

Действие магнитного поля на проводники с током

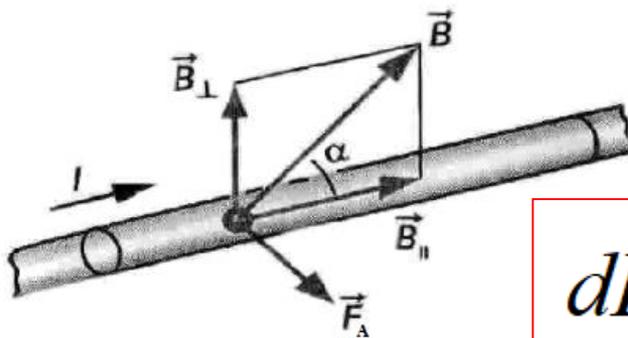
На прямой проводник, по которому течет ток, в магнитном поле действует **сила Ампера**.

Ампер установил, что сила, действующая на проводник с током, пропорциональна силе тока, длине проводника, индукции магнитного поля и зависит от ориентации проводника в магнитном поле. Влияние этих факторов можно учесть, если определить силу как

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]$$

векторное
произведение

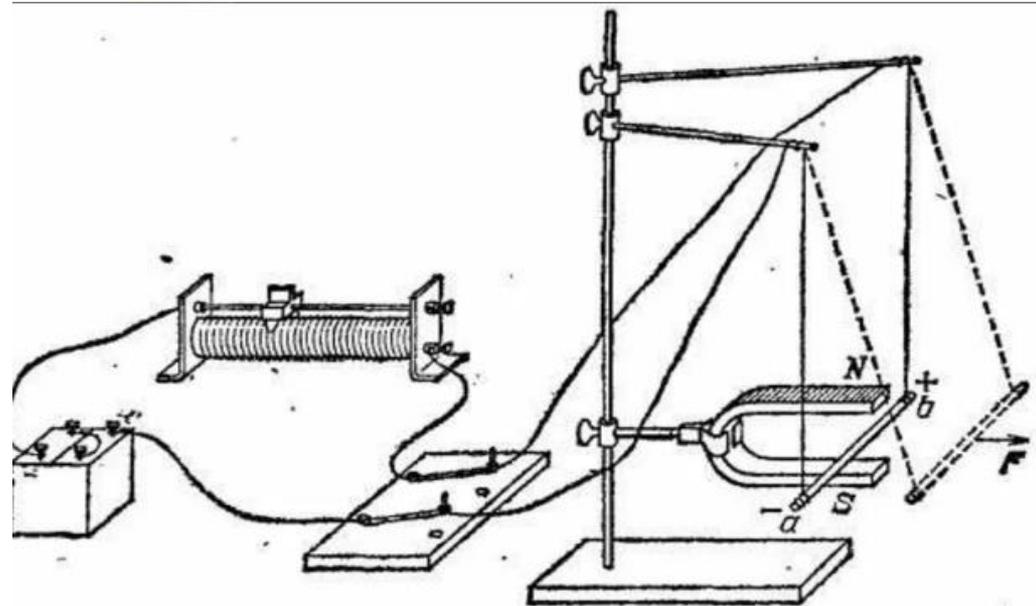
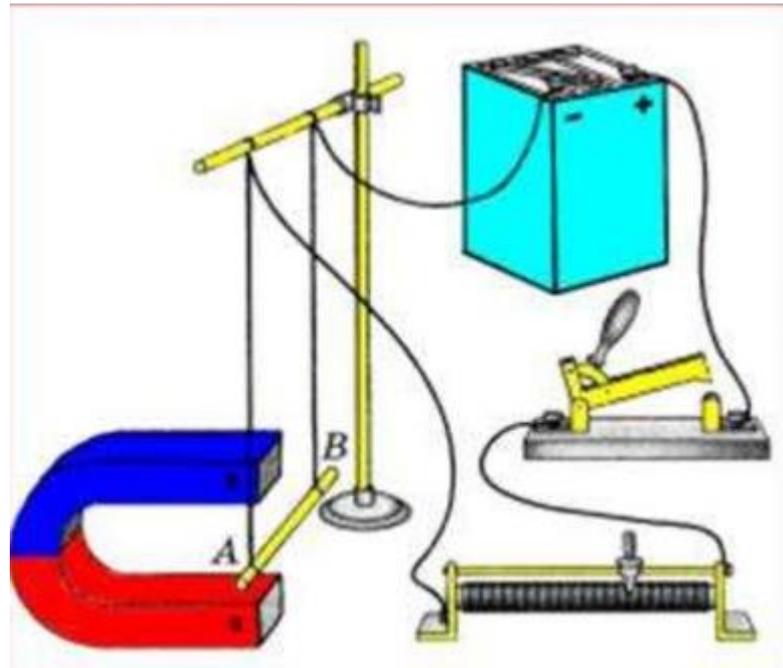
- сила с которой магнитное поле действует на бесконечно малый проводник длиной dl



$$B_{\perp} = B \sin \alpha$$

$$dF = IBdl \sin(d\vec{l}, \vec{B})$$

- модуль силы Ампера



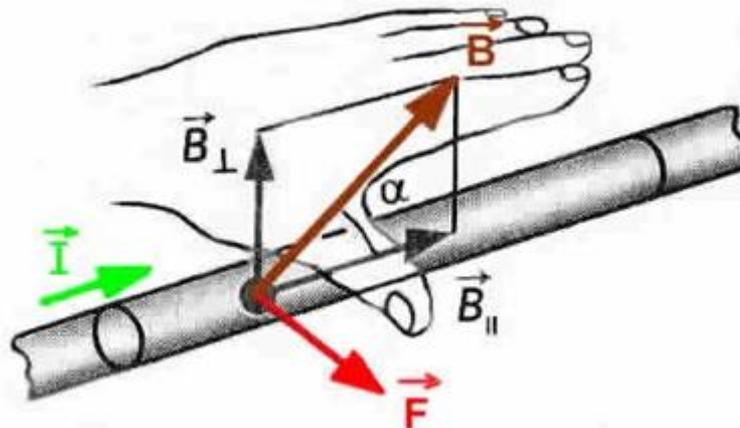
$$\vec{F} = \int_0^l d\vec{F}$$

- сила с которой магнитное поле действует на проводник длиной l

Если магнитное поле **однородно** и проводник **прямолинейный**, то

$$F = IBlsin(\vec{l}, \vec{B})$$

Направление силы Ампера определяется по **правилу левой руки**: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная составляющая вектора магнитной индукции B входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на 90 градусов большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника с током, то есть силы Ампера.

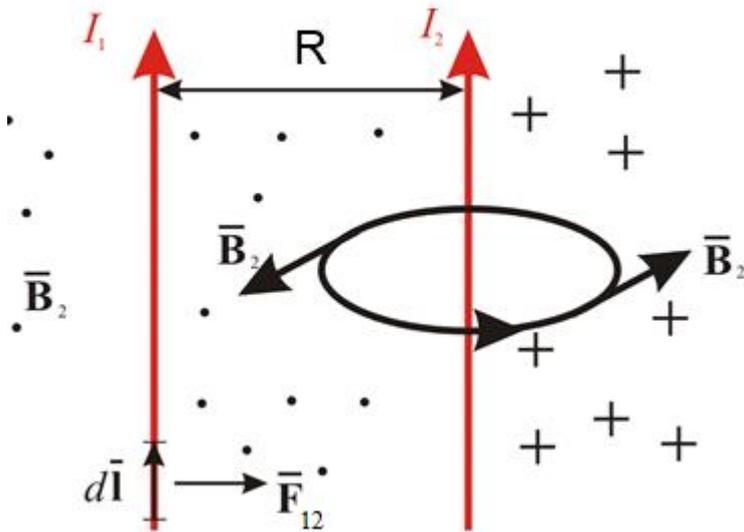


Из закона Ампера можно определить индукцию магнитного поля:

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}$$

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 l .

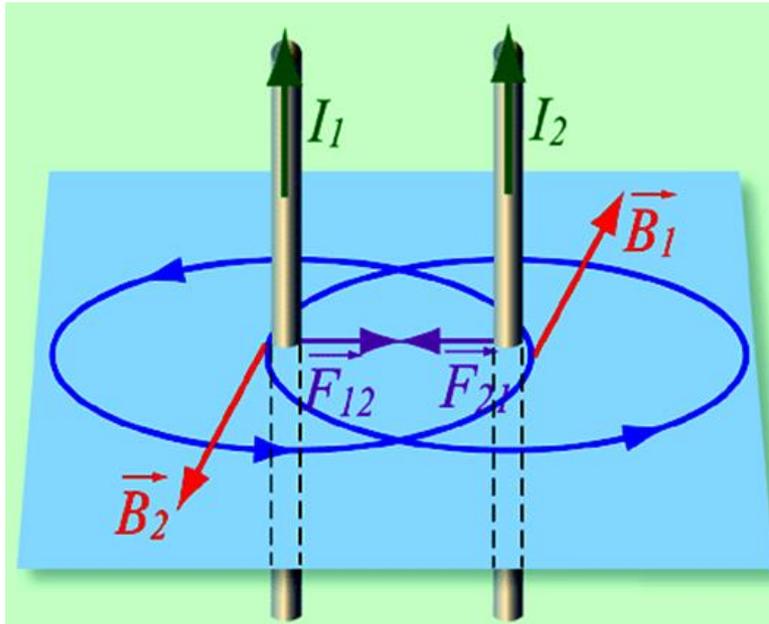
Взаимодействие двух параллельных бесконечных проводников с током



Пусть R – расстояние между проводниками.
Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует по закону Ампера на другой проводник с током.

Два параллельных тока одинакового направления притягиваются друг к другу, а противоположных направлений отталкиваются.

Рассчитаем силу взаимодействия двух параллельных бесконечных проводников с током. *Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует на второй проводник.*



$B_1 = \frac{\mu_o \mu}{2\pi R} I_1$ - индукция магнитного поля, созданного проводником с током I_1 в точках, где находится второй проводник

$B_2 = \frac{\mu_o \mu}{2\pi R} I_2$ - индукция магнитного поля, созданного проводником с током I_2 в точках, где находится первый проводник

μ_o - магнитная постоянная

μ - магнитная проницаемость среды

$$dF_{12} = I_1 B_2 dl = \frac{\mu_o \mu}{2\pi R} I_1 I_2 dl$$

- сила, действующая на проводник с током I_1

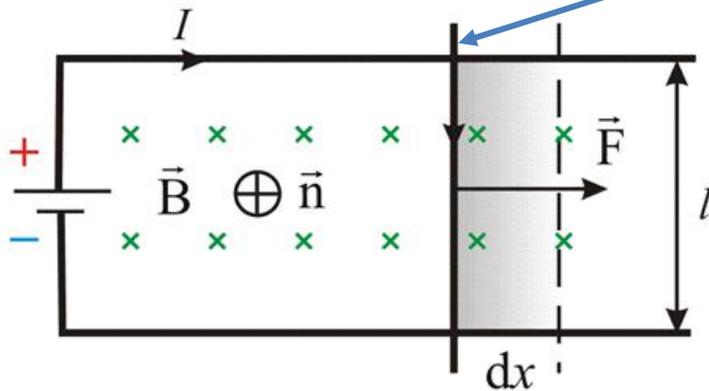
$$dF_{21} = I_2 B_1 dl = \frac{\mu_o \mu}{2\pi R} I_1 I_2 dl$$

- сила, действующая на проводник с током I_2

$$dF_{12} = dF_{21}$$

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

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



Этот контур находится во внешнем однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} , перпендикулярной к плоскости контура.

На элемент тока I (подвижный провод) длиной l действует **сила Ампера**, направленная вправо:

$$F = IlB.$$

Пусть проводник переместится параллельно самому себе на расстояние dx . При этом сила совершает работу:

$$dA = Fdx = IBldx$$

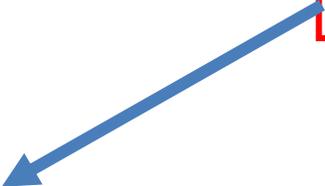
$ldx = dS$ - площадь, пересекаемая проводником при перемещении на dx

Тогда получим

$$dA = IBdS$$

$$BdS = d\Phi$$

- магнитный поток, пересечённый этим проводником

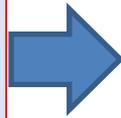
$$dA = Id\Phi$$


Работа, совершаемая проводником с током при перемещении, численно **равна произведению тока на магнитный поток**, пересечённый этим проводником.

Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток)

Магнитным потоком $d\Phi$ через площадь dS называют скалярное произведение

$$\vec{B}d\vec{S}$$



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

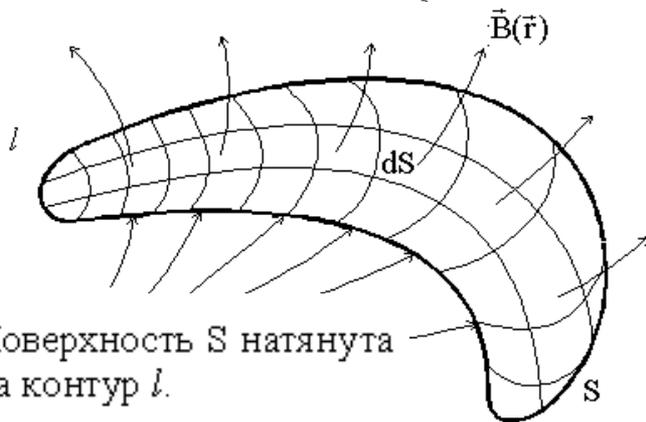
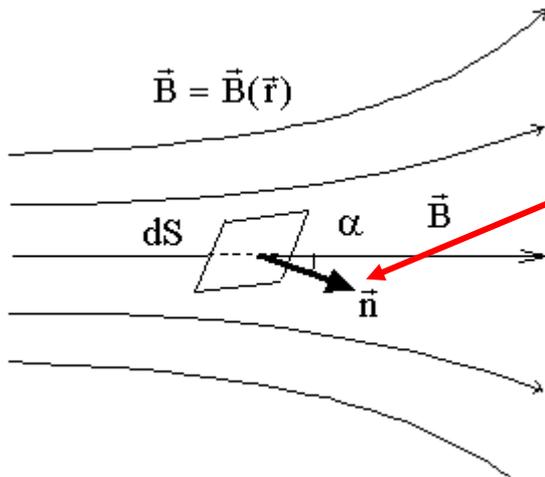
- поток вектора \vec{B} через бесконечно малую поверхность в неоднородном поле

$$d\vec{S} = dS \vec{n}$$

\vec{n} - единичный вектор нормали к площадке dS

$$d\Phi = B dS \cos(\vec{n}\vec{B}) = B_n dS$$

$B_n = B \cos(\vec{n}\vec{B})$ - проекция \vec{B} на направление нормали

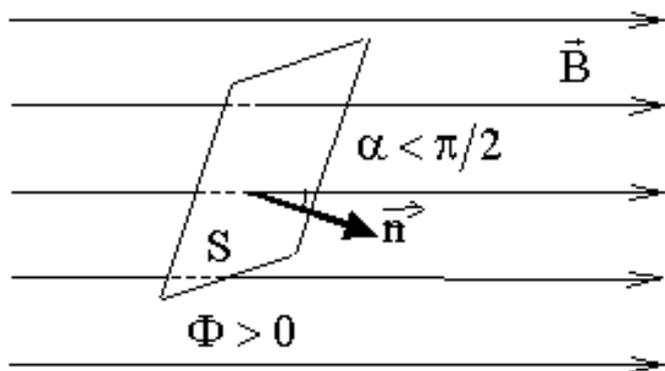


Поверхность S натянута на контур l .

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B_n dS$$

- поток вектора \vec{B} через произвольную поверхность в неоднородном поле

Для однородного поля и плоской площадки:

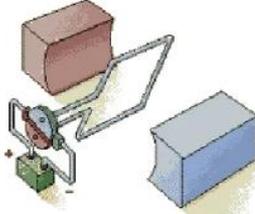
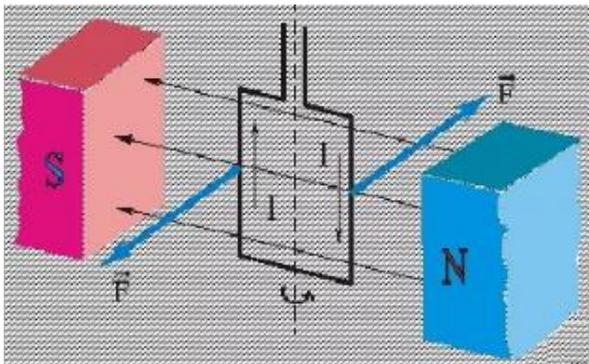
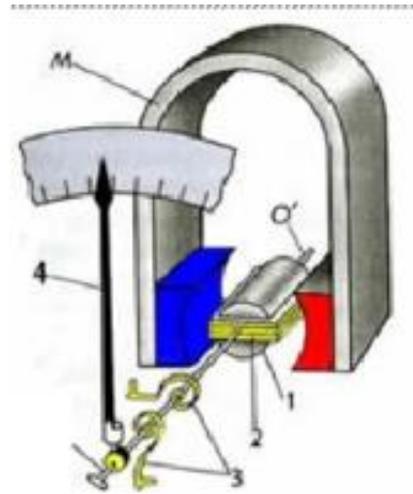


$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\vec{n}\vec{B}) = B_n S$$

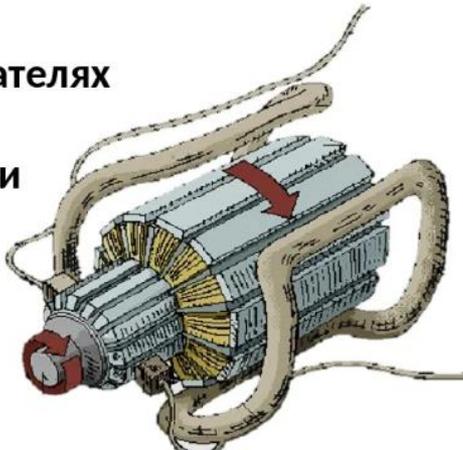
$$[\Phi] = \text{Вб (вебер)}$$

Применение силы Ампера

Работа любого прибора магнитоэлектрической системы (амперметра, вольтметра) основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и рамки с током. Возникает вращающий момент, который будет поворачивать рамку. Угол поворота рамки и связанные с ним показания шкалы прибора зависят от силы тока в рамке.



В электрических двигателях для преобразования электрической энергии в механическую используется действие силы Ампера.



The complex block contains three elements: a small schematic of a current loop in a magnetic field at the top left, a block of text in the center, and a cutaway diagram of an electric motor at the bottom right. The motor diagram shows the internal stator, rotor, and brushes, with a red arrow indicating the direction of rotation.

Сила Лоренца

Сила, действующая на движущуюся в магнитном поле заряженную частицу называется **силой Лоренца**. Она зависит от скорости его движения, индукции магнитного поля и угла между направлениями \vec{v} и \vec{B} .

Выражение для этой силы было получено в конце XIX в. голландским физиком **Г.А. Лоренцем**.

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B} \quad - \text{ сила Лоренца}$$

q - заряд движущейся частицы

\vec{v} - скорость частицы

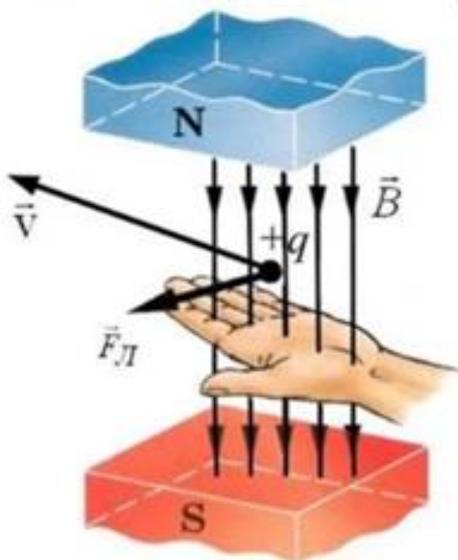
\vec{B} - индукция магнитного поля

$$F_L = qvB \sin\alpha \quad - \text{ модуль силы Лоренца}$$

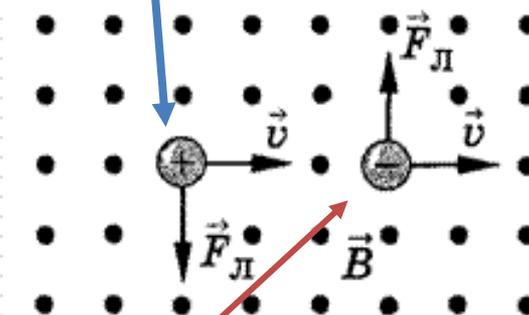
α - угол между векторами \vec{v} и \vec{B}

Направлена сила Лоренца перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы \vec{v} и \vec{B} .

Направление силы Лоренца определяется **по правилу левой руки:**



Четыре пальца левой ладони нужно направить по скорости, а линии индукции должны входить в ладонь, тогда большой палец покажет направление силы Лоренца (так для **положительного** заряда)



Линии индукции направлены перпендикулярно плоскости рисунка «к нам»

Если заряд **отрицателен**, нужно направление силы сменить на противоположное:

Сила Лоренца всегда перпендикулярна векторам \vec{v} и \vec{B}



При движении частицы в магнитном поле **сила Лоренца не совершает работу.**



Так как $A=0$, то $\Delta W_k = A = 0$



Постоянное магнитное поле не совершает работы над движущейся в ней заряженной частицей, и кинетическая энергия этой частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

Под действием силы Лоренца меняется только направление скорости заряженной частицы.

!!! ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ: дать определение индукции магнитного поля через силу Лоренца.

Полная сила, действующая на заряженную частицу в электромагнитном поле, равна

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} + q\vec{E} \quad - \text{обобщенная сила Лоренца}$$

$$\vec{F}_m = q \vec{v} \times \vec{B} \quad - \text{магнитная составляющая полной силы (сила Лоренца)}$$

$$\vec{F}_э = q\vec{E} \quad - \text{электрическая составляющая полной силы}$$

Поля – электрическое и магнитное – неразрывно связаны.

При переходе к другой системе отсчёта полная сила останется прежней; изменится лишь её объяснение.

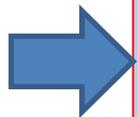
Движение заряженных частиц в магнитных полях

Считаем, что магнитное поле **однородно** и на частицу не действуют электрические поля. Рассмотрим три возможных случая:

1) $\vec{v} \parallel \vec{B}$ Заряженная частица движется в магнитном поле вдоль линий магнитной индукции

$$\alpha = 0 \Rightarrow \sin \alpha = 0 \Rightarrow F_L = 0$$

Магнитное поле не действует на заряженную частицу в двух случаях :
если частица неподвижна ($V=0$) или
если (V и B –параллельны) частица движется вдоль силовой линии магнитного поля.



Частица движется равномерно и прямолинейно вдоль силовой линии магнитного поля. **Траектория частицы – прямая линия.**

2) Заряженная частица движется в магнитном поле со скоростью перпендикулярной вектору магнитной индукции

$$\vec{v} \perp \vec{B}$$

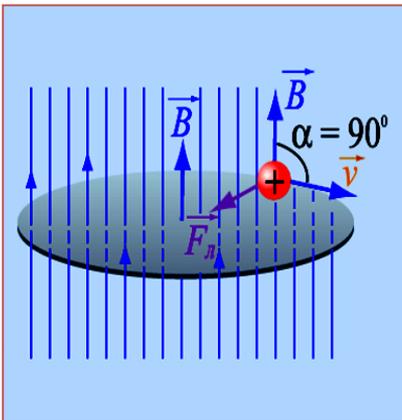
$$\alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \alpha = 1 \Rightarrow F_{\text{Л}} = qVB$$

Если вектор скорости перпендикулярен индукции магнитного поля, то сила Лоренца создает нормальное (центростремительное) ускорение и частица будет двигаться по окружности

Радиус найдем используя второй закон Ньютона

$$\frac{mV^2}{R} = qVB \Rightarrow R = \frac{mV}{qB} \quad \text{- радиус окружности}$$

$$a_n = \frac{V^2}{R} \quad \text{- центростремительное ускорение}$$

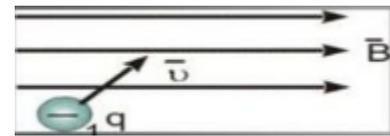


$$T = \frac{2\pi m}{Bq}$$

- период вращения частицы

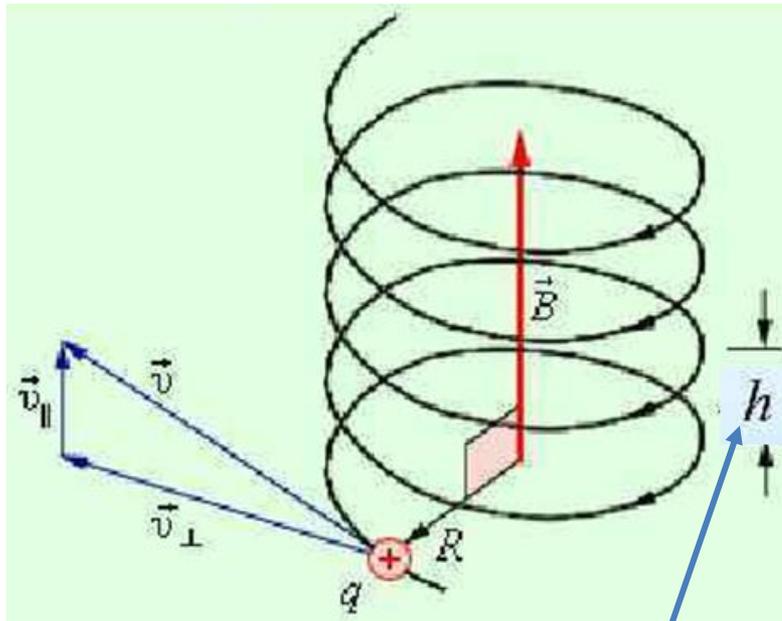
$$T = \frac{2\pi R}{V}$$

3) Заряженная частица движется под углом к линиям магнитной индукции .



В этом случае движение частицы состоит из двух движений:

- 1) равномерного движения по окружности;
- 2) равномерного прямолинейного движения вдоль поля.



В результате сложения двух движений возникает движение по винтовой линии – спирали, ось которой параллельна линиям индукции.

$$v_{\perp} = v \sin \alpha$$

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

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

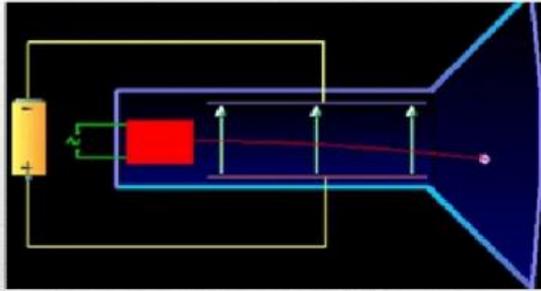
- радиус витков

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

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

- шаг спирали

Применение силы Лоренца



Электронно- лучевая
трубка

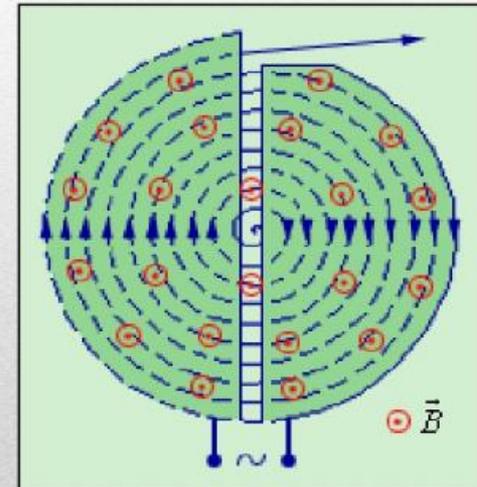
Перемещение электронного луча по экрану электронно-лучевых трубок происходит с помощью магнитного поля, создаваемого особыми катушками

- ❑ Российские академики И.Е.Тамм и А.Д.Сахаров в 1950 г. предложили использовать магнитную термоизоляция
- ❑ В вакуумной кольцевой камере создается сильное магнитное поле
- ❑ Заряженные частицы движутся, как бы навиваясь на линии индукции, и не испытывают столкновений со стенками камеры
- ❑ Такие камеры применяют в установках «Токамак» для получения плазмы

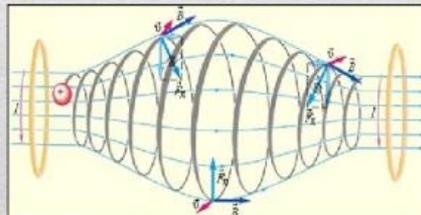
Циклотрон

- В этом ускорителе заряженные частицы разгоняются переменным электрическим полем
- В циклотронах используется тот факт, что период обращения частицы в однородном магнитном поле не зависит от скорости и радиуса траектории ее движения

$$T = 2 \pi m / qV$$

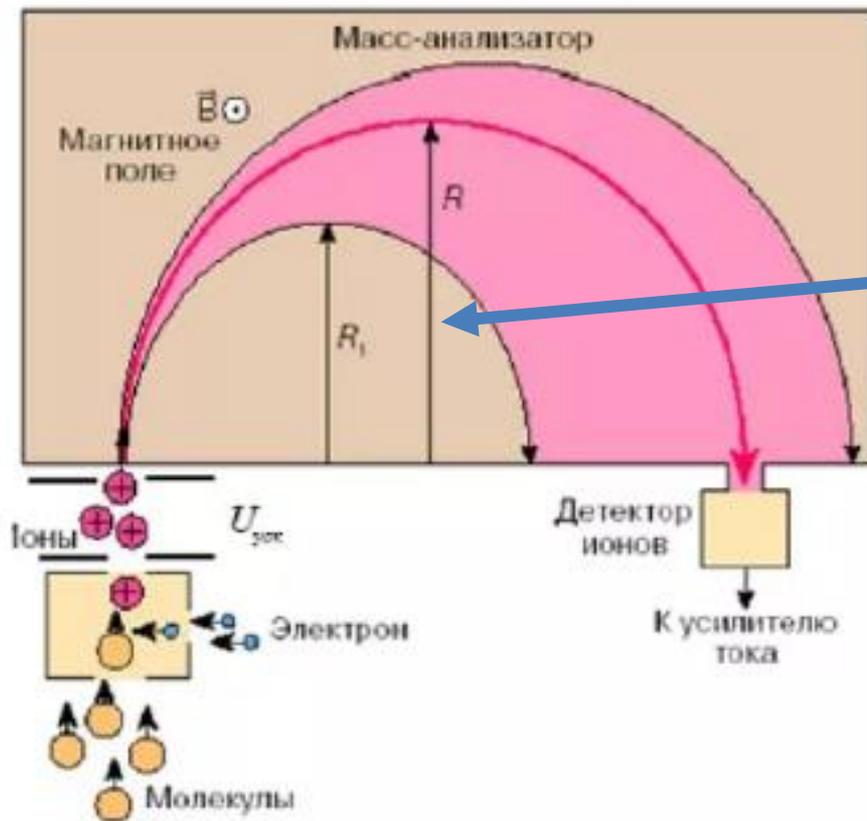


Магнитная ловушка



Применение силы Лоренца

Масс-спектрометр – прибор для разделения заряженных частиц (ионизированных молекул, атомов) по их массам



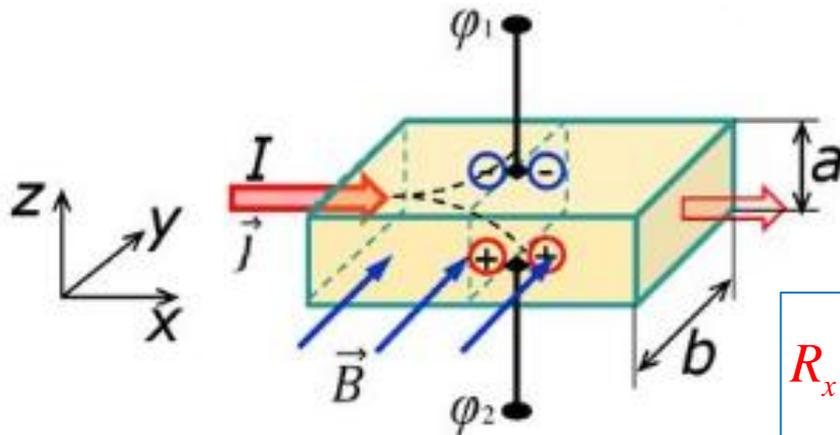
$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot m}{q}}$$

Принцип работы основан на воздействии электрических и магнитных полей на пучки ионов. Траектории частиц, прошедших через электрические и магнитные поля, зависят от их массы при одинаковых скоростях и зарядах.

Эффект Холла

Одним из проявлений силы Лоренца в веществе служит эффект, обнаруженный в 1879 г. американским физиком Э.Г. Холлом (1855–1938).

Сущность явления: Возникновение поперечного электрического поля и соответствующей разности потенциалов в проводнике (или в полупроводнике), по которому течет электрический ток I , при помещении проводника (полупроводника) в магнитном поле \vec{B} , перпендикулярное к направлению тока.



На верхней и нижней гранях пластинки (пл. x - y) образуется холловская разность потенциалов

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = U_x = R_x \cdot \frac{I \cdot B}{b}$$

$$R_x = \frac{1}{nq} \text{ - постоянная Холла}$$

n -концентрация носителей тока

Измерение Холловской разности потенциалов позволяет определить:

- 1) знак заряда;
- 2) количество носителей.

Магнитное поле Земли

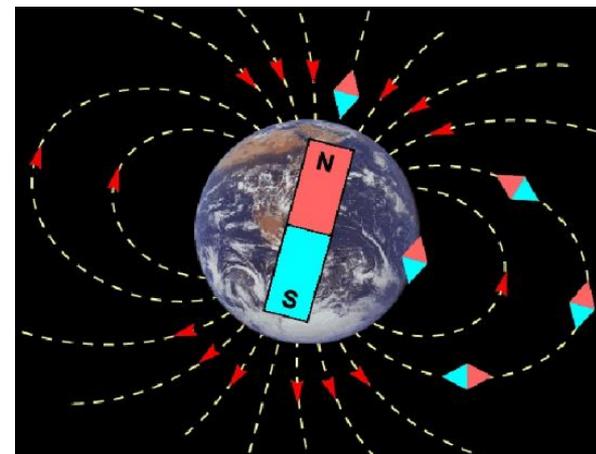


Магнитное поле Земли, образующее земную магнитосферу, простирается на расстоянии 70 – 80 тысяч км в направлении к Солнцу и на многие миллионы километров в обратном направлении. В околоземном пространстве магнитное поле образует магнитную ловушку для заряженных частиц высоких энергий.

Происхождение магнитного поля Земли связывают с движениями проводящего жидкого вещества в земном ядре.

Из других планет Солнечной системы лишь Юпитер и Сатурн обладают заметными магнитными полями.

Магнитное поле Солнца играет важнейшую роль во всех происходящих на Солнце процессах.



Действие магнитного поля Земли вблизи земной поверхности изменяет траекторию движения частиц, испускаемых Солнцем и звездами. Этим объясняется так называемый широтный эффект, заключающийся в том, что интенсивность космических лучей, доходящих до Земли, вблизи экватора меньше, чем в более высоких широтах

*Проходя через верхние слои атмосферы, поток заряженных частиц вызывает появление свечения. Поэтому в полярных широтах часто наблюдается такое явление, как **ПОЛЯРНОЕ СИЯНИЕ***

