

Омский государственный технический университет

Кафедра физики

Калистратова Л.Ф.

**Электронные лекции по разделам
электромагнетизма**

(электростатика, постоянный ток, магнетизм)

17 лекций

(34 аудиторных часа)

Тема 4.

Электростатическое поле в проводниках

План лекции

1. Распределение внешнего заряда на проводнике.
2. Проводник во внешнем электростатическом поле.
3. Электроёмкость проводников и конденсаторов.
4. Соединение конденсаторов в батарею.

4.1. Распределение внешнего заряда на проводнике

Все вещества природы по способности проводить электрический ток делятся на **проводники, полупроводники и диэлектрики.**

Проводники в обычных условиях **очень хорошо проводят электрический ток.**

К ним относятся металлы, электролиты, расплавы, ионизированные газы, плазма и т. д.

Полупроводники в обычных условиях **не проводят электрический ток**, но их проводимость начинает возрастать при нагревании или внесении примесей.

К ним относятся элементы IV группы периодической таблицы элементов: кремний, германий, арсенид галлия и многие химические соединения.

Диэлектрики ни при каких условиях **не проводят электрический ток**.

К ним относятся газы при обычных условиях, многие чистые жидкости, слюда, фарфор, мрамор и др.

При очень больших напряжениях может наступить пробой диэлектрика.

Пробой воздуха в виде молнии наступает при напряжённости электрического поля 120 В/см.

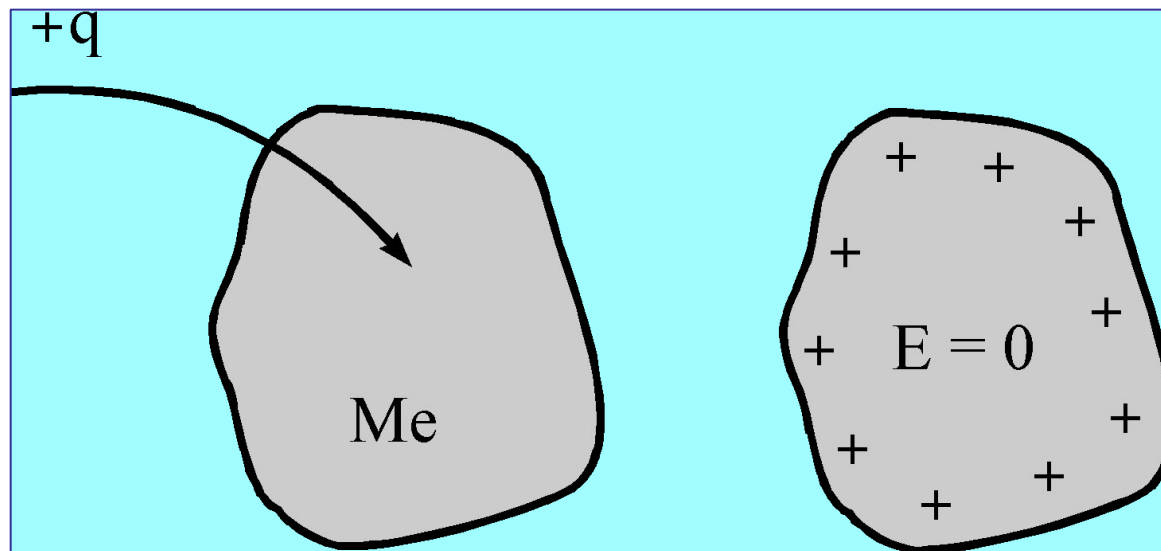
Проводники по своему внутреннему строению имеют **кристаллическую решётку**, в узлах которой находятся положительные атомные остатки атомов, и **электронный газ** с очень высокой концентрацией свободных электронов:

$$n \sim 10^{20} - 10^{23} \text{ электронов/см}^3.$$

Проводник – электрически нейтрален, т.к. отрицательный заряд свободных электронов равен положительному заряду решётки.

Внесём на проводник внешний заряд величиной **q**.

1. **Внешний заряд** **равномерно** распределяется по поверхности проводника.
2. Условие равновесия зарядов требует, чтобы **напряженность электрического поля внутри проводника была равна нулю** ($E = 0$).



3. Поскольку , а напряжённость $\mathbf{E} = \mathbf{0}$, то

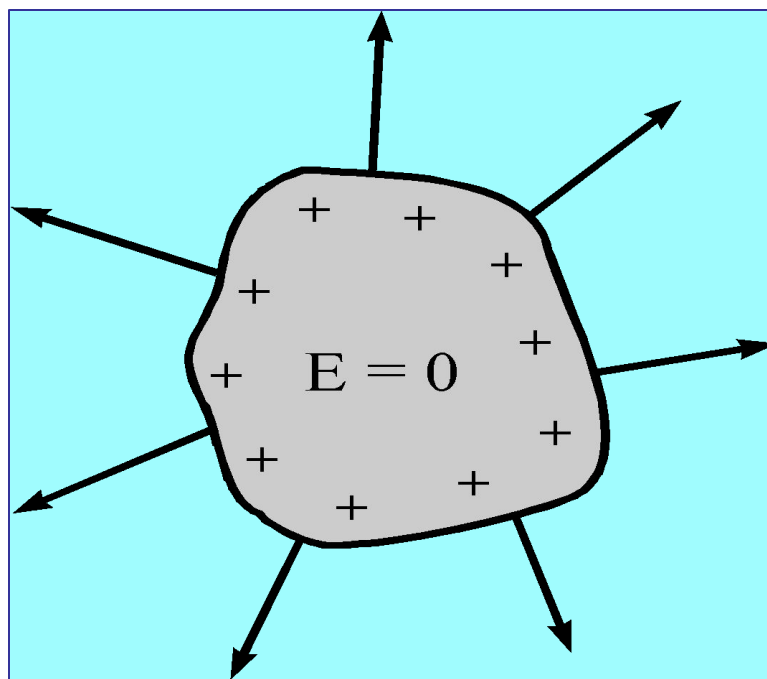
$$E = -\frac{d\varphi}{dr} \quad \varphi = \text{const}$$

Потенциал во всех точках проводника и на его поверхности **одинаков**: $\varphi = \text{const}$.

4. **Заряженное металлическое тело** является эквипотенциальной областью.

5. **Заряженный проводник** – источник электрического поля.

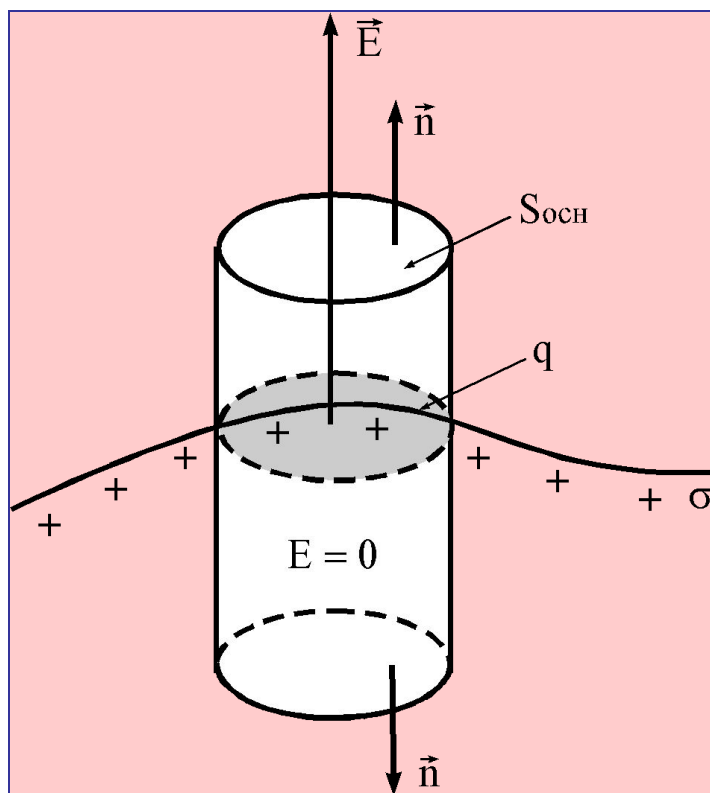
6. **Силловые линии** внешнего поля, сосредоточенного вокруг проводника, **перпендикулярны к его поверхности**.



7. **Напряженность** внешнего поля E вблизи поверхности проводника вычисляется на основе применения теоремы Гаусса.

Пусть σ - поверхностная плотность заряда на поверхности проводника.

Гауссову поверхность выберем цилиндрической формы.



Поток вектора напряжённости через цилиндрическую замкнутую поверхность найдем как сумму потоков через ее боковую поверхность, нижнее и верхнее основания:

$$N = \oint_{\text{цил. пов.}} E_n dS = \int_{\text{бок. пов.}} E_n dS + \int_{\text{ниж. осн.}} E_n dS + \int_{\text{верх. осн.}} E_n dS$$

Нормаль к основанию параллельна силовым линиям , поэтому $E_n = E$, где E_n – проекция вектора на нормаль к основанию цилиндрической поверхности.

В пределах основания цилиндра поле считаем однородным.

Отличным от нуля является только **интеграл по верхнему основанию.**

$$N = \oint_{\text{цил. пов.}} E_n dS = \int_{\text{верх. осн.}} E_n dS = ES_{\text{осн.}}$$

Действительно:

- интеграл по боковой поверхности равен нулю, так как силовые линии электрического поля её не пересекают;
- интеграл по нижнему основанию также равен нулю, потому что поле внутри проводника отсутствует ($E = 0$).

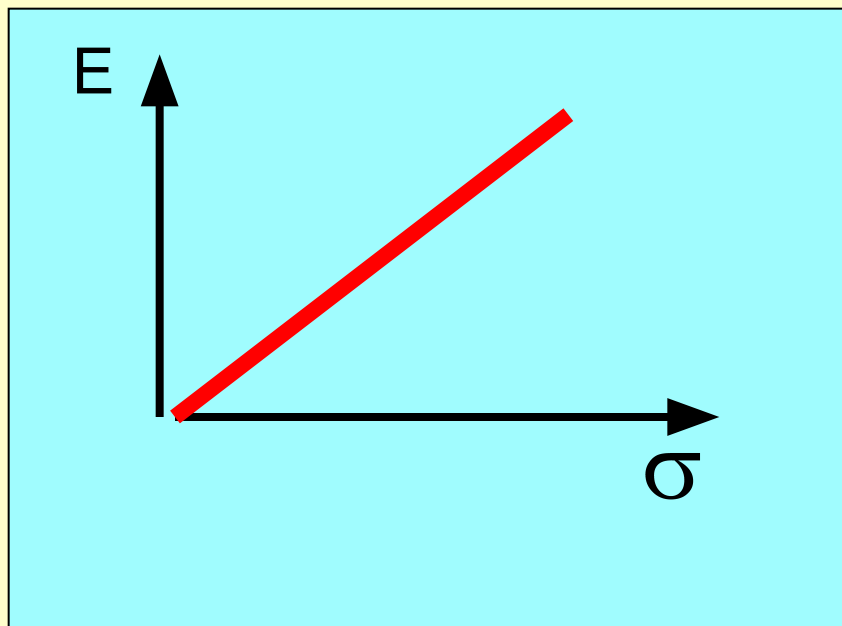
Заряд, находящийся внутри цилиндрической поверхности, расположен на поверхности проводника и равен:

$$q = \sigma S_{\text{осн.}}$$

По теореме Гаусса имеем равенство: $ES_{\text{осн.}} = \frac{\sigma S_{\text{осн.}}}{\epsilon_0}$

Тогда:
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

8. Напряжённость поля у поверхности заряженного проводника пропорциональна поверхностной плотности заряда.



Величина поверхностной плотности заряда σ определяется радиусом кривизны поверхности R :
чем меньше R , тем больше σ , тем больше E .

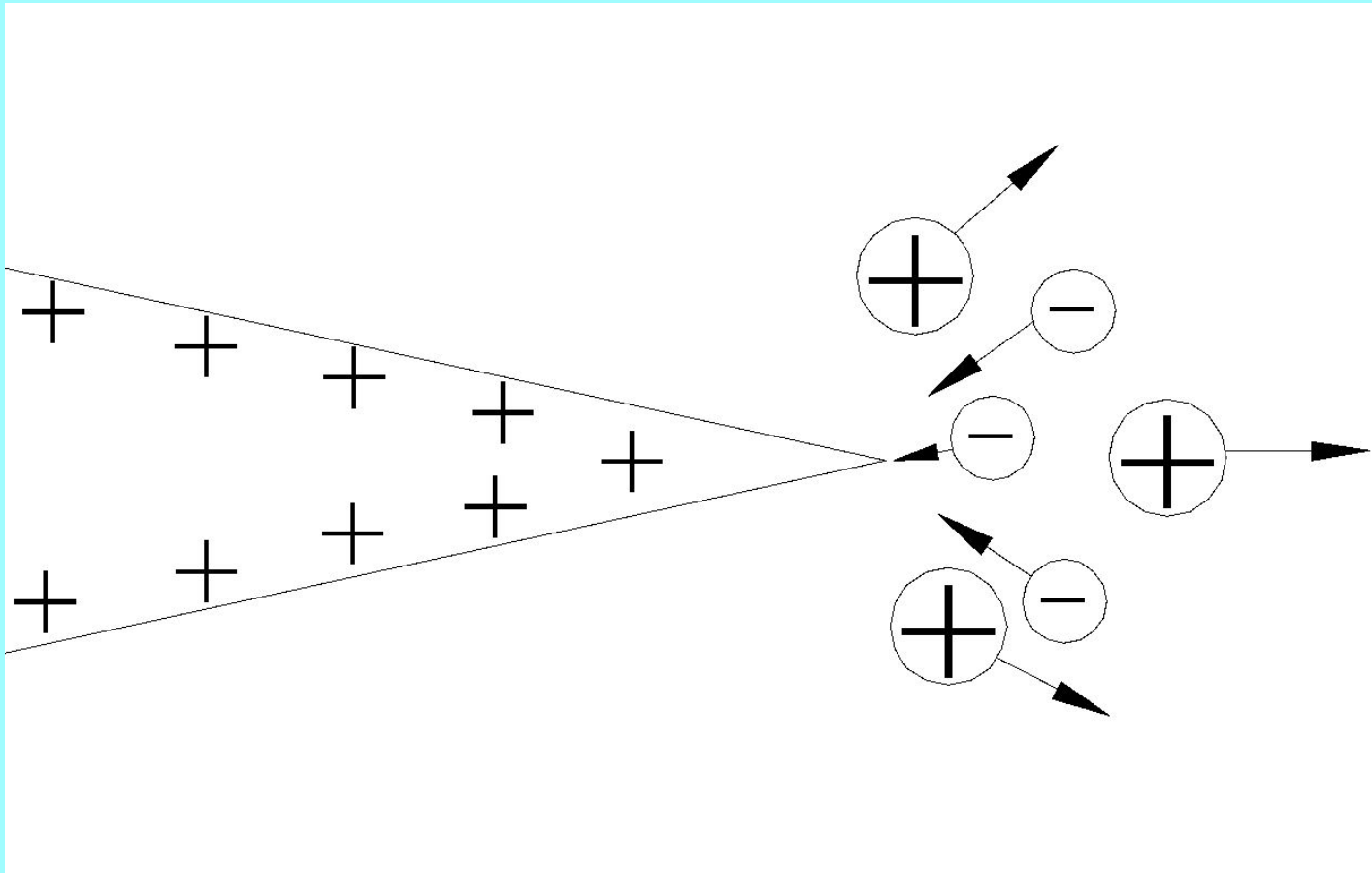
На острых выступах проводника могут скапливаться большие по величине заряды, которые создают **сильное электрическое поле.**

Это электрическое поле **ионизирует воздух.**

Образующиеся ионы воздуха приходят в движение.

Ионы того же знака, что и заряд острия, перемещаются от острия, увлекая с собой нейтральные молекулы воздуха – образуется так называемый **электрический ветер.**

Процесс ионизации воздуха у заряженного проводника



Ионы противоположенного знака идут к острию, частично нейтрализуя его заряд и ослабляя поле.

На этом явлении основано действие **молниеотвода**.

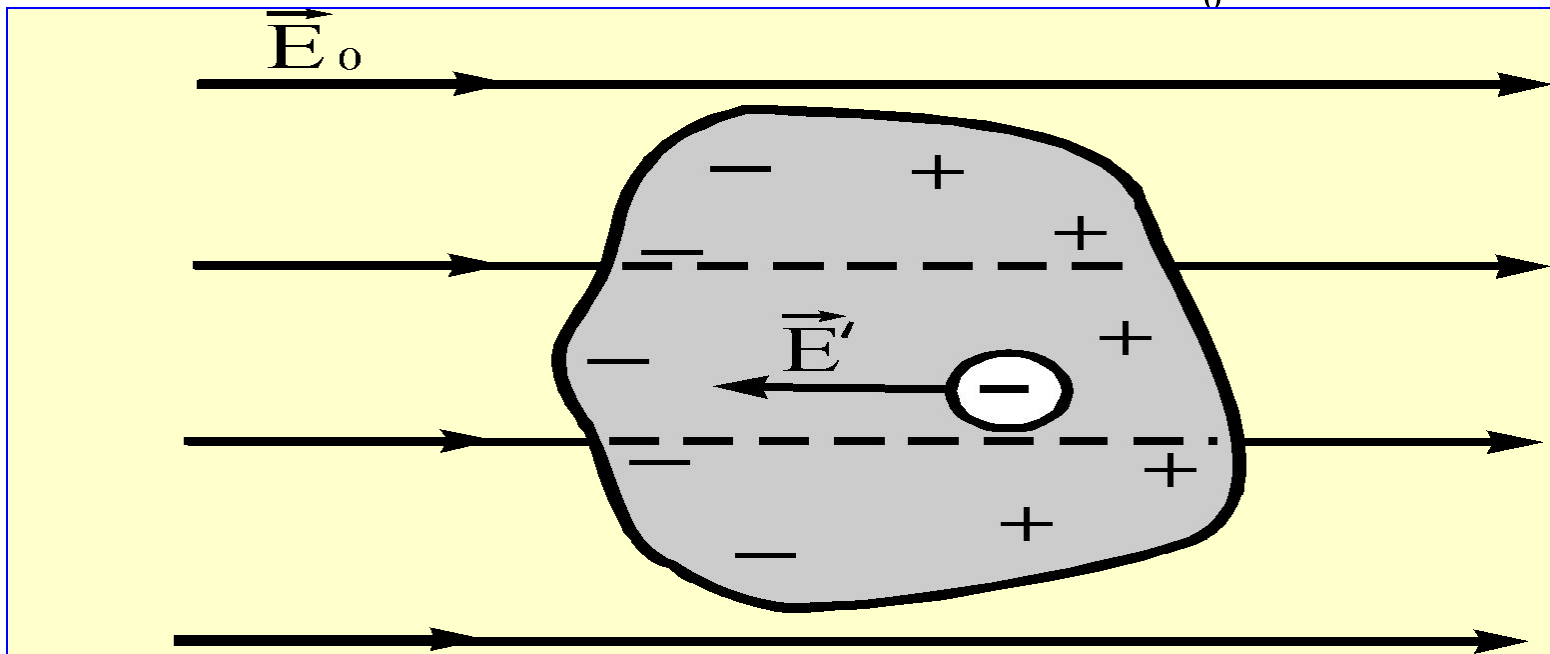
Процесс ионизации воздуха сопровождается его свечением (**огни святого Эльма** вокруг мачт на кораблях).

9. **Наличие в проводнике внутренних полостей не влияет на характер распределения зарядов**, так как избыточные заряды располагаются только по внешней поверхности проводника.

Равновесное распределение зарядов на **сплошном** проводнике **такое же, как и на полом**, при условии одинаковости их внешней формы.

2. Проводник во внешнем электрическом поле

Внесём нейтральный проводник в однородное электрическое поле напряженностью E_0 .



Электроны проводника придут в направленное движение **против силовых линий** внешнего поля и соберутся на одном из его концов.

Другой конец проводника заряжается при этом положительно, так как количество электронов здесь уменьшится.

Электростатическая индукция - явление перераспределения зарядов внутри проводника под действием внешнего электрического поля.

- 1. Внешнее электрическое поле разделяет заряды самого проводника.**

Процесс разделения зарядов наблюдается при любых напряженностях внешнего поля.

Индукцированными называются **избыточные** заряды, скопившиеся на **разных концах** проводника.

Индукцированные заряды создают внутри проводника **собственное поле напряжённостью** E' , противоположно направленное **внешнему полю** E_0 .

При условии $E' = E_0$ процесс перераспределения зарядов прекратится.

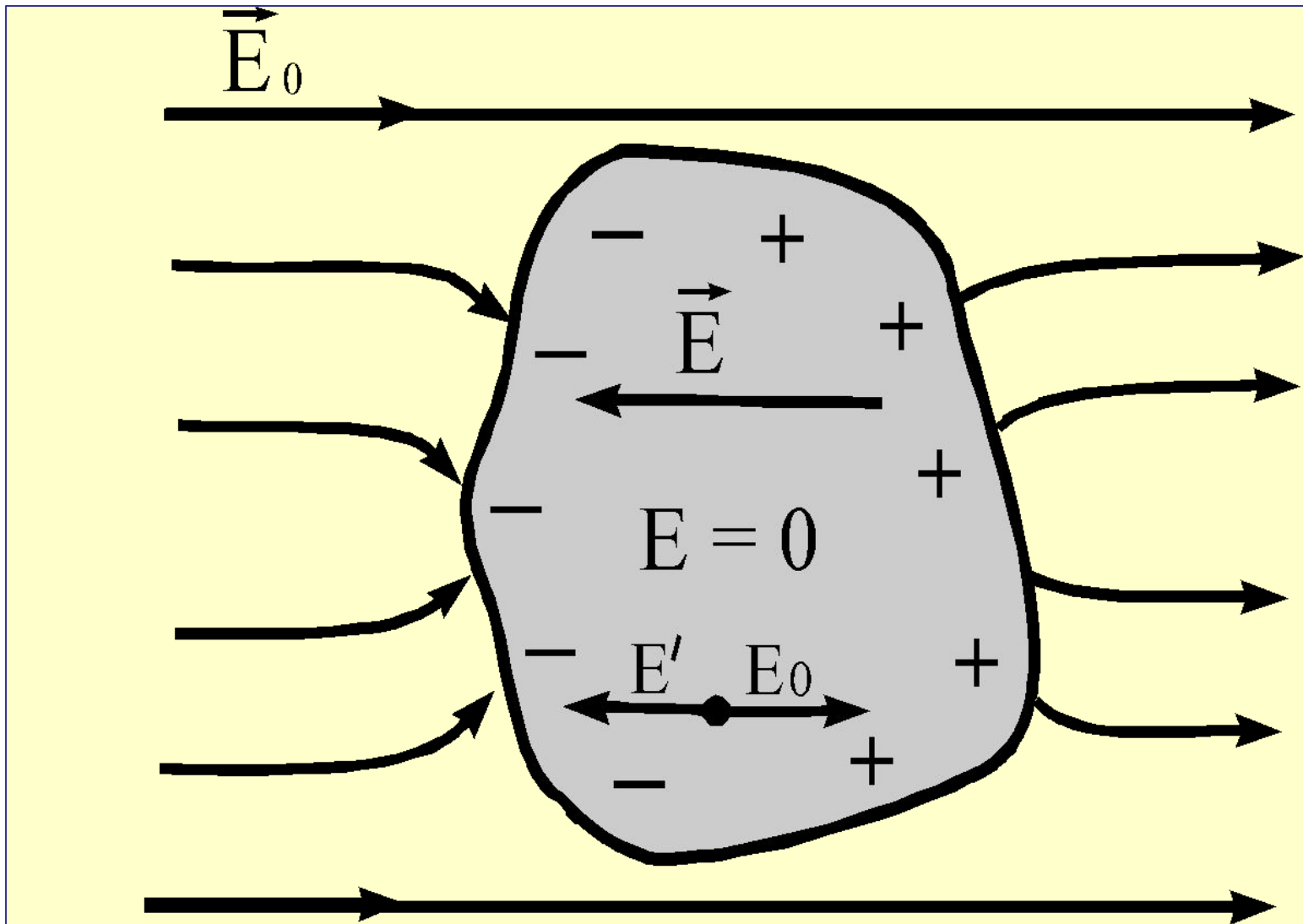
2. **Суммарная напряженность поля внутри проводника равна нулю: $E = 0$.**

Действительно, напряжённости названных полей одинаковы и направлены в разные стороны.

По принципу суперпозиции: $\vec{E} = \vec{E}' + \vec{E}_0$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}' = 0$$

3. **Проводник уничтожает внешнее поле там, где он находится.**
4. **Поверхность проводника и все его точки являются эквипотенциальной областью.**
5. **Проводник искажает внешнее поле вокруг себя.**

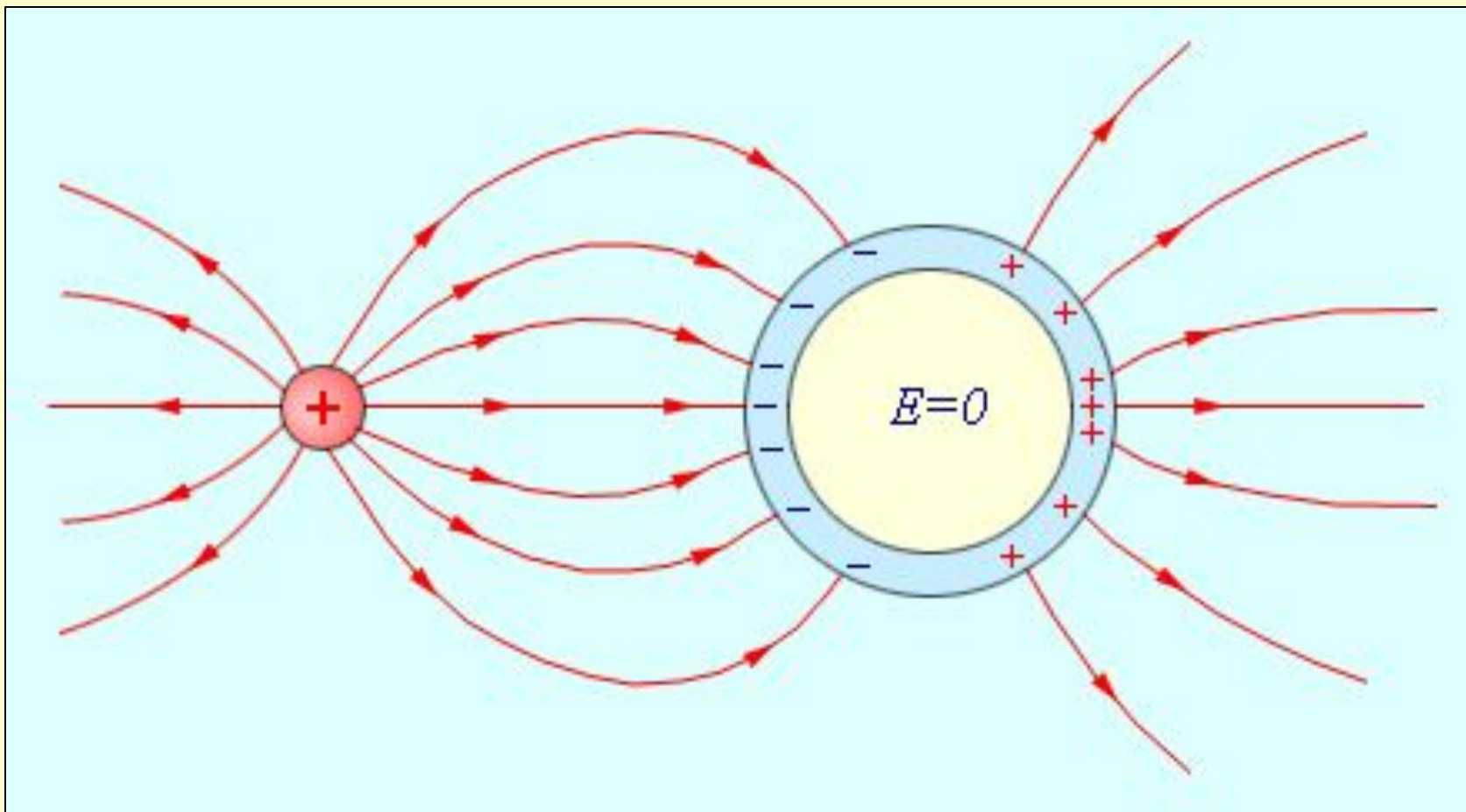


Силловые линии внешнего поля заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах проводника, и вновь начинаются на индуцированных положительных зарядах, входя и выходя в его поверхность перпендикулярно.

Проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает часть линий напряженности внешнего поля.

6. Если **из сплошного проводника изъять внутреннюю часть** вещества, **равновесие индуцированных зарядов не нарушается.**

Полый проводник во внешнем поле



Электрическое поле внутри проводника отсутствует независимо от того, сплошной проводник или полый, так как индуцированные заряды располагаются только на внешней поверхности проводника.

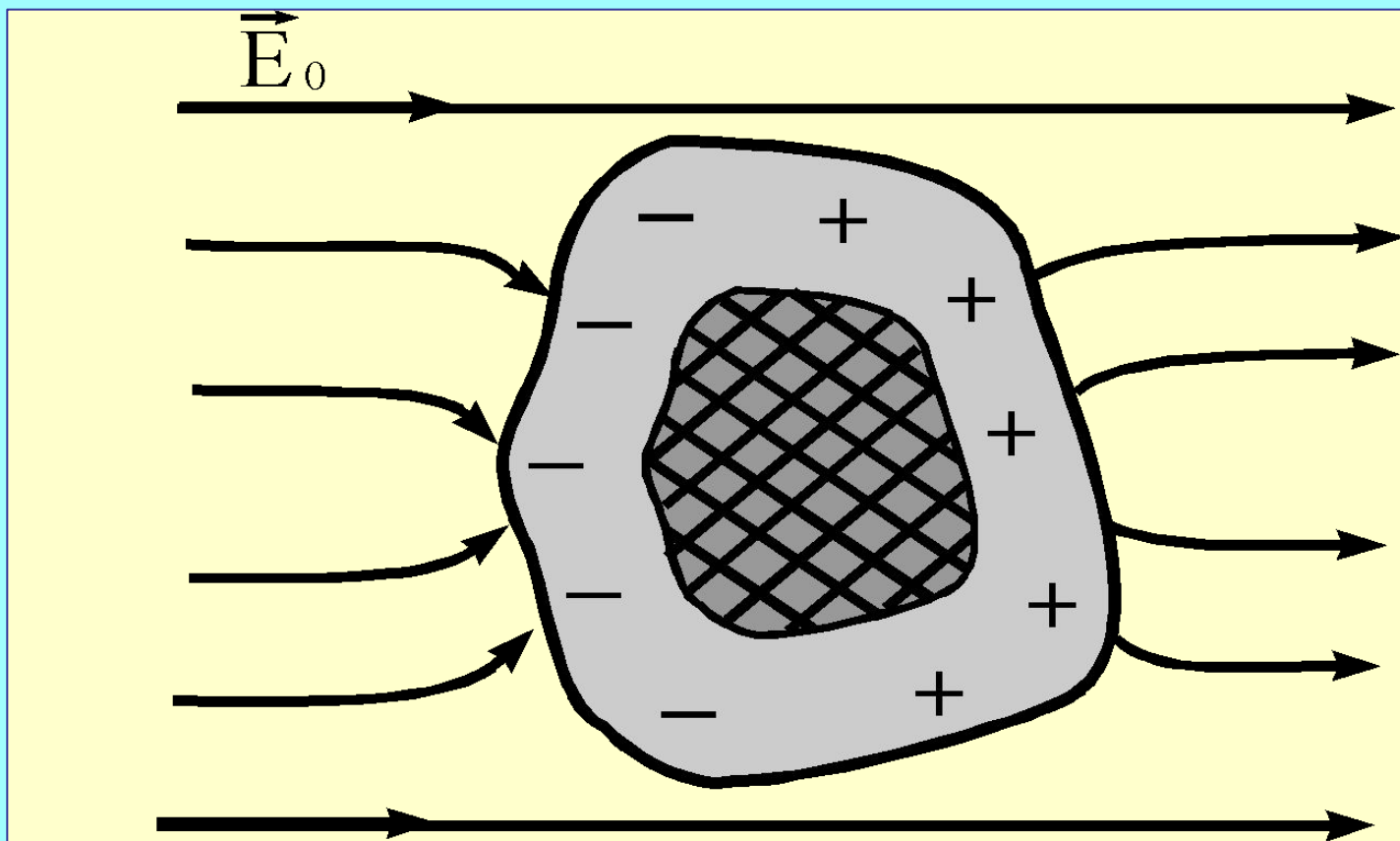
На этом основана **электростатическая защита**.

Когда какой-то прибор необходимо защитить от действия внешних электрических полей, его окружают проводящим экраном.

Внешнее поле компенсируется внутри экрана возникающими на его поверхности индуцированными зарядами.

Метод защиты от электрических полей

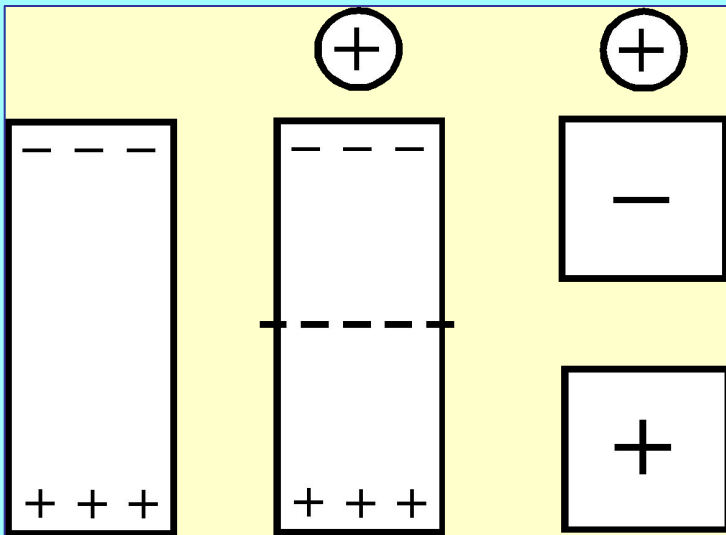
Помещают исследуемую систему с приборами внутри металлической сетки и этим экранируют ее от действия внешних электрических полей.



Свойства индуцированных зарядов

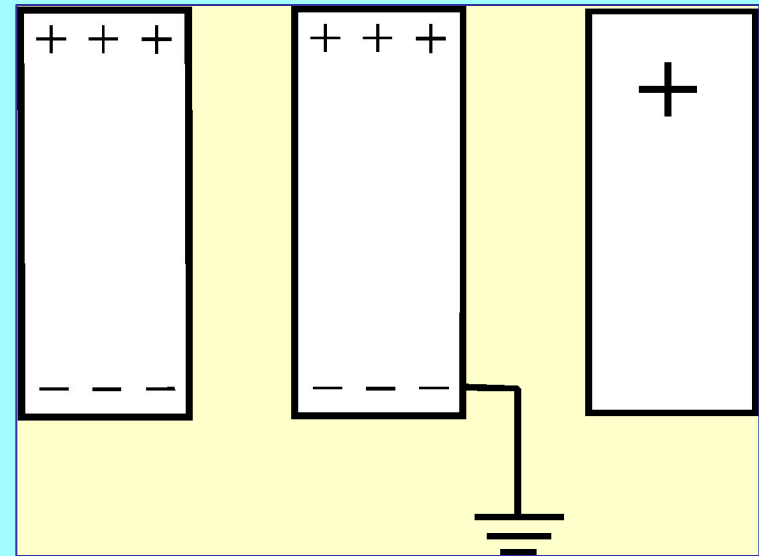
1. Индуцированные заряды

МОЖНО **разделять по знаку** в присутствии внешнего заряда.



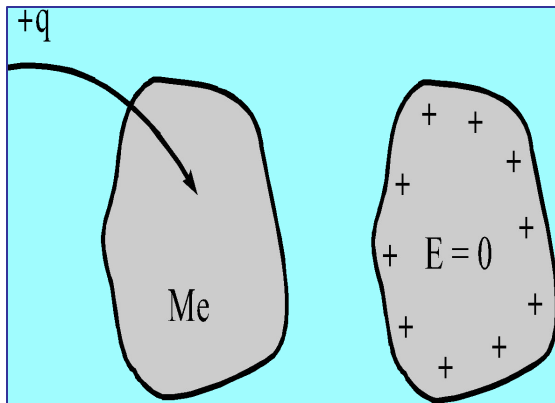
2. Индуцированные заряды

МОЖНО **снимать с проводника** заземлением.



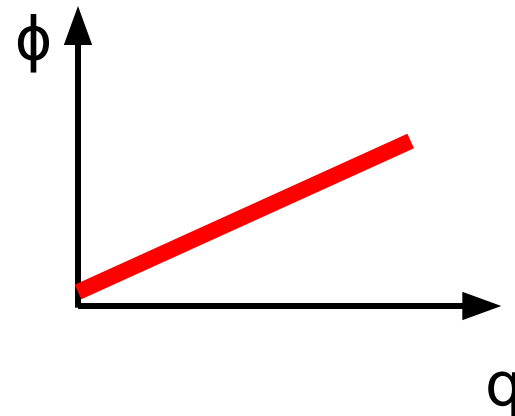
3. Электроемкость проводников и конденсаторов

Если на незаряженный проводник внести заряд q , то проводник заряжается и его потенциал становится равным ϕ .



Чем больший заряд внесем на проводник, тем больший потенциал он приобретет:

$$q \sim \phi.$$



Величиной, определяющей функциональную зависимость между зарядом проводника и его потенциалом, является **ёмкость С**.

$$q = C\varphi$$

Для **ёмкости** можно записать ряд формул, из которых следует физический смысл этой величины:

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

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

$$C = \frac{dq}{d\varphi}$$

Ёмкость численно равна заряду, который изменяет потенциал проводника на единицу.

Электроёмкость:

- измеряется в фарадах: $[C] = 1 \text{ Ф}$ ($\text{Ф} = \text{Кл/В}$);
- характеристика самого проводника;
- не зависит ни от его заряда, ни от потенциала;
- определяется формой, размерами проводника;
- зависит от диэлектрических свойств окружающей среды (ϵ).

Емкость:

шара

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$$

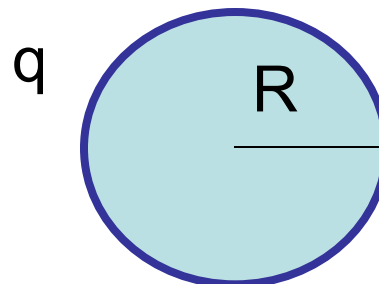
плоского конденсатора

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

Ёлектроёмкость шара

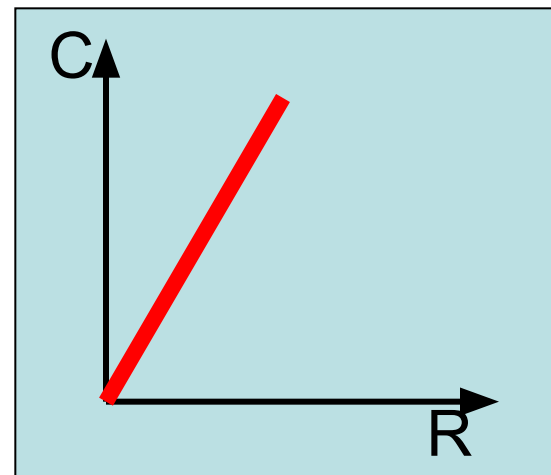
Потенциал шара радиусом **R** определяется по формуле потенциала точечного заряда:

$$\varphi = \frac{kq}{\varepsilon R}$$



Тогда:

$$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{\varepsilon q R}{kq} = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon R$$



Электроёмкость плоского конденсатора

Для плоского конденсатора с диэлектриком (ϵ)

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma S}{Ed} \quad \leftarrow \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$$

Напряженность однородного поля в диэлектрике конденсатора E определяется поверхностной плотностью заряда σ на его пластинах площадью S .

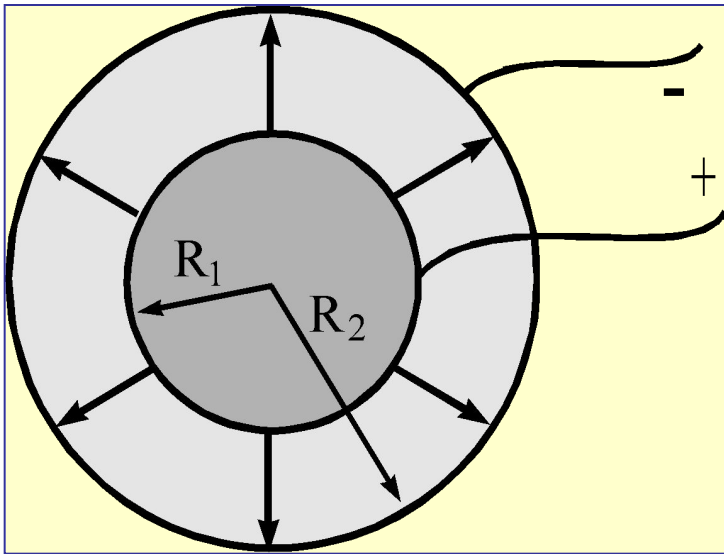
Электроёмкость

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

где d – расстояние между пластинами.

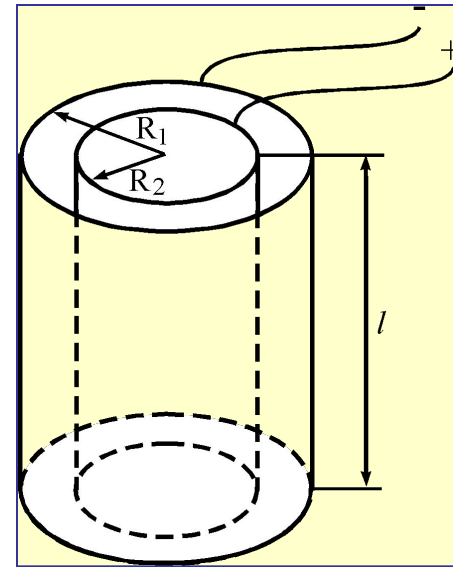
Електроёмкость
сферического
конденсатора:

$$C_{\text{сф.}} = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$



Електроёмкость
цилиндрического
конденсатора:

$$C_{\text{цил.}} = \frac{2\pi l\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$



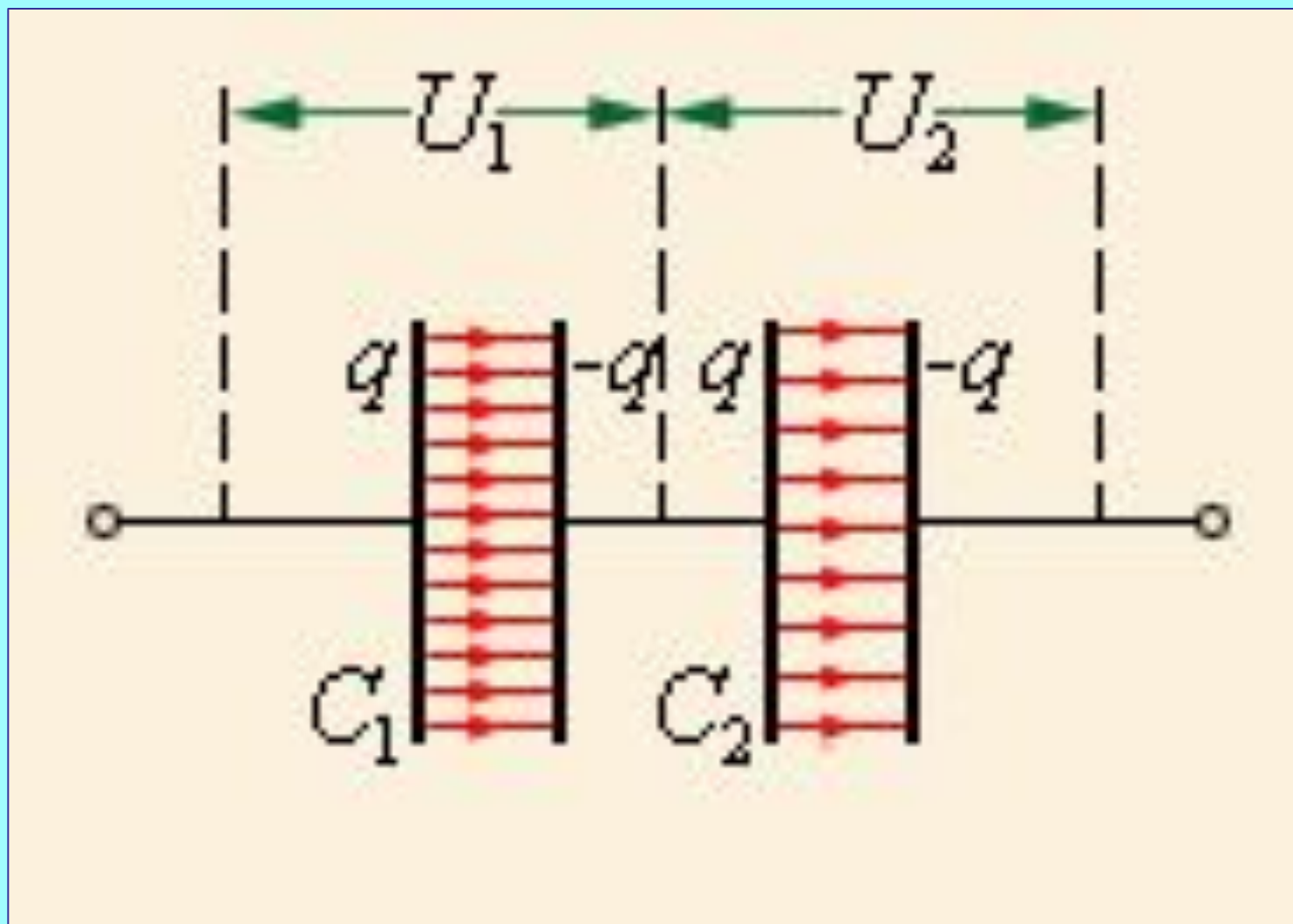
Соединение конденсаторов в батарею

Батарея конденсаторов – несколько соединенных друг с другом конденсаторов.

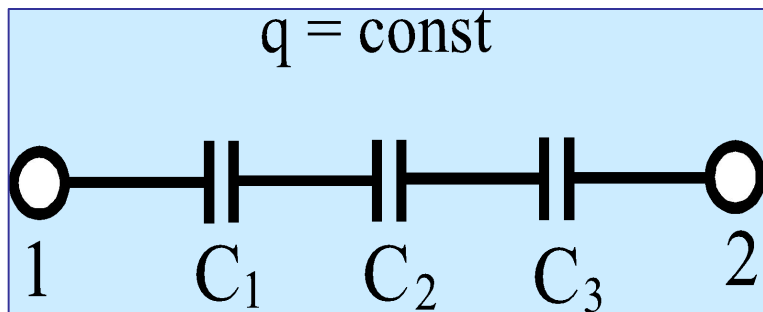
Заряд батареи – заряд, который проходит по проводнику, соединяющему положительный и отрицательный полюсы батареи.

Емкость батареи – величина, численно равная отношению заряда батареи к абсолютной величине разности потенциалов, между полюсами батареи.

Последовательное соединение двух конденсаторов



При последовательном включении все конденсаторы имеют **одинаковый заряд.**



$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

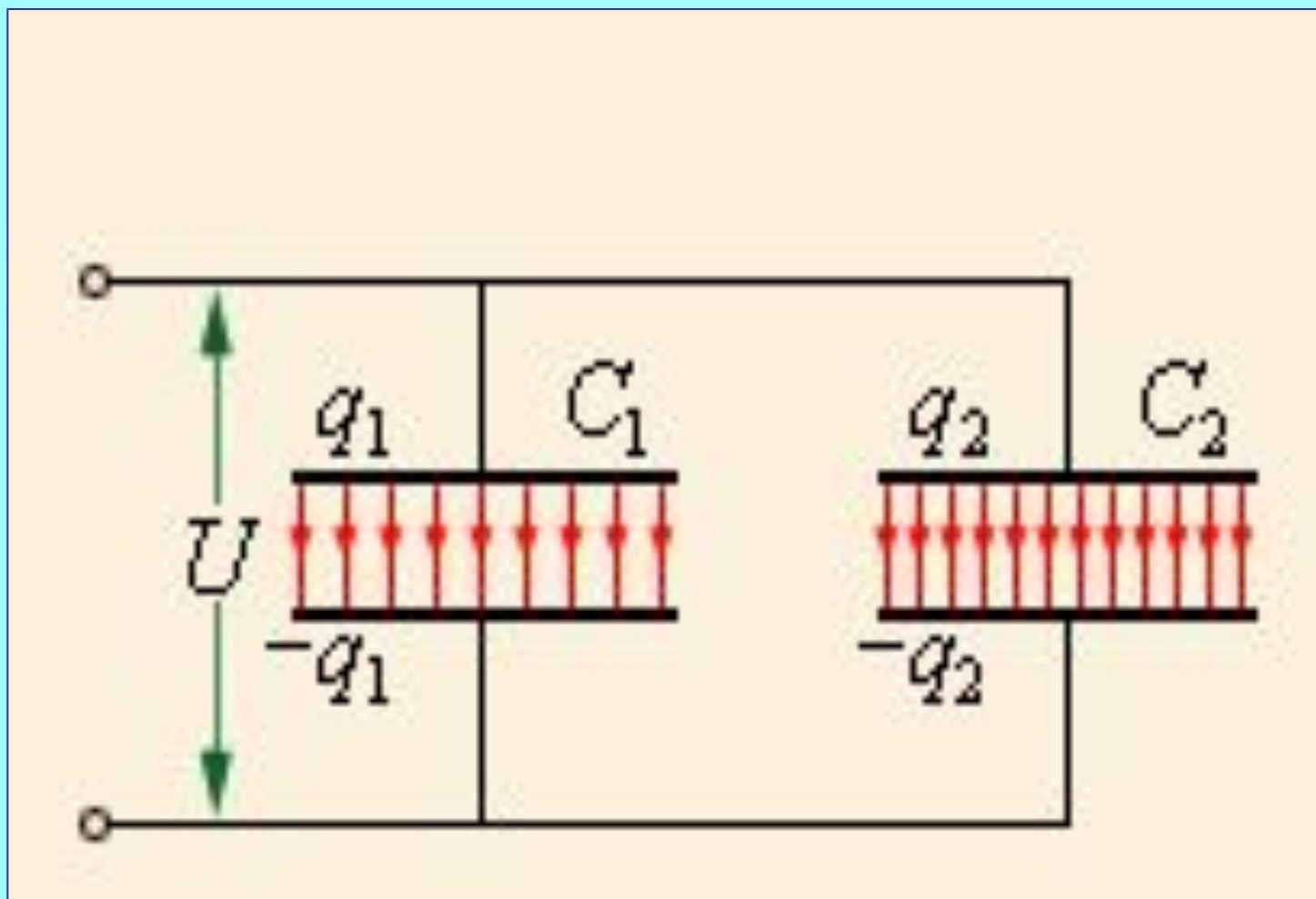
Общая ёмкость
батареи

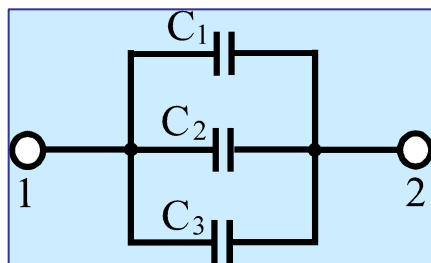
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Только для двух
конденсаторов:

$$C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Параллельное соединение двух конденсаторов





Конденсаторы находятся под **одним напряжением**:

$$U_{12} = U_1 = U_2 = U_3$$

Заряд q_i на каждом конденсаторе будет разным, причём, по закону сохранения заряда:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots$$

Общая ёмкость батареи параллельно соединённых конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \dots$$