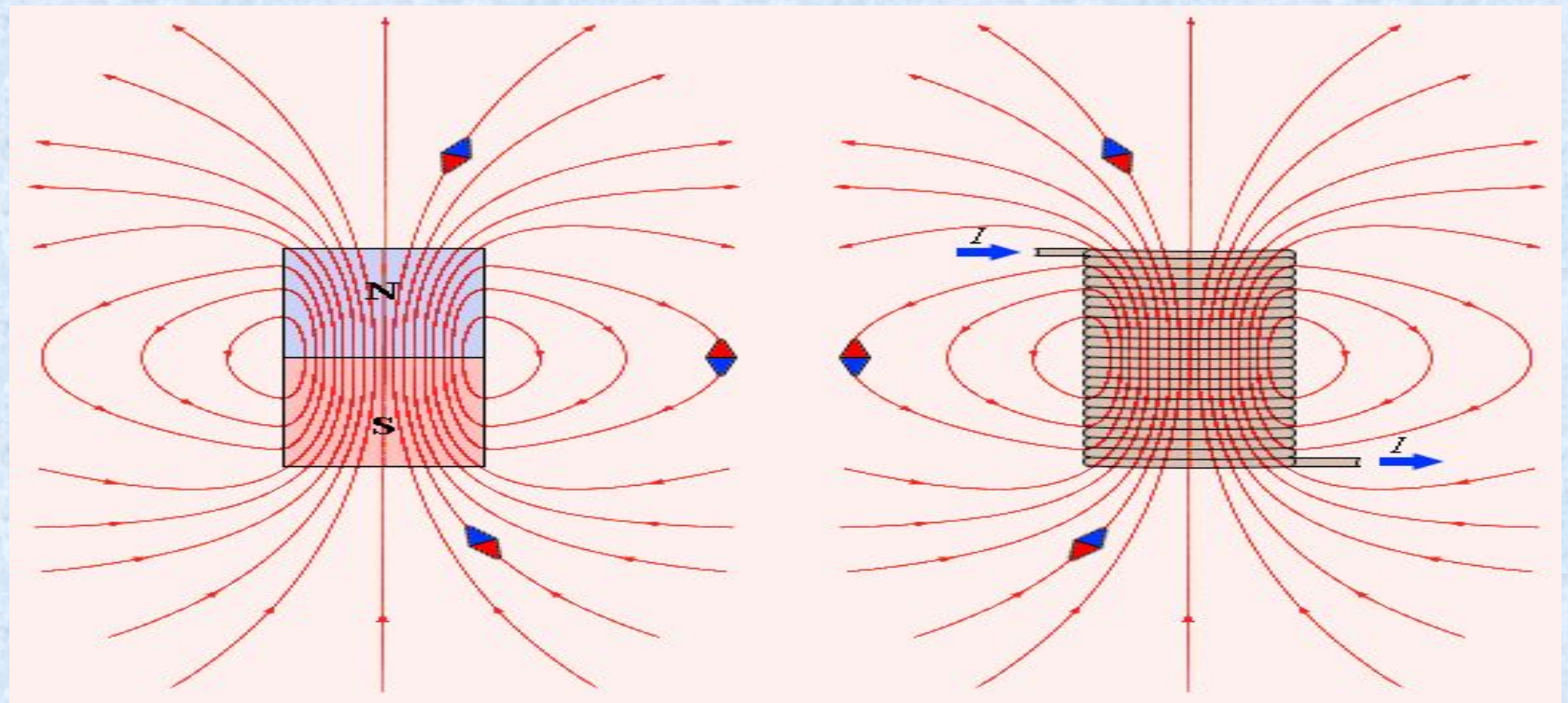


# Лекция 12

# Магнитное взаимодействие ТОКОВ

- Источниками магнитного поля являются **движущиеся электрические заряды (токи)**. Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем проводники с током, подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле. Магнитное поле постоянных магнитов также создается электрическими микротоками, циркулирующими внутри молекул вещества (гипотеза Ампера).
- Для описания магнитного поля необходимо ввести силовую характеристику поля, аналогичную вектору **напряженности** электрического поля. Такой характеристикой является **вектор магнитной индукции**  $\vec{B}$ . Вектор магнитной индукции определяет силы, действующие на токи или движущиеся заряды в магнитном поле.
- За положительное **направление вектора**  $\vec{B}$  принимается направление от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле. Таким образом, исследуя магнитное поле, создаваемое током или постоянным магнитом, с помощью маленькой магнитной стрелки, можно в каждой точке пространства определить направление вектора  $\vec{B}$ .



- Аналогично СИЛОВЫМ ЛИНИЯМ в электростатике можно построить **линии магнитной индукции**, в каждой точке которых вектор **магнитной индукции** направлен по касательной. Пример линий магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки с током приведен на рис.
- Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не обрываются. Это означает, что магнитное поле не имеет источников – магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются **вихревыми**.

- 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:

$$F \sim I \Delta l \sin \alpha.$$

Эта сила называется **силой Ампера**. Она достигает максимального по модулю значения  $F_{\max}$ , когда проводник с током ориентирован перпендикулярно линиям магнитной индукции.

- 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  $\Delta l$ :

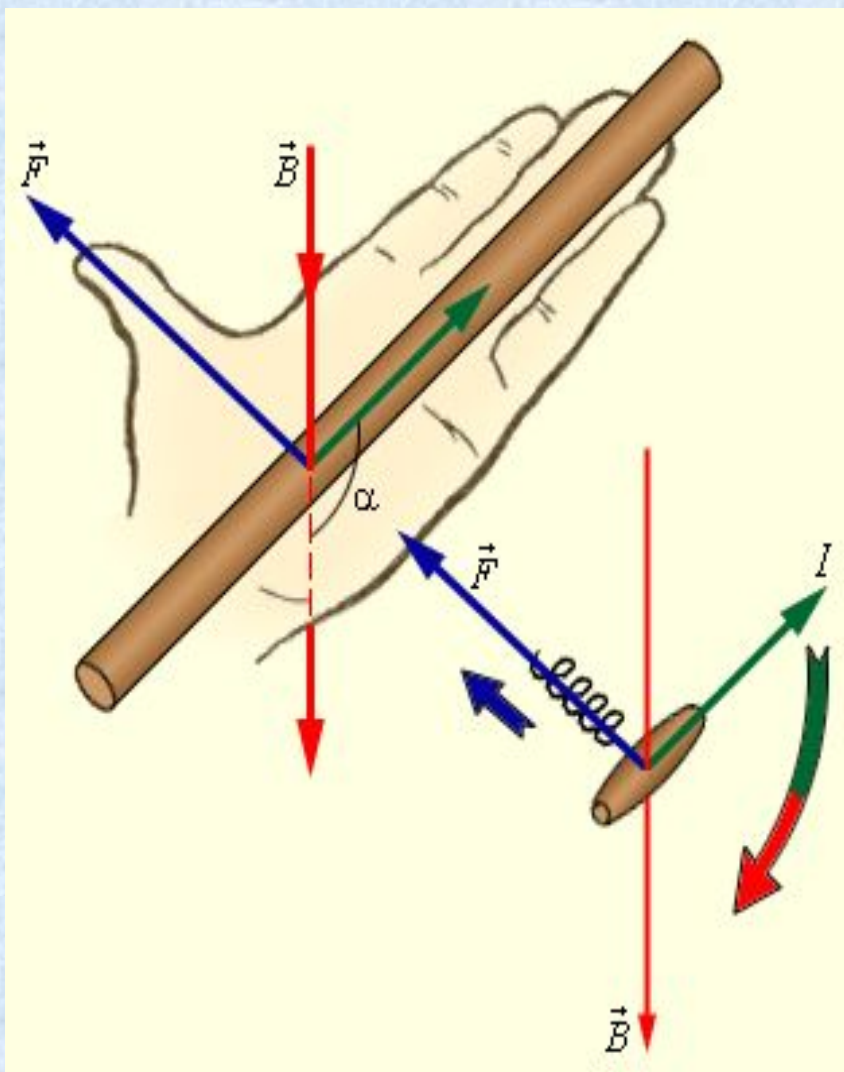
$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}$$

- В общем случае сила Ампера выражается соотношением:

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

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).

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

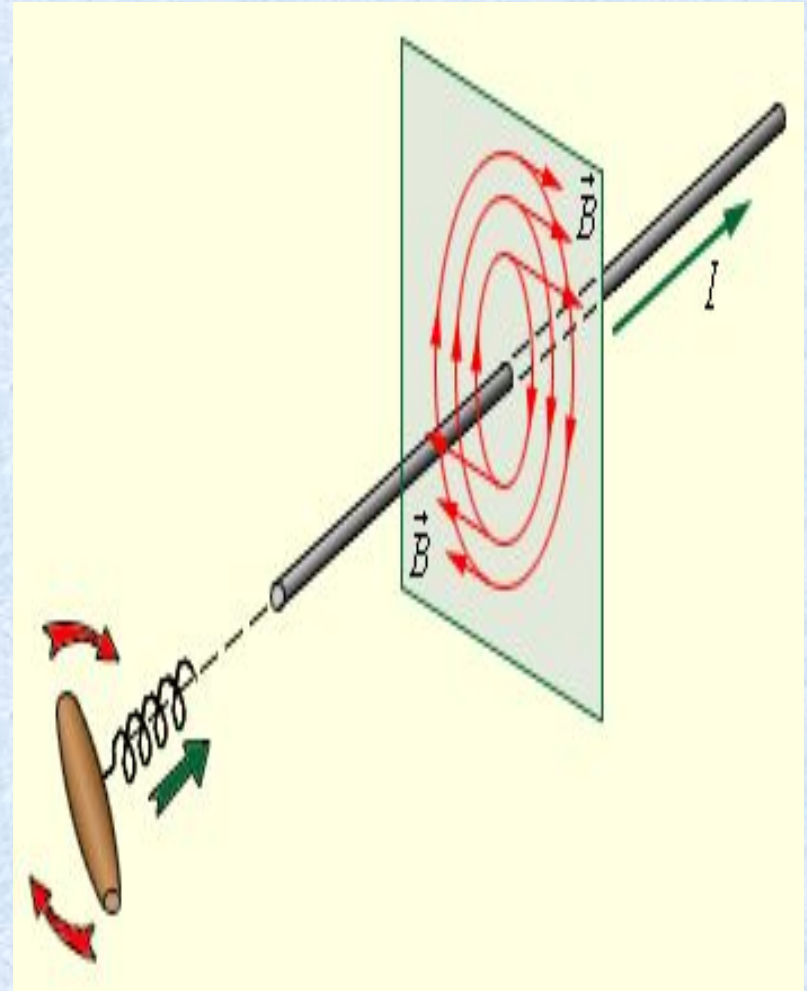


- Сила Ампера направлена перпендикулярно вектору магнитной индукции и направлению тока, текущего по проводнику. Для определения направления силы Ампера обычно используют **правило левой руки**: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник

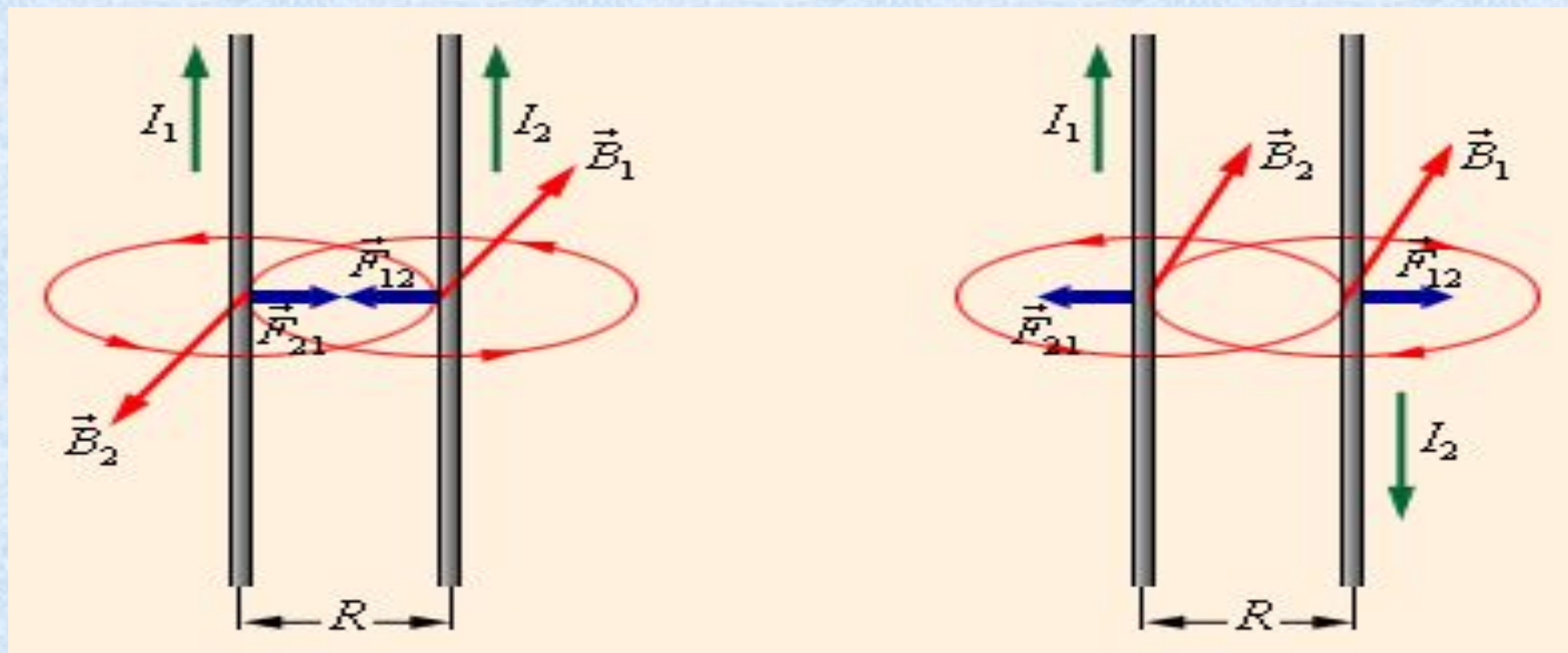
- Взаимодействие токов вызывается их магнитными полями: магнитное поле одного тока действует силой Ампера на другой ток и наоборот.
- опыты показали, что модуль силы, действующей на отрезок длиной  $\Delta l$  каждого из проводников, прямо пропорционален силам тока  $I_1$  и  $I_2$  в проводниках, длине отрезка  $\Delta l$  и обратно пропорционален расстоянию  $R$  между ними:

$$F = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}$$

Для определения направления вектора  $\vec{B}$  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





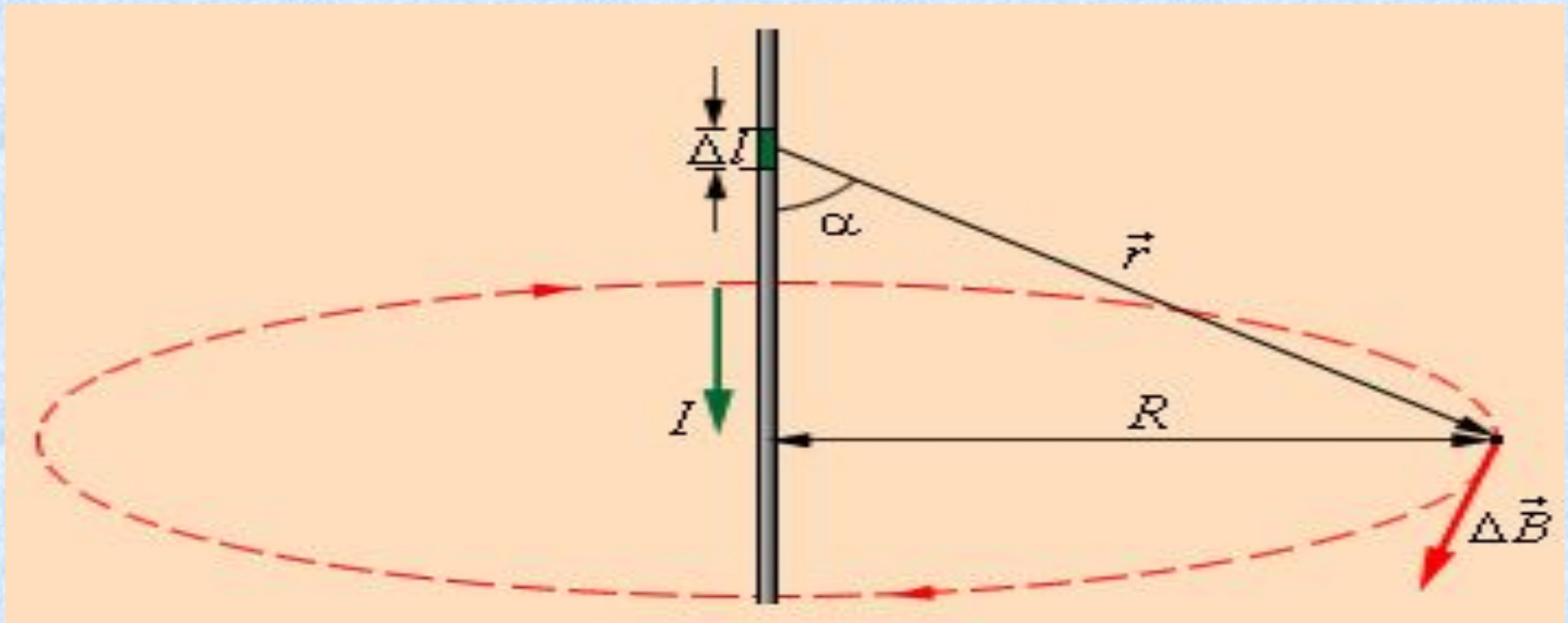


- Магнитное взаимодействие параллельных и антипараллельных токов.
- Магнитное взаимодействие параллельных проводников с током используется в Международной системе единиц (СИ) для определения единицы силы тока – ампера:
- **Ампер** – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины

# Закон Био–Савара. Теорема о циркуляции

- Магнитное поле подчиняется **принципу суперпозиции**:
- Если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля **есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности.**

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}.$$



- Закон Био–Савара позволяет рассчитывать магнитные поля токов различных конфигураций. Нетрудно, например, выполнить расчет магнитного поля в центре кругового витка с током. Этот расчет приводит к формуле

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

- Циркуляцией вектора  $\vec{B}$  называют сумму произведений  $B_{\tau} \Delta l$ , взятую по всему контуру  $L$ :

$$\text{Циркуляция вектора } \vec{B} = \sum_{(L)} B_{\tau} \Delta l.$$

- Теорема о циркуляции утверждает, что циркуляция вектора  $\vec{B}$  магнитного поля постоянных токов по любому контуру  $L$  всегда равна произведению магнитной постоянной  $\mu_0$  на сумму всех токов, пронизывающих контур:

$$\sum_{(L)} B_{\tau} \Delta l = \mu_0 \sum I_i$$

# Сила Лоренца

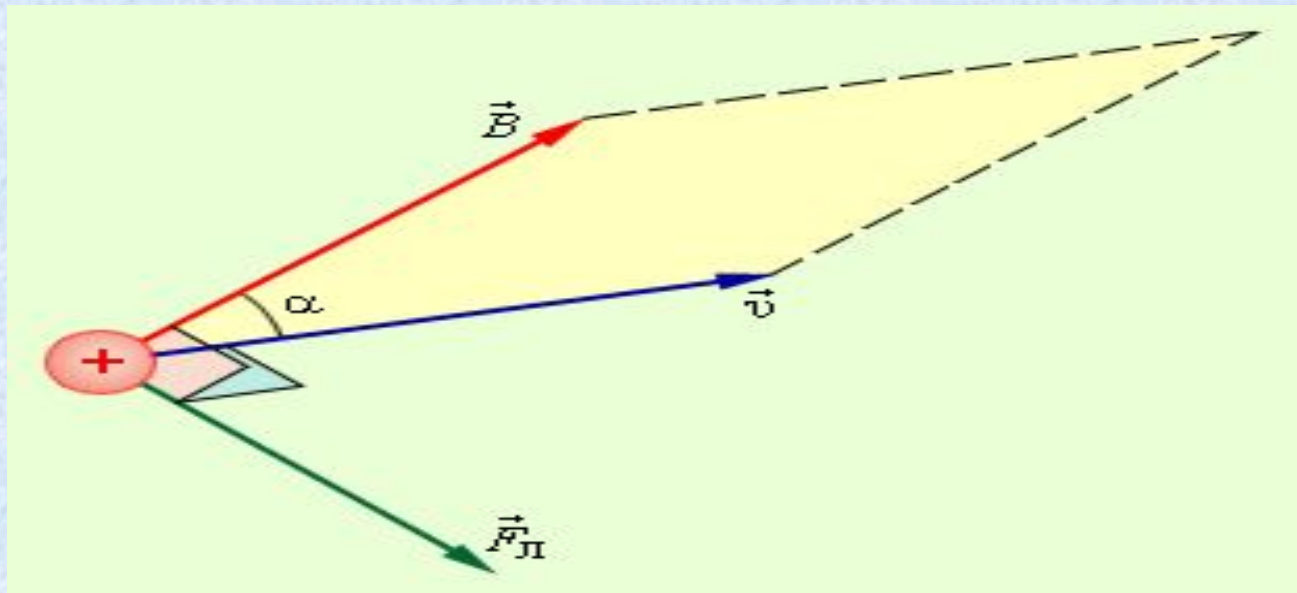
- Выражение для силы Ампера можно записать в виде:

$$F = qnS\Delta l u B \sin \alpha$$

- Так как полное число  $N$  носителей свободного заряда в проводнике длиной  $\Delta l$  и сечением  $S$  равно  $nS\Delta l$ , то сила, действующая на одну заряженную частицу, равна

$$F_{\text{л}} = quB \sin \alpha.$$

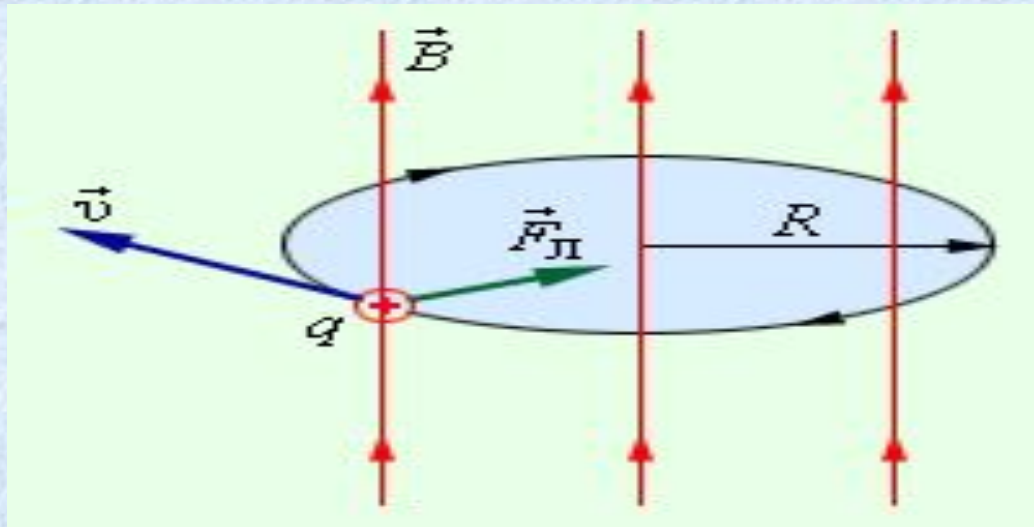
- Направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, так же, как и направление силы Ампера, может быть найдено по [правилу левой руки](#) или по [правилу буравчика](#). Сила Лоренца направлена перпендикулярно векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .



- При движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает. Поэтому модуль вектора скорости при движении частицы не изменяется.
- Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость  $\vec{v}$  лежит в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{B}$ , то частица будет двигаться по окружности радиуса

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

- Сила Лоренца в этом случае играет роль центростремительной силы



# Магнитное поле в веществе

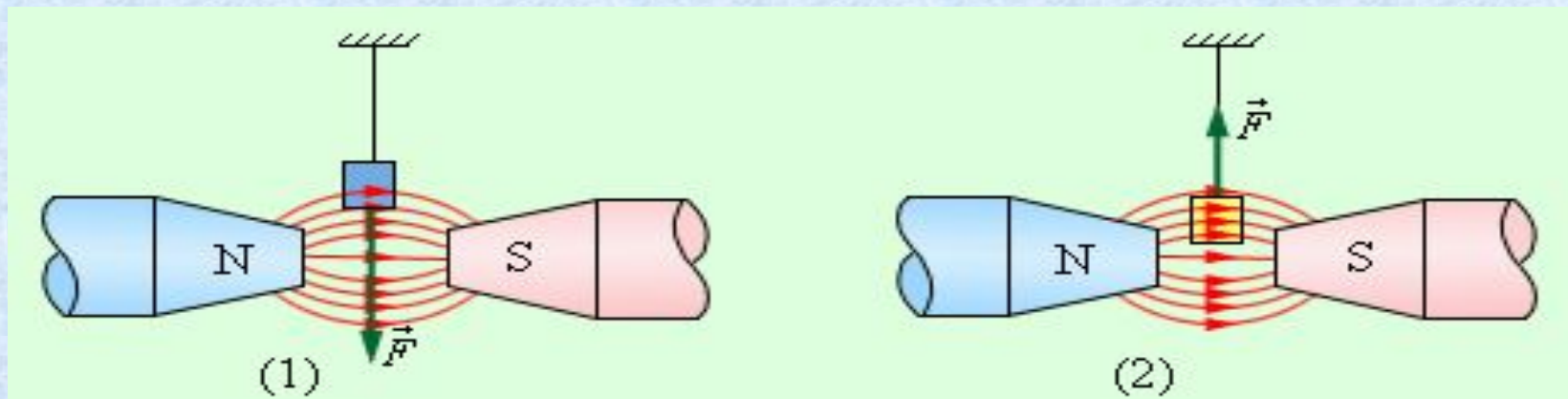
- Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме, называется **магнитной проницаемостью**:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

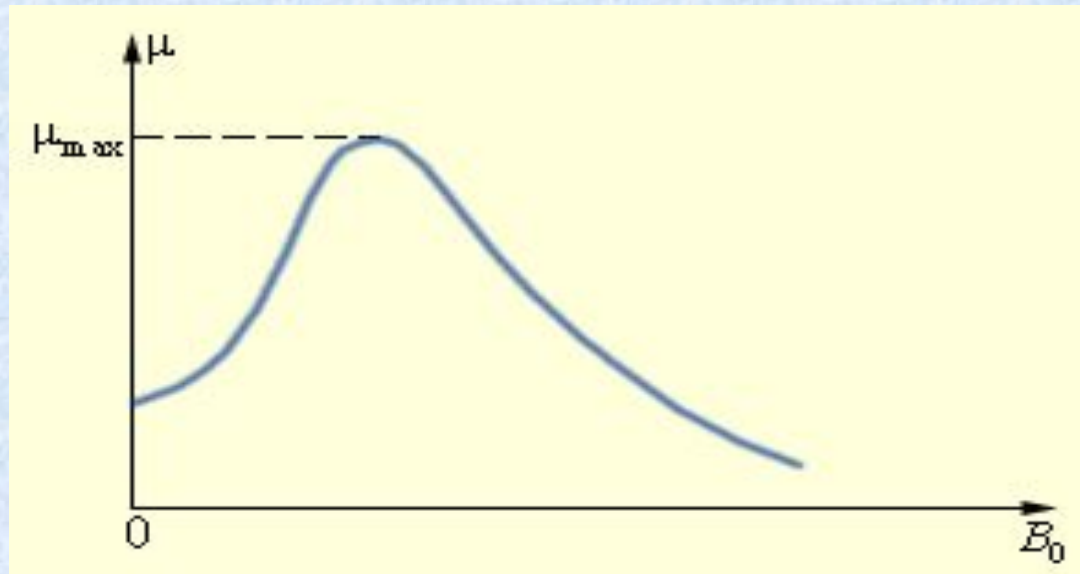
- Магнитные свойства веществ определяются магнитными свойствами атомов или элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав атомов. В настоящее время установлено, что магнитные свойства протонов и нейтронов почти в 1000 раз слабее магнитных свойств электронов. Поэтому магнитные свойства веществ в основном определяются электронами, входящими в состав атомов.
- Одним из важнейших свойств электрона является наличие у него не только электрического, но и собственного магнитного поля. Собственное магнитное поле электрона называют **спиновым** (spin – вращение).



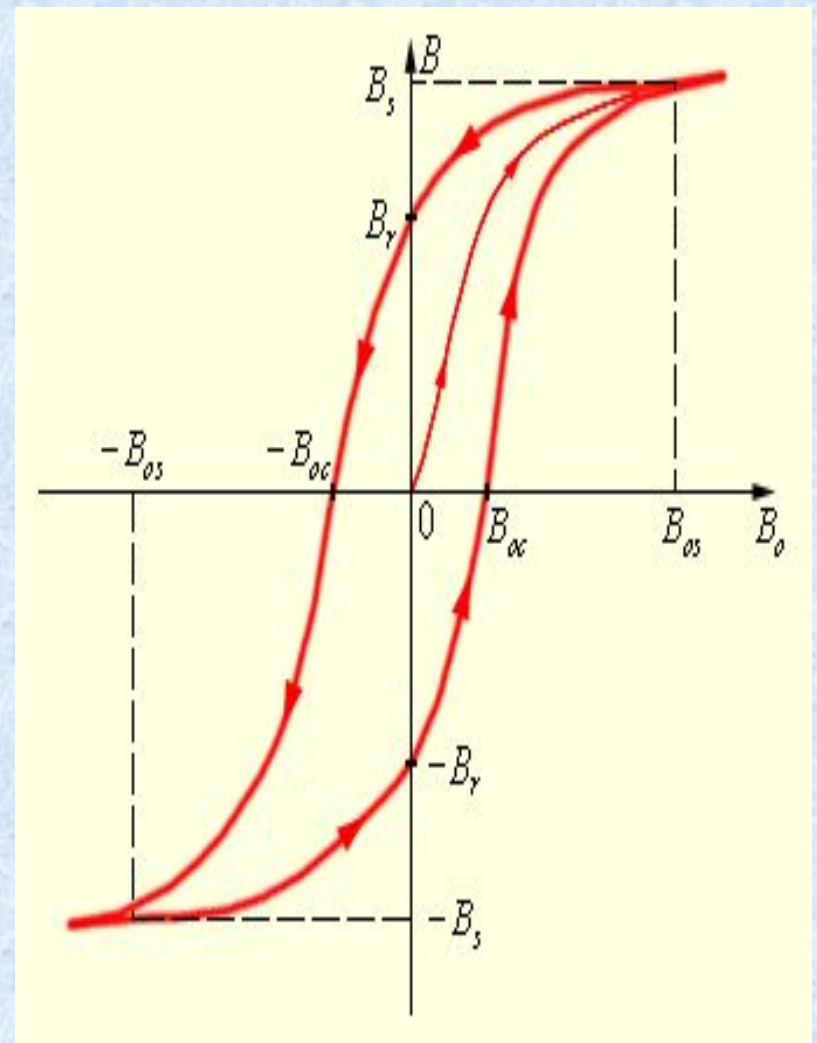
- **Слабо-магнитные вещества** делятся на две большие группы – **парамагнетики** и **диамагнетики**. Они отличаются тем, что при внесении во внешнее магнитное поле парамагнитные образцы намагничиваются так, что их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю, а диамагнитные образцы намагничиваются против внешнего поля.
- Парамагнетик (1) и диамагнетик (2) в неоднородном магнитном поле.



- Вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле, называются **ферромагнетиками**.
- Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая **температура или точка Кюри**), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. У железа, например, температура Кюри равна  $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ , у кобальта  $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , у никеля  $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы – на **магнито-мягкие** и **магнито-жесткие** материалы. Магнито-жесткие материалы используются в основном для изготовления **постоянных магнитов**.
- Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции внешнего магнитного поля.



- Петля гистерезиса ферромагнетика. Стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля.



# Электромагнитная индукция.

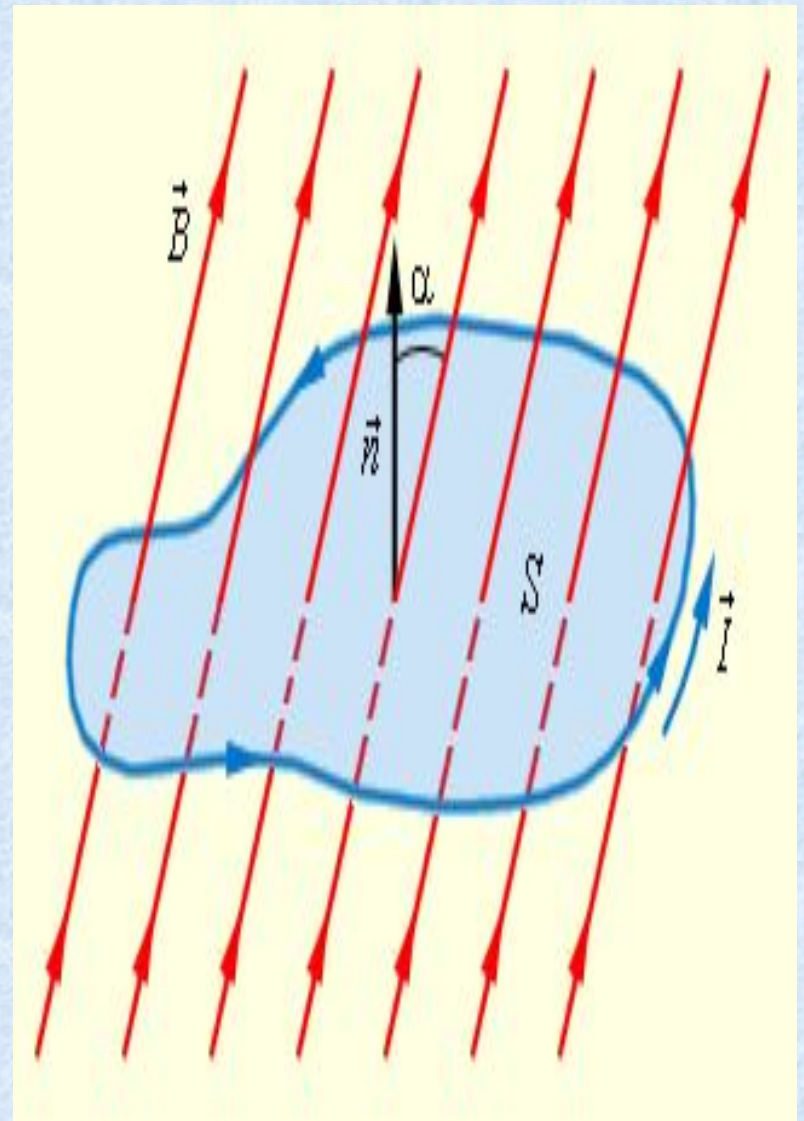
## Правило Ленца

- Магнитным потоком  $\Phi$  через площадь  $S$  контура называют величину

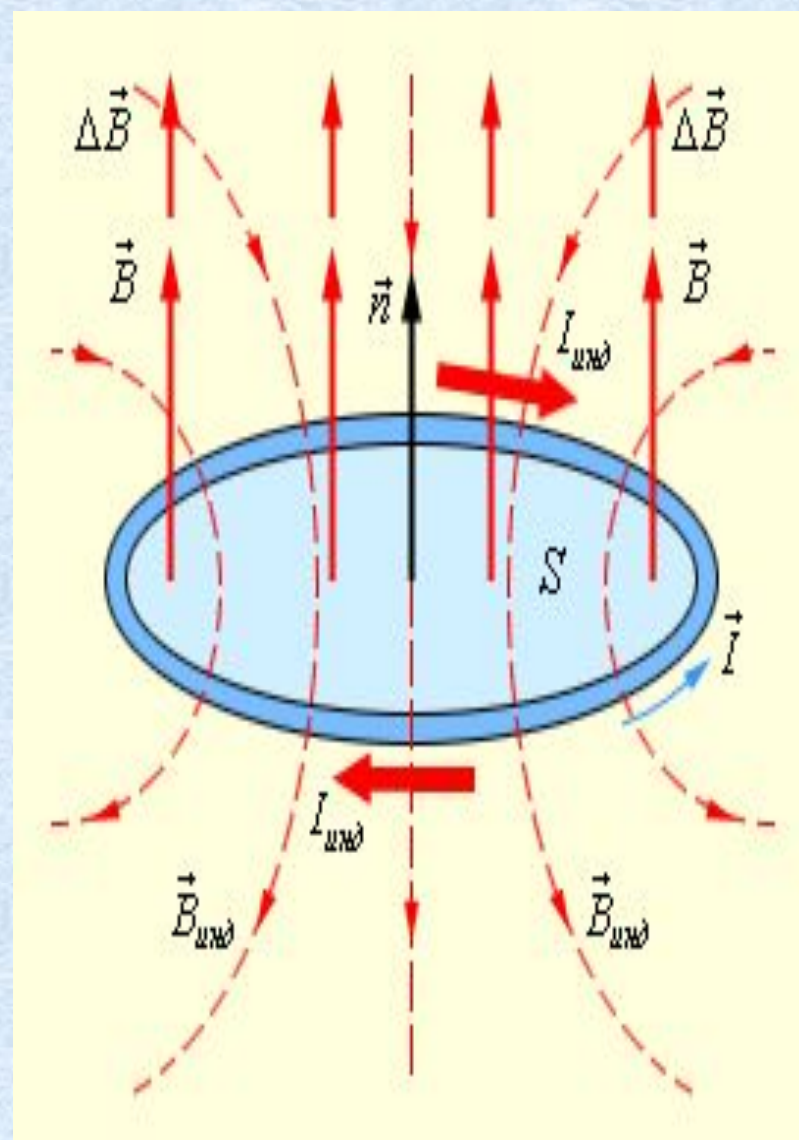
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

где  $B$  – модуль вектора магнитной индукции,  $\alpha$  – угол между вектором  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$  нормалью к плоскости контура.

- Магнитный поток через замкнутый контур. Направление нормали  $\vec{n}$  и выбранное  $\vec{dl}$  положительное направление обхода контура связаны правилом правого буравчика.



- Иллюстрация правила Ленца. В этом примере  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ , а  $\Sigma_{\text{инд}} < 0$ . Индукционный ток  $I_{\text{инд}}$  течет навстречу выбранному положительному направлению  $\vec{n}$  обхода контура.



- Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, может происходить по двум причинам.
  1. Магнитный поток изменяется вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле. Это случай, когда проводники, а вместе с ними и свободные носители заряда, движутся в магнитном поле. Возникновение ЭДС индукции объясняется действием силы Лоренца на свободные заряды в движущихся проводниках. Сила Лоренца играет в этом случае роль сторонней силы.
  2. Вторая причина изменения магнитного потока, пронизывающего контур, – изменение во времени магнитного поля при неподвижном контуре. В этом случае возникновение ЭДС индукции уже нельзя объяснить действием силы Лоренца. Электроны в неподвижном проводнике могут приводиться в движение только электрическим полем. Это электрическое поле порождается изменяющимся во времени магнитным полем. Работа этого поля при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру равна ЭДС индукции в неподвижном проводнике. Следовательно, электрическое поле, порожденное изменяющимся магнитным полем, **не является потенциальным**. Его называют **вихревым электрическим полем**.

# Самоиндукция. Энергия магнитного поля

- **Самоиндукция** является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создается током в самом контуре. Если ток в рассматриваемом контуре по каким-то причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока, а, следовательно, и собственный магнитный поток, пронизывающий контур. В контуре возникает ЭДС самоиндукции, которая согласно правилу Ленца препятствует изменению тока в контуре.
- Собственный магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока  $I$ :  $\Phi = LI$ .

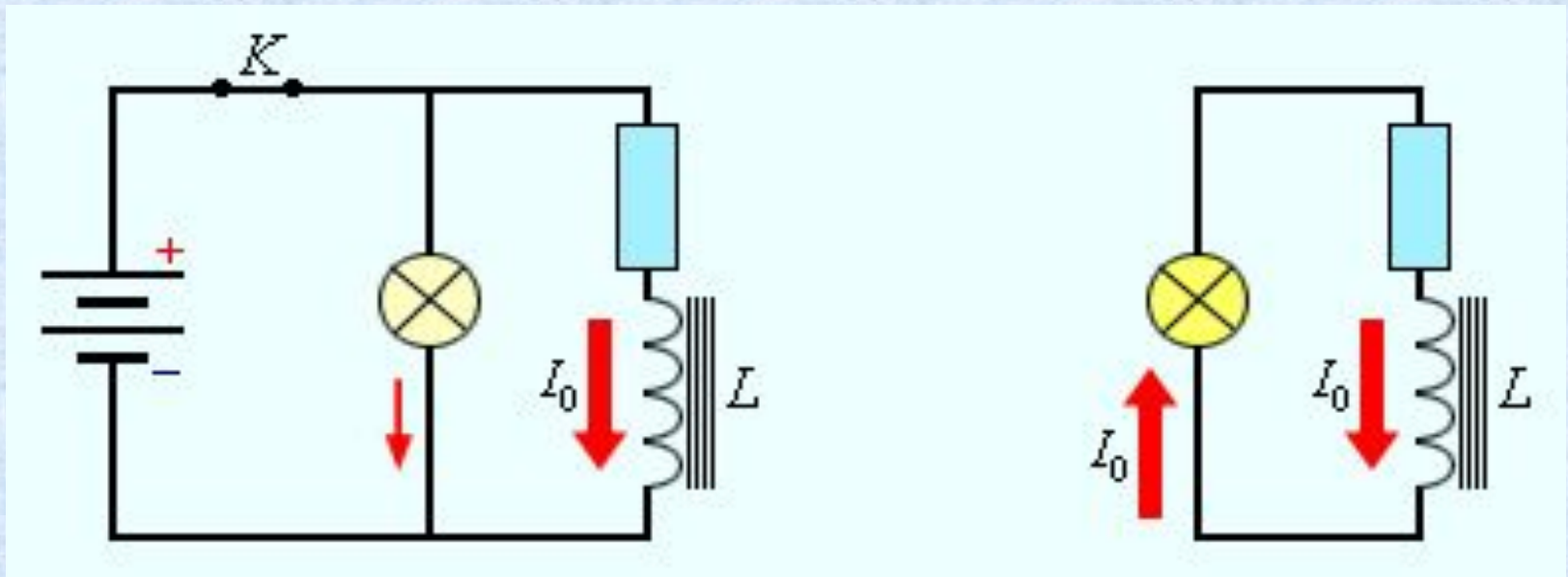


- Коэффициент пропорциональности  $L$  в этой формуле называется **коэффициентом самоиндукции** или **индуктивностью** катушки. Единица индуктивности в СИ называется **генри** (Гн). Индуктивность контура или катушки равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А собственный поток равен 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ А.}$$

**ЭДС самоиндукции**, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно формуле Фарадея равна

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \mathcal{E}_L = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

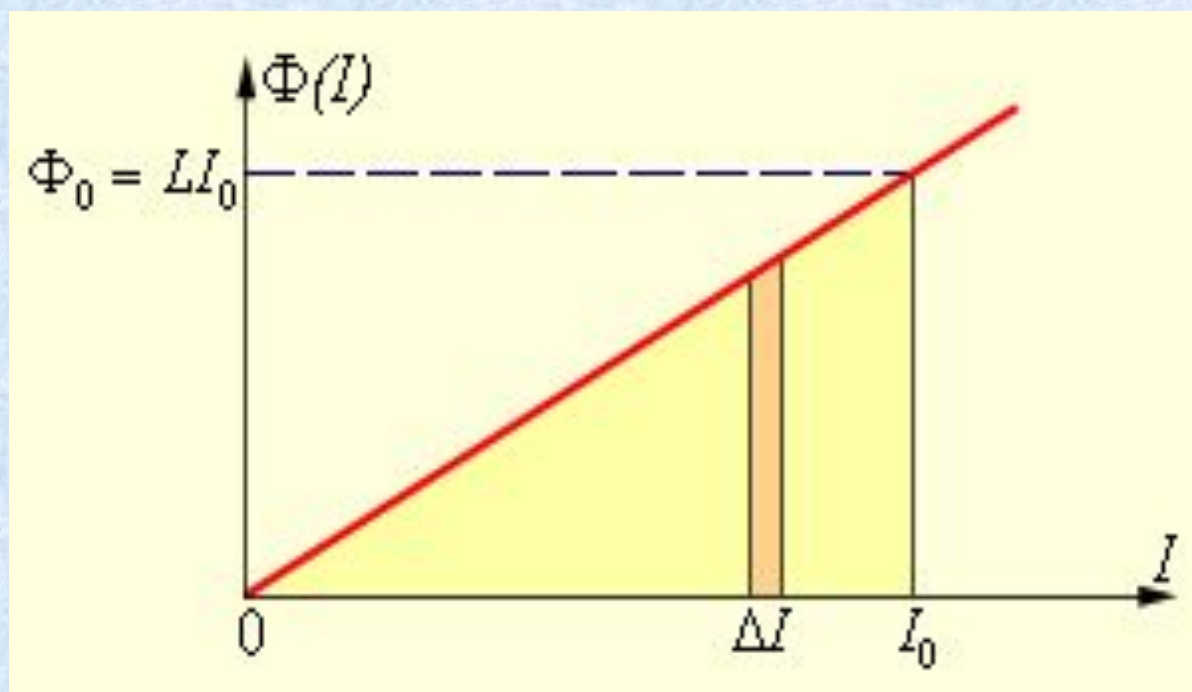


- Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии. Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного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

- Полное количество теплоты, выделившейся в цепи, будет равно:

$$Q = \frac{LI_0^2}{2}.$$

- Вычисление энергии магнитного поля.



- Таким образом, энергия  $W_M$  магнитного поля катушки с индуктивностью  $L$ , создаваемого током  $I$ , равна

$$W_M = \frac{\Phi I}{2} = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$

- Физическая величина  $w_M = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}$  равная энергии магнитного поля в единице объема, называется **объемной плотностью магнитной энергии**.