



Международный государственный экологический институт
им. А.Д. Сахарова БГУ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Лекция 1

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электростатика – это раздел физики, изучающий взаимодействие неподвижных электрических зарядов и характеристики их электрических полей

1. *Электрический заряд. Свойства электрического заряда*
2. *Закон сохранения электрического заряда.*
3. *Закон Кулона.*
4. *Электрическое поле. Напряженность поля. Принцип суперпозиции.*
5. *Графическое изображение полей. Силовые линии поля.*
6. *Работа сил электрического поля при перемещении в нем заряда.*
7. *Потенциал. Разность потенциалов.*
8. *Электрическая емкость*
9. *Энергия электрического поля*

Электрический заряд

Электрический заряд q – это скалярная физическая величина, определяющая способность тела быть источником электромагнитного поля и принимать участие в электромагнитном взаимодействии

Понятие «электрический заряд» впервые ввел **Кулон** в 1785 году

Единица измерения электрического заряда в **СИ** –
Кулон [Кл]

1 Кулон – это электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с

Элементарный электрический заряд e – это фундаментальная физическая постоянная, определяющая минимальную порцию электрического заряда

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Электрический заряд тела пропорционален величине элементарного заряда

$$q = N e$$

N – число зарядов

Точечный заряд – это заряд, размером которого можно пренебречь в условиях данной задачи

Два рода электрических зарядов

В природе существуют *два рода электрических зарядов*: **положительные** и **отрицательные**

Наименьшая частица, имеющая элементарный **отрицательный** электрический заряд, называется **электроном**. Его масса равна

$$\ominus \quad m_e = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ з}$$

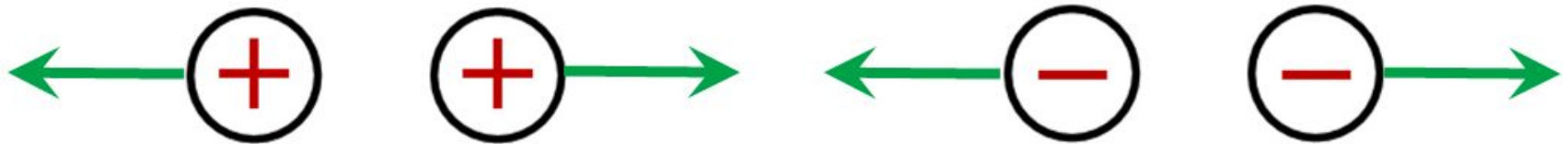
Наименьшая частица, имеющая элементарный **положительный** электрический заряд, называется **протоном**. Его масса равна

$$\oplus \quad m_p = 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ з}$$

Свойства электрических зарядов

- Заряды электрона и протона **численно равны** и **отличаются** только **знаком**
- Электрические заряды **не возникают** и **не исчезают**, они передаются от одного тела к другому или перемещаются внутри тела
- **Взаимодействие зарядов:**

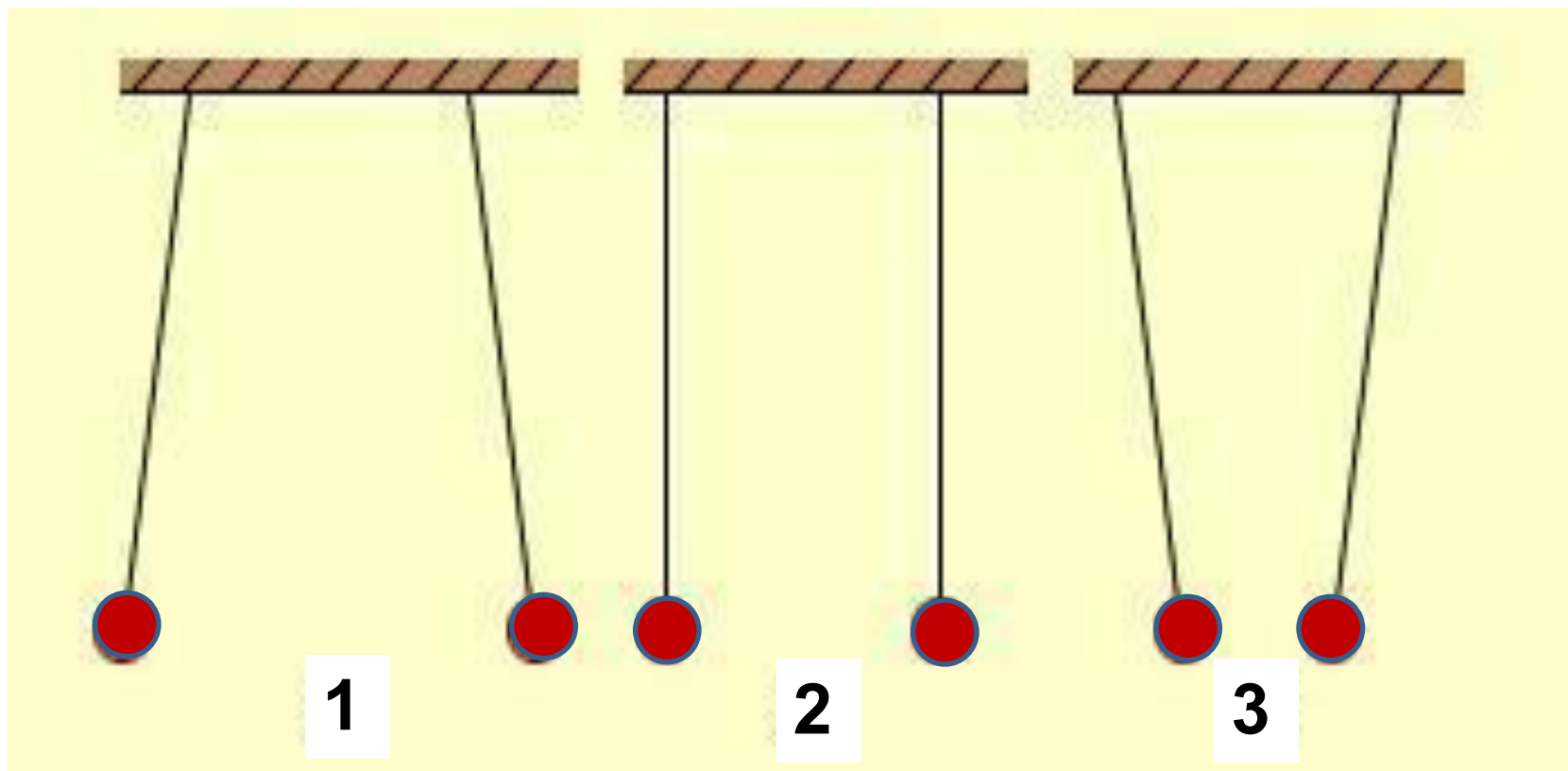
одноименные заряды – **отталкиваются,**

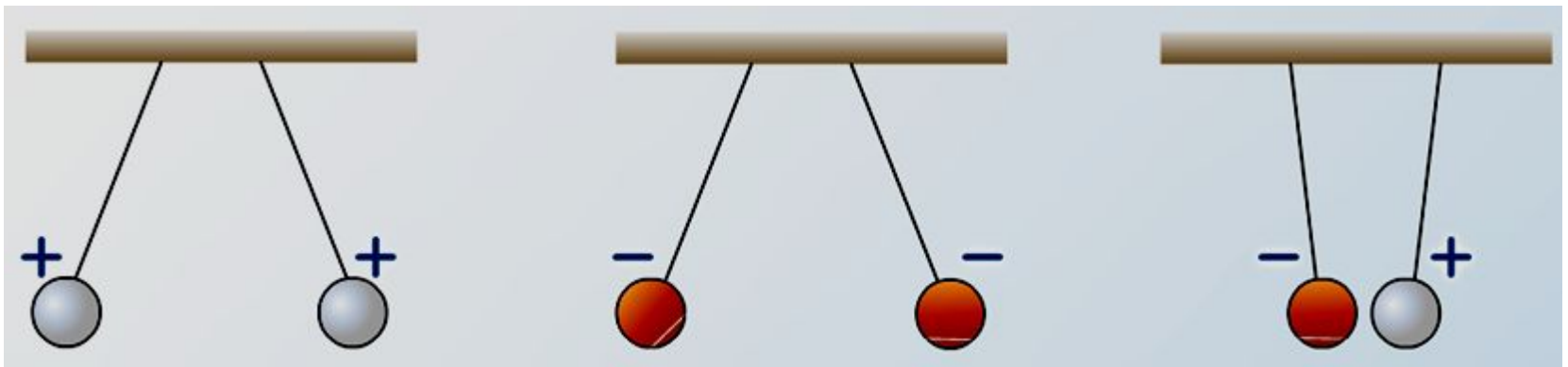
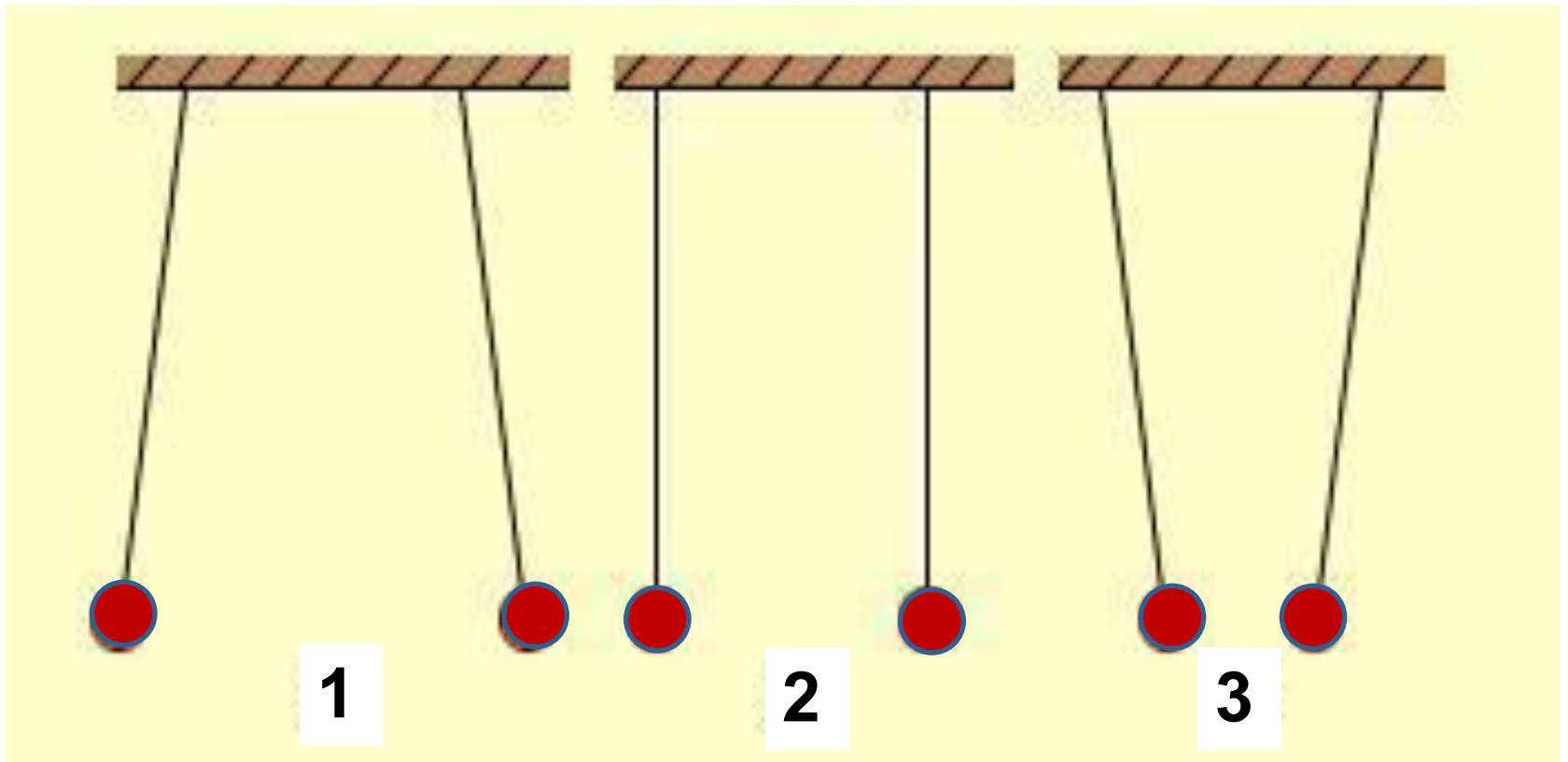


разноименные заряды – **притягиваются**



Определите заряды шариков





Закон сохранения электрического заряда

Изолированная система — это система, в которой через ограничивающую ее поверхность не проникают заряженные частицы

В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

Закон сохранения электрического заряда является **фундаментальным законом природы**. Он экспериментально подтвержден Фарадеем в 1845 г

В зависимости от наличия **свободных зарядов** все тела делятся на **следующие виды**:

проводники – электрические заряды могут перемещаться по всему их объему тела

диэлектрики – отсутствуют свободные электрические заряды, тело содержит только связанные заряды, входящие в состав атомов и молекул

полупроводники – по электропроводящим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками, часть зарядов находится в свободном состоянии и может перемещаться в теле

Закон Кулона

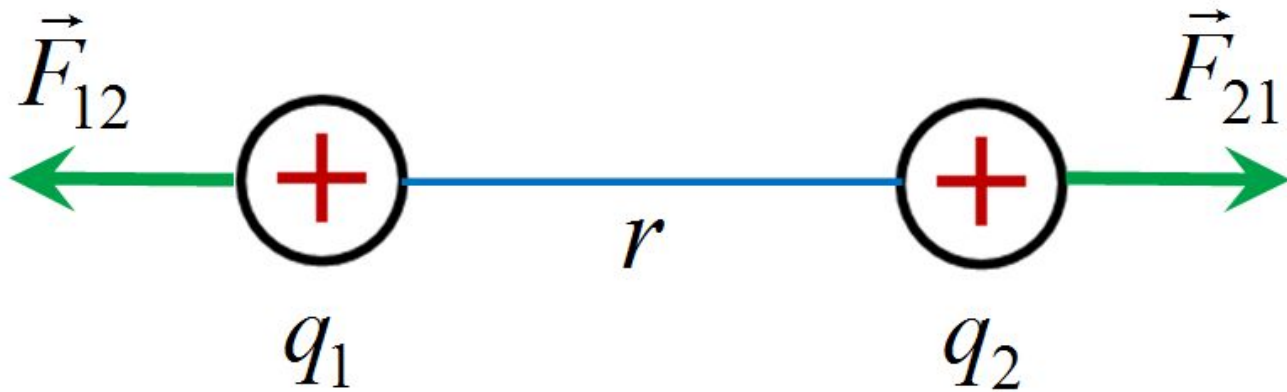
Закон, определяющий силу взаимодействия точечных зарядов, установлен французским физиком Кулоном в 1785 г.

Сила взаимодействия F двух неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 пропорциональна произведению величины этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}$$

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбранной системы единиц

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$



По третьему закону Ньютона

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

В вакууме

В системе СИ: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$

В системе СГС: $k = 1.$

ϵ_0 – электрическая постоянная

В системе СИ:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

Закон Кулона в вакууме

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

В среде

В системе СИ: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0}$

ϵ – электрическая постоянная среды или диэлектрическая проницаемость среды

Закон Кулона в среде

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

или

$$F = \frac{k}{\epsilon} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

Задача

Два одинаковых положительных заряда, находящихся на расстоянии 10 мм в вакууме отталкиваются с силой 0,72 мН.

Чему равен заряд?

• Дано:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$F = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$$

$$r = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$q_1 = q_2 = q$$

Найти:

$$q = ?$$

Решение:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = \frac{q^2}{r^2} \Leftrightarrow q = \sqrt{\frac{Fr^2}{k}}$$

$$q = \sqrt{\frac{0,72 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot (10^{-2} \text{ м})^2}{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}}$$

$$q = \sqrt{8 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}^2} = 2,8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

Электростатическое поле

Электрическое поле – это особая форма существования материи, посредством которой взаимодействуют электрические заряды.

Электростатическое поле – это поле, посредством которого осуществляется кулоновское взаимодействие неподвижных электрических зарядов.

Пробный заряд q_0 – это **единичный положительный точечный** заряд

Пробный заряд q_0 используют для обнаружения и исследования электростатического поля.

Пробный заряд не вызывает заметного перераспределения зарядов, создающих поле.

Напряженность электрического поля

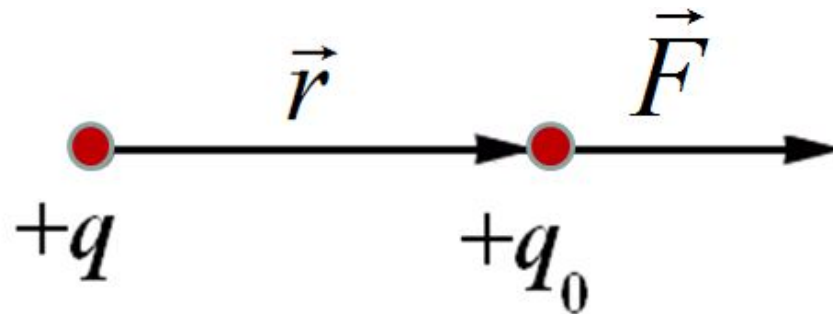
Напряженность электрического поля – это **силовая характеристика** электростатического поля определяющая, с какой силой поле действует на **единичный положительный точечный заряд** q_0 .

Напряженность электрического поля в данной точке поля – это **векторная** физическая величина, определяемая силой, действующей на **пробный точечный положительный заряд** q_0 , помещенный в эту точку поля.

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

Размерность E в СИ: [1 Н /Кл = 1 В/м]

1 В/м – это напряженность такого поля, которое действует на точечный заряд 1 Кл с силой 1 Н.



С учетом закона Кулона в векторной форме

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^3} \vec{r}$$

q – заряд, создающий поле

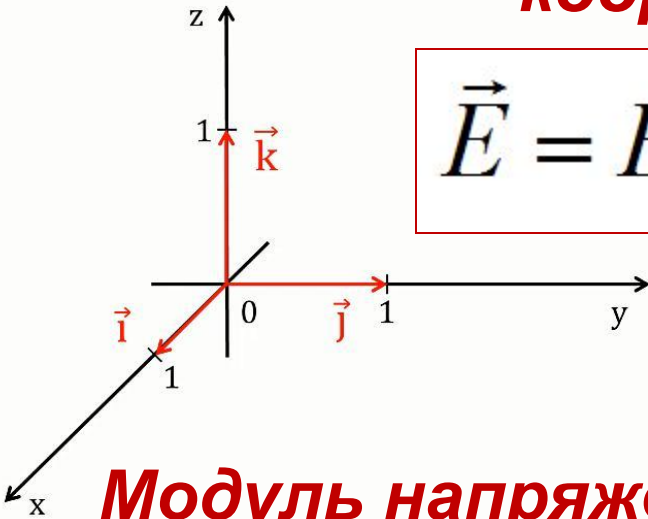
q_0 – пробный заряд, $q_0 = 1$

Напряженность поля точечного заряда в вакууме

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r}$$

Напряженность электрического поля в координатной форме

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}$$



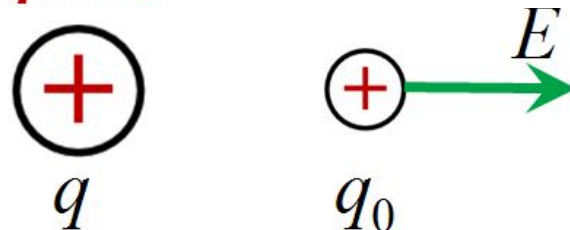
Модуль напряженности электрического поля

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

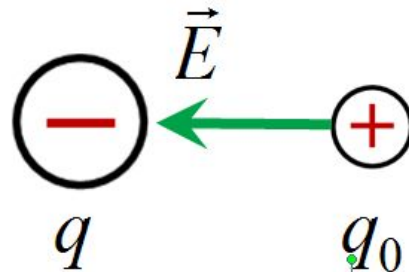
Вектор напряженности электрического поля

Вектор напряженности электрического поля \vec{E} совпадает с направлением силы \vec{F} , действующей на пробный положительный заряд q_0

Поле создается **положительным зарядом** $-$ вектор напряженности электрического поля \vec{E} направлен **от заряда**.

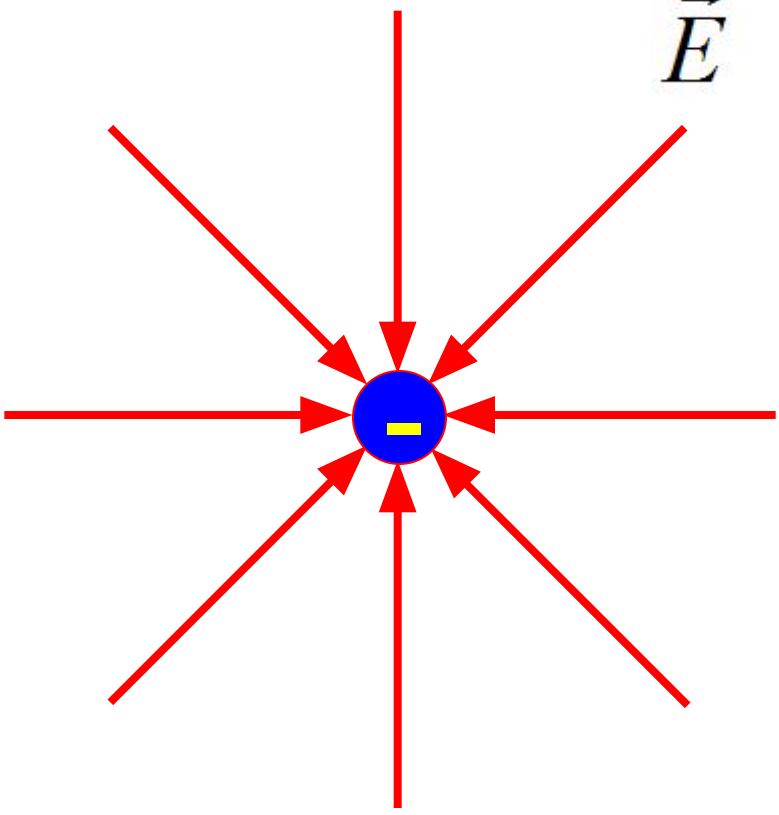


Поле создается **отрицательным зарядом** $-$ вектор напряженности электрического поля \vec{E} направлен **к заряду**.



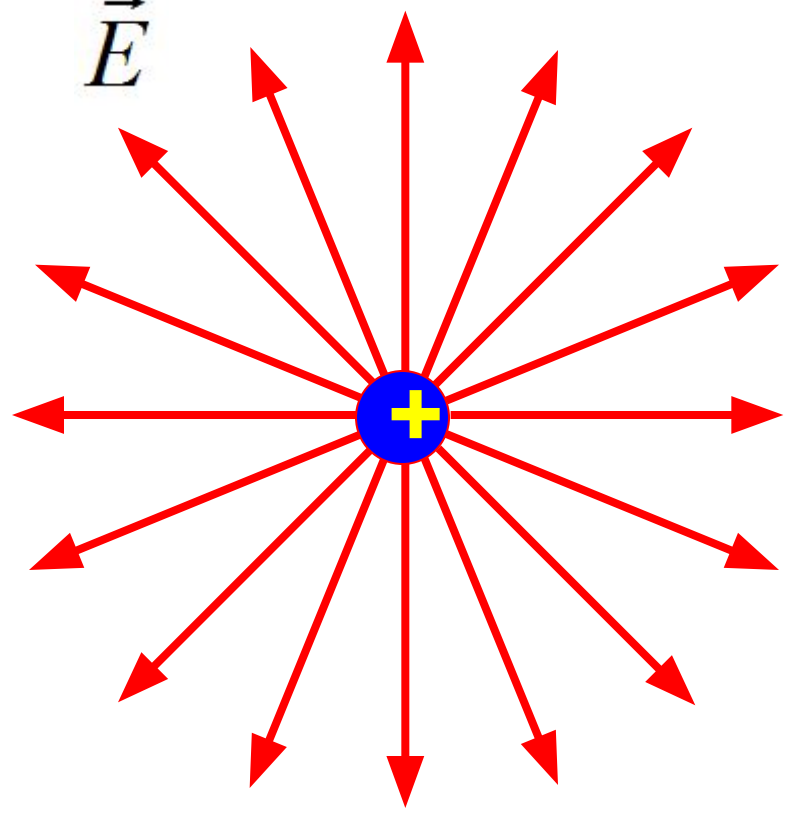
q

\vec{E}



q

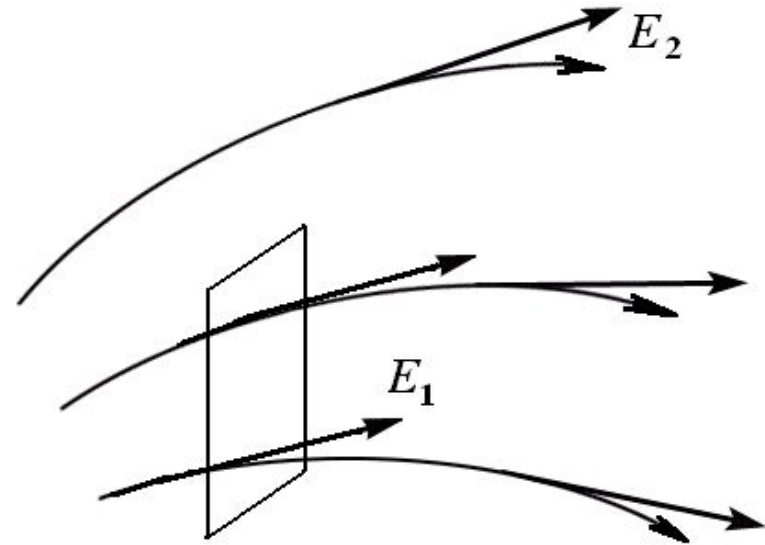
\vec{E}



Графическое изображение электрического поля

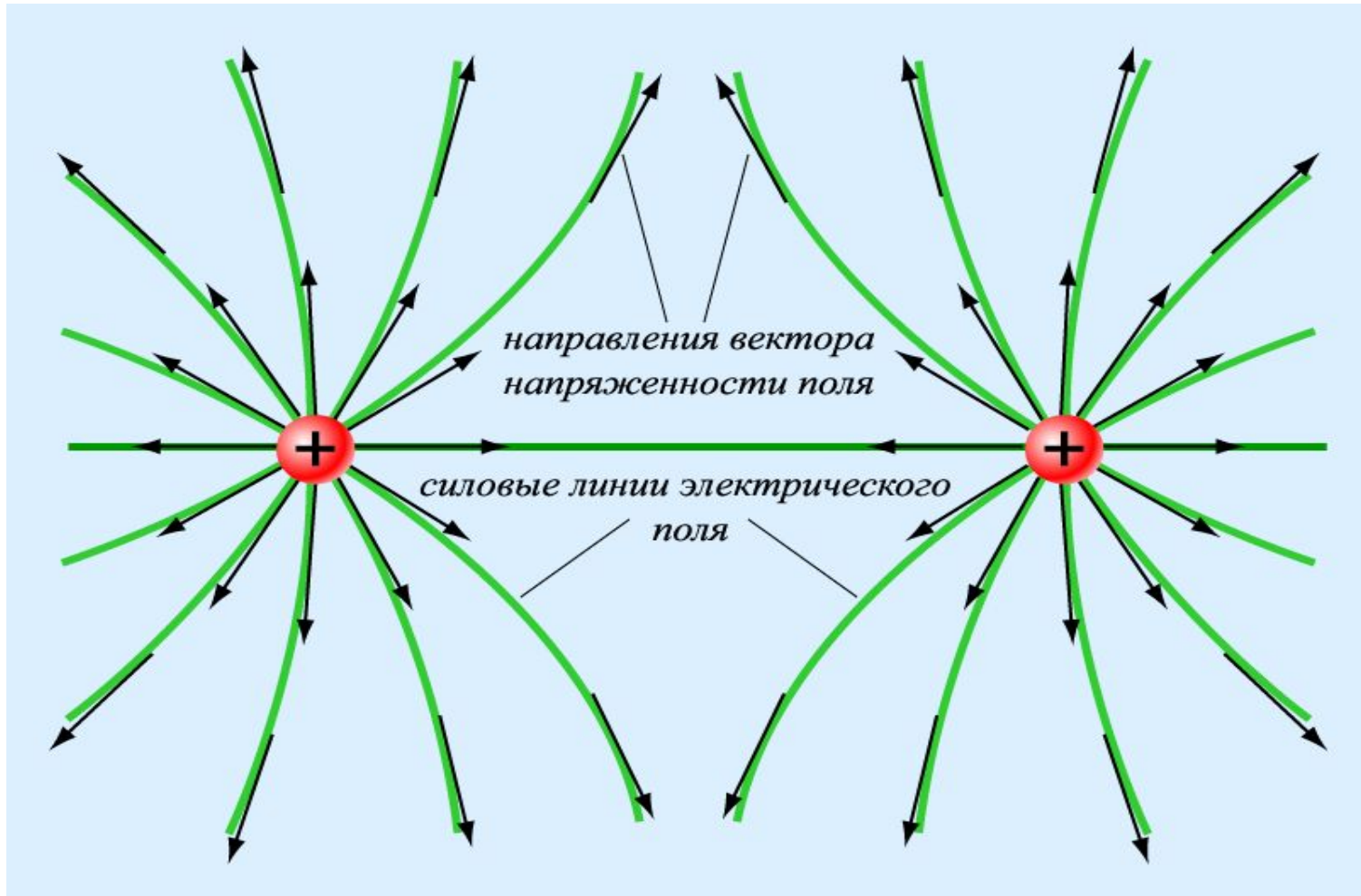
Силовые линии напряженности электрического поля - линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности \vec{E}

По их **направлению** можно судить, где расположены положительные (+) и отрицательные (-) заряды, создающие электрическое поле.

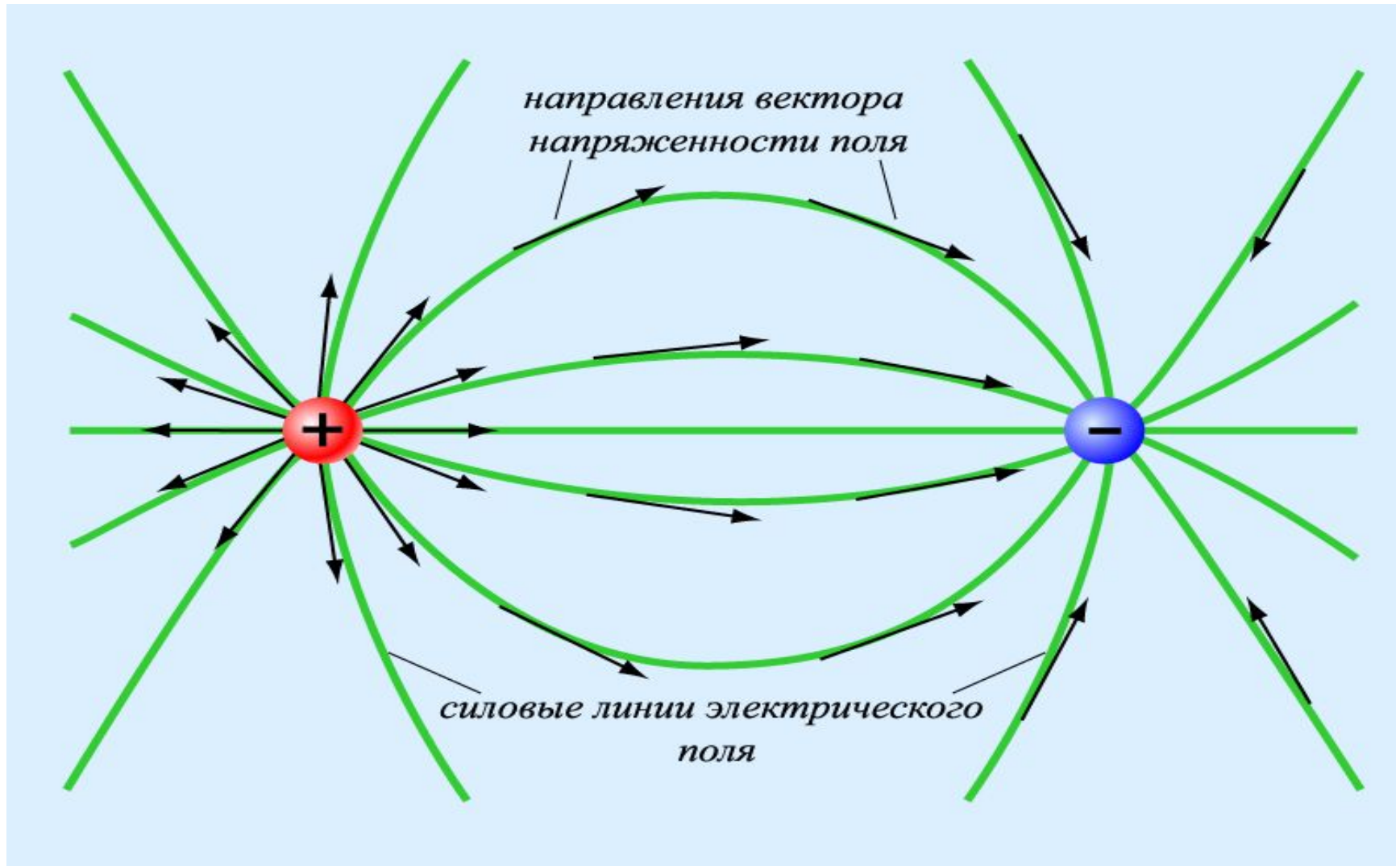


Густота линий (количество линий, пронизывающих единичную площадку поверхности, перпендикулярную к ним) численно равно модулю вектора \vec{E}

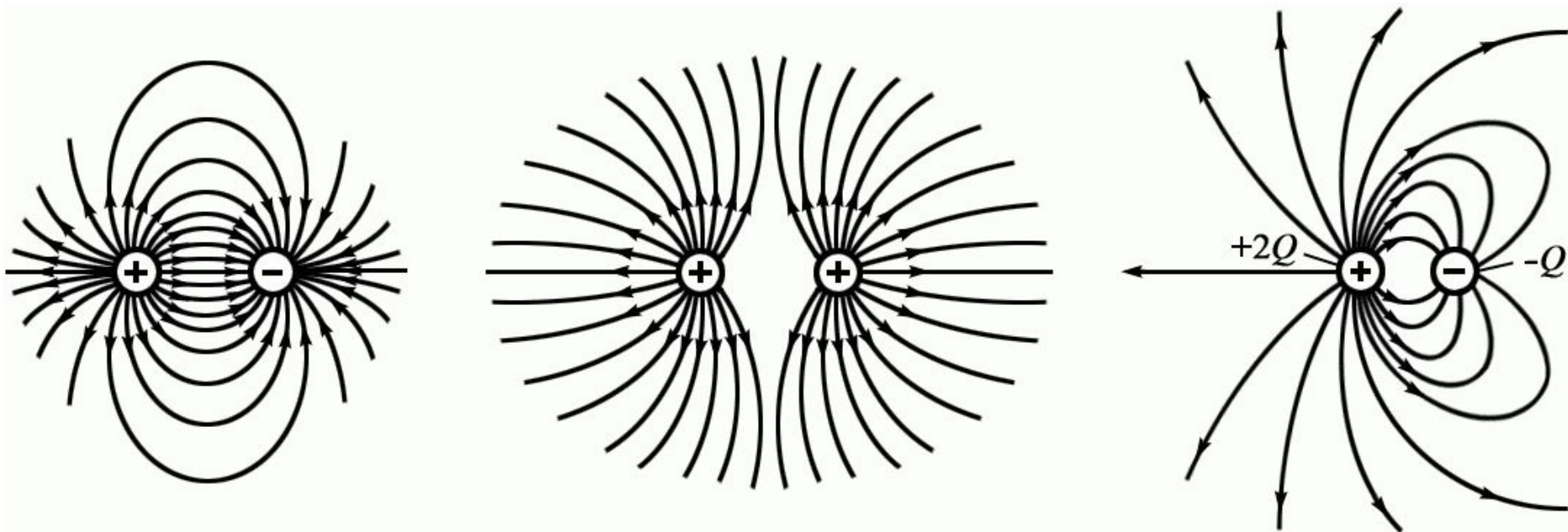
Линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и уходят в бесконечность.



Линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных



Примеры силовых линий напряженности электрического поля



Диаграммы силовых линий:

два заряда противоположного знака (диполь); два заряда одного знака; два заряда, один из которых $-Q$, а другой $+2Q$

Принцип суперпозиции напряженности электрического поля

Опытным путем установлено, что взаимодействие двух зарядов между собой не зависит от присутствия других зарядов.

В соответствии с принципом независимости действия сил (принципом суперпозиции сил) на пробный заряд, помещенный в некоторую точку, будет действовать результирующая сила со стороны всех зарядов q_i , равная векторной сумме сил, действующих на него со стороны каждого из зарядов.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Зная напряженность поля в какой-либо точке пространства, можно найти силу, действующую на заряд, помещенный в эту точку:

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

Если электростатическое поле создается системой точечных зарядов q_i , то на единичный пробный заряд, помещенный в данную точку поля, со стороны каждого из этих зарядов действует сила

$$\vec{F}_i = q_0\vec{E}_i$$

Результирующая сила, действующая на единичный пробный заряд, равна

$$\vec{F} = \sum \vec{F}_i = q_0\vec{E} = \sum_{i=1}^n q_0\vec{E}_i \quad (\text{при } q_0 = 1)$$

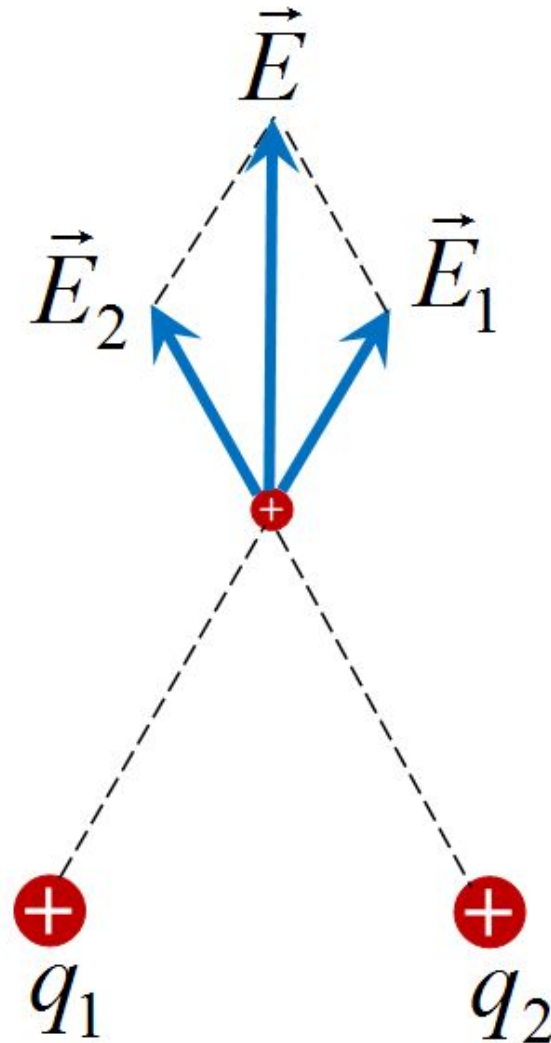
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

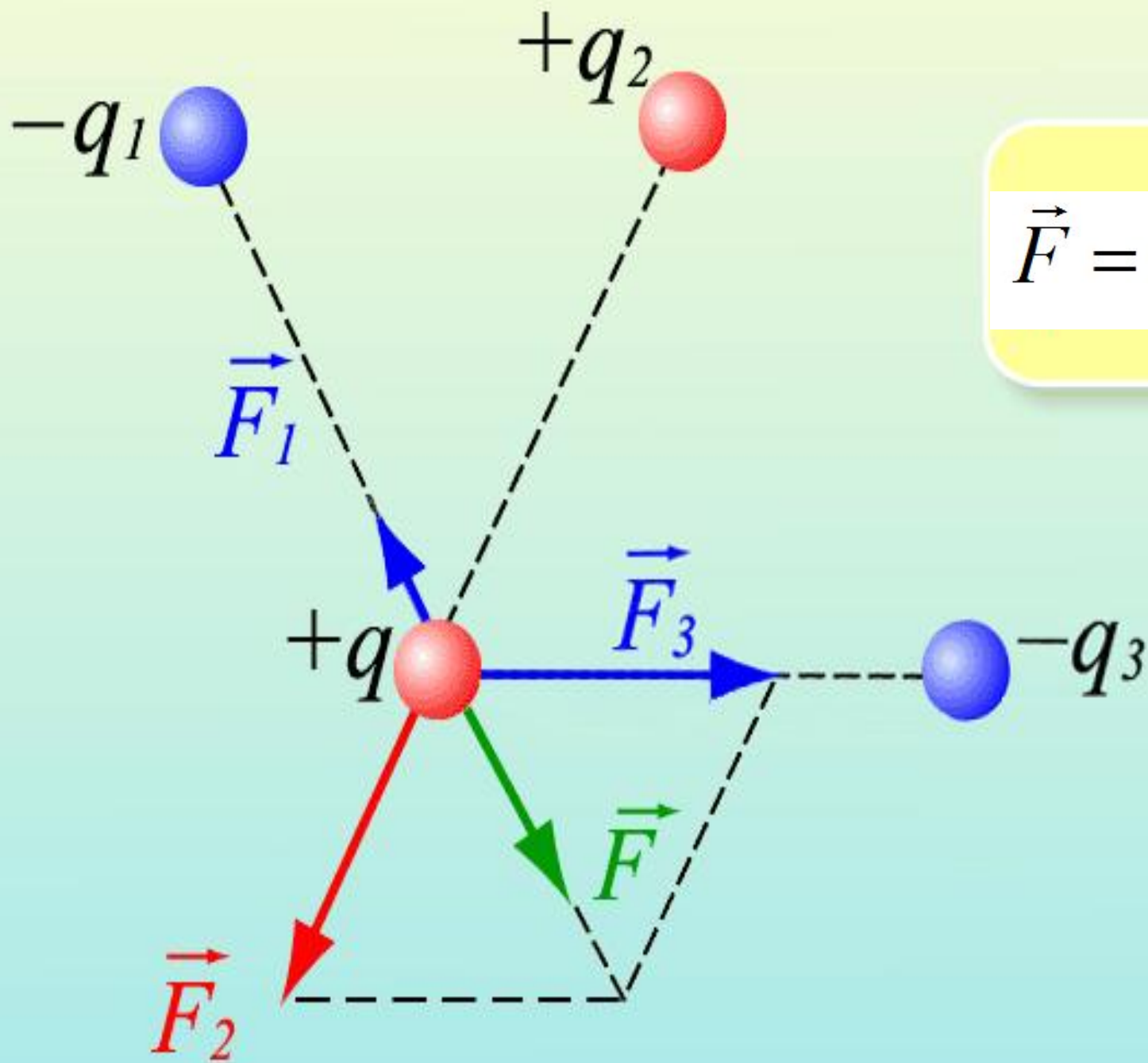
\vec{E} - вектор напряженности результирующего электрического поля
 \vec{E}_i - векторы напряженностей каждого из электрических полей

Напряженность электростатического поля, создаваемого системой точечных зарядов, в данной точке поля равна геометрической сумме напряженностей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов в отдельности.

Принцип суперпозиции напряженности электрического поля

Примеры принципа суперпозиции напряженности электрического поля



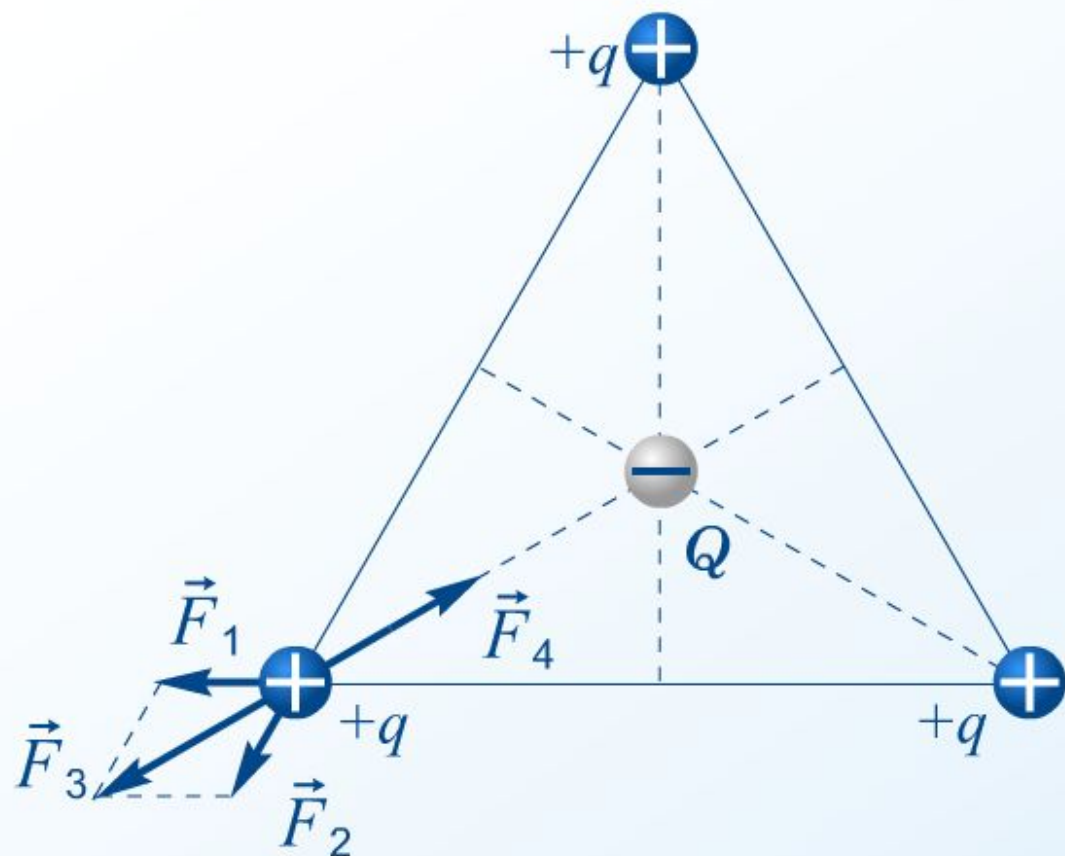


$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

Принцип суперпозиции для взаимодействия точечных зарядов

Сила \vec{F} , действующая на точечный заряд q со стороны N точечных зарядов q_1, q_2, \dots, q_N , равна векторной сумме сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_N$, действующих со стороны каждого из зарядов системы на этот заряд, и не зависит от наличия других зарядов:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N$$

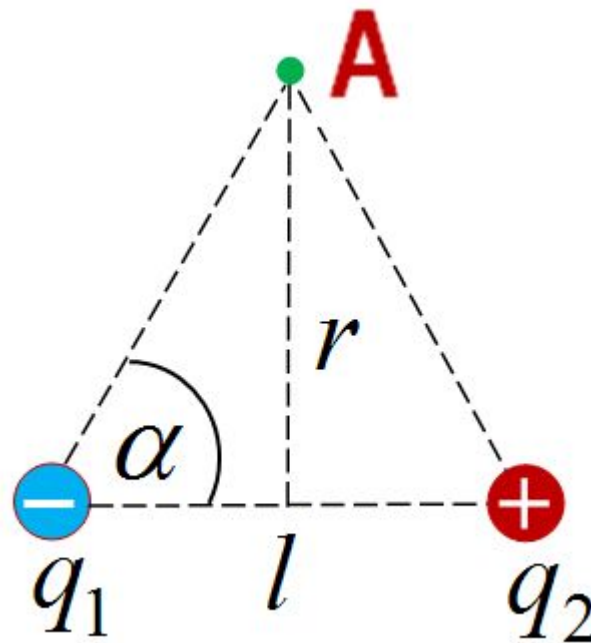


$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_4 = 0$$

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \text{ и } \vec{F}_3 = -\vec{F}_4$$

Задача

Определить напряженность электрического поля, создаваемого численно равными зарядами противоположного знака q_1 и q_2 , расположенных на расстоянии l друг от друга, в точке A , находящейся на расстоянии r от прямой, соединяющей эти заряды



Т.к. $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$ и $|\vec{E}_+| = |\vec{E}_-|$

Из рисунка видно, что $E = 2E_+ \cos \alpha$ и

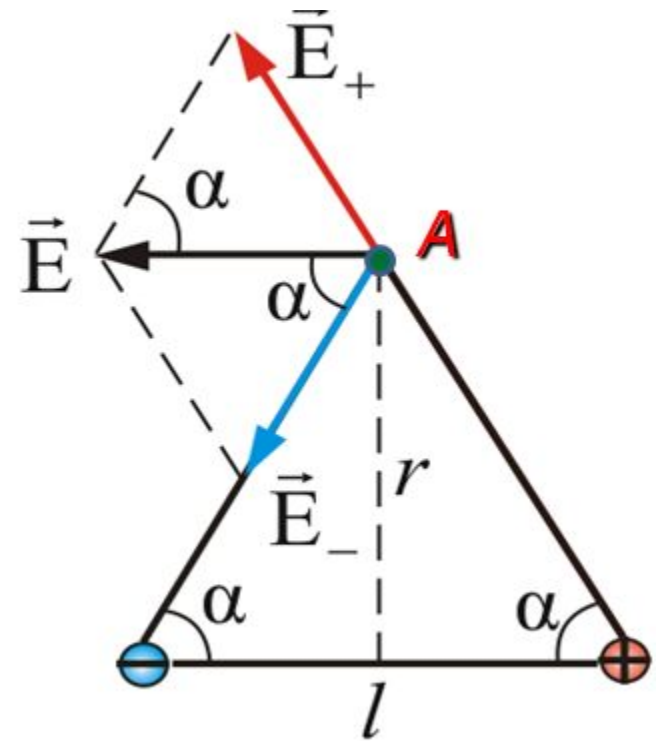
$$\cos \alpha = \frac{l}{2\sqrt{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)}}$$

С учетом определения напряженности

$$E_- = E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)}$$

Окончательно получаем

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

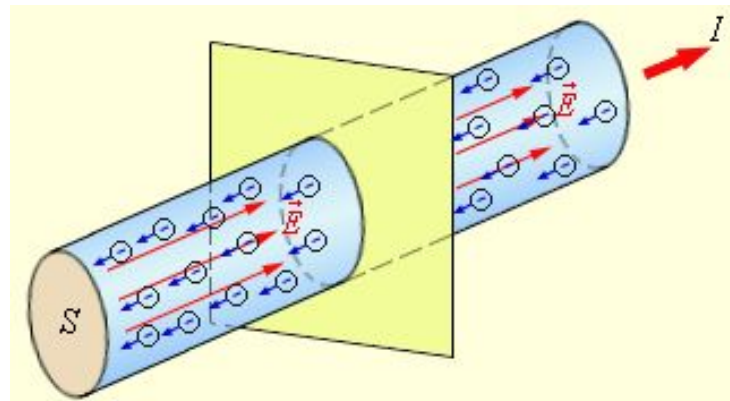


ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда (электронов или ионов) называется **электрическим током**.

Сила тока I – скалярная физическая величина, равная заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени

$$I = \frac{q}{t}$$



В Международной системе единиц СИ сила тока I измеряется в **амперах (А)**

Для **возникновения** и **существования** электрического тока

необходимо:

- 1 наличие **свободных носителей заряда** - заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно
- 2 наличие **электрического поля**, энергия которого, расходовалась бы на упорядоченное движение свободных носителей заряда

Постоянный ток при наличии лишь сил электростатического происхождения **невозможен**.

Для поддержания в цепи постоянного тока **необходимы** устройства, способные создавать и поддерживать в цепи **разность потенциалов** за счет работы сил **не электростатического** происхождения.

Такие устройства называют **источниками тока (напряжения)**.

Силы **неэлектростатического происхождения**, действующие на заряженные частицы со стороны источников тока, называют **сторонними**

Природа сторонних сил может быть различной.

В **гальванических элементах** сторонние силы возникают за счет **химических реакций** между электродами и электролитами. Химические силы разделяют молекулы на положительные и отрицательные ионы ,

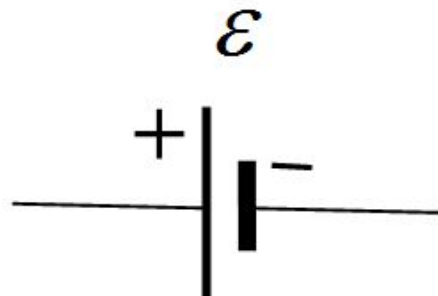
В **генераторах** — за счет **механической энергии** вращения ротора генератора.

Физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называют **электродвижущей силой ε (ЭДС)**

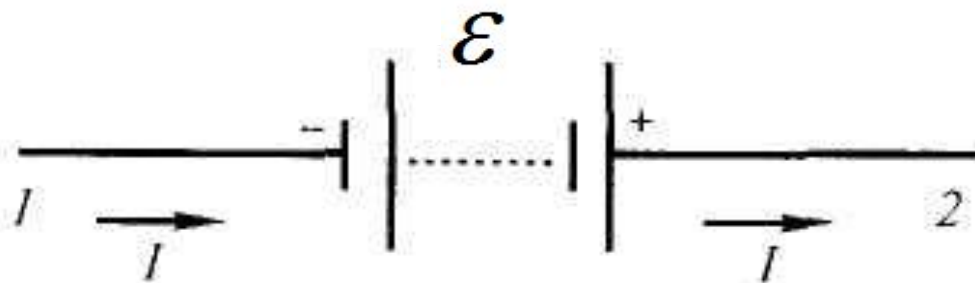
Электродвижущая сила ε численно равна работе сторонних сил по переносу единичного заряда в цепи

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q} \quad \text{В СИ ЭДС измеряется в вольтах (В)}$$

Обозначение источника постоянного тока на схеме



За направление тока принято движение положительных зарядов.



В металле ток создается движением электронов, поэтому принято считать, что **во внешней цепи** ток движется **от клеммы «+» к клемме «-»**.

Напряжение

Электрическое поле совершает работу, заставляя заряженные частицы перемещаться по проводнику, следовательно оно совершает работу.

Напряжение – это отношение работы тока на определенном участке электрической цепи к заряду, протекающему по этому участку цепи.

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

Единица измерения напряжения в СИ – вольт (В)

$$1\text{В} = 1 \text{ Дж/Кл}$$

Электрическое сопротивление

Электрическое сопротивление R – скалярная физическая величина, характеризующая сопротивление проводника электрическому току

Единица сопротивления в СИ - ом (Ом).

1 Ом - сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А.

Сопротивление проводников *зависит* от его **размеров** и **формы**, а также от **материала**, из которого проводник изготовлен

Для однородного линейного проводника **сопротивление R** прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м} \left(\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right)$$

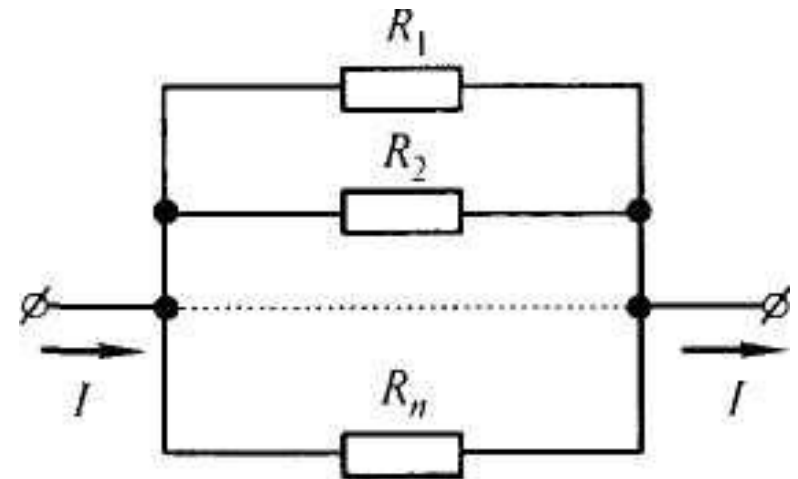
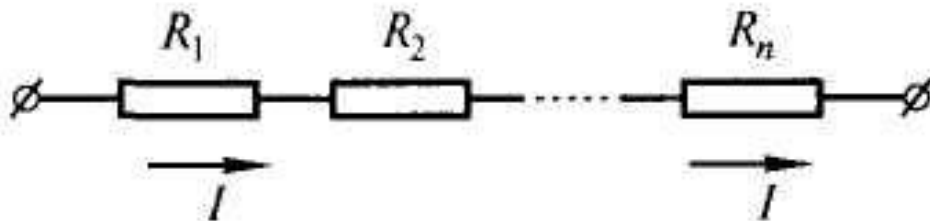
ρ - **удельное электрическое сопротивление**

Удельное электрическое сопротивление проводника ρ – это физическая величина, равная сопротивлению однородного линейного проводника длиной 1 м и площади поперечного сечения 1 м².

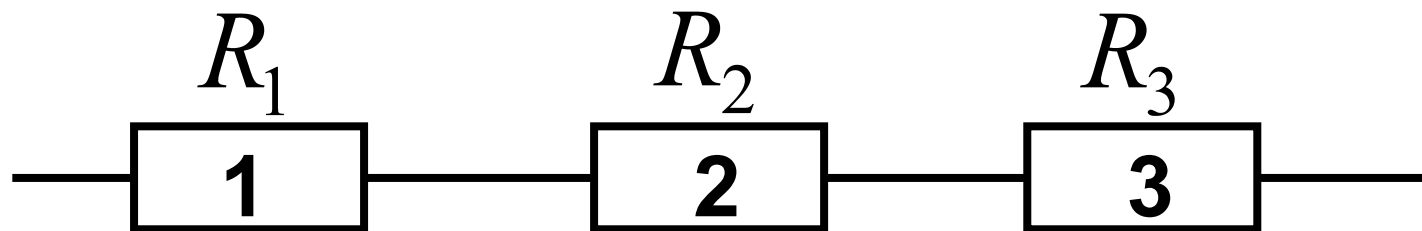
Величина ρ характеризует вещество, из которого изготовлен проводник.

Соединения проводников

Резистор - элемент электрической цепи, который оказывает сопротивление электрическому току. Резисторы в электрических цепях постоянного тока соединяют **последовательно** и **параллельно**.



Последовательное соединение проводников



При последовательном соединении проводников все электроны проводимости (весь ток I) проходят через каждый из резисторов

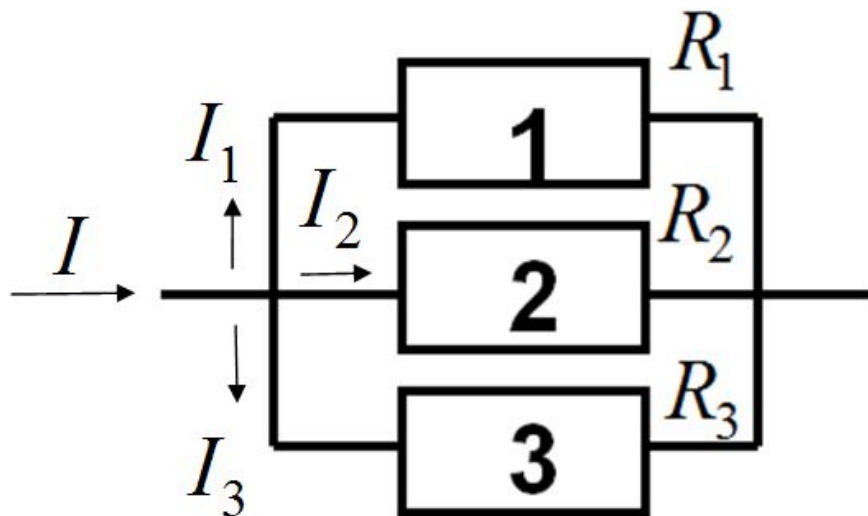
Законы последовательного соединения

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$$

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

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Параллельное соединение проводников



При параллельном соединении проводников в месте их соединения **ток I разветвляется.**

Напряжение U одинаково на всех резисторах

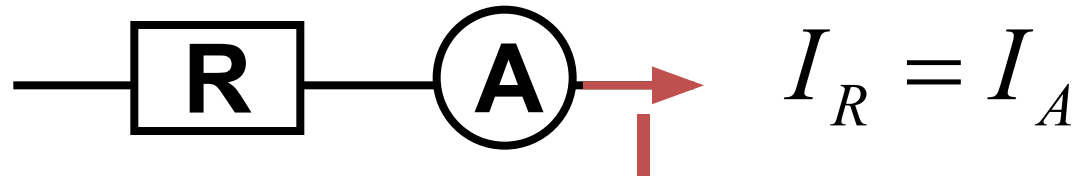
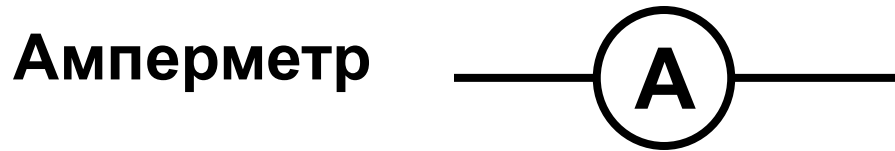
Законы параллельного соединения

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

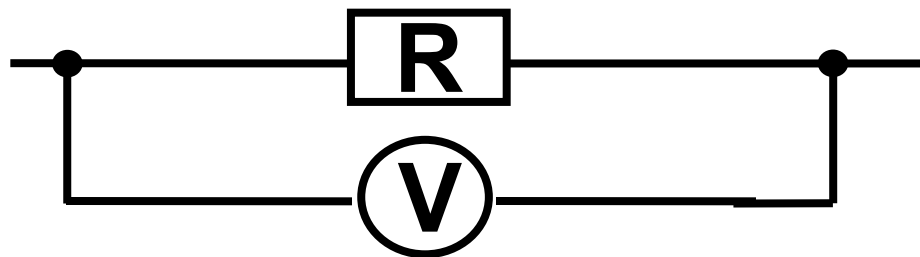
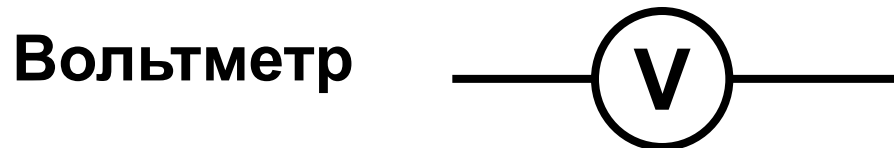
$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Измерение силы тока

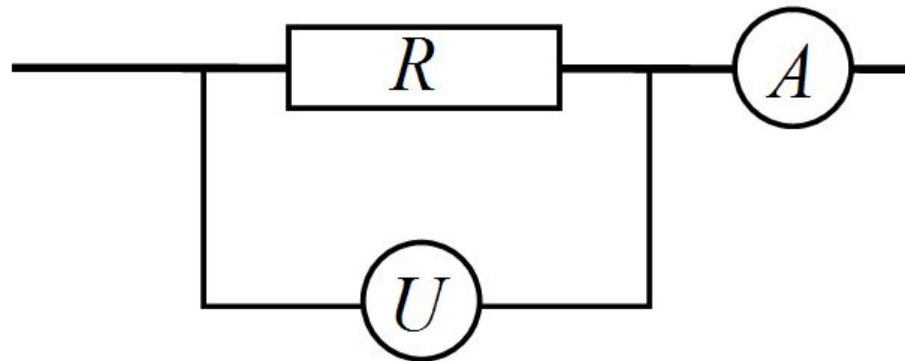


Измерение напряжения



Закон Ома для участка цепи

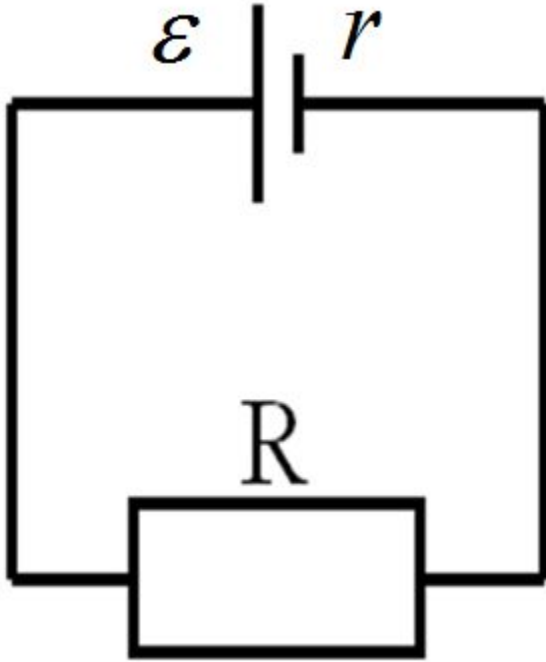
Немецкий физик Георг Ом (1826 г.)



Сила тока в участке цепи пропорциональна напряжению U на концах проводника и обратно пропорциональна сопротивлению R проводника

$$I = \frac{U}{R}$$

Закон Ома для замкнутой цепи



$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

ε – электродвижущая сила источника тока;

R – внешнее сопротивление, т.е. сопротивление всех внешних по отношению к источнику тока участков цепи;

r – внутреннее сопротивление источника тока

Работа постоянного тока

Для однородного участка цепи сопротивлением R , к концам которого приложено напряжение U , с учетом

$$I = \frac{q}{t} \quad I = \frac{U}{R} \quad A = qU$$

и закона Ома **работа тока** равна:

$$A = IUt$$

$$A = I^2 Rt$$

$$A = \frac{U^2}{R} t$$

Закон Джоуля - Ленца

Количество теплоты $Q=A$, выделяемое постоянным током

Мощность тока

Исходя из определения мощности $P = \frac{A}{t}$ с учетом
закона Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$

Мощность постоянного тока

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Единица мощности в СИ - *ватт* (Вт).

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ А} \cdot \text{В}$$

1 Вт – мощность проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А