

# Лекция 18

## 4. Магнетизм

### 4.1. Магнитостатика

Действие магнитного поля на проводник с током. Сила Ампера. Взаимодействие параллельных токов. Закон Ампера. Действие поля на контур с током. Магнитный момент контура. Действие поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Движение зарядов в магнитных и электрических полях. Эффект Холла. Работа перемещения проводника и контура с током в магнитном поле. Сцепленный магнитный поток.

## **Магнитное поле**

Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется силовое взаимодействие между **движущимися** зарядами.

- 1) Магнитное поле порождается движущимися зарядами (электрическими токами);
- 2) Воздействует на движущиеся заряды (электрические токи).

## **Действие магнитного поля**

Поле обнаруживает себя по действию на помещенные в него:

- 1) магнитные стрелки – ориентирует (вращает);
- 2) контура (рамки) с током – ориентирует (вращает);
- 3) проводники с током – перемещает;
- 4) движущиеся электрически заряженные частицы – перемещает.

## **Индукция магнитного поля**

Индукция магнитного поля может быть определена через действие:

- 1) на проводник с током;
- 2) на контур (рамку) с током;
- 3) на движущуюся электрически заряженную частицу.

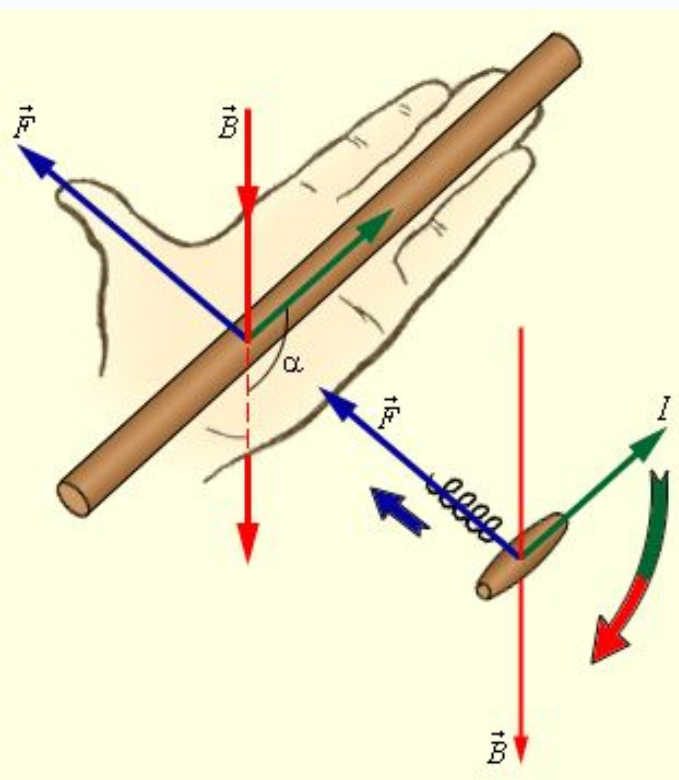
# Сила Ампера

Сила, с которой внешнее магнитное поле действует на прямолинейный проводник с током, прямо пропорциональна силе тока в проводнике, длине проводника, величине магнитной индукции поля и синусу угла между магнитной индукцией и направлением тока в проводнике.

Направление силы Ампера всегда перпендикулярно как линиям индукции, так и самому проводнику.



Андре-Мари  
Ампер  
1775-1836



$$d\vec{F}_A = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\left| dF_A \right| = IBdl \sin(\angle dl, B)$$

- 1) Правило "буравчика" – поступательное его движение при кратчайшем повороте от  $I$  к  $B$  показывает направление силы;
- 2) Правило "левой руки" – ориентировать её так, чтобы четыре вытянутых пальца располагались вдоль тока, а магнитная индукция входила в ладонь, тогда отогнутый на 90 градусов большой палец укажет направление силы.

$$dF_A = I dl \times B$$

$$|dF_A| = IBdl \sin(\angle dl, B)$$

## Магнитная индукция

Магнитной индукцией  $B$  называется векторная физическая величина, характеризующая силовое действие магнитного поля и численно равная силе, действующей со стороны магнитного поля на единичный элемент тока (единицу длины проводника, по которому течет ток единичной силы), расположенный перпендикулярно направлению поля.

## Единица магнитной индукции (тесла)

За единицу магнитной индукции принята индукция такого однородного поля, в котором на участок проводника длиной в 1 м при силе тока в нем 1 А действует со стороны поля сила 1 Н.

$$|B| = \frac{dF}{I dl}$$

$$[Tл] = \left[ \frac{Н}{А \cdot м} \right] = 10^4 \text{ Гаусс}$$

# ***Видео сила Ампера***

# Взаимодействие параллельных токов

## – закон Ампера (1820)

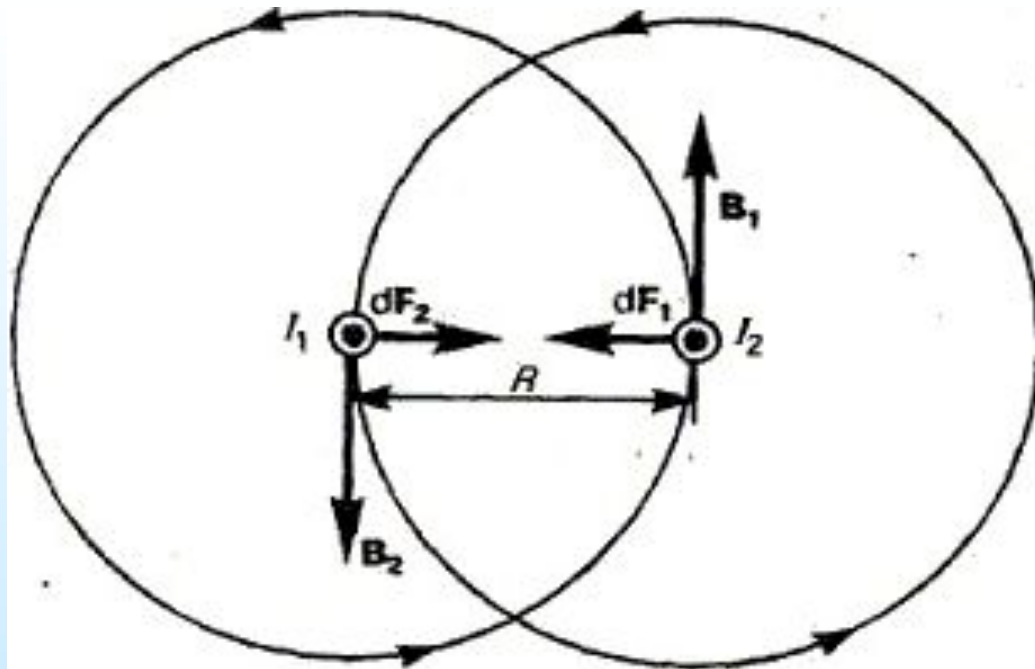
Рассчитаем силу взаимодействия (на единицу длины) двух находящихся в вакууме бесконечно длинных прямых параллельных токов  $I_1$  и  $I_2$ , находящихся на расстоянии  $b$  друг от друга:



Андре-Мари  
Ампер  
1775-1836

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1}{b}$$

$$|dF_A| = I_2 B_1 dl \sin(\angle dl, B_1)$$

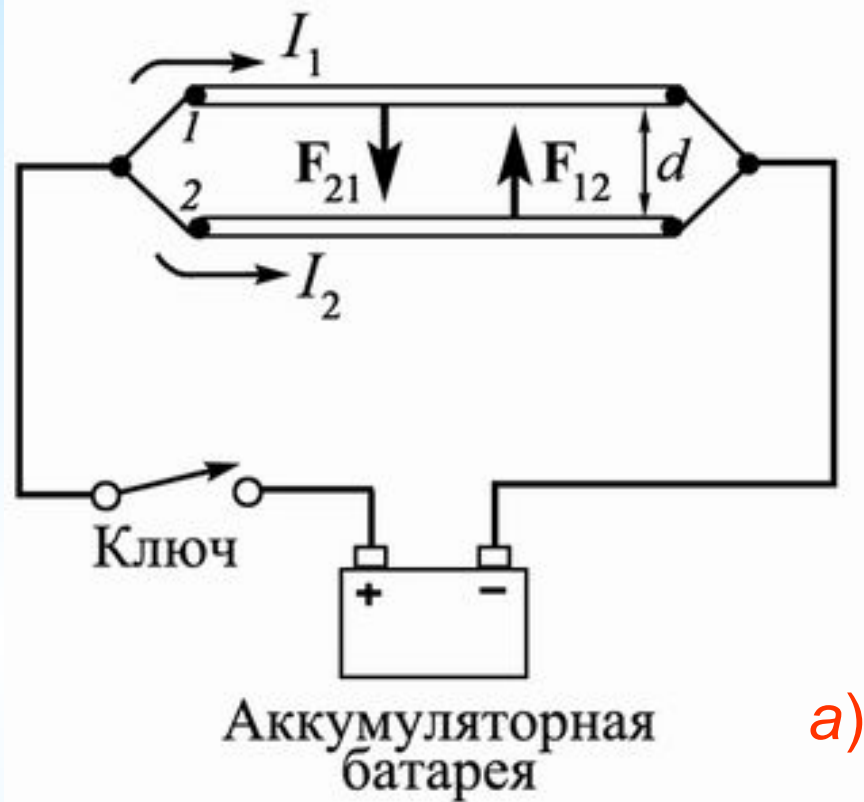


$$dF_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{b} dl \quad \rightarrow$$

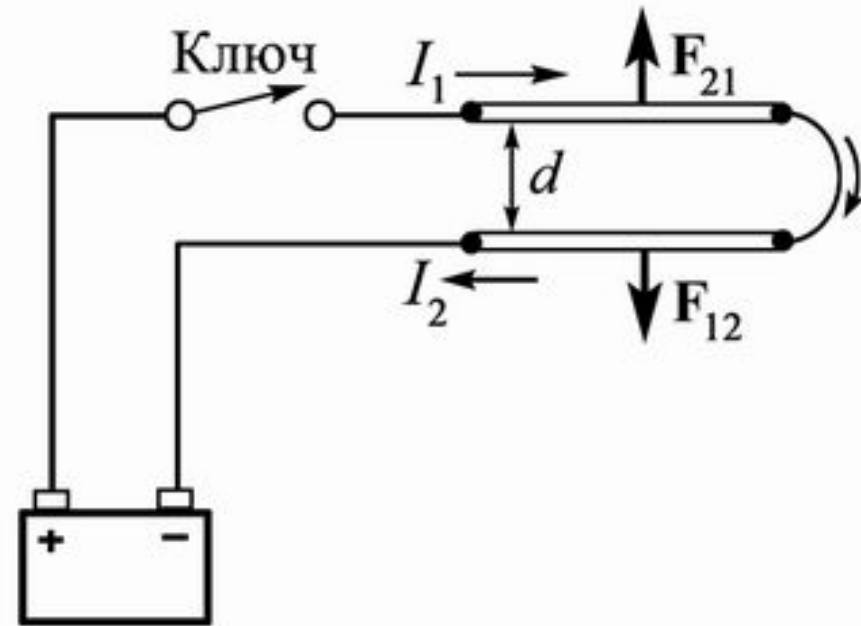
$$F = \frac{dF_A}{dl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b}$$

Токи, текущие в одном направлении притягиваются;  
Токи, текущие в разных направлениях, отталкиваются.

## Взаимодействие параллельных токов



а)



б)

Близко расположенные два незаряженных проводника при включении батареи притягиваются (а) или отталкиваются (б) в зависимости от того, текут ли в них токи в одном или противоположном направлении.

По величине силы отталкивания или притяжения, действующей на единицу длины проводника, можно определить силу тока, идущего по проводникам.

# ***Видео параллельные токи***



## **Единица силы тока (ампер)**

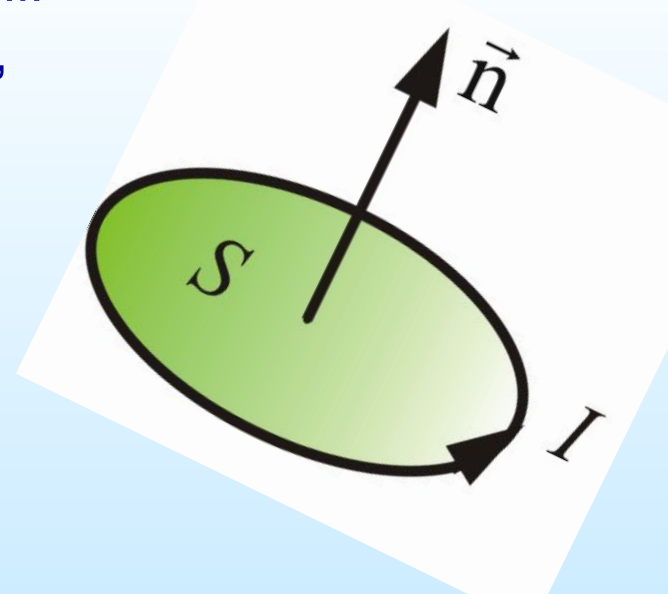
За единицу силы тока 1 ампер (1 А) в системе СИ принимается сила такого постоянного тока, при прохождении которого по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины, находящимся в вакууме на расстоянии 1 метр друг от друга, сила электромагнитного взаимодействия между проводниками равна  $2 \cdot 10^{-7}$  ньютона на каждый метр длины проводника.

$$\mu_0 = \frac{4\pi Fb}{2 I^2 l} = \frac{4\pi \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2 \cdot 1 \cdot 1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

## **Магнитный момент контура (рамки) с током**

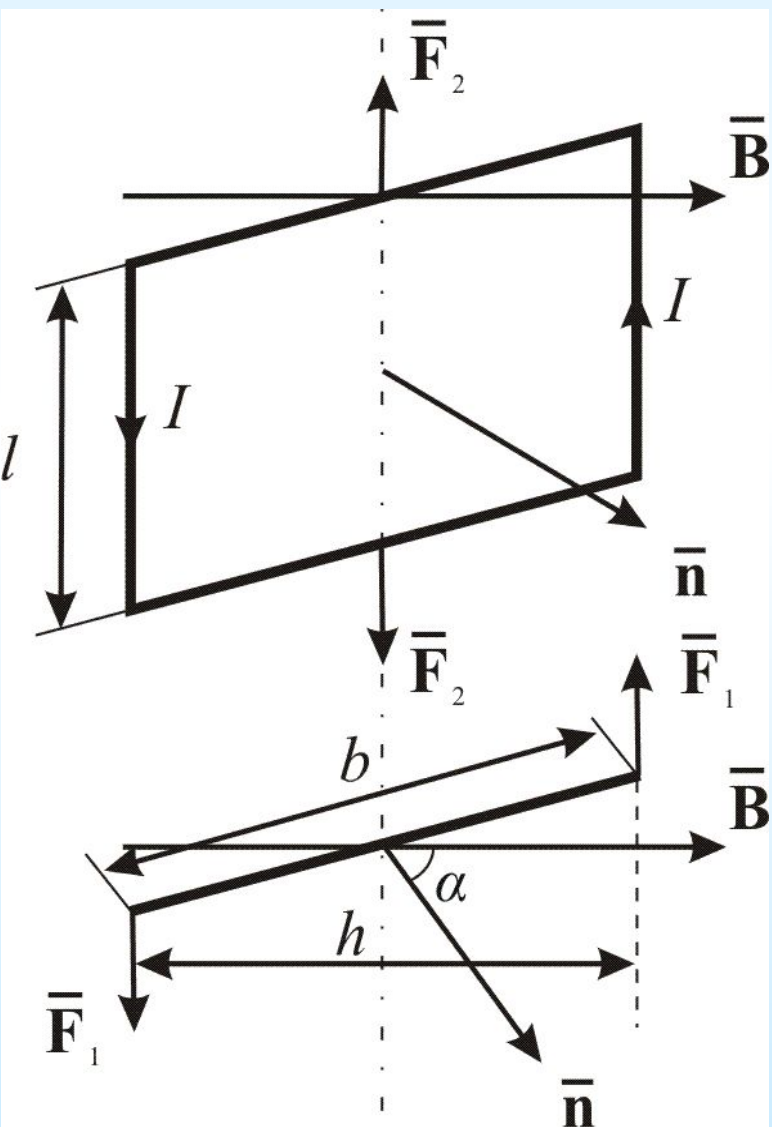
Магнитным моментом контура (рамки) с током называется векторная физическая величина, равная произведению площади рамки на величину протекающего по ней тока и совпадающая по направлению с положительной (определяемой по правилу "буравчика") нормалью к рамке.

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} \quad \left| \vec{p}_m \right| = IS$$



## Действие поля на контур с током

Пусть рамка с током  $I$  находится в однородном магнитном поле,  $\alpha$  – угол между  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{n}$  (направление нормали связано с направлением тока правилом буравчика),  $l$  – высота,  $b$  – ширина рамки.



Вращающий механический момент:

$$M_{\text{вр}} = F_A h = F_A b \sin \alpha$$

$$F_A = I B l \sin(l, B) = I B l$$

$$M_{\text{вр}} = I B l b \sin \alpha = I B S \sin \alpha$$

$$M_{\text{вр}} = B p_m \sin \alpha$$

$$M_{\text{вр}} = \mathbf{B} \times \mathbf{p}_m$$

Под действием вращательного момента рамка всегда повернётся так, чтобы магнитная индукция стала параллельна нормали к рамке.

# *Видео рамка с током*

## Магнитная индукция (другое определение)

$$M_{\text{вр}} = B p_m \sin \alpha$$

Вращающий момент будет максимальным, если:

$$\alpha = 90^\circ \longrightarrow M_{\text{max}} = B p_m$$

$$\longrightarrow B = \frac{M_{\text{max}}}{p_m}$$

Магнитной индукцией  $B$  называется векторная физическая величина, характеризующая силовое действие магнитного поля и численно равная максимальному механическому моменту сил, действующему на рамку с током в однородном поле, обладающую единичным магнитным моментом (сила тока составляет 1 А в рамке площадью 1 м<sup>2</sup>).

$$[\text{Тл}] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \right] = 10^4 \text{ Гс}$$

## Единица магнитной индукции (другое определение)

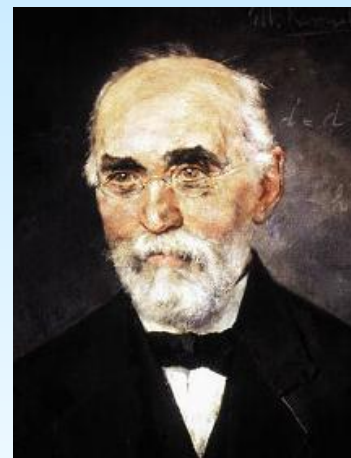
За единицу магнитной индукции 1 Тесла принята индукция такого однородного магнитного поля, в котором на плоский контур с током, имеющий магнитный момент 1 А·м<sup>2</sup>, действует вращающий момент 1 Н·м.

# Сила Лоренца

Сила, действующая на отдельно взятый движущийся электрический заряд со стороны магнитного поля, прямо пропорциональна величине заряда, скорости его движения, величине магнитной индукции поля и синусу угла между магнитной индукцией и направлением движения заряда.

$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$|\vec{F}_L| = q v B \sin(\vec{v}, \vec{B})$$



Хендрик  
Антон Лоренц  
1853-1928

Направление силы Лоренца всегда перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы индукции и скорости движения заряда.

Для положительного заряда направление силы Лоренца определяется по правилу "левой руки" (большие пальцы направить по направлению движения заряда), для отрицательного заряда – направление противоположно.

$$d\vec{F}_A = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$d\vec{F}_A = q n v S d\vec{l} \times \vec{B} = q n d\vec{l} S \vec{v} \times \vec{B}$$

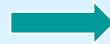
$$n d\vec{l} S = n V = N \quad \text{– число зарядов}$$

$$I = j S = (q n v) S$$

$$\vec{F}_L = \frac{d\vec{F}_A}{N} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

## Магнитная индукция (другое определение)

$$|F_L| = qvB \sin(\vec{v}, \vec{B})$$



$$B = \frac{F_L}{qv \sin(\vec{v}, \vec{B})}$$

Магнитной индукцией  $\mathbf{B}$  называется векторная физическая величина, характеризующая силовое действие магнитного поля и численно равная силе, с которой магнитное поле действует на единичный положительный заряд, движущийся с единичной скоростью перпендикулярно направлению поля.

$$[\text{Тл}] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{К} \cdot \text{м}} \right] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \right] = 10^4 \text{ Гс}$$

## Единица магнитной индукции (другое определение)

За единицу магнитной индукции 1 Тесла принята индукция такого однородного магнитного поля, в котором на положительный заряд, равный 1 К, двигающийся со скоростью 1 м/сек перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, действует со стороны поля сила равная 1 Н.

# Движение зарядов в магнитных и электрических полях

Так как сила Лоренца направлена перпендикулярно движущемуся заряду, т.е. перпендикулярно скорости, **работа этой силы всегда равна нулю**. Следовательно, действуя на заряженную частицу, сила Лоренца не может изменить кинетическую энергию частицы.

**Если частица двигается в магнитном поле с постоянной скоростью, то величина этой скорости не изменится, только направление!**

**1) Скорость частицы параллельна силовым линиям магнитной индукции**

$$|\vec{F}_L| = qvB \sin(\vec{v}, \vec{B})$$

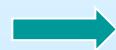
Магнитное поле на частицу не действует (сила Лоренца равна нулю) – частица движется равномерно и прямолинейно.

**2) Скорость частицы перпендикулярна силовым линиям магнитной индукции**

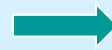
$$|\vec{F}_L| = qvB$$

Сила Лоренца постоянна по величине и перпендикулярна силовым линиям магнитной индукции, т.е. является центростремительной силой, под действием которой частица движется по окружности.

$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$



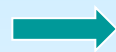
$$R = \frac{mv}{qB}$$



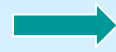
$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$



$$\frac{m v^2}{R} = q v B$$

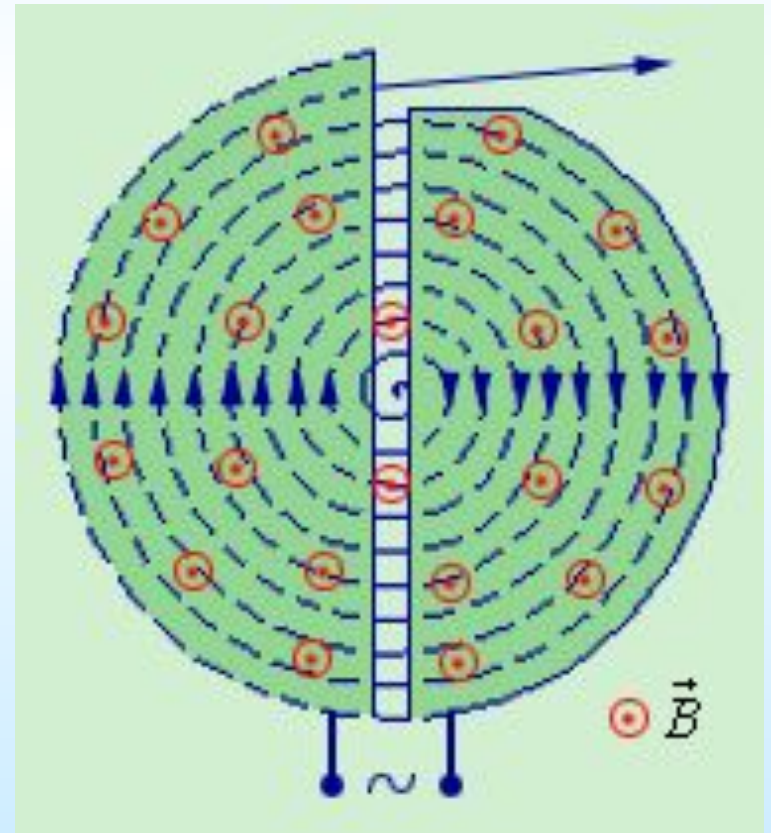
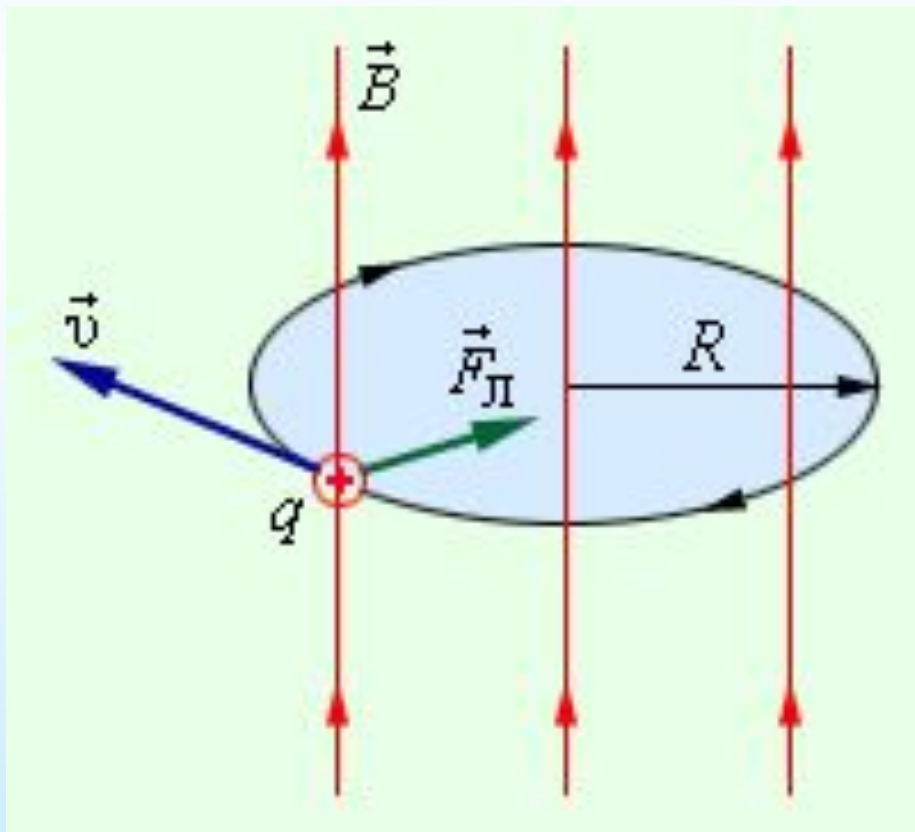


$$R = \frac{m v}{q B}$$



$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{q B}$$

Период обращения заряженной частицы не зависит от ее скорости!  
На этом основано действие ускорителей заряженных частиц  
(циклотронов).





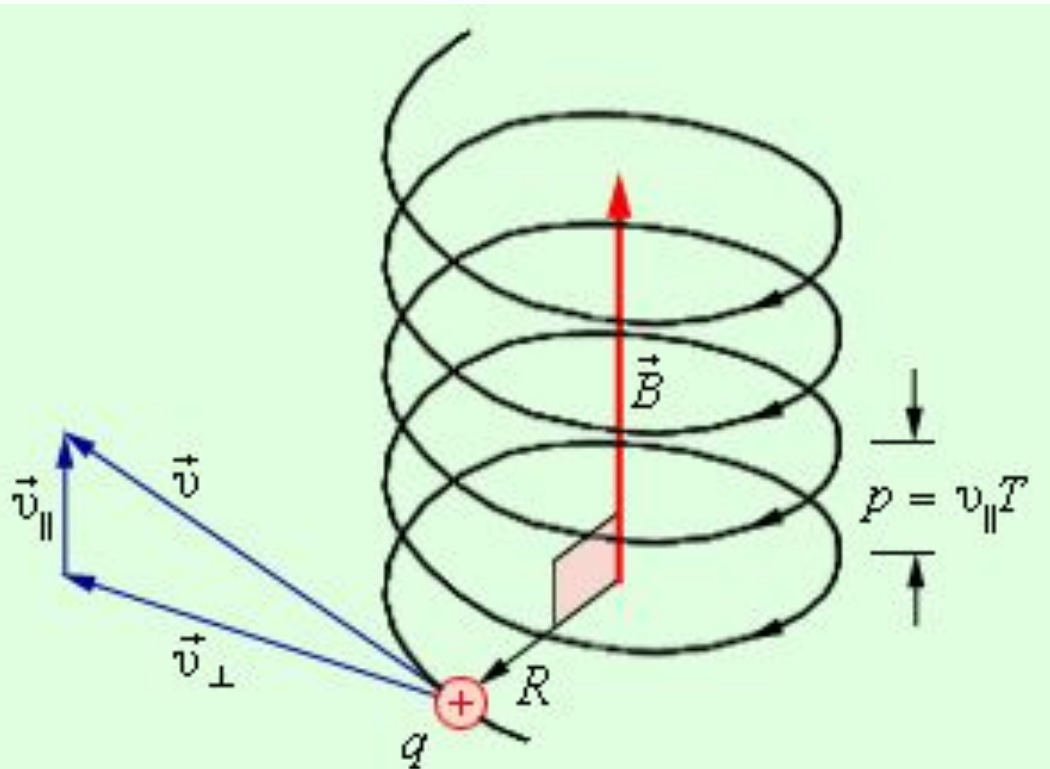
### 3) Скорость частицы направлена под произвольным углом к силовым линиям магнитной индукции

$$0 < \alpha < \pi/2 \quad v = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2} \quad \longrightarrow \quad v_{\perp} = v \sin \alpha \quad v_{\parallel} = v \cos \alpha$$

Движение частицы является суперпозицией двух движений:

1) Равномерного прямолинейного движения вдоль поля со скоростью  $v_{\parallel} = v \cos \alpha$  ;

2) Равномерного вращения по окружности в плоскости, перпендикулярной полю, со скоростью  $v_{\perp} = v \sin \alpha$ .



**Движение по спирали**

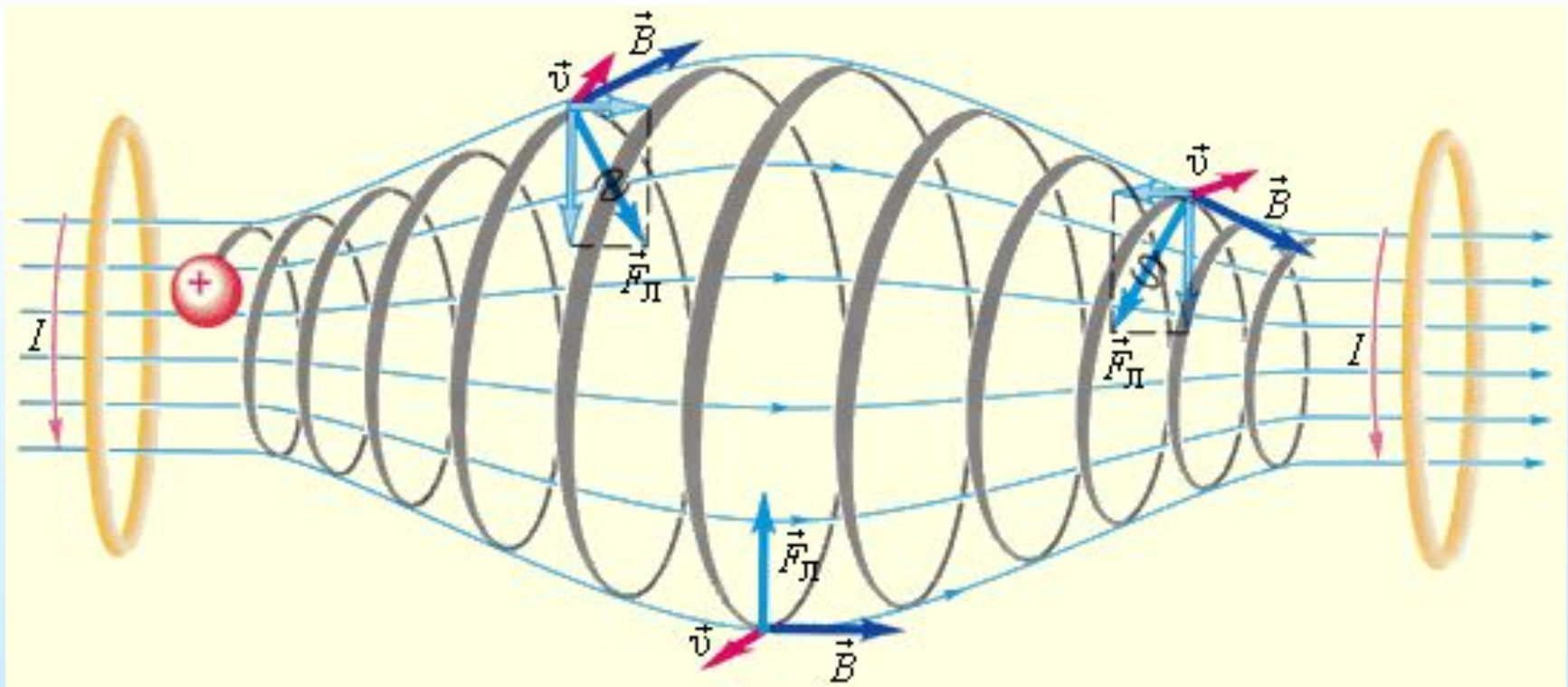
$$R = \frac{m v_{\perp}}{q B} = \frac{m v \sin \alpha}{q B}$$

$$T = \frac{2\pi m}{q B}$$

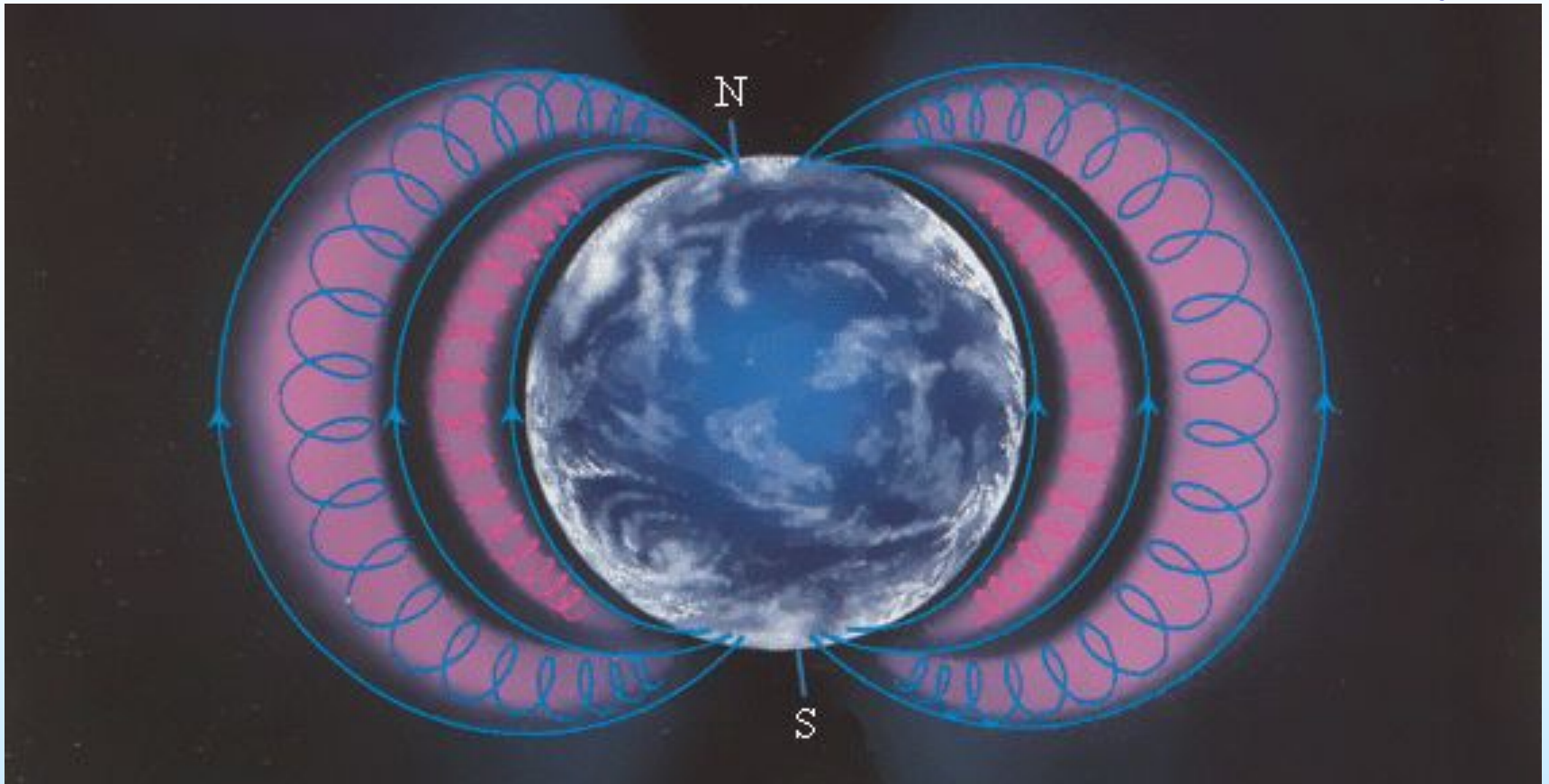
$$h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha$$

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{q B}$$

Таким образом, траектория заряженной частицы как бы навивается на линии магнитной индукции. Это явление используется в технике для магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы, то есть полностью ионизированного газа при температуре порядка  $10^6$  К. Вещество в таком состоянии получают в установках типа "Токамак" при изучении управляемых термоядерных реакций. Плазма не должна соприкасаться со стенками камеры. Термоизоляция достигается путем создания магнитного поля специальной конфигурации в виде магнитной "бутылки".

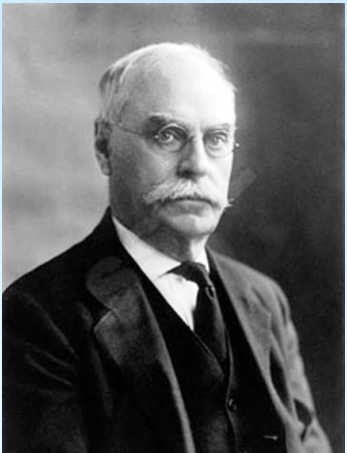


Аналогичное явление происходит в магнитном поле Земли, которое является защитой для всего живого от потоков заряженных частиц из космического пространства. Быстрые заряженные частицы из космоса (главным образом от Солнца) "захватываются" магнитным полем Земли и образуют так называемые *радиационные пояса* в которых частицы, как в магнитных ловушках, перемещаются туда и обратно по спиралеобразным траекториям между северным и южным магнитными полюсами за времена порядка долей секунды.





# Эффект Холла (1879)



Эдвин Герберт Холл  
1855-1938

Эффект Холла состоит в возникновении на боковых гранях проводника (пластинки) с током, помещенного в поперечное магнитное поле, электрического поля (разности потенциалов), пропорционального величине тока и индукции магнитного поля и направленного перпендикулярно их направлениям.

Пусть высота пластинки  $h$ , а ширина  $a$ .

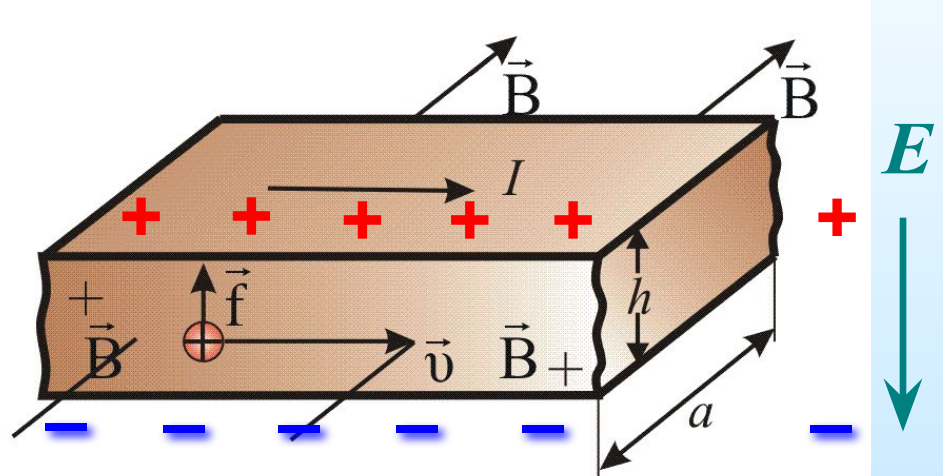
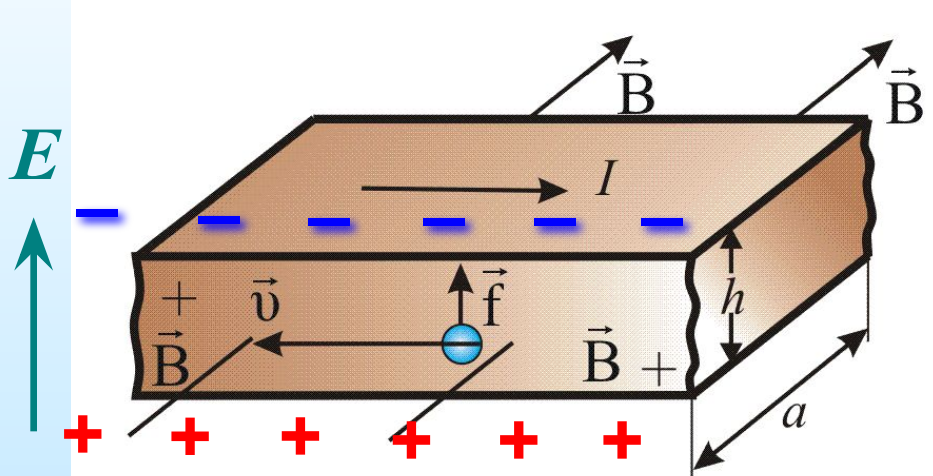
$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$qE = q \frac{U}{h} = q v B$$

$$U = v B h \quad v = I / q n a h$$

$$I = j S = q n v S$$

$$U = \frac{I B h}{q n a h} = \frac{1}{q n} \frac{I B}{a} = R \frac{I B}{a}$$



$R = \frac{1}{qn}$  – постоянная Холла, зависящая от вещества.

По измеренной постоянной Холла можно:

- 1) Судить о природе проводимости (в полупроводниках), так как знак постоянной Холла совпадает со знаком носителей заряда.
- 2) Определить концентрацию носителей заряда в проводнике (при известных характере проводимости и заряде носителей).

### **Движение заряда в магнитном и электрическом полях**

Если на заряженную частицу одновременно действуют магнитное и электрическое поля, то полная сила, действующая на нее:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

В отличие от магнитного, электрическое поле совершает работу над заряженной частицей, следовательно, изменяет величину ее скорости.

## Работа по перемещению проводника с током

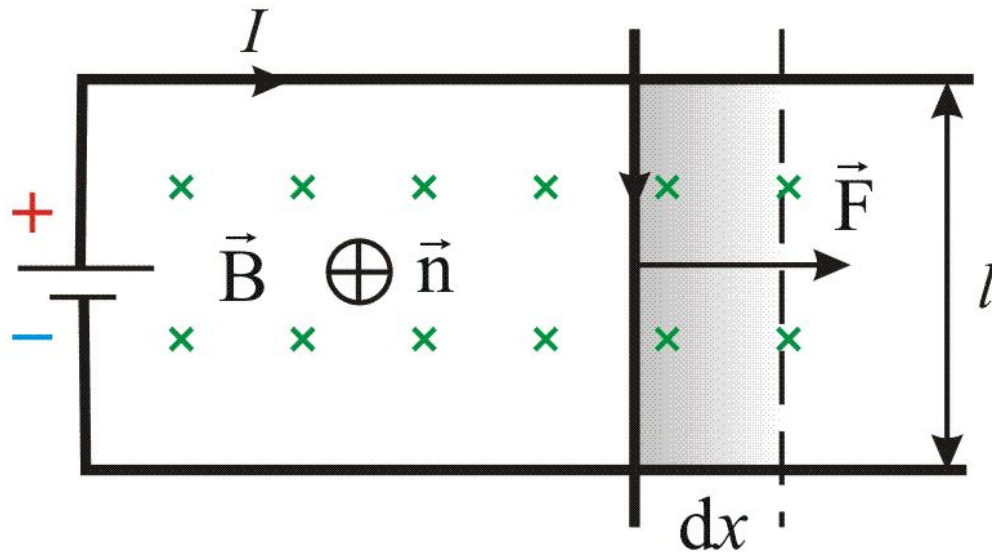
Рассмотрим контур с током, образованный неподвижными проводами и скользящей по ним подвижной перемычкой длиной  $l$ .

$$dF_A = IBdl \sin(\overset{\sphericalangle}{dl}, \overset{\sphericalangle}{B}) = IBdl$$

$$dA = dF_A x = IBdl x = IBdS = Id\Phi$$

Работа, совершаемая проводником с током при перемещении его в магнитном поле, численно равна произведению силы тока на магнитный поток, пересечённый этим проводником.

Формула остаётся справедливой, если проводник любой формы движется под любым углом к линиям вектора магнитной индукции



$$dA = Id\Phi$$

Единица измерения потока  
1 Вебер (Вб)

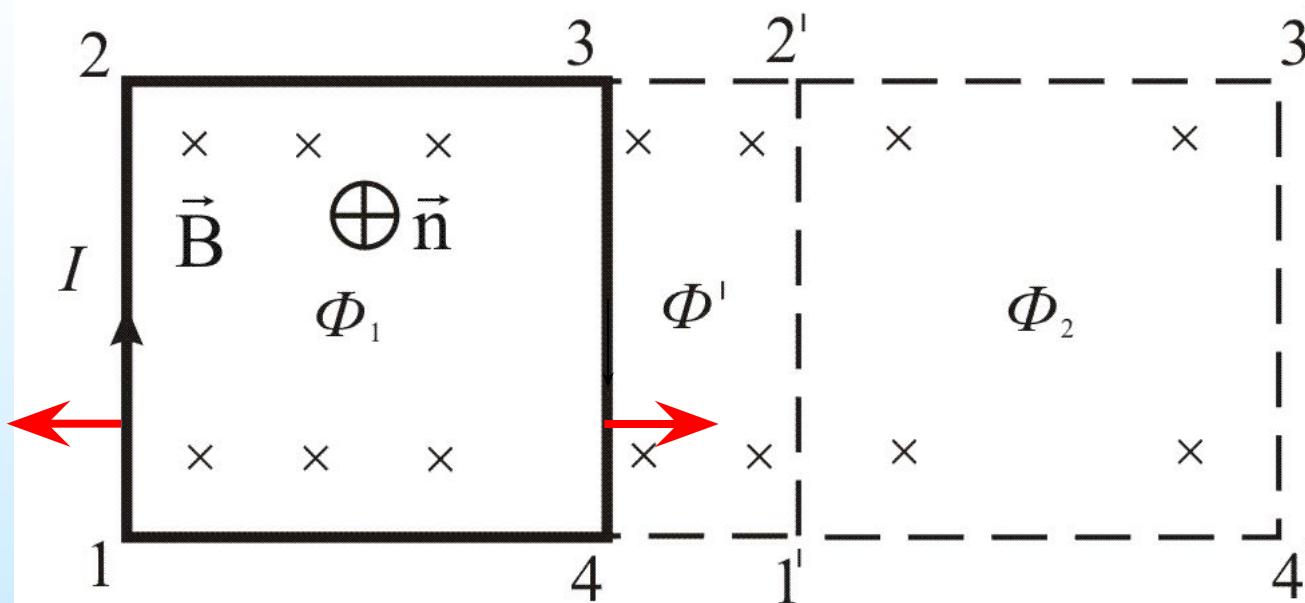
## Работа по перемещению замкнутого контура с током

Переместим этот контур параллельно самому себе в новое положение. Магнитное поле может быть неоднородным и тогда новый контур будет пронизан другим магнитным потоком.

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}$$

$$A = -I(\Phi_1 + \Phi') + I(\Phi' + \Phi_2) = I(\Phi_2 - \Phi_1) = Id\Phi$$

Работа, совершаемая при перемещении замкнутого контура с током в магнитном поле, численно равна произведению силы тока на изменение магнитного потока, сцепленного с этим контуром.



$$dA = Id\Phi$$

Формула остаётся справедливой для контура любой формы в произвольном магнитном поле.

Если контур неподвижен, а меняется магнитная индукция или площадь контура, то при изменении магнитного потока в контуре на величину  $d\Phi$  магнитное поле совершает такую же работу.

$$dA = I d\Phi = IS dB = IB dS$$