

Общая физика

Ф́изика (от др.-греч. (от др.-греч. φύσις «природа») — область естествознания (от др.-греч. φύσις «природа») — область естествознания, наука, изучающая наиболее общие и фундаментальные закономерности, определяющие структуру и эволюцию материального мира. Законы физики лежат в основе всего естествознания.

Термин «физика» впервые появился в сочинениях одного из величайших мыслителей древности — Аристотеля, жившего в IV веке до нашей эры. Первоначально термины «физика» и «философия» были синонимичны, поскольку обе дисциплины пытаются объяснить законы функционирования Вселенной.

Однако в результате научной революции XVI века физика выделилась в отдельное научное направление.

Общая физика

Название	Фактор	Название	Фактор
пико	10^{-12}	кило	10^3
нано	10^{-9}	Мега	10^6
микро	10^{-6}	Гига	10^9
милли	10^{-3}	Тера	10^{12}

Общая физика. Электромагнитные явления.

Основоположник науки об электричестве в Европе - английский физик и придворный врач королевы Елизаветы - Уильям Гильберт (1544-1603).

С помощью своего "версора" (первого электроскопа) У. Гильберт показал, что способностью притягивать легкие тела (соломинки) обладает не только натертый янтарь, но и алмаз, сапфир, карборунд, опал, аметист, горный хрусталь, стекло, сланцы и др., которые он назвал **электрическими** минералами.

Кроме того, Гильберт заметил, что пламя "уничтожает" электрические свойства тел, приобретенные при трении, и впервые исследовал магнитные явления, установив, что:

- магнит всегда имеет два полюса - северный и южный;
- одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются;
- распиливая магнит, нельзя получить магнит только с одним полюсом;
- железные предметы под влиянием магнита приобретают магнитные свойства (магнитная индукция);

Общая физика. Электромагнитные явления.

- **1650 г.: Отто фон Герике** (1602-1686) создает первую электрическую машину, извлекавшую из натиремого шара, отлитого из серы, значительные искры, уколы которых могли быть даже болезненными. Однако тайна свойств **«электрической жидкости»**, как в то время называли это явление, не получила тогда никакого объяснения.
- **1733 г.: французский физик**, член Парижской Академии наук, **Шарль Франсуа Дюфе** (Dufay, Du Fay, 1698-1739) открыл существование двух видов электричества, которые назвал "стеклянным" и "смоляным". Первое возникает на стекле, горном хрустале, драгоценных камнях, шерсти, волосах и т. д.; второе - на янтаре, шелке, бумаге и т. п.
- После многочисленных экспериментов **Ш. Дюфе** впервые электризовал тело человека и "получил" из него искры. В область его научных интересов входил магнетизм, фосфоресценция и двойное лучепреломление в кристаллах, ставшее впоследствии основой для создания оптических лазеров. Для обнаружения измерения электричества пользовался версором Гилберта, сделав его намного более чувствительным. Впервые высказал мысль об электрической природе молнии и грома.

Общая физика. Электромагнитные явления.

1745 г.: выпускник Лейденского университета (Голландия) физик **Питер ван Мушенбрук** (Musschenbroek Pieter van, 1692-1761) изобрел первый автономный источник электроэнергии - лейденскую банку и провел с ней ряд опытов, в ходе которых установил взаимосвязь электрического разряда с его физиологическим действием на живой организм.

Лейденская банка представляла собой стеклянный сосуд, стенки которого снаружи и изнутри были оклеены свинцовой фольгой, и являлась первым электрическим конденсатором. Если обкладки прибора, заряженного от электростатического генератора **О. фон Герике**, соединяли тонкой проволокой, то она быстро нагревалась, а иногда и плавилась, что указывало на наличие в банке источника энергии, которую можно было транспортировать далеко от места ее зарядки.

1747 г.: член Парижской Академии наук, французский физик-экспериментатор **Жан Антуан Нолле** (1700-1770) изобрел **первый прибор для оценки электрического потенциала - электроскоп**, зарегистрировал факт более быстрого "стекания" электричества с острых тел и впервые сформировал теорию действия электричества на живые организмы и растения.

Общая физика. Электромагнитные явления.

- **1747–1753 гг.:** американский государственный деятель, ученый и просветитель **Бенджамин (Вениамин) Франклин** (Franklin, 1706-1790) публикует цикл работ по физике электричества, в которых:
 - - ввел общепринятое теперь обозначение электрически заряженных состояний «+» и «-»;
 - - объяснил принцип действия лейденской банки, установив, что главную роль в ней играет диэлектрик, разделяющий проводящие обкладки;
 - - установил тождество атмосферного и получаемого с помощью трения электричества и привел доказательство электрической природы молнии;
 - - установил, что металлические острия, соединённые с землёй, снимают электрические заряды с заряженных тел даже без соприкосновения с ними и предложил молниеотвод;
 - - выдвинул идею электрического двигателя и продемонстрировал «электрическое колесо», вращающееся под действием электростатических сил;
 - - впервые применил электрическую искру для взрыва пороха.

Общая физика. Электромагнитные явления.

- **1759 г.:** В России физик **Франц Ульрих Теодор Эпинус** (Aepinus, 1724-1802), впервые выдвигает гипотезу о наличии связи между электрическими и магнитными явлениями.
- **1761 г.:** Швейцарский механик, физик и астроном **Леонард Эйлер** (L. Euler, 1707-1783) описывает новую электростатическую машину, состоящую из вращающегося диска из изоляционного материала с радиально наклеенными кожаными пластинами. Для съема электрического заряда к диску надо было подвести шелковые контакты, присоединенные к медным стержням со сферическими окончаниями. Приближая сферы друг к другу, можно было наблюдать процесс электрического пробоя атмосферы (искусственная молния).
- **1785 - 1789 гг.:** Французский физик **Шарль Огюстен Кулон** (S. Coulomb, 1736-1806) публикует семь работ, в которых описывает закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов (закон Кулона), вводит понятие магнитного момента и поляризации зарядов и доказывает, что электрические заряды всегда располагаются на поверхности проводника.

Общая физика. Электромагнитные явления.

- **1791 г.:** В Италии издается трактат **Луиджи Гальвани** (L. Galvani, 1737-1798), «De Viribus Electricitatis In Motu Musculari Commentarius» («Трактат о силах электричества при мышечном движении»), в котором доказывалось, что **электричество вырабатывается живым организмом** и наиболее эффективно проявляется в контакте разнородных проводников. В настоящее время этот эффект лежит в основе принципа действия электрокардиографов.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электростатика

Закон Кулона: сила взаимодействия между двумя зарядами направлена вдоль линии, соединяющей эти заряды, прямо пропорциональна произведению зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \cdot 10^9 \text{ н} \cdot \text{Кл}^{-2} \text{ м}^2$$

Напряженность $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

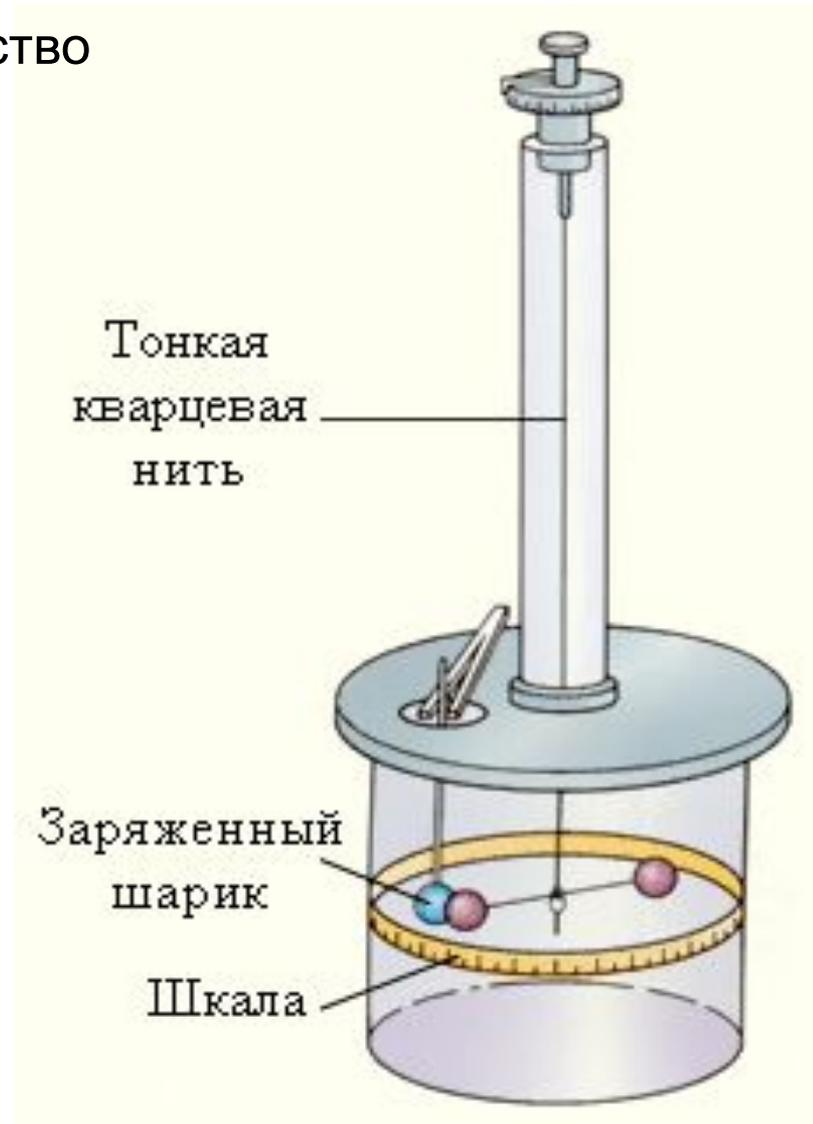
Напряженность точечного заряда Q ,
а также заряженного шара (вне шара)

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Принцип суперпозиции: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Экспериментальное доказательство
закона Кулона



Общая физика. Электромагнитные явления.

Заряженные частицы – электрон, протон и др.

Элементарный заряд: $|q_e| = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

q_e - заряд электрона.

Заряд любой частицы равен: $Q = m \cdot |q_e|$

Где m – целое число (включая ноль).

Закон сохранения электрического заряда.

$$a + b \rightarrow c + d$$

$$q_a + q_b = q_c + q_d$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электростатика

Заряженные частицы – электрон, протон и др.

Элементарный заряд: $q_p = |q_e| = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

$$|q_e| = (1.6021892 \times 0.00000046) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

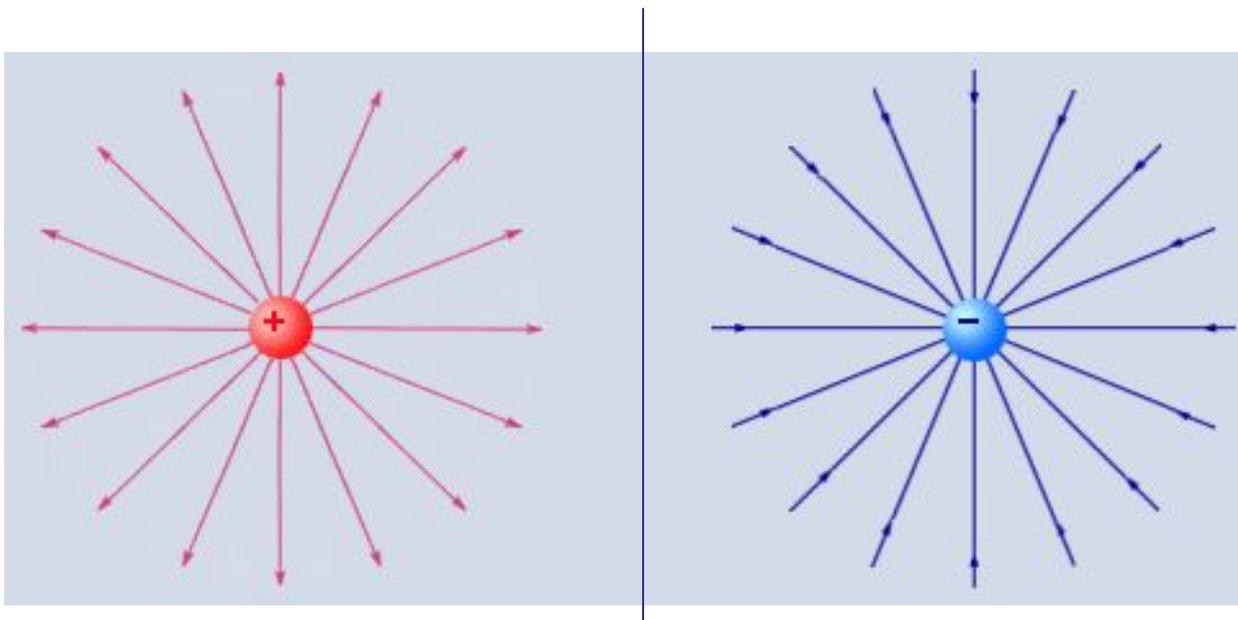
Отношение электростатических сил к гравитационным.

Электрон: $q_e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

$$\frac{F_{el}}{F_g} = \frac{k_0 \frac{q_e^2}{r^2}}{G \frac{m^2}{r^2}} = \frac{k_0}{G} \left(\frac{q_e}{m} \right)^2 \approx 4 \cdot 10^{42} !!!$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

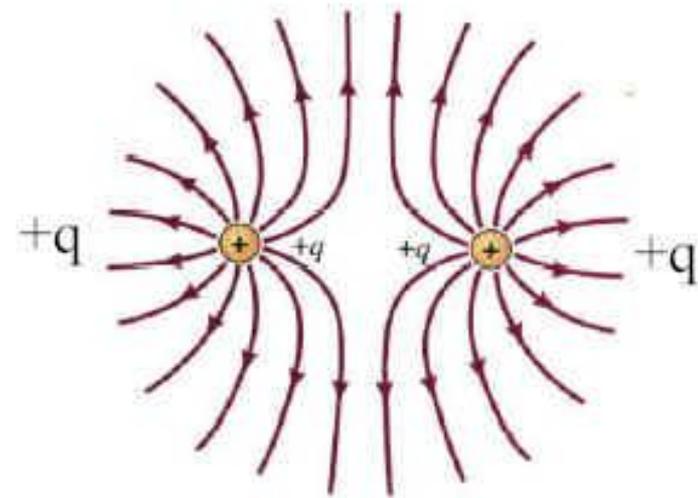
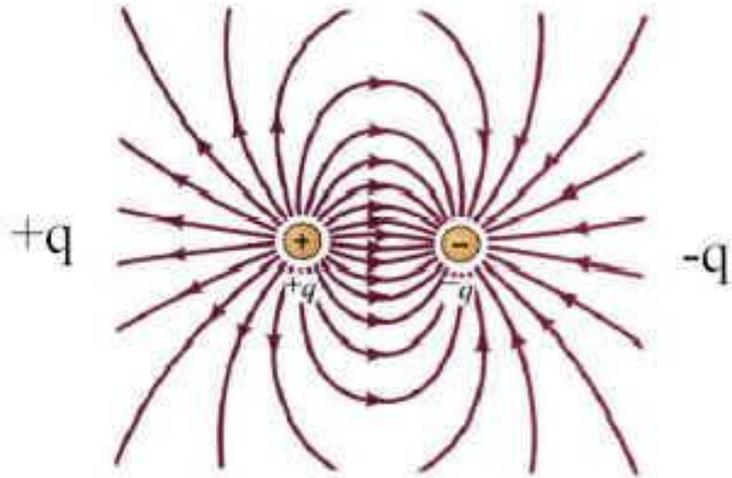
Силовые линии электрического поля.



$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right)$$

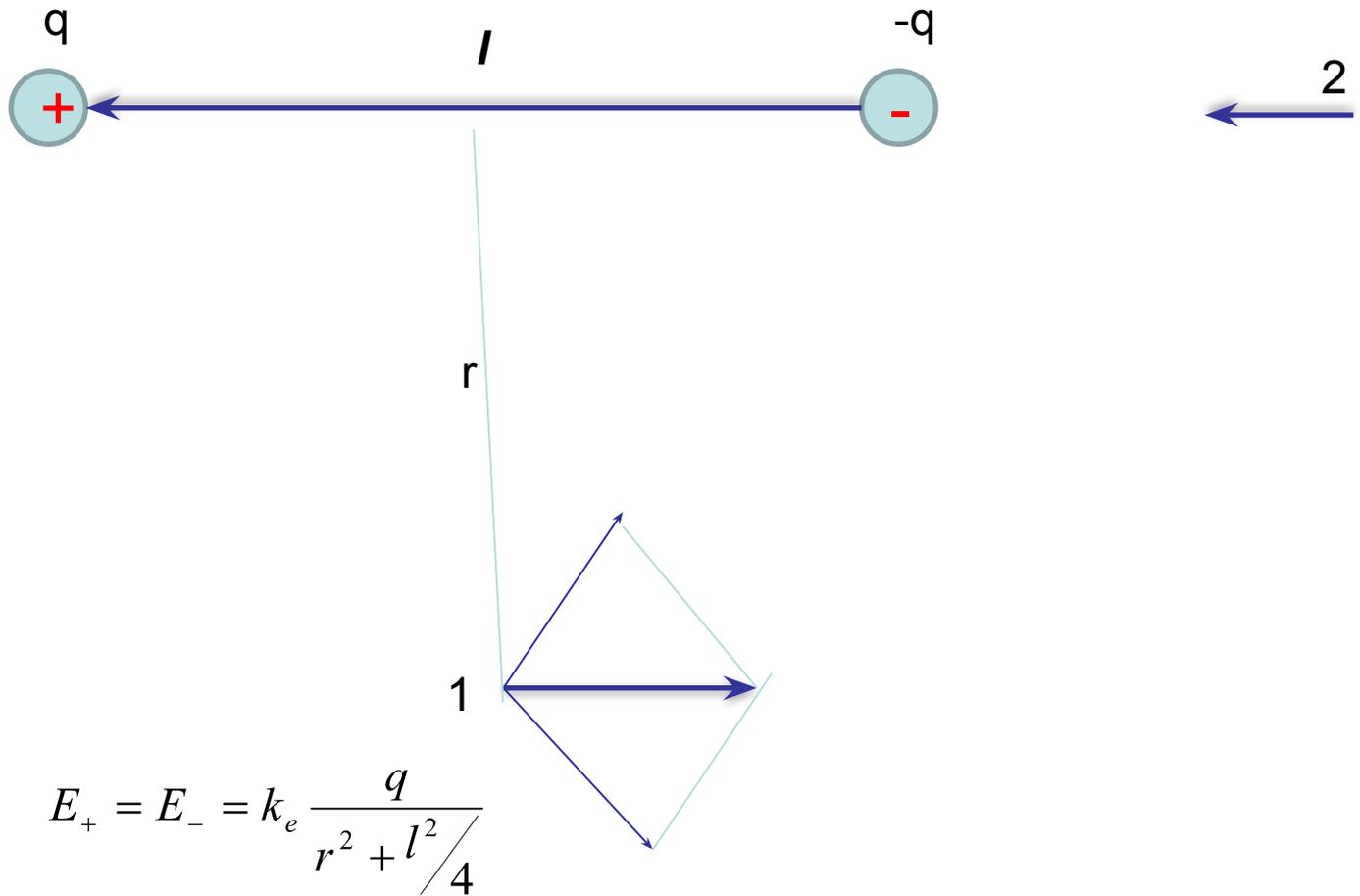
Общая физика. Электромагнитные явления.

Силовые линии.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Диполь. $\vec{d}_e = q \cdot \vec{l}$



Общая физика. Электромагнитные явления.

Диполь.

$$1) \quad E_+ = E_- = k_e \frac{q}{r^2 + l^2/4} \quad E = 2 \cdot E_+ \frac{l}{2r} \approx k_e \frac{q \cdot l}{r^3} = k_e \frac{d_e}{r^3}$$

$$2) \quad E_+ = k_e \frac{q}{\left(r + l/2\right)^2} \quad E_- = k_e \frac{q}{\left(r - l/2\right)^2}$$

$$E = E_+ - E_- = k_e q \left(\frac{1}{\left(r + l/2\right)^2} - \frac{1}{\left(r - l/2\right)^2} \right) \approx k_e q \frac{r^2 - 2r \frac{l}{2} + \frac{l^2}{4} - r^2 - 2r \frac{l}{2} - \frac{l^2}{4}}{r^4} =$$

$$= -k_e \frac{2ql}{r^3} = -k_e \frac{2d_e}{r^3}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{3(\vec{d}_e \cdot \vec{r})}{r^5} \vec{r} - \frac{\vec{d}_e}{r^3} \right\}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

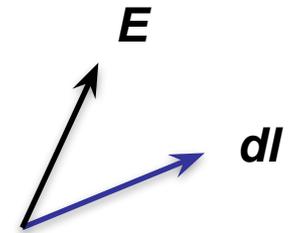
Работа электростатических сил. Потенциал.

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$$

$$A_{12} = U_1 - U_2$$

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{U(\vec{r})}{q}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$$



$$d\varphi = \varphi(x + dx, y + dy, z + dz) - \varphi(x, y, z) = -\frac{dA}{q} = -\vec{E} d\vec{l}$$

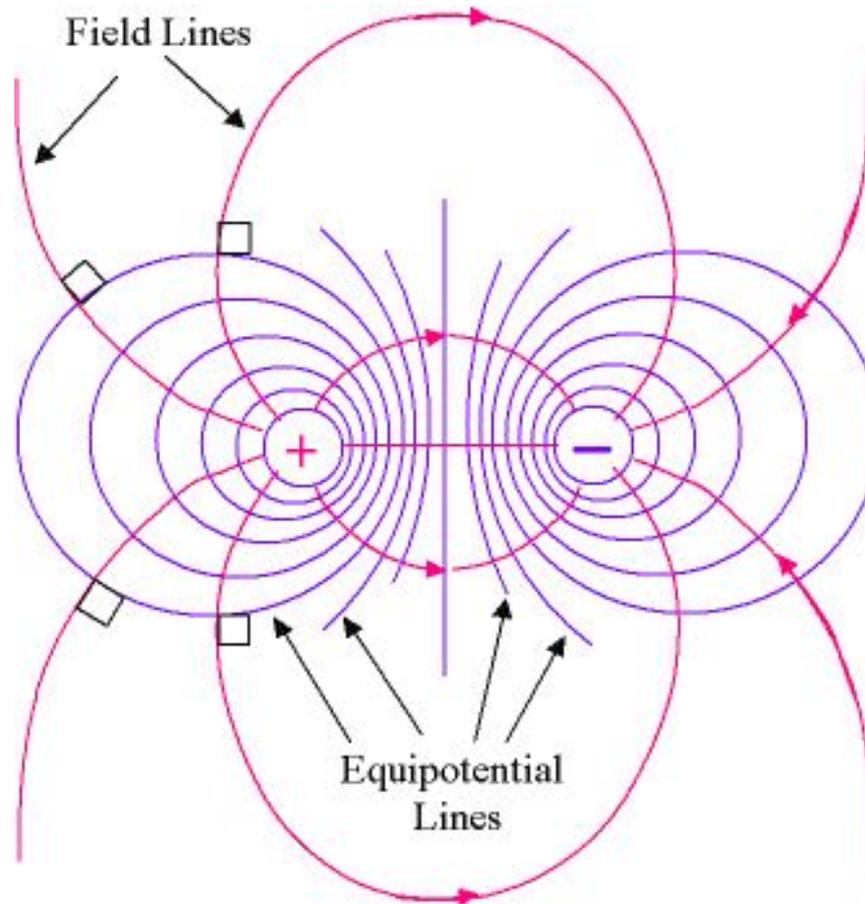
$$d\varphi = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = -(E_x \cdot dx + E_y \cdot dy + E_z \cdot dz)$$

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z};$$

$$\vec{E} = -\text{grad}(\varphi) \equiv -\left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \right\}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Эквипотенциальные поверхности.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Потенциал.

Электростатические силы – консервативны.

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Потенциальная энергия пробного заряда q в поле точечного заряда Q :

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q \cdot q}{r}$$

Потенциал:

$$\varphi(r) = \frac{U(r)}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

Принцип суперпозиции:

$$\varphi(\vec{r}) = \varphi_1(\vec{r}) + \varphi_2(\vec{r}) + \varphi_3(\vec{r}) + \dots$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Теорема Гаусса.

Поток вектора.

$$d\Phi = \vec{E} d\vec{S} = E \cdot dS \cdot \cos \alpha$$

Точечный заряд.

$$d\Phi = k_e \frac{q}{r^2} dS_r$$

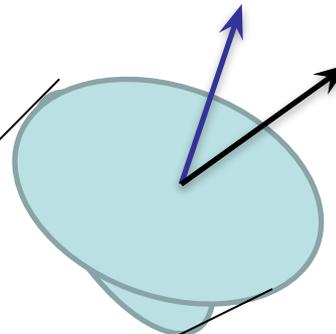
q

$$d\Omega = \frac{dS_r}{r^2} \text{ - Телесный угол.}$$

$$\int d\Omega = 4\pi$$

$$\Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 4\pi \cdot q = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$d\vec{S}$



$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

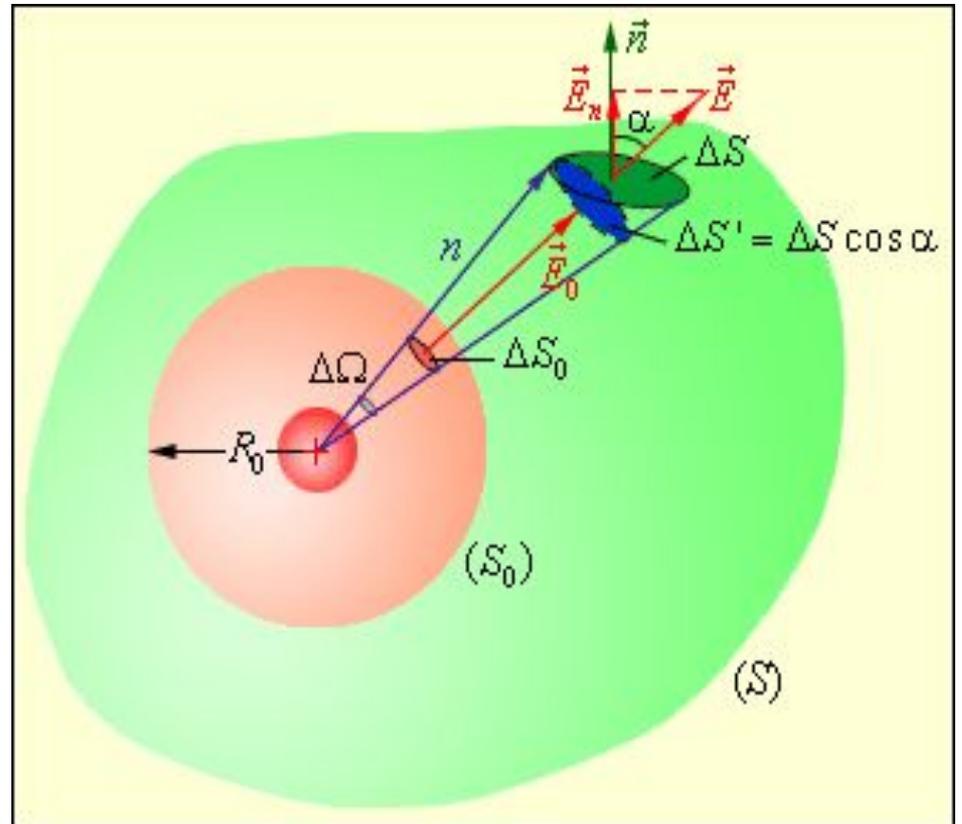
$$dS_r = dS \cdot \cos \alpha$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Теорема Гаусса.

Поток вектора напряженности стационарного электрического поля по замкнутой поверхности равен сумме зарядов, находящихся внутри этой поверхности, деленной на диэлектрическую постоянную.

$$\oiint E \cdot dS = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}$$



Общая физика. Электромагнитные явления.

Электростатика.

Теорема Гаусса:

$$\oint E dS = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Интеграл потока напряженности электрического поля по любой замкнутой поверхности равен сумме зарядов, находящихся внутри этой поверхности, деленной на электрическую постоянную.

Теорема Гаусса в дифференциальной форме:

$$\text{div} E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Оператор “набла”:

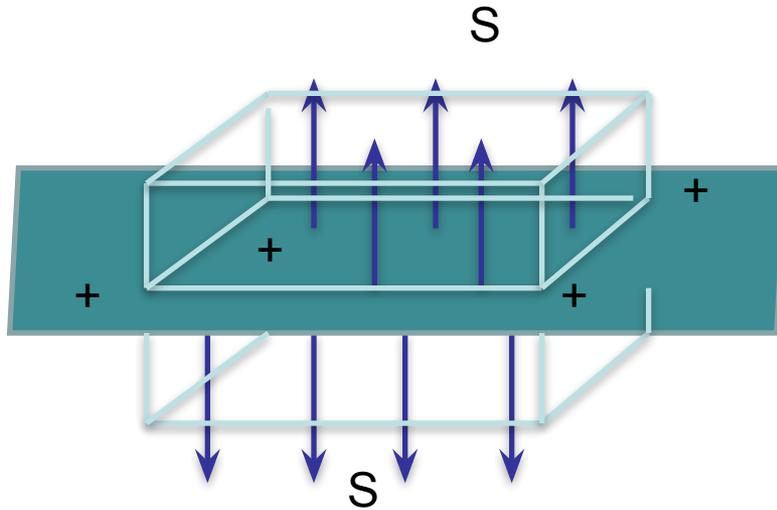
$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\text{div} E \equiv \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \equiv (\nabla E)$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Теорема Гаусса.

Напряженность электрического поля бесконечной заряженной пластины.



Поток напряженности через верхнюю и нижнюю поверхности:

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{S} = 2E \cdot S$$

Поток напряженности через боковую поверхность равен нулю, так как

$$\vec{E} \perp \vec{S}.$$

Заряд внутри параллелепипеда:

$$Q = \sigma \cdot S$$

Согласно теореме Гаусса:

$$2ES = \frac{\sigma \cdot S}{\varepsilon_0}$$

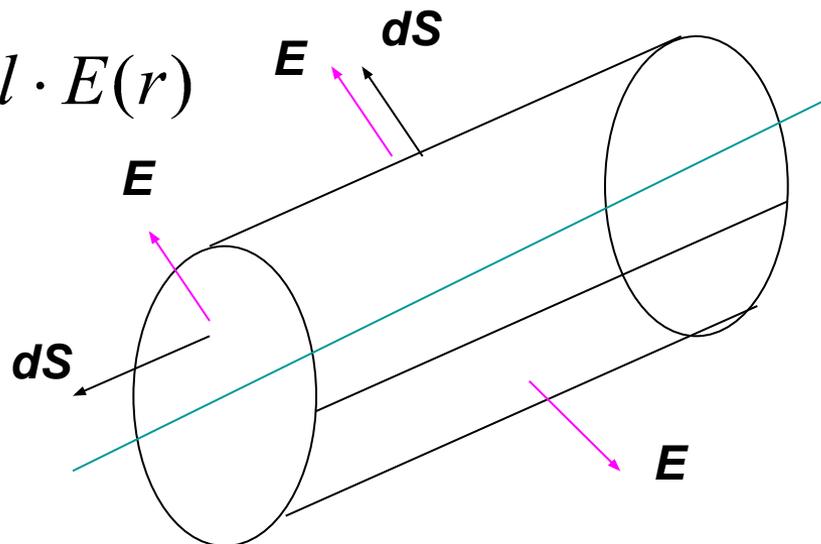
$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электростатика.

Однородно заряженная нить.

$$\iint_S \vec{E} d\vec{S} = 2\pi \cdot r \cdot l \cdot E(r)$$



Теорема Гаусса.

$$2\pi \cdot r \cdot l \cdot E(r) = \frac{\lambda \cdot l}{\varepsilon_0}$$

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 \cdot r}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электростатика.

Однородно заряженный шар.

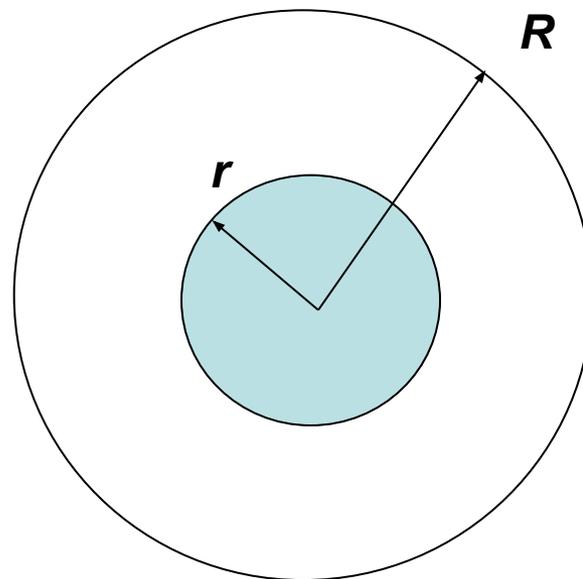
Плотность заряда $\rho = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi \cdot R^3}$

Согласно теореме Гаусса:

$$4\pi r^2 \cdot E = \frac{4}{3\varepsilon_0} \pi \rho \cdot r^3 \Rightarrow E = \frac{1}{3\varepsilon_0} \rho \cdot r$$

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^3} r$$

$$r \leq R$$



Общая физика. Электромагнитные явления.

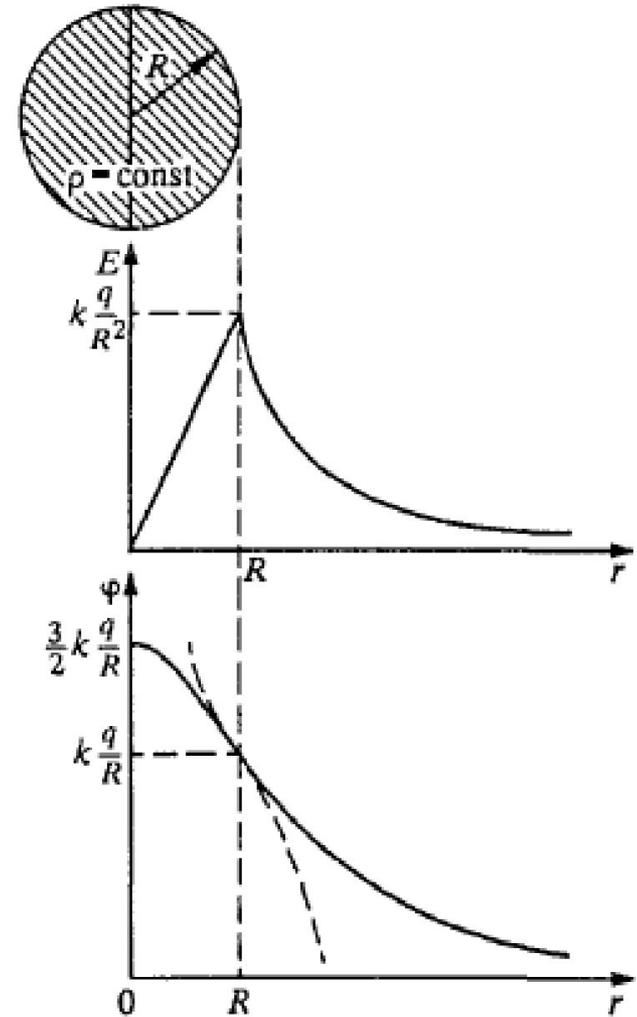
Однородно заряженный шар.

$$\varphi = \varphi_0 - \int_0^r E dr = \varphi_0 - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^3} \int_0^r r dr = \varphi_0 - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \frac{r^2}{2}$$

$$\varphi(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}$$

$$\varphi_0 - k_e \frac{Q}{2R} = k_e \frac{Q}{R} \quad \varphi_0 = k_e \frac{3Q}{2R}$$

$$\varphi(r) = k_e \left(\frac{3Q}{2R} - \frac{Q}{2R^3} r^2 \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{2R} \left(3 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$



Общая физика. Электромагнитные явления.

Точечный заряд вблизи проводящей поверхности.

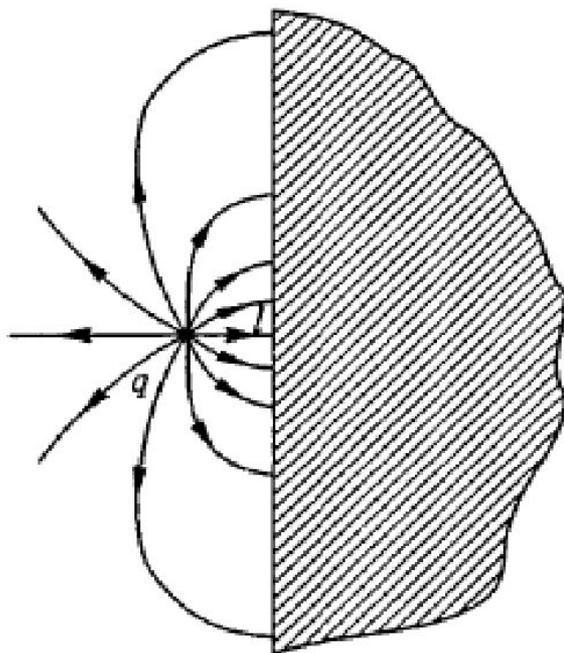


Рис. 30. Электрическое поле точечного заряда, находящегося вблизи поверхности

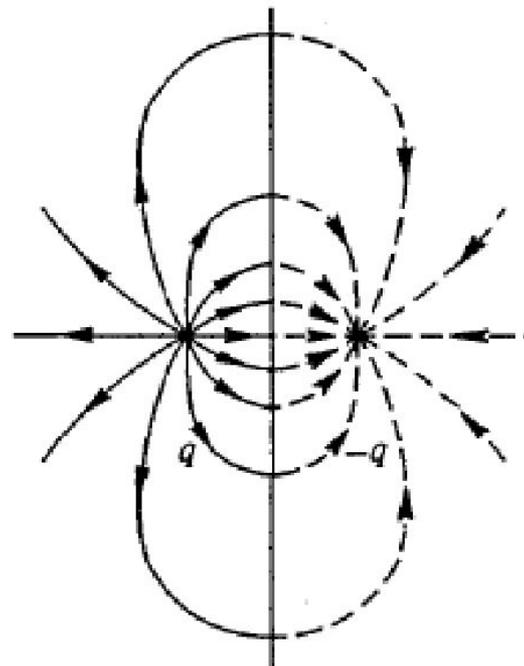
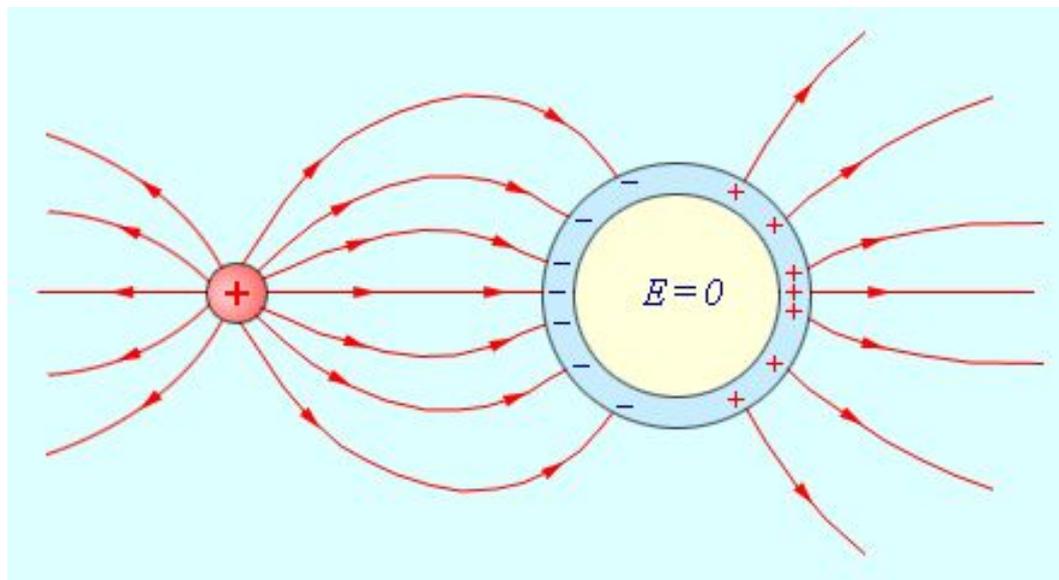


Рис. 31. Слева от плоскости действие индуцированных на плоской границе зарядов эквивалентно действию точечного заряда $-q$

Общая физика. Электромагнитные явления.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Электростатика

Потенциал $\varphi(r) = \frac{U(r)}{q}$

Ед. изм. – Вольт = Дж / Кл

Напряженность $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ $\vec{E} = -grad(\varphi) \equiv -\left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \right\}$

Оператор “набла”: $\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot \varphi$$

Электростатические силы – консервативны.

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$$



$$rot \vec{E} = 0$$

$$[\vec{\nabla}, \vec{E}] = 0$$

Теорема Гаусса.

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum_i q_i}{\epsilon_0}$$



$$div \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

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

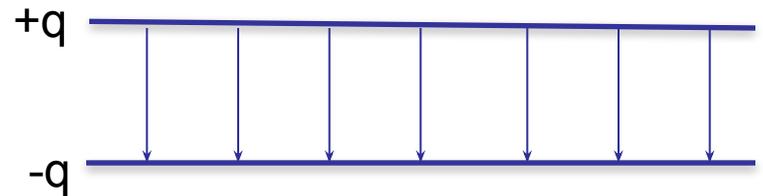
Общая физика. Электромагнитные явления.

Электростатика

Электрическая емкость

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

Емкость плоского конденсатора.



Напряженности между пластинами складываются:

Для однородного поля $E = \frac{U}{d}$

$$E = 2 \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 S}$$

$$q = \varepsilon_0 E \cdot S = \frac{\varepsilon_0 U}{d} S$$

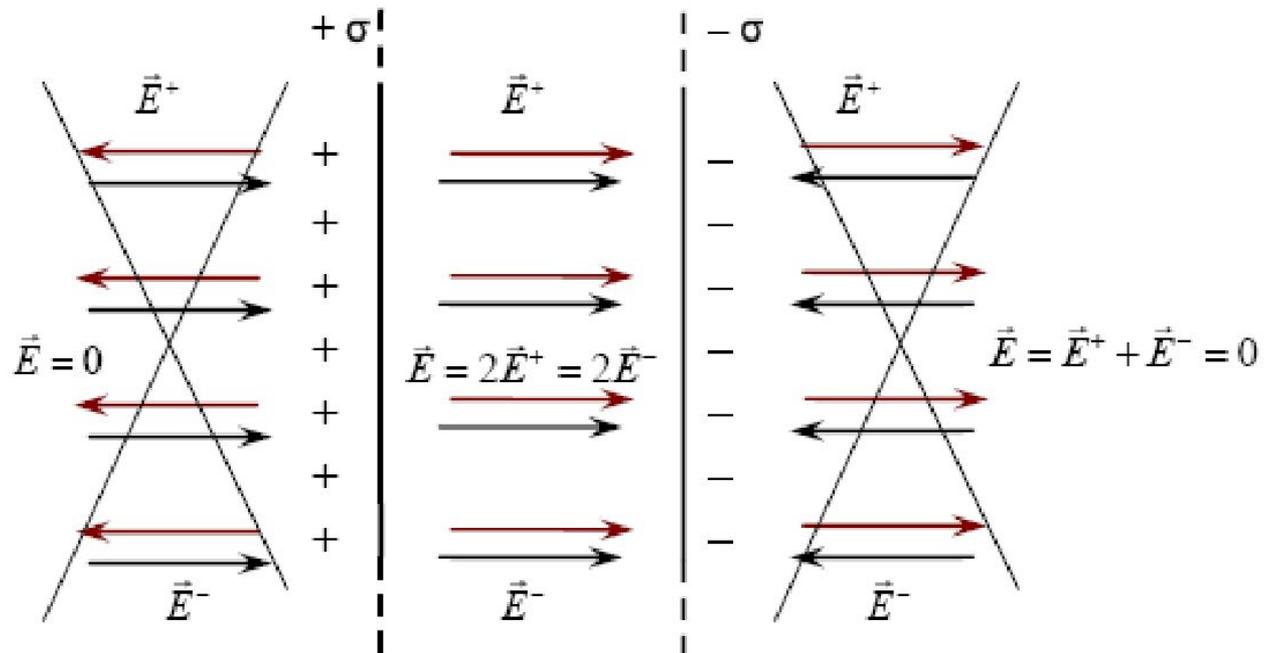
Если между пластинами диэлектрик:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

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

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электростатика



Электрическое поле двух бесконечных противоположно заряженных пластин.

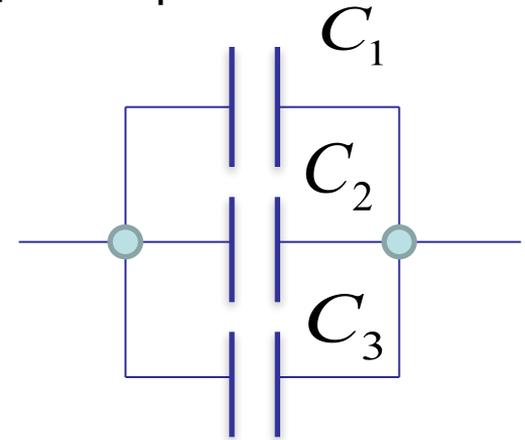
Общая физика. Электромагнитные явления.

Параллельное и последовательное соединение конденсаторов..

Параллельное соединение.

$$q = q_1 + q_2 + q_3 = C_1U + C_2U + C_3U = U \cdot (C_1 + C_2 + C_3)$$

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



Последовательное соединение.

$$q_1 = q_2 = q_3 = q$$

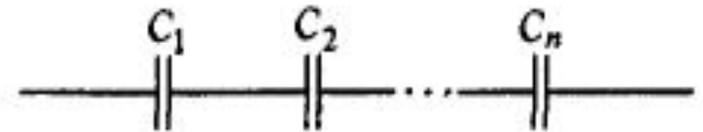


Рис. 45. Последовательное соединение конденсаторов

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

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

Общая физика. Электромагнитные явления.

Диэлектрики.

- I. неполярные;
- II. полярные;
- III. ионные;

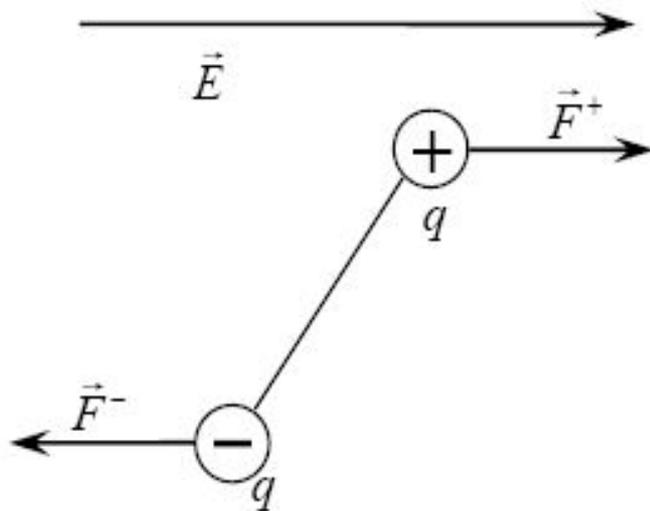
Неполярные диэлектрики состоят из симметричных молекул, не обладающих собственным дипольным моментом (N_2 , H_2 , O_2 , CO_2 и др.).

В состав полярных диэлектриков входят асимметричные молекулы, у которых есть собственные дипольные моменты, однако, если электрическое поле отсутствует, их дипольные моменты направлены хаотично и средний дипольный момент равен нулю (H_2O , CO , SO_2 и др.)

Ионные диэлектрики, представляют собой две ионные решетки, вдвинутые одна в другую, например $NaCl$, KCl , KBr и др.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Диэлектрики.

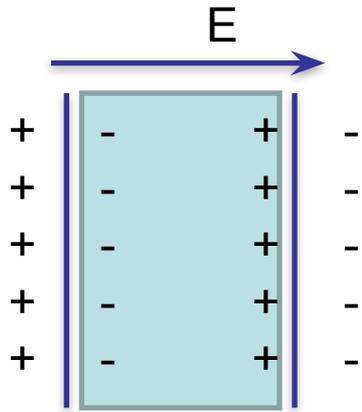


Образование вращательного момента, действующего на диполь в электрическом поле.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Диэлектрики.

Поляризованность $\vec{P} = \frac{1}{V} \sum \vec{p}_i$ (дипольный момент единицы объема)



$$\vec{P} = \chi \cdot \epsilon_0 \vec{E}_{BH}$$

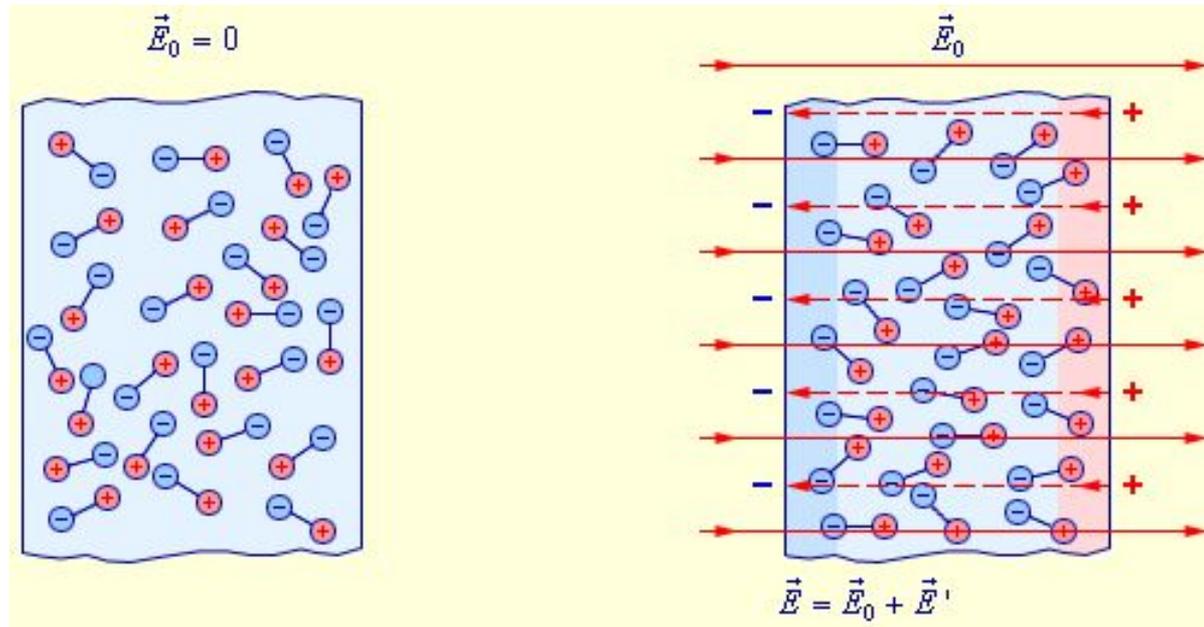
χ - восприимчивость.

$$\epsilon = 1 + \chi$$

Индукция (электрическое смещение) $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_{BH} + \vec{P} = \epsilon \cdot \epsilon_0 \vec{E}_{BH}$

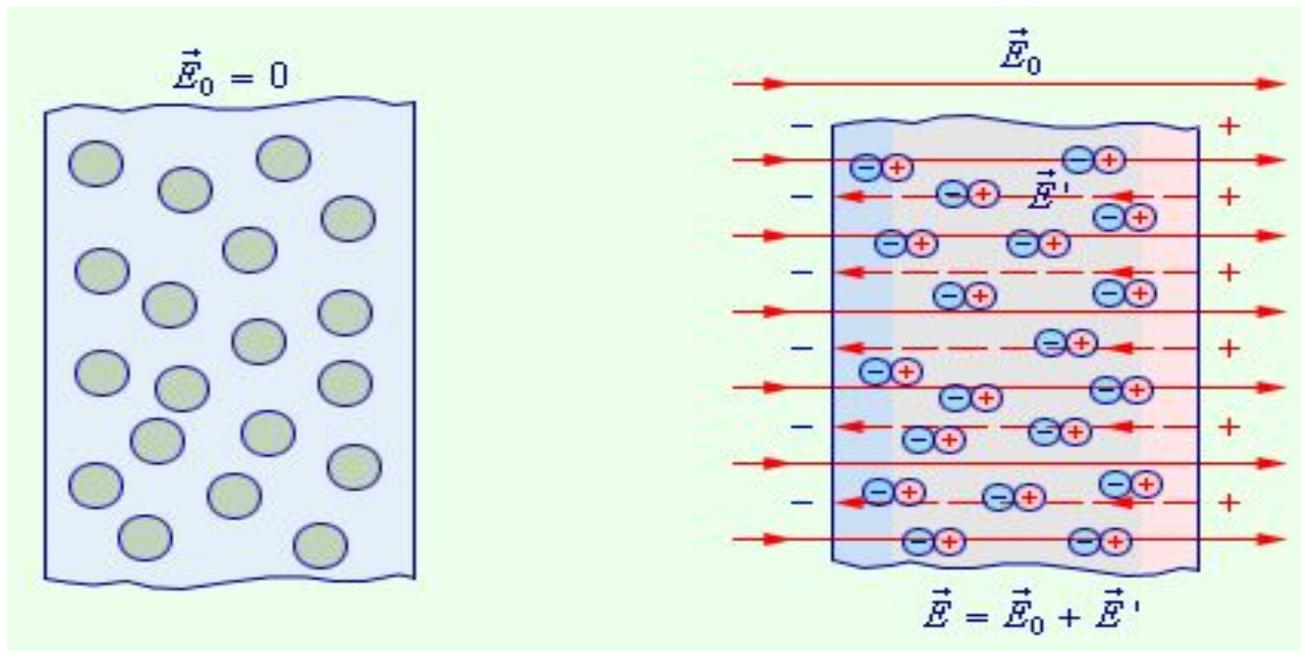
Теорема Гаусса для диэлектриков: $\oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_i Q_i$

Общая физика. Электромагнитные явления.



Ориентационный механизм поляризации полярного диэлектрика

Общая физика. Электромагнитные явления.



Поляризация неполярного диэлектрика

Общая физика. Электромагнитные явления.

Напряженность электрического поля в диэлектрике.

$$E = \frac{\sigma_{\text{своб}} - \sigma_{\text{пол}}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{\text{своб}} - P}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{\text{своб}} - \chi\varepsilon_0 E}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma_{\text{своб}}}{(1 + \chi) \cdot \varepsilon_0} = \frac{\sigma_{\text{своб}}}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Энергия электрического поля.

Изменение энергии при изменении заряда $dW = U \cdot dq$

Полная энергия: $W = \int U dq = \int \frac{q}{C} dq = \frac{1}{C} \frac{q^2}{2}$ $W = \frac{C \cdot U^2}{2}$

$$\frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S d}{d} U^2 = \frac{V \varepsilon \varepsilon_0}{2} E^2 \quad \text{Для однородного поля} \quad E = \frac{U}{d}$$

V – объем.

Плотность энергии электрического поля: $w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E}$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Основные единицы системы СИ.

Метр – единица измерения расстояния.

Килограмм – единица измерения массы.

Секунда – единица измерения интервала времени.

Кельвин – единица измерения температуры.

Моль – единица измерения количества вещества.

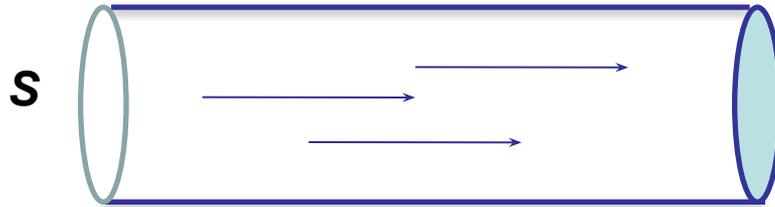
Ампер – единица измерения силы тока.

Аргумент любой функции должен быть безразмерным !

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электрический ток.

Электрический ток – это направленное движение зарядов.



$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Закон Ома:
$$I = \frac{U}{R}$$

Сопротивление:
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Для металлов:
$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Вещество	ρ Ом·м	α 1/К
Серебро Ag	$1.59 \cdot 10^{-8}$	0.0061
Медь Cu	$1.68 \cdot 10^{-8}$	0.0068
Алюминий Al	$2.65 \cdot 10^{-8}$	0.00429
Железо Fe	$9.71 \cdot 10^{-8}$	0.00651
Графит	$(3-60) \cdot 10^{-5}$	-0.0005
Германий Ge	$(1-500) \cdot 10^{-3}$	-0.05
Кремний Si	(0.1-60)	-0.07
Стекло	$10^9 - 10^{12}$	

Удельное сопротивление и ТКС для различных материалов.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Закон Ома в дифференциальной форме.

$$j = \sigma \cdot E$$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Плотность тока.

$$j = \frac{I}{S}$$

Удельная проводимость.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Напряженность.

$$E = \frac{U}{l}$$

Вывод:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{E \cdot l}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{1}{\rho} E \cdot S$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

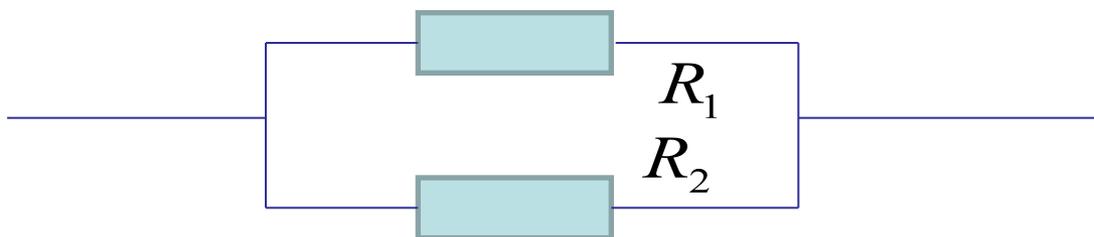
Параллельное и последовательное соединение сопротивлений.

Последовательное соединение сопротивлений.



$$U = IR_1 + IR_2 = IR \qquad R = R_1 + R_2$$

Параллельное соединение сопротивлений.

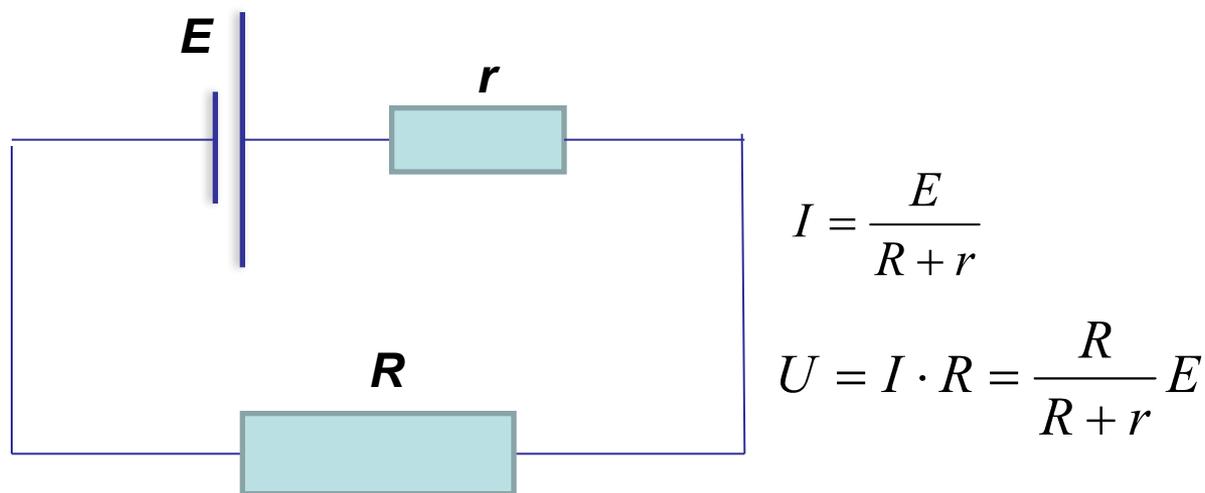
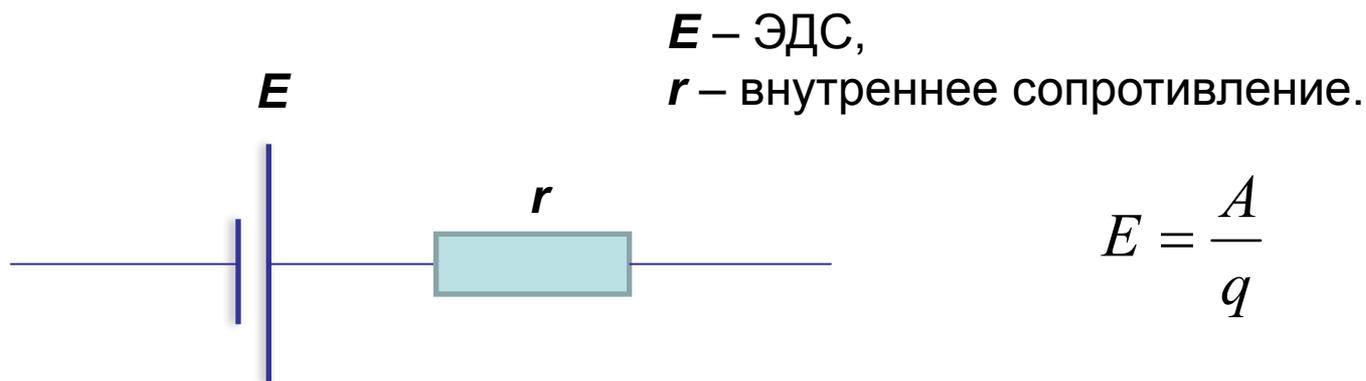


$$U = I_1 R_1 = I_2 R_2 \qquad I_1 = \frac{U}{R_1} \qquad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

$$I = I_1 + I_2 \longrightarrow \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \longrightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

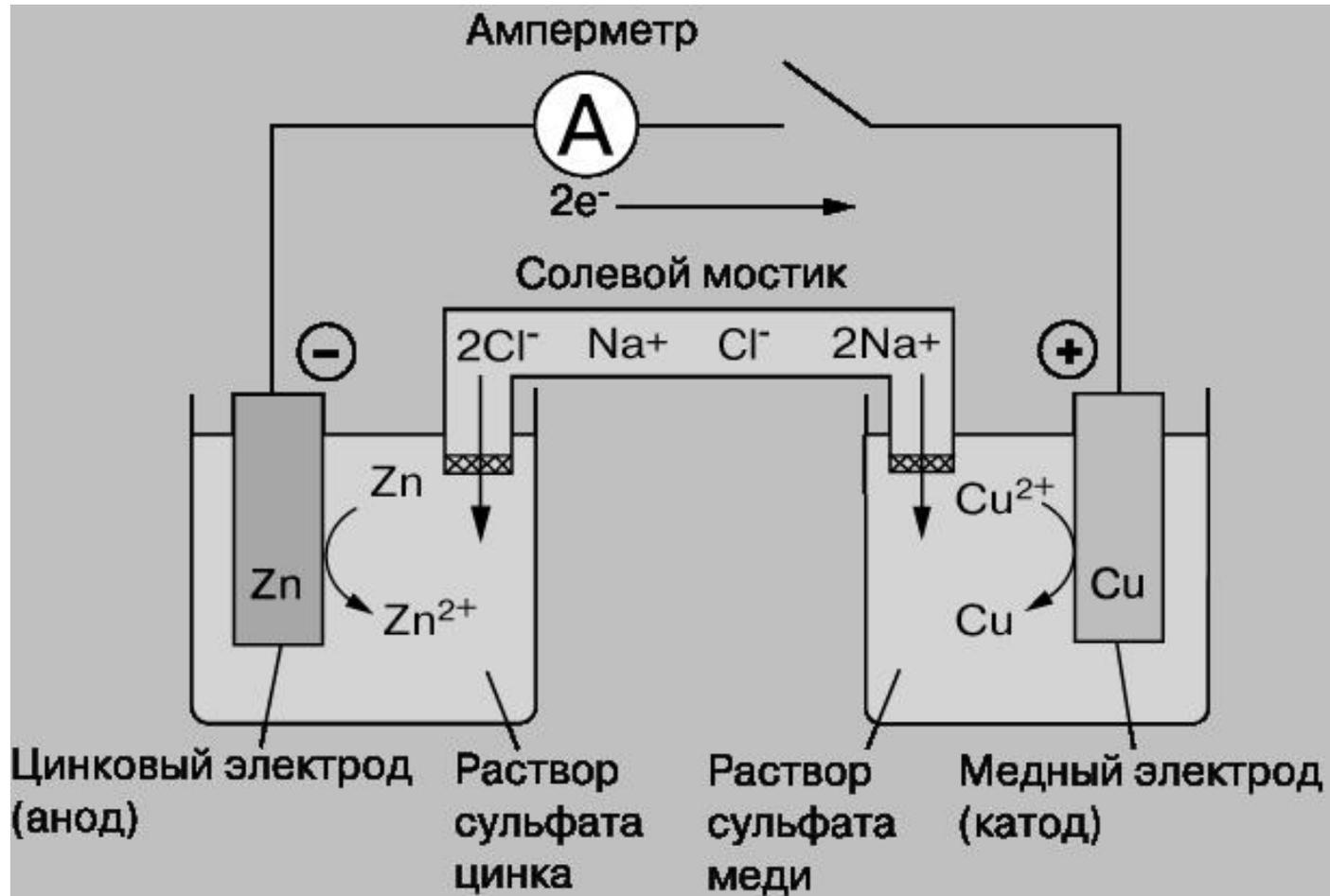
Источники тока.



Напряжение на сопротивлении нагрузки меньше ЭДС.

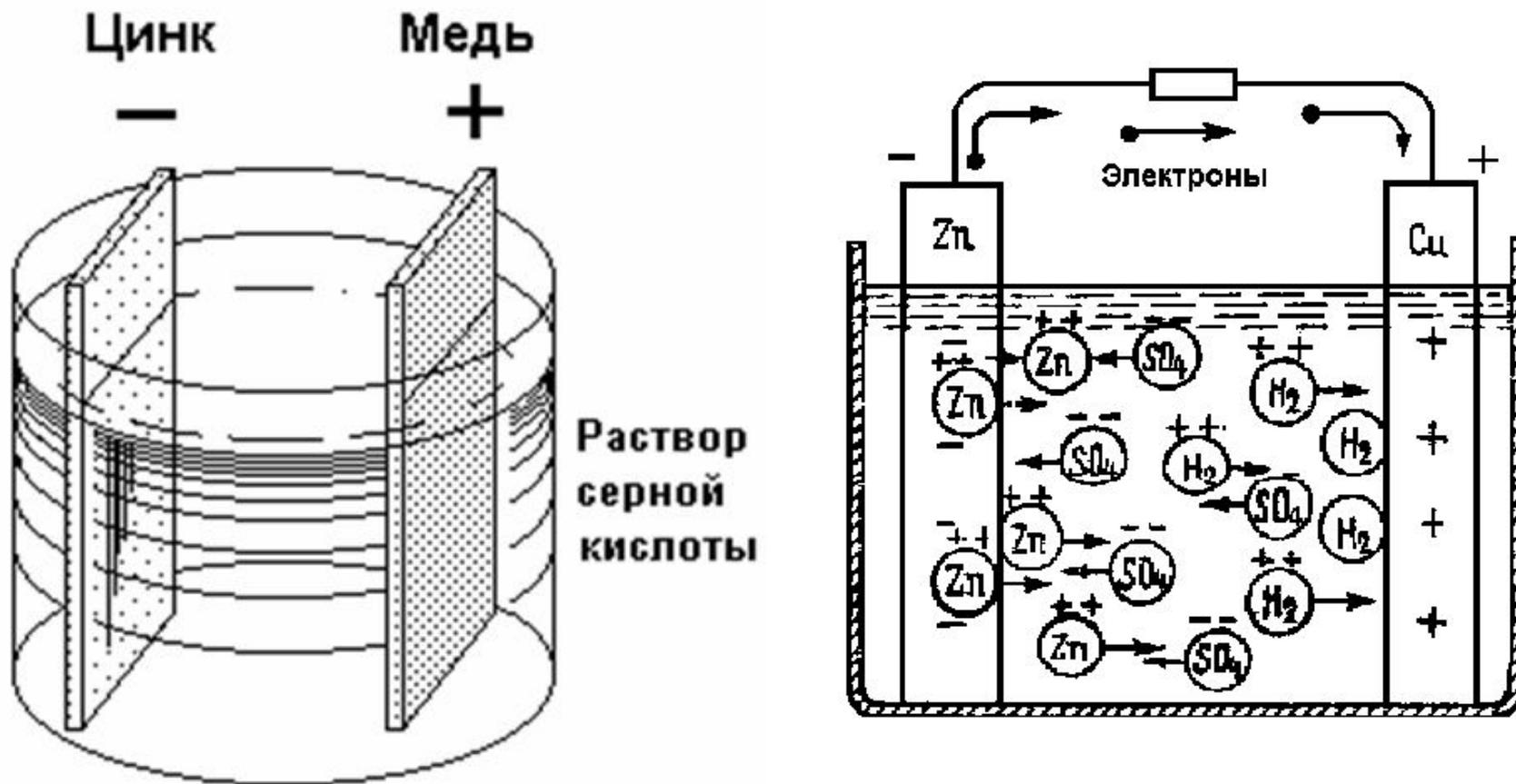
Общая физика. Электромагнитные явления.

Источники тока.



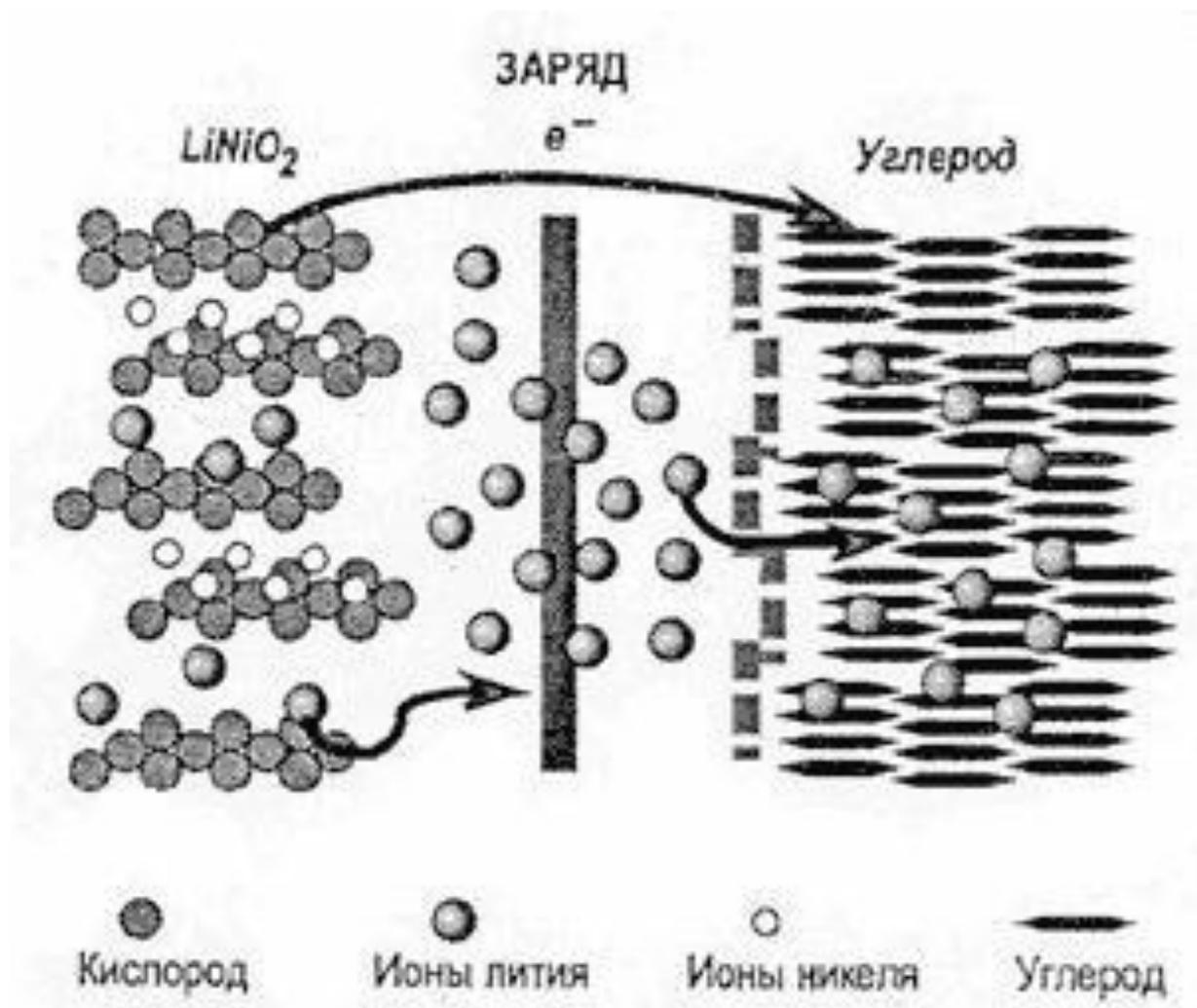
Общая физика. Электромагнитные явления.

Источники тока.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Источники тока.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Законы Кирхгофа.

1. Алгебраическая сумма токов в любом узле равна нулю.

$$\sum I_i = 0$$

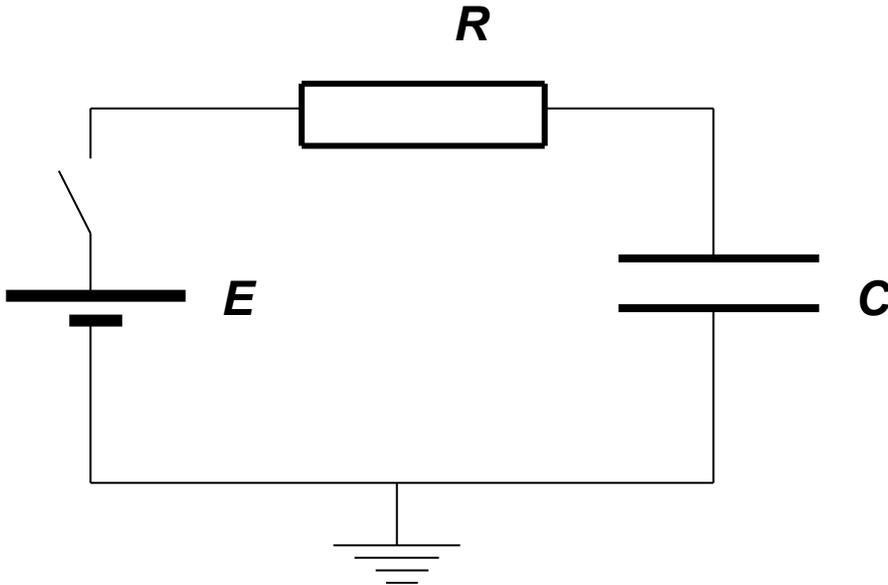
(закон сохранения заряда)

2. Сумма падений напряжений по замкнутому контуру равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре.

$$\sum I_i R_i = \sum E_i$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Цепь, содержащая конденсатор и сопротивление.



$$I \cdot R + U_C = E$$

$$\frac{dq}{dt} R + \frac{q}{C} = E$$

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{RC} q = \frac{E}{R}$$

$$\tau = R \cdot C$$

$$q_0 = E \cdot C$$

$$q = q_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}$$

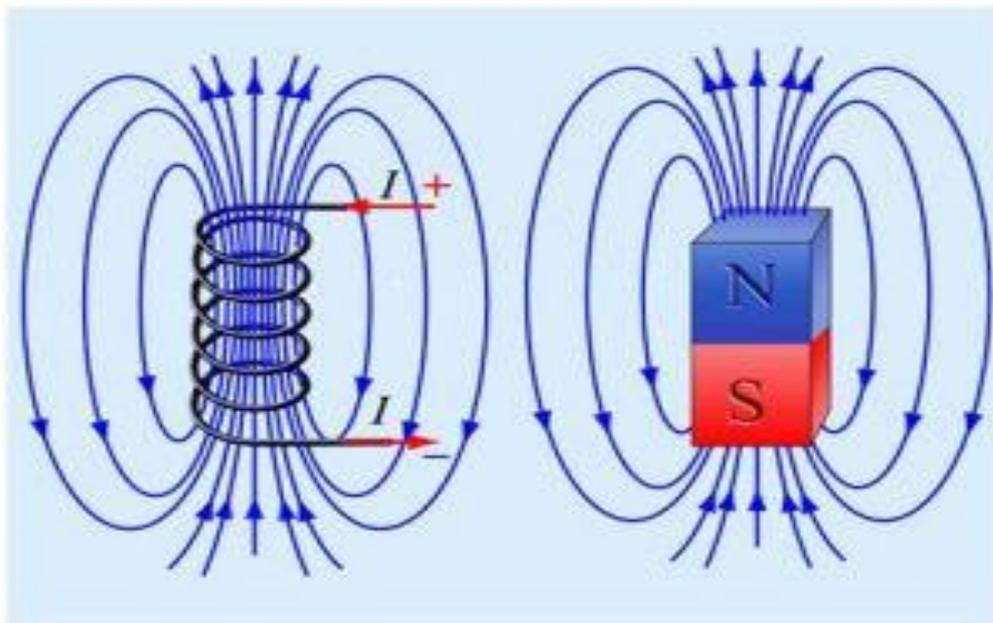
$$U(t) = \frac{q(t)}{C} = E \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле.

В 1920 г. Х. Эрстед обнаружил, что проводник с током создает магнитное поле.

Магнитное поле характеризуется векторной величиной, называемой индукцией. Единица измерения в системе СИ - Тесла.



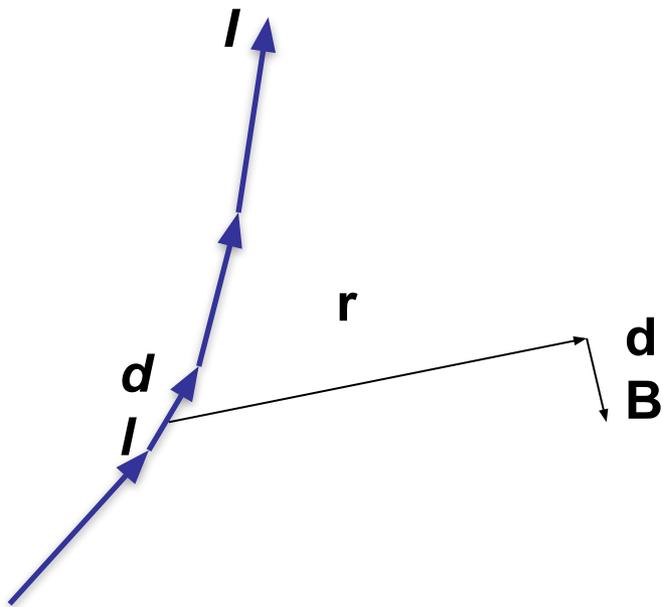
Общая физика. Электромагнитные явления.

- 1820 г.: Ханс Кристиан Эрстед (Ersted, 1777-1851) в ходе опытов по отклонению магнитной стрелки под действием проводника с током, установил связь между электрическими и магнитными явлениями.
- Сообщение об этом явлении, опубликованное в 1820 г., стимулировало исследования в области электромагнетизма, что, в конечном счете, привело к формированию основ современной электротехники.
- Андре Мари Ампер (1775-1836), сформулировал в том же году правило определения направления действия электрического тока на магнитную стрелку, названное им "правилом пловца" (правило Ампера или правой руки), после чего были определены законы взаимодействия электрических и магнитных полей, в рамках которых впервые была сформулирована идея об использовании электромагнитных явлений для дистанционной передачи электрического сигнала.
- В 1822 г. А. Ампер создает первый усилитель электромагнитного поля - многовитковые катушки из медного провода, внутри которых помещались сердечники из мягкого железа (соленоиды), ставшие технологической основой для изобретенного им в 1829 г. электромагнитного телеграфа, открывшего эру современной электросвязи.
- 1821 г.: английский физик Майкл Фарадей (M. Faraday, 1791-1867) после исследования взаимосвязи электрических и магнитных явлений установил факт вращения магнита вокруг проводника с током и вращения проводника с током вокруг магнита.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле.

Закон Био-Савара-Лапласа. Вклад в магнитную индукцию от элемента тока dI равен:



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot [dl \times r]}{r^3}$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{\Gamma\text{H}}{\text{M}}$$

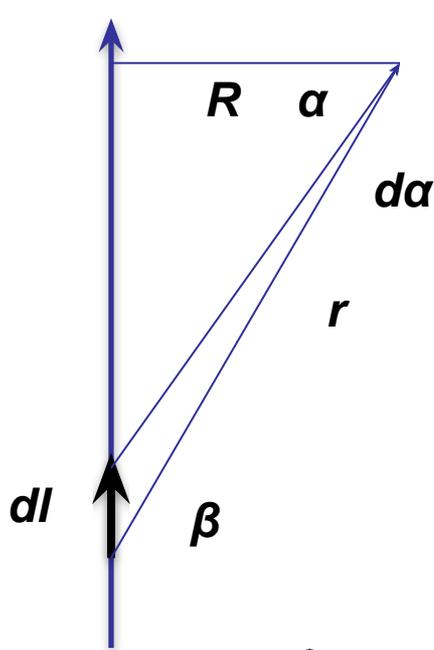
$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \sum_i I_i$$

$$\oiint_S B \cdot dS = 0$$

Магнитные заряды не существуют

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле прямого бесконечного проводника с током.



$$|dB| = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl \cdot \sin \beta}{r^2}$$

$$dl = \frac{r d\alpha}{\sin \beta}$$

$$|dB| = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \sin \beta \cdot d\alpha$$

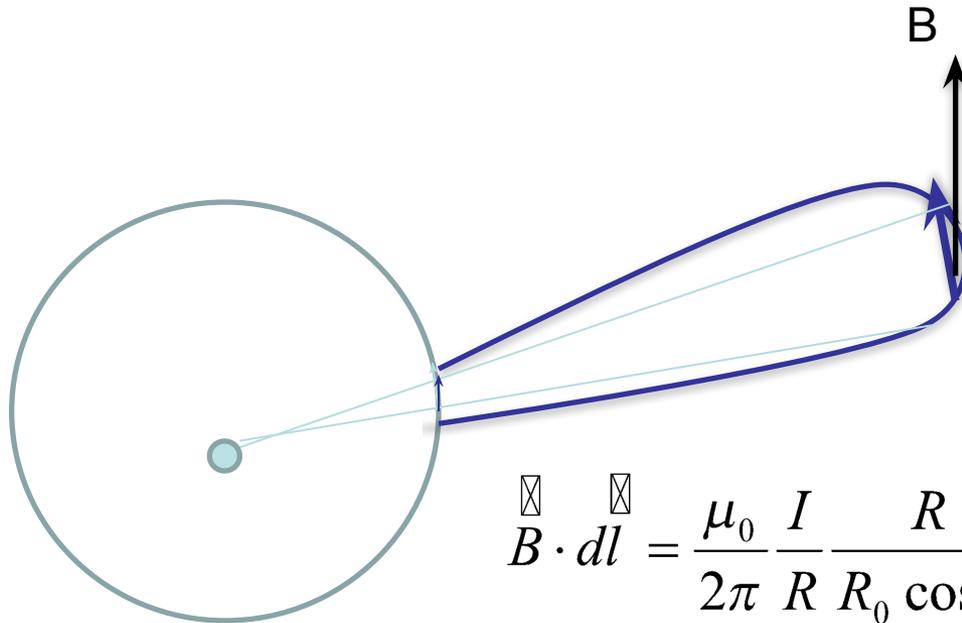
$$r = \frac{R}{\sin \beta}$$

$$B = \int dB = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \sin \beta \cdot d\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha \cdot d\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} (1 + 1)$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{R} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{R}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле.



$$\frac{dl_0}{R_0} = \frac{dl \cdot \cos \varphi}{R}$$

$$dl = \frac{R}{R_0 \cos \varphi} dl_0$$

$$\vec{B} \cdot d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \frac{R}{R_0 \cos \varphi} dl_0 \cos \varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi R_0} dl_0 = B_0 dl_0$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

Теорема о циркуляции магнитного поля.

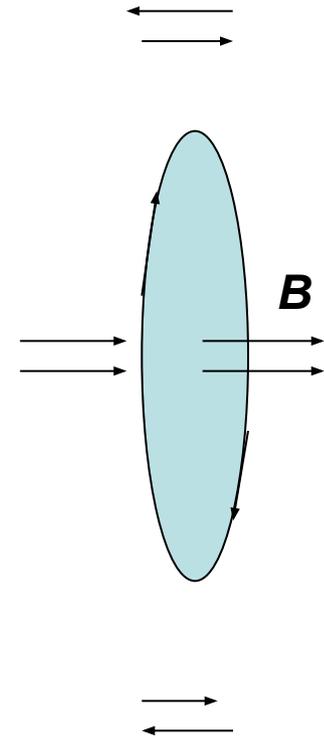
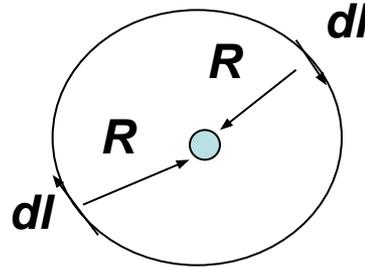
Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле кольца с током.

Применяем закон Био – Савара - Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{R^2}$$

$$\oint d\vec{l} = 2\pi R$$

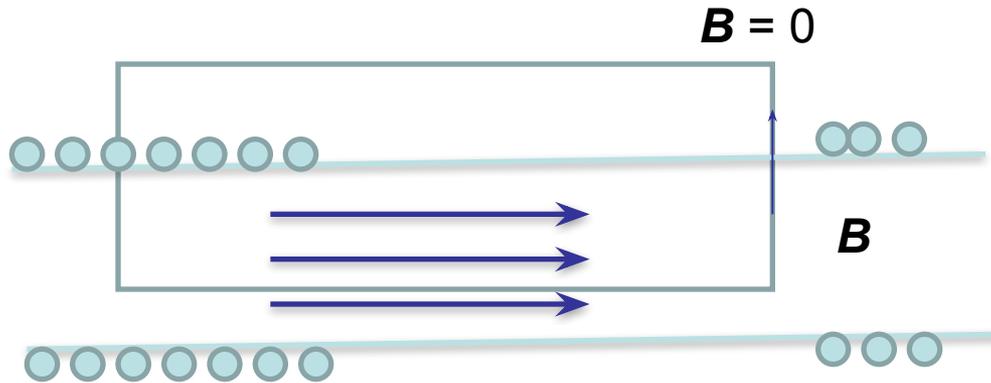


Индукция магнитного поля
в центре кольца с током:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi I}{R}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

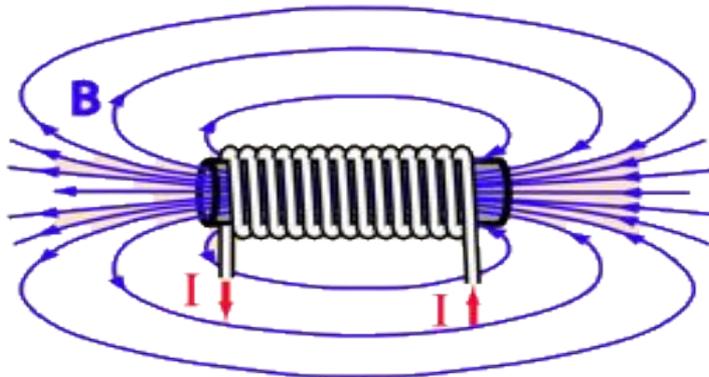
Магнитное поле бесконечного соленоида.



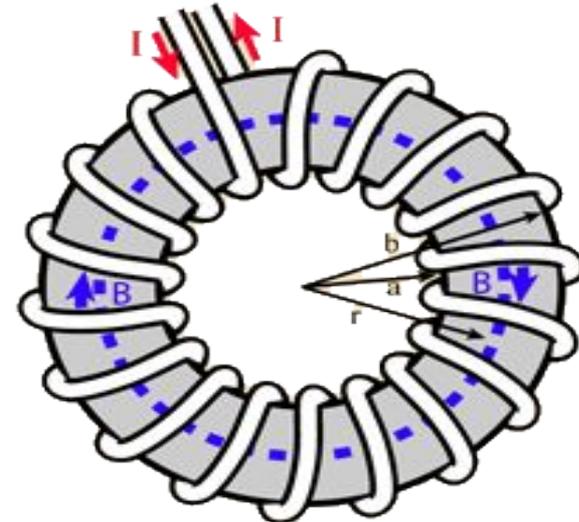
$$B \cdot l = \mu_0 N \cdot I$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n \cdot I$$

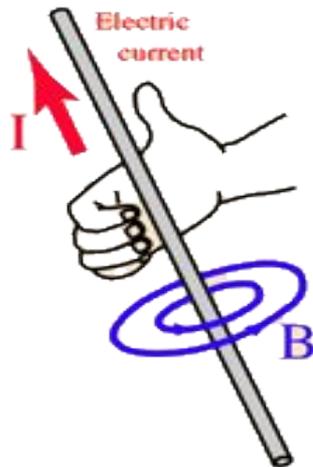
Общая физика. Электромагнитные явления.



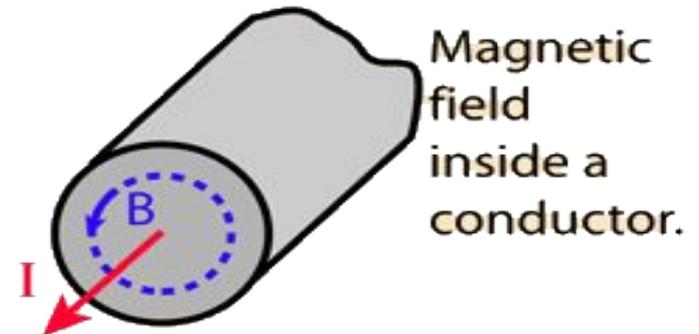
Magnetic field inside a long solenoid.



Magnetic field inside a toroidal coil.



Magnetic field from a long straight wire.



Magnetic field inside a conductor.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Силы, действующие на заряженную частицу в электрическом и магнитном полях.

Сила Лоренца:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q [\vec{v}, \vec{B}]$$

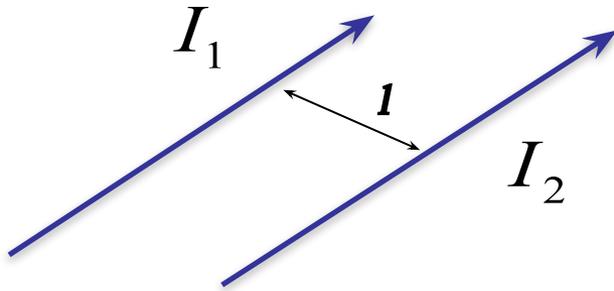
Сила, действующая на заряженную частицу в магнитном поле: $\vec{F}_M = q [\vec{v}, \vec{B}]$

Работа силы \vec{F}_M равна нулю!

Общая физика. Электромагнитные явления.

Силы, действующие на проводники с током.

Закон Ампера:
$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]$$



$$dF = I_2 \cdot dl \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r} dl$$

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r}$$

Сила на единицу
Длины.

$$\vec{P}_M = I \cdot \vec{S}$$

Момент сил, действующих на контур с током.
$$\vec{M} = [\vec{P}_M, \vec{B}]$$

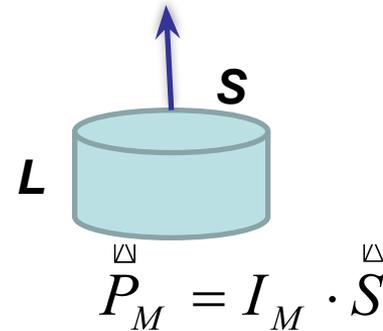
1 Ампер – это такая сила тока, при котором два параллельных проводника с током, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга притягиваются с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле в веществе.

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum (I + I_m) = \mu_0 I + \mu_0 I_M$$

Вектор намагниченности $\vec{J} = \frac{\sum_i \vec{P}_m}{\Delta V}$



Магнитный момент цилиндра.

$$\vec{P}_M = \vec{J} \cdot V = \vec{J} \cdot S \cdot L$$

$$JSL = I_M S \longrightarrow I_M = J \cdot L$$

$$I_M = \oint \vec{J} \cdot d\vec{l}$$

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I + \oint \vec{J} d\vec{l} \longrightarrow \oint \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \right) d\vec{l} = I$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле в веществе.

Напряженность: $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$ Единица измерения - А/м

Теорема о циркуляции $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$

$$B \rightarrow 0 \quad \vec{J} = \chi_M \vec{H} \quad \longrightarrow \quad (1 + \chi_M) \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu \cdot \mu_0}$$

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu \cdot \mu_0 I$$

Магнитная индукция в веществе
в μ раз больше!

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле в веществе.

Диамагнетики: $\chi_M \approx -10^{-3}$ $\mu \approx 0.999 < 1$

Парамагнетики: $\chi_M \approx +10^{-2}$ $\mu \approx 1.01 > 1$

Ферромагнетики: $\chi_M \approx 10^2 - 10^4$ $\mu \gg 1$

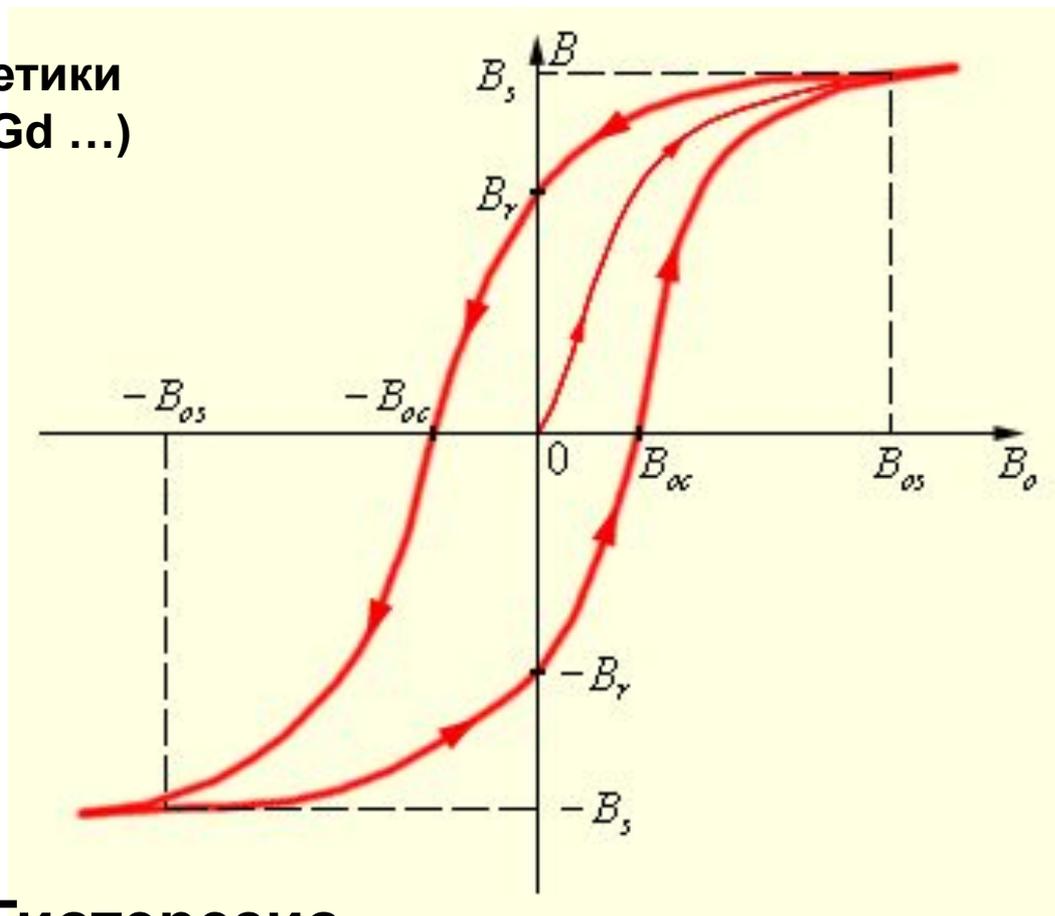
Магнитная проницаемость нелинейно зависит от напряженности магнитного поля.

Гистерезис – значение магнитной индукции в ферромагнетике определяется не только действующим в данный момент магнитным полем, но зависит от предыдущих состояний намагничивания.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле в веществе.

Ферромагнетики
(Fe, Co, Ni, Gd ...)



Гистерезис.

Общая физика. Электромагнитные явления.

- В течение последующих 10 лет М. Фарадей пытался «превратить магнетизм в электричество», результатом чего стало открытие в 1831 электромагнитной индукции, что привело к формированию основ теории электромагнитного поля и появлению новой отрасли промышленности - электротехники.

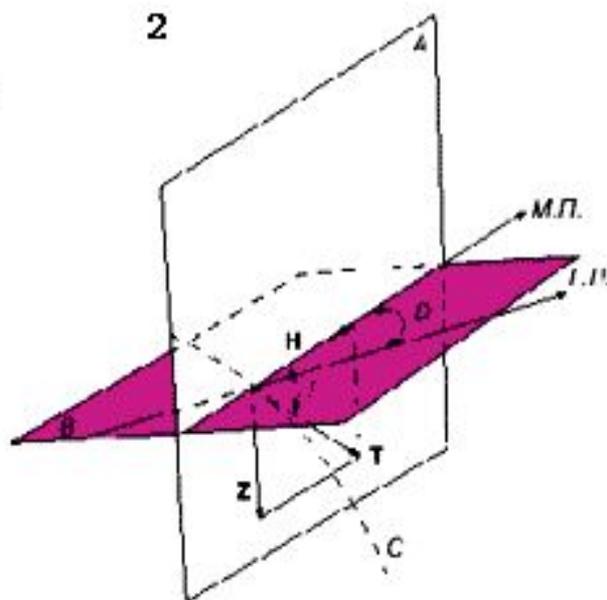
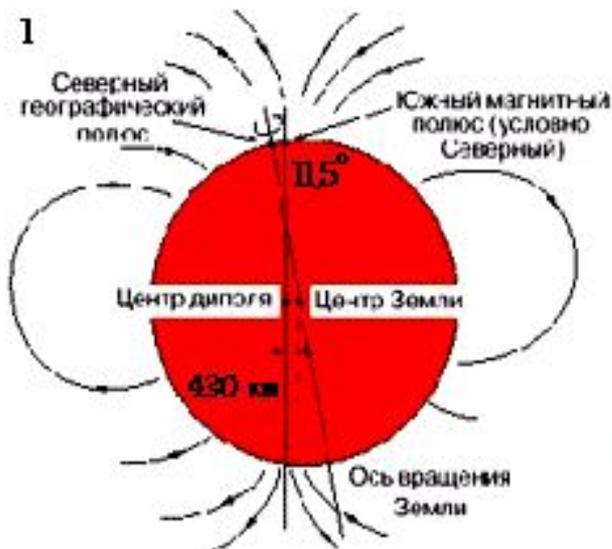
В 1832 г. М. Фарадей публикует работу, в которой выдвигается идея о том, что распространение электромагнитных взаимодействий есть волновой процесс, происходящий в атмосфере с конечной скоростью, что стало основой для появления новой отрасли знаний - радиотехники.

Стремясь установить количественные соотношения между различными видами электричества, М. Фарадей начал исследования по электролизу и в 1833–1834 гг. сформулировал его законы.

- В 1845 г., исследуя магнитные свойства различных материалов, М. Фарадей открывает явления парамагнетизма и диамагнетизма и устанавливает факт вращения плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея). Это было первое наблюдение связи между магнитными и оптическими явлениями, которое позднее было объяснено в рамках электромагнитной теории света Дж. Максвелла.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Магнитное поле Земли.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Явление электромагнитной индукции.

М. Фарадей, 1831 год.

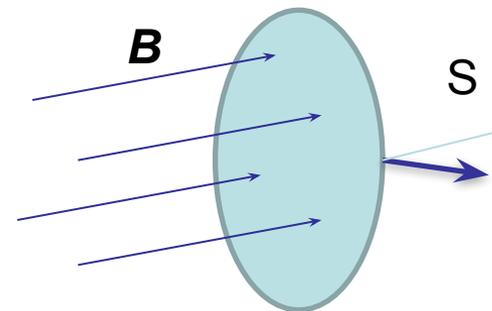


Общая физика. Электромагнитные явления.

Электромагнитная индукция.

Магнитный поток: $\Phi = \int \vec{B} d\vec{S}$

Единица измерения – Вебер = Тл·м².

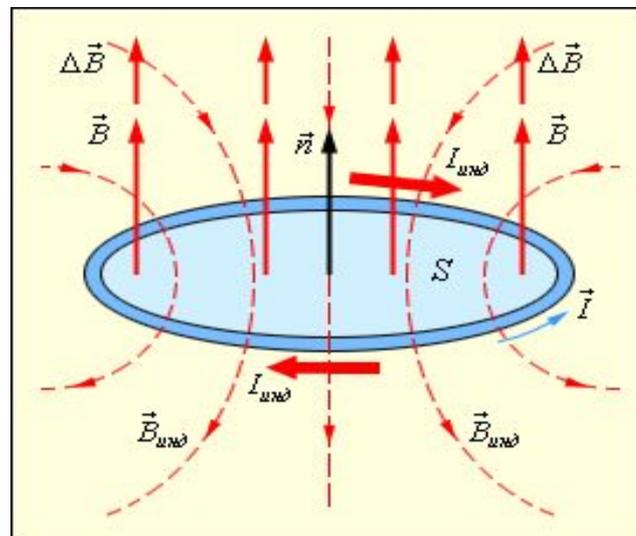


Для однородного магнитного поля:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Явление электромагнитной индукции - при изменении магнитного потока возникает электродвижущая сила (ЭДС).

$$E = - \frac{d\Phi}{dt}$$



Общая физика. Электромагнитные явления.

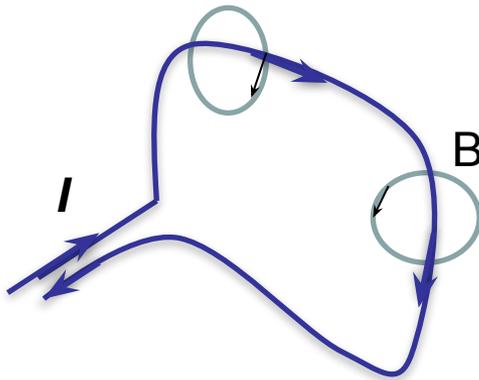
Самоиндукция.

$$\Phi = L \cdot I$$

L – индуктивность. Единица измерения - Генри.

Явление самоиндукции.

$$E = -L \frac{dI}{dt}$$



При изменении тока появляется ЭДС самоиндукции.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Индуктивность соленоида.

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I \quad \text{Поток через 1 виток:} \quad \Phi_1 = \mu_0 \frac{N}{l} I \cdot S$$

$$\text{Полный поток: } \Phi = N \cdot \Phi_1 = \mu_0 \frac{N^2}{l} I \cdot S \quad \longrightarrow \quad L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} V$$

$$L = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2}{l} S$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Переменный ток. Конденсатор в цепи переменного тока.

ЭДС $U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$

$q(t) = C \cdot U_0 \cos(\omega \cdot t)$ Заряд конденсатора.

$$I(t) = \frac{d}{dt}(C \cdot U_0 \cos(\omega \cdot t)) = -C \cdot \omega \cdot U_0 \sin(\omega \cdot t) = C \cdot \omega \cdot U_0 \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Ток через конденсатор на $\frac{\pi}{2}$ опережает по фазе напряжение.

$$Z_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad - \text{Эффективное сопротивление.}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Индуктивность в цепи переменного тока.

$$U_0 \cos(\omega \cdot t) + E_{\text{инд}} = 0$$

ЭДС самоиндукции: $E_{\text{инд}} = -L \frac{dI}{dt} \longrightarrow \frac{dI}{dt} = \frac{U_0}{L} \cos(\omega \cdot t)$

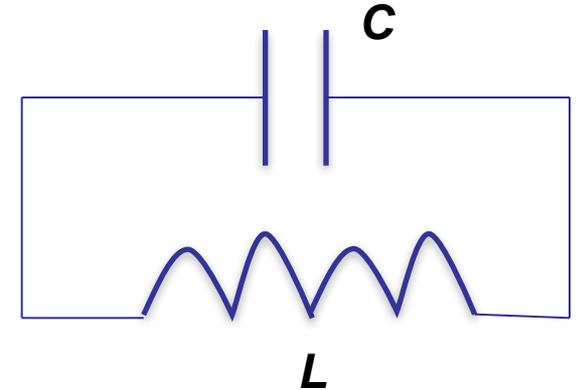
$$I(t) = \frac{U_0}{\omega \cdot L} \sin(\omega \cdot t) = \frac{U_0}{\omega \cdot L} \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Ток через индуктивность на $\frac{\pi}{2}$ отстает по фазе от напряжения.

$$Z_L = \omega \cdot L \quad - \text{Эффективное сопротивление.}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Колебательный контур.



ЭДС самоиндукции: $U = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d^2 q}{dt^2}$

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{C} q = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0$$

Решение $q(t) = q_0 \sin(\omega t + \alpha)$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{LC}$$

Формула Томпсона.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Колебательный контур.

$$I = \frac{dq}{dt} = q_0 \omega \cos(\omega t + \alpha) = I_0 \cos(\omega t + \alpha)$$

$$U(t) = \frac{q_0}{C} \sin(\omega_0 t + \alpha)$$

Ток и напряжение не совпадают по фазе!

Общая физика. Электромагнитные явления.

Энергия магнитного поля.

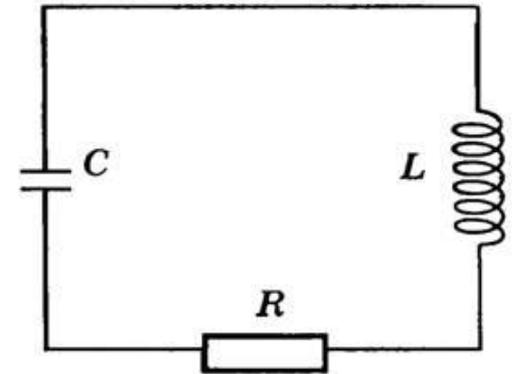
Рассмотрим идеальный колебательный контур.

Максимальная энергия конденсатора:

$$W = \frac{q_0^2}{2 \cdot C} = \frac{I_0^2}{2C\omega_0^2}$$

Энергия индуктивности:

$$W_L(t) = \frac{q_0^2}{2 \cdot C} - \frac{q^2(t)}{2 \cdot C}$$



$$W_L(t) = \frac{I_0^2}{2C\omega_0^2} - \frac{I_0^2}{2C\omega_0^2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{I_0^2}{2C\omega_0^2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad W_L(t) = \frac{1}{2} LI_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1}{2} L \cdot I^2(t)$$

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Энергия магнитного поля.

Энергия соленоида:

$$W = \frac{1}{2} \left(\mu \cdot \mu_0 \frac{N^2}{l} S \right) \cdot I^2 = \frac{1}{2} \left(\mu \mu_0 \frac{N}{l} I \right) \left(\frac{N}{l} I \right) (S \cdot l) = \frac{1}{2} B \cdot H \cdot V$$

Плотность энергии магнитного поля:

$$w_M = \frac{W_M}{V} = \frac{\vec{B} \cdot \vec{H}}{2}$$

В вакууме: $w_M = \frac{B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0}$

Плотность энергии электромагнитного поля:

$$w_{EM} = \frac{\vec{E} \cdot \vec{D}}{2} + \frac{\vec{B} \cdot \vec{H}}{2}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Реальный колебательный контур.

$$U_C + I \cdot R = E_L$$

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0$$

Затухающие колебания:

$$q(t) = q_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha)$$

$$\beta = \frac{R}{2L}$$

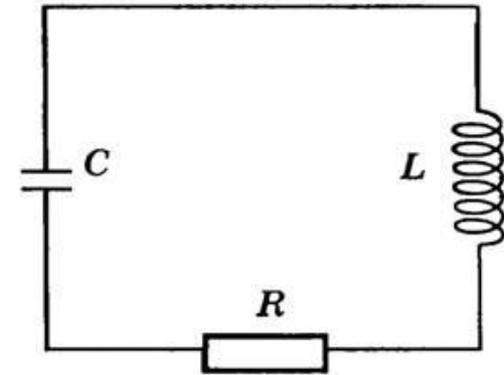
$$\beta \ll \omega_0$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = q_0 \omega \cdot e^{-\beta \cdot t} \cos(\omega t + \alpha) = I_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} \cos(\omega t + \alpha)$$

$$\theta = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) = \beta \cdot T \quad \text{Логарифмический декремент затухания.}$$

$$\theta = \frac{1}{N_e}$$



Общая физика. Электромагнитные явления.

Решение уравнения затухающих колебаний.

Решение $q = \xi \cdot e^{-\beta \cdot t}$ 1-я про-изводная: $\frac{dq}{dt} = \frac{d\xi}{dt} e^{-\beta \cdot t} - \beta \xi e^{-\beta \cdot t}$

2-я про-изводная: $\frac{d^2 q}{dt^2} = \frac{d^2 \xi}{dt^2} e^{-\beta \cdot t} - \beta \frac{d\xi}{dt} e^{-\beta \cdot t} - \beta \frac{d\xi}{dt} e^{-\beta \cdot t} + \beta^2 \xi e^{-\beta \cdot t} =$
 $= \frac{d^2 \xi}{dt^2} e^{-\beta \cdot t} - 2\beta \frac{d\xi}{dt} e^{-\beta \cdot t} + \beta^2 \xi e^{-\beta \cdot t}$

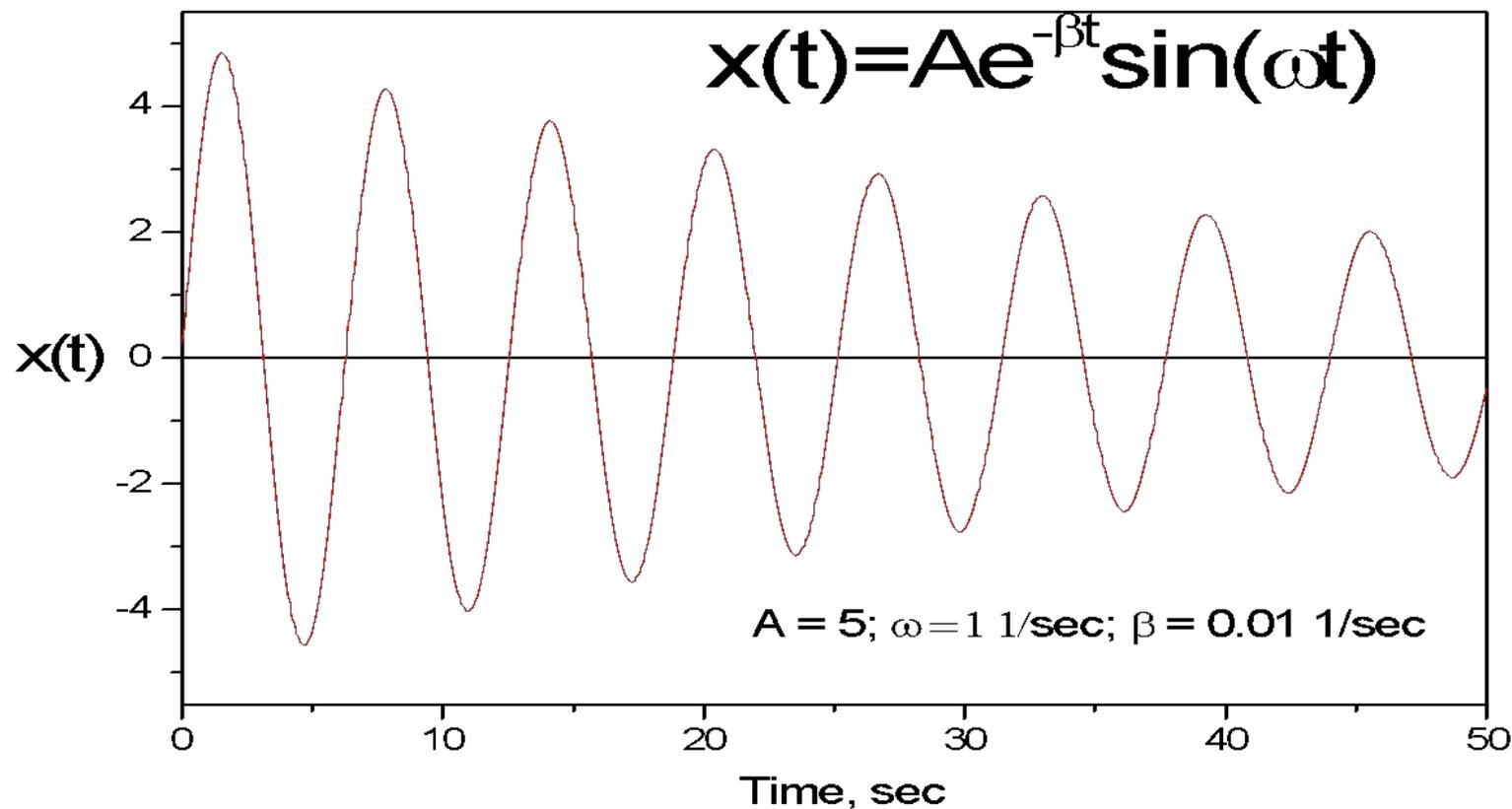
Подставляем в дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} e^{-\beta \cdot t} - 2\beta \frac{d\xi}{dt} e^{-\beta \cdot t} + \xi \beta^2 e^{-\beta \cdot t} + 2\beta \frac{d\xi}{dt} e^{-\beta \cdot t} - 2\beta^2 \xi e^{-\beta \cdot t} + \omega_0^2 \xi \cdot e^{-\beta \cdot t} = 0$$
$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} - \beta^2 \xi + \omega_0^2 \xi = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{d^2 \xi}{dt^2} + (\omega_0^2 - \beta^2) \cdot \xi = 0$$

Получили уравнение гармонических колебаний с $\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Затухающие колебания.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Вынужденные колебания.

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 \cdot q = \frac{U_0}{L} \cos(\omega \cdot t)$$

$$\ddot{q} + 2\beta \cdot \dot{q} + \omega_0^2 \cdot q = X_0 e^{i\omega t}$$

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения есть сумма частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения.

Частное решение $q = q_0 \cdot e^{i\omega t} \longrightarrow q(t) = \frac{X_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\beta\omega} e^{i\omega t}$

Общее решение $q = \frac{X_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\beta\omega} e^{i\omega t} + e^{-\beta \cdot t} (C_1 \cos \omega \cdot t + C_2 \sin \omega \cdot t)$

$\longrightarrow 0$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Вынужденные колебания.

$$\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\beta \cdot \omega = \rho \cdot e^{i\delta} = \rho \cos \delta + i\rho \sin \delta$$

$$\omega_0^2 - \omega^2 = \rho \cos \delta$$

$$2\beta \cdot \omega = \rho \sin \delta$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2\omega\beta}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

$$\rho^2 = (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot \omega^2 \cdot \beta^2$$

Решение при $t \rightarrow \infty$

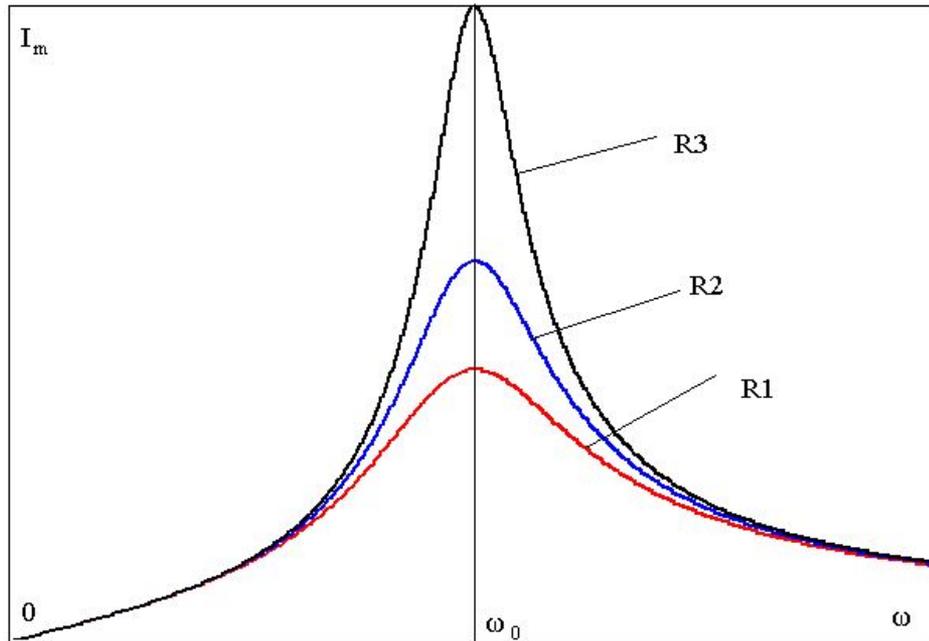
$$q(t) = \frac{X_0}{\rho} e^{i(\omega \cdot t - \delta)}$$

Действительная часть: $q(t) = A(\omega, \omega_0) \cos(\omega \cdot t - \delta)$

$$A(\omega, \omega_0) = \frac{U_0}{L \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\beta^2}}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Вынужденные колебания.



Резонанс.

$$\frac{d}{d\omega} \left((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \beta^2 \right) = 0$$
$$-2(\omega_0^2 - \omega^2) \cdot 2\omega + 8\beta^2 \omega = 0$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Вынужденные колебания.

Логарифмический
Декремент: $\theta = \frac{1}{N_e}$ где N_e – число колебаний, в результате которых амплитуда уменьшилась в e раз.

Добротность. $Q = \frac{\pi}{\theta} = \pi \cdot N_e$

$$E = E_0 e^{-2\beta \cdot t} \quad dE = -2\beta \cdot E_0 e^{-2\beta \cdot t} dt$$

За 1 период: $\Delta E = -2\beta T E$ $\frac{E}{|\Delta E|} = \frac{1}{2\beta \cdot T} = \frac{Q}{2\pi}$

Добротность характеризует отношение запасённой в контуре энергии к потере энергии за один период колебаний.

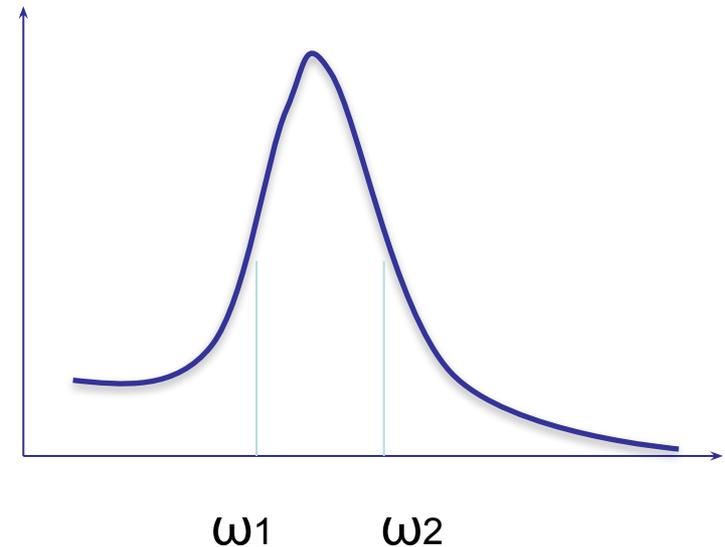
Общая физика. Электромагнитные явления.

Вынужденные колебания.

Ширина резонансной кривой.

$$E_{col} = \frac{1}{2} E_{max} \longrightarrow (\omega_1^2 - \omega_0^2)^2 = 4\omega_0^2 \beta^2;$$

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = 2\beta = \frac{\omega_0}{Q}$$



Чем выше добротность контура, тем уже резонансная кривая.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Цепи переменного тока.

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t)$$

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \varphi)$$

Импеданс

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} \quad Z = R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad |Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

$$W(t) = U(t) \cdot I(t) = U_0 I_0 \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi) = \frac{1}{2} U_0 I_0 [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)]$$

$$W_{cp} = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi \equiv I_{eff} U_{eff} \cos \varphi$$

$$I_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0$$

$$U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Уравнения Максвелла в интегральной форме.

$$\oint E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \oint B \cdot dS$$

$$\oiint D \cdot dS = \int \rho dV$$

$$\oiint B \cdot dS = 0$$

$$\oint H \cdot dl = \int j \cdot dS + \int \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS$$

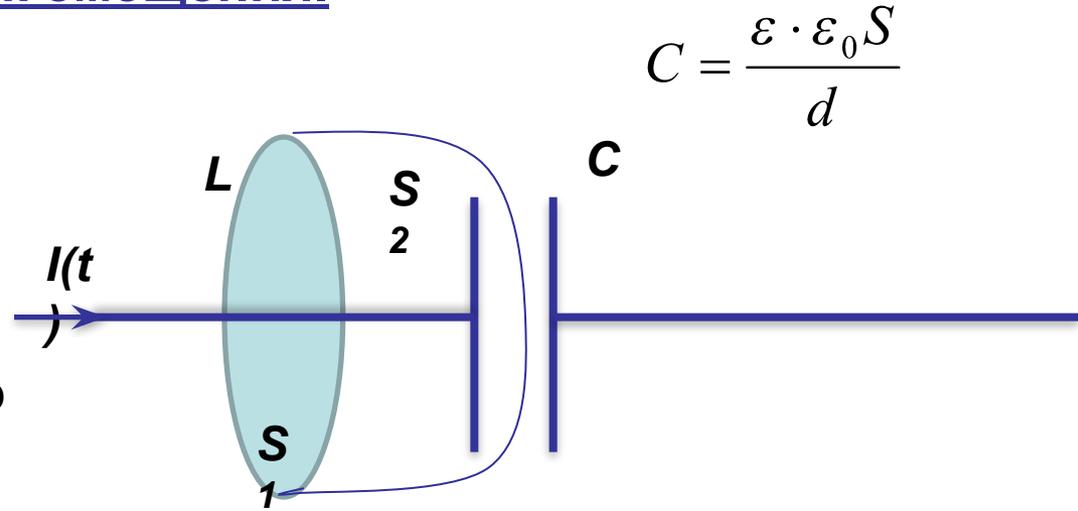
$$H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0} \quad D = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 E$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Уравнения Максвелла. Ток смещения.

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S}$$

Теорема о циркуляции должна выполняться для любой поверхности, натянутой на контур (теорема Стокса).



Если поверхность проходит между пластинами конденсатора, проходит между ними ток или нет?

Максвелл: существует ток смещения !!!

$$I_{cm}(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(C \cdot U)$$

$$I_{cm} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} E \cdot d \right) = S \frac{d}{dt} (\epsilon \epsilon_0 E) = S \frac{dD}{dt}$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \epsilon_0 \vec{E}_{вн}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Уравнения Максвелла (в вакууме).

Интегральная форма.

Дифференциальная форма.

I. Теорема Гаусса.

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

II. Нет магнитных зарядов

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

III. Явление электромагнитной индукции

$$\oint E \cdot dl = - \frac{\partial}{\partial t} \oint_S B \cdot dS$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

IV. Закон полного тока – магнитное поле порождается токами + ток смещения.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электромагнитные волны.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho = 0; \quad j = 0$$

Вывод: III-е уравнение: $\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{B}$

Преобразуем: $\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{E}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{E}) - \Delta \vec{E}$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad \nabla \cdot \nabla = \nabla^2 \equiv \Delta \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

Подставляем $\operatorname{rot} \vec{B}$
из 4-го уравнения:

$$-\Delta \vec{E} = -\mu_0 \cdot \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

- Из уравнений Максвелла следует, что даже в той области пространства, где нет токов ($\mathbf{j} = 0$) и зарядов ($\rho = 0$), существуют электромагнитные волны.
- Скорость распространения электромагнитной волны равна скорости света.
- **Вывод: свет это электромагнитная волна!**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электромагнитные волны.

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\frac{\partial B_x}{\partial t} \quad \rightarrow \quad 0 = \mu \cdot \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t}$$

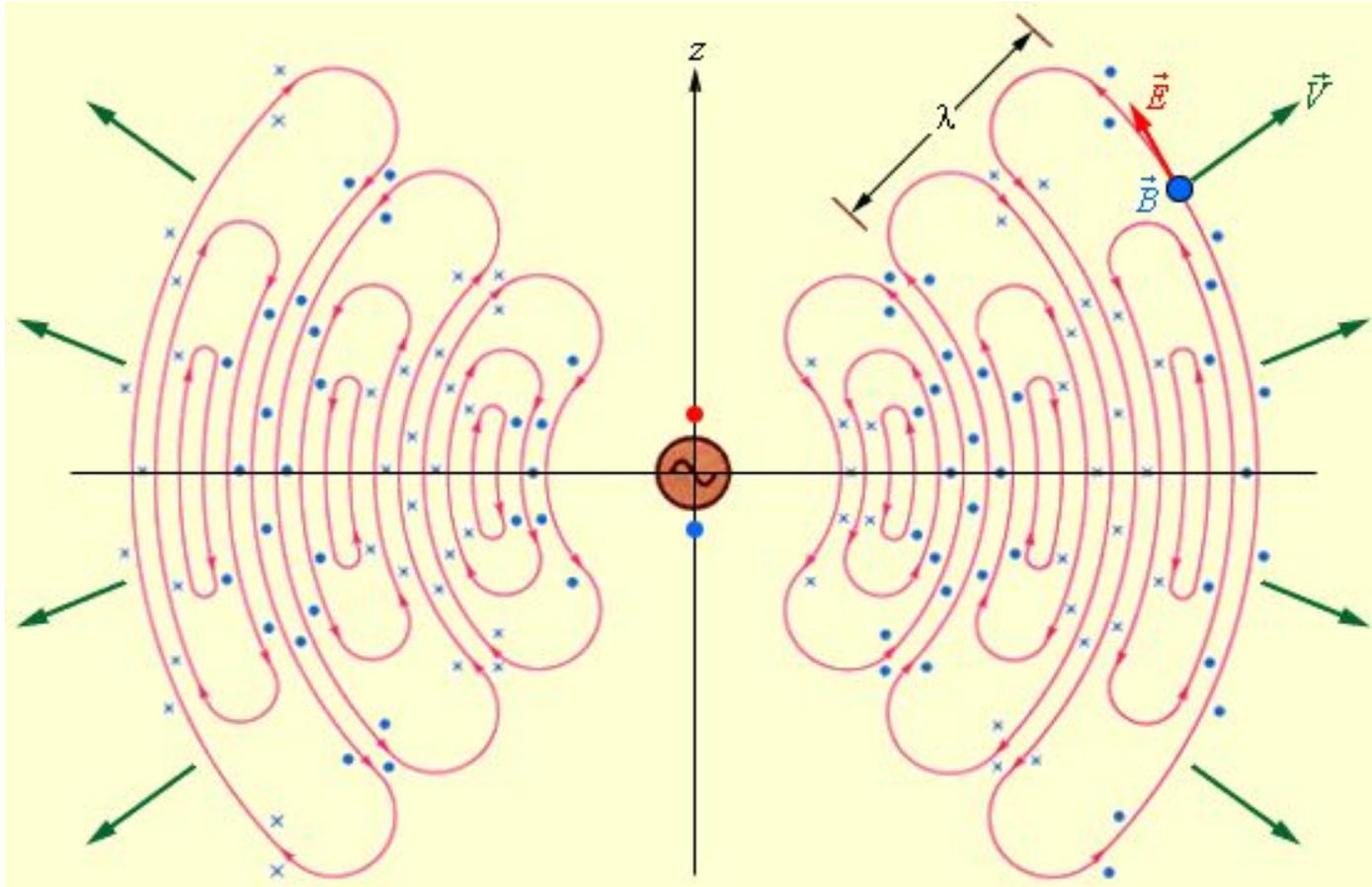
$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{\partial B_y}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \cdot \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \cdot \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial B_x}{\partial x} = \mu \cdot \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial x} = 0$$

Вывод: $E_x = H_x = 0$

Общая физика. Электромагнитные явления.



Генерация электромагнитных волн.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Характеристики электромагнитных волн.

$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t) \quad B_z = B_0 \sin(kx - \omega t)$$

Циклическая (круговая) частота колебаний $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Длина волны – это расстояние, которое проходит волна за период.

$$\lambda = v \cdot T = \frac{2\pi \cdot v}{\omega}$$

Волновое число:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$k = \frac{\omega}{v}$$

v - Фазовая скорость.

В веществе

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Волны

Волновое уравнение
$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Решение
$$y(x, t) = a \cdot \cos(\omega t - kx)$$

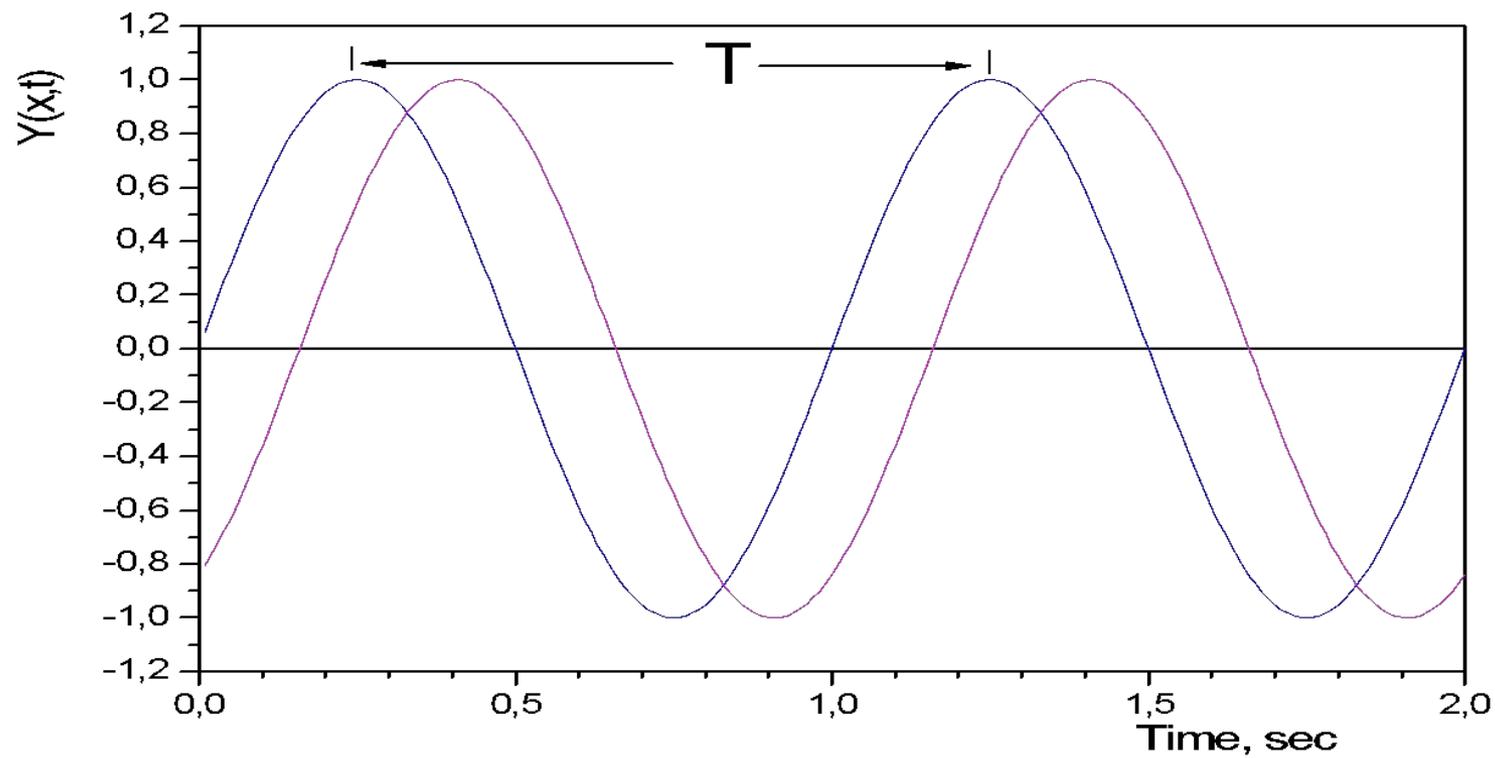
$y = a \cdot \cos[k(x - \frac{\omega}{k}t)]$ Точка с определенной фазой движется
со скоростью $u = \frac{\omega}{k}$ (Фазовая скорость)

Длина волны
$$\lambda = u \cdot T = \frac{2\pi \cdot u}{\omega}$$

Волновое число
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Волны



Общая физика. Электромагнитные явления.

Излучение электромагнитных волн.

Электрический диполь: $\vec{d} = d_m \cos \omega t$

Амплитуды переменных полей: $E_m \propto H_m \propto \frac{1}{r} \sin \theta$

Интенсивность: $I = \langle S \rangle \propto \frac{1}{r^2} \sin^2 \theta$

Мощность излучения $P = \frac{\mu_0}{6\pi c} \left(\frac{d^2 d_e}{dt^2} \right)^2$

$$P = \frac{\mu_0}{6\pi \cdot c} \omega^4 d_m^2 \cos^2 \omega \cdot t$$

Мощность излучения пропорциональна 4-й степени частоты.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Плотность потока энергии $j = \frac{dW}{dS_{\perp} dt}$

w – плотность энергии.

$$dW = w \cdot dV = w \cdot v \cdot dt \cdot dS \cos \alpha = wv \cdot dt \cdot dS_{\perp}$$

$$\vec{j} = w \cdot \vec{v}$$

Плотность энергии:

$$w_{EM} = \frac{\vec{E} \cdot \vec{D}}{2} + \frac{\vec{B} \cdot \vec{H}}{2}$$

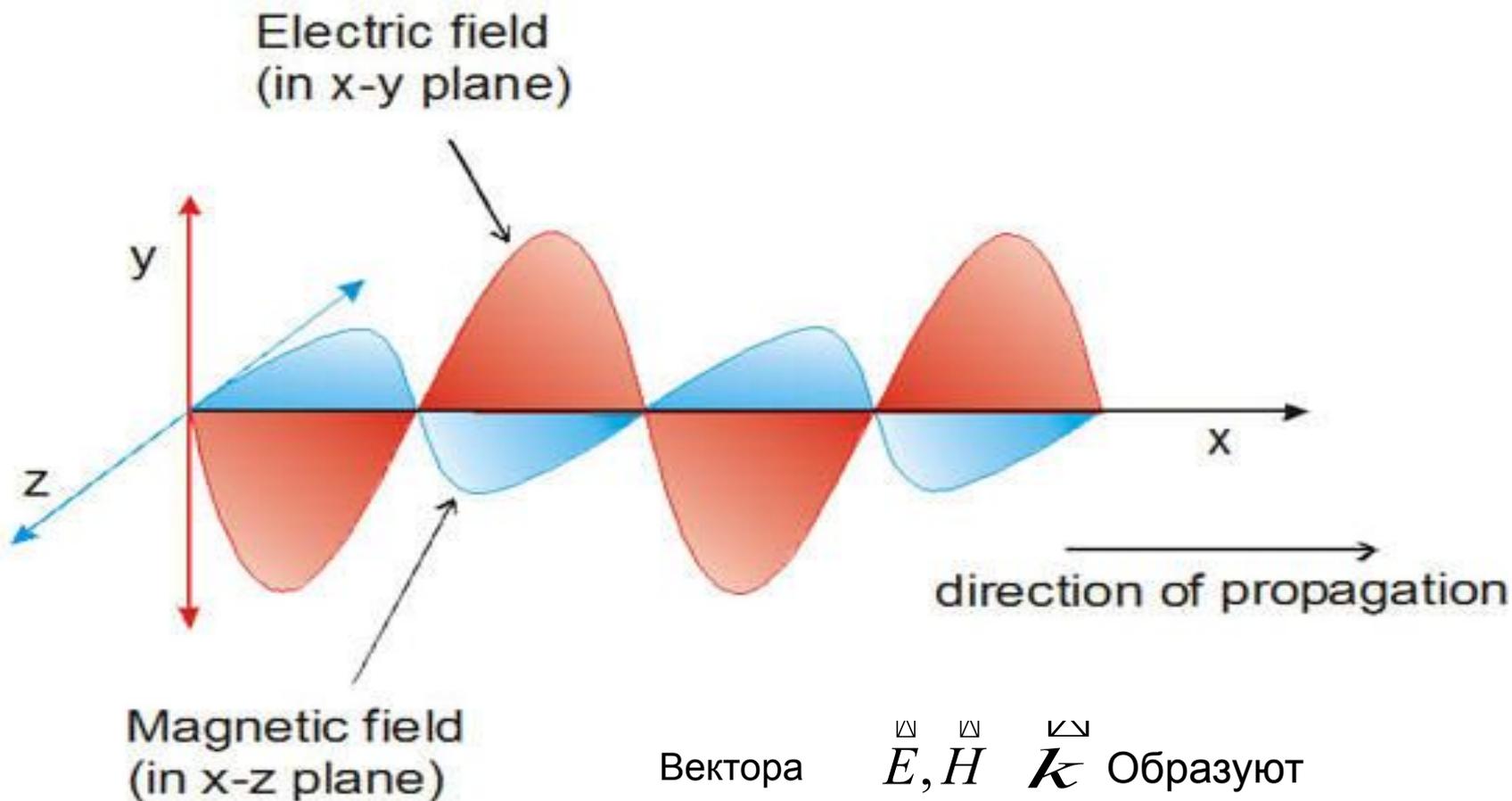
Электрическая и магнитная энергии равны $\varepsilon_0 E^2 = \mu_0 H^2 \rightarrow E = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} H$

$$w = \varepsilon_0 E \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} H = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} E \cdot H = \frac{1}{c} E \cdot H$$

Вектор Пойнтинга: $\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$ - Плотность потока эл-магн. энергии.

Общая физика. Электромагнитные явления.

Электромагнитные волны.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Шкала электромагнитных волн.



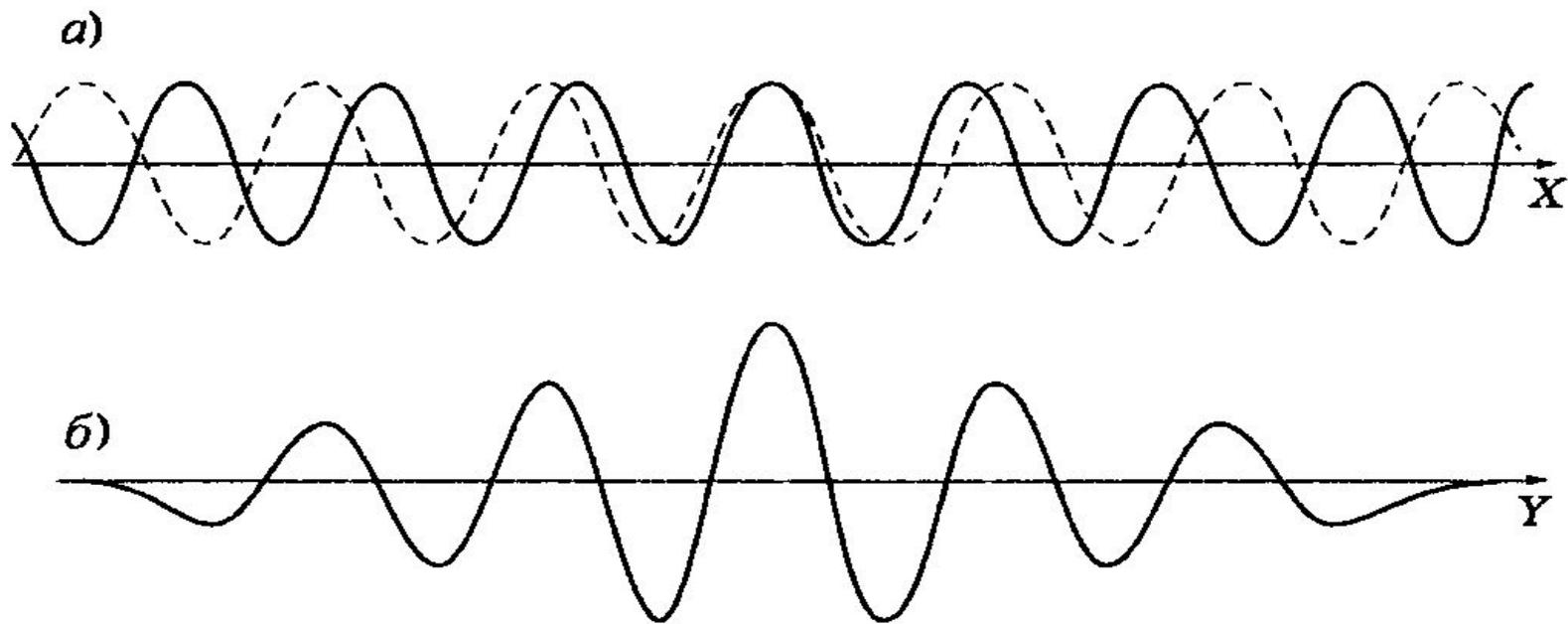
Общая физика. Электромагнитные явления.

Электромагнитные волны.

	λ	
радиоволны	1 мм – 100 км	
инфракрасные	0.76 мкм – 1 мм	
видимые	(0.4 – 0.76) мкм	
ультрафиолетовые	(0.01- 0.4) мкм	
рентгеновские	(10^{-12} – 10^{-8}) м	
Гамма-кванты	$< 2 \cdot 10^{-10}$ м	

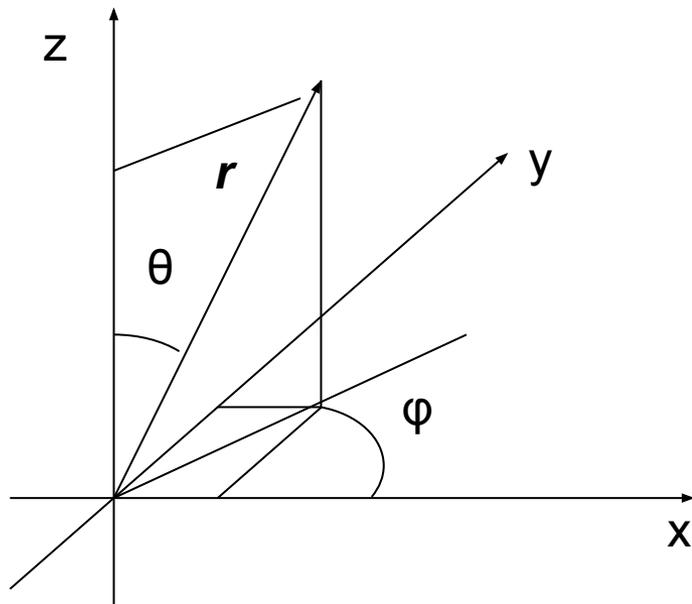
Общая физика. Электромагнитные явления.

Групповая скорость.



Общая физика. Электромагнитные явления.

Сферическая система координат.



$$0 < \theta < \pi$$

$$0 < \varphi < 2\pi$$

Телесный угол:

$$d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

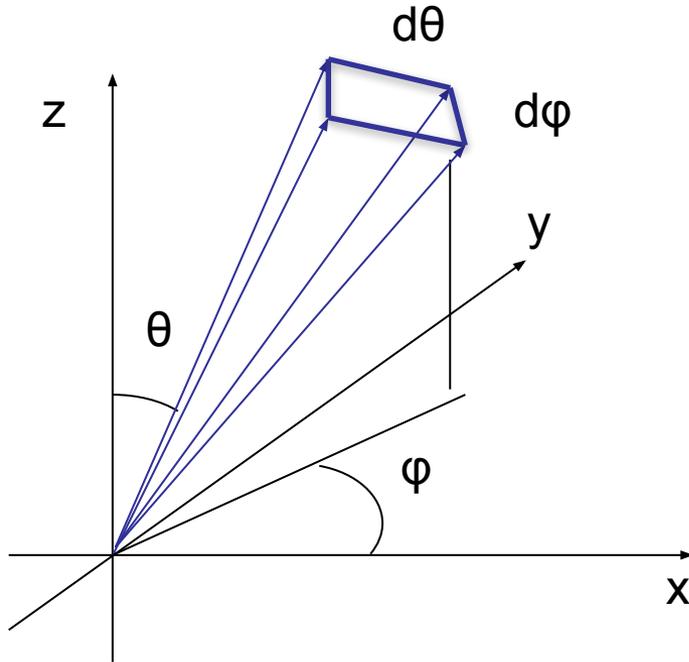
$$X = r \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi; \quad Y = r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi; \quad Z = r \cdot \cos \theta.$$

Интеграл по всем направлениям:

$$\int d\Omega = \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = -2\pi (\cos \pi - \cos 0) = 4\pi$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Сферическая система координат.



Телесный угол:

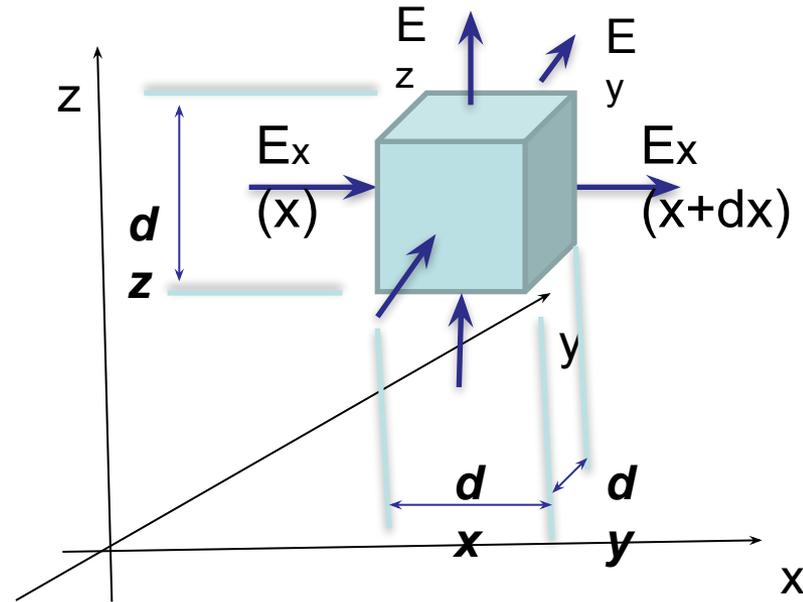
$$d\Omega = \frac{dS_r}{r^2}$$

$$d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

$$\begin{aligned}
 dx \cdot dy \cdot dz &= \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \\ \frac{\partial z}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} & \frac{\partial z}{\partial \theta} \end{vmatrix} dr \cdot d\theta \cdot d\varphi = \begin{vmatrix} \sin \theta \cos \varphi & -r \sin \theta \sin \varphi & r \cos \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi & r \sin \theta \cos \varphi & r \cos \theta \sin \varphi \\ \cos \theta & 0 & -r \sin \theta \end{vmatrix} dr \cdot d\theta \cdot d\varphi = \\
 &= r^2 dr \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi
 \end{aligned}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Теорема Гаусса
в дифференциальной форме.



$$d\Phi_x = [E_x(x + dx) - E_x(x)]dydz = \frac{\partial E_x}{\partial x} dx dy dz$$

$$d\Phi_y = [E_y(y + dy) - E_y(y)]dxdz = \frac{\partial E_y}{\partial y} dx dy dz$$

$$d\Phi_z = [E_z(z + dz) - E_z(z)]dydz = \frac{\partial E_z}{\partial z} dx dy dz$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Теорема Гаусса в дифференциальной форме.

По теореме Гаусса:
$$\left(\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) dx dy dz = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$$

Плотность заряда:
$$\rho(x, y, z) = \frac{\sum q}{dV} = \frac{\sum q}{dx dy dz}$$

$$\boxed{\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}}$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) = \nabla \cdot \vec{E}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Уравнение Пуассона.

Теорема Гаусса

в дифференциальной форме:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_0}$$

Связь напряженности и потенциала:

$$\vec{E} = -\nabla \cdot \varphi$$

$$\nabla \cdot \nabla \varphi = -\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_0}$$

Лапласиан:

$$\nabla \cdot \nabla = \nabla^2 \equiv \Delta \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_0}$$

Общая физика. Электромагнитные явления.

Физические основы электроники

Деление веществ по электрическим свойствам:

	ρ , Ом·см
Проводники	$< 10^{-3}$
Диэлектрики	$> 10^{10}$
Полупроводники	$10^{-3} < \rho < 10^{10}$

Современная электроника использует полупроводники:
Si, Ge, GaAs, SbAs и т.д.

Физические основы электроники.

Проводимость $\sigma = \frac{1}{\rho}$

Плотность тока:

$$j = env_{dr}$$

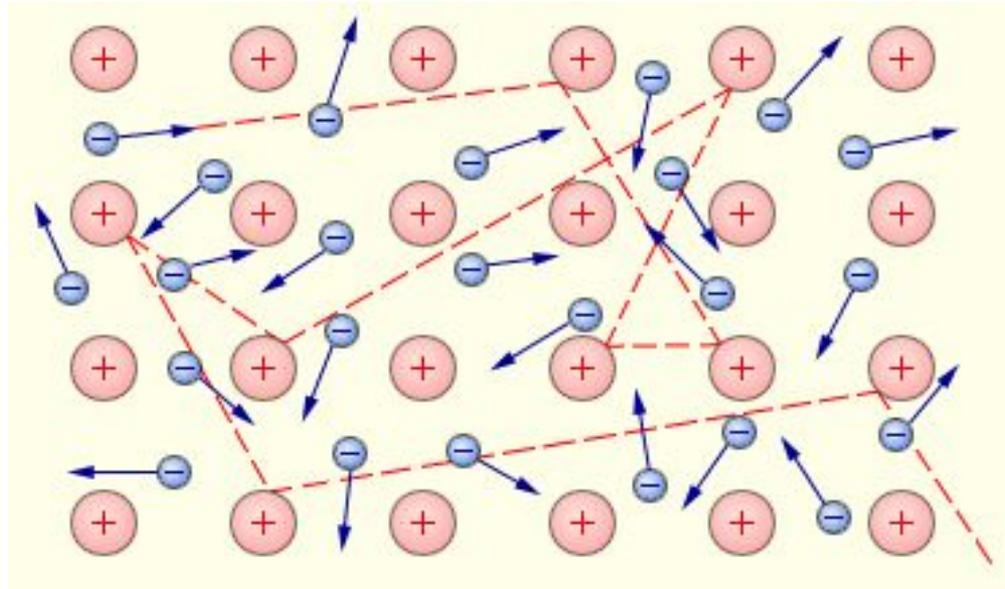
n – концентрация электронов проводимости.
 e – заряд электрона

Дрейфовая скорость пропорциональна напряженности электрического поля:

$$\vec{v}_n = \mu_n \vec{E} \quad \mu - \text{подвижность}$$

$$j = en\mu_n \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad - \text{Закон Ома в дифференциальной форме.}$$

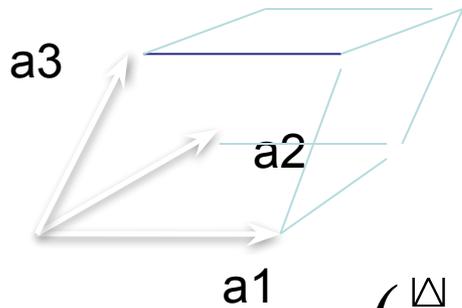
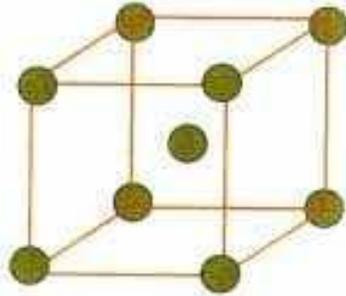
Физические основы электроники.



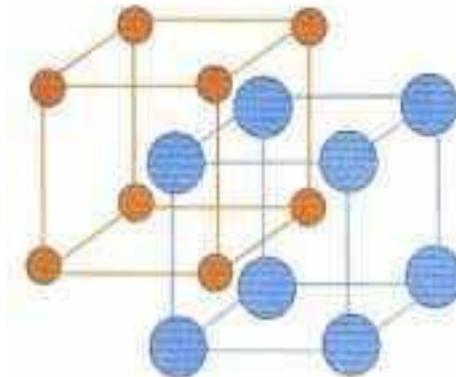
Движение электронов внутри кристалла.

Физические основы электроники

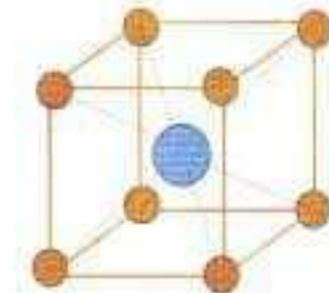
Кристаллическая решетка.



$$\left(\overset{\sphericalangle}{a_1}; \overset{\sphericalangle}{a_2}; \overset{\sphericalangle}{a_3} \right)$$



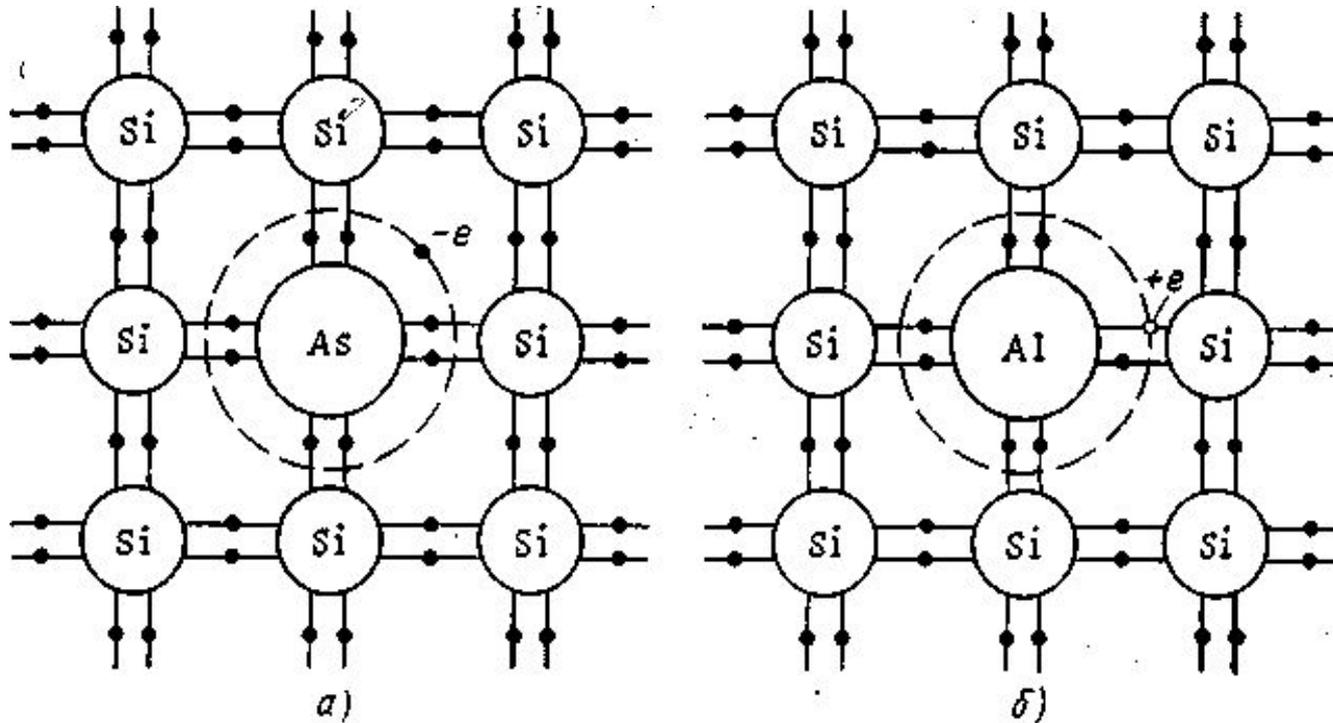
а



б



Физические основы электроники



Донорная и акцепторная примеси.

Электронный и дырочный дрейфовые токи.

$$j_{\partial p} = j_{n\partial\partial} + j_{p\partial p}$$

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = ne\mu_n + pe\mu_p$$

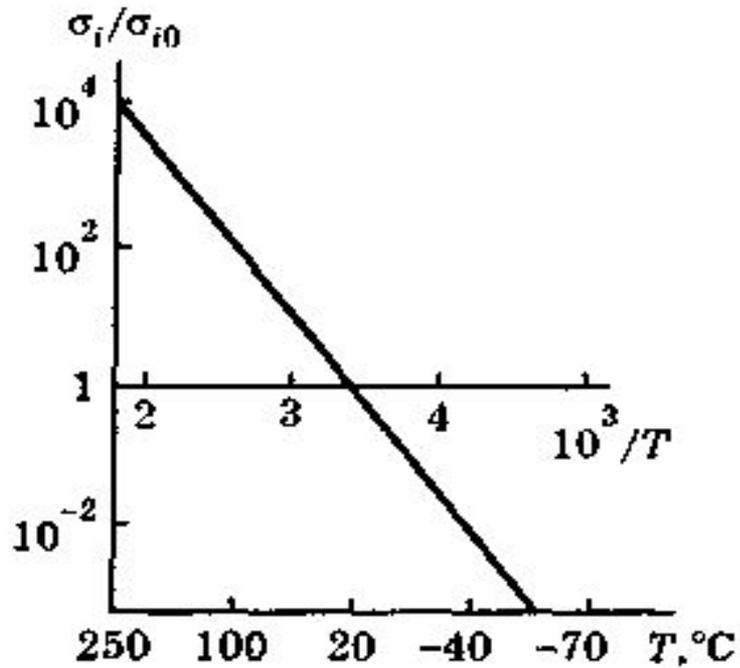
$$e = 1.610^{(-19)} \text{ Кл}$$

Проводимость полупроводников в очень сильной степени зависит от примесей. Свойства полупроводника, очищенного от примесей, определяются его собственной проводимостью. Такой полупроводник называется собственным. Процесс образования свободных электронов и дырок называется термогенерацией, причём количество электронов в собственном полупроводнике равно количеству дырок. При нулевой температуре в нём нет носителей заряда и полупроводник является изолятором. Требования к уровню примесей очень высоки: так, например, относительная концентрация нежелательных примесей не должна превышать $10^{-8}\%$ для **Ge** и $10^{-11}\%$ для **Si**.

Часто для достижения необходимых свойств полупроводника в него добавляют строго контролируемые примеси. Если в полупроводник IV группы (**Si** или **Ge**) добавляется элемент III-й группы (например, **B**, **Ga**, **Al**, у которых по 3 валентных электрона), то одна из 4-х связей атомов полупроводника оказывается вакантной, то есть образуется дырка. Примесь такого рода называется акцепторной. Полупроводник с дырочной проводимостью называется полупроводником *p*-типа.

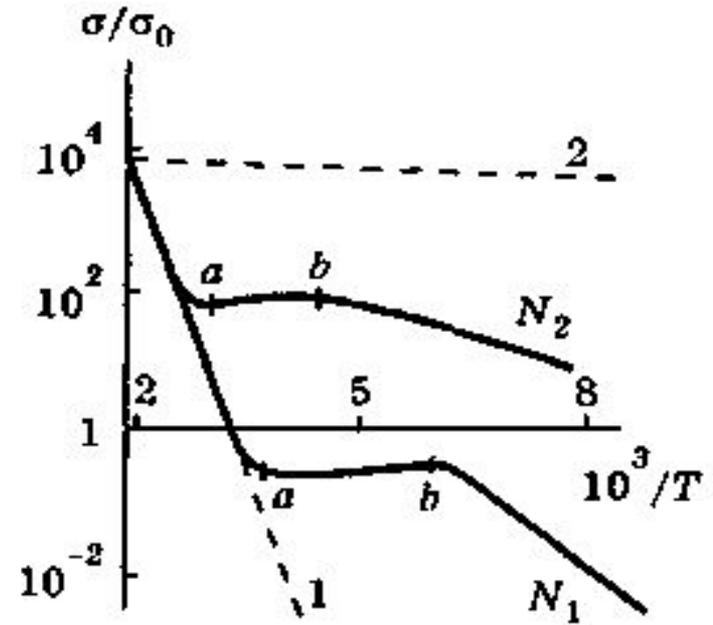
При добавлении элемента V-й группы (**P**, **Sb**, **As**) образуются лишние электроны. Такая примесь называется донорной, и образуется полупроводник *n*-типа.

Зависимость проводимости от температуры.



а)

Собственный полупроводник.



б)

Примесный полупроводник.

Общая физика. Электромагнитные явления.

$$\text{rot}_n \vec{E} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\oint \vec{E} d\vec{l}}{S}$$

$$\text{rot} \vec{E} \equiv [\vec{\nabla}, \vec{E}] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix}$$

Двойное векторное произведение.

$$[\vec{a}, [\vec{b}, \vec{c}]] = \vec{b}(\vec{a} \cdot \vec{c}) - \vec{c}(\vec{a} \cdot \vec{b})$$

“Бац минус цаб”

Общая физика. Электромагнитные явления.

Комплексные числа.

Мнимая единица $i = \sqrt{-1}$

$$z = x + iy$$

Абсолютная величина: $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$

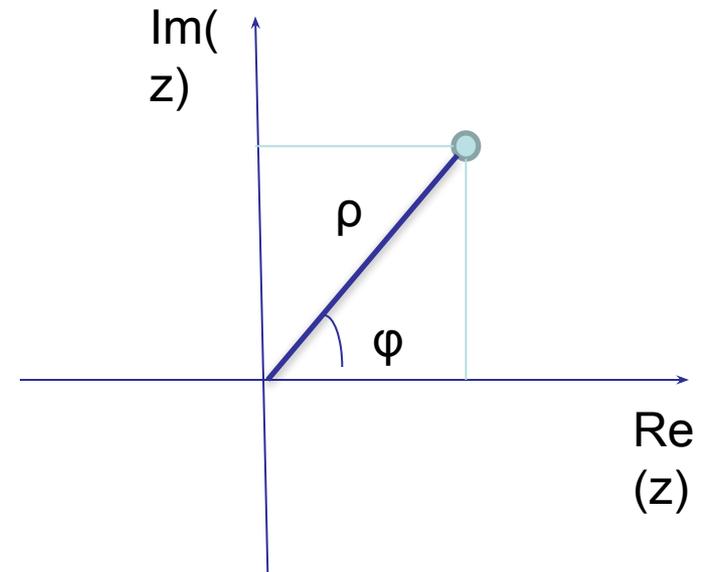
Показательная форма: $z = \rho \cdot e^{i\varphi}$

Формула Эйлера.

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi$$

$$\rho = |z| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y}{x}$$



Общая физика. Электромагнитные явления.

Комплексные числа.

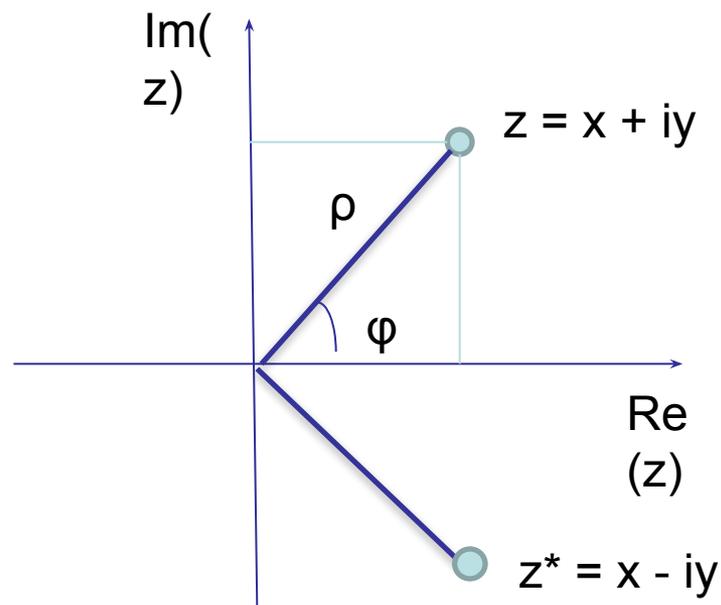
Комплексно сопряженные числа.

$$z^* = x - i \cdot y \quad \longleftrightarrow \quad z = x + iy$$

Показательная форма.

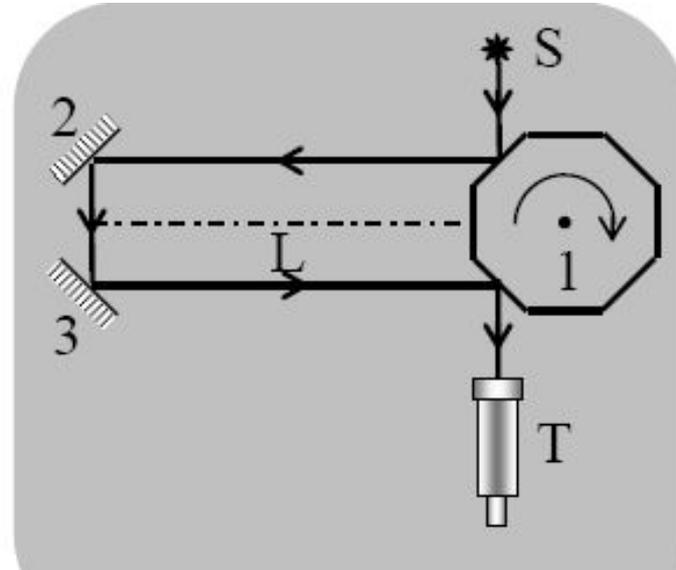
$$z = \rho \cdot e^{i\varphi} \quad z^* = \rho \cdot e^{-i\varphi}$$

$$|z|^2 = z \cdot z^*$$



Общая физика. Электромагнитные явления.

Измерение скорости света
(опыт Майкельсона).



Общая физика. Электромагнитные явления.

Затухающие колебания

$$x(t) = A_0 e^{-\beta \cdot t} \sin(\omega \cdot t + \alpha)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

$$\theta = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) = \beta \cdot T$$

Электромагнитные волны

Вид волны	Длина волны
радиоволны	1 мм – 100 км
инфракрасные	0.76 мкм – 1 мм
видимые	(0.4 – 0.76) мкм
ультрафиолетовые	(0.01 – 0.4) мкм
рентгеновские	(10^{-12} – 10^{-8}) м
Гамма лучи	$< 2 \cdot 10^{-10}$ м