

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



- *Электродинамика* это раздел физики, в котором изучаются электрические и магнитные взаимодействия материи.
- *Электромагнитными взаимодействиями* называются взаимодействия между электрически **заряженными** частицами или макроскопическими заряженными телами.
- Электромагнитные явления обусловлены способностью **некоторых** частиц взаимодействовать путем **обмена** фотонами - эта способность оценивается электрическим зарядом.

- Физическая величина, характеризующая свойство тел или частиц вступать в электромагнитные взаимодействия и определяющая значения сил и энергий при таких взаимодействиях, называется электрическим зарядом



Электрические заряды обладают четырьмя свойствами:

1. Заряды существуют в двух видах.

Заряды классифицируются на положительные и отрицательные.

Носителями элементарного положительного заряда являются протон и позитрон, отрицательного - электрон и антипротон.

2. Заряд инвариантен - величина и знак электрического заряда не зависят от того движется он или нет - он инвариантен к системе отсчета.

3. Заряд дискретен – заряд тела составляет целое число, кратное элементарному заряду электрона

4. Заряд аддитивен - заряд системы зарядов равен их сумме



- Тело или система тел электрически нейтральна, если в ней содержится равное число зарядов противоположного знака. Если электрическая нейтральность тела нарушена, то оно называется *наэлектризованным*.
- Явление электризации бесконтактным способом называется электростатической индукцией, а полученные заряды - индуцированными.
- Электрические заряды называются *точечными*, если они распределяются на телах, линейные размеры которых значительно меньше, чем другие расстояния, встречающиеся в данной задаче.

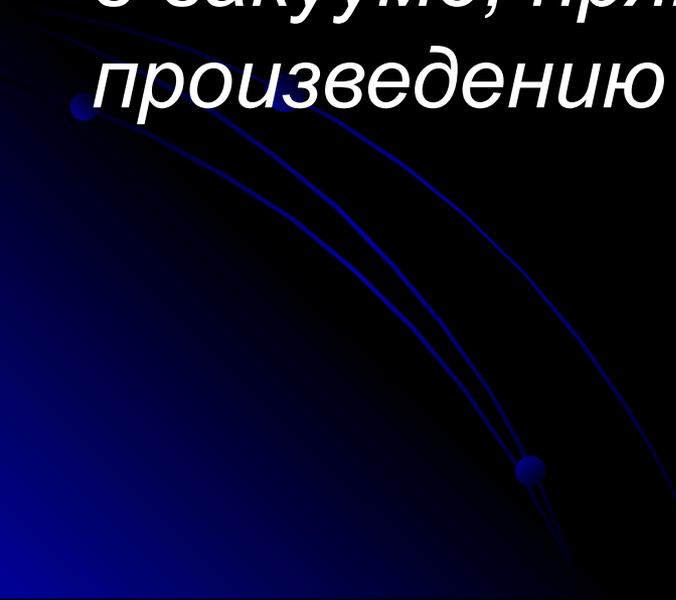
# Электростатика

- Электростатика изучает взаимодействие неподвижных точечных зарядов. Для таких зарядов справедливы 2 закона:
- **1. Закон сохранения электрического заряда** - В электрически изолированной системе при перераспределении зарядов суммарный заряд остается постоянным.

- **2. Закон Кулона:**

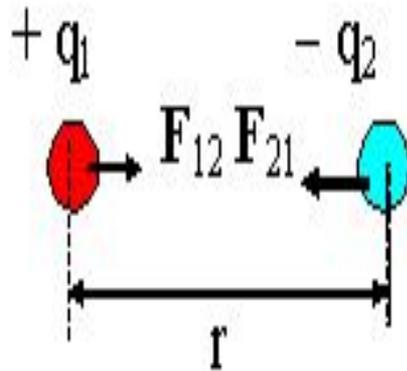
- Закон Кулона количественно определяет характеристики электростатического взаимодействия зарядов:

*Сила  $F$  электростатического взаимодействия между двумя точечными электрическими зарядами, находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению величин зарядов*



# • Взаимодействие зарядов

$$F = k q_1 q_2 / r^2$$



$k$  - коэффициент, зависящий от системы единиц;

$k = ? \pi \epsilon_0$  в системе СИ;

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ (Нм}^2\text{/Кл}^2\text{)}$$

$\epsilon_0$  - электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ [Кл}^2\text{/Нм}^2\text{]}.$$

$F$  - сила взаимодействия. [Н];

$q_1$  и  $q_2$  заряды [Кл].

- В соответствии с законом Кулона, тело может быть электрически заряжено только зарядом одного знака: или положительным (недостаток электронов) либо отрицательным (их избыток), но так как одноименные элементарные заряды отталкиваются, значит в конечном счете, заряд распределится на поверхности тела.



# Электрическое поле

- Материя существует не только в виде частиц, но и в виде полей. Например, электростатическое поле создается неподвижными электрическими зарядами.
- Наиболее общим случаем поля является электромагнитное поле - форма материи, посредством которой осуществляются электромагнитные взаимодействия заряженных частиц или тел, движущихся в данной системе отсчета.

- Современная физика основывается на *теории близкодействия*, в основе которой переменные электромагнитные поля распространяются в пространстве с конечной скоростью, равной скорости света, и воздействуют на заряженные частицы или тела, находящиеся в пространстве.

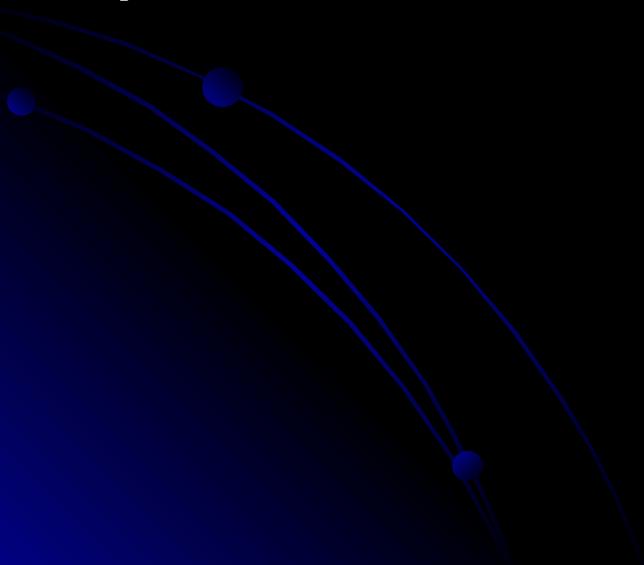


- Силовой характеристикой электрического поля является  $E$  - вектор напряженности электростатического поля в его конкретной точке :

$$E = F/q. \quad [Н/Кл].$$



- $F$ - кулоновская сила, действующая на положительный заряд  $q$ , помещенный в данную точку поля.
- $E$  - Напряженность электрического поля в некоторой его точке численно равна и совпадает по направлению с силой, действующей на единичный положительный заряд, внесенный в поле.



- Электростатическое поле можно графически изобразить с помощью силовых линий.
- Силовыми линиями называются воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности в данной точке поля.



- Силовые линии электрического поля.

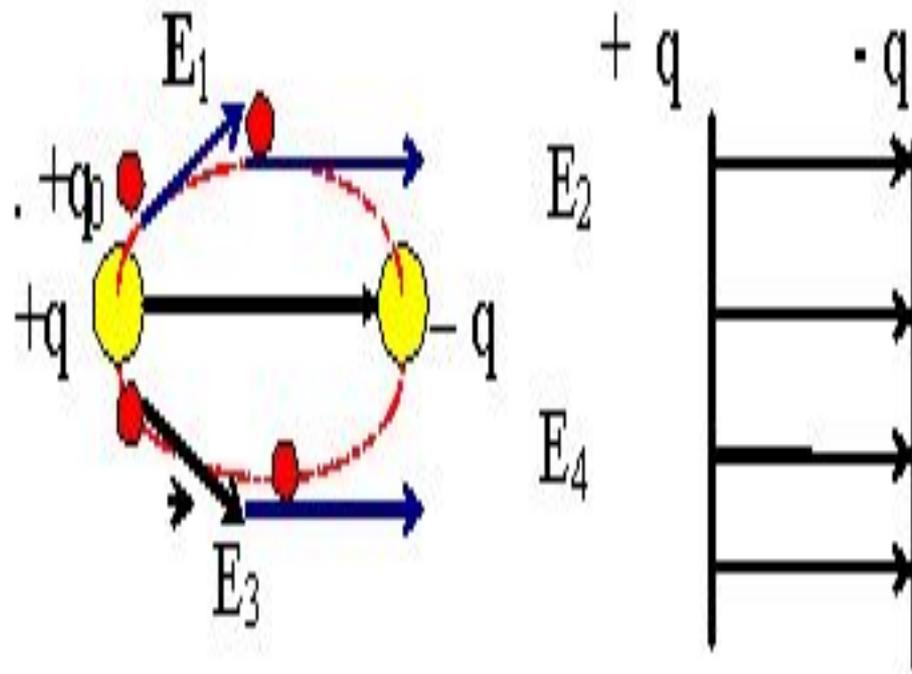
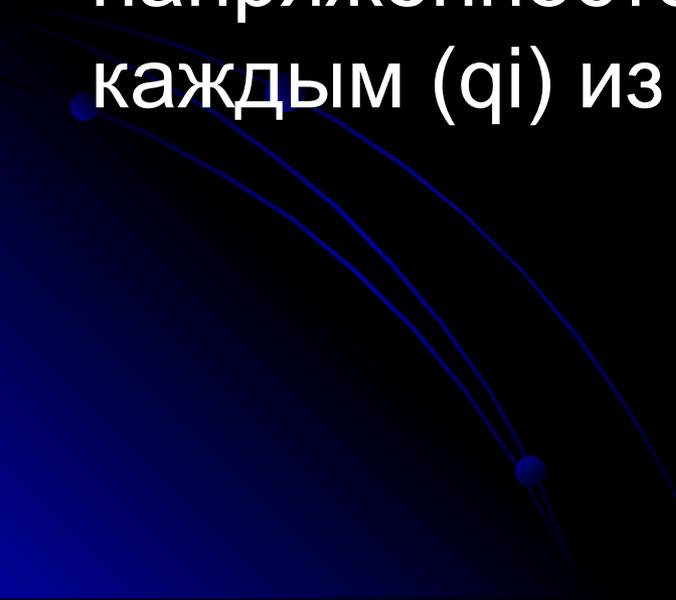


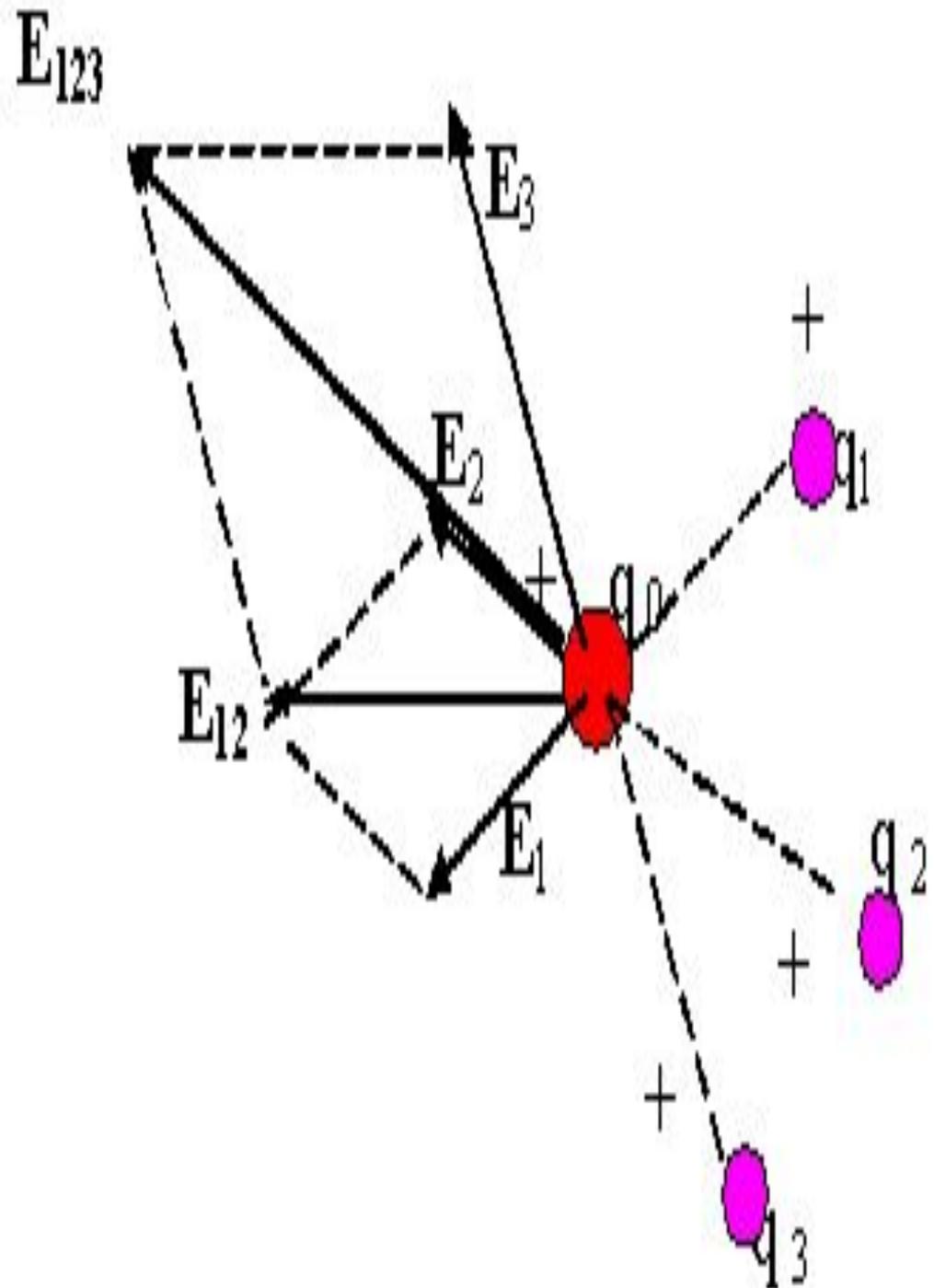
Рис. 131. Силовые линии электрического

- Силовые линии имеют следующие свойства:
- 1-Они замкнуты - начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах.
- 2- Силовые линии нигде не пересекаются.
- Электрическое поле, силовые линии напряженности которого параллельны, называется однородным.
- Силовыми линиями удобно пользоваться при вычислении результирующего значения вектора напряженности электрического поля, создаваемого несколькими электростатическими зарядами.

- Электростатическое поле создается только покоящимися зарядами и само поле не создает какого-либо дополнительного поля вокруг себя. Поля различных зарядов не влияют друг на друга, поэтому суммарное поле от системы зарядов можно вычислить как векторную сумму составляющих полей.



- Нахождение значения и направления такого результирующего вектора осуществляется на основе принципа суперпозиции полей, т.е. посредством операции сложения векторов.
  - Принцип суперпозиции (наложения) полей:
  - Напряженность электрического поля ( $E$ ) системы  $n$  зарядов равна векторной сумме напряженностей полей ( $E_{123}$ ), создаваемых каждым ( $q_i$ ) из них в отдельности.
- 



$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{123} = \sum \mathbf{E}_i$$

# Проводники и диэлектрики

- **Проводники в электростатическом поле.**  
*Проводниками называются вещества, в которых может происходить упорядоченное перемещение электрических зарядов, т.е. осуществляться электрический ток. Проводниками являются металлы, водные растворы солей, ионизированные газы.*
- В проводнике, находящемся вне электромагнитного поля, заряд всегда скомпенсирован.

- Проводники характеризуются наличием свободных электронов или ионов. Например, во внешнем электрическом поле можно получить упорядоченное движение электронов в направлении, противоположном направлению векторов напряженности поля.
- Тогда на одной поверхности проводника появляется избыточный отрицательный заряд, а на противоположной ей поверхности - избыточный положительный. Эти заряды создают внутреннее электрическое поле, направленное навстречу  $E_{вх} : E_{рез} = E_{вх} + E_{int}$

- Если  $|\mathbf{E}_{вх}| = |\mathbf{E}_{int}|$ , то упорядоченное перемещение зарядов в проводнике заканчивается. На этом основана электростатическая защита каких-либо аппаратов посредством металлических кожухов.
- **Диэлектрики в электрическом поле.**  
Диэлектриками называются вещества, в которых практически отсутствуют свободные электроны. Поэтому диэлектрики не проводят электрический ток. К диэлектрикам можно отнести: стекло, фарфор, химически чистую воду, газы.

- Электрически нейтральная система диэлектрика реагирует на внешнее электрическое поле - происходит поляризация диэлектрика. В результате на поверхностях диэлектрика образуются связанные заряды. В диэлектриках различают электронную, ионную и дипольную поляризации.



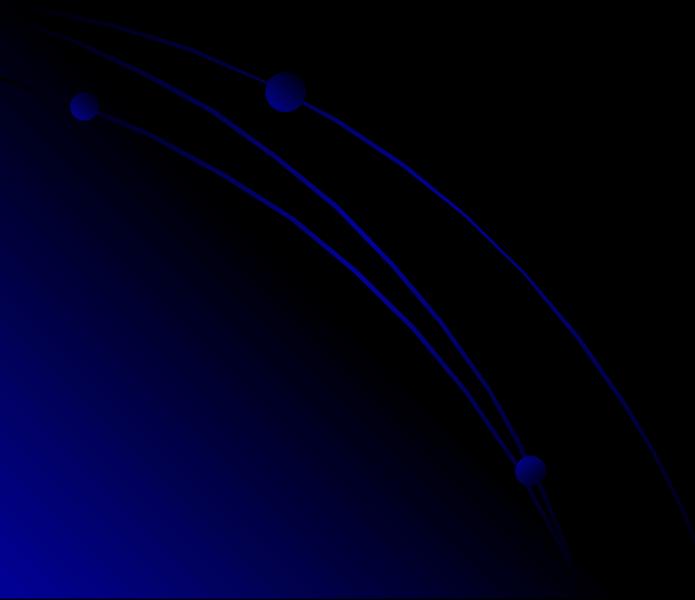
- Система состоящая из двух зарядов равных по модулю и противоположных по знаку называется *диполем*.
- Электрической характеристикой диполя является электрический *дипольный момент*  $p_e$  :

$$p_e = Lq \quad .$$

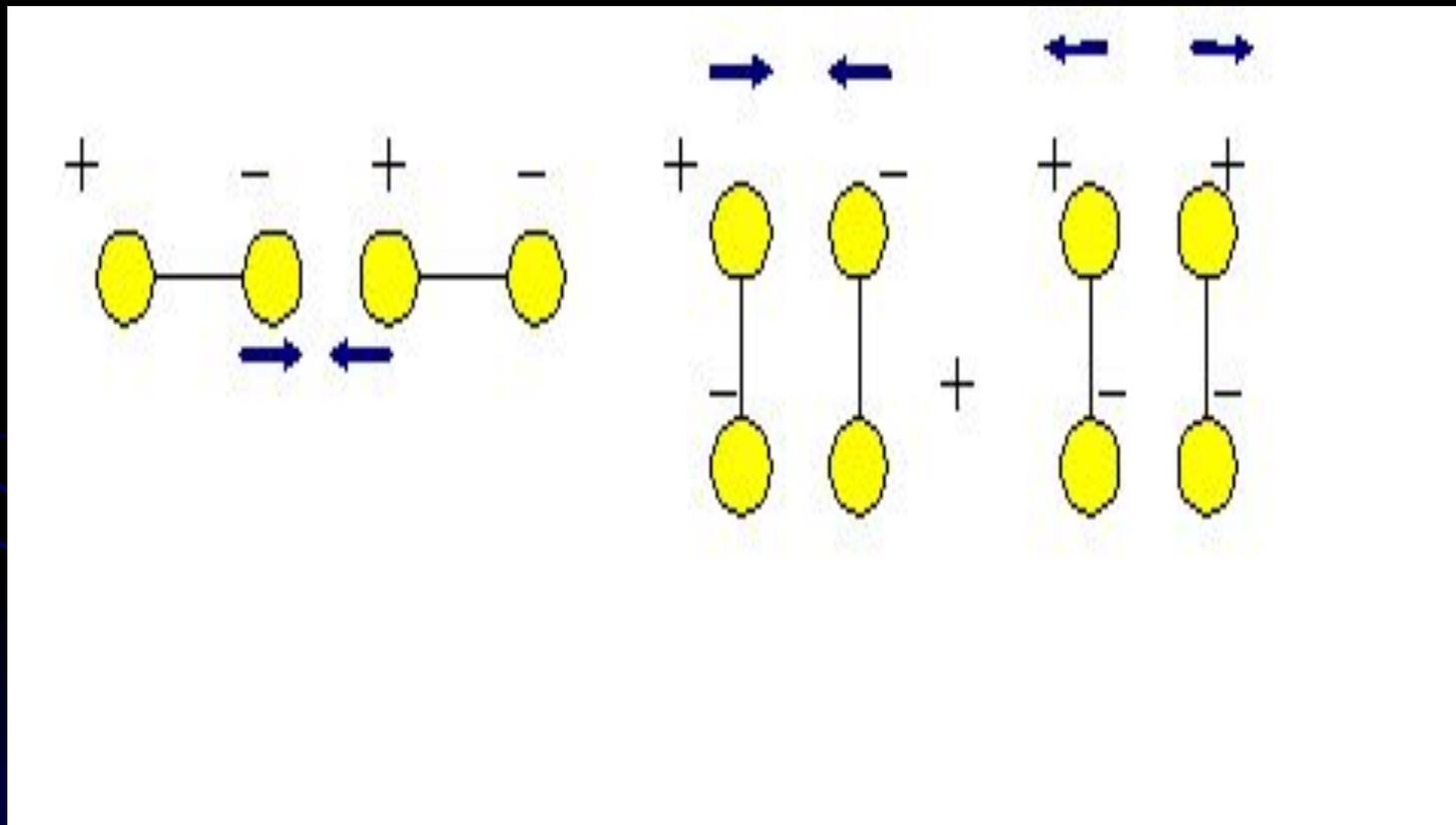
$L$  - вектор, модуль

которого равен расстоянию между зарядами.

- От напряженности  $E$  внешнего электрического поля в диполе образуется момент сил, поворачивающий диполь, создавая потенциальную энергию ориентации диполя на внешнее поле.
- Диэлектрик можно рассматривать как систему электрических диполей.



- В зависимости от пространственной ориентации диполей они могут притягиваться либо отталкиваться, сами же диполи электрически нейтральны:



Взаимодействие электрических диполей

- В кристаллических диэлектриках поляризация может возникнуть при отсутствии электрического поля - при деформации. Это явление получило название *пьезоэлектрический эффект*.
- Пьезоэлектрический эффект обусловлен смещением элементарных кристаллических ячеек относительно друг друга при деформациях. При небольших деформациях поляризованность пропорциональна деформации.

- Различают прямой и обратный пьезоэффект. При прямом пьезоэффекте реакцией на деформацию кристалла является появление напряжения на его гранях. При обратном - при подаче напряжения на грани - кристалл деформируется.



- Диполи внутри диэлектрика компенсируют поля друг друга. В результате заряды противоположных знаков проявляются на противоположных сторонах диэлектрика. Эти заряды создают внутреннее поле. Поэтому результирующее электрическое поле в однородном изотропном диэлектрике имеет напряженность в  $\epsilon$  раз меньшую, чем в вакууме.
- При наличии диэлектрика закон Кулона принимает вид:
- $F = k q_1 q_2 / \epsilon r^2$      $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды.

# Работа и энергия электростатического поля

- Электрические силы потенциальны - их работа не зависит от формы траектории.
- Элементарная работа сил поля по перемещению электростатического заряда определится по формуле:
  - $dA = F dl$  [Дж]
  - где  $F$  – вектор кулоновской силы
  - $dl$  – отрезок пути

- **Потенциал электростатического поля.**  
Энергетической характеристикой электростатического поля является *потенциал поля в данной его точке.*
- *Потенциалом поля ( $\phi$ ) в данной точке называется скалярная величина, численно равная потенциальной энергии ( $E_p$ ) единичного положительного заряда ( $q$ ), помещенного в эту точку, отнесенной к величине этого заряда:*
- $$\phi = E_p/q \quad [V = \text{Дж/Кл}].$$

- Физический смысл имеет разность потенциалов между двумя точками электростатического поля.
- Две характеристики электростатического поля - силовая ( $E$ ) и энергетическая ( $\phi$ ) связаны между собой:
  - $$E = - d\phi/dl$$
- Знак минус в формуле означает, что вектор напряженности всегда направлен в сторону убывания потенциала.

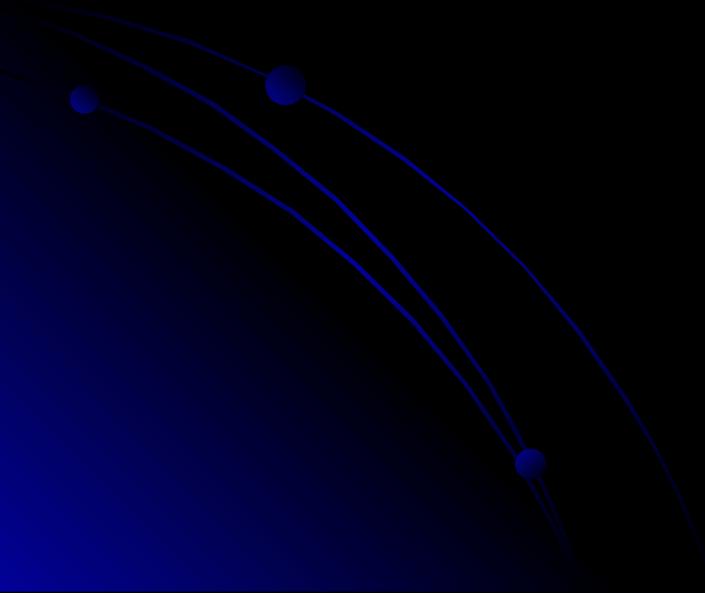
# Электрическая емкость проводника

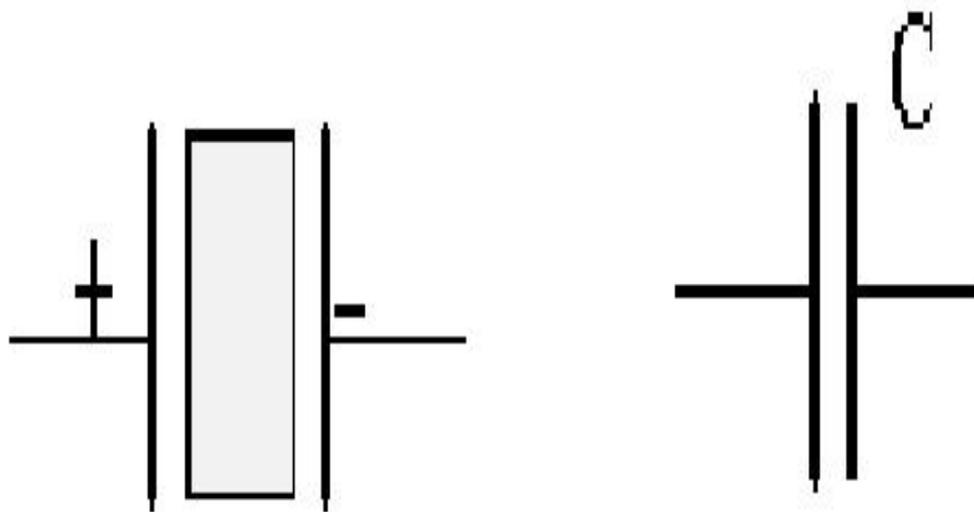
- Разность потенциалов между проводниками пропорциональна модулю заряда:
- $\Delta\phi = (1/C) q$ .
- Потенциал, создаваемый зарядом в любой точке поля, пропорционален заряду .
- Величину  $C$ , равную отношению заряда системы проводников к разности потенциалам между ними, называют электрической емкостью (электроемкость) данной системы проводников:

$$C = q/\Delta\phi.$$

$$[1\text{Ф}=1\text{Кл/В}];$$

- Электроемкость определяется размерами проводника, их формой, расположением в пространстве и диэлектрической проницаемостью среды.
- Система, состоящая из двух изолированных друг от друга металлических проводников, между которыми находится диэлектрик называется **конденсатором**.





Конденсатор и его обозначение в электрической цепи

- Диэлектрик в конденсаторе служит для создания остаточной поляризации молекул диэлектрика и образования в связи с этим поверхностного заряда, удерживающего заряд противоположного знака на проводнике.

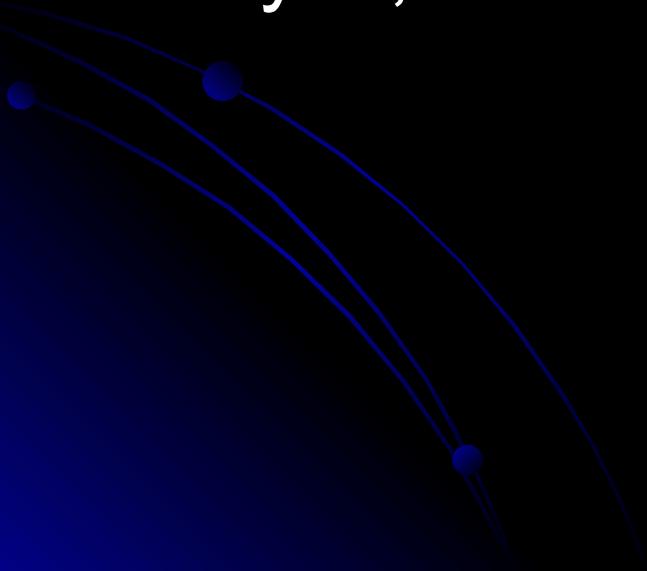


# Постоянный электрический ток

- *Электрический ток – это упорядоченное движение электрических зарядов.*
- Носители тока движутся хаотично и одновременно перемещаются в направлении поля. Такое движение называется дрейфом.
- Скорость дрейфа  $v$ :
- $v = \mu E = 10^{-4}$  м/с       $\mu$  - коэффициент дрейфа.
- Чем меньше масса носителя заряда и их температура, тем скорость дрейфа выше.

- Средняя скорость свободного пробега электрона оценивается расстоянием между узлами (атомами) кристаллической решетки металла.
- Направлением электрического тока принято считать то направление, в котором движутся положительные заряды.
- Силой тока называется скалярная величина  $I$ , равная количеству электричества  $dq$ , которое за единицу времени проходит через некоторую площадь сечения проводника:

- Для возникновения и поддержания постоянного тока необходимы следующие условия:
- 1- напряженность электрического поля в проводнике должна быть отлична от нуля и не должна меняться с течением времени;
- 2- электрическая цепь должна быть замкнута;



- 3- на свободные электрические заряды помимо кулоновских сил должны действовать не электростатические силы - сторонние силы.
- Электростатические силы не могут поддерживать электрический ток, так как работа по перемещению заряда уменьшает энергию самого поля

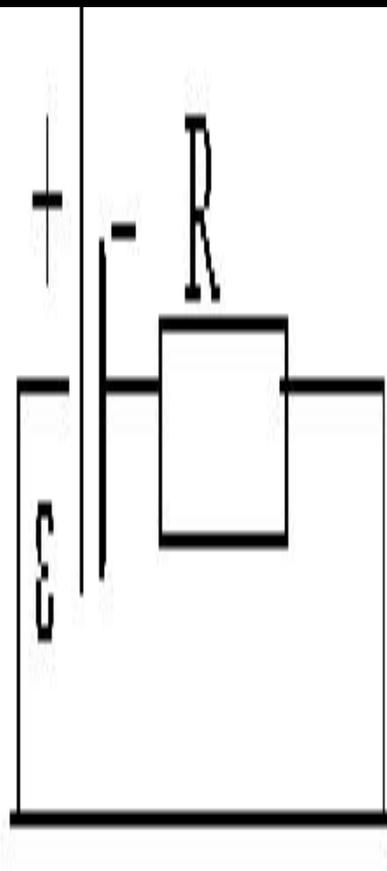


- Соединение проводников, по которым течет электрический ток называется участком электрической цепи. Электрическая цепь называется полной, если она состоит из проводников и источника тока (ЭДС). В этом случае подсоединенные к источнику проводники образуют внешний участок, а источник тока – внутренний участок электрической цепи.

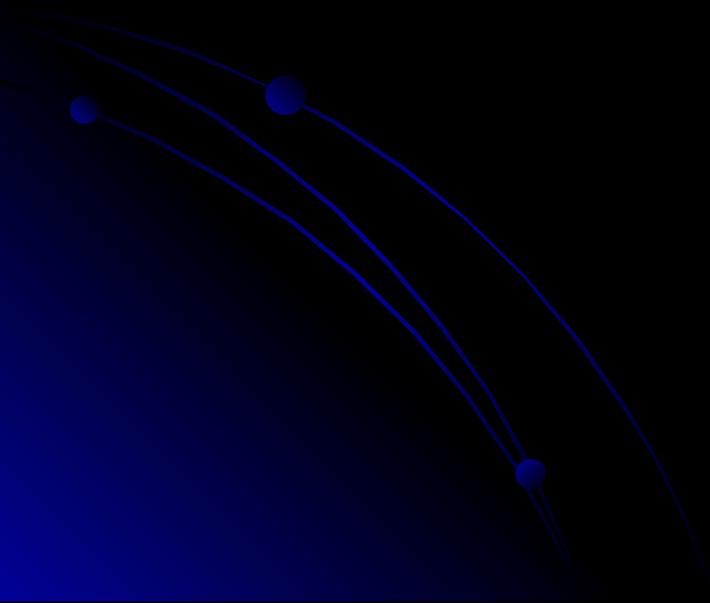


- Во внешней цепи движение зарядов осуществляется от высокого к низкому потенциалу.
- Для внешнего участка справедлив закон Ома:
  - $U = RI$        $U$  - напряжение на внешнем участке [В].
  - $R$  - электрическое сопротивление [Ом].

- Рис. Полная электрическая цепь



- **Электродвижущей силой (э.д.с.)** на участке цепи называется величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению заряда вдоль участка, к величине этого заряда:
- $\varepsilon = A_{\text{стор}}/q$        $\varepsilon$  - ЭДС- электродвижущая сила стороннего источника [В].



- Следовательно, напряжение полной цепи равно сумме разности потенциалов и электродвижущей силы:
- $U = (\phi_1 - \phi_2) + \varepsilon.$
- Название электрическое сопротивление связано с тем, что столкновение носителей зарядов с узлами кристаллической решетки хаотизирует движение. С ростом температуры возрастает число столкновений - повышается электрическое сопротивление

# Электрический ток в различных средах

- Электрический ток в металлах
- Металлы обладают электронной проводимостью. В металлических проводниках (проводниках первого рода) электрическое сопротивление возрастает с увеличением температуры *линейно*. Это связано с тем, что с ростом температуры свободные электроны увеличивают свою кинетическую энергию, скорость движения, частоту столкновения с ионами кристаллических решеток, что и служит повышением удельного сопротивления  $\rho$ :

- Для полупроводников и электролитов с увеличением температуры электрическое сопротивление *нелинейно уменьшается*, что связано с ростом концентрации свободных зарядов:  $\alpha < 0$ .
- При температурах, близких к  $t_0 = -2730 \text{ C}$ , электрическое сопротивление некоторых веществ (например, свинца, олова, алюминия) снижается до нуля. Это явление называется *сверхпроводимостью*. Температура, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, называется *критической температурой перехода*.
- Явление сверхпроводимости объясняется на основе квантовой электронной теории.

- . Сверхпроводимость не чисто электронное явление. Оно связано с взаимодействием электронов с колебаниями решетки - фононами, что может привести к притяжению между электронами. Взаимное притяжение (спаривание) возникает, правильнее сказать, не между электронами, а в низко энергетической части систем - частиц фермионов, в которую входят и электроны. Фермионы имеют такой же заряд, что и электроны, но очень малую энергию.
- Вызванное перестроение образует сверхтекучесть вещества. За счет сверхпроводимости резко уменьшаются потери энергии при перемещении заряда.

- Электрическая мощность по определению равна работе тока, отнесенной к единице времени:
- $P = A/t = UIt/t \Rightarrow P = UI \quad [\text{Вт}]$ .
- Устройства, преобразующие какую-либо энергию в электрическую называются электрогенераторами. Название генератора присваивается по виду преобразованной энергии ( химический, тепловой, механический и т.д.).