

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.

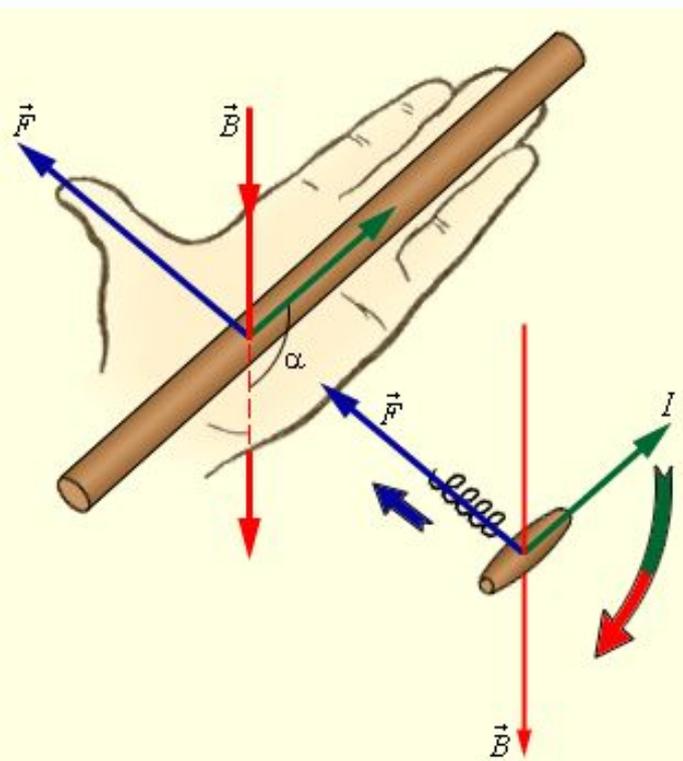
Сила Ампера

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)

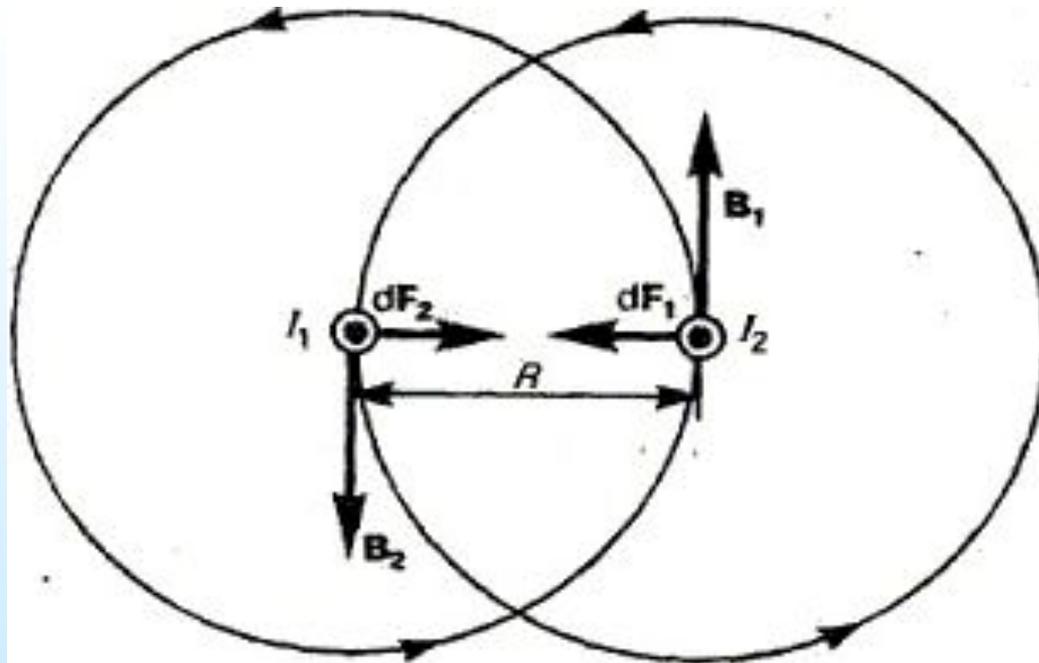
Рассчитаем силу взаимодействия (на единицу длины) двух находящихся в вакууме бесконечно длинных прямых параллельных токов I_1 и I_2 , находящихся на расстоянии b друг от друга:



Андре-Мари
Ампер
1775-1836

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

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

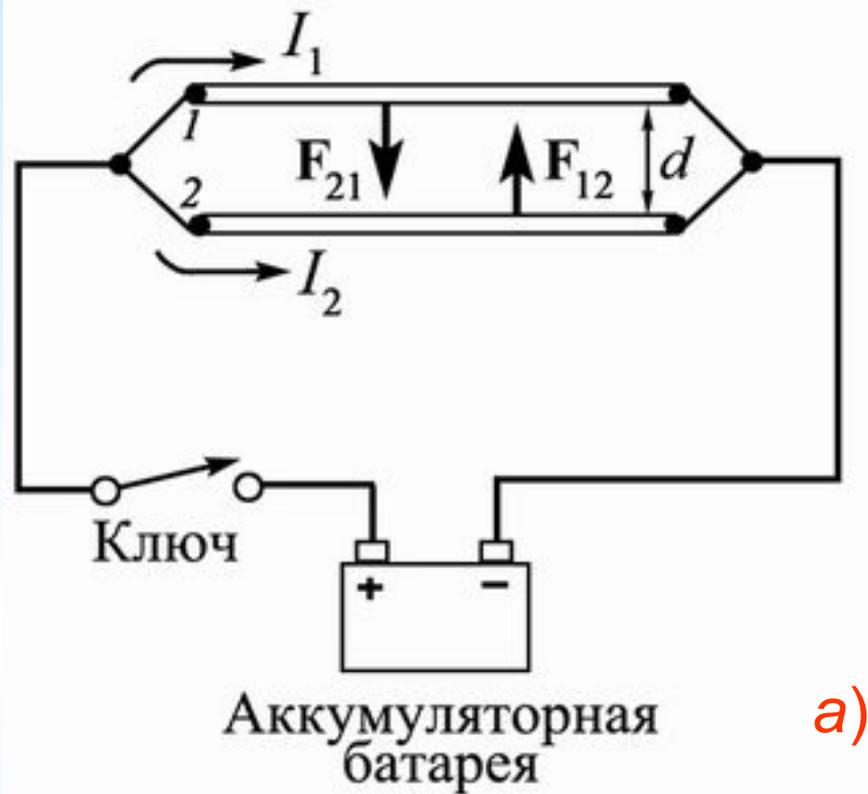


$$dF_A = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b} dl \quad \rightarrow$$

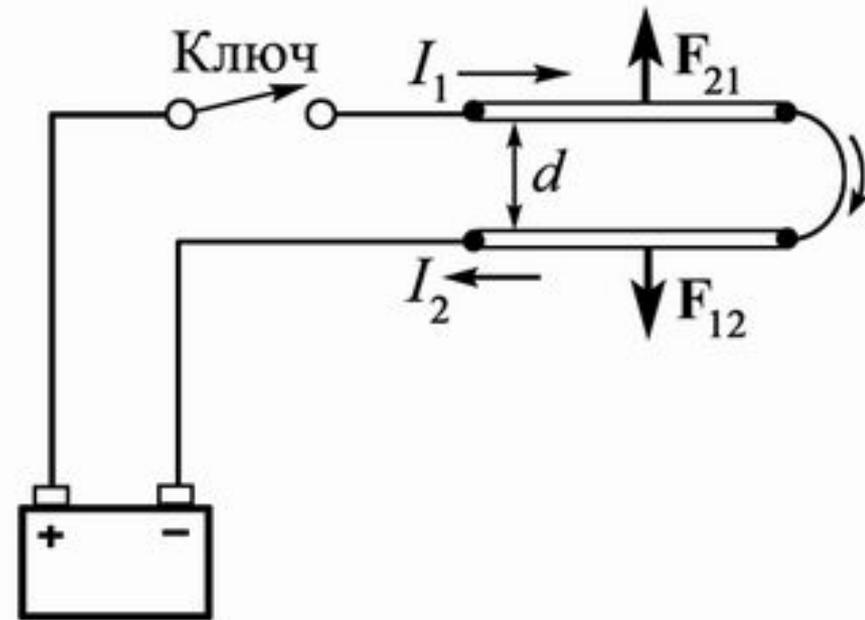
$$F = \frac{dF_A}{dl} = \frac{\mu_0 2I_1 I_2}{4\pi b}$$

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)

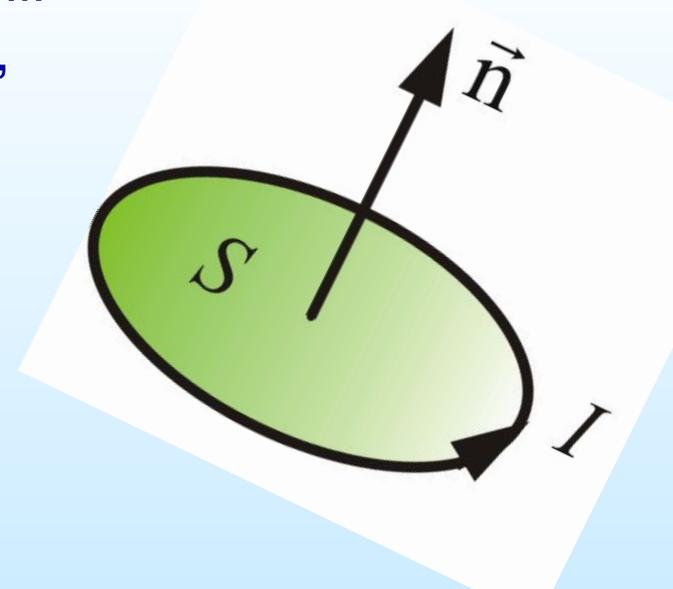
За единицу силы тока 1 ампер (1 А) в системе СИ принимается сила такого постоянного тока, при прохождении которого по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины, находящимся в вакууме на расстоянии 1 метр друг от друга, сила электромагнитного взаимодействия между проводниками равна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

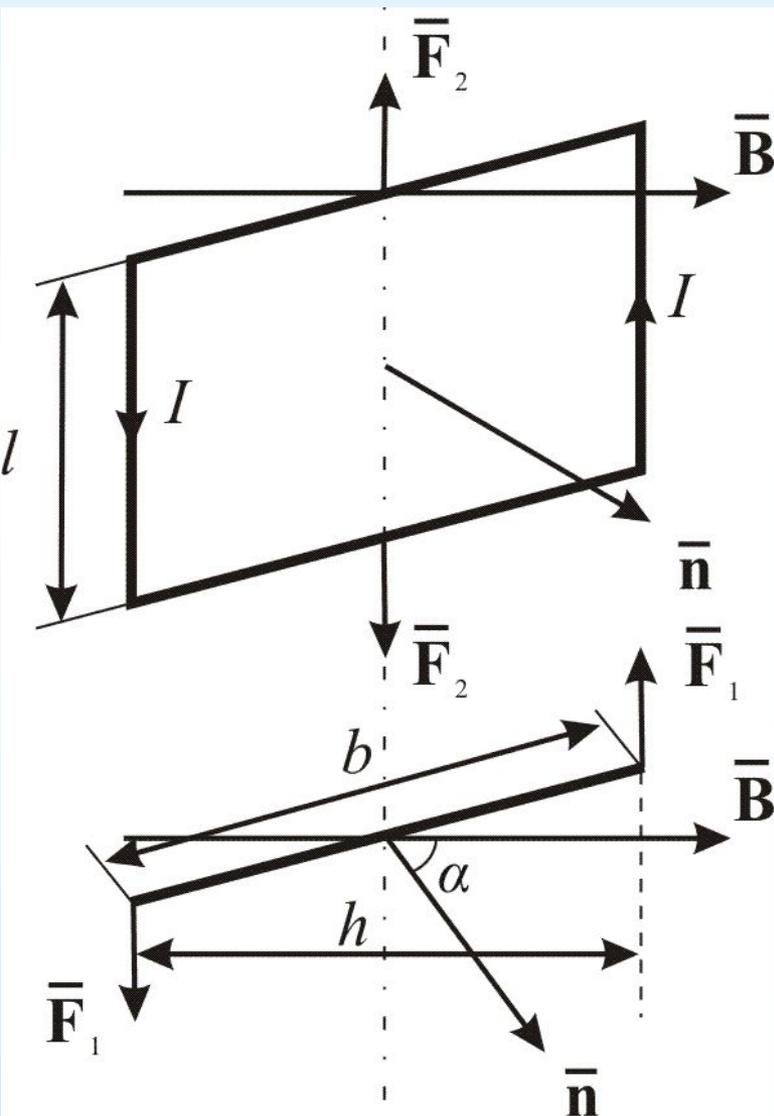
Магнитным моментом контура (рамки) с током называется векторная физическая величина, равная произведению площади рамки на величину протекающего по ней тока и совпадающая по направлению с положительной (определяемой по правилу "буравчика") нормалью к рамке.

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



Действие поля на контур с током

Пусть рамка с током I находится в однородном магнитном поле, α – 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:

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

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

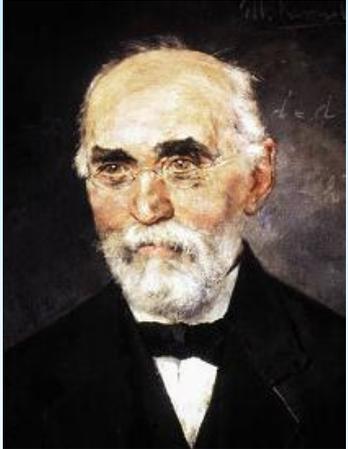
Магнитной индукцией B называется векторная физическая величина, характеризующая силовое действие магнитного поля и численно равная максимальному механическому моменту сил, действующему на рамку с током в однородном поле, обладающую единичным магнитным моментом (сила тока составляет 1 А в рамке площадью 1 м²).

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

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·м², действует вращающий момент 1 Н·м.

Сила Лоренца



Хендрик
Антон Лоренц
1853-1928

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.

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

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

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.

$$dF_A = q n v S dl \times B = q n dl S \vec{v} \times \vec{B}$$

$$dF_A = I dl \times B$$

$$n dl S = nV = N \quad \text{– число зарядов}$$

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



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

Магнитная индукция (другое определение)

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



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

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.

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



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



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

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

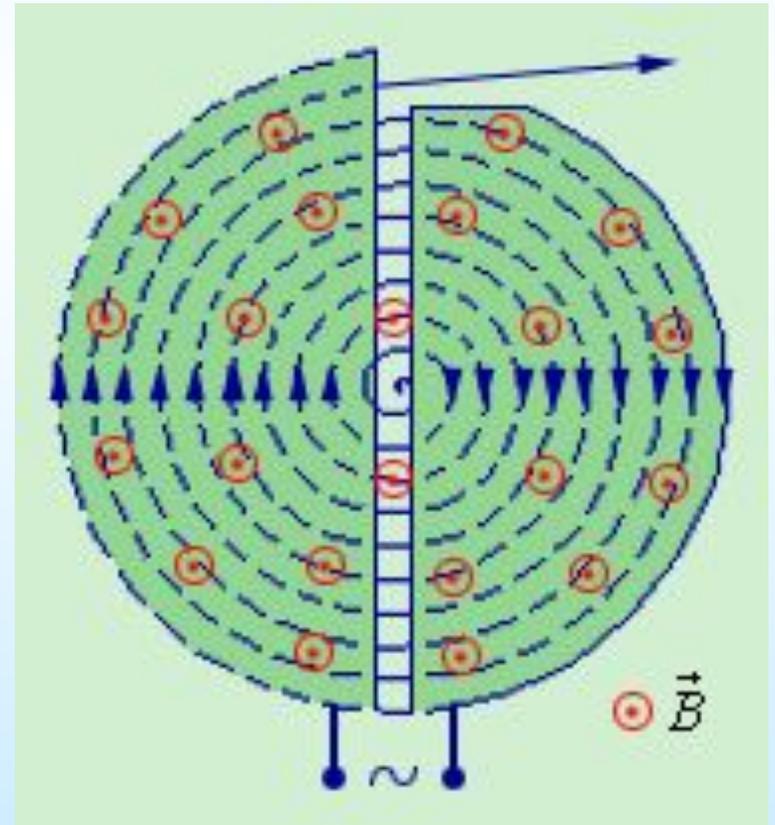
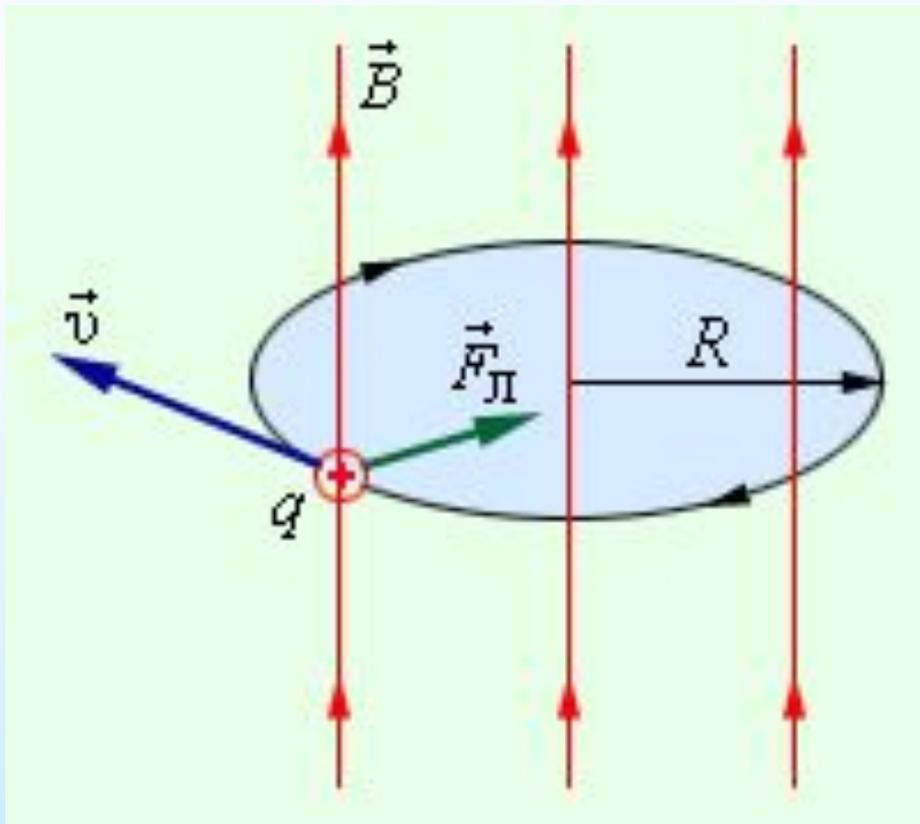


$$R = \frac{m v}{q B}$$



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

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



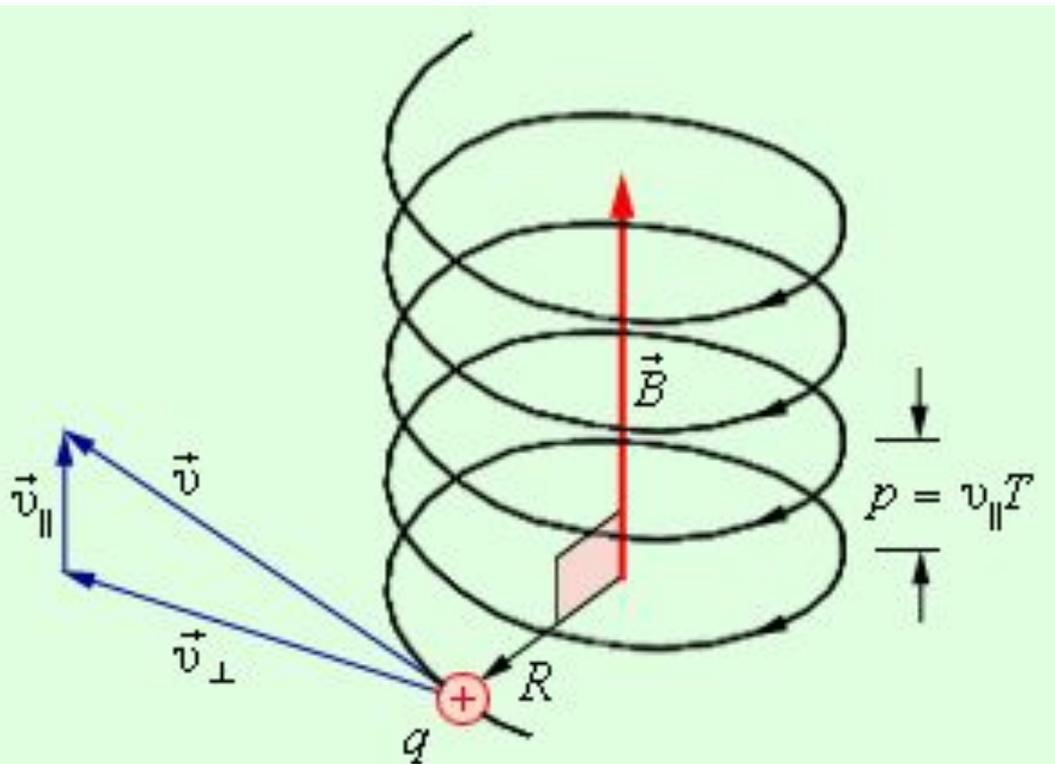
3) Скорость частицы направлена под произвольным углом к силовым линиям магнитной индукции

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

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

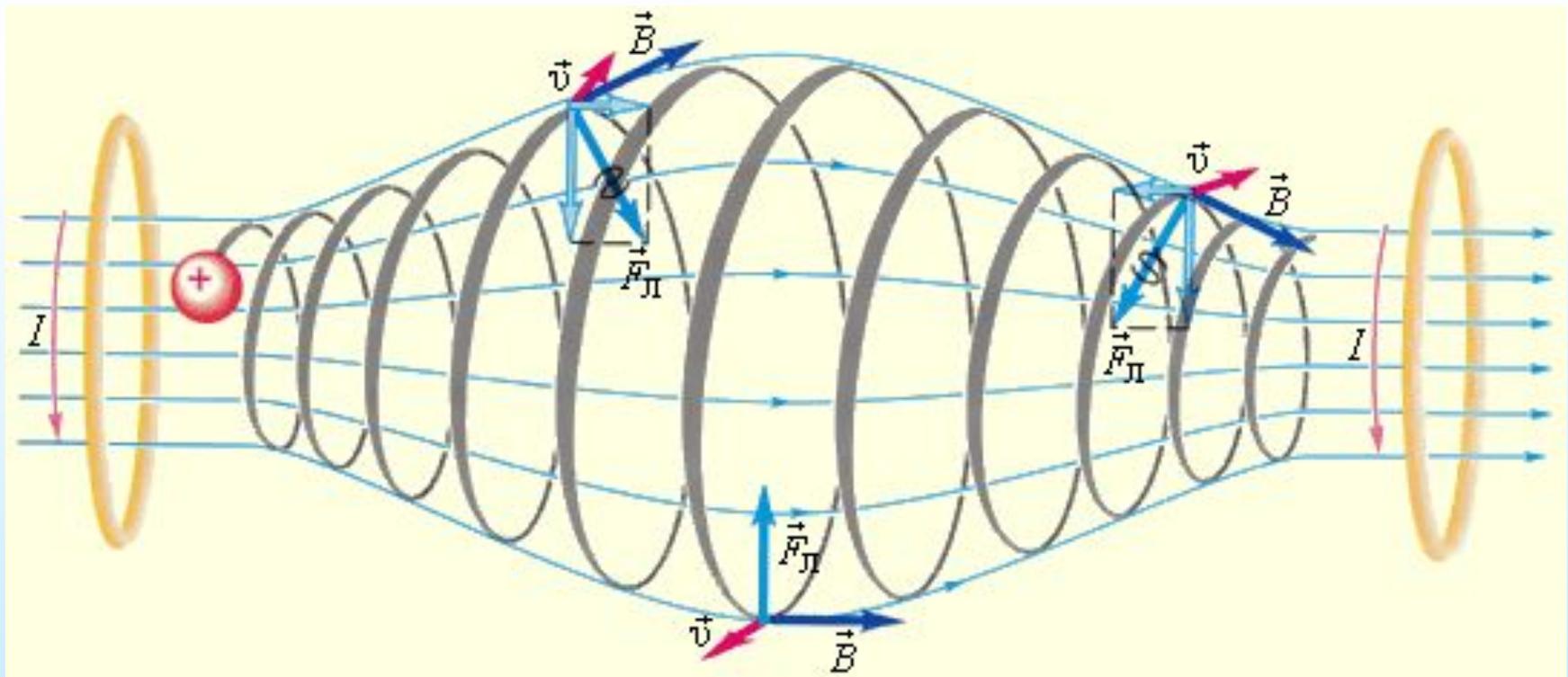
$$R = \frac{m v_{\perp}}{q B} = \frac{m v \sin \alpha}{q B}$$

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

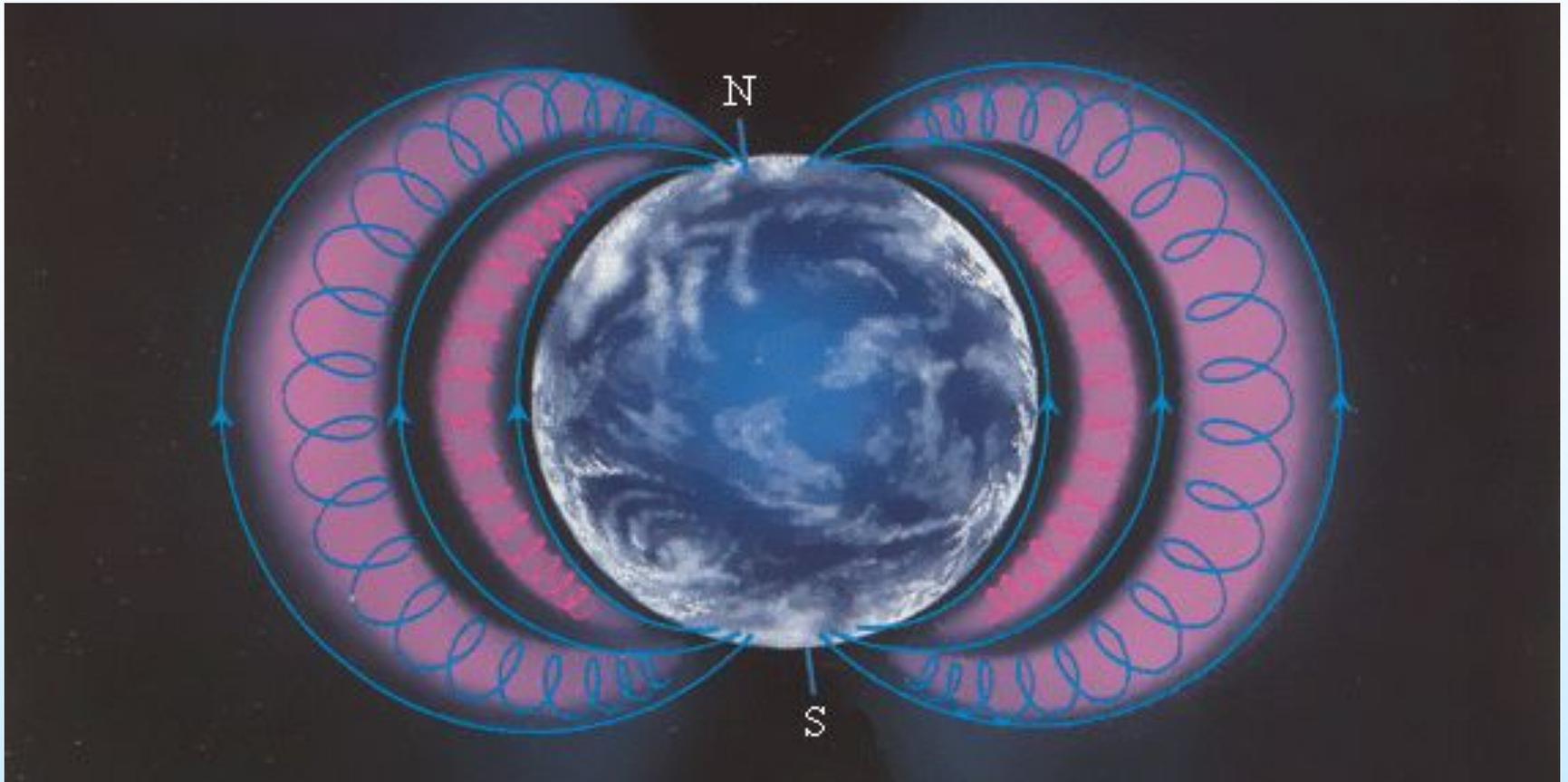
$$h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha$$

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

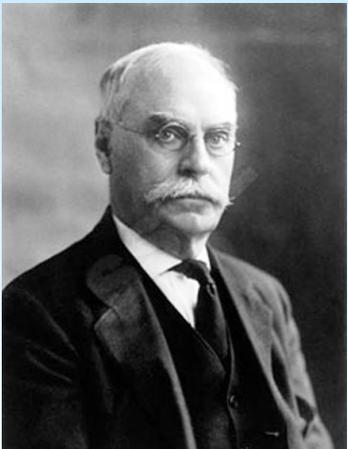
Таким образом, траектория заряженной частицы как бы навивается на линии магнитной индукции. Это явление используется в технике для магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы, то есть полностью ионизированного газа при температуре порядка 10^6 К. Вещество в таком состоянии получают в установках 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 .

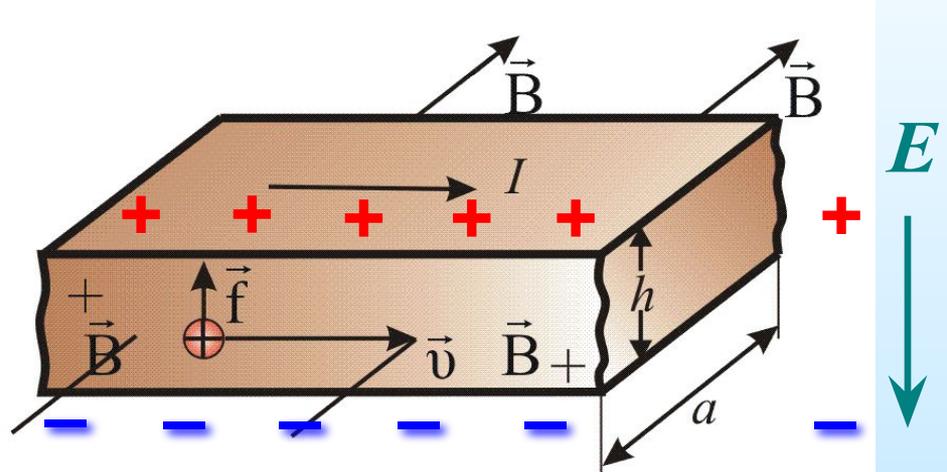
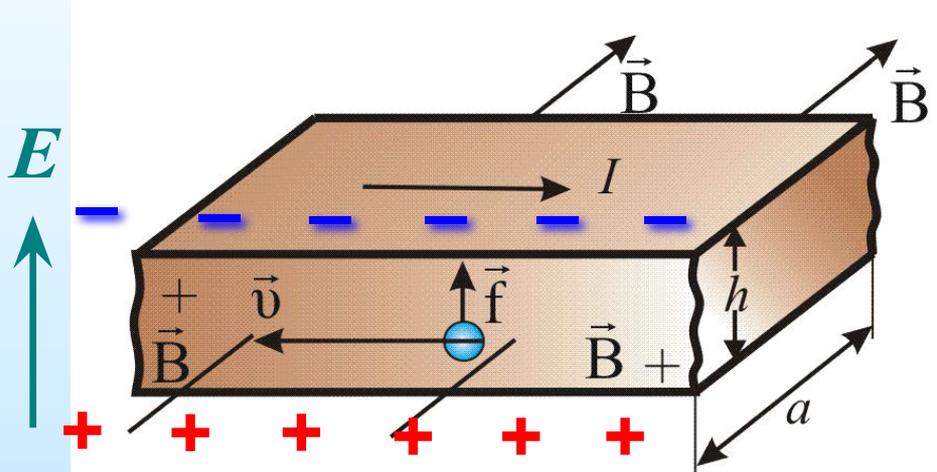
$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$$

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

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

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

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



$R = \frac{1}{qn}$ – 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

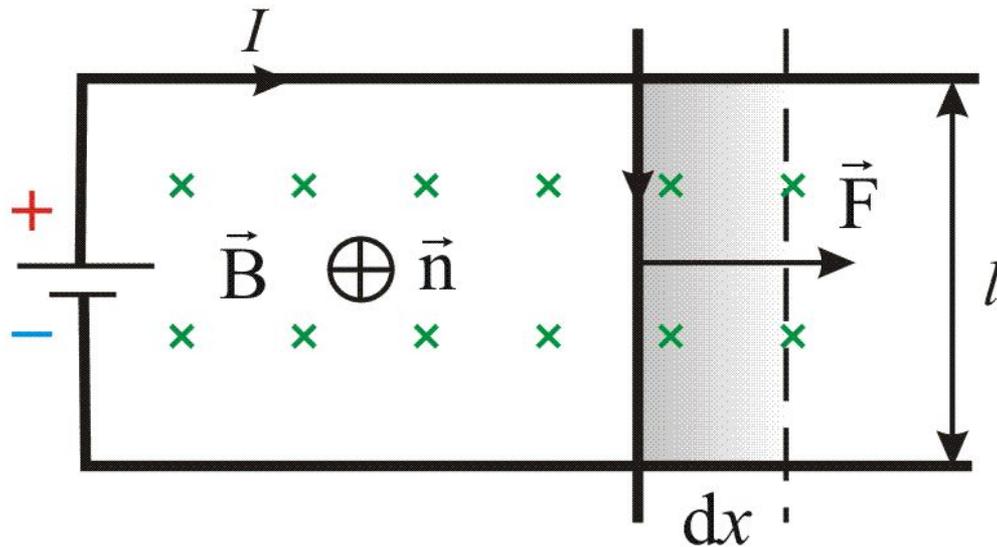
Рассмотрим контур с током, образованный неподвижными проводами и скользящей по ним подвижной перемычкой длиной l .

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

$$dA = dF_A x = IBdl x = IBdS = I d\Phi$$

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



$$dA = I d\Phi$$

Единица измерения потока
1 Вебер (Вб)

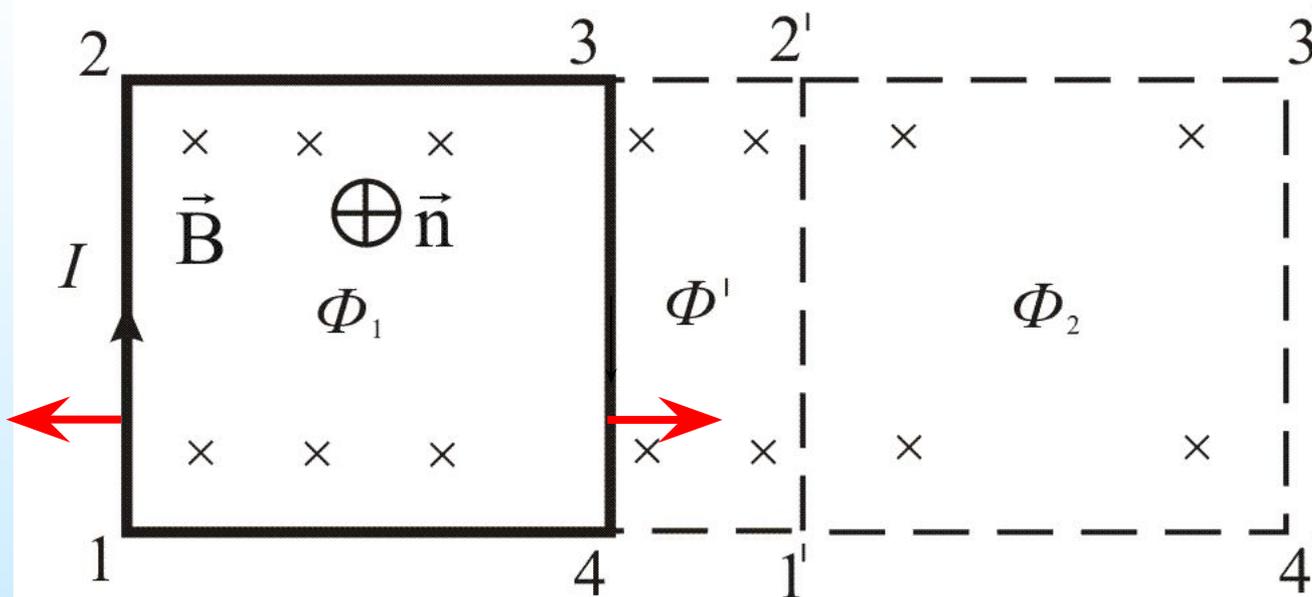
Работа по перемещению замкнутого контура с током

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.

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