

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Томский Политехнический Университет

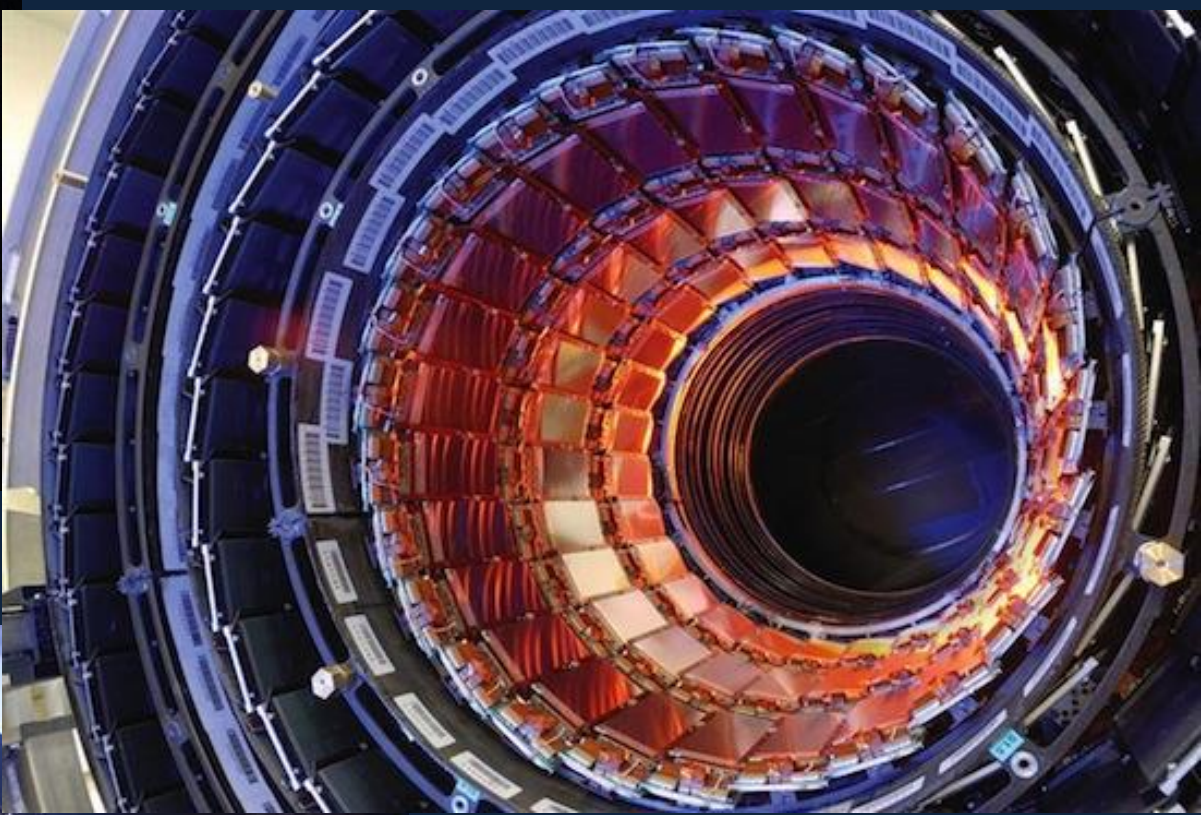


~2016~



NATURE

CERN



# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

-учение о движении и взаимодействии электрических зарядов.

-учение об электромагнитном поле и его связи с зарядами и токами.



### ▪ Концепция дальнего действия:

мгновенное распространение взаимодействий в пространстве на любых расстояниях. Электрические силы мгновенно передаются через пустоту, а само их существование является естественным свойством заряженных тел.  
*Ампер, Риман, Кирхгоф, Гельмгольц и др.*

### ▪ Концепция ближнего действия:

распространение взаимодействий с конечной скоростью в пространстве. Существует особый материальный носитель ЭФИР- это всепроникающая среда, посредством которой передаются электрические взаимодействия между зарядами и токами.  
*Фарадей, Максвелл, Лоренц и др.*

### ▪ Концепция поля:

взаимодействия передаются электромагнитным полем, которое есть самостоятельная материальная сущность, распределенная в пространстве. Существует особый материальный носитель электромагнитных сил – электромагнитное поле (концепция поля).

*Герц, Паунд, Ребка, Эйнштейн и др.*



# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ

## Закон сохранения электрического заряда

Заряду приписывали "текучесть". Существовала гипотеза о двух видах "электрических жидкостей" - положительной и отрицательной, взаимно притягивающихся, но отталкивающих себе подобную ( *Франклин, Дюфэ, Симмер, Фарадей* ).

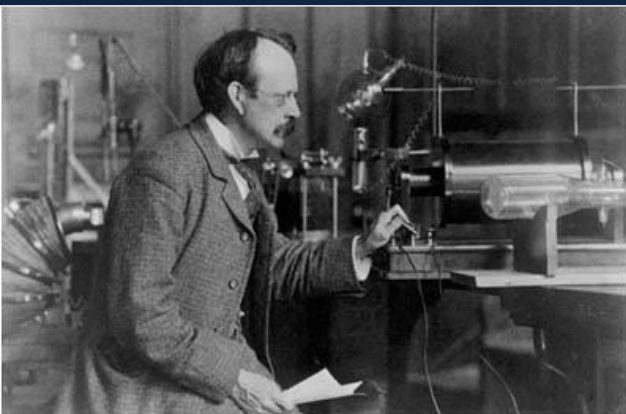
Количество накопившейся в теле "электрической жидкости" стали называть электрическим зарядом  $Q$  этого тела, а о его величине судили по степени электрического влияния на другое тело.

**Опытный факт:** электрический заряд не может быть уничтожен - при контакте двух заряженных тел он перераспределяется между ними.



# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ

## Закон сохранения электрического заряда



THE  
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN  
PHILOSOPHICAL MAGAZINE  
AND  
JOURNAL OF SCIENCE.  
[FIFTH SERIES.]  
OCTOBER 1897.

XI. Cathode Rays. By J. J. THOMSON, M.A., F.R.S.,  
Cavendish Professor of Experimental Physics, Cambridge\*.

THE experiments† discussed in this paper were undertaken in the hope of gaining some information as to the nature of the Cathode Rays. The most diverse opinions are held as to these rays; according to the almost unanimous opinion of German physicists they are due to some process in the ether to which—inasmuch as in a uniform magnetic field their course is circular and not rectilinear—no phenomenon hitherto observed is analogous: another view of these rays is that, so far from being wholly ætherial, they are in fact wholly material, and that they mark the paths of particles of matter charged with negative electricity. It would seem at first sight that it ought not to be difficult to discriminate between views so different, yet experience shows that this is not the case, as amongst the physicists who have most deeply studied the subject can be found supporters of either theory.

The electrified-particle theory has for purposes of research a great advantage over the ætherial theory, since it is definite and its consequences can be predicted; with the ætherial theory it is impossible to predict what will happen under any given circumstances, as on this theory we are dealing with hitherto

\* Communicated by the Author.

† Some of these experiments have already been described in a paper read before the Cambridge Philosophical Society (Proceedings, vol. ix. 1897), and in a Friday Evening Discourse at the Royal Institution ('Electrician', May 21, 1897).  
*Phil. Mag.* S. 5. Vol. 44. No. 269. Oct. 1897. Y

Reprinted from *Philosophical Magazine Series 5*, 44:269, 293–316.

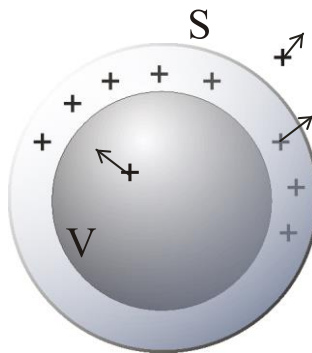
В 1897 году Дж.Дж. Томсон, исследуя катодные лучи, открыл электрон. Позднее Р. Милликен установил, что заряд любого тела кратен заряду электрона:

$$e = -1.803242 \times 10^{-10} (\text{СГС}_q)$$

Таким образом, полный заряд в некотором объеме  $V$

$$Q = \sum_{i \in V} e_i,$$

где  $i \in V$  означает что суммирование проводится по всем элементарным зарядам из объема  $V$ .



Если объем  $V$  окружен замкнутой поверхностью  $S$ , то закон сохранения электрического заряда означает, что  $Q$  может измениться только в том случае, когда заряды  $e_i$  пересекают поверхность  $S$ .

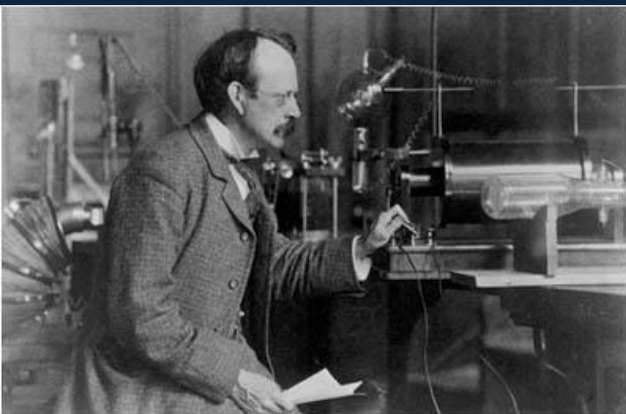
Сила электрического тока  $I$  - количество заряда, вытекающего из объема  $V$  за 1с:

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



# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ

## Закон сохранения электрического заряда



THE  
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN  
PHILOSOPHICAL MAGAZINE  
AND  
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

OCTOBER 1897.

XI. *Cathode Rays.* By J. J. THOMSON, M.A., F.R.S.,  
*Cavendish Professor of Experimental Physics, Cambridge\*.*

THE experiments† discussed in this paper were undertaken in the hope of gaining some information as to the nature of the Cathode Rays. The most diverse opinions are held as to these rays; according to the almost unanimous opinion of German physicists they are due to some process in the ether to which—inasmuch as in a uniform magnetic field their course is circular and not rectilinear—no phenomenon hitherto observed is analogous: another view of these rays is that, so far from being wholly ætherial, they are in fact wholly material, and that they mark the paths of particles of matter charged with negative electricity. It would seem at first sight that it ought not to be difficult to discriminate between views so different, yet experience shows that this is not the case, as amongst the physicists who have most deeply studied the subject can be found supporters of either theory.

The electrified-particle theory has for purposes of research a great advantage over the ætherial theory, since it is definite and its consequences can be predicted; with the ætherial theory it is impossible to predict what will happen under any given circumstances, as on this theory we are dealing with hitherto

\* Communicated by the Author.

† Some of these experiments have already been described in a paper read before the Cambridge Philosophical Society (Proceedings, vol. ix. 1897), and in a Friday Evening Discourse at the Royal Institution ('Electrician,' May 21, 1897).

*Phil. Mag.* S. 5. Vol. 44. No. 269. Oct. 1897. Y

Reprinted from *Philosophical Magazine Series 5*, 44:269, 293–316.

1. Элементарными носителями заряда являются положительно и отрицательно заряженные частицы. Электроны, протоны, ионы.

2. Суммарный заряд объема определяется:

$$Q = \sum_{i \in V} e_i,$$

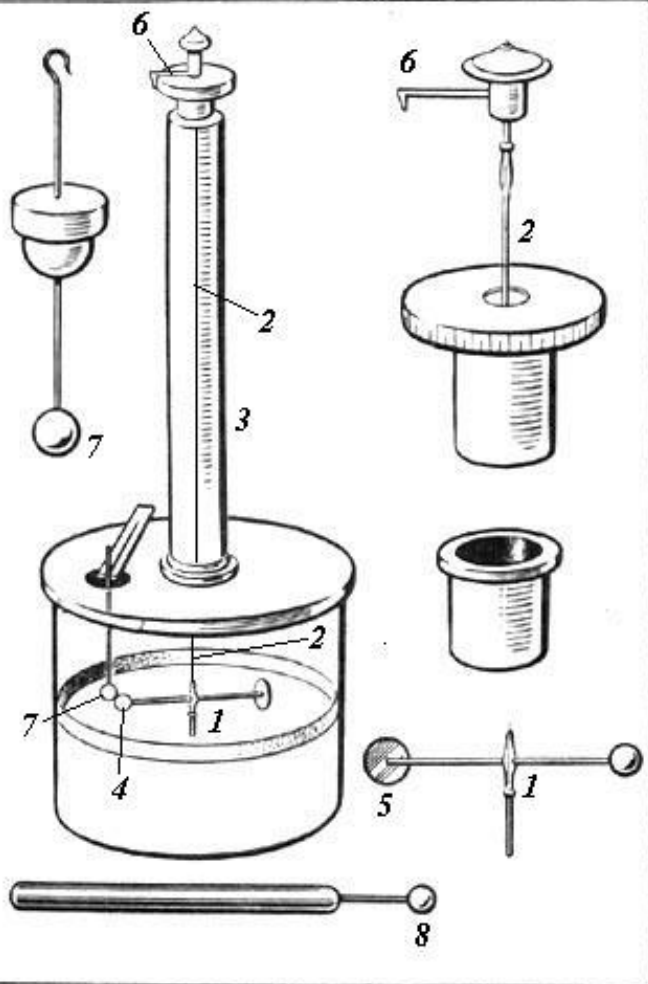
3. Изменение суммарного заряда со временем — ток заряда:

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



# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ

## Закон Кулона для электрических зарядов



Коромысло 1 было закреплено на шелковой нити 2 в стеклянном сосуде 3, из которого был откачан воздух. На коромысле крепился металлический шарик 4, против веса — 5. Верхний конец нити крепился с помощью специального зажима к стрелке крутильного микрометра 6 (см. схему справа вверху). В сосуд через специальное отверстие можно было помещать второй шарик 7, и тогда из-за взаимодействия шариков нить закручивалась, и силу взаимодействия можно было измерить по повороту стрелки микрометра. Шарики с определенным зарядом Кулон готовил, замыкая два из них через металлическую булавочную головку 8: при этом электрический заряд шариков делился пополам. Это, при достаточной аккуратности, позволяло получать шарики с различным отношением зарядов. С помощью своей установки Ш. Кулон измерял силы до  $10^{-11}$  Н, при этом убедившись, что сила отталкивания шариков обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и прямо пропорциональна их зарядам. В современном виде в системе единиц СГС этот закон имеет вид:

$$\vec{F}_{21} = + \frac{e_1 \cdot e_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}},$$

где  $e_1, e_2$  — величины точечных зарядов,  $r_{12}$  — вектор от первого заряда ко второму. В формуле выше записана сила, действующая на заряд 2 со стороны заряда 1, поэтому знак «плюс» перед всем выражением соответствует отталкиванию одноименных зарядов (ср. с законом всемирного тяготения).

СГС - абсолютная система единиц Гаусса.  
Сантиметр. Грамм. Секунда.

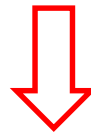




# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ

## Закон Кулона для электрических зарядов

$$\vec{F}_{21} = +e_1 \cdot e_2 \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}^3} = e_1 \cdot \vec{E}$$



$$\vec{E} = e \frac{\vec{r}}{r^3}$$

- напряженность электрического поля,  
создаваемого зарядом  $e$ .

1. Всякий неподвижный точечный заряд  $e$  окружен электрическим полем с напряженностью  $\vec{E}$ .
2. Напряженности от нескольких неподвижных тел складываются векторно. Следовательно, для электрических сил справедлив закон линейности взаимодействий, или **принцип суперпозиции**.

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ

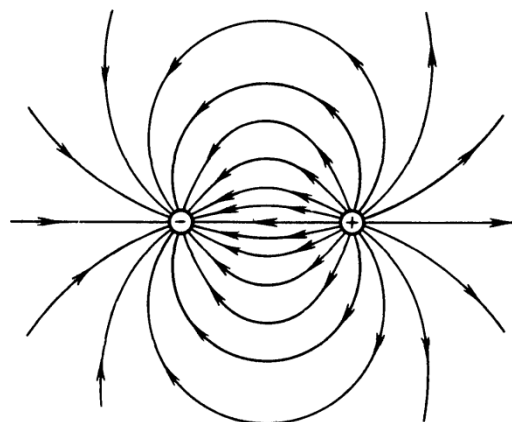
## Взаимодействие магнитов и токов



**WILLIAM GILBERT  
(1544-1603)**

Gilbert was born in the town of Colchester located in Essex, England on May 24, 1544. His family was part of the rising middle class, most of whom earned their fortunes as merchants. Gilbert began studying at St. John's College, Cambridge University, when he was 14 years old. There he received bachelor's, master's and doctoral degrees, completing his studies in 1569. His alma mater elected him as a fellow of the college and he began practicing as a physician in London.

**“DE MAGNETE, MAGNETICISQUE CORPORIBUS, ET DE MAGNO MAGNETE TELLURE”**. YEAR -1600. Гильберт создал первую теорию магнитных явлений. Он установил, что любые магниты имеют два полюса, при этом разноименные полюсы притягиваются, а одноименные отталкиваются. Проводя опыт с железным шаром, который взаимодействовал с магнитной стрелкой, впервые выдвинул предположение о том, что Земля является гигантским магнитом. Также он предположил идею о том, что магнитные полюсы Земли могут совпадать с географическими полюсами планеты.



**1.** Магнит имеет два полюса: положительный (северный) и отрицательный (южный).

**2.** Невозможно получить магнит с одним полюсом.

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ

## Взаимодействие магнитов и токов



### Charles-Augustin Coulomb

(1736-1806)

«Коллеж четырёх наций» (Коллеж Мазарини)

**1760** Военно-инженерная школа в Мезьере, лучшее высшее техническое учебное заведение XVIII века.

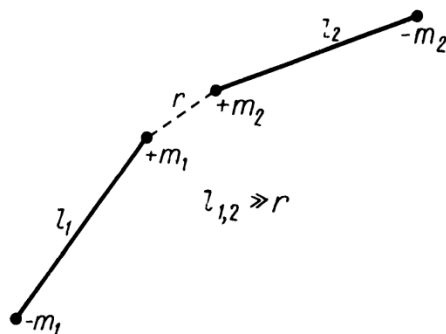
**1761** лейтенант. Направлен в Брест. Занимался

картографическими работами.

**С1762** служил в инженерных войсках на острове Мартиника в Форте Бурбон, Ла-Рошели и Шербуре.

**1781** Париж. Интендант вод и фонтанов.

После начала революции в **1789** году ушёл в отставку и переехал в своё поместье в Блуа.



Количественный закон взаимодействия магнитных полюсов был установлен

Кулоном в 1785 году одновременно с законом взаимодействия электрических зарядов.

Сила взаимодействия двух ближайших полюсов, имеющих одноименный заряд:

$$\vec{F}_{1,2}^m = m_1 m_2 \frac{\vec{r}}{r^3},$$

где  $m_1, m_2$  - магнитные заряды полюсов.

По аналогии с электрическим полем можно ввести магнитную индукцию.

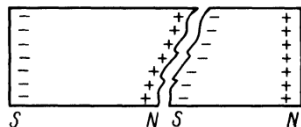
**Магнитная индукция** - сила, действующая на единичный магнитный заряд.

Точечный магнитный заряд  $m$  окружен магнитным полем с индукцией

$$\vec{B} = m \frac{\vec{r}}{r^3}.$$

В отличие от электрических зарядов магнитные заряды невозможно отделить от их антиподов.

С молекулярной точки зрения, если молекула - диполь (элементарный магнитик) с разноименными равными по величине зарядами на концах, то в любом объеме, заключающем какое-то число молекул суммарный магнитный заряд равен нулю:



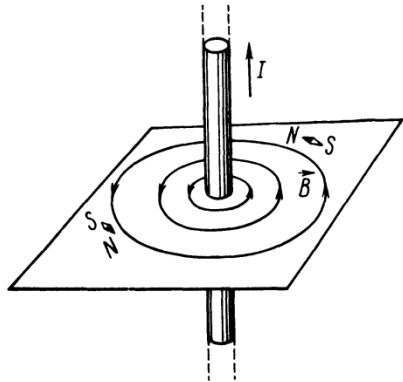
$$\sum_{i \in V} m_i = 0.$$



# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

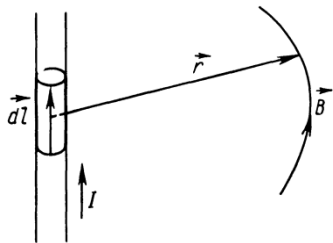
## Взаимодействие магнитов и токов.

Магнитное действие электрических токов.



- 1 Эрстед 1820год: Магнитная стрелка, поднесенная к проводнику ориентируется перпендикулярно направлению тока в проводнике.
- 2 Ж. Б. Био, Ф. Савара: Магнитное поле спадает обратно пропорционально расстоянию от провода.
- 3 П. С. Лаплас:каждый элемент тока создает магнитное поле, индукция которого меняется по закону  $\frac{1}{r^2}$ .

**Закон Био-Савара-Лапласа:** магнитная индукция элемента тока  $I d\vec{l}$



$$d\vec{B} = \frac{I}{c} [d\vec{l}, \vec{r}] \frac{1}{r^3},$$

где  $c$  - электродинамическая постоянная, имеющая размерность скорости.  $c=299792458$  м/с.

**Фарадей 1821 год. Ампер, Эрстед:**

Обнаружено действие магнитного поля на токи.

Сила, действующая в магнитном поле  $\vec{B}$  элемент тока, равна  $I d\vec{l} \times \vec{B}$

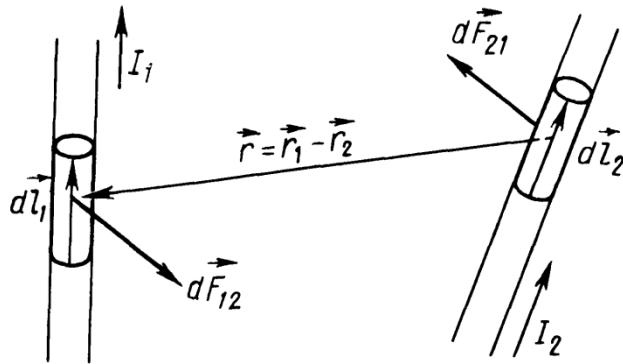
$$d\vec{F} = \frac{I}{c} [d\vec{l}, \vec{B}].$$

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Взаимодействие магнитов и токов.

**Закон взаимодействия двух элементов тока** может быть выведен из закона Био-Савара-Лапласа и закона Фарадея:

т.к. проводник с током создает вокруг поле с индукцией  $B$  (БСЛ), то второй поднесенный проводник попадает в это магнитное поле, где на него действует сила Фарадея.



$$d\vec{F}_{12} = \frac{I_1 I_2}{c^2} [d\vec{l}_1, [d\vec{l}_2, \vec{r}]] \frac{1}{r^3}.$$

Со стороны второго проводника создается аналогичное магнитное поле, которое действует на противоположный элемент с током с силой

$$d\vec{F}_{21} = \frac{I_1 I_2}{c^2} [d\vec{l}_2, [d\vec{l}_1, \vec{r}]] \frac{1}{r^3}.$$

Согласно третьему закону механики, сила действия равна силе противодействия, однако, в случае незамкнутых токов третий закон механики не выполняется:

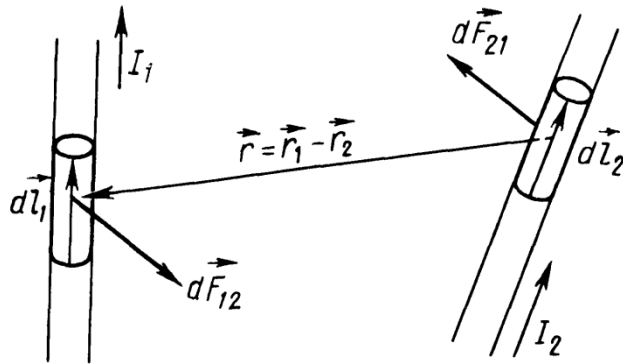
$$d\vec{F}_{12} + d\vec{F}_{21} = \frac{1}{c^2} I_1 I_2 \left( d\vec{l}_2 (d\vec{l}_1, \vec{r}) - d\vec{l}_1 (d\vec{l}_2, \vec{r}) \right) \frac{1}{r^3} \neq 0. \quad !!!$$

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Взаимодействие магнитов и токов.

**Закон взаимодействия двух элементов тока** может быть выведен из закона Био-Савара-Лапласа и закона Фарадея:

т.к. проводник с током создает вокруг поле с индукцией  $B$  (БСЛ), то второй поднесенный проводник попадает в это магнитное поле, где на него действует сила Фарадея.



$$d\vec{F}_{12} = \frac{I_1 I_2}{c^2} [d\vec{l}_1, [d\vec{l}_2, \vec{r}]] \frac{1}{r^3}.$$

Со стороны второго проводника создается аналогичное магнитное поле, которое действует на противоположный элемент с током с силой

$$d\vec{F}_{21} = \frac{I_1 I_2}{c^2} [d\vec{l}_2, [d\vec{l}_1, \vec{r}]] \frac{1}{r^3}.$$

Согласно закону сохранения заряда все реальные токи должны быть замкнутыми. При взаимодействии двух замкнутых контуров  $C_1$  и  $C_2$  действие уже равно противодействию, поэтому

$$\oint_C (d\vec{l} \vec{\nabla}) \varphi = 0,$$

Сумма сил может быть записана:

$$d\vec{F}_{12} + d\vec{F}_{21} = -\frac{I_1 I_2}{c^2} \left( d\vec{l}_2 (d\vec{l}_1, \vec{\nabla}_1) + d\vec{l}_1 (d\vec{l}_2, \vec{\nabla}_2) \right) \frac{1}{r},$$

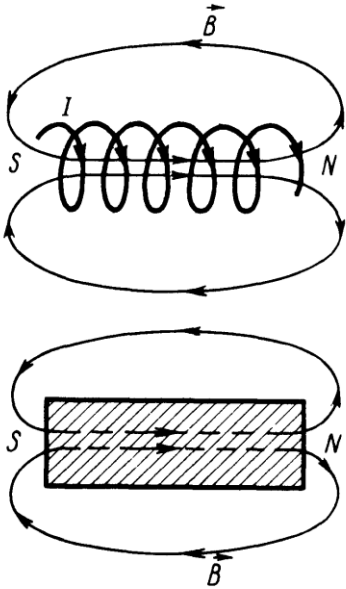
Сумма сил должна быть проинтегрирована по обоим замкнутым контурам. Результирующее значение интегралов должно равняться нулю:

$$\oint_{C_1} \oint_{C_2} (d\vec{F}_{12} + d\vec{F}_{21}) = 0.$$

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Взаимодействие магнитов и токов.

### Закон Ампера.



Магнит эквивалентен системе замкнутых токов.

Катушка с током ведет себя как прямой магнит.

Круговой ток эквивалентен магнитному листку.

Магнитные заряды не существуют, единственным источником магнитного поля является электрический ток.

Определять магнитное поле физически разумно из закона Ампера:

$$d\vec{F} = \frac{I}{c} [d\vec{l}, \vec{B}].$$

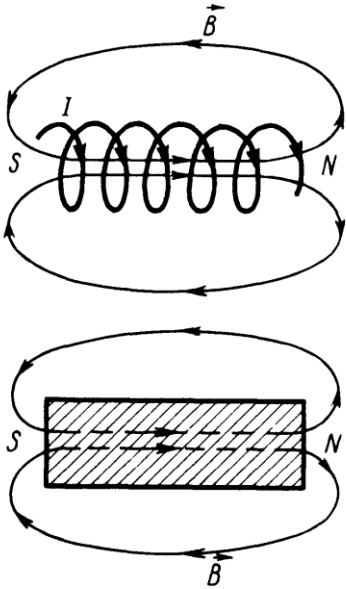
Физическая интерпретация:

магнитная индукция – сила, действующая на элементарный ток.

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Взаимодействие магнитов и токов.

### Закон Ампера.



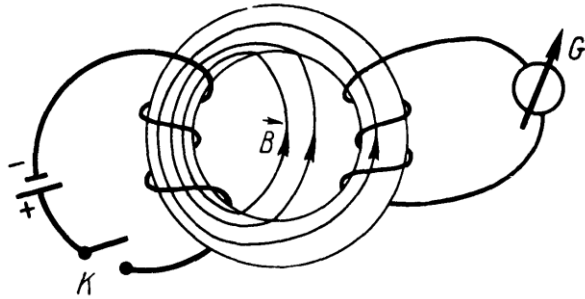
Работа, совершаемая магнитным полем над единичным магнитным зарядом при обнесении его вокруг постоянного тока  $I$  по любому замкнутому контуру  $C$ , ориентированному по току, равна :

$$\oint_C (\vec{B}, d\vec{l}) = \frac{4\pi}{c} I.$$



# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Закон электромагнитной индукции Фарадея.



В 1831 году Майкл Фарадей экспериментально обнаружил единство и взаимосвязь электрического и магнитных полей.

Принимая во внимание неотъемлемость этих характеристик можно говорить об объекте качественно новом, называемом **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ**.

Железное кольцо с двумя обмотками.

В одной включен гальванометр, а в другой – источник тока. Стрелка гальванометра показывала наличие тока в проводнике, при замыкании ключа в соседнем. Т.е. во втором проводнике, не имевшем никакого источника тока возникает наведенный электрический ток.

Токи, появившиеся таким образом Фарадей назвал как **ИНДУКЦИОННЫЕ ТОКИ**.

**ФАРАДЕЙ:** линии магнитной индукции, возникавшие вблизи первичной обмотки при замыкании ключа К, расширяются и стремятся заполнить железное кольцо, и пересекают при этом вторичную обмотку.

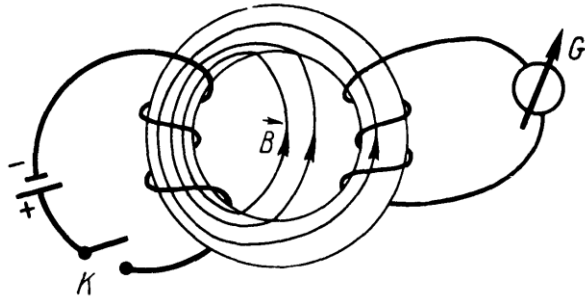
Протекший ток  $\Delta Q$  пропорционален числу пересеченных силовых линий  $\Delta \Phi$  и обратно пропорционален электрическому сопротивлению проводника  $R$ , т.е.

**ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ:**

$$R\Delta Q = \frac{1}{c} \Delta \Phi.$$

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Закон электромагнитной индукции Фарадея.



**ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ:**

$$R\Delta Q = \frac{1}{c} \Delta\Phi.$$

Согласно закону Ома сопротивление можно выразить:

$$R = \frac{\mathcal{E}}{I},$$

где  $\mathcal{E}$ - э.д.с. – электродвижущая сила, равная работе, которую совершает поле, перемещая единичный заряд по замкнутому контуру.

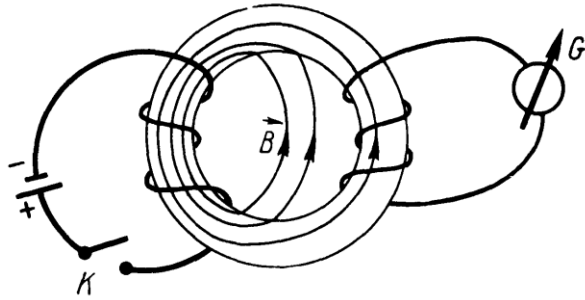
$I$  – сила тока в контуре.

Максвелл ввел понятие магнитного потока, связанного с контуром  $C$ :

$$\Phi = \int_S (\vec{B}, \vec{n}) dS,$$

где  $S$ – натянутая на контур  $C$  правоориентированная поверхность.

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ. Закон электромагнитной индукции Фарадея.



ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ:

$$R\Delta Q = \frac{1}{c} \Delta\Phi.$$

Если отождествить  $\Delta\Phi$  с приращением  $\Phi$ , то учитывая

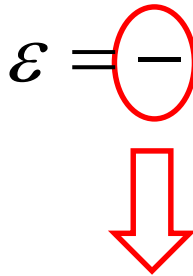
$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -I, \quad R = \frac{\varepsilon}{I}$$

получим *максвелловскую формулировку закона электромагнитной индукции Фарадея:*

$$\varepsilon = -\frac{1}{c} \frac{\partial\Phi}{\partial t}.$$

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Закон электромагнитной индукции Фарадея.

$$\varepsilon = - \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$


### Правило Ленца:

Индукционный ток направлен противоположно направлениям линий магнитного поля (магнитной индукции), т.е. противоположно направлению вектора  $\vec{B}$ .

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Электромагнитные свойства вещества.

Поведение вещества в электромагнитном поле определяется молекулярной структурой вещества. Входящие в состав вещества заряды могут иметь:

1). Связанное состояние и оставаться в связанном состоянии при взаимодействии вещества с полем;

Связанными заряды остаются в электронейтральных молекулярных газах.

или

2). Под действием электромагнитного поля заряды могут переходить от одной молекулы к другой, т.е. быть свободными.

Свободными являются электроны в металлах, ионы в электролитах и ионизованных газах.

Токи проводимости образуют свободные электроны или ионы.



# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Электромагнитные свойства вещества.

Токи проводимости в случаях малости внешнего электрического поля по сравнению с внутримолекулярным полем хорошо описываются линейным законом Ома:

$$I = \frac{U_{12}}{R_{12}},$$

где  $U_{12}$  - напряжение, приложенное к образцу между точками 1 и 2

$$U_{12} = \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}).$$

$$\frac{1}{R_{12}}$$

— проводимость.

**Удельная электрическая проводимость** (обозначается  $\sigma$ ) – это проводимость образца длиной 1 см и площадью поперечного сечения  $1\text{см}^2$ .

В общем случае  $\sigma$  зависит от температуры  $T$ , напряженности  $\vec{E}$ , и др.

ДИЭЛЕКТРИКИ

$$\sigma < 10^2 \text{ с}^{-1}$$

ПОЛУПРОВОДНИКИ

$$10^2 \text{ с}^{-1} < \sigma < 10^{16} \text{ с}^{-1}$$

ПРОВОДНИКИ

$$\sigma > 10^{16} \text{ с}^{-1}$$

# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Электромагнитные свойства вещества.

Диэлектрики во внешнем поле  $\vec{E}_0$  :

происходит ослабление напряженности поля внутри диэлектрика

$$\vec{E}_0 = \varepsilon \vec{E},$$

для сильных полей и  
изотропных сред

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость вещества.

$$E_0^i = \varepsilon^{ik}(\vec{E}) E_k,$$

в общем случае

тут  $\varepsilon^{ik}$  - тензор диэлектрической проницаемости.

Для газов

$$(\varepsilon - 1) \sim 10^{-4} \div 10^{-6}$$

Жидкости и кристаллы

$$\varepsilon \sim 10^2$$

Сегнетоэлектрики

$$\varepsilon \sim 10^4$$

содержат домены с высокими  
внутренними полями



# 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ОПЫТНЫХ ФАКТОВ.

## Электромагнитные свойства вещества.

Вещества, искажающие приложенное внешнее магнитное поле  $\vec{B}_0$ , называются магнетиками.

Принято выражать внутреннее поле образца  $\vec{B}$  через внешнее  $\vec{B}_0$ , т.е.

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0, \quad \text{где } \mu \text{ — магнитная проницаемость вещества.}$$

**ДИАМАГНЕТИКИ:**  $(1 - \mu) \sim 10^{-6} \div 10^{-4}$

Диамагнитный эффект - ослабление внешнего магнитного поля по средством возникновения индукционных токов в веществе, которые по правилу Ленца создают магнитные поля противоположной направленности по отношению к внешнему.

**ПАРАМАГНЕТИКИ:**  $(1 - \mu) \sim 10^{-4} \div 0$

Парамагнитный эффект – усиление внешнего поля по средством молекулярных «замкнутых циклических» токов, которые создают переменные магнитные поля, ориентирующиеся по внешнему и, как следствие, усиливают последнее.

**ФЕРРОМАГНЕТИКИ:**  $\mu \sim 10^3$

Ферромагнитный эффект – упорядочение магнитных моментов атомных носителей магнетизма. Параллельная ориентация магнитных моментов обусловлена межэлектронным обменным взаимодействием.





