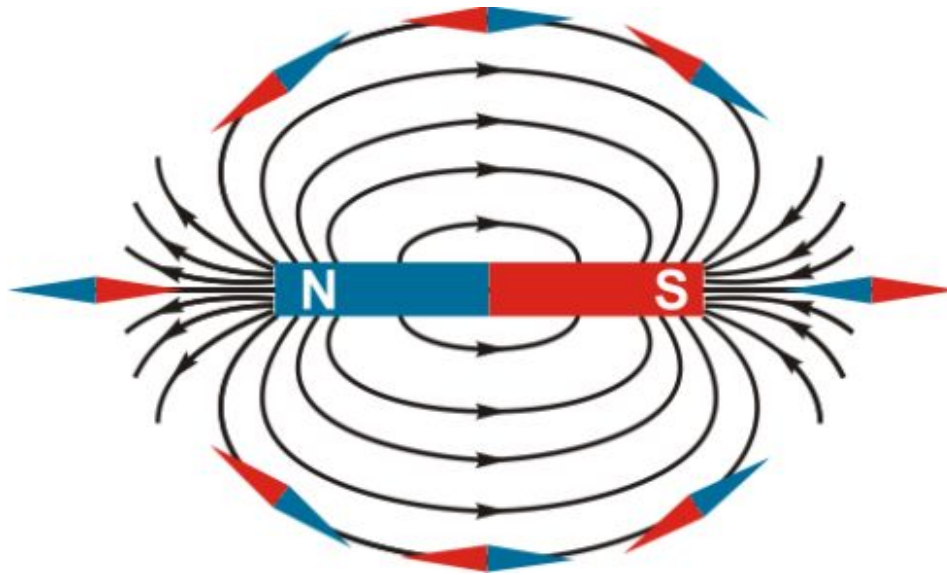
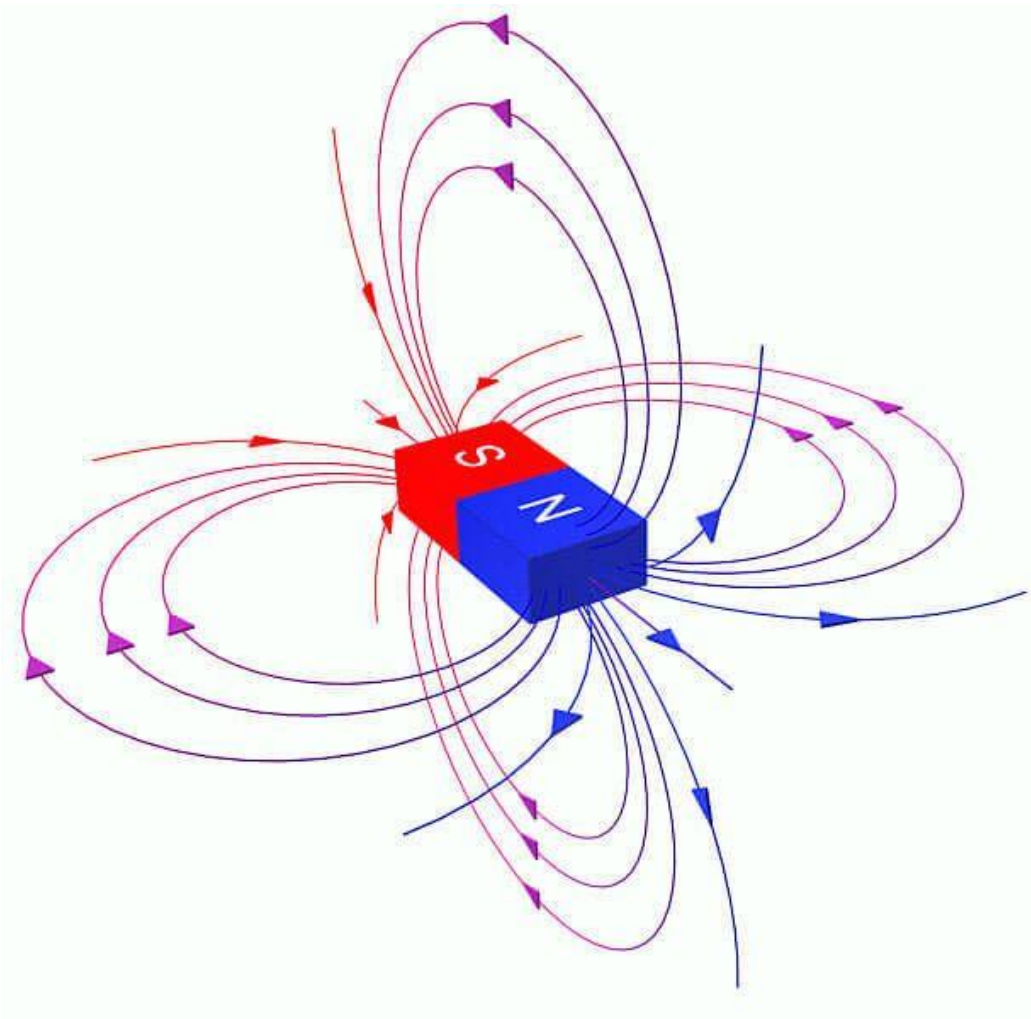


# Магнитные цепи



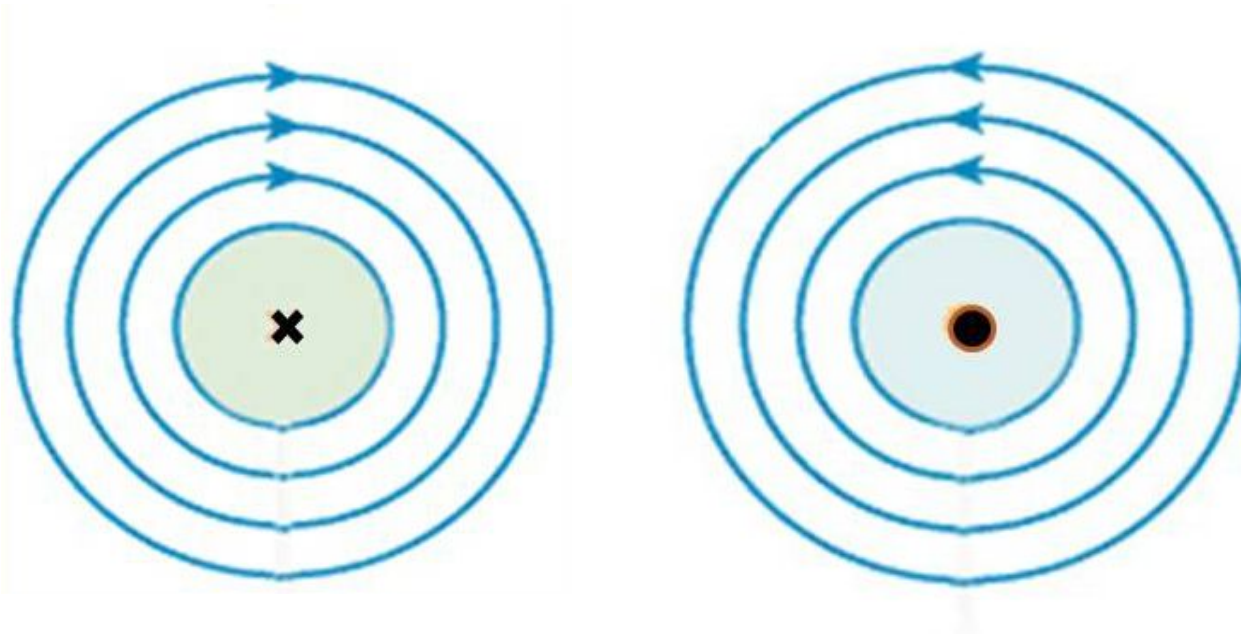
За положительное направление поля, а значит и силовых линий, принято считать направление от северного полюса N к южному S

Силовые линии выходят из северного, или положительного полюса, а входят в южный полюс



Внутри магнита силовые линии направлены от южного полюса к северному

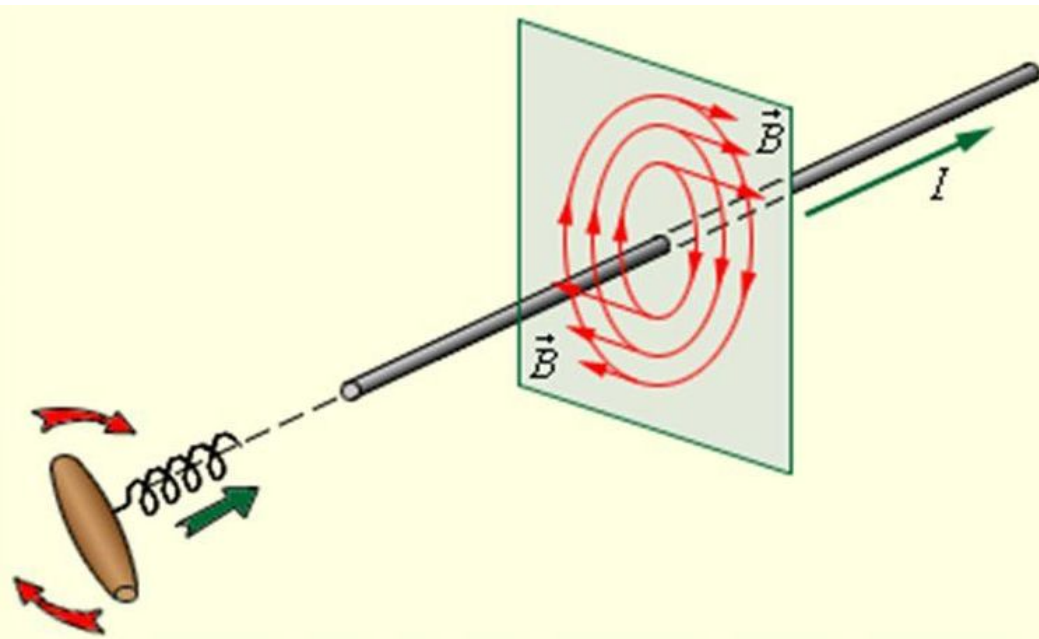
Силовые линии магнитного поля замкнутые, в отличие от силовых линий электрического поля



Силловые линии прямолинейного проводника с током представляют собой концентрические окружности с общим центром, который находится в центре проводника с током

# Основные величины, характеризующие магнитное поле

## Вектор магнитной индукции



характеризует силу и направление магнитного поля в любой его точке

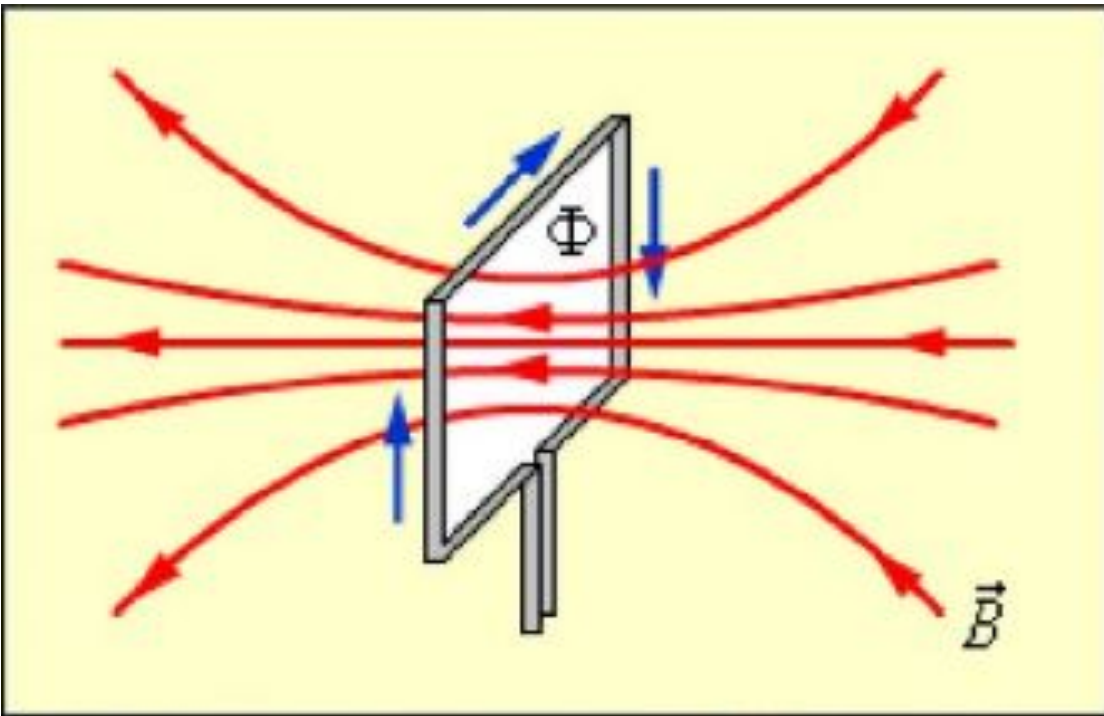
направлен по касательной к силовой линии

Направление действия магнитного поля можно определить с помощью правила буравчика, или правого винта: если буравчик вворачивать так, чтобы жало двигалось в направлении тока, то вращающаяся ручка при этом укажет направление силовых линий магнитного поля

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}$$

## Магнитный поток



Магнитным потоком  $\Phi$  сквозь поверхность  $S$  называют количество линий вектора магнитной индукции  $B$ , проходящих через поверхность  $S$

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

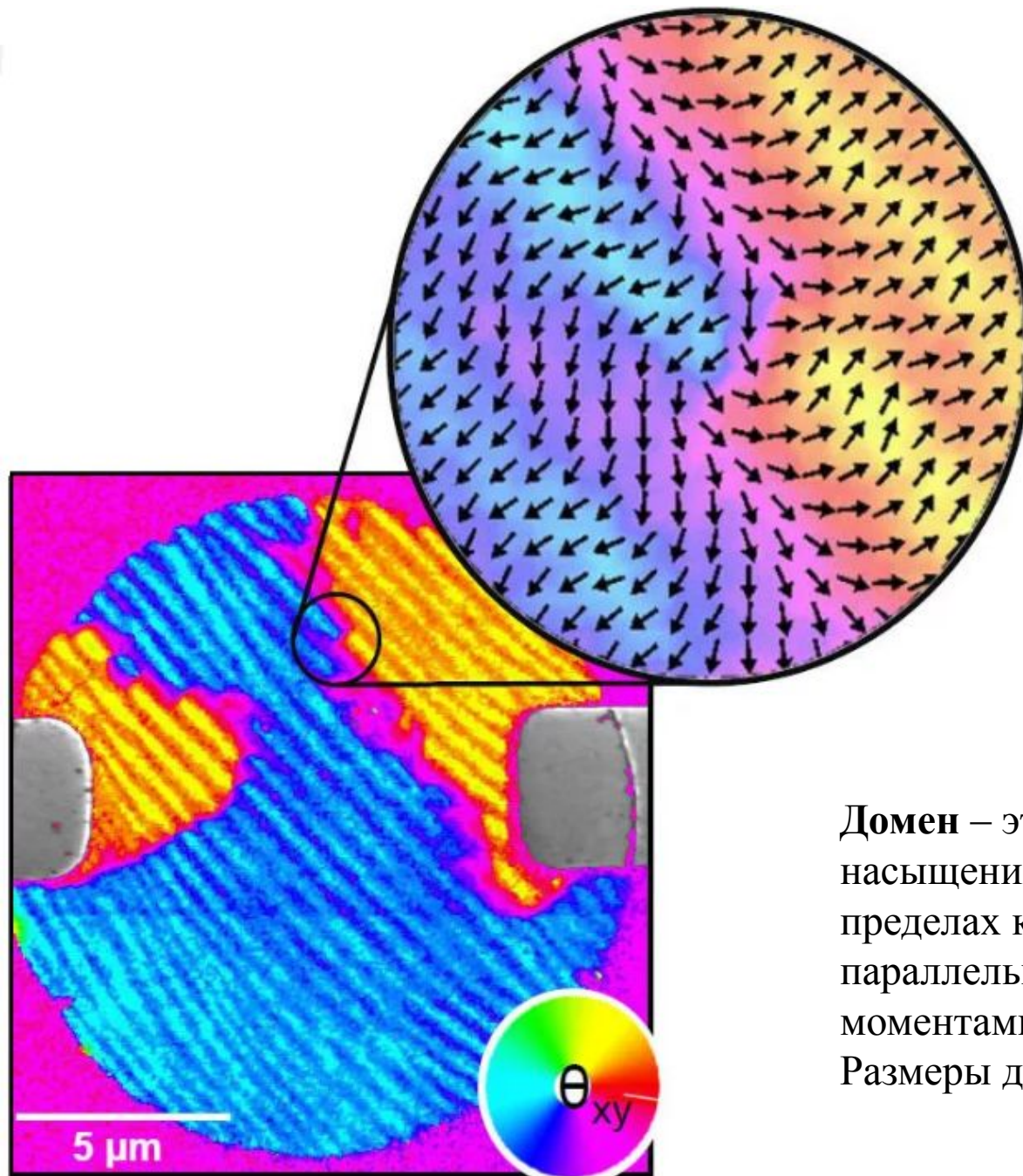
$$\alpha = 0 \rightarrow \Phi = BS$$

## Напряженность магнитного поля

$$B = \mu \mu_0 H$$

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

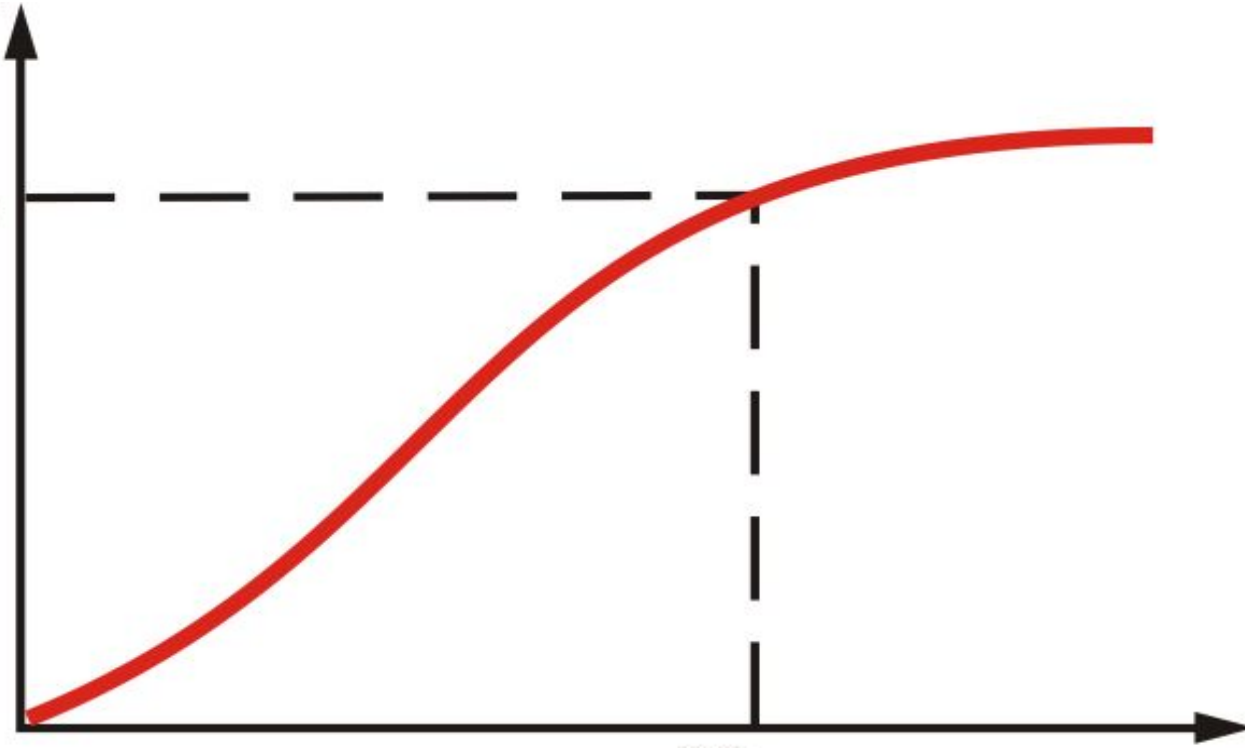
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu \mu_0}$$



**Домен** – это область, намагниченная до насыщения, то есть такая область, в пределах которой все атомы выстроены параллельно своими магнитными моментами  
Размеры доменов порядка 0,01 мм

## Основная кривая намагничивания

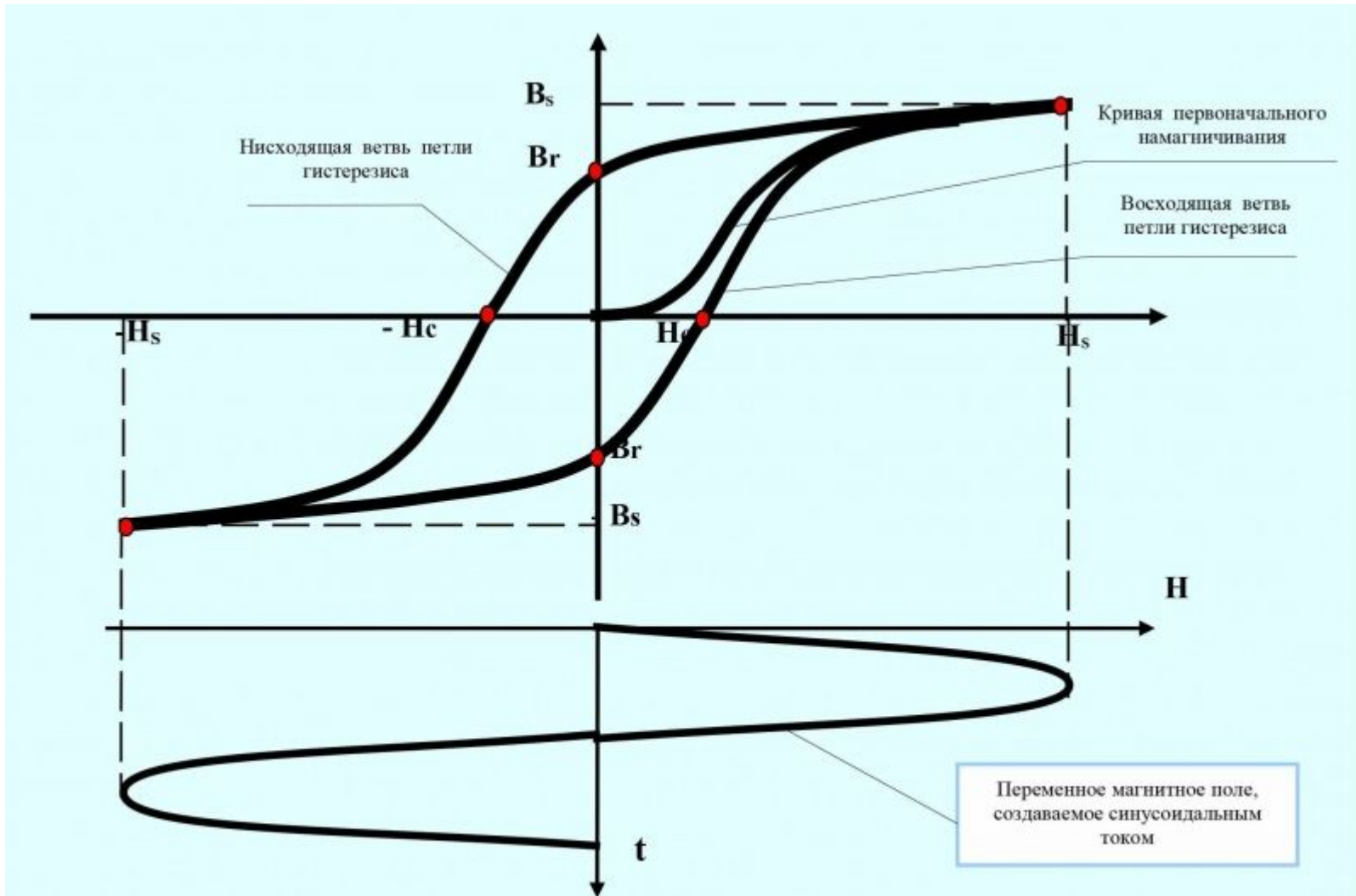
$$B = f(H)$$



определяет значение магнитной индукции, которая будет создаваться в магнитопроводе из данного ферромагнитного материала при воздействии конкретной напряженности поля

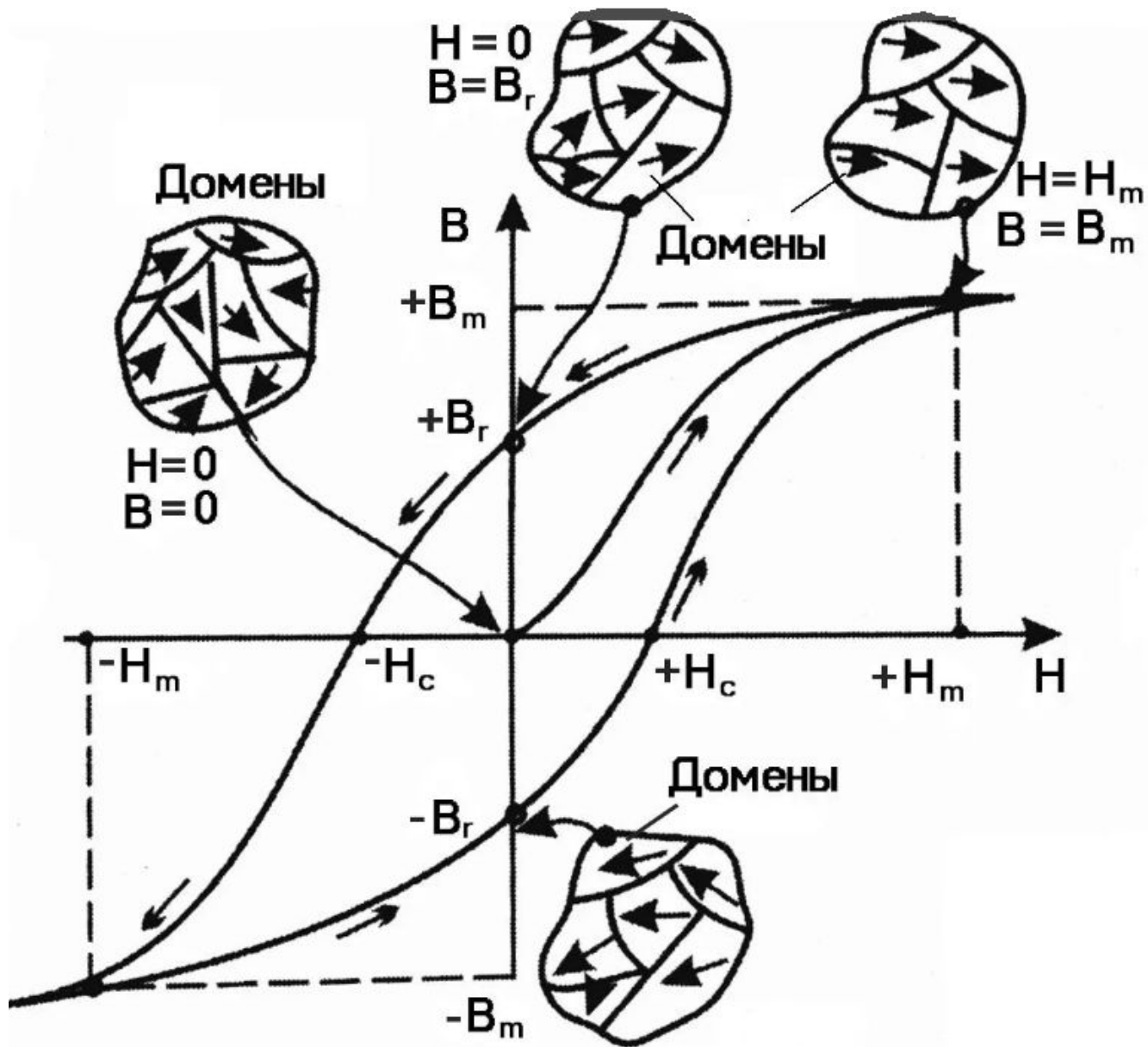


# Петля гистерезиса



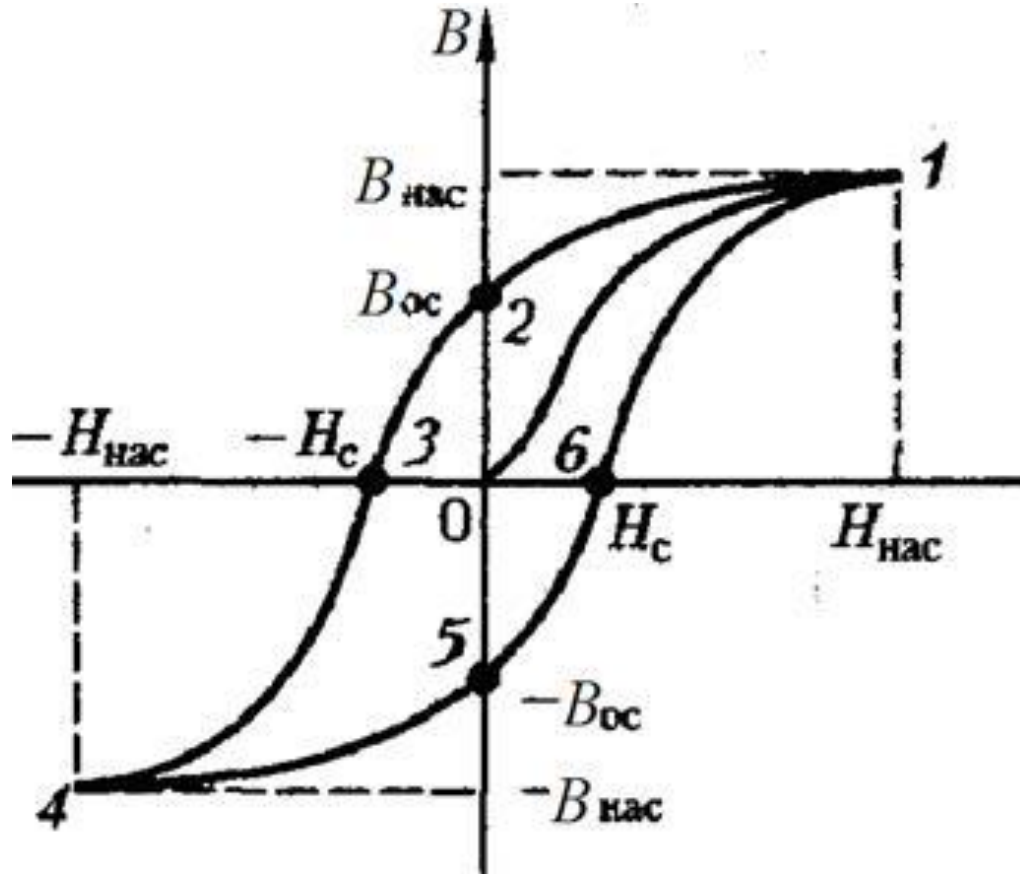
Основные магнитные характеристики ферромагнитных материалов:

$H_c$  – коэрцитивная сила;  $B_r$  – остаточная индукция;  $B_s$  – индукция насыщения;  $H_s$  – напряженность насыщения;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\mu_n$  – начальная магнитная проницаемость;  $\mu_{\max}$  – максимальная магнитная проницаемость

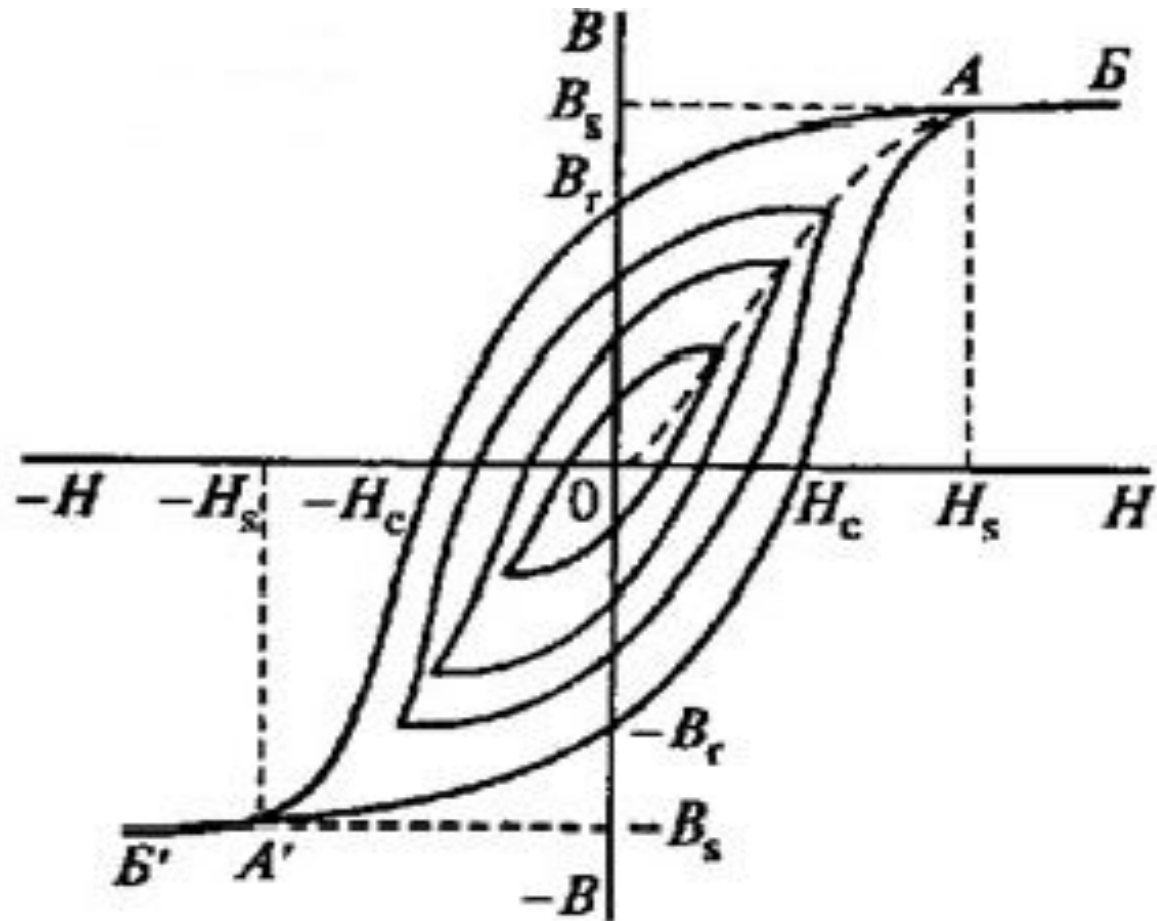


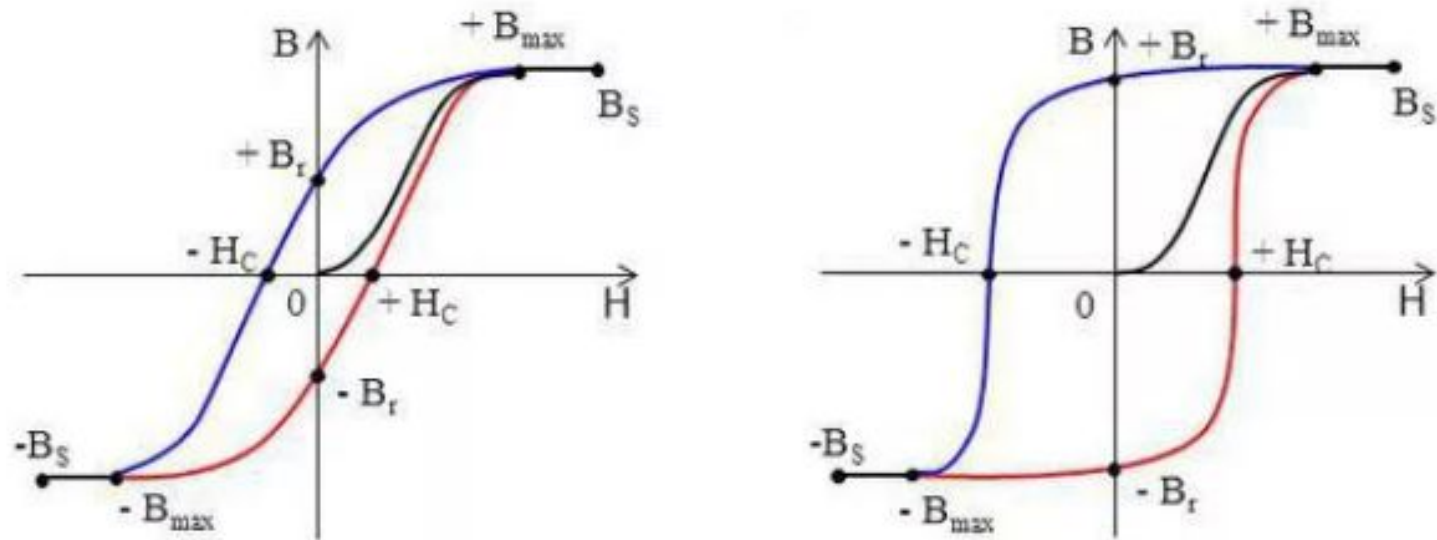
ориентация доменных областей при разных значениях напряженности и индукции магнитного поля

# Петля гистерезиса



# Семейство петель магнитного гистерезиса





По свойствам петли гистерезиса ферромагнитные материалы подразделяют на магнитомягкие и магнитотвердые

**Магнитомягкие** материалы: чистое железо, электротехнические конструкционные стали, пермаллои

коэрцитивная сила мала  $H_K < 0,05$  А/м, основная кривая намагничивания круто поднимается вверх, петля гистерезиса узкая и площадь ее небольшая

**Магнитотвердые** материалы: мартенситные стали (стали с высоким содержанием хрома и углерода), сплавы железа, никеля, алюминия кобальта

большая коэрцитивная сила  $H_K > 30000$  А/м, широкая петля гистерезиса с большой площадью

сохраняют намагниченность и после снятия намагничивающего поля





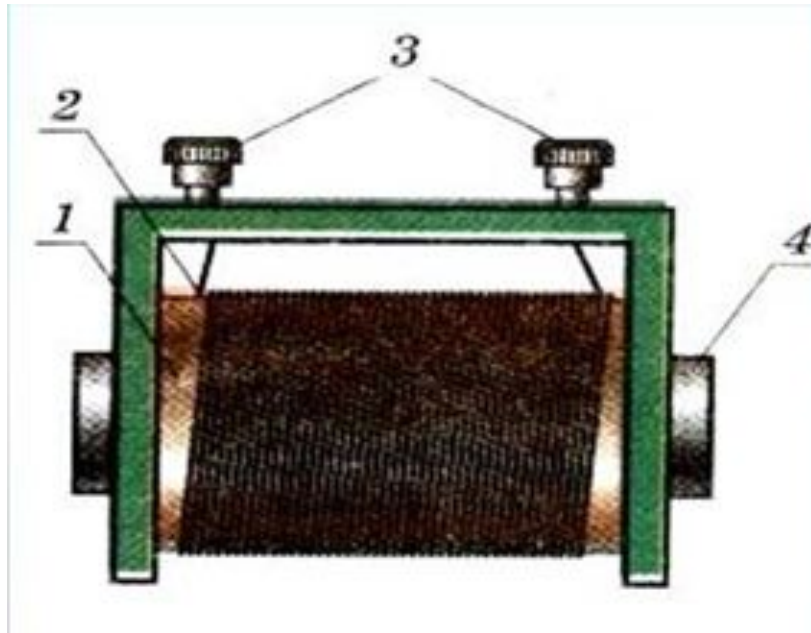


**Электромагнитные фиксаторы  
дверей**





## Устройство электромагнита



4 – стальной сердечник

1, 2 – катушка с витками изолированной проволоки

3 – клеммы источника

Для усиления магнитного поля и сосредоточения магнитных линий в определенной части пространства электрические машины и аппараты выполняют таким образом, чтобы магнитный поток проходил главным образом через ферромагнитные материалы

Магнитная цепь, или магнитопровод – это совокупность различных ферромагнитных (сталь) и неферромагнитных (воздух) частей электротехнического устройства для создания магнитных полей нужной конфигурации и интенсивности

Примеры магнитных цепей: сердечники трансформаторов, магнитных усилителей, электрических машин

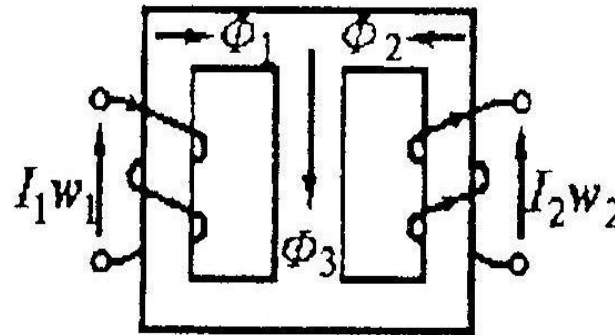
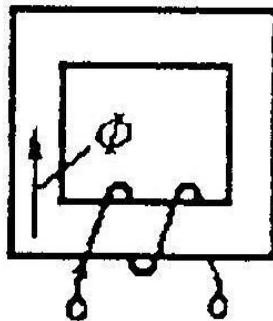
# Классификация магнитных цепей

## По электромагнитным свойствам:

1. **Магнитные цепи с постоянной МДС** (магнитные цепи постоянного тока): питание обмоток таких цепей осуществляется постоянным током
2. **Магнитные цепи с переменной МДС** (магнитные цепи переменного тока): питание обмоток таких цепей осуществляется переменным током
3. **Магнитные цепи с постоянной и переменной МДС** (магнитные цепи постоянного и переменного тока): питание части обмоток осуществляется постоянным током, остальных переменным током
4. **Магнитные цепи с постоянными магнитами.** К таким цепям относятся устройства, в которых для получения магнитного потока используют постоянные магниты

## По конфигурации:

1. **Неразветвленные** – это магнитная цепь, во всех сечениях которой магнитный поток одинаков
2. **Разветвленные** – магнитные потоки на разных участках неодинаковы



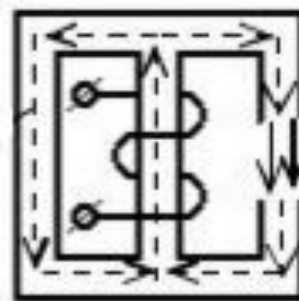
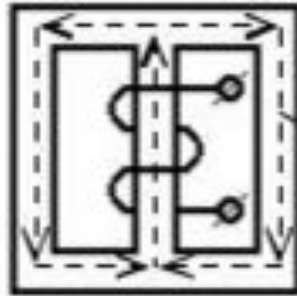
## Разветвленные магнитные цепи

– **симметричные:** условия для прохождения магнитных потоков от точки разветвления общего магнитного потока одинаковы для каждой ветви, то есть одинаковы материал и геометрические размеры магнитопровода

– **несимметричные**

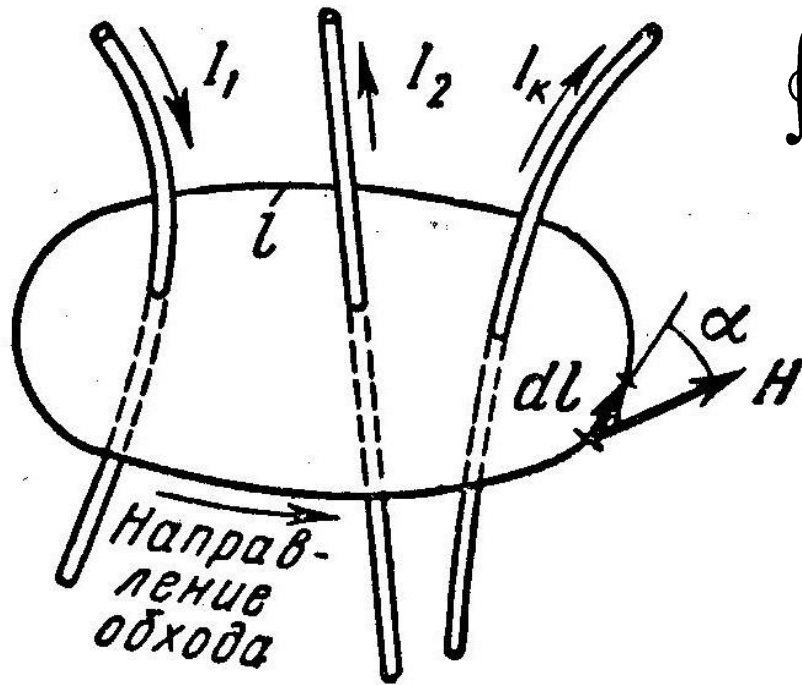
– **однородные:** условия для прохождения магнитного потока вдоль неразветвленного участка цепи не изменяются, то есть сечение и материал остаются постоянными

– **неоднородные**



# Основные законы магнитной цепи

## Закон полного тока

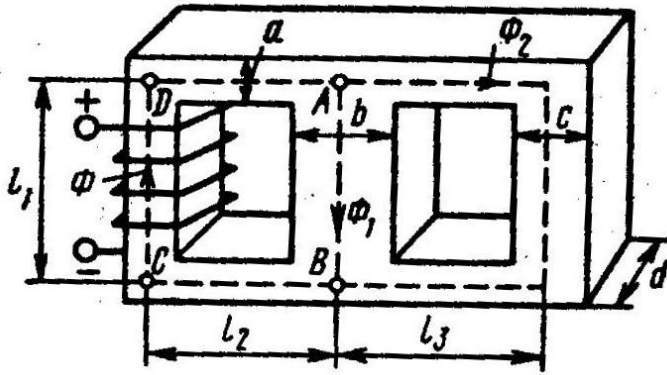


$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H \cos \alpha dl = \sum_{k=1}^n i_k$$

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = i \cdot w = F$$

$$F = i \cdot w$$

## Закон Ома для магнитной цепи



$$\Phi = \frac{U_M}{R_M}$$

Магнитное напряжение – величина, равная произведению напряженности магнитного поля на длину участка магнитной цепи

$$U_M = Hl$$

Магнитное сопротивление – отношение магнитного напряжения к магнитному потоку

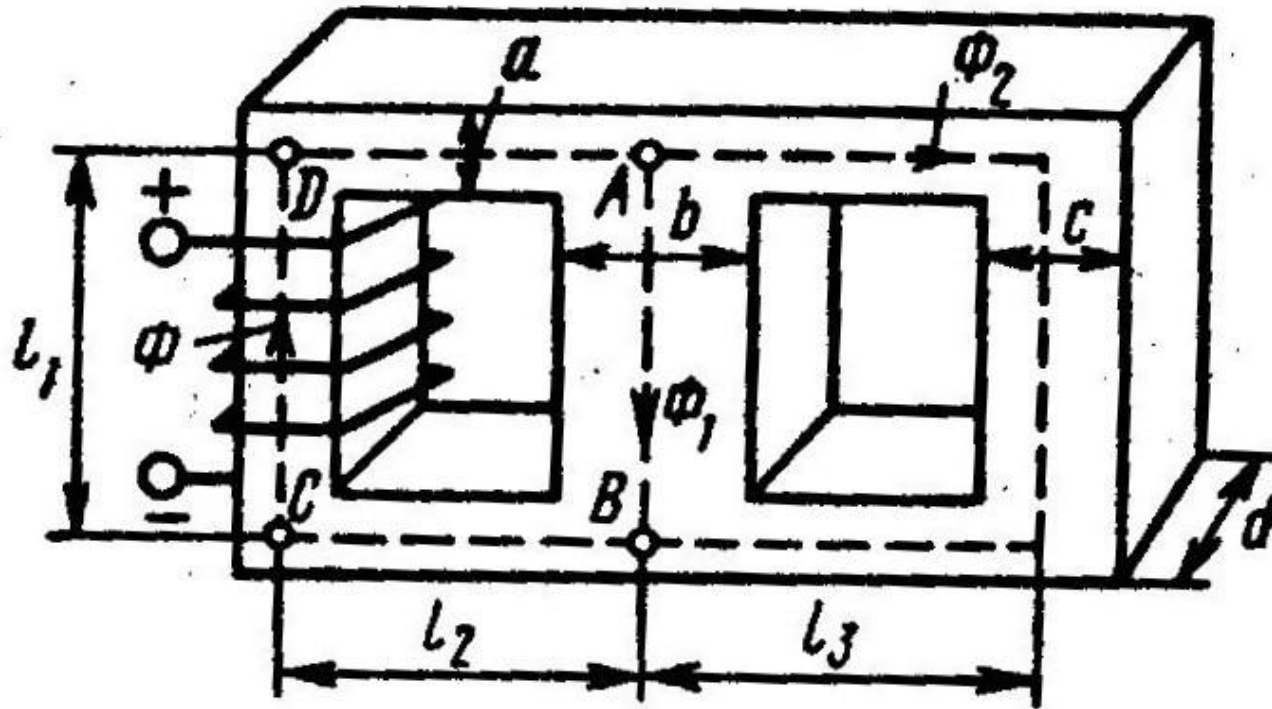
$$R_M = \frac{U_M}{\Phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{Bl}{\mu\mu_0 BS} = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \quad \left[ \frac{1}{\text{Гн}} \right]$$

$$H = \frac{Iw}{l} = \frac{F}{l}$$

$$\Phi = \frac{F}{R_M}$$

закон Ома справедлив только для линейных участков магнитной цепи

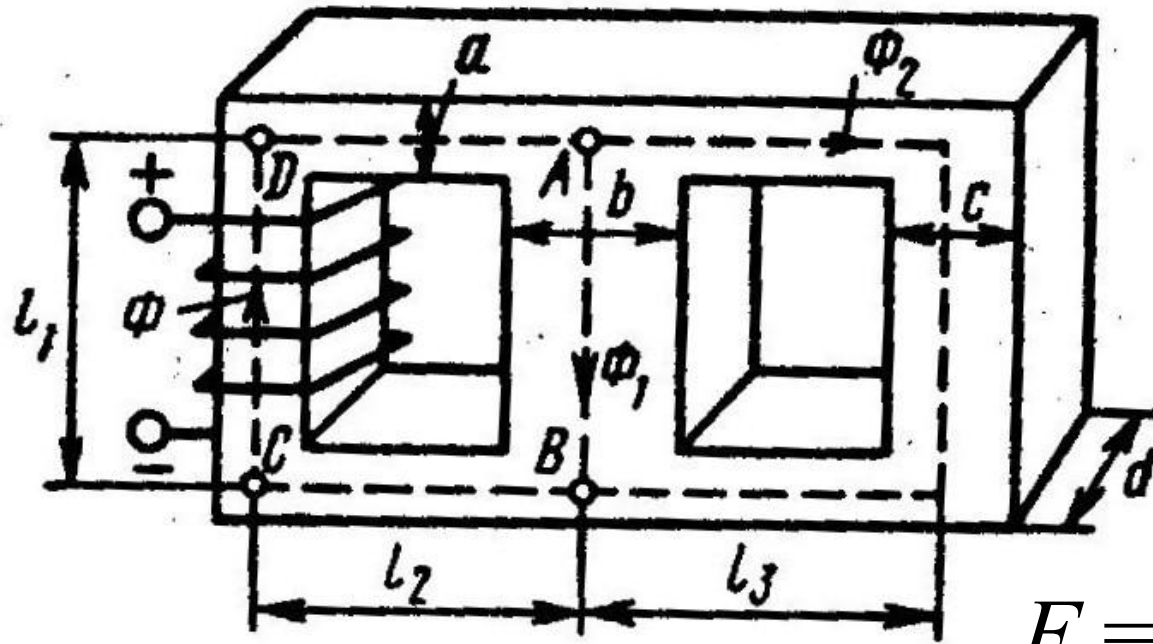
# Первое правило Кирхгофа для магнитной цепи



$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0$$

## Второе правило Кирхгофа для магнитной цепи



***ABCD:***

$$\sum I = Iw$$

$$F = H(l_1 + 2l_2) + H_1 l_1$$

$$I \cdot w = H(l_1 + 2l_2) + H_1 l_1$$

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 + \dots + I_n w_n = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_m l_m$$

$$\sum_{i=1}^n I_i w_i + \sum_{k=1}^n H_k l_k = 0$$

# Индукционное и электромеханическое действие магнитного поля

## Индукционное действие магнитного поля

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

если контур состоит из  $w$  последовательно соединенных витков и представляет собой катушку:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(w\Phi)}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}$$

если отдельные группы витков катушки пронизываются различными магнитными потоками, то общее потокоцепление

$$\Psi = \sum \Phi_k \cdot w_k$$

при отсутствии ферромагнитных материалов потокоцепление пропорционально протекающему по цепи току  $i$

$$\Psi = Li$$



$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

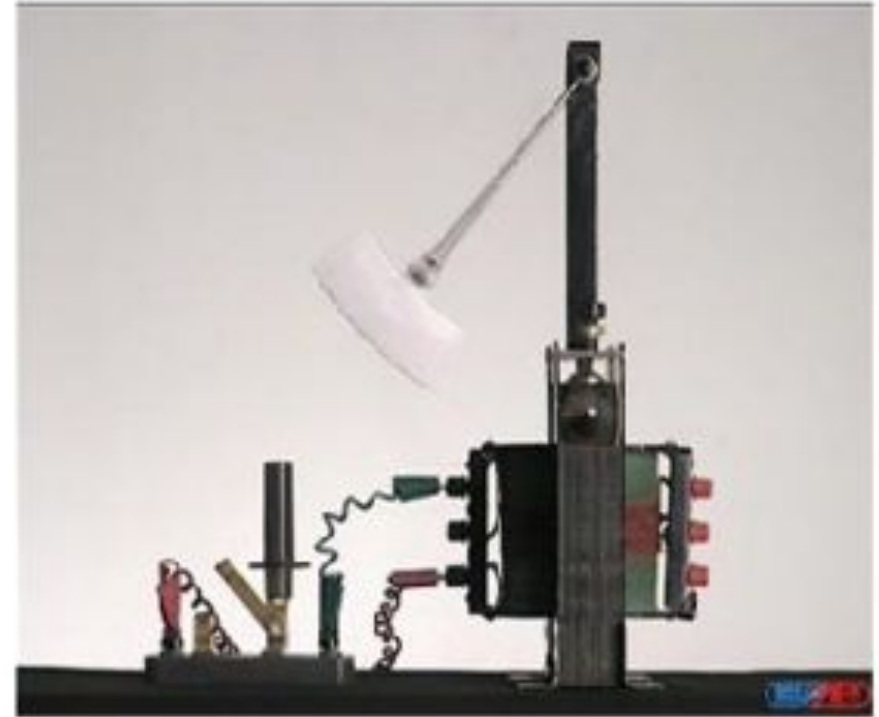
индуктивность  $L$  характеризует способность цепи запасать энергию в магнитном поле (так называемую электрокинетическую энергию)

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

При увеличении тока  $\frac{di}{dt} > 0$  энергия поступает в магнитное поле – катушка является приемником электрической энергии

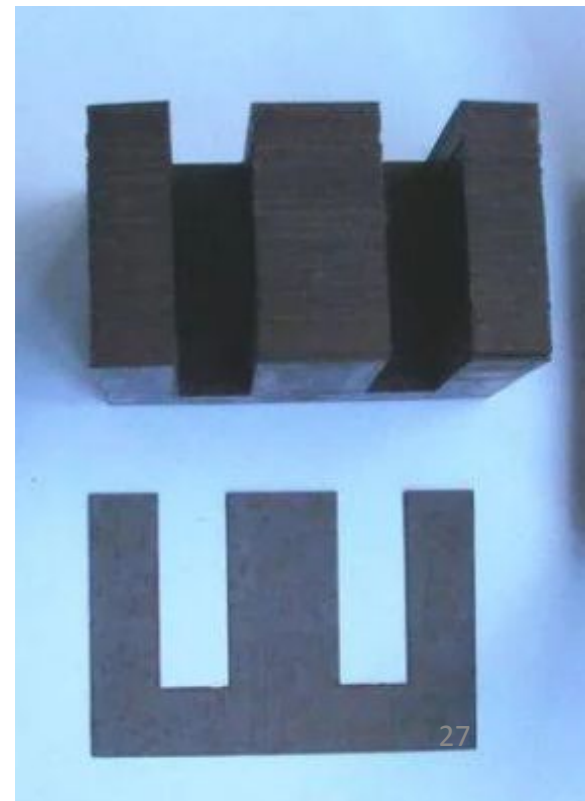
При убывании тока  $\frac{di}{dt} < 0$  магнитное поле катушки отдает запасенную в ней энергию

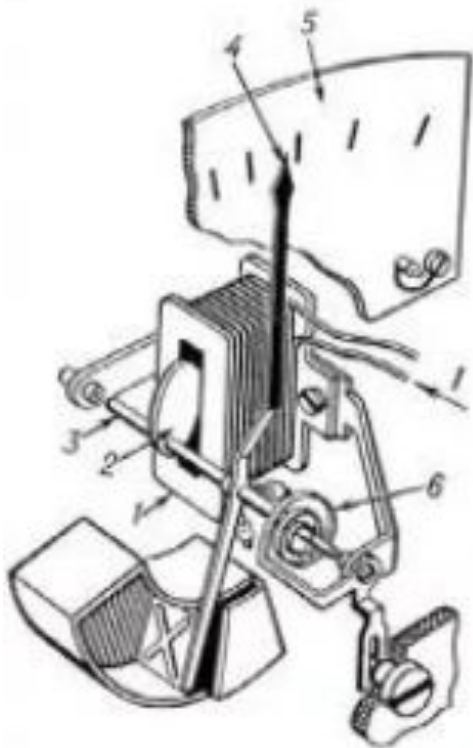
# Вихревые токи (токи Фуко)



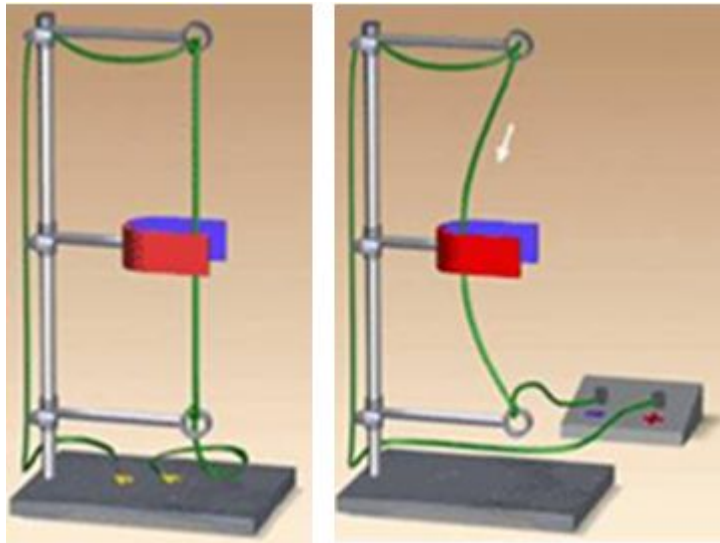


**Магнитопровод**





# Электромеханические взаимодействия. Закон Ампера

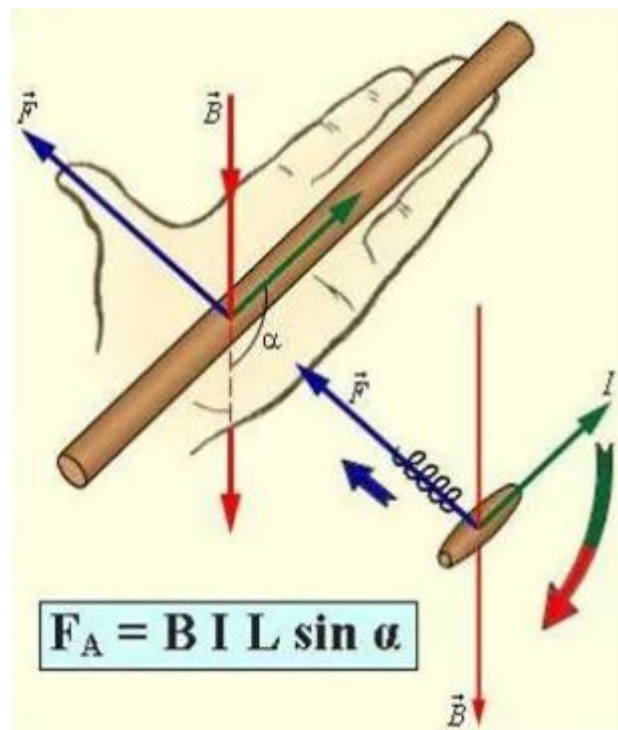


Если концы проводника присоединить к источнику постоянного тока, то проводник «втягивается» в магнит.

При изменении направления тока проводник «выбрасывается» из магнита

## Закон Ампера

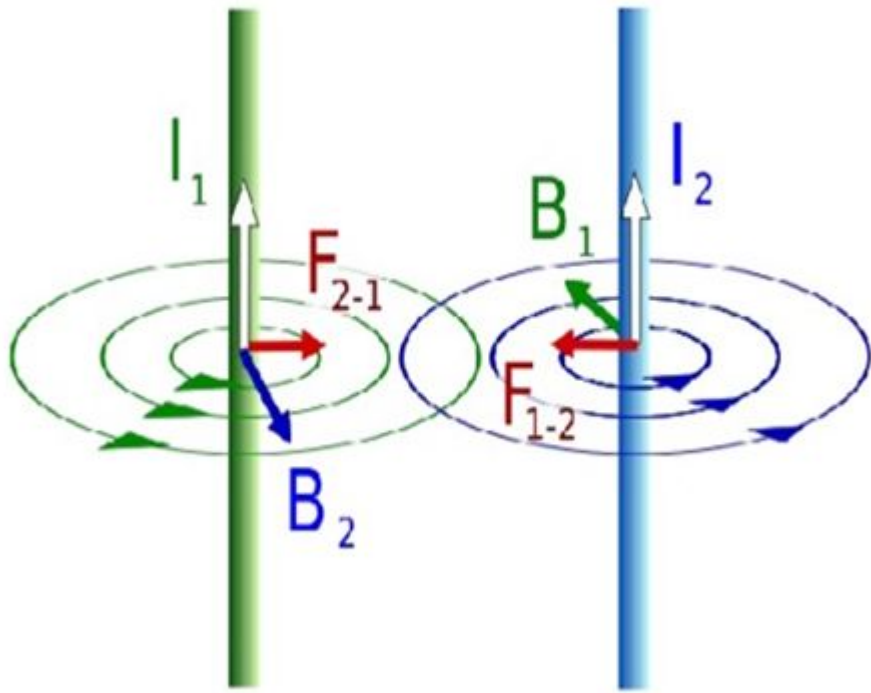
(закон электромагнитных сил Ампера)



$$F_{\text{эм}} = BIl \cdot \sin \alpha$$

Направление силы  $F_{\text{эм}}$  определяется с помощью правила левой руки:

если расположить левую руку таким образом, что магнитные линии входят в ладонь, четыре пальца совпадают с направлением тока, то отставленный в сторону большой палец укажет направление силы, действующей на проводник



Между проводниками с током возникают механические силы взаимодействия  
 Со стороны каждого из них на соседний будет действовать сила Ампера

$$F_{1,2} = F_{2,1} = F = kI_1I_2\frac{l}{a}$$

$I_1, I_2$  – сила тока, А

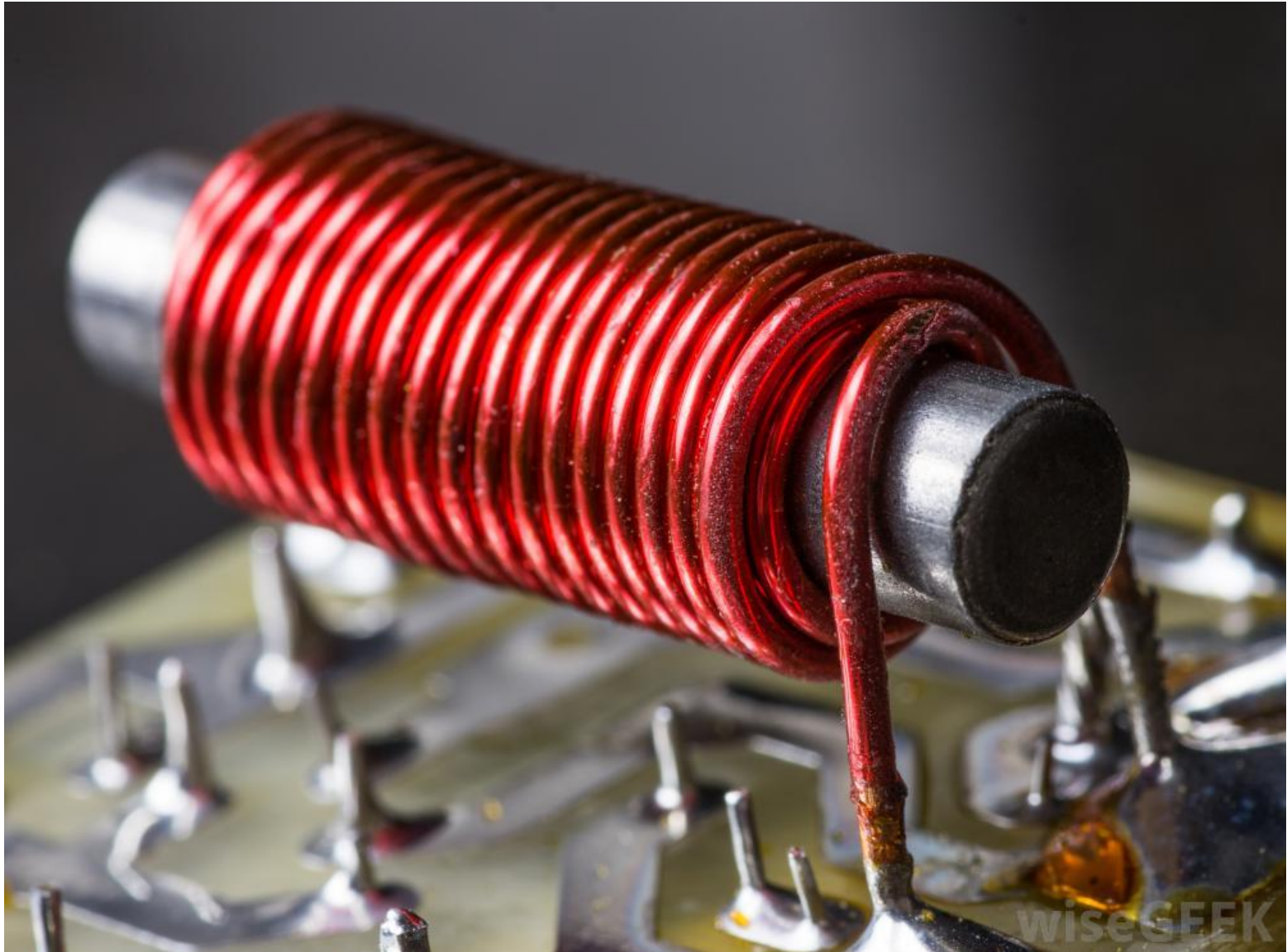
$l, a$  – длина и расстояние между проводниками

$k$  – коэффициент,  $k = 2 \cdot 10^{-7}$

Направление токов совпадает – проводники притягиваются

Направления токов противоположны – проводники отталкиваются

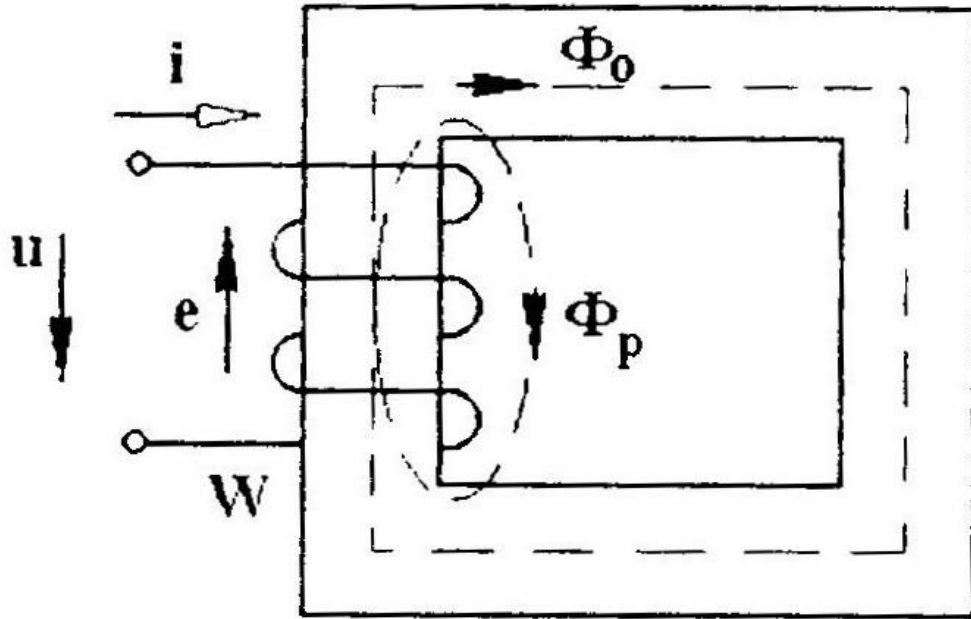
## Катушка с магнитопроводом в цепи переменного тока



Катушка с магнитопроводом – электромагнитное устройство, используется в электротехнических устройствах, работающих на переменном токе  
Она состоит из обмотки, выполненной из медного или алюминиевого провода и ферромагнитного сердечника (магнитопровода)  
Форма катушки может быть различной







$$F = i \cdot w$$

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$$

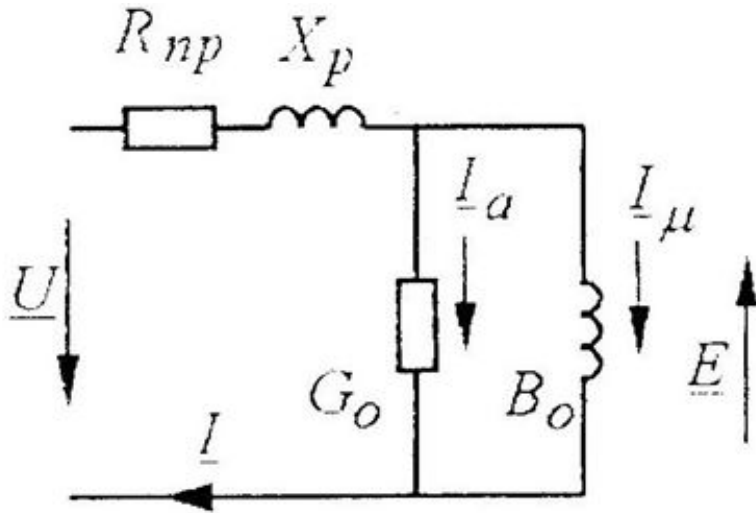
$\Phi_0$  – основной магнитный поток, замыкается по сердечнику (магнитопроводу), другая часть – меньшая – замыкается по воздуху и

$\Phi_p$  – поток рассеяния, замыкается по воздуху и частично по сердечнику

$$P_{\text{эл}} = I^2 R \text{ – электрические потери (потери в обмотке)}$$

$$P_{\text{м}} = P_{\text{г}} + P_{\text{в}} \text{ – магнитные потери (потери в сердечнике)}$$

## Схема замещения катушки с параллельным соединением элементов



$R_{пр}$  – активное сопротивление обмотки катушки

$X_p = \frac{E_p}{I}$  – индуктивное сопротивление рассеяния

$G_0 = \frac{I_a^2}{P_{маг}}$  – активная проводимость, отражающая преобразование энергии на нагрев сердечника (магнитные потери)

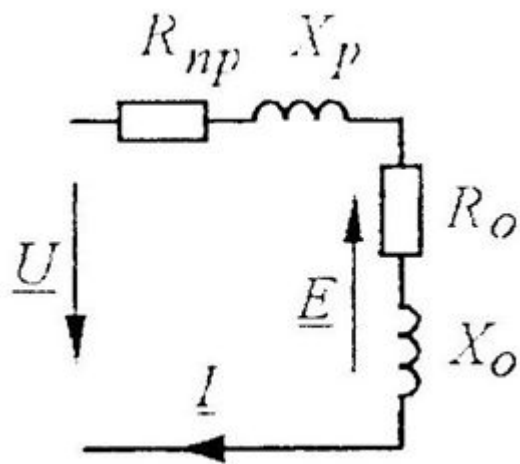
$B_0 = \frac{I_\mu}{E}$  – индуктивная проводимость, отражающая преобразование энергии на создание основного магнитного поля

$I_a, I_\mu$  – соответственно активная и реактивная составляющие тока катушки

**Уравнение электрического равновесия катушки с ферромагнитным сердечником**

$$\overset{\bullet}{I} = \overset{\bullet}{I}_a + \overset{\bullet}{I}_\mu$$

## Схема замещения катушки с последовательным соединением элементов



$R_0 = \frac{P_{\text{маг}}}{I_a^2}$  – активное сопротивление, отражающее преобразование энергии на нагрев сердечника

$X_0$  – индуктивное сопротивление, отражающее преобразование энергии на создание основного магнитного поля

$$G_0 \neq \frac{1}{R_0} \quad B_0 \neq \frac{1}{X_0}$$

Уравнение электрического равновесия катушки с ферромагнитным сердечником

$$\dot{U} = -\dot{E} = R_{np} \dot{I} + jX_p \dot{I}$$

## Уравнения трансформаторной э.д.с.

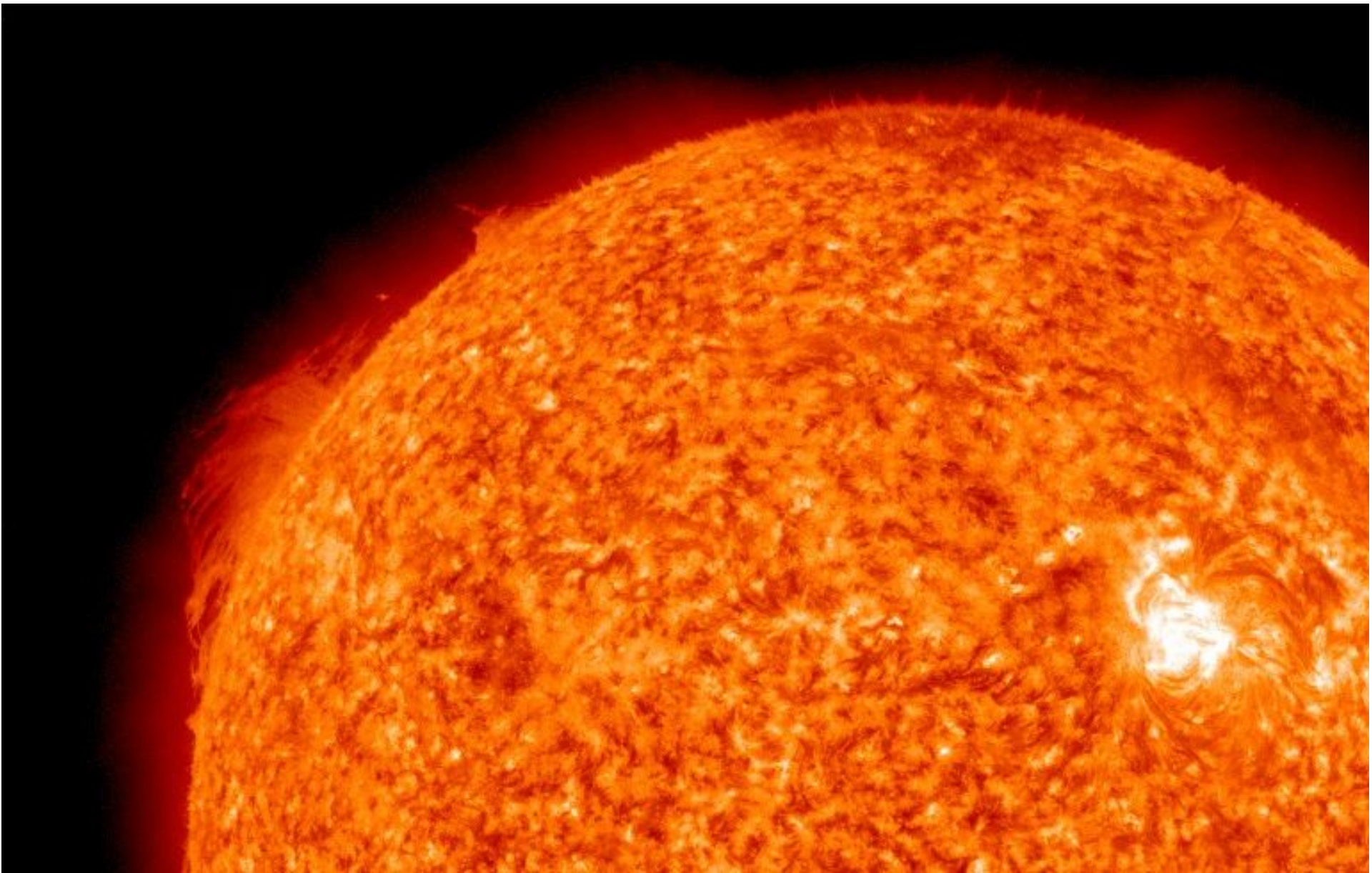
$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t \qquad e = -w \frac{d\Phi}{dt}$$

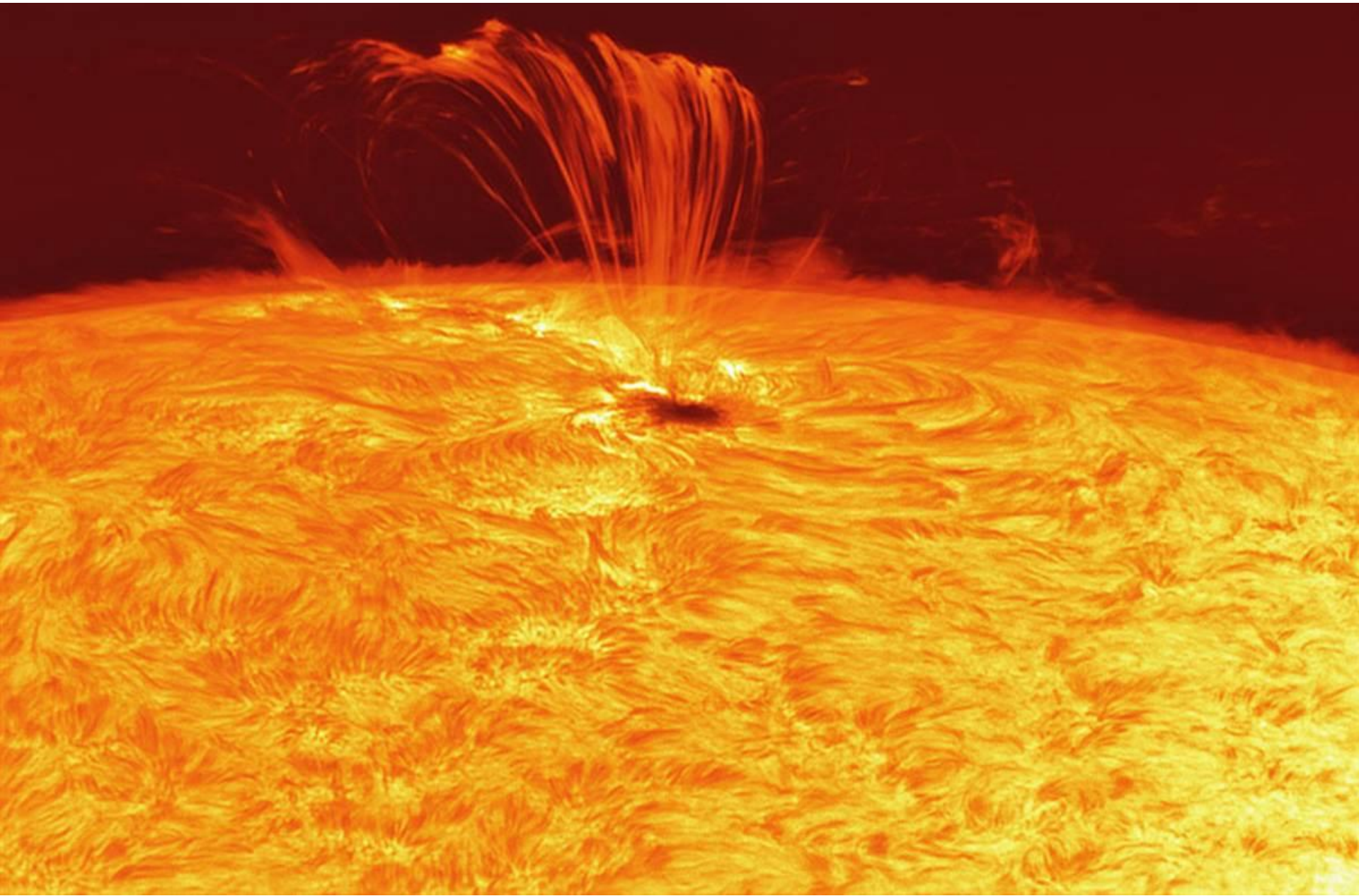
Э.д.с. от основного магнитного потока

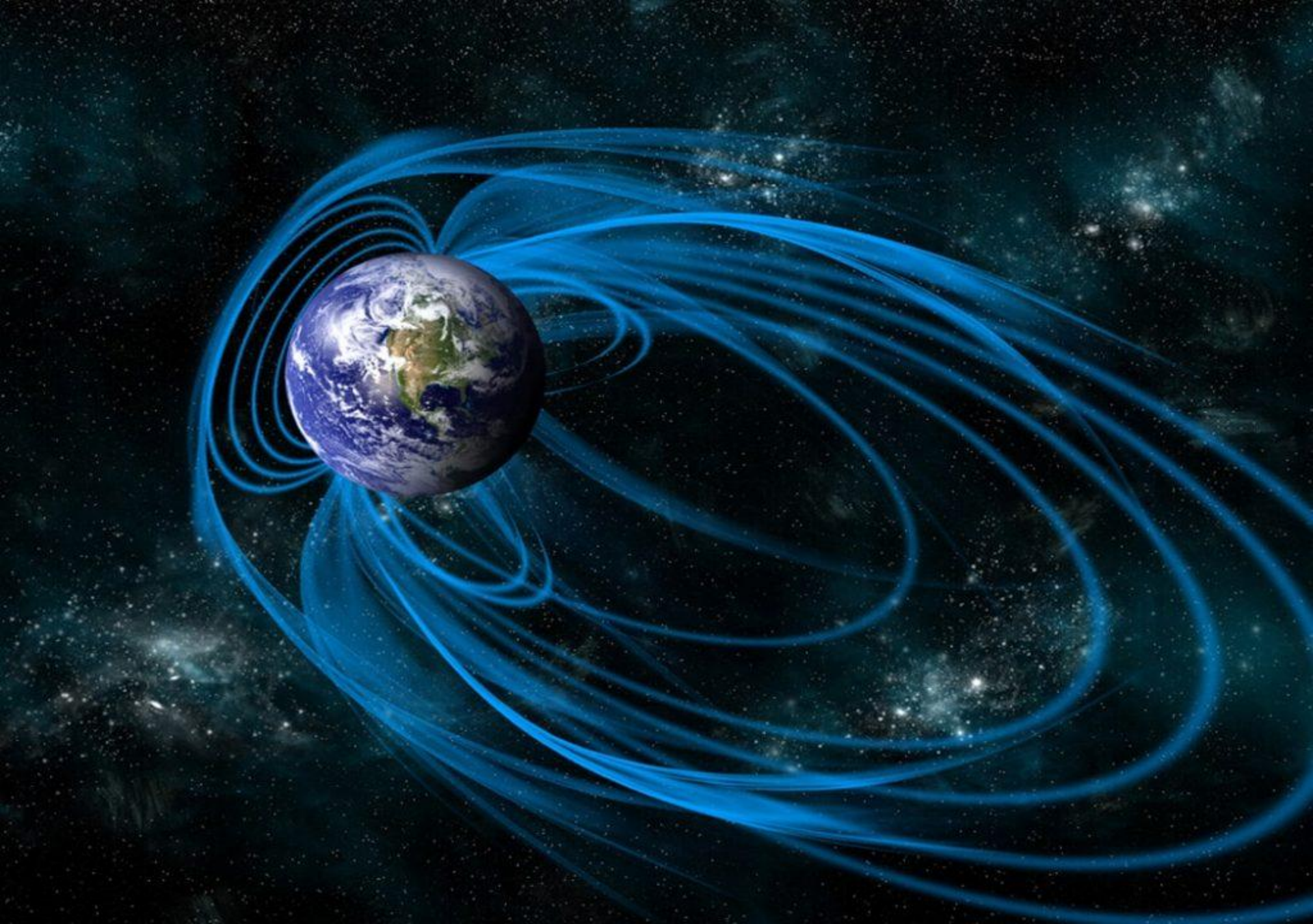
$$E = 4,44 f w \Phi_{0m}$$

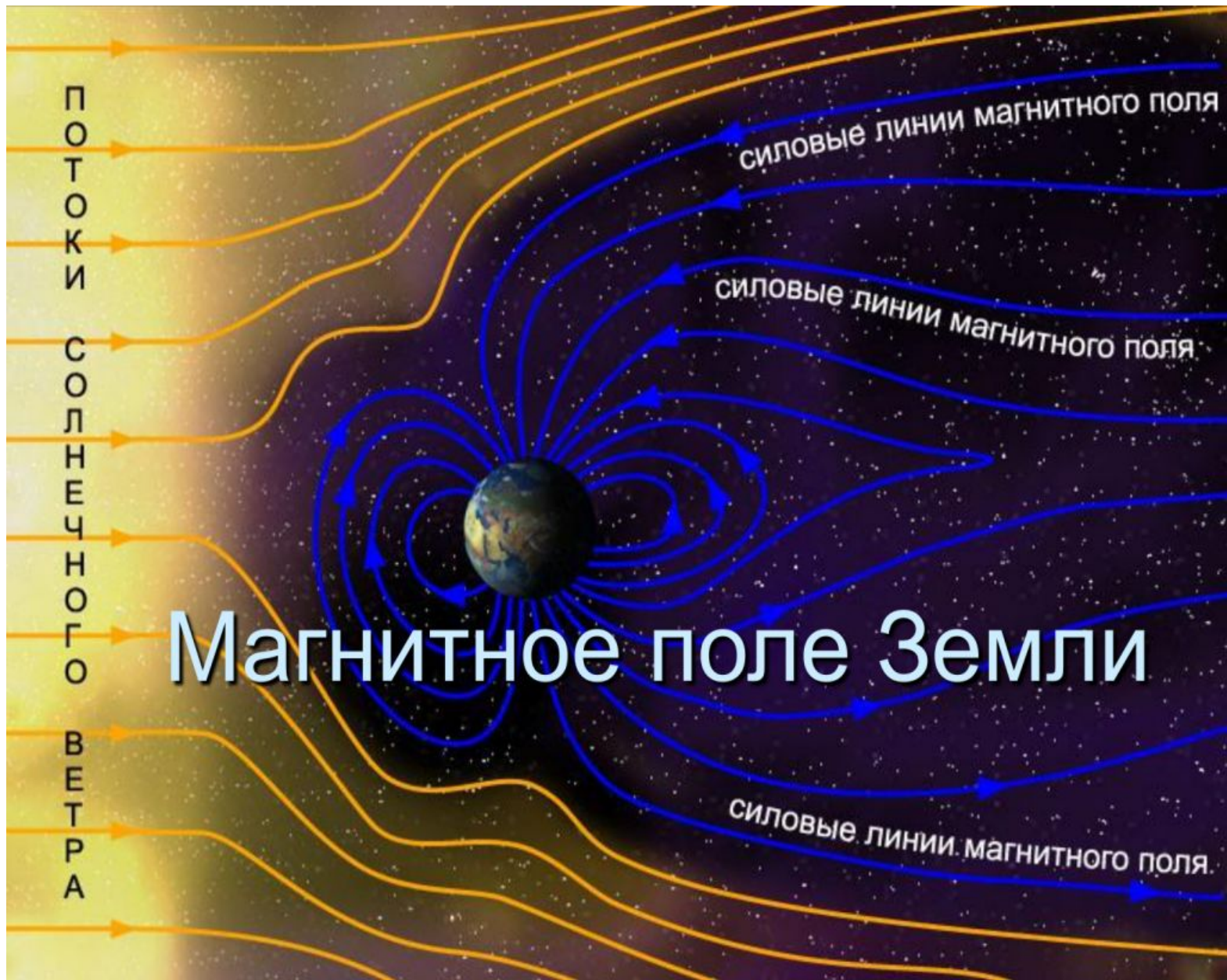
Э.д.с. от магнитного потока рассеяния

$$E = 4,44 f w \Phi_{pm}$$

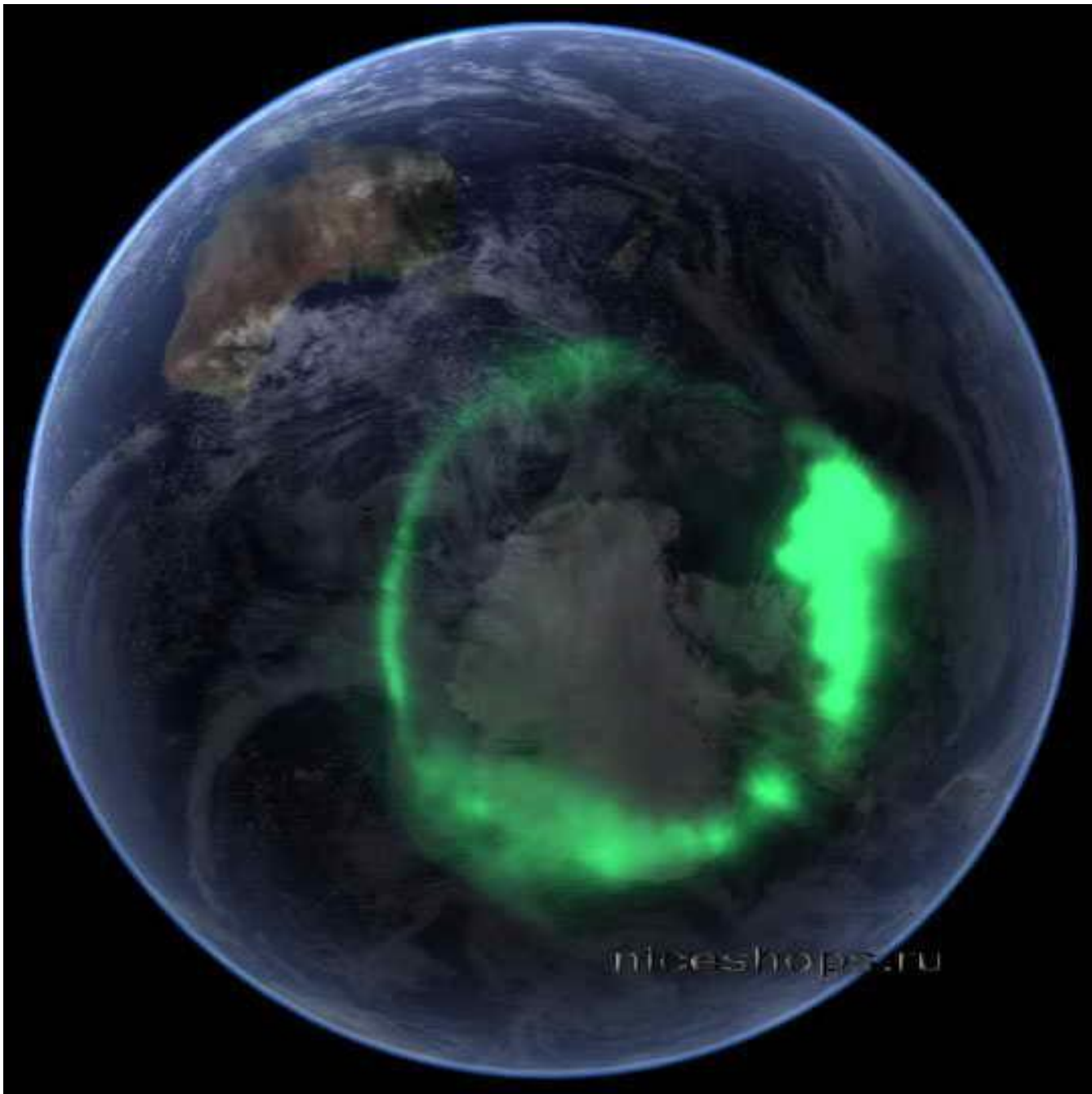














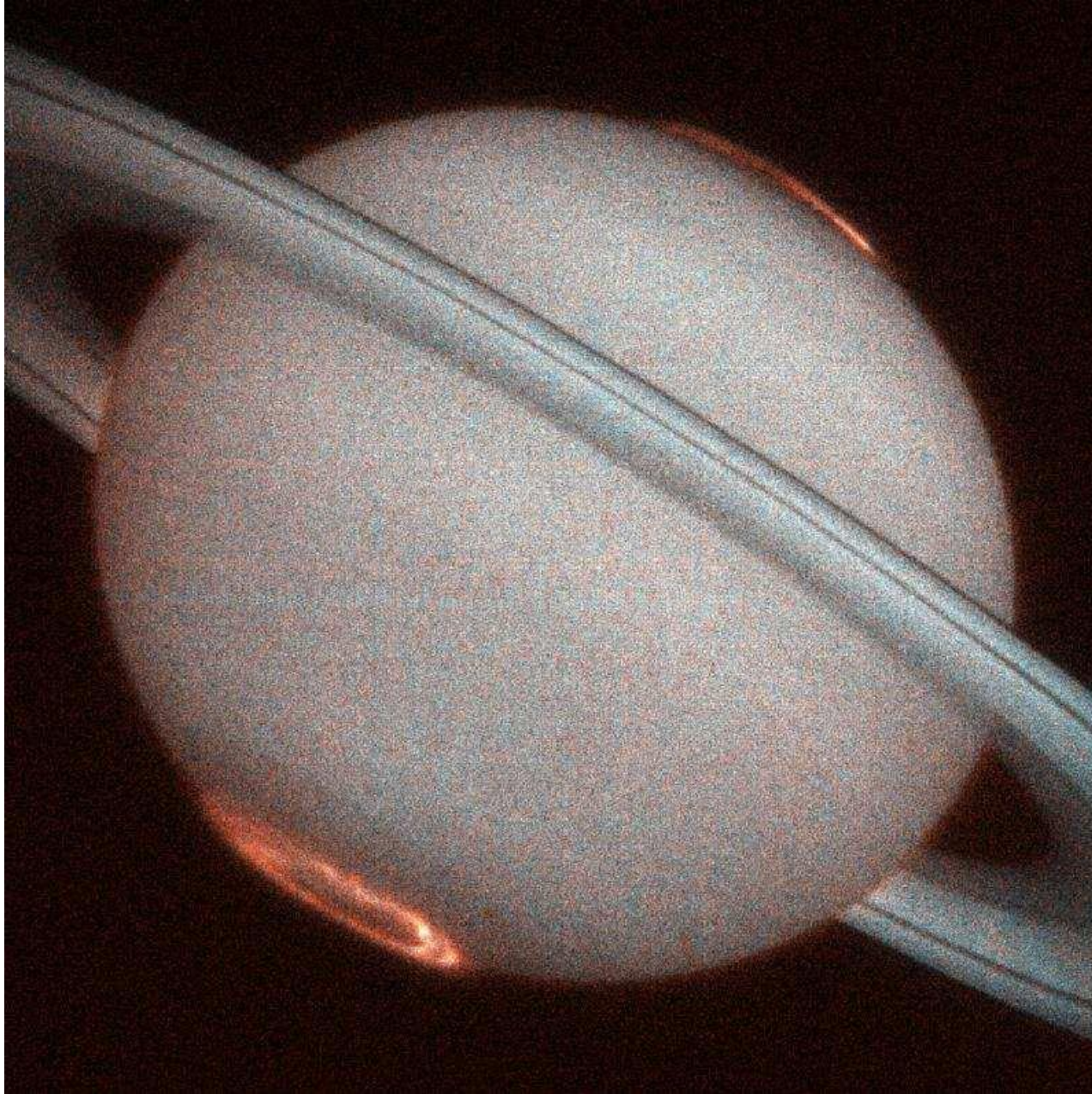










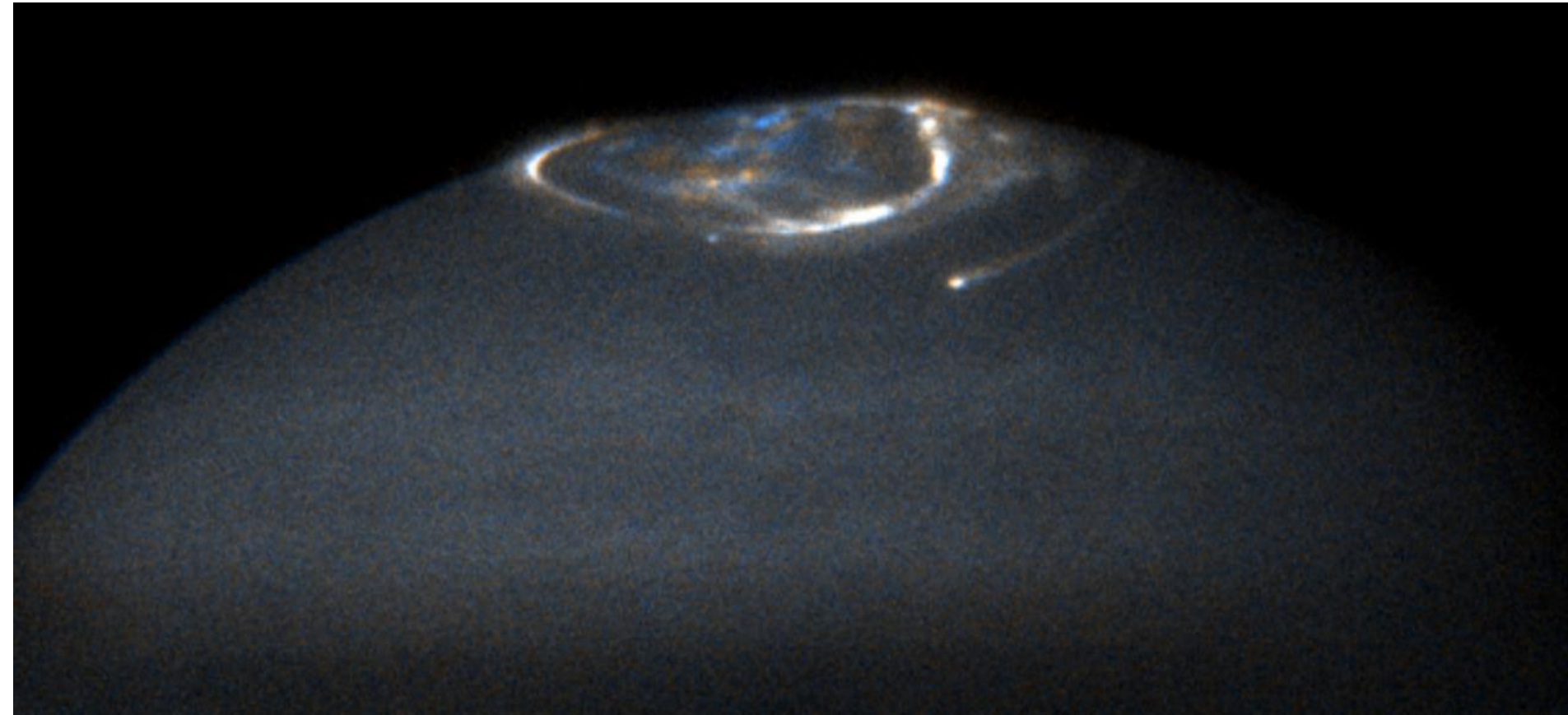


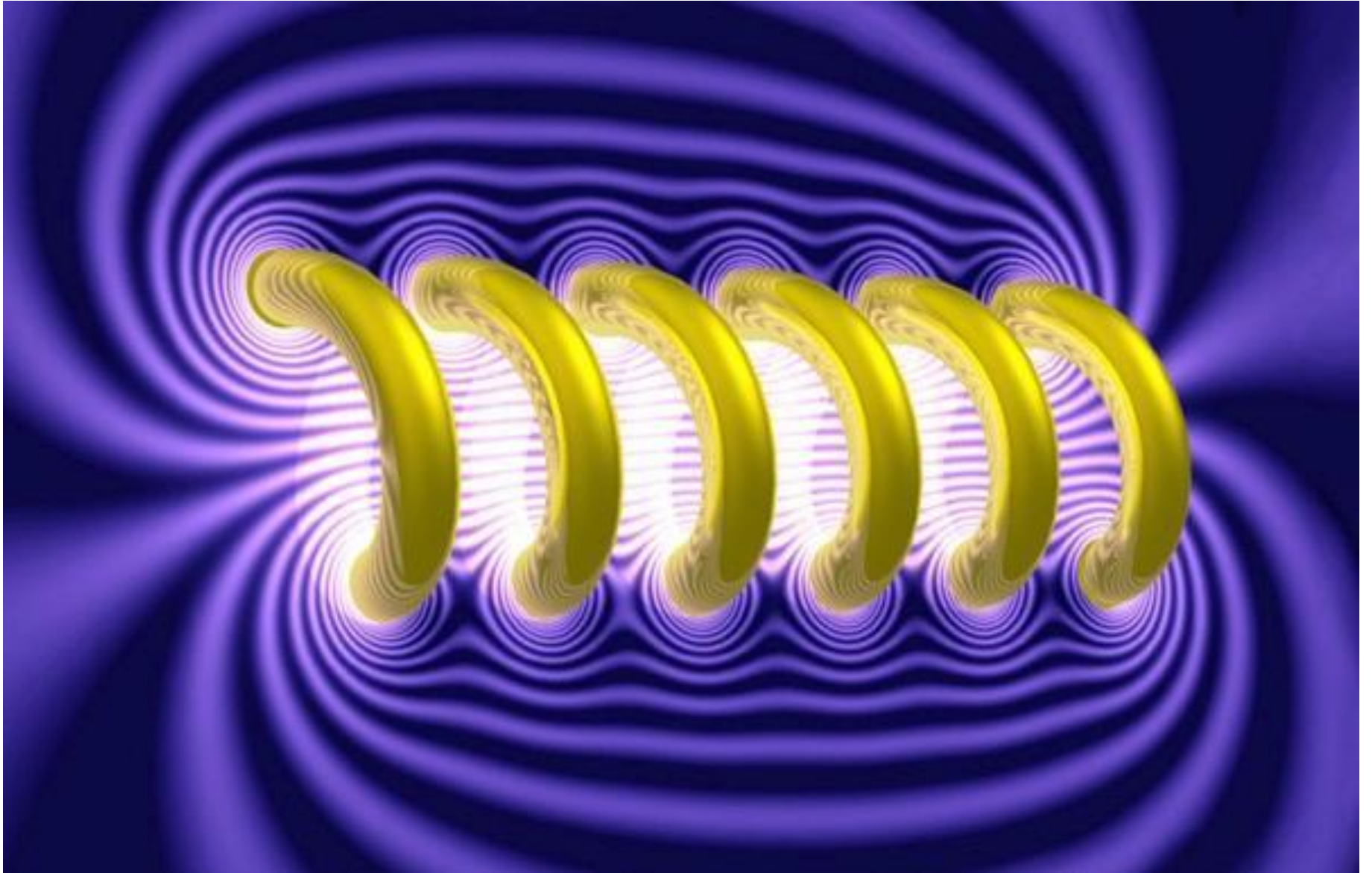
Сатурн в УФ диапазоне, фото телескопа Хаббл

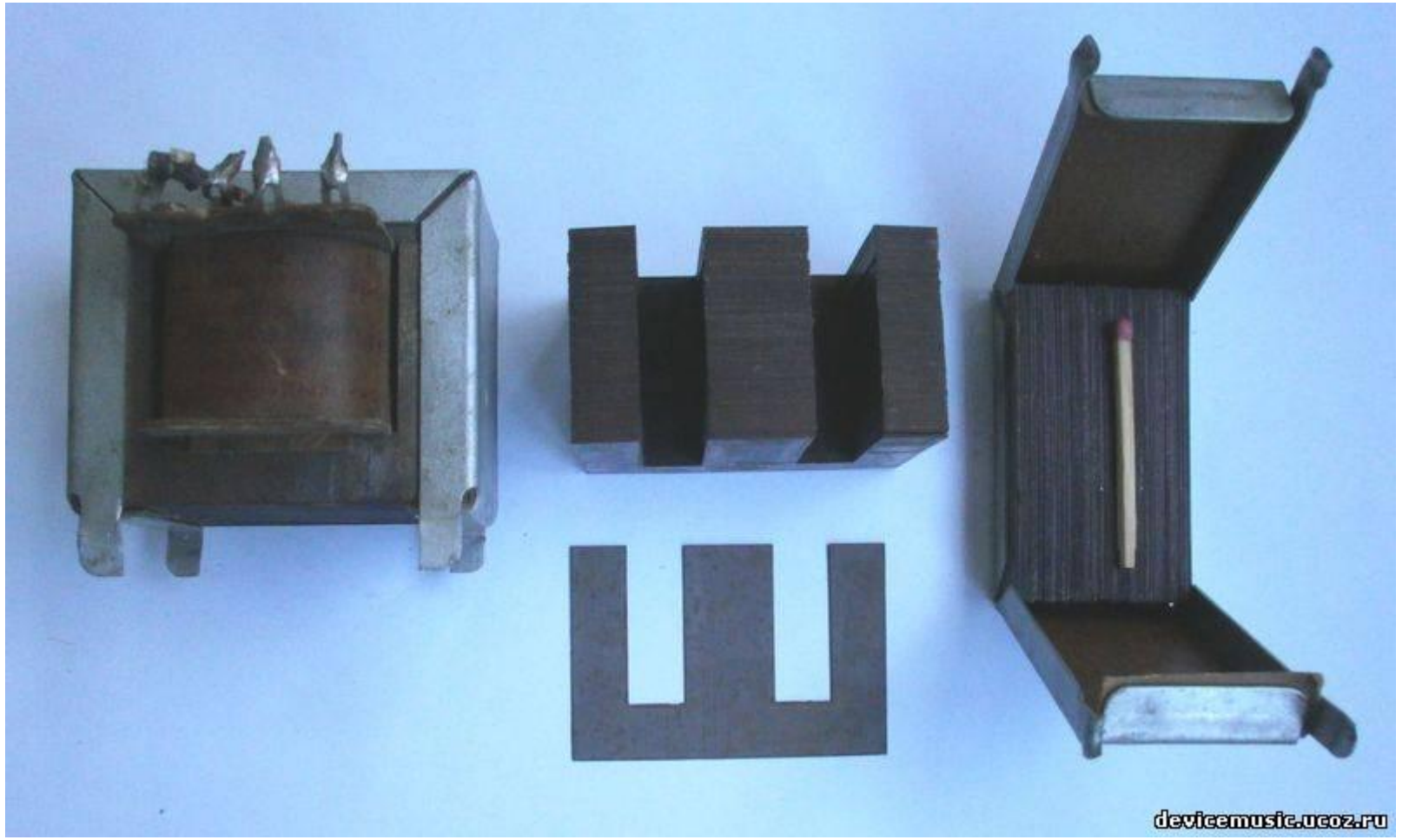




Сияние на северном полюсе Юпитера







[devicemusic.ucoz.ru](http://devicemusic.ucoz.ru)

# Элементы трансформатора:

Пластины  
стального  
сердечника

Катушка с  
проволочной  
обмоткой

Пластины стального  
сердечника

