



*Основные физические  
явления,  
используемые в  
работе ТСО*


**ТЕМА 3. Лекция**

## УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основные характеристики электрического поля. Электрическая емкость.
2. Основные характеристики магнитного поля. Магнитная индукция. Индуктивность, взаимная индуктивность.
3. Основные характеристики электромагнитных волн (интерференция, дифракция, дисперсия) и СО на их основе.
4. Радиоволновые системы обнаружения и физические явления, используемые при их создании.
5. Физические явления в создании сейсмологических вибрационных СО.

## *Учебный вопрос №1*

- **Основные характеристики электрического поля.  
Электрическая емкость.**



Электромагнитное поле - особый вид материи:

- посредством которого осуществляются электромагнитные взаимодействия;
- представляющий собой единство электрического и магнитного полей.
- В каждой точке электромагнитное поле характеризуется:
  - напряженностью и потенциалом электрического поля; а также
  - индукцией магнитного поля.

# 1.1. Электрический заряд. Закон Кулона

**Электрический заряд  $Q$**  – это физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в электромагнитные силовые взаимодействия.

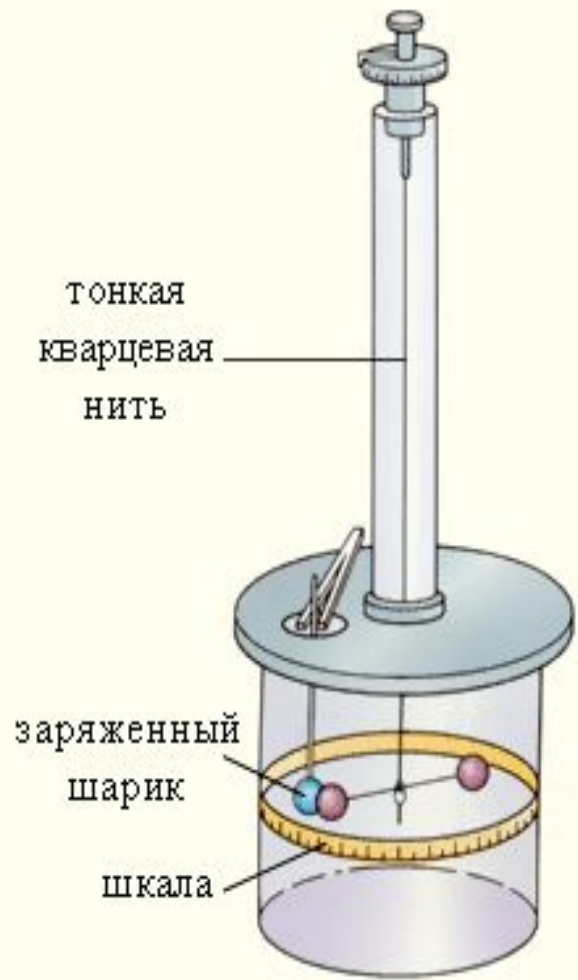
Совокупность всех известных экспериментальных фактов позволяет сделать следующие выводы:

- Существует два рода электрических зарядов, условно названных положительными и отрицательными.
- Заряды могут передаваться (например, при непосредственном контакте) от одного тела к другому. В отличие от массы тела электрический заряд не является неотъемлемой характеристикой данного тела. Одно и то же тело в разных условиях может иметь разный заряд.
- Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.

Одним из фундаментальных законов природы является экспериментально установленный *закон сохранения электрического заряда*.

- В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной:

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



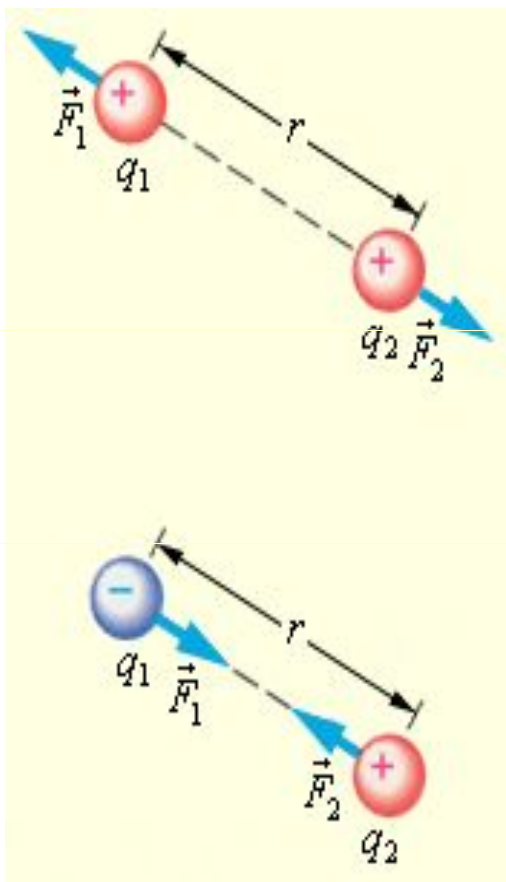
Впервые закон взаимодействия неподвижных зарядов был установлен французским физиком Ш. Кулоном (1785 г.). В своих опытах Кулон измерял силы притяжения и отталкивания заряженных шариков с помощью сконструированного им прибора – крутильных весов, отличавшихся чрезвычайно высокой чувствительностью.

Идея измерений основывалась на блестящей догадке Кулона о том, что если заряженный шарик привести в контакт с точно таким же незаряженным, то заряд первого разделится между ними поровну. Таким образом, был указан способ изменять заряд шарика в два, три и т. д. раз.

В опытах Кулона измерялось взаимодействие между шариками, размеры которых много меньше расстояния между ними.

Такие заряженные тела принято называть точечными зарядами.

***Точечным зарядом называют заряженное тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.***



## Закон Кулона:

Силы взаимодействия неподвижных зарядов прямо пропорциональны произведению модулей зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними:

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

В Международной системе СИ за единицу заряда принят **кулон** (Кл).

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

Коэффициент  $k$  в системе СИ обычно записывают в виде:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$  – *электрическая постоянная*.



## 1.2. Электрическое поле

- Каждое заряженное тело создает в окружающем пространстве *электрическое поле*.
- Электрическое поле - особая форма существования материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между покоящимися или движущимися электрическими зарядами.
- Главное свойство электрического поля – действие на электрические заряды с некоторой силой.
- Взаимодействие заряженных тел осуществляется не непосредственным их воздействием друг на друга, а через электрические поля, окружающие заряженные тела.

# ***Напряженность электрического поля***

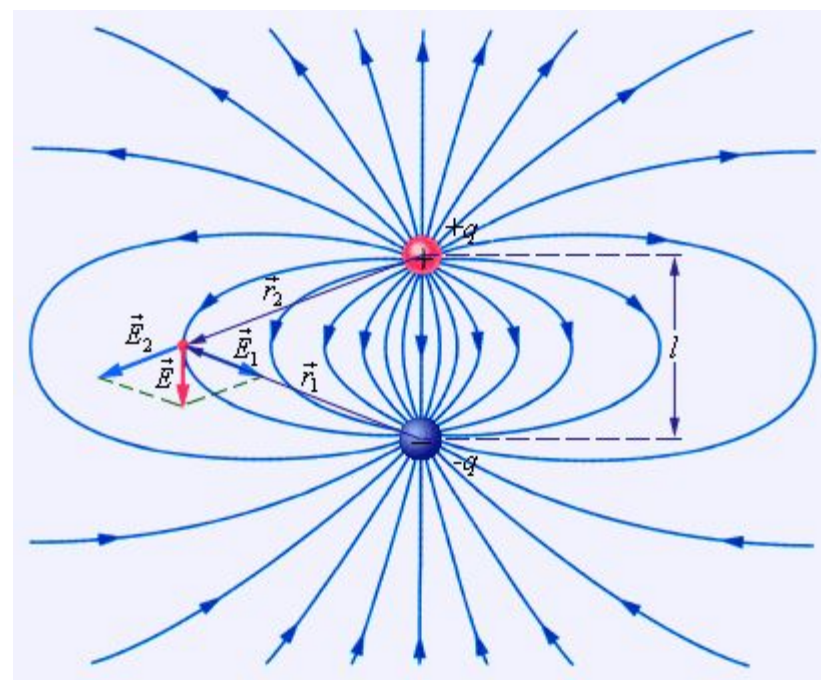
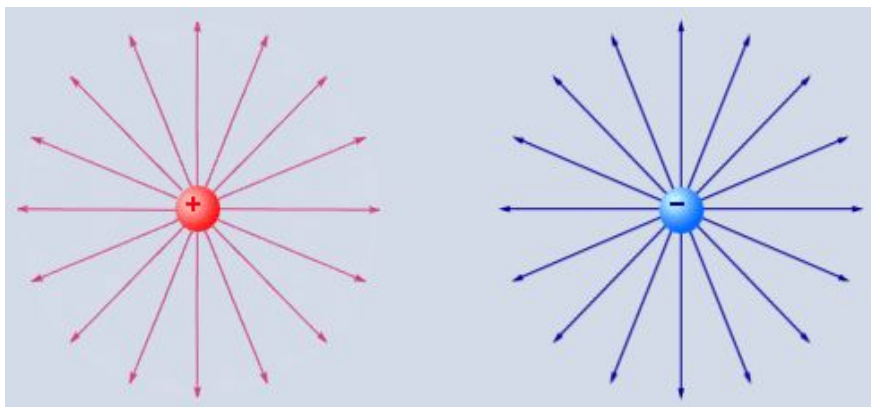
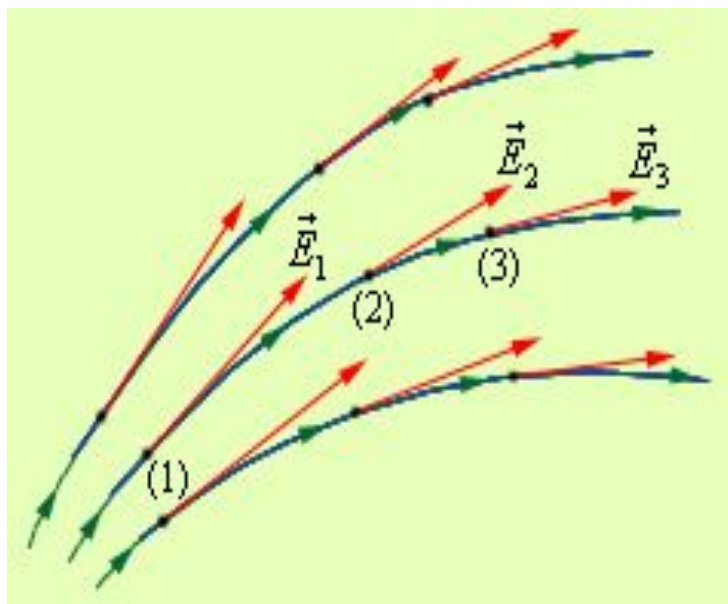
- **Напряженность электрического поля** - физическая величина, равная отношению силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого

заряда:

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

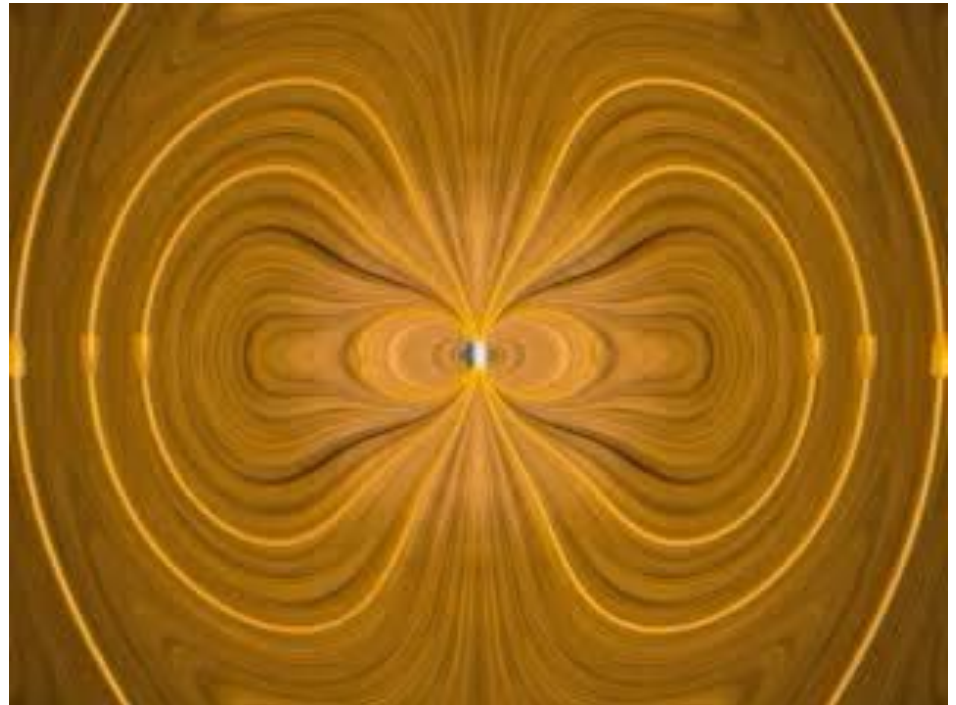
- **Напряженность электрического поля** – векторная физическая величина.
- **Направление вектора совпадает в каждой точке пространства с направлением силы, действующей на положительный заряд.**

Для наглядного представления электрического поля используют **силовые линии**. Эти линии проводятся так, чтобы направление вектора в каждой точке совпадало с направлением касательной к силовой линии. При изображении электрического поля с помощью силовых линий, их густота должна быть пропорциональна модулю вектора напряженности поля.

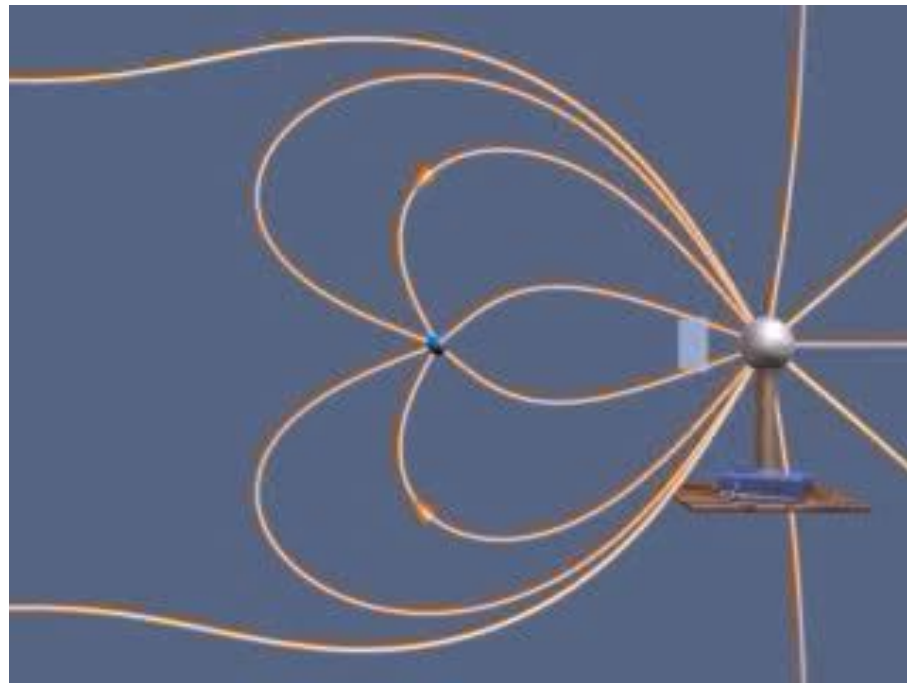


# Излучение электрического диполя

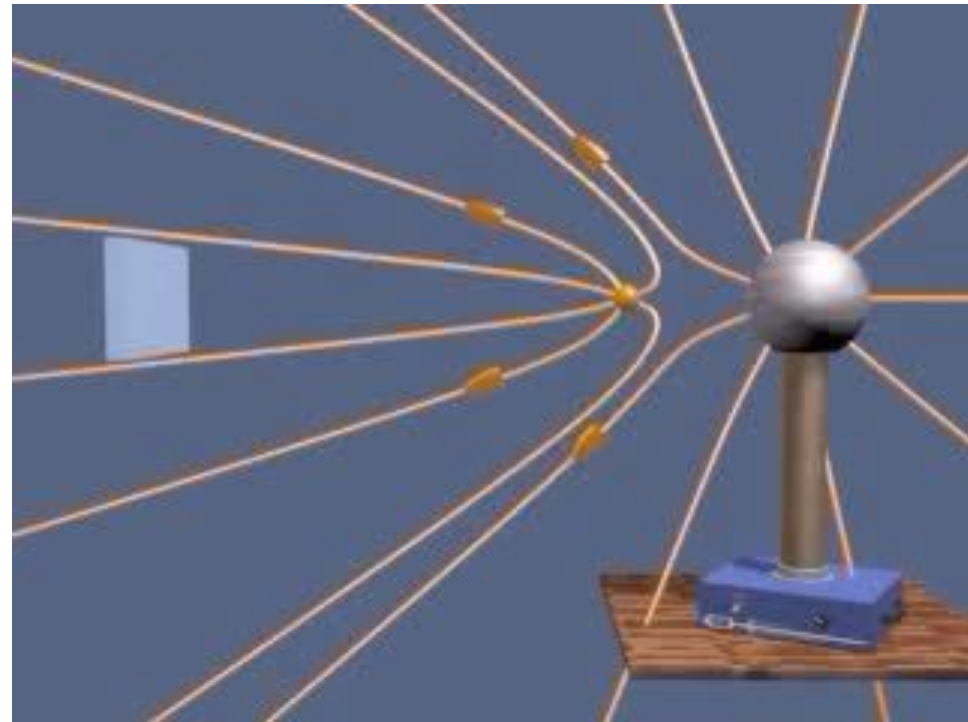
Анимация демонстрирует распространение излучения от центра диполя. Дипольный момент вектора всегда направлен вертикально, а его величина изменяется синусоидально с амплитудой 10%. На рисунке представлены области квазистатической зоны, зоны индукции и зоны излучения. Движения силовых линий - в направлении локального вектора.



Движение отрицательно заряженной частицы, притягиваемой положительно заряженной сферой ускорителя Ван де Граффа. Когда заряд движется от сферы и замедляется, его кинетическая энергия уменьшается, и энергия сохраняется в локальном электрическом поле, в то время как само поле растягивается. Когда заряд перемещается к сфере и ускоряется, его кинетическая энергия увеличивается, поскольку энергия, предварительно сохраненная в локальном электрическом поле, освобождается.



Движение положительно заряженной частицы, отраженной положительно заряженной сферой ускорителя Ван де Граффа. Когда заряд перемещается к сфере и замедляется, его кинетическая энергия уменьшается, и энергия хранится в локальном электрическом поле, т.к. оно сжато. Когда заряд движется от сферы и ускоряется, его кинетическая энергия увеличивается, поскольку энергия, предварительно сохраненная в сжатом локальном электрическом поле, освобождается.



## Потенциал электростатического поля

Потенциал электростатического поля - энергетическая характеристика точки поля.

Потенциал поля в данной точке пространства равен работе, которую совершают электрические силы при удалении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

$$\varphi_{\infty} = \frac{A_{\infty}}{q}$$

В заданной точке поля:


- потенциал электростатического поля равен потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в эту точку;
- потенциал электростатического поля, создаваемого несколькими зарядами, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых в этой точке каждым из зарядов.

В СИ потенциал электростатического поля измеряется в вольтах.

## Разность потенциалов

- Разность потенциалов - скалярная величина, равная отношению работы электрического поля по перемещению положительного заряда из одной точки поля в другую точку к величине этого заряда. В СИ разность потенциалов измеряется в вольтах.





**Электрическое напряжение** - скалярная величина, численно равная работе, совершаемой суммарным полем сторонних и кулоновских сил при перемещении единичного положительного заряда на участке электрической цепи.

Единицей измерения электрического напряжения в СИ является вольт.

# Електроємкость. Конденсатори

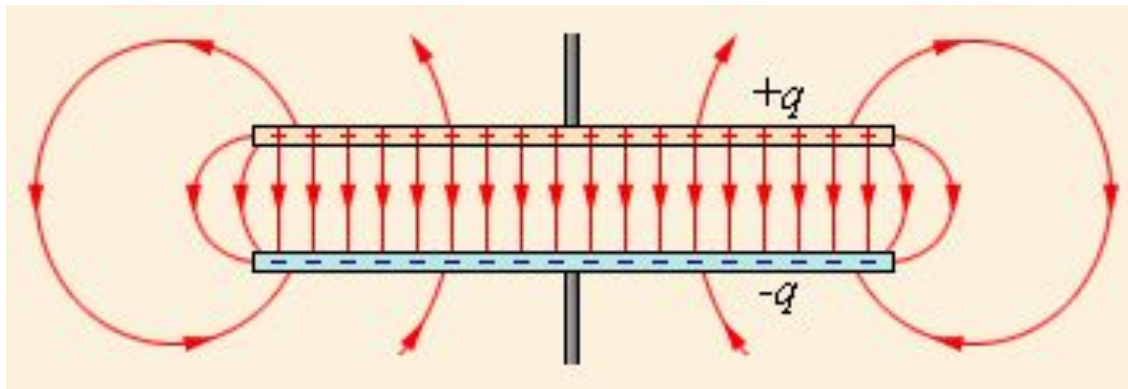
- Електроємкостю системи з двох провідників називається фізична величина, визначається як відношення заряду  $q$  одного з провідників до різниці потенціалів  $\Delta\phi$  між ними:

$$C = \frac{q}{\Delta\phi} = \frac{q}{U}$$

В системі СІ одиниця електроємкості - **фарад** (Ф):

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$$

- Величина емкости зависит от формы и размеров проводников и от свойств диэлектрика, разделяющего проводники. Существуют такие конфигурации проводников, при которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства.
- Такие системы называются **конденсаторами**, а проводники, составляющие конденсатор, называются **обкладками**.
- Простейший конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется **плоским**.



## формула для емкости плоского конденсатора

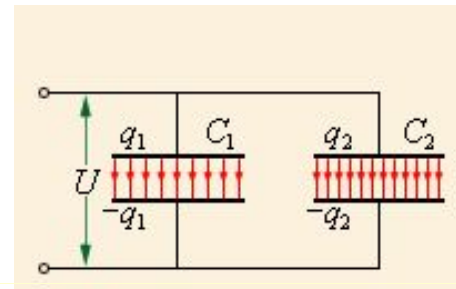
$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}.$$

Емкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластин (обкладок) и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Если пространство между обкладками заполнено диэлектриком, емкость конденсатора увеличивается в  $\varepsilon$  раз:

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

Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов. При **параллельном соединении** конденсаторов напряжения на конденсаторах одинаковы:  $U_1 = U_2 = U$ , а заряды равны  $q_1 = C_1U$  и  $q_2 = C_2U$ . Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор емкости  $C$ , заряженный зарядом  $q = q_1 + q_2$  при напряжении между обкладками равном  $U$ . Отсюда следует

$$C = \frac{q_1 + q_2}{U} \text{ или } C = C_1 + C_2$$

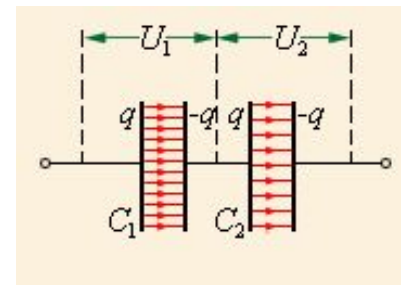


**Таким образом, при параллельном соединении емкости складываются**

При последовательном соединении одинаковыми оказываются заряды обоих конденсаторов:  $q_1 = q_2 = q$ , а напряжения на них равны и такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом  $q$  при напряжении между обкладками  $U = U_1 + U_2$ . Следовательно


$$C = \frac{q}{U_1 + U_2} \text{ или } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

**При последовательном соединении конденсаторов складываются обратные величины емкостей.**



# **Учебный вопрос №2**


- **Основные характеристики магнитного поля. Магнитная индукция. Индуктивность, взаимная индуктивность.**



Магнитное поле - особая форма существования материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами.

Магнитное поле:

- является формой электромагнитного поля;
- непрерывно в пространстве;
- порождается движущимися зарядами;
- обнаруживается по действию на движущиеся заряды;
- описывается уравнениями Максвелла.



Магнитное поле характеризуется воздействием на движущуюся электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и ее скорости.

***Основные характеристики магнитного поля:***

- **Напряженность магнитного поля.**
- **Магнитная индукция.**
- **Магнитный поток.**

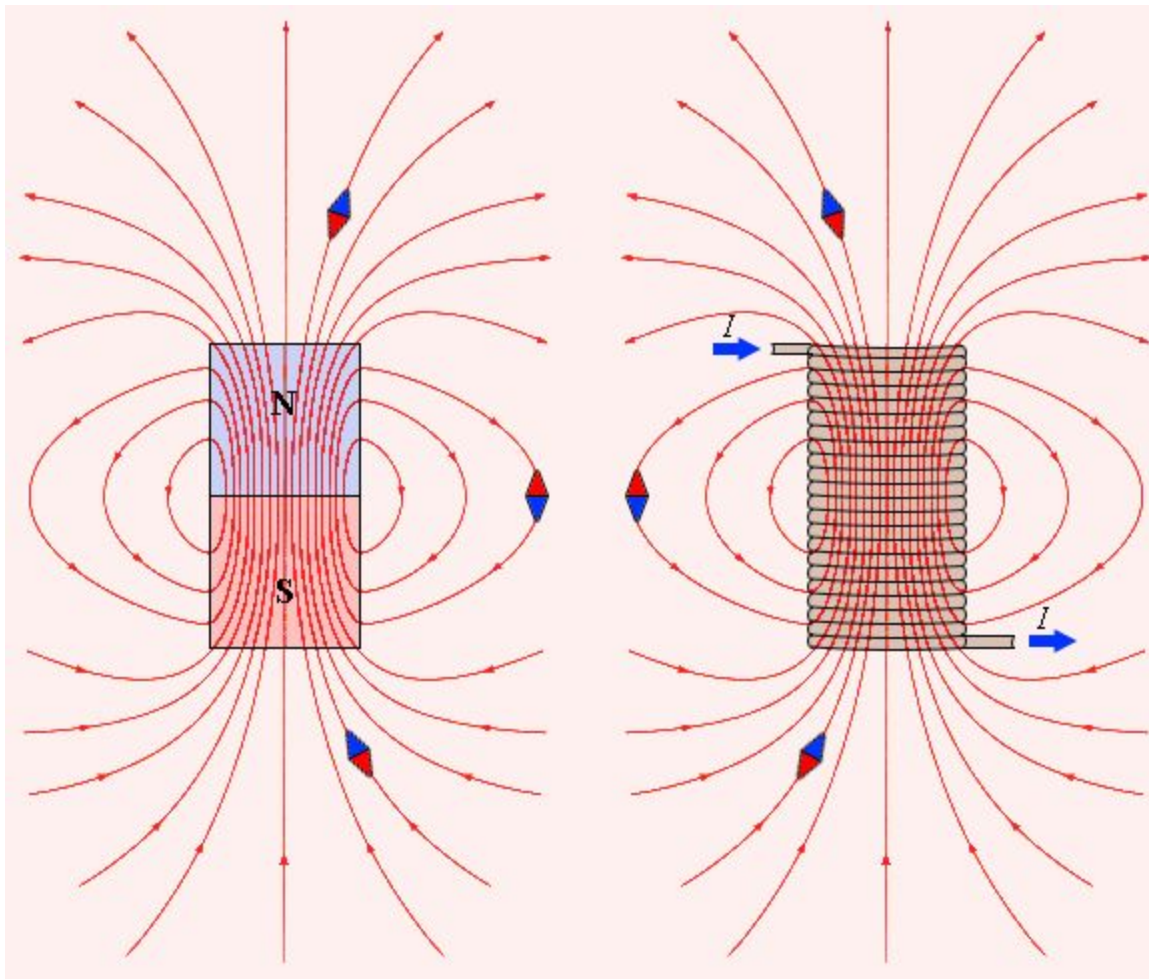


**Напряженность магнитного поля** - векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на магнитный полюс носителя магнитного момента со стороны магнитного поля.

- Численно напряженность магнитного поля равна отношению силы, действующей на магнитный полюс носителя магнитного момента к магнитному потоку истока внешнего поля соответствующего полюса диполя.
- Напряженность магнитного поля имеет положительное направление, совпадающее с направлением силы, действующей на исток магнитной индукции.

## Линии магнитной индукции

- Линии магнитной индукции - воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке.
- Линии магнитной индукции замкнуты, не пересекаются между собой и могут быть проведены через любую точку магнитного поля.



- **Магнитная индукция** - векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся или смещающуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля в заданной точке. Модуль и направление вектора магнитной индукции определяется по влиянию магнитного поля на рамку с током, помещаемую в заданную точку магнитного поля.
- **Магнитная индукция** – силовая характеристика магнитного поля в веществе.
- Магнитная индукция  $B$  определяется из соотношения:  **$B = \mu \mu_0 H$** ,  
где:  $\mu$  – магнитная проницаемость;  
 $\mu_0$  – магнитная постоянная;  
 $H$  – напряженность намагничивающего поля

- Для того, чтобы количественно описать магнитное поле, нужно указать способ определения не только направления вектора  $\vec{B}$  но и его модуля. Проще всего это сделать, внося в исследуемое магнитное поле проводник с током и измеряя силу, действующую на отдельный прямолинейный участок этого проводника.
- Как показали опыты Ампера, сила, действующая на участок проводника, пропорциональна силе тока  $I$ , длине  $\Delta l$  этого участка и синусу угла  $\alpha$  между направлениями тока и вектора магнитной индукции:  **$F \sim I \Delta l \sin \alpha$ .**
- **Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального значения силы Ампера, действующей на прямой проводник с током, к силе тока  $I$  в проводнике и его длине  $\Delta l$ :**

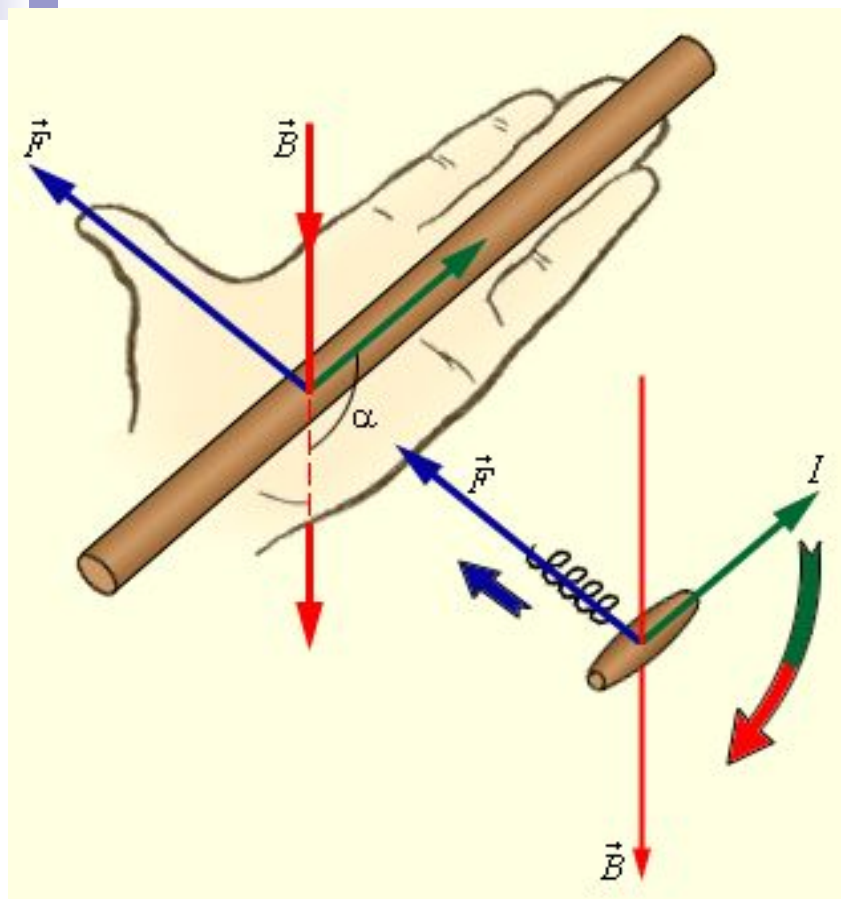
$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}$$

- В общем случае сила Ампера выражается соотношением (**законом Ампера**)

$$F = IB\Delta l \sin \alpha.$$

- В системе единиц СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица называется **тесла** (Тл).

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

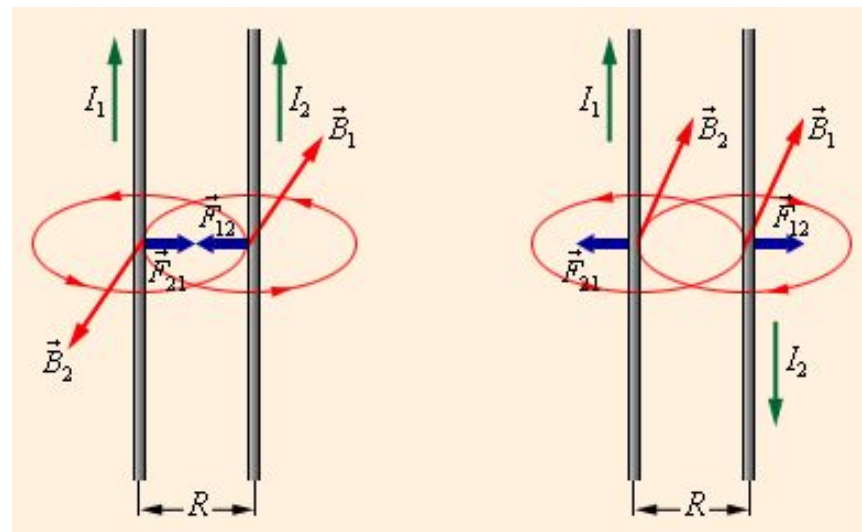
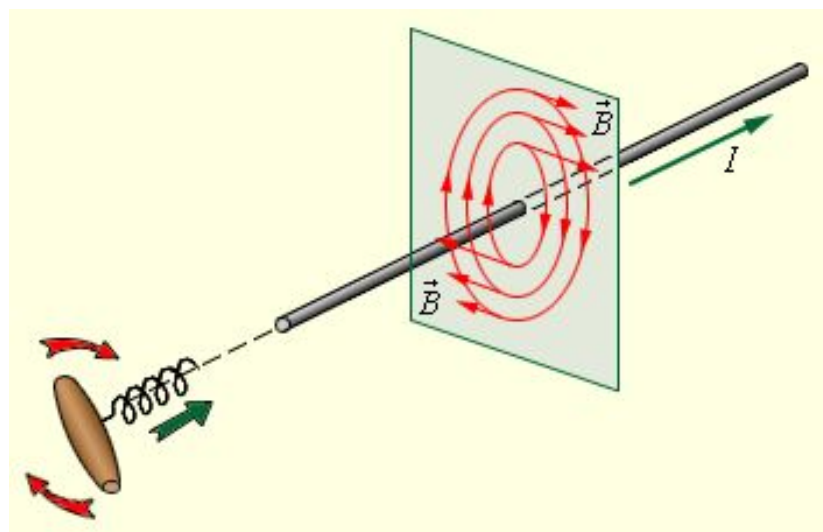


Сила Ампера направлена перпендикулярно вектору магнитной индукции и направлению тока, текущего по проводнику.

Для определения направления силы Ампера обычно используют **правило левой руки**: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник

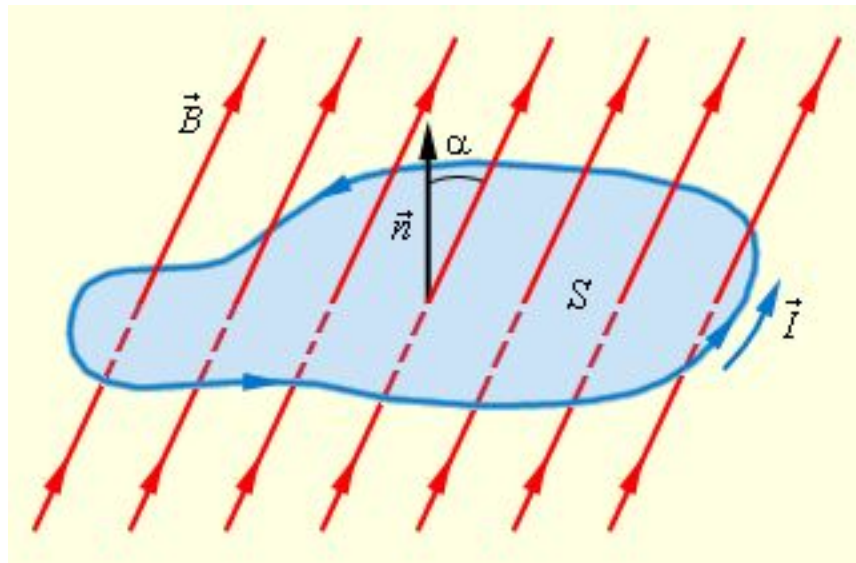
Если угол  $\alpha$  между направлениями вектора и тока в проводнике отличен от  $90^\circ$ , то для определения направления силы Ампера более удобно пользоваться **правилом буравчика**: воображаемый буравчик располагается перпендикулярно плоскости, содержащей вектор и проводник с током, затем его рукоятка поворачивается от направления тока к направлению вектора. Поступательное перемещение буравчика будет показывать направление силы Ампера

Для определения направления вектора магнитного поля прямолинейного проводника также можно пользоваться правилом буравчика: направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением вектора  $\vec{B}$  если при вращении буравчик перемещается в направлении тока



- **Магнитный поток** – поток вектора магнитной индукции через какой-либо контур (плоскую поверхность площадью  $S$ ), измеряемый в веберах (Вб):  **$\Phi = BS \cos \alpha$** ,

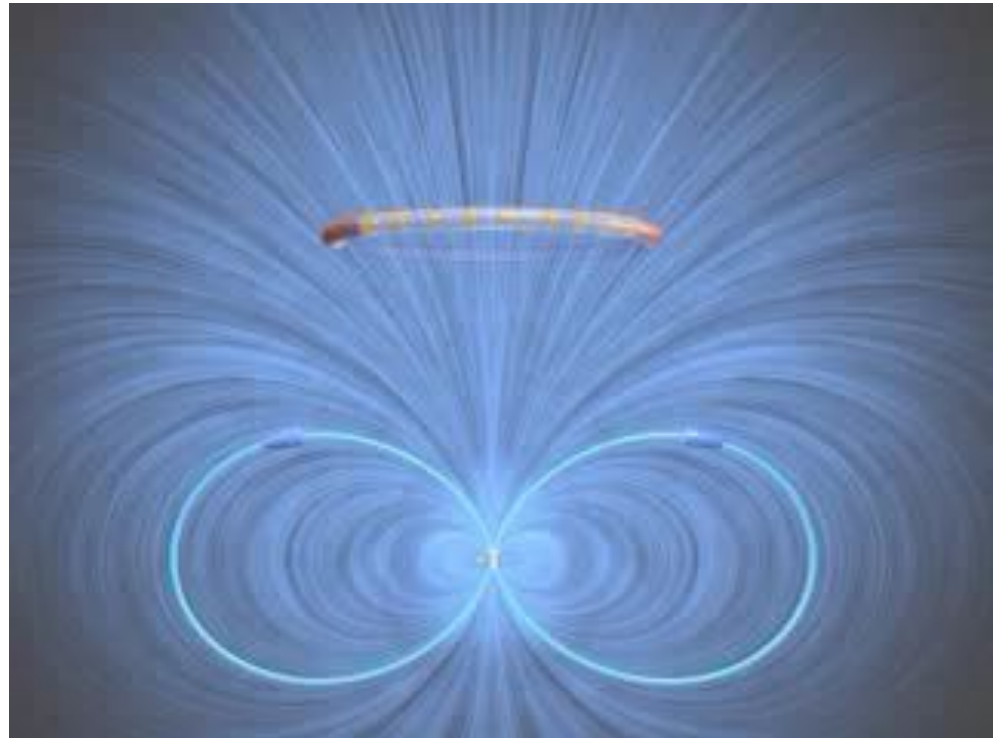
где  $\alpha$  – угол между  $\mathbf{B}$  и перпендикуляром к  $\mathbf{S}$ .





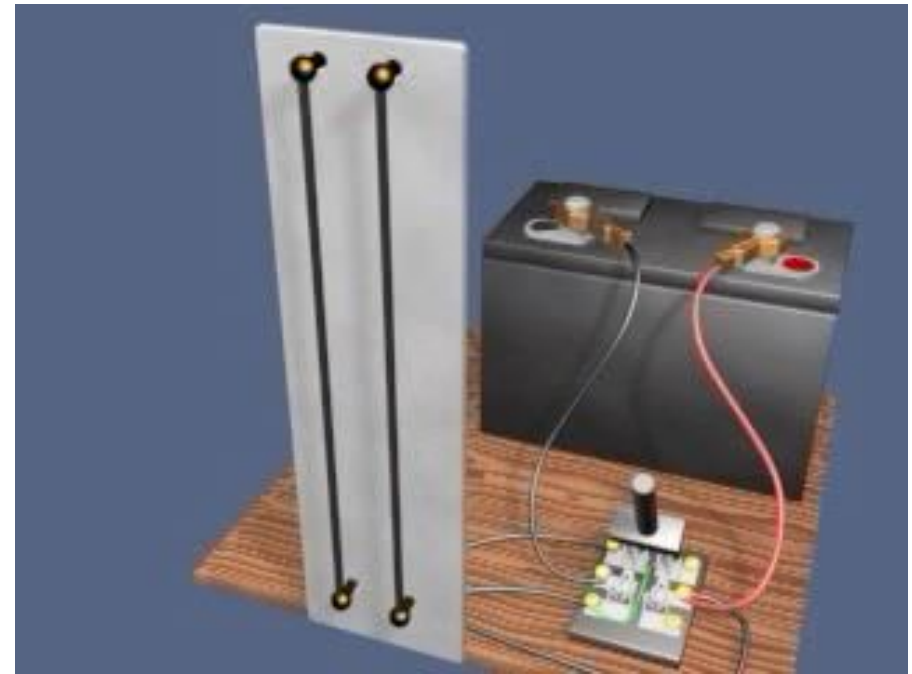
# Магнитное поле падающего кольца

Анимация демонстрирует конфигурацию магнитного поля вокруг движущегося кольца из «немагнитного материала» (например меди), в момент его попадания в магнитное поле, порождаемое стационарным магнитом. Движение тока в кольце обозначено перемещающимися маленькими сферами. В этом случае кольцо легче и имеет нулевое сопротивление, оно парит над магнитом.

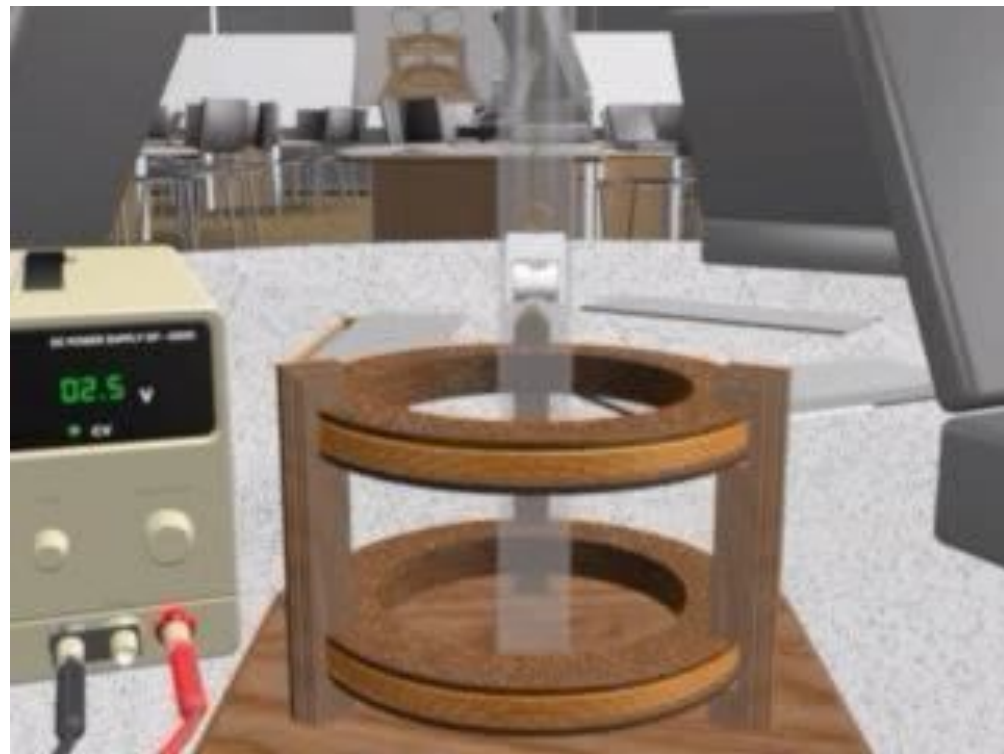


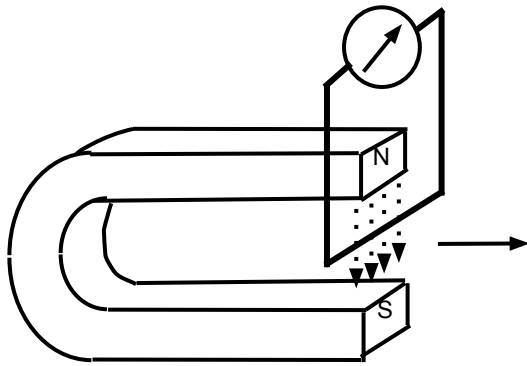
# Магнитное поле протяженных проводов

Анимация демонстрирует конфигурации магнитного поля, образованного вокруг двух протяженных проводов, по которым течет ток в противоположных направлениях. Сила Максвелла, образованная магнитными полями приводит к взаимному отталкиванию проводов.



магнитное поле постоянного магнита, подвешенного над аппаратом TeachSpin™, плюс магнитное поле в главной катушке. Магнит установлен так, чтобы его Северный полюс был направлен вниз, тогда, если смотреть сверху, ток в катушке будет направлен против часовой стрелки. Результирующая сила на магните является восходящей, и магнит перемещается вверх, поскольку ток в катушке увеличивается. Магнит частично поднимается магнитным полем катушки.





Подвижный проводник в магнитном поле.

Если двигать проводник в магнитном поле, то на концах проводника возникает напряжение. При перемене направления движения изменяется знак наведенной разности потенциалов.

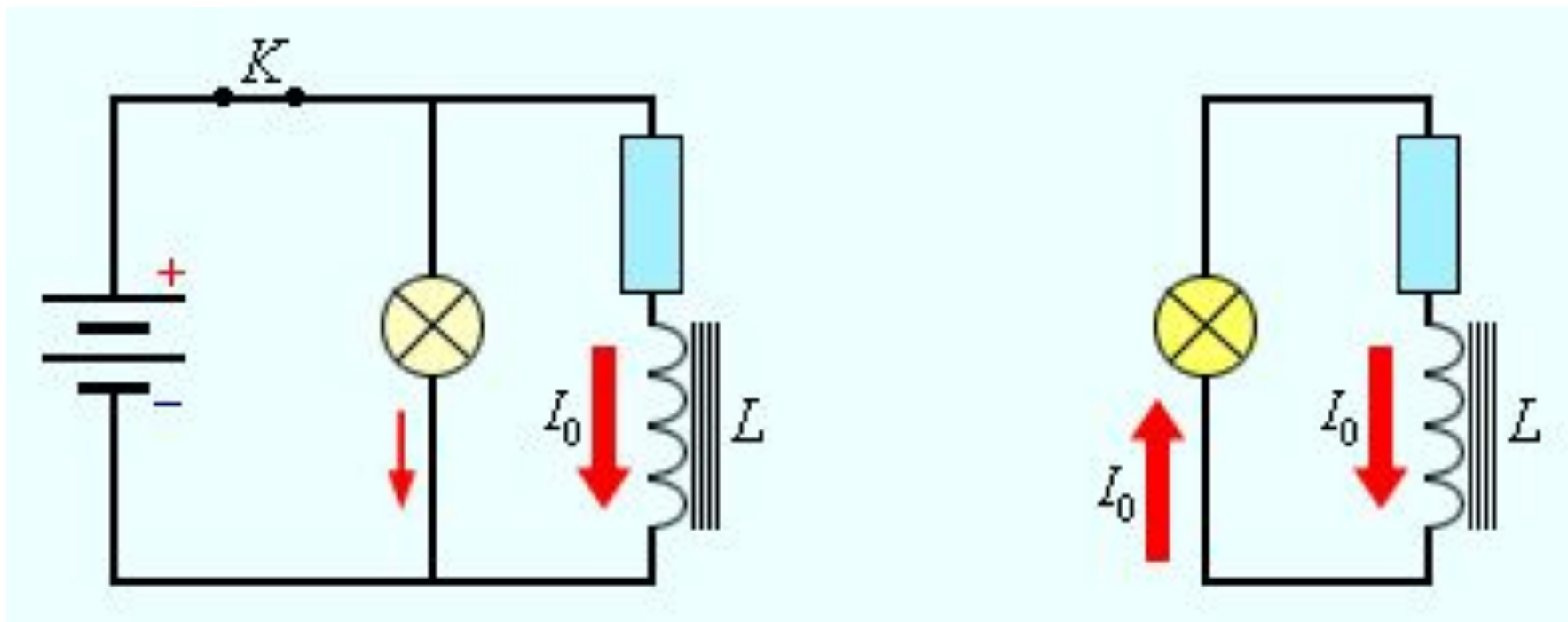
**Закон Ленца.** Направление индукционного тока таково, что поле перед проводником усиливается. Индукционный ток всегда направлен так, что стремится затормозить движение, вызывающее возникновение этого тока.

Вместо того чтобы двигать проводник, можно изменять магнитное поле, например, включая и выключая электромагнит. При этом безразлично, пересекает ли проводник неподвижные линии поля, или происходит движение поля относительно неподвижного проводника.

Для возникновения индукционного тока необходимо лишь изменение потока магнитной индукции через плоскость контура тока.

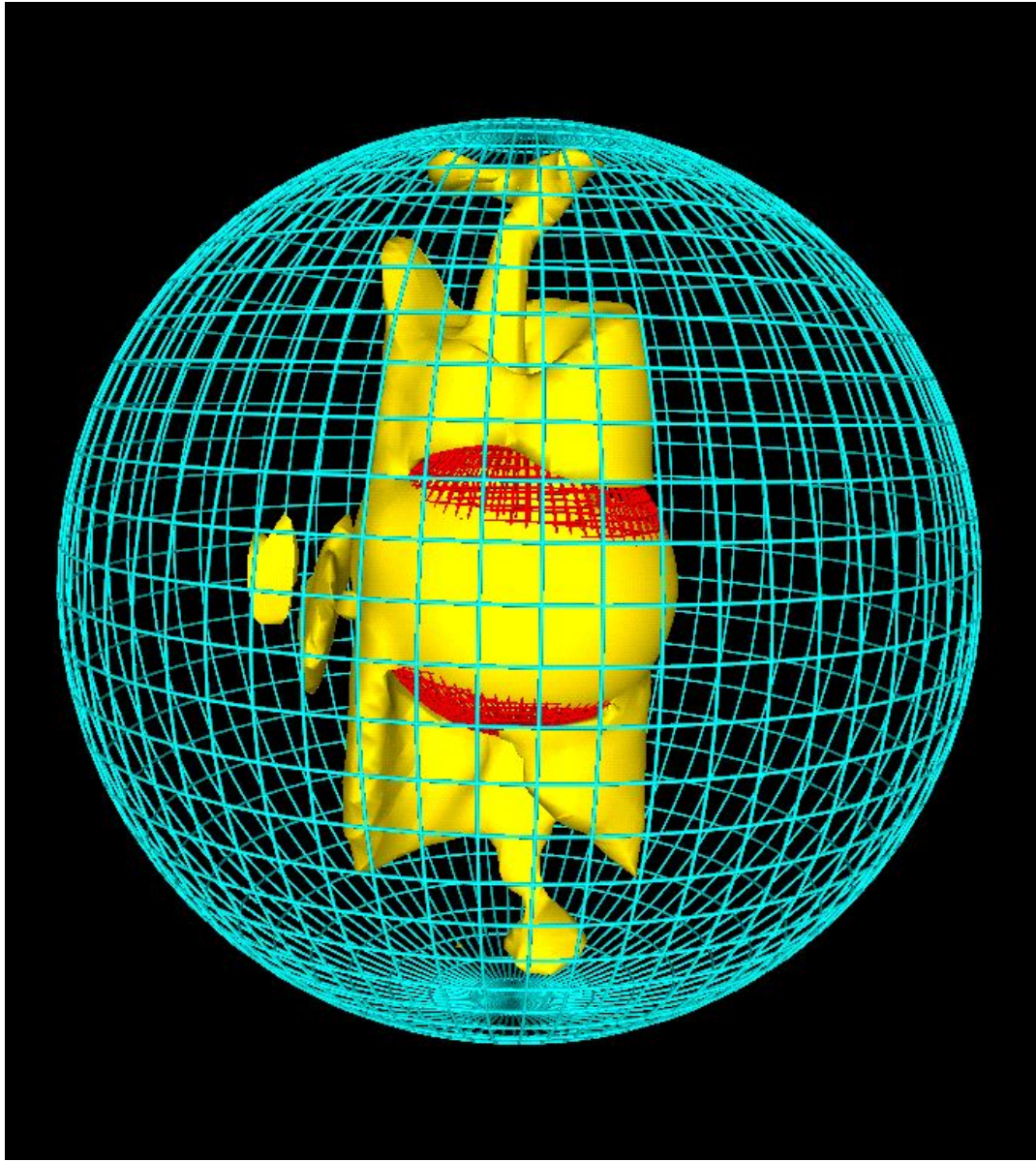
Всякое изменение магнитного поля порождает индукционный процесс.

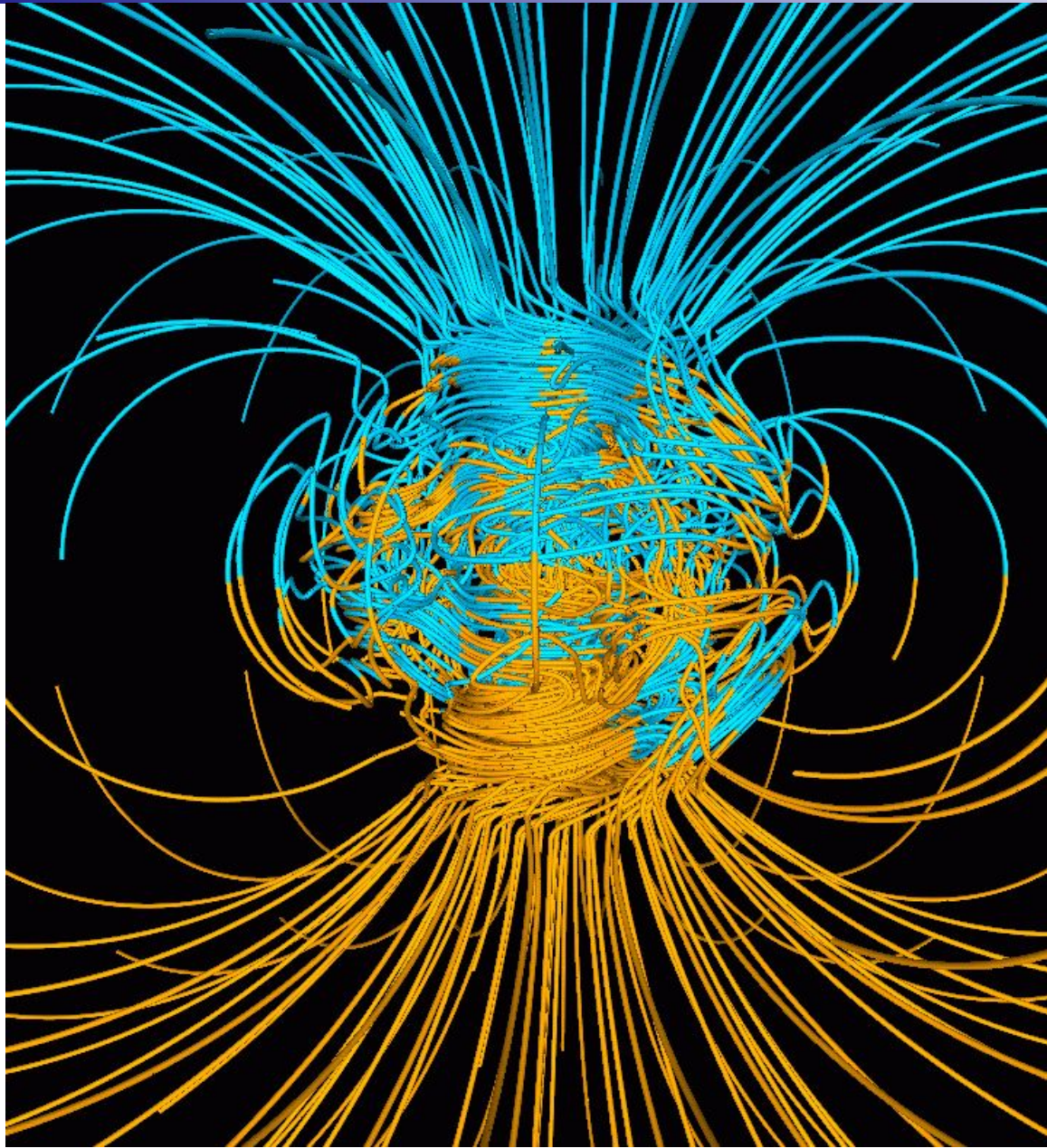
Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии. Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании ключа наблюдается кратковременная вспышка лампы. Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.



# Магнитное поле Земли

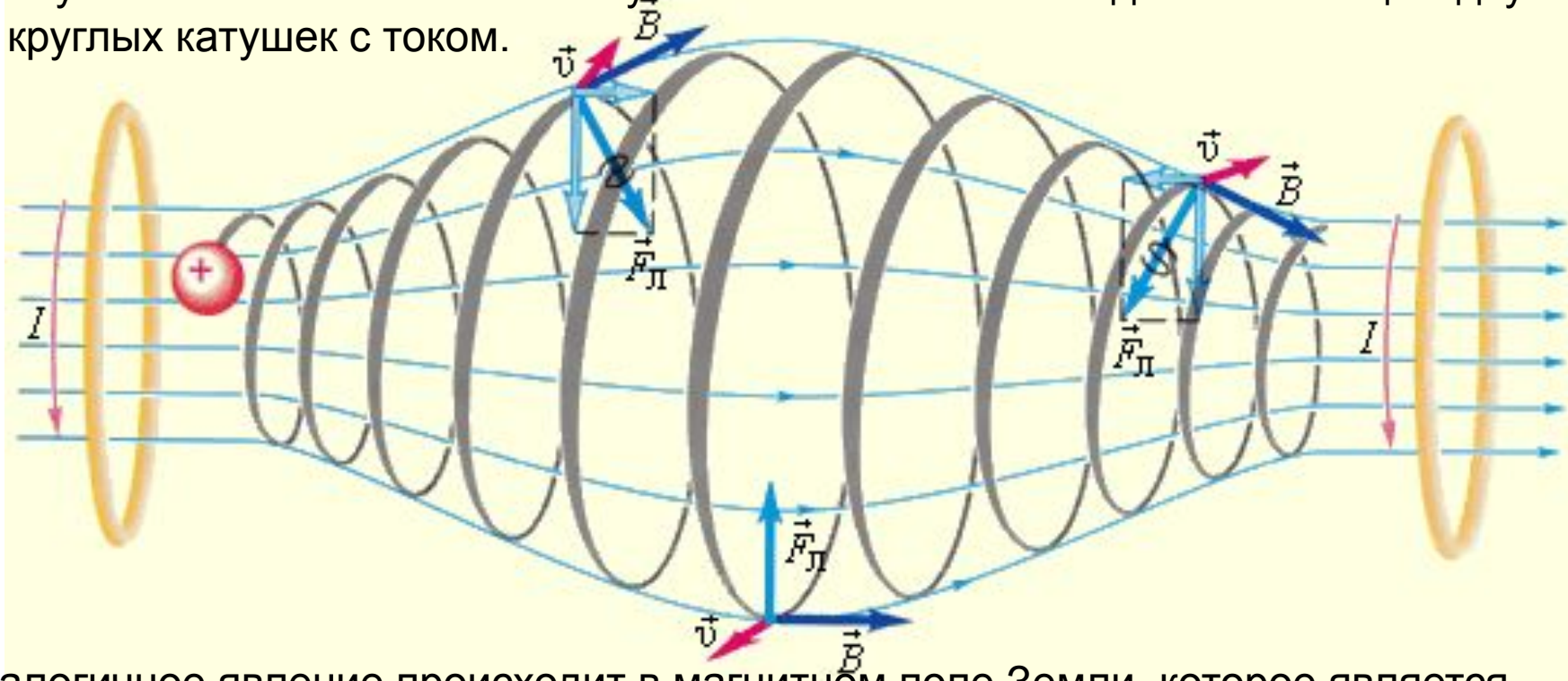
- Почему у нас есть магнитное поле? В последнее время считают, что магнитное поле объясняется движениями во внешней жидкой оболочке ядра. А именно, по мере того как внешняя оболочка ядра охлаждается и части ее падают внутрь, океаны магмы, богатой железом, поднимаются вверх в спиральном движении под действием вращения Земли. Геологи полагают, что именно это движение поддерживает земной магнетизм. На рисунке показаны результаты компьютерного моделирования магнитного поля Земли, чьи силовые линии доходят до двух земных радиусов. Голубым цветом показаны линии, направленные внутрь, желтым - наружу.







Магнитная «бутылка». Заряженные частицы не выходят за пределы «бутылки». Магнитное поле «бутылки» может быть создано с помощью двух круглых катушек с током.



Аналогичное явление происходит в магнитном поле Земли, которое является защитой для всего живого от потоков заряженных частиц из космического пространства. Быстрые заряженные частицы из космоса (главным образом от Солнца) «захватываются» магнитным полем Земли и образуют так называемые **радиационные пояса**, в которых частицы, как в магнитных ловушках, перемещаются туда и обратно по спиралевидным траекториям между северным и южным магнитными полюсами за времена порядка долей секунды. Лишь в полярных областях некоторая часть частиц вторгается в верхние слои атмосферы, вызывая полярные сияния.

Радиационные пояса Земли простираются от расстояний порядка 500 км до десятков земных радиусов

