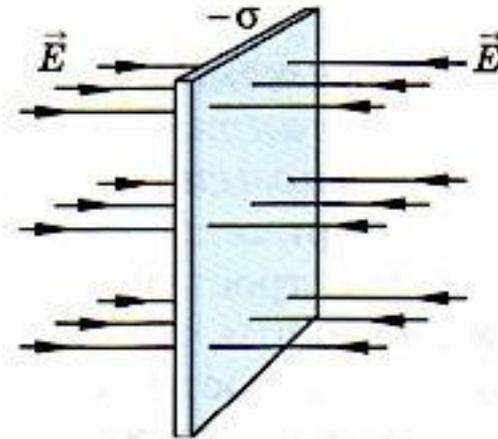
$$E_r = \frac{kQ}{r^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cong \frac{N}{4\pi r^2}$$

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

Линии напряжённости заряженной плоскости



Линии напряжённости
положительно
заряженной
бесконечной плоскости
направлены от неё
перпендикулярно её
поверхности



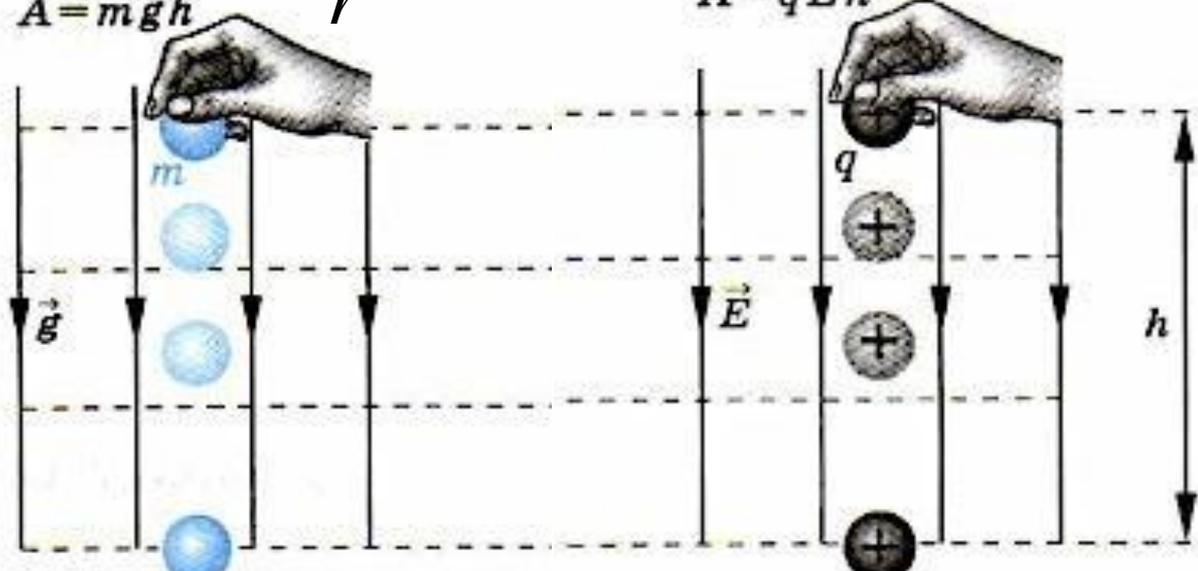
Линии напряжённости
отрицательно
заряженной бесконечной
плоскости направлены к
ней перпендикулярно её
поверхности

Работа сил однородного электростатического поля

- Гравитационное поле
 $g = const$ $F_g \approx \frac{1}{r^2}$
 $A = mgh$

- Электростатическое поле
 $E = const$ $F_k \approx \frac{1}{r^2}$
 $A = qEh$

- Работы силы зависят от начальной координаты

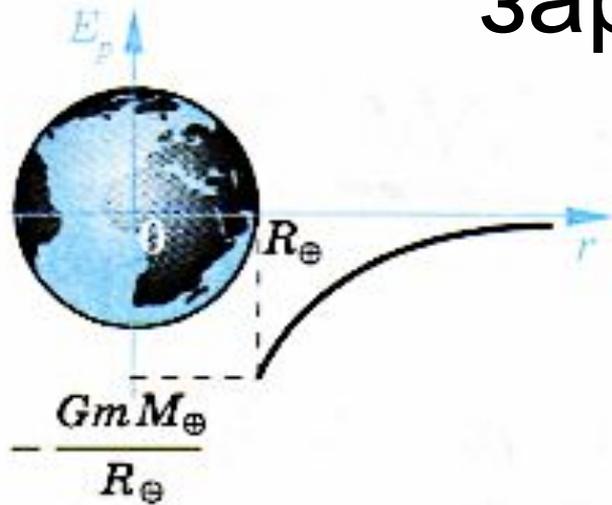


Этого поля мы не считаем и от тела

- Гравитационное поле
 $A_g = W_{p_1} - W_{p_2} = mgh_1 - mgh_2$

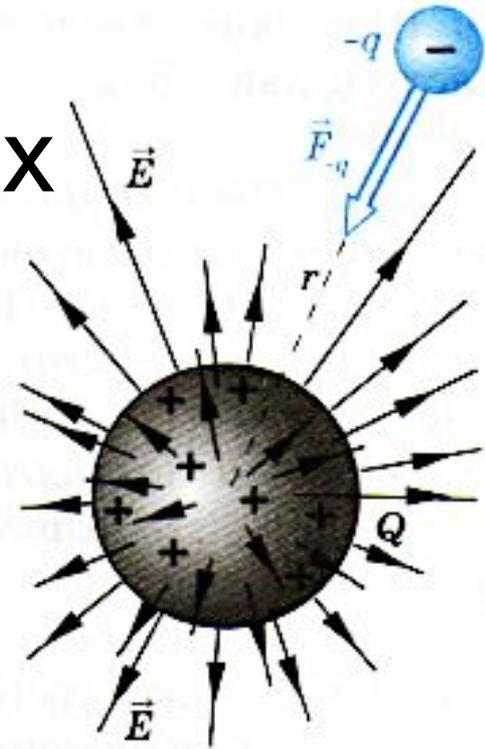
- Электростатическое поле
 $A_q = W_{p_1} - W_{p_2} = ?$

Потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов



$$F_g = G \frac{mM}{r^2}$$

$$E_p = -G \frac{mM}{r}$$



$$A = W_1 - W_2 = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_1} - k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_2}$$

$$W_{-q} = -k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r}$$

Нуль отсчёта потенциальной энергии находится в бесконечности

Характеристики электростатического поля

- Силовая характеристика электростатического поля
- Векторная физическая величина
- Не зависит от заряда q_0 , постоянна для данной точки поля
- Энергетическая характеристика электростатического поля
- Скалярная физическая величина
- Не зависит от заряда q_0 , постоянна для данной точки поля

$$E = \frac{F}{q_0}$$

$$\varphi = \frac{W}{q_0}$$

- напряжённость, Н/Кл

- потенциал, В (вольт)

Потенциал электростатического поля

Потенциал электростатического поля в данной точке — скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии, которой обладает пробный положительный заряд, помещённый в данную точку поля, к значению этого заряда:

- Формула-определение:
- Формула зависимости:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}$$

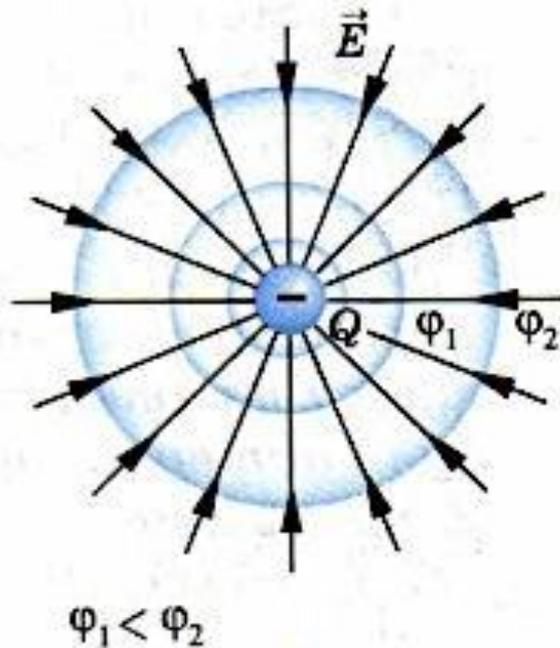
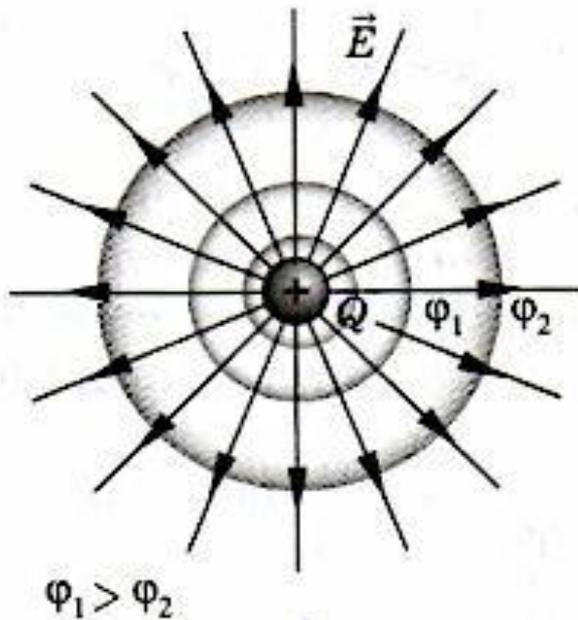
$$\varphi = \frac{W}{q_0} = k \frac{Qq_0}{rq_0} = k \frac{Q}{r}$$

- Если $Q > 0$, то $\varphi > 0$
- Если $Q < 0$, то $\varphi < 0$

Для точечного заряда
или заряженной сферы
(вне её)

Эквипотенциальные поверхности

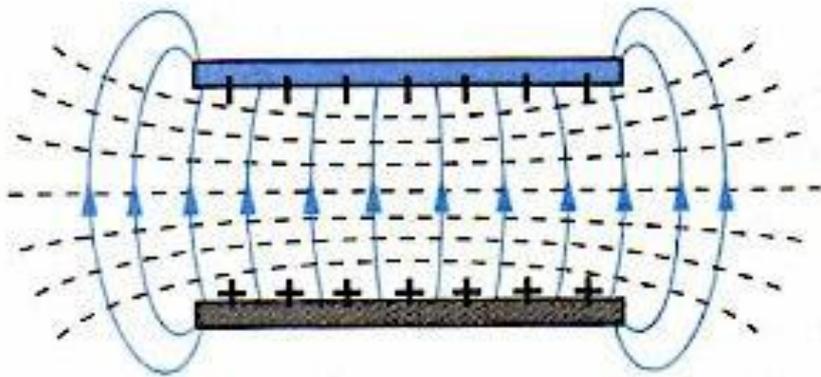
- - поверхности равного потенциала



- Для точечных зарядов – сферы, в центре которых расположен заряд

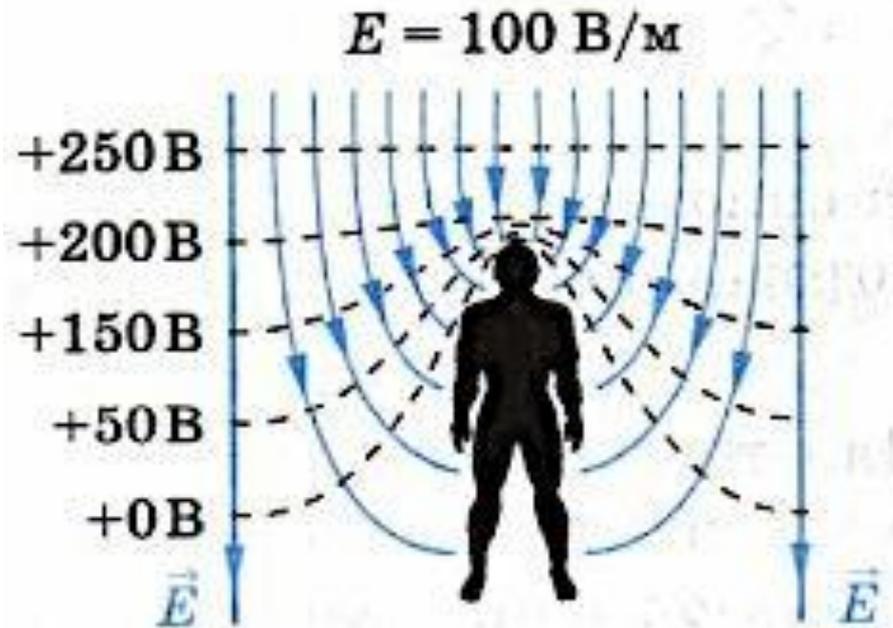
Эквипотенциальные поверхности

- Однородное электростатическое поле



- Плоскости, параллельные заряженным пластинам (за исключением их краёв)

- Вблизи поверхности Земли



Работа электростатического поля и потенциал

- Пусть заряд q перемещается из точки 1 в точку 2 электростатического поля. Тогда

$$A = W_1 - W_2 = q\varphi_1 - q\varphi_2$$

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

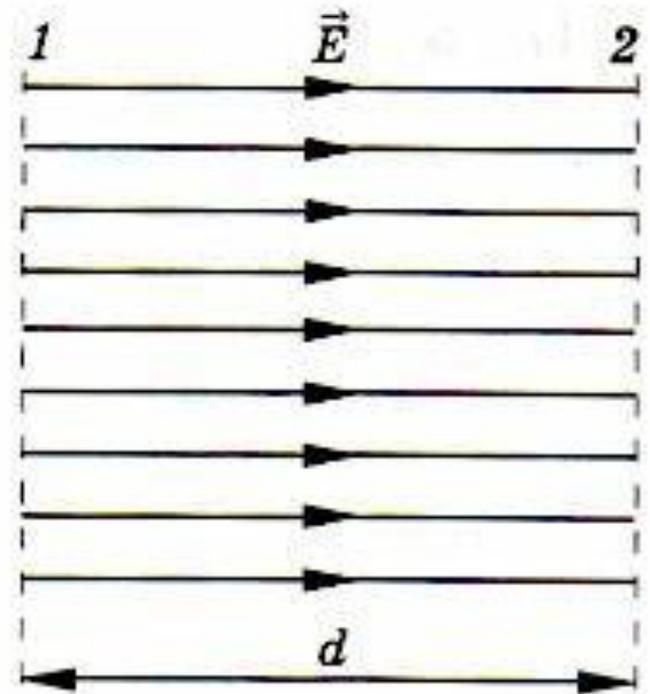
- Рассмотрим однородное электростатическое поле.

Разность потенциалов называют напряжением U

- $A = qU = qEd$

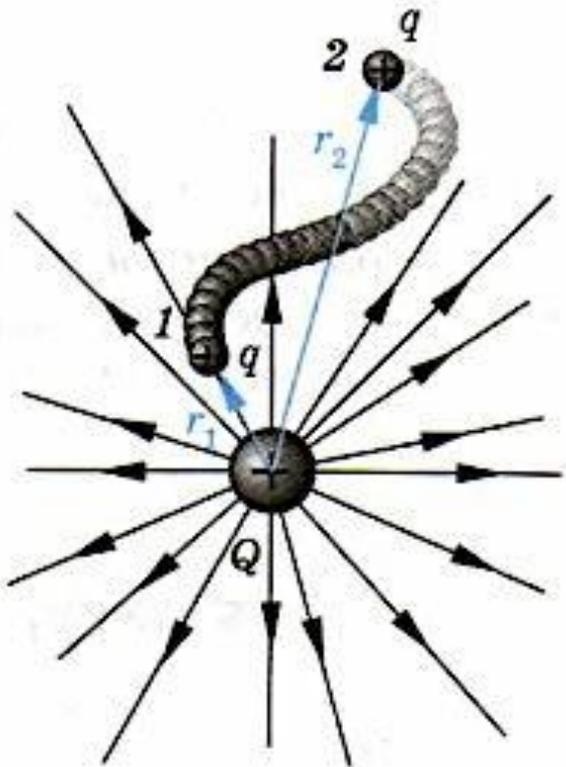
- $U = Ed$

➔ $[E] = \text{В/М}$



$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = Ed$$

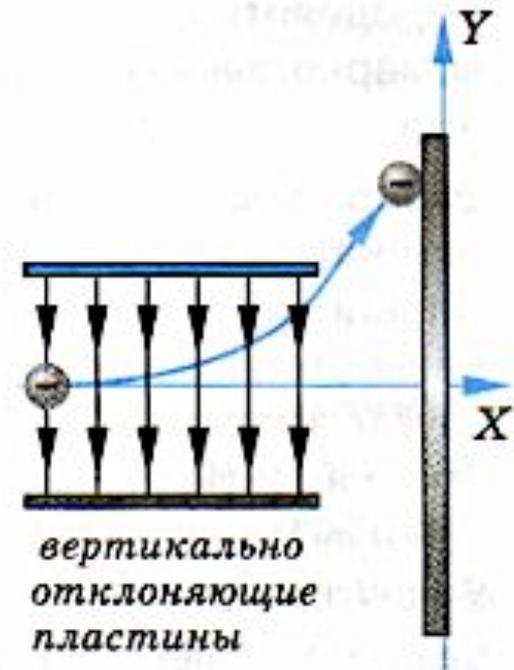
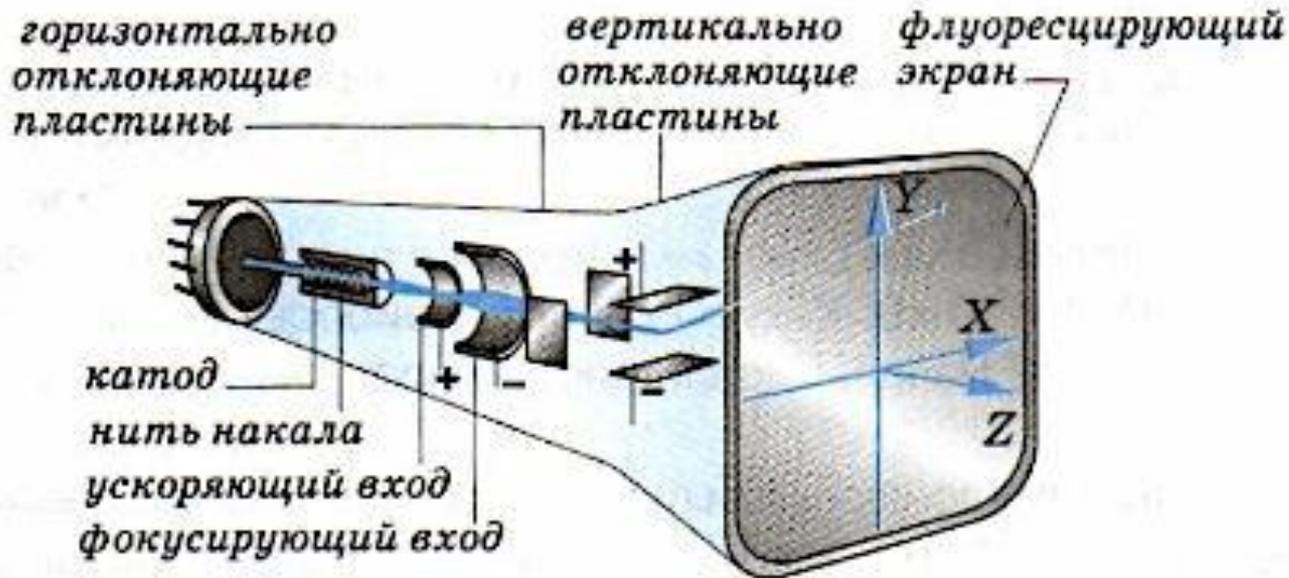
Разность потенциалов в неоднородном поле



- Разность потенциалов не зависит от формы траектории заряда между точками 1 и 2

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = kQ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Движение электронов в электронно-лучевой трубке



Для формирования электронного пучка применяется значительная разность потенциалов порядка 10^3 В

Электрическое поле в веществе

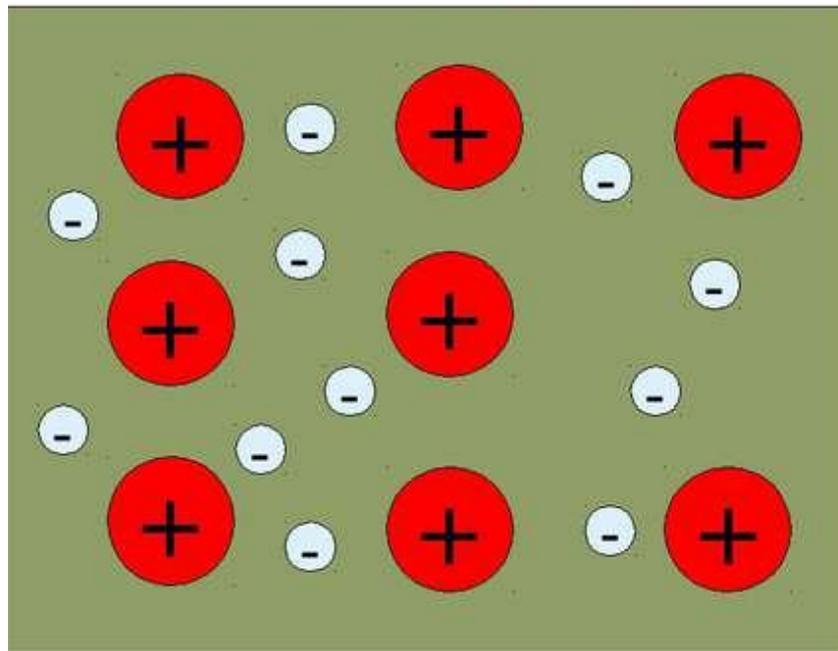
Электрические характеристики вещества
определяются:

концентрацией
заряженных частиц

подвижностью
зарядов

Строение атомов и их
взаимное

расположение
Энергия связи электрона с
атомом меньше энергии его
взаимодействия с
соседними атомами



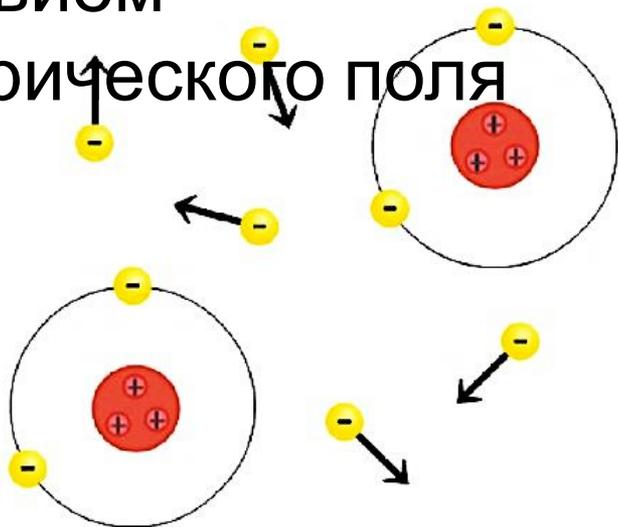
Виды зарядов в веществе

- Свободные

- заряженные частицы одного знака,

способные перемещаться под действием

электрического поля

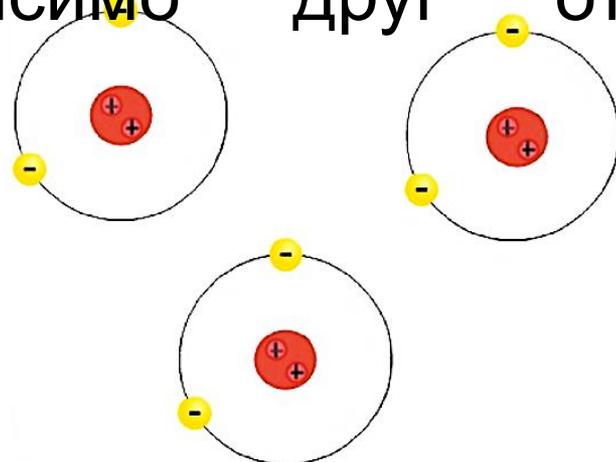


- Связанные

- разноимённые заряды,

входящие в состав атомов (молекул), не могут перемещаться под действием

электрического поля независимо друг от друга



Вещество (по электрическим свойствам)

Проводники

Вещество, в котором свободные заряды могут перемещаться по всему объёму.

Металлы, растворы солей, щелочи и кислоты.

воздух, плазма, почва, тело

Полупроводники

Вещество, в котором количество свободных зарядов зависит от внешних условий:

температуры, освещённости, напряжённости электрического поля

Минералы, оксиды, сульфиды, германий, кремний, селен и др.

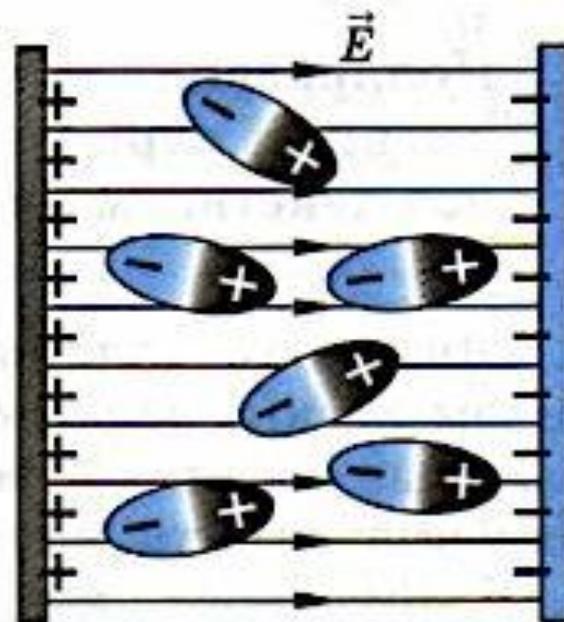
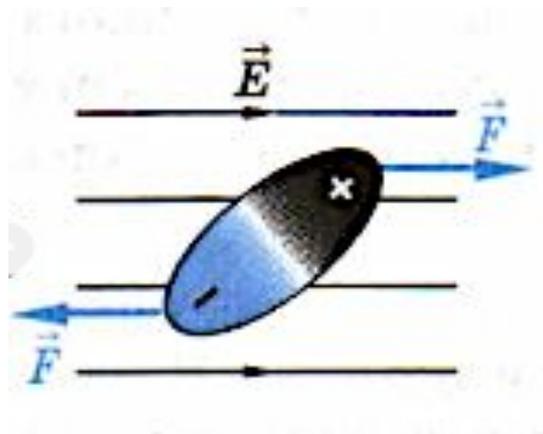
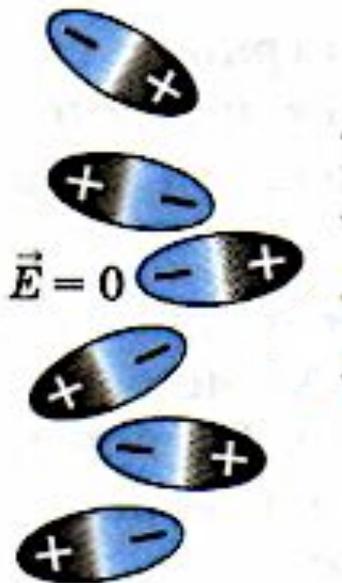
Диэлектрики

Вещество, содержащее только связанные заряды.

Газы, дистиллированная вода, масло, резина, фарфор, стекло

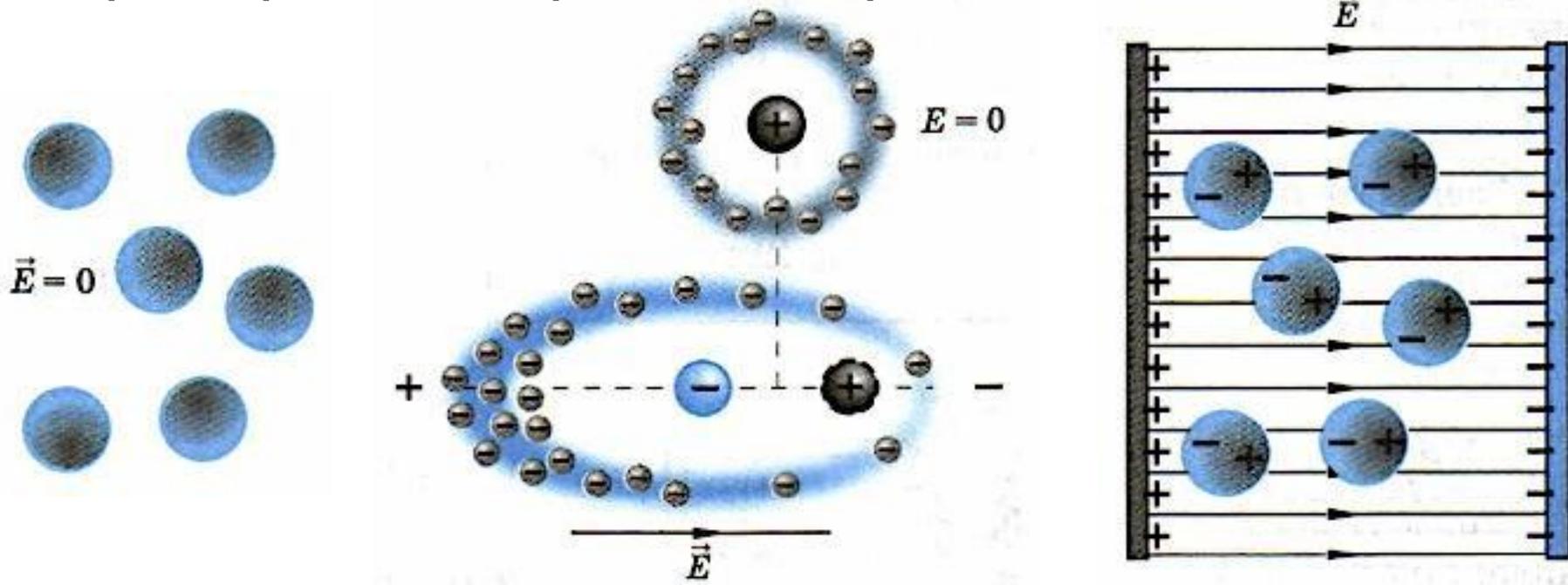
Диэлектрики в электростатическом поле

- Полярные диэлектрики – центры связанных зарядов находятся на некотором расстоянии.
- Модель – электрический диполь
- Примеры – вода, аммиак, спирты



Диэлектрики в электростатическом поле

- неполярные диэлектрики – центры положительных и отрицательных связанных зарядов совпадают
- Примеры – водород, кислород, азот



Поляризация диэлектриков

- процесс ориентации диполей или появление под действием внешнего электрического поля ориентированных по



Напряжённость электрического поля в диэлектрике меньше, чем в вакууме

Относительная диэлектрическая проницаемость

- - число, показывающее во сколько раз напряжённость электростатического поля в однородном диэлектрике меньше, чем напряжённость в вакууме
- ε – относительная диэлектрическая проницаемость

$$E = \frac{E_{vak}}{\varepsilon}$$

Формулы электростатики для диэлектрической среды

$$E = \frac{E_{vak}}{\varepsilon} \Rightarrow F = qE = q \frac{E_{vak}}{\varepsilon} = k \frac{qQ}{\varepsilon r^2}$$

$$E = \frac{E_{vak}}{\varepsilon} = k \frac{Q}{\varepsilon r^2}$$

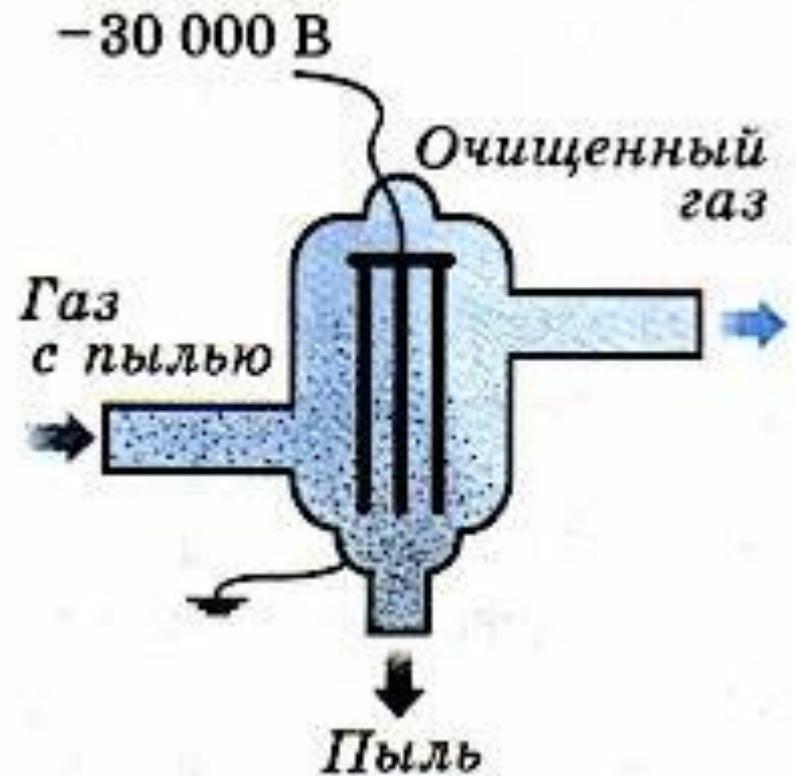
$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$W = k \frac{qQ}{\varepsilon r^2}$$

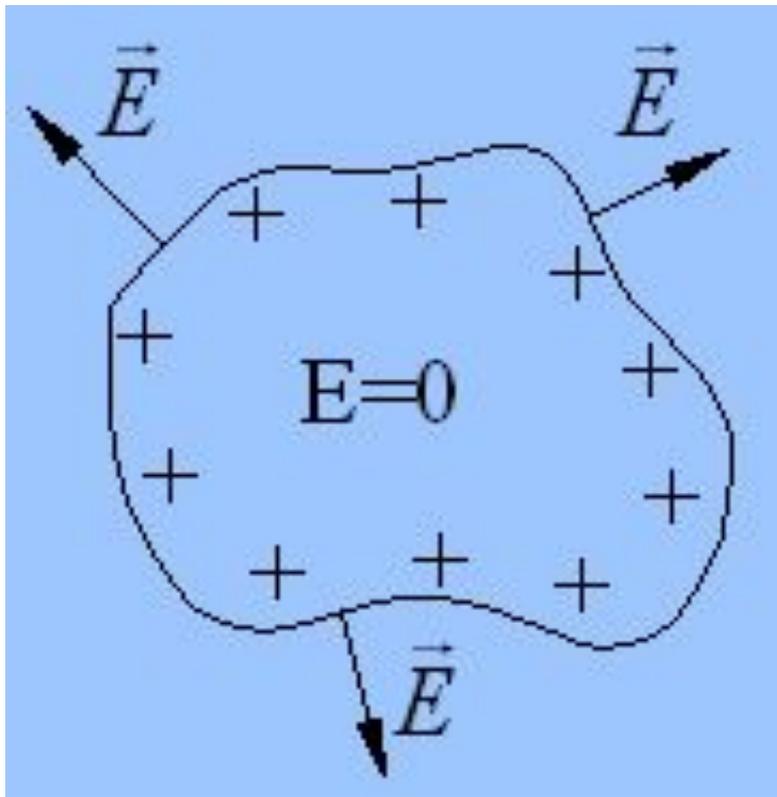
$$\varphi = k \frac{Q}{\varepsilon r}$$

Фильтр очистки газа

- Частицы угольной пыли, попав в сильное электростатическое поле, поляризуются и притягиваются к вертикальным электродам
- Под действием силы тяжести пыль оседает на дне фильтра
- Очищенный воздух циркулирует в шахте



Распределение зарядов на проводнике



- Заряды, сообщённые проводнику, распределяются по его поверхности
- Напряжённость поля внутри проводника равна 0
- Линии напряжённости электростатического поля перпендикулярны его поверхности

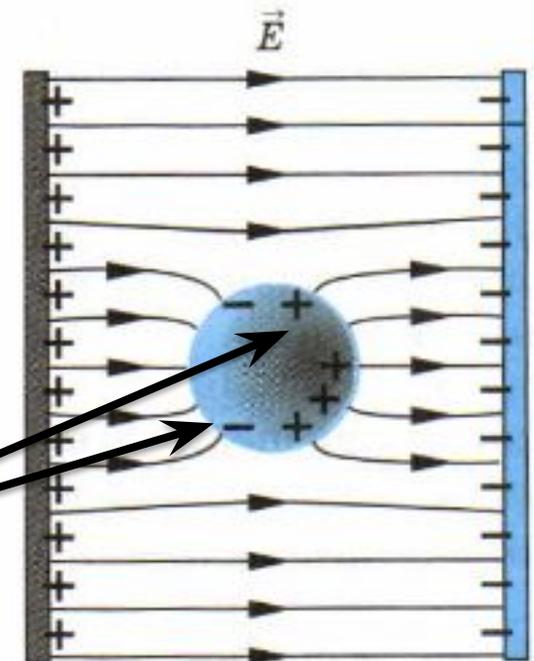
Электростатическая индукция

- - перераспределение зарядов в проводнике под действием внешнего электростатического

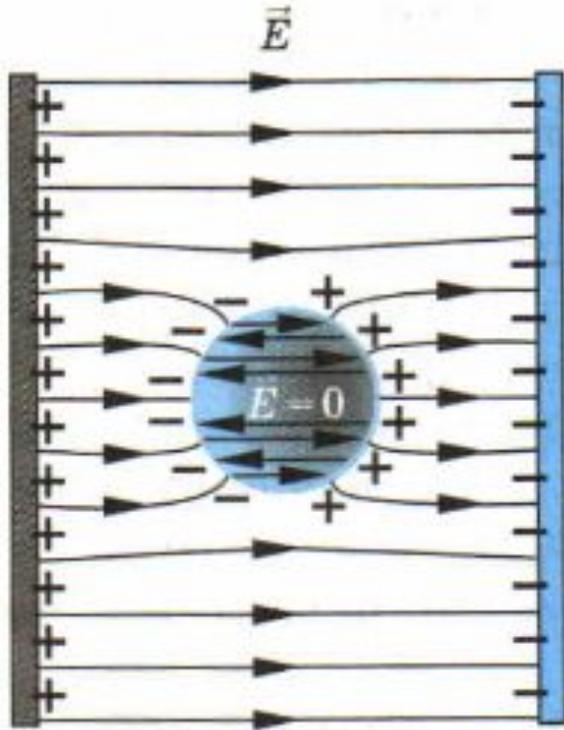
поля

Разделение зарядов прекращается, когда сила притяжения зарядов к пластинам будет равна силе притяжения индуцированных зарядов

Индуцированные заряды



Проводники в электростатическом поле



$$\vec{E} = \vec{E}_{vn} + \vec{E}_{ind}$$

$$\vec{E}_{vn} \uparrow \downarrow \vec{E}_{ind} \quad E_{vn} = E_{ind}$$

$$\vec{E} = 0$$

Напряжённость поля внутри проводника, помещённого в электростатическое поле, равна нулю.

$$\vec{E} = 0 \Rightarrow A = qEd = 0$$

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \Rightarrow \varphi_1 = \varphi_2$$

Поверхность проводника – эквипотенциальная поверхность

Электростатическая защита

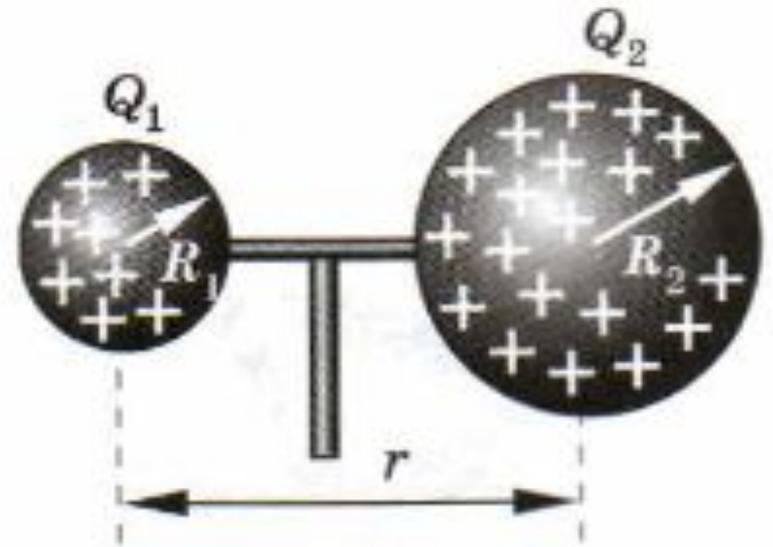


https://youtu.be/PF6eFwYcC_0 - клетка
Фарадея

Распределение зарядов между проводниками

- $R_2 > R_1$; Q_1 и Q_2
- $r \gg R_2$
- Находятся ли заряды в равновесии?

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$$



Условие равновесия зарядов:

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

Распределение зарядов между проводниками

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad Q_1 + Q_2 = q_1 + q_2$$

$$k \frac{q_1}{R_1} = k \frac{q_2}{R_2} \quad Q_1 + Q_2 = q_1 + q_1 \frac{R_2}{R_1} = q_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$q_2 = q_1 \frac{R_2}{R_1}$$

$$q_1 = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_1$$

$$q_2 = \frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} R_2$$

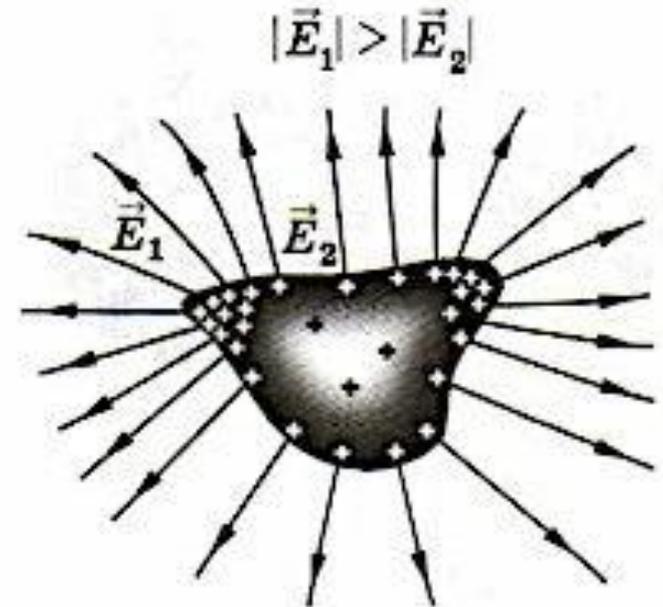
Заряды на сферах
перераспределяются

пропорционально радиусу сфер

Напряжённость поля, созданного сферой

$$E = k \frac{q_1}{R_1^2} = k \frac{Q_1 + Q_2}{(R_1 + R_2)R_1^2} R_1 = k \frac{Q_1 + Q_2}{(R_1 + R_2)} \cdot \frac{1}{R_1}$$

Напряжённость поля, созданного заряженным проводником, наибольшая вблизи области с малым радиусом кривизны



Задача 1.

Металлические шары, несущие одинаковый заряд, имеют потенциалы 30 и 60 В. Определите потенциалы этих шаров после соединения их проволокой.

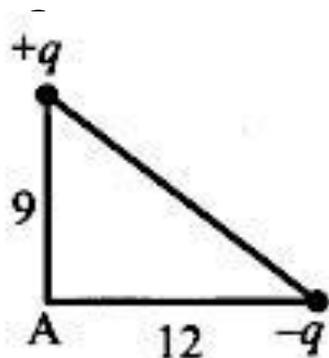
Ответ: 40 В

Задача 2. Металлический шарик диаметром $d=2$ см заряжен до потенциала $\varphi=-150$ В. Сколько электронов находится на поверхности шарика?

Ответ:

10^9

Задача



Два заряда $+q$ и $-q$ находятся в вершинах прямоугольного треугольника, катеты которого 9 и 12 м (см. рисунок). Определите результирующий потенциал в точке А, находящейся в вершине прямого угла.

Ответ:

$kq/36$

Задача. В одну большую каплю сливают n одинаковых капелек ртути, заряженных до потенциала φ . Каков будет потенциал Φ этой капли? Считать, что капли имеют сферическую форму.

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} \quad Q = n \cdot q$$

- Пусть $n = 32$, $\varphi = 100$ В, тогда $\Phi = ?$

$$n \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi R^3 \Leftrightarrow R = r\sqrt[3]{n}.$$

$$\Phi = \frac{nq}{4\pi\epsilon_0 r\sqrt[3]{n}} = \frac{q\sqrt[3]{n^2}}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad \Phi = \varphi\sqrt[3]{n^2}.$$

Ответ: 1008 В

Электроёмкость уединённого проводника

- - физическая величина, равная отношению заряда проводника к его потенциалу

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

- Единица измерения электроёмкости – **фарад (Ф)**
- $1\text{Ф} = 1\text{ Кл/В}$

Ёлектроёмкость заряженной сферы

$$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{q}{k \frac{q}{R}} = \frac{1}{k} R = 4\pi\epsilon_0 R$$

- Пусть $C=1\text{Ф}$. Вычислим радиус такой сферы:

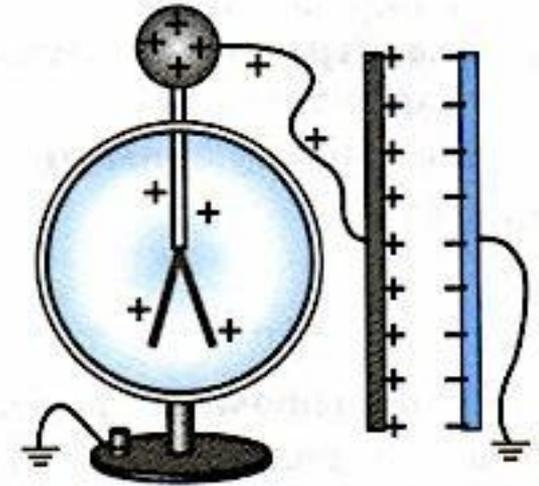
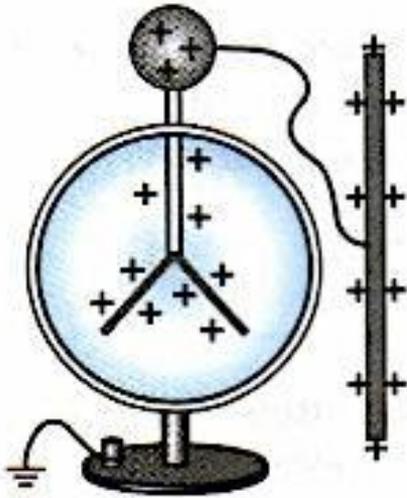
- $$R = \frac{C}{4\pi\epsilon_0} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ м}$$

- Для сравнения радиус Солнца $7 \cdot 10^8 \text{ м}$
- Ёлектроёмкость Земли $0,7 \text{ мФ}$ – большая величина!

Электроёмкость конденсатора

Конденсатор – система двух проводников с равными по величине и противоположными по знаку зарядами

$$C = \frac{q}{U}$$



Электроёмкость конденсатора – физическая величина, равная отношению заряда одного из проводников к разности потенциалов между этим проводником и соседним.

Электроемкость плоского конденсатора

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{Ed}$$

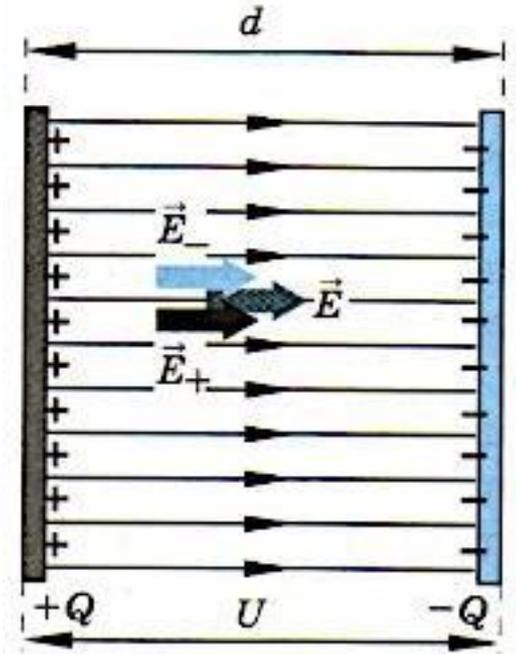
$$q = \sigma S$$

$$E = E_+ + E_-$$

$$E_+ = E_- = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

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

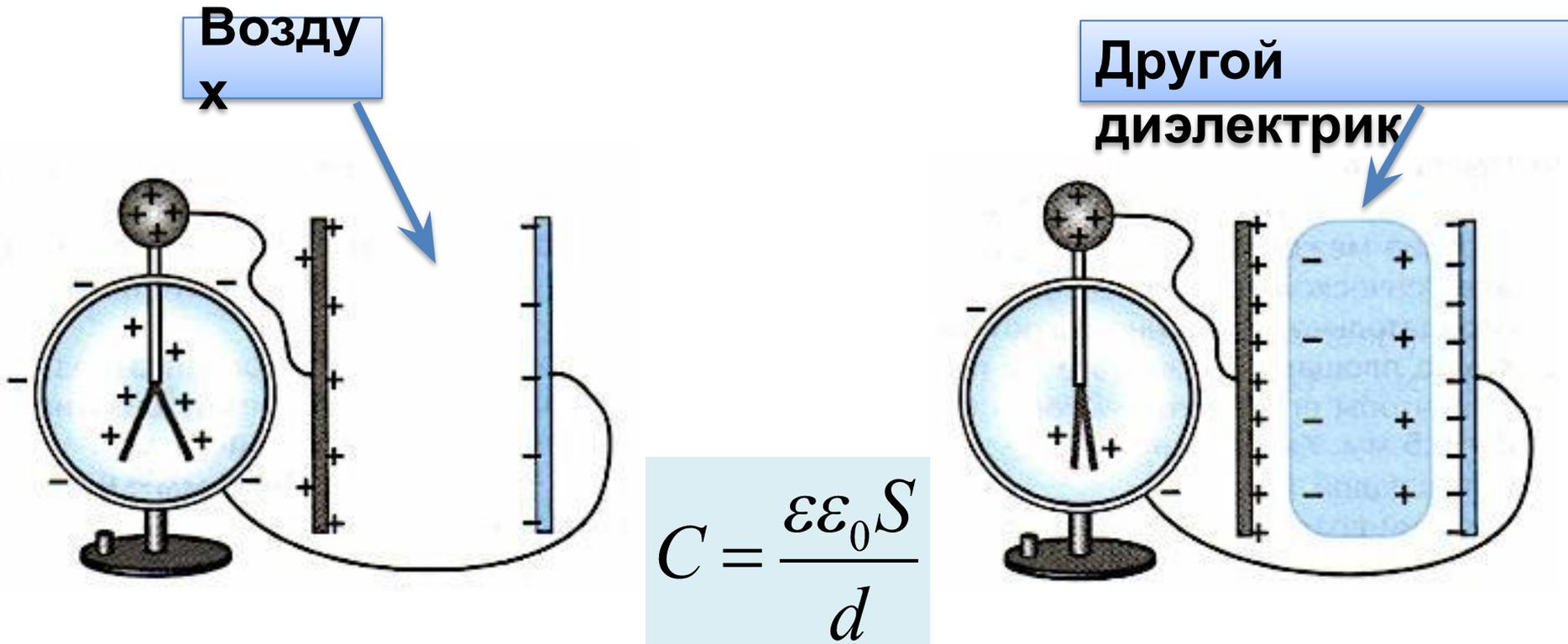
$$C = \frac{\sigma S}{\frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$



- Электроемкость конденсатора не зависит от заряда пластин и от разности потенциалов

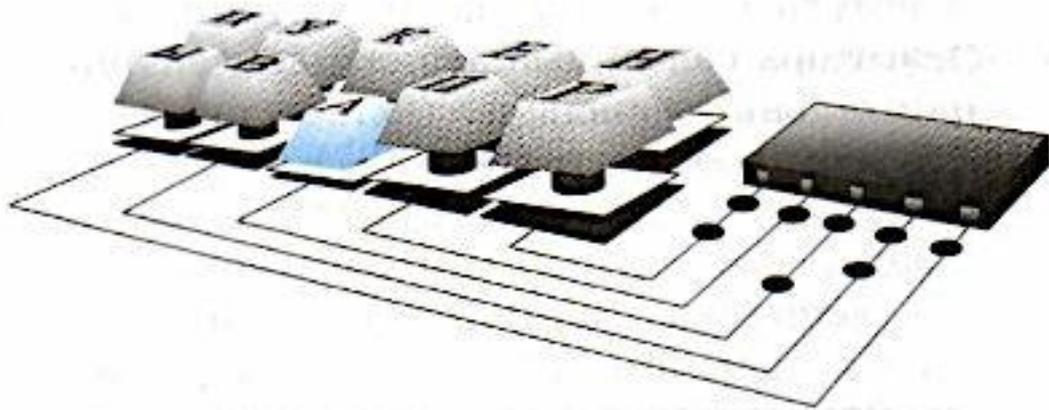
$$C \cong S \quad C \cong \frac{1}{d}$$

Электроемкость плоского конденсатора



- В результате введения диэлектрика между пластинами конденсатора электроёмкость конденсатора увеличивается

Принцип работы клавиатуры компьютера

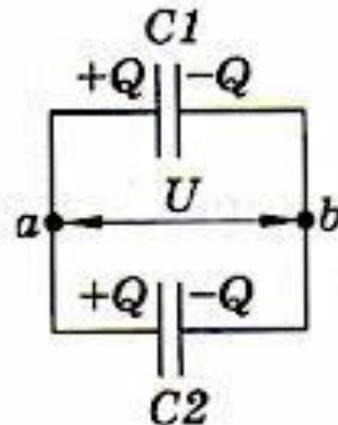
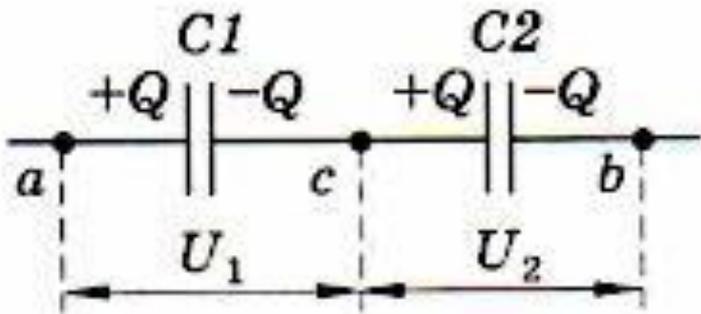


- Под каждой клавишей – конденсатор
- При нажатии на клавишу изменяется ёмкость
- Микросхема, подключённая к клавише создаёт кодированный сигнал, соответствующий данной букве

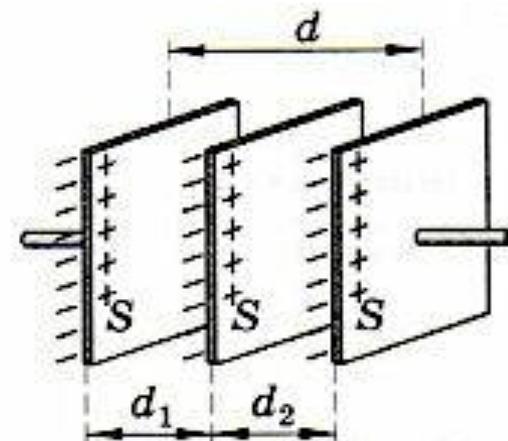
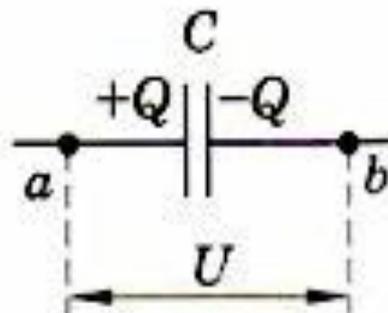
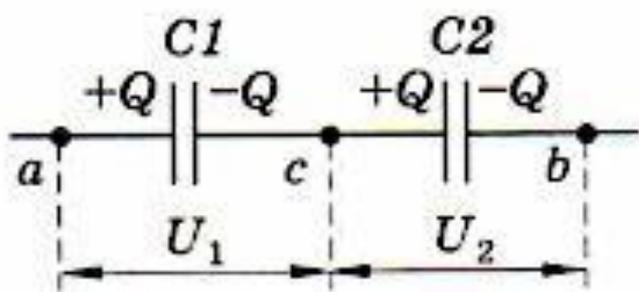
Соединение конденсаторов

Последовательн
– ое соединение при
котором разноимённые
пластины предыдущего
конденсатора и только
одного из последующих
соединяются между
собой

Параллельн
– ое соединение, при
котором все
конденсаторы
подключены между
одной и той же парой
точек (узлами)



Законы последовательного соединения конденсаторов



$$Q_1 = Q_2 = Q.$$

$$U = U_1 + U_2.$$

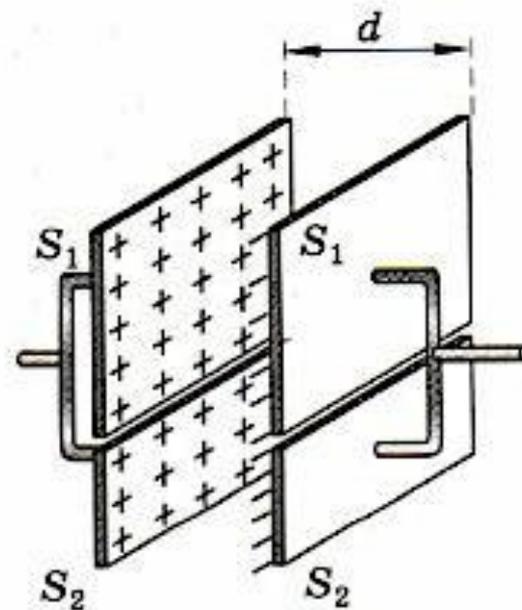
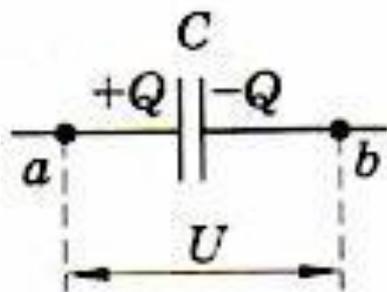
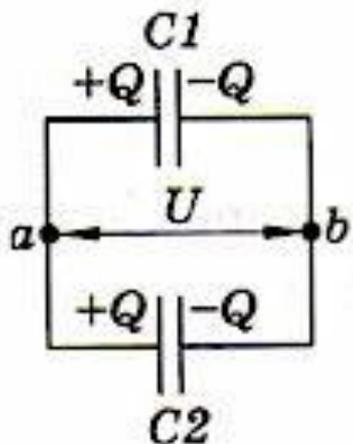
$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}.$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Величина, обратная электроёмкости батареи последовательно соединённых конденсаторов равна сумме величин, обратных электроёмкости каждого из

НИХ

Законы параллельного соединения конденсаторов



$$Q = Q_1 + Q_2$$

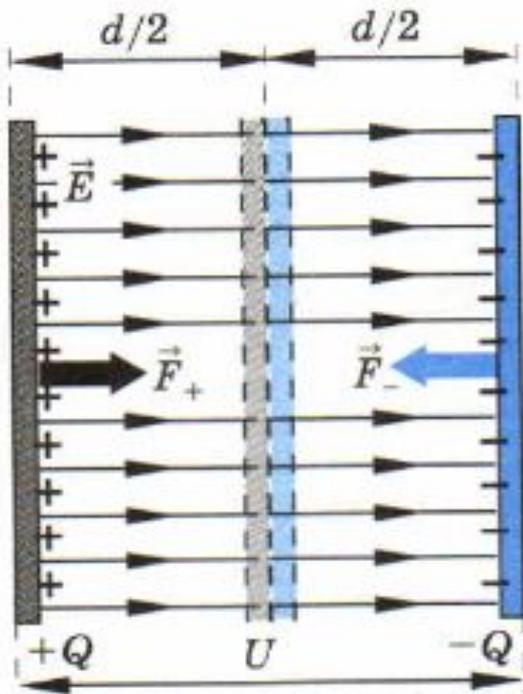
$$U = U_1 = U_2$$

$$CU = C_1U + C_2U$$

$$C = C_1 + C_2$$

Ёлектроёмкость батареи параллельно соединённых конденсаторов равна сумме ёлектроёмкостей каждого из них

Потенциальная энергия пластин конденсатора



$$E_+ = E_- = \frac{1}{2} E = \frac{1}{2} \frac{U}{d}$$

$$F_+ = F_- = Q \cdot \frac{1}{2} \frac{U}{d}$$

$$A_+ = F_+ \frac{d}{2}, \quad A_- = F_- \frac{d}{2}$$

$$A = A_+ + A_- = \frac{QU}{2} = W$$

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

Объёмная плотность энергии электростатического поля

- - физическая величина, равная отношению энергии электростатического поля, сосредоточенного в объёме, к этому объёму.

$$w = \frac{W}{V}$$

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$



$$W = \frac{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} U^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2}{2d}$$

$$[w] = \text{Дж/м}^3$$

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2}{2d \cdot V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S (Ed)^2}{2d \cdot Sd} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$