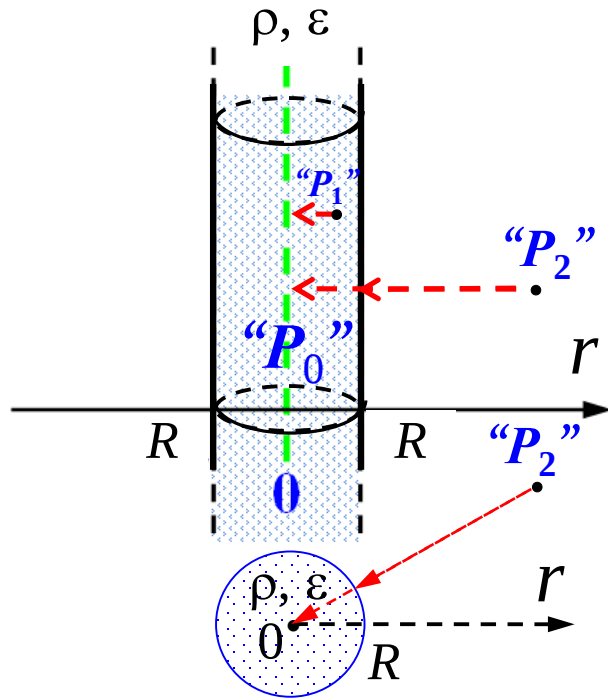


Лекция 9
Проводники в электрическом поле.
Конденсатор



3. Выбор траектории



$$\varphi_P = \int_{(P)}^{(P_0)} (\vec{E}, d\vec{l})$$

траектория – любая ??

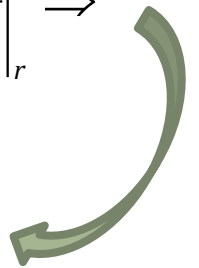
а) " P_1 " – внутри ($r \leq R$) :

$$\varphi_P = \int_{(P_1)}^{(P_0)} (\vec{E}, d\vec{l}) = \int_r^0 E(r) dr = \int_r^0 \frac{\rho \cdot r}{2\epsilon\epsilon_0} dr = \frac{\rho \cdot r^2}{4\epsilon\epsilon_0} \Big|_r^0 \Rightarrow$$

($r \leq R$)



$$\varphi(r)^{(\text{внутри})} = -\frac{\rho}{4\epsilon\epsilon_0} r^2$$



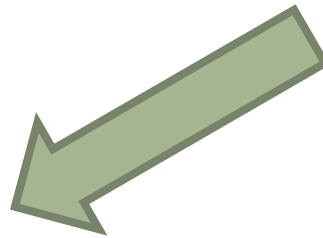
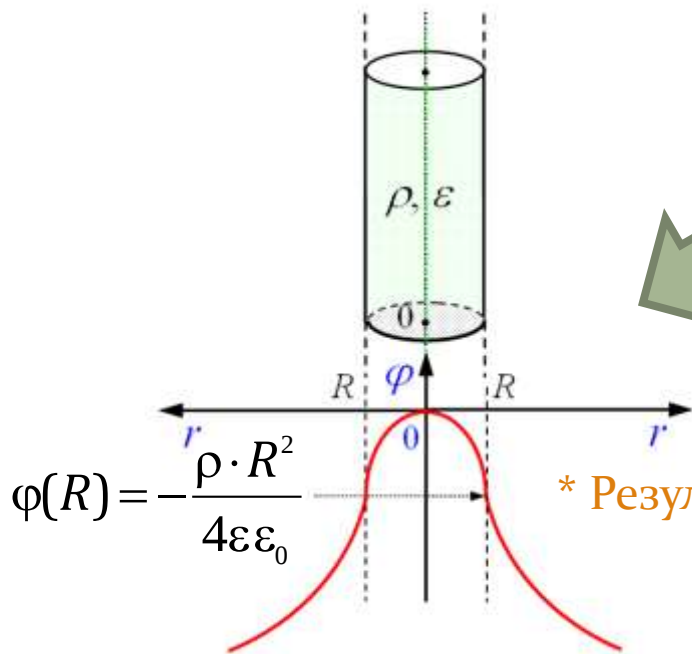
б) “ P_2 ” вне ($r > R$) : *(вот тут положительное будет ☺)

$$\varphi_P = \int_{(P_2)}^{(P_0)} (\vec{E}, d\vec{l}) = \int_r^R \frac{\rho \cdot R^2}{2\epsilon_0 r} dr + \int_R^0 \frac{\rho \cdot r}{2\epsilon\epsilon_0} dr = \frac{\rho R^2}{2\epsilon_0} \ln r \Big|_r^R + \frac{\rho \cdot r^2}{4\epsilon\epsilon_0} \Big|_R^0 \Rightarrow$$

($r > R$)



$$\varphi(r) = -\frac{\rho R^2}{2\epsilon_0} \ln \frac{r}{R} - \frac{\rho \cdot R^2}{4\epsilon\epsilon_0}$$



Вот, “как это работает”,
и вот, что мы получили!

* Результаты “сшиваются” : нет «скачков» потенциала!

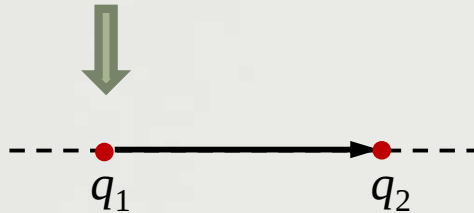
9.5. Энергия взаимодействия системы зарядов

Мы знаем:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{U(x, y, z)}{q_{np}}$$

Энергия т.з. в электрическом поле: $U = q \cdot \varphi(x, y, z)$

“Источник поля”

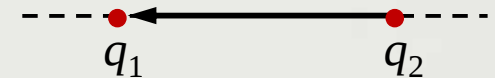


а) Два заряда:

$$U_{21} = q_2 \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r}$$

А можно наоборот? Вот так:

($U \equiv W_{21}$)



“Источник поля”

Результат один:

или

$$W_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r}$$

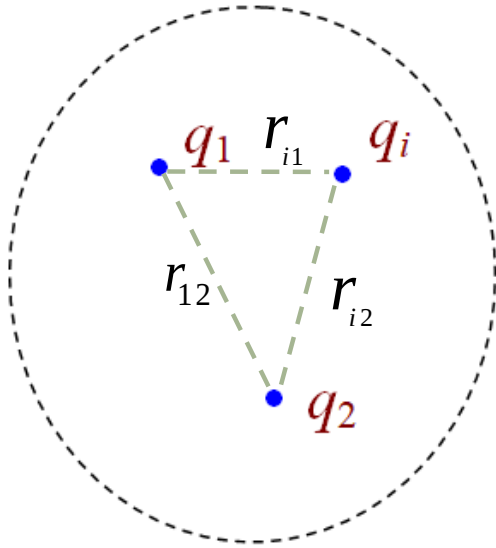
$$U_{12} = q_1 \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_2}{r}$$

$$W_{12} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_2 q_1}{r} \right\}$$

А зачем так
сложно ??

Вот зачем :
(а если “зарядов много”?)

б) Система состоит из N зарядов:



$$W_{\text{э}} = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^N \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_i q_j}{r_{ij}} \right)$$

Это энергия электрического взаимодействия
системы

заряженных частиц и тел

!!

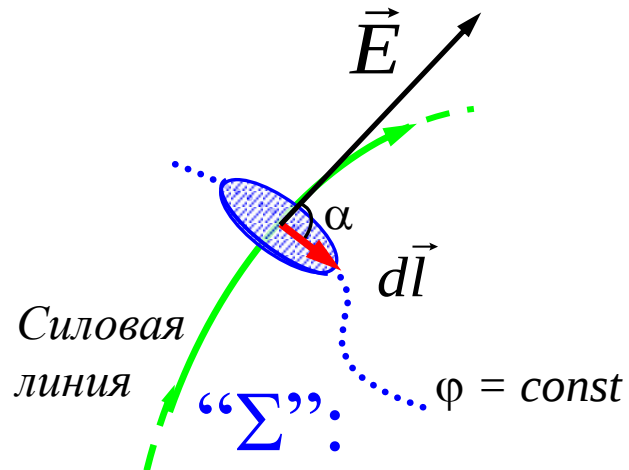
энергия электрического поля

9.6. Заключительные замечания к §9

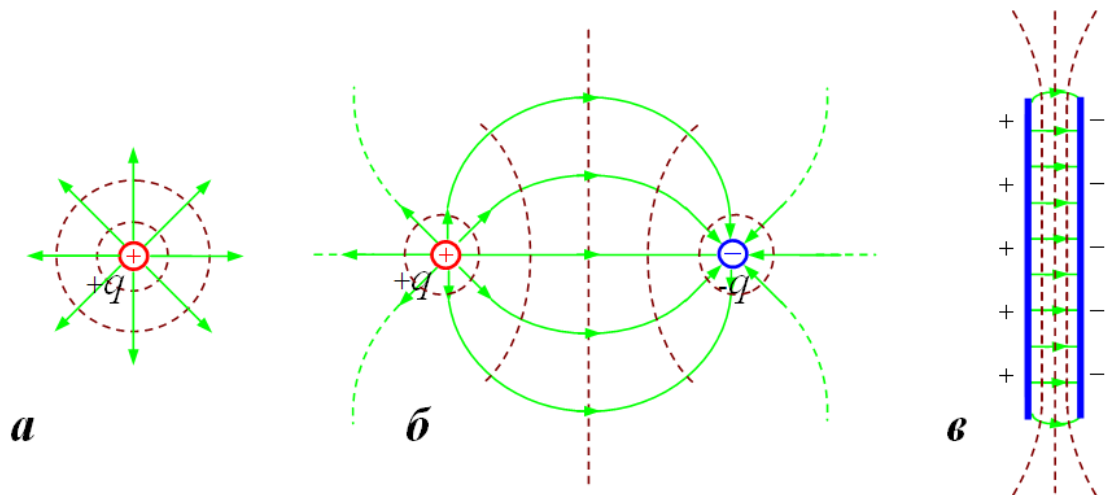
φ - зачем?

1. скалярная!;
2. легко измерять;

3. Эквипотенциальные поверхности –
поверхности $\varphi = \text{const}$:



Примеры:



§ 10. Проводники в электрическом поле

10.1. Поле заряженного проводника

- 1. Напряжённость электрического поля в проводниках равна нулю;

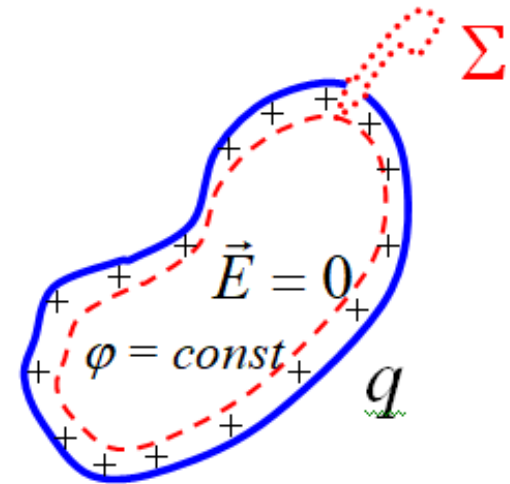
$$\vec{E}^{(\text{внутри})} = 0;$$

- 2. Потенциал всех точек проводящего тела одинаков $\varphi = \text{const}$;

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \Rightarrow \varphi = \text{const};$$

(или: $E_l = \frac{\partial \varphi}{\partial l}$)

- 3. Весь избыточный заряд проводника распределён по его поверхности;



$$\Phi_E = \oint_{\Sigma} (\vec{E}, d\vec{S}) = 0$$



$$\Sigma q_{(\text{внутри})} = 0$$

!!

“любая поверхность Σ внутри”

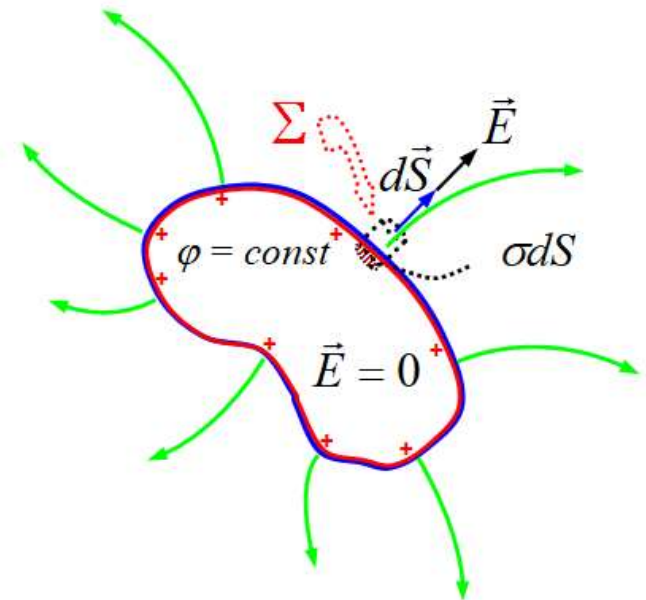
Поле снаружи вблизи поверхности проводника ??

- 4. Вне проводника силовые линии электростатического поля вблизи от его поверхности перпендикулярны к ней;
- 5. Напряжённость поля заряженного проводника вблизи поверхности пропорциональна поверхностной плотности заряда;

$$\Phi_E = \oint_{\Sigma} (\vec{E}, d\vec{S}) = E \cdot dS$$

$$E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \sigma \cdot dS.$$

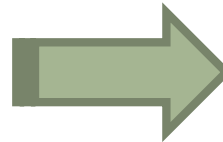
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0}$$



- 6*. Плотность поверхностного заряда проводника зависит от её кривизны;

$$\sigma \sim \frac{1}{R_{кр}} \Rightarrow$$

$$E \sim \frac{1}{R_{кр}}$$



“Огни Святого Эльма”

“Огни Святого Эльма”

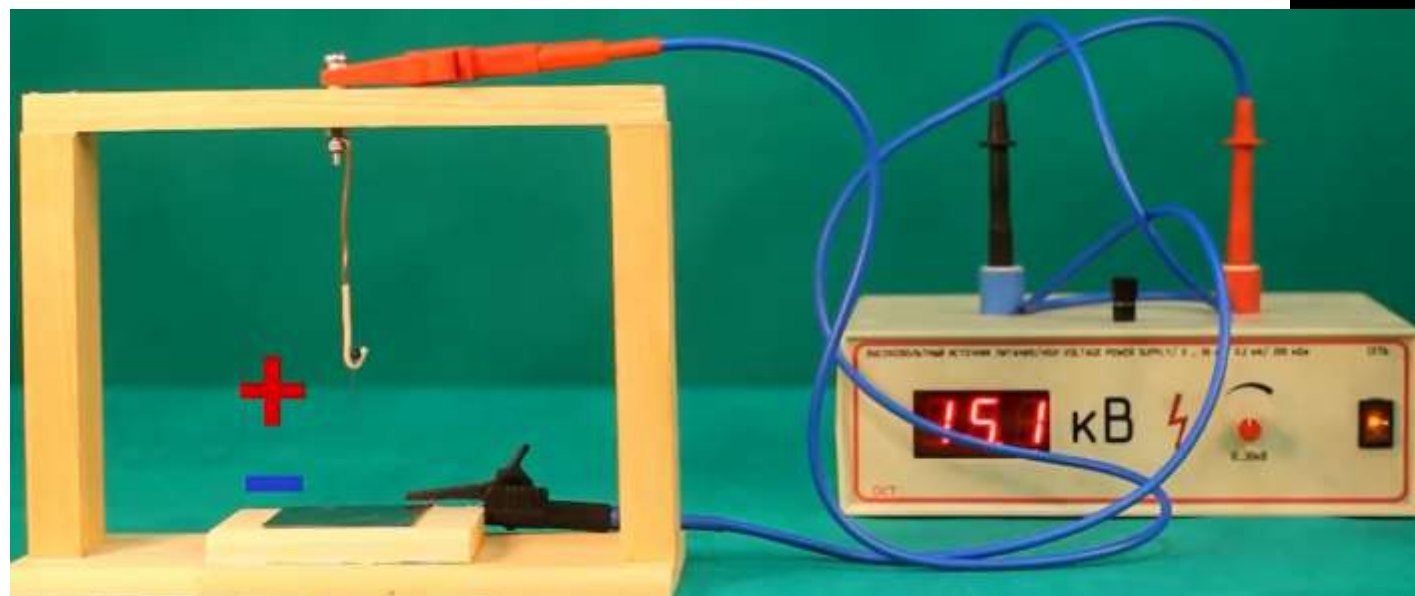
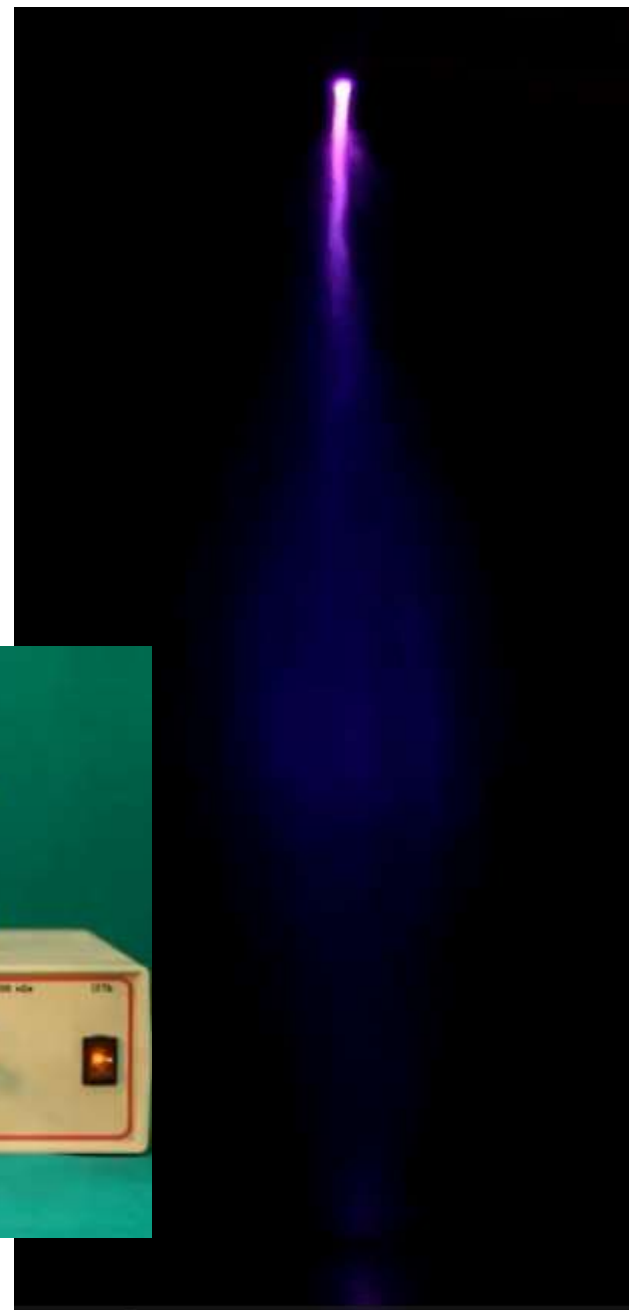
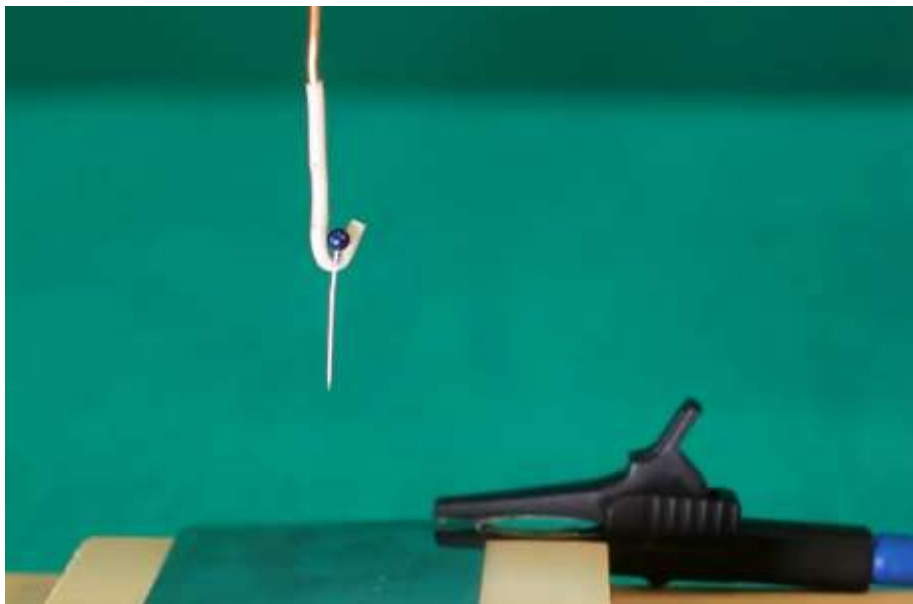


А ещё

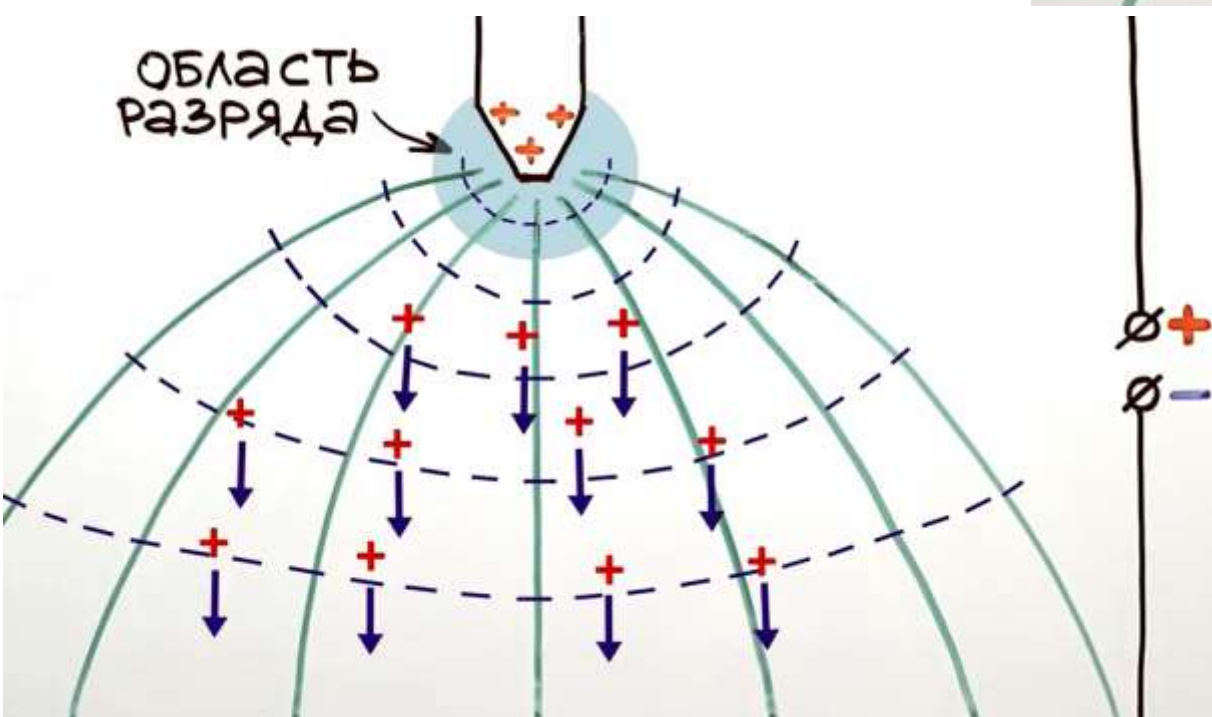
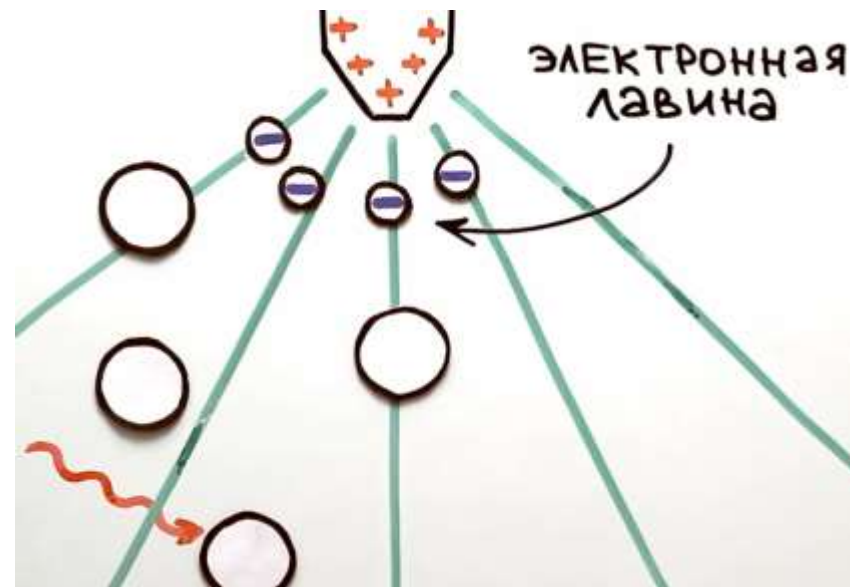
“Туннельный микроскоп”



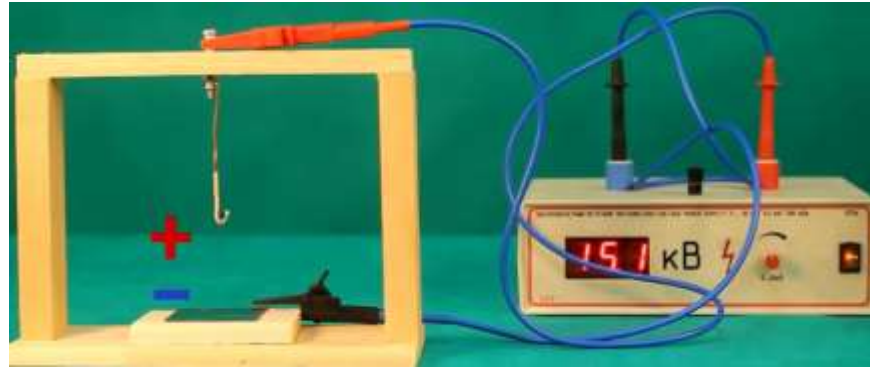
“Огни Святого Эльма”– «коронный разряд»



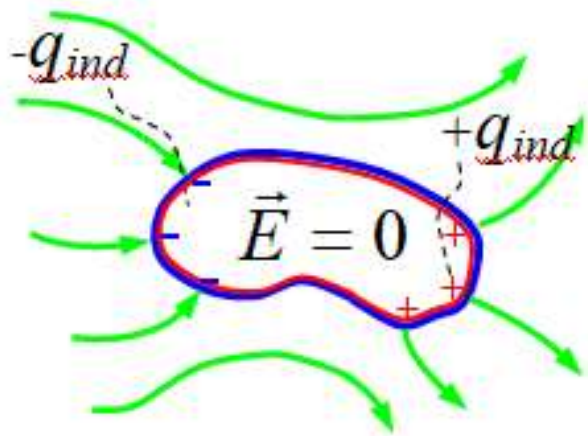
“Огни Святого Эльма” – «коронный разряд»



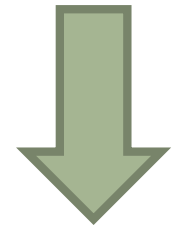
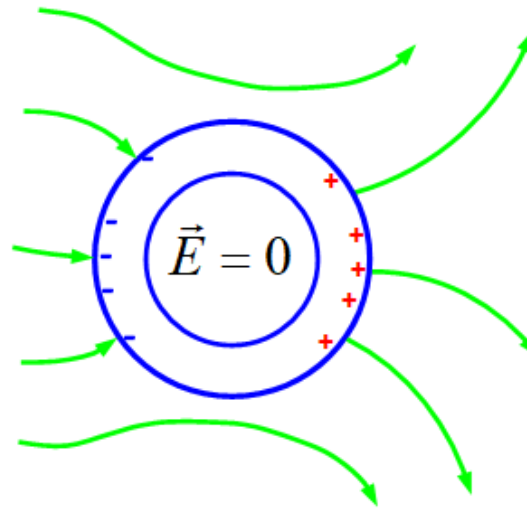
Видеофрагмент – «коронный разряд»



10.2. Проводники во внешнем электрическом поле (Проводящие оболочки. Теоремы Фарадея)



“Электростатическая защита”



“Клетка
Фарадея”

- 1. Если внутри полости проводящей оболочки нет заряженных тел, то эта область пространства свободна от электрического поля

“Электростатическая защита”

Шоу “Клетка Фарадея”

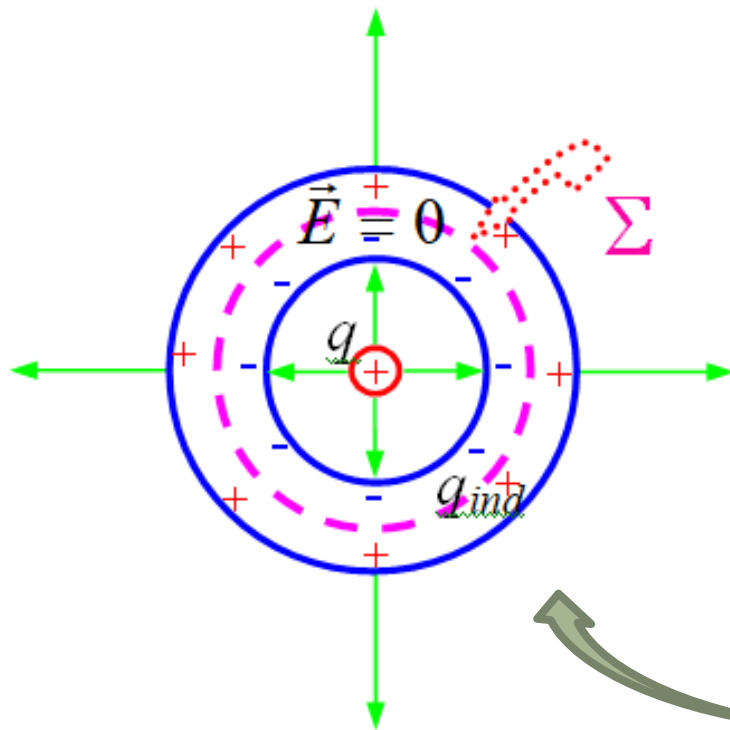


“Клетка Фарадея”

“Электростатическая защита”



- 2. Суммарный заряд, индуцированный на внутренней поверхности полости, равен алгебраической сумме зарядов, находящихся внутри полости проводника, взятой с противоположным знаком



$$\oint_{\Sigma} (\vec{E}, d\vec{S}) = \frac{1}{\epsilon_0} \left(\sum_i q_i + q_{ind} \right) \Rightarrow$$

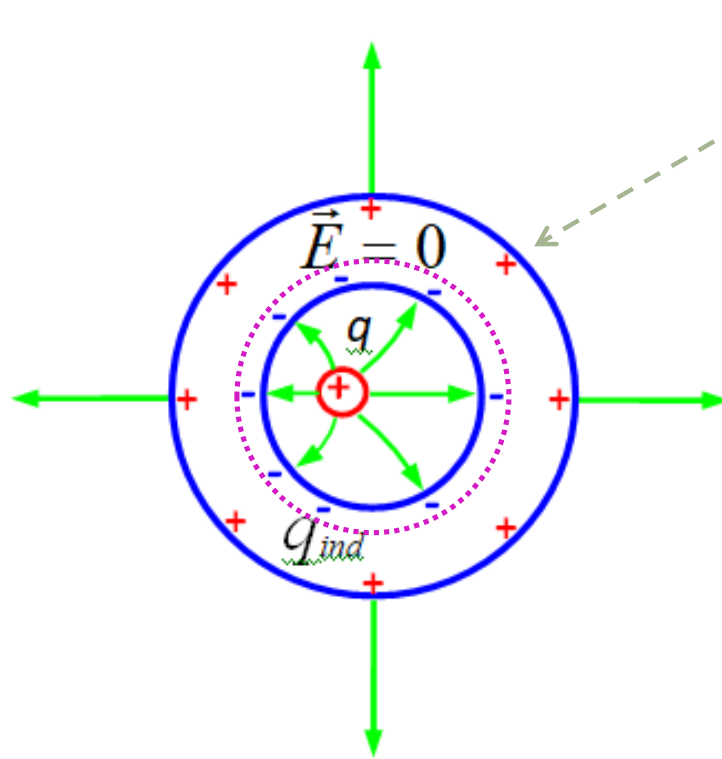
$$= 0 !$$

алгебраическая сумма зарядов
внутри полости – $\sum_i q_i$

индуцированный на
внутренней поверхности заряд – q_{ind}

$$q_{ind} = - \sum_i q_i$$

- 3. Индукционный заряд на внешней поверхности оболочки, равен по модулю и противоположен по знаку заряду, индуцированному на внутренней её поверхности

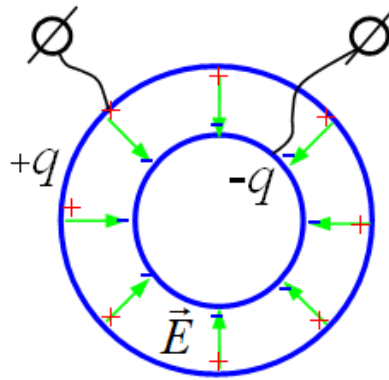
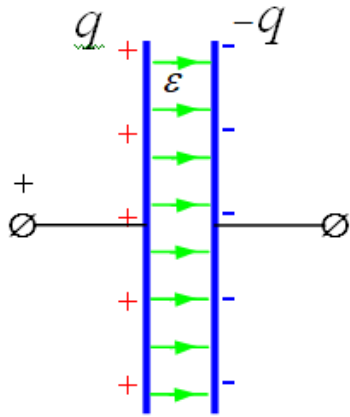


$$q_{ind} = - \left(\sum_{\text{внутр. пов.}} q_i \right)$$

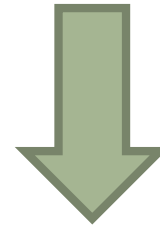
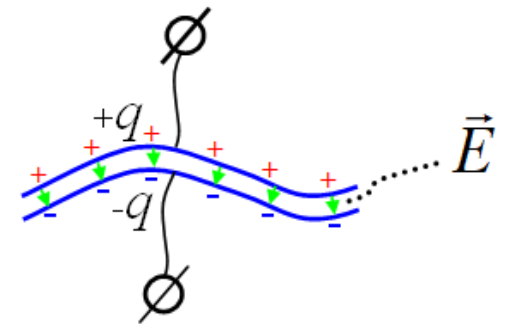
Оболочка НЕ экранирует внешнюю область пространства от заряда внутри

10.3. Конденсаторы. Электроёмкость конденсаторов

“Конденсатор” ?? – копить заряд / сгущать поле
(конденсировать)



...

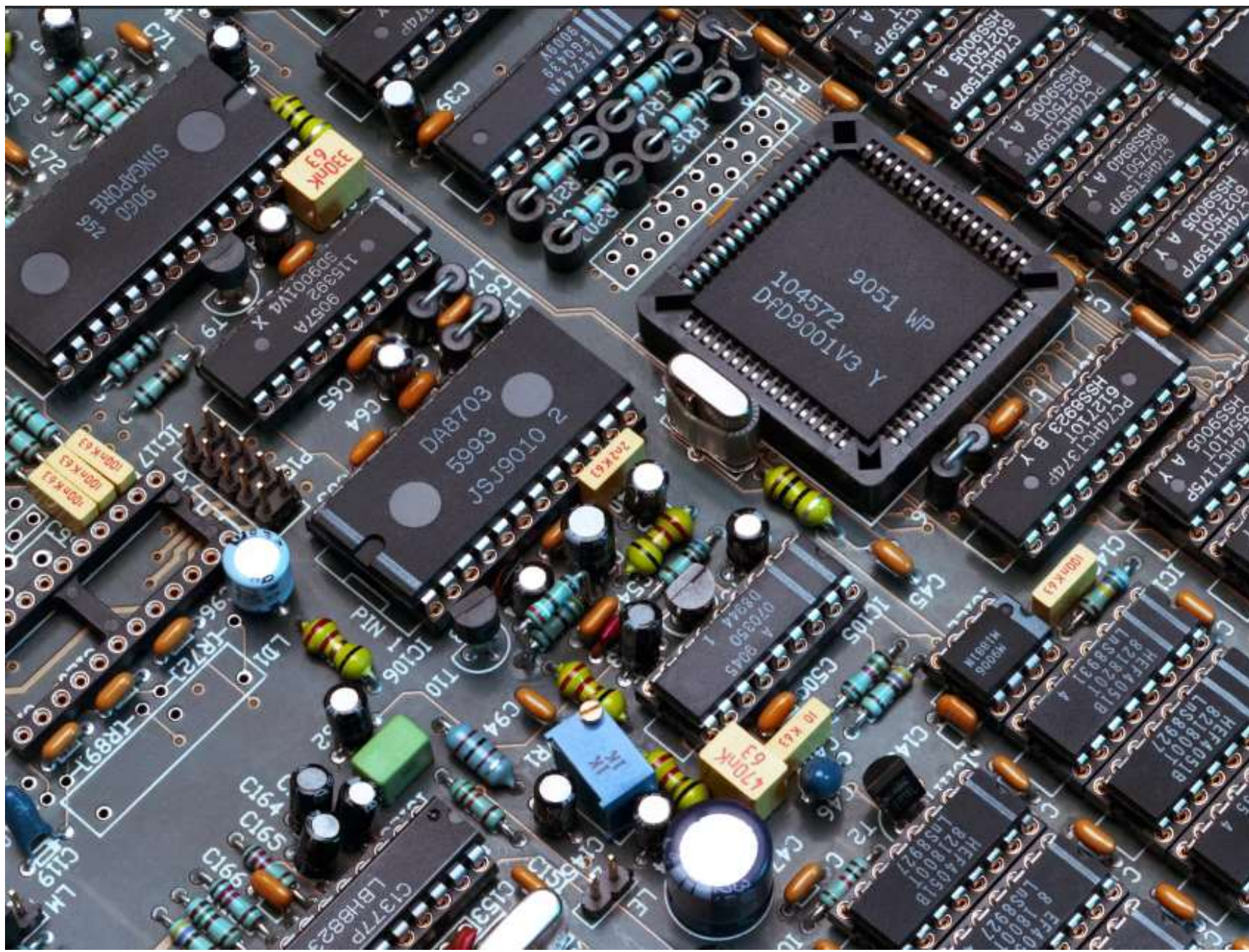


► (Опр.) Конденсатором называется система, состоящая из двух проводников, между которыми возникает изолированное от внешних тел электрическое поле при сообщении проводникам равных по модулю и противоположных по знаку зарядов

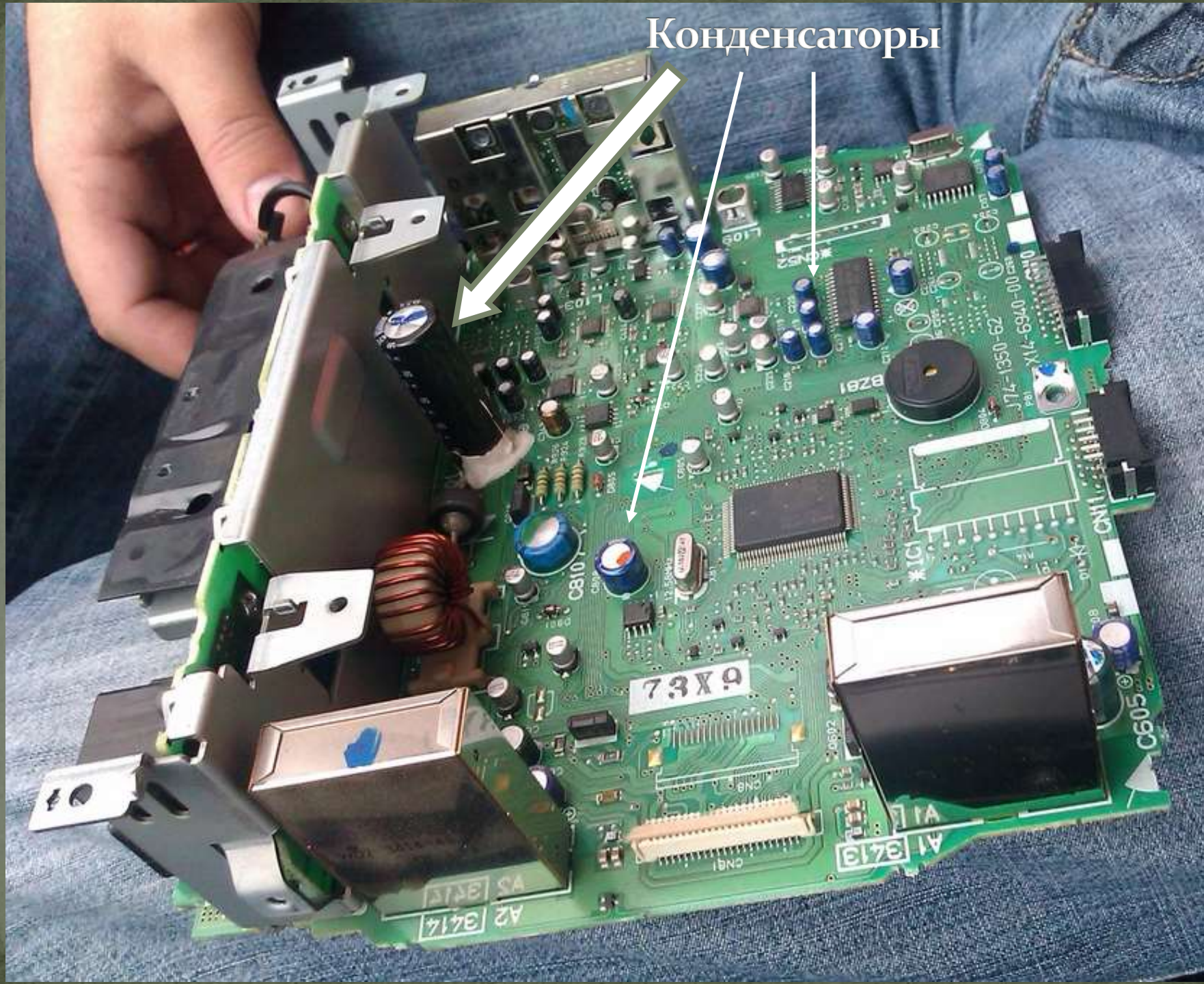
Конденсаторы



“Печатная плата”



Конденсаторы



“Ёмкость” ??

– характеризует способность
копить заряд:

► (Опр.) Ёмкостью конденсатора называется отношение модуля заряда каждой из его обкладок к разности потенциалов между ними



$V, \text{ л?}$

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

$$\frac{\dots \text{ Кл}}{1 \text{ В}} = \dots \Phi$$

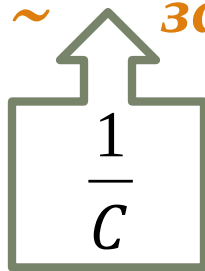
“Фарада”

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{(1)}^{(2)} (\vec{E}, d\vec{l})$$

Нет зависимости от
окружающих тел

!!

$$\int_{(1)}^{(2)} (\vec{E}, d\vec{l}) \sim \text{заряд на обкладках } (q)$$



- 1. Размеры;
 - 2. форма;
 - 3. расстояние между обкладками;
- А ещё ??
- 4. диэлектрическая проницаемость (ϵ)

Как рассчитать ёмкость конденсатора

??

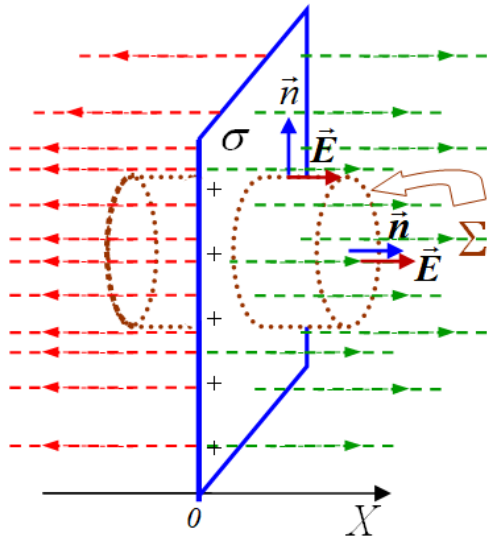
- 1. Найти напряжённость поля между обкладками $\vec{E}(\vec{r})$;
- 2. разность потенциалов между обкладками выразить через q :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{(1)}^{(2)} (\vec{E}, d\vec{l})$$

- 3. применить определение ёмкости: $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$.

Как считать на практике ?

Пример: (Задача 7.14,а) Получить выражения для ёмкости плоского конденсатора с площадью пластин S и расстоянием d между ними. Конденсатор заполнен диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ .



- 1. Найти напряжённость поля между обкладками:

$$\oint_{\Sigma} E_n dS = E \cdot 2S_{\text{осн.}} \Rightarrow E \cdot 2S_{\text{осн.}} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \sigma \cdot S_{\text{осн.}}$$

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

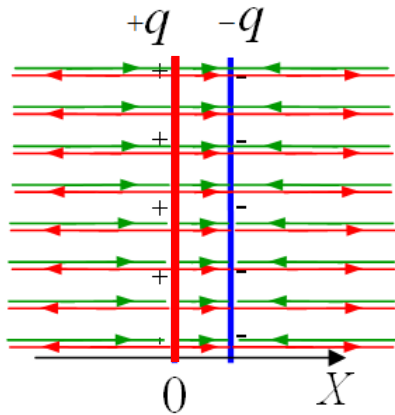
Вернём вторую пластину “на место”:

$$\vec{E}_{вне} = \vec{E}^{(+)} + \vec{E}^{(-)} = 0 \quad \text{— поле вне конденсатора;}$$

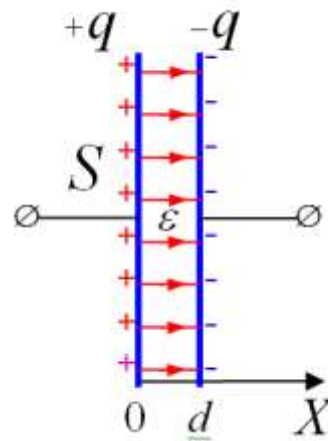
$$\vec{E}_{внутри} = \vec{E}^{(+)} + \vec{E}^{(-)} = 2\vec{E}^{(+)} = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \vec{e}_+ + \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \vec{e}_+$$

Суперпозиция полей

поле внутри
“пустого” конденсатора



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



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{(1)}^{(2)} E_l dl = \int_0^d E_x dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} dx = \frac{\sigma \cdot d}{\epsilon\epsilon_0}$$

$$C_0 = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\sigma \cdot d / \epsilon\epsilon_0} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S \cdot q}{q \cdot d}$$

И вот результат:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$



Коронный разряд и “Огни Святого Эльма” полезные ссылки:

<https://www.youtube.com/watch?v=1T8FRhLCUJM>

<https://www.youtube.com/watch?v=35gu43SeHgk>