

## Действие магнитного поля на проводники с током

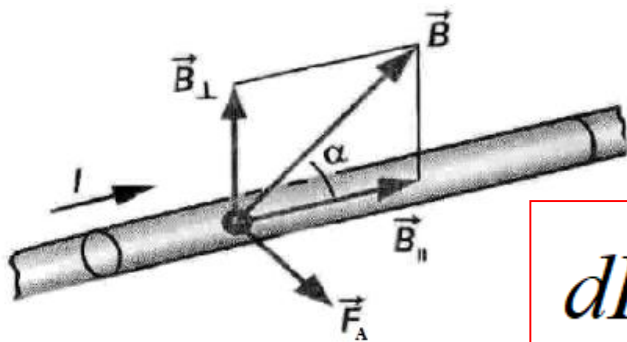
На прямой проводник, по которому течет ток, в магнитном поле действует **сила Ампера**.

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

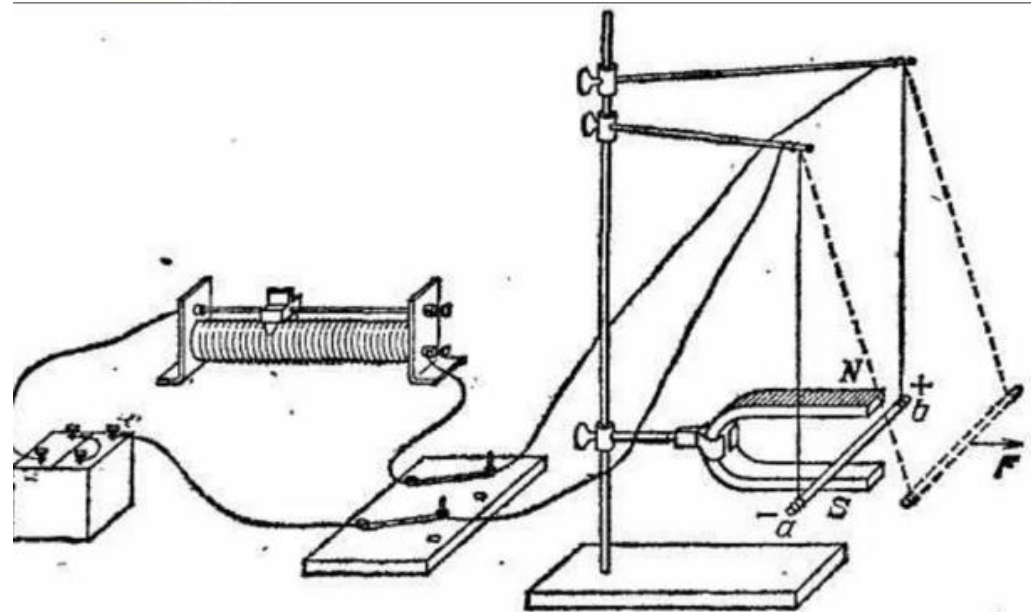
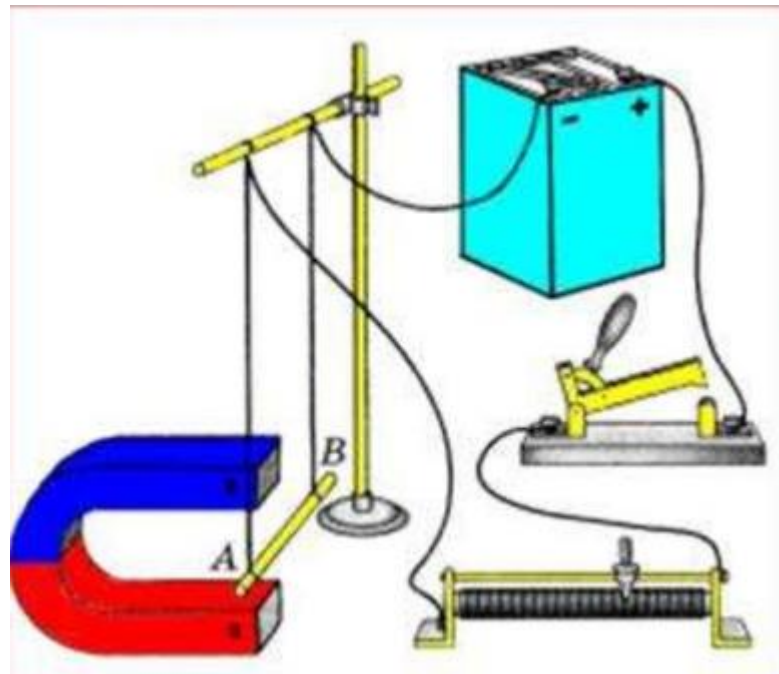
- сила с которой магнитное поле действует на бесконечно малый проводник длиной  $dl$



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

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

- модуль силы Ампера

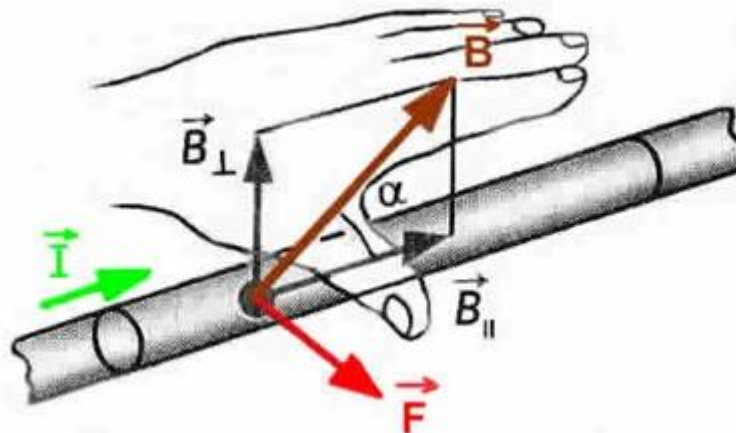


$$\vec{F} = \int_0^l d\vec{F} \quad \text{- сила с которой магнитное поле действует на проводник длиной } l$$

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

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

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.

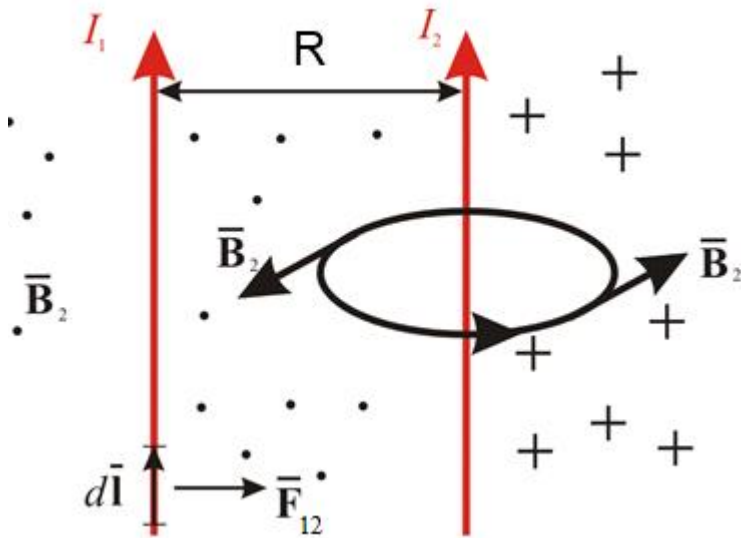


Из закона Ампера можно определить индукцию магнитного поля:

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

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

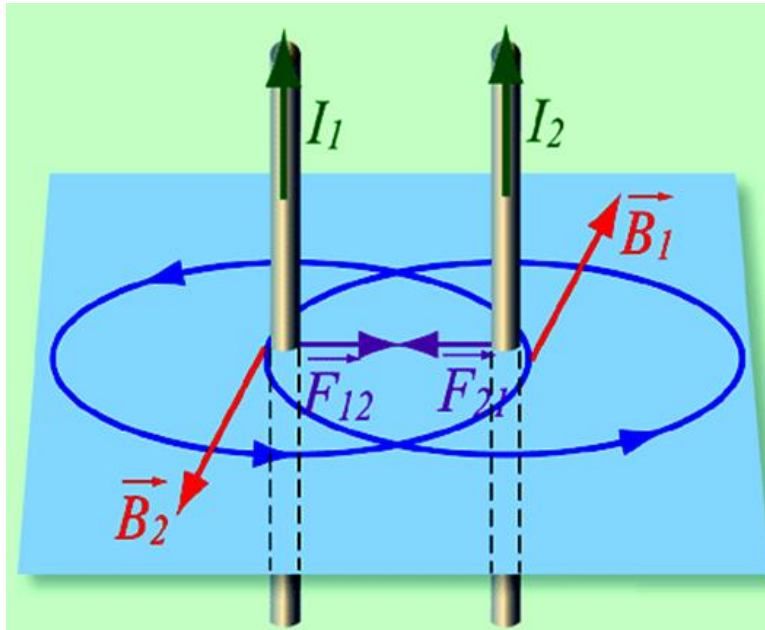


Пусть  $R$  – расстояние между проводниками.

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

$\mu_o$  - магнитная постоянная

$\mu$  - 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  $I_1$

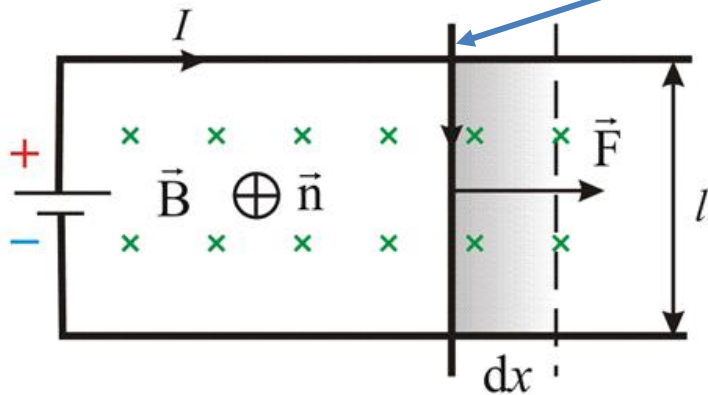
$$dF_{21} = I_2 B_1 dl = \frac{\mu_o \mu}{2\pi R} I_1 I_2 dl$$

- 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:

$$dA = Fdx = IBldx$$

$$ldx = dS \quad \text{- площадь, пересекаемая проводником при перемещении на } dx$$

Тогда получим

$$dA = IBdS$$

$$BdS = d\Phi$$

- магнитный поток, пересечённый этим проводником

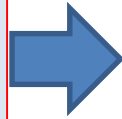
$$dA = Id\Phi$$

**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

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



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

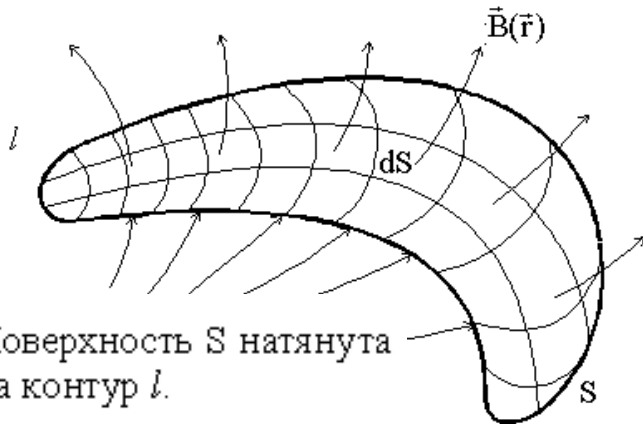
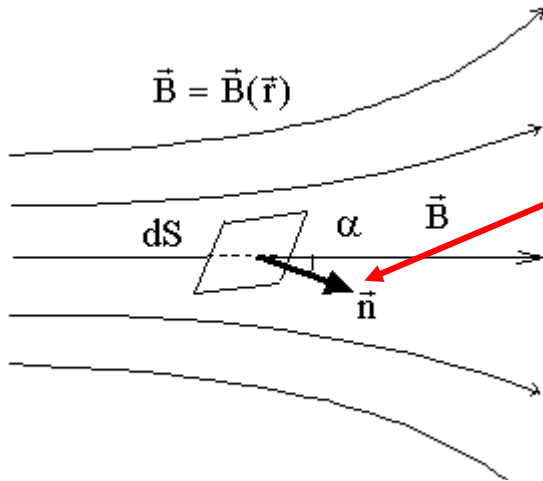
- поток вектора  $\vec{B}$  через бесконечно малую поверхность в неоднородном поле

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

$\vec{n}$  - 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



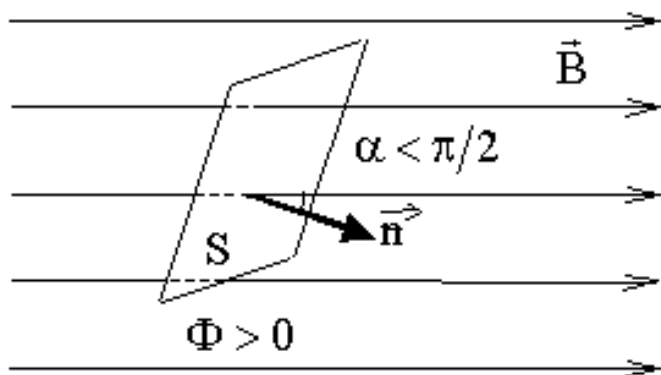
Поверхность  $S$  натянута на контур  $l$ .

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

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



**Для однородного поля и плоской площадки:**

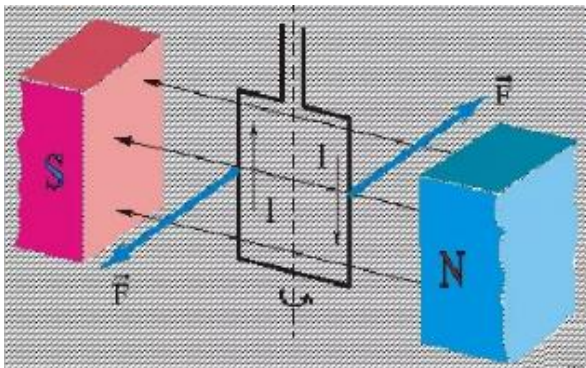
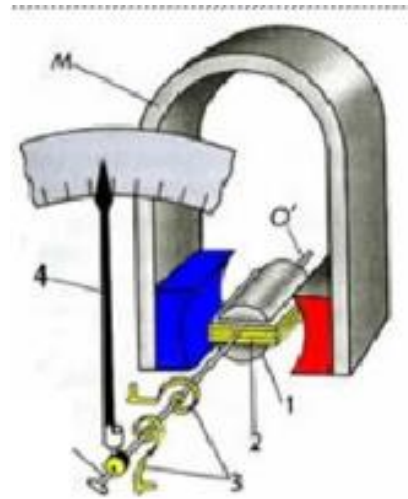


$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\vec{n}\vec{B}) = B_n S$$

$$[\Phi] = \text{Вб (вебер)}$$

# 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.

A detailed cutaway diagram of an electric motor. It shows the internal components, including the stator (outer part with windings), the rotor (inner part with windings), and the commutator with brushes. A red arrow indicates the direction of rotation. Wires are connected to the motor's terminals.

# 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

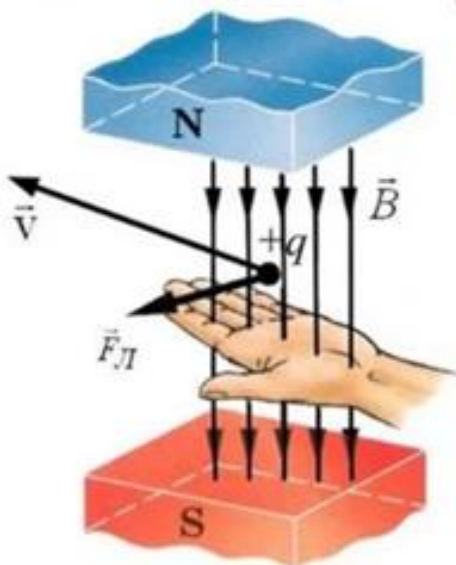
$\vec{B}$  - индукция магнитного поля

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

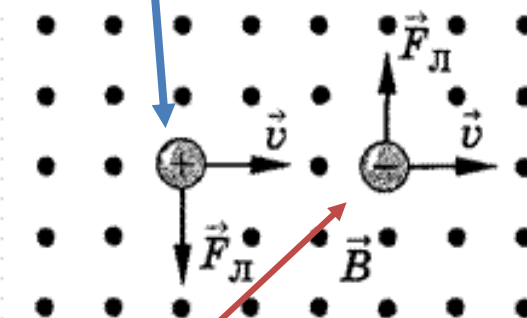
$\alpha$  - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$

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.

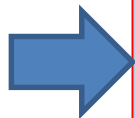
# Движение заряженных частиц в магнитных полях

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

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

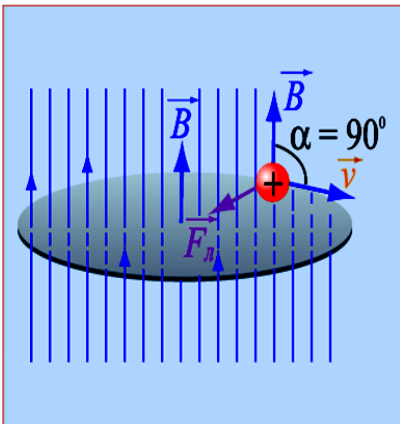
$$\alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \alpha = 1 \Rightarrow F_{\text{Л}} = qVB$$

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

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

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



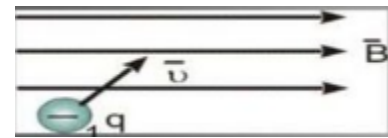
$$T = \frac{2\pi m}{Bq}$$

- период вращения частицы

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

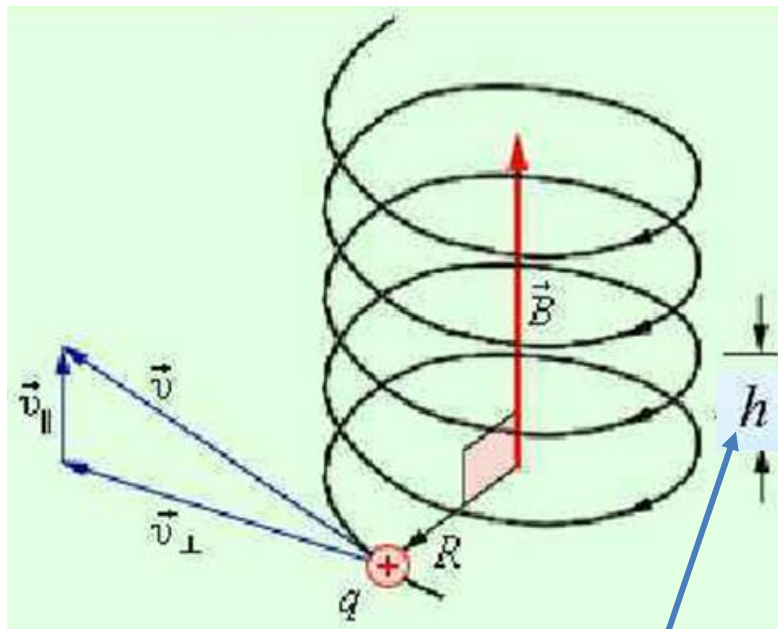


3) Заряженная частица движется под углом к линиям магнитной индукции .



*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.*

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

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

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

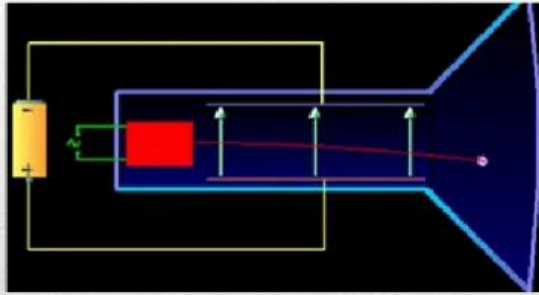
- радиус витков

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

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

- шаг спирали

# Применение силы Лоренца



Электронно- лучевая трубка

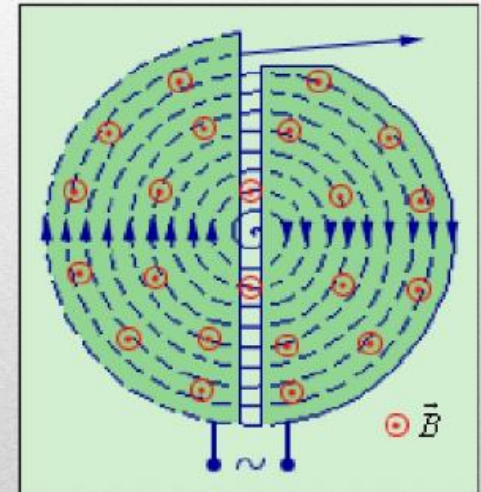
Перемещение электронного луча по экрану электронно-лучевых трубок происходит с помощью магнитного поля, создаваемого особыми катушками

- ❑ 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

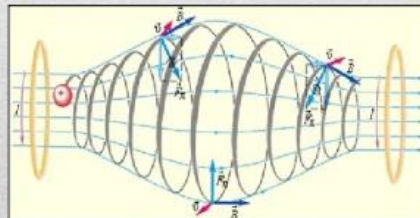
## Циклотрон

- 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

$$T = 2 \pi / qV$$

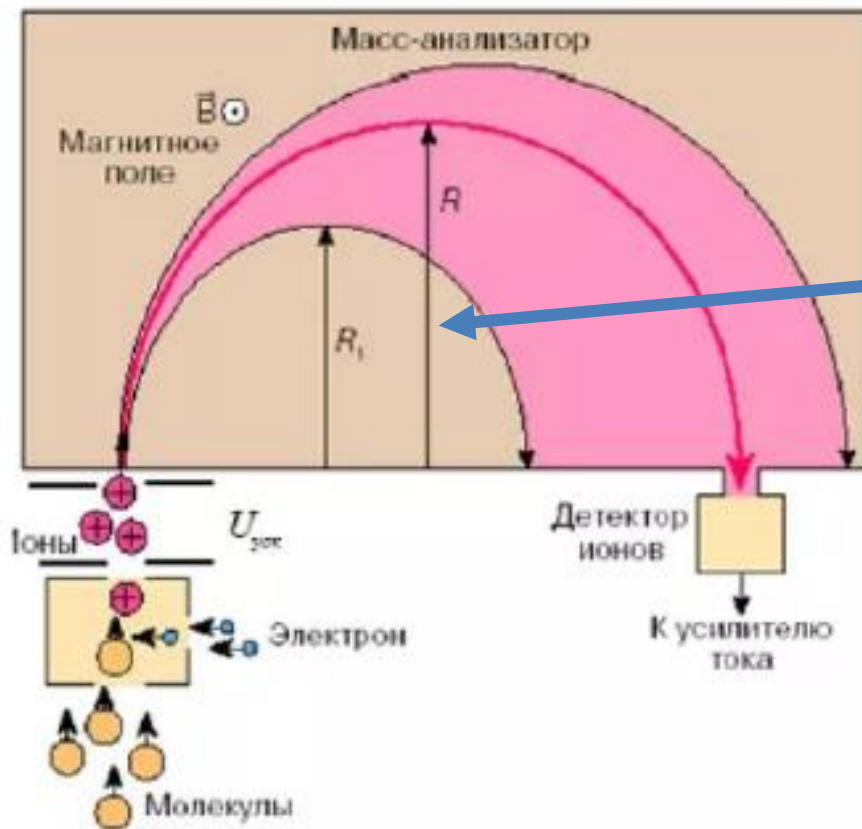


## Магнитная ловушка



# Применение силы Лоренца

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



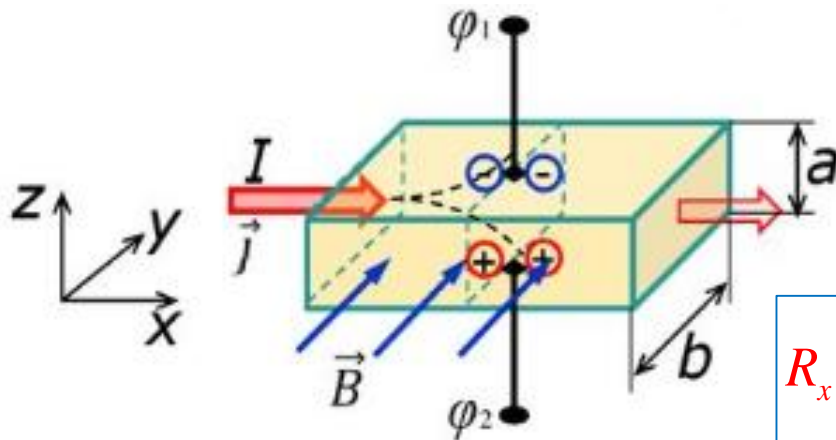
$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot m}{q}}$$

**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

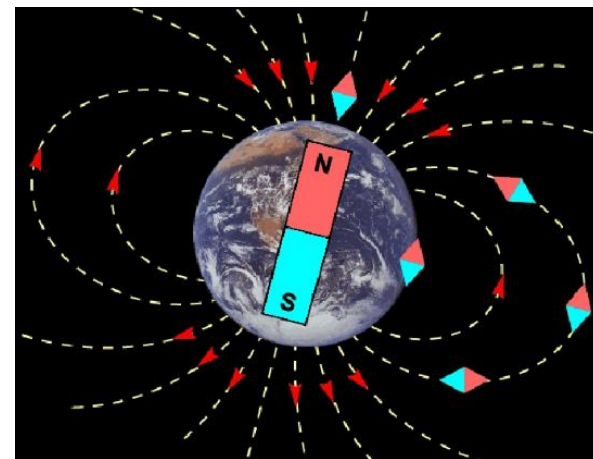


Магнитное поле Земли, образующее земную магнитосферу, простирается на расстоянии 70 – 80 тысяч км в направлении к Солнцу и на многие миллионы километров в обратном направлении. В околоземном пространстве магнитное поле образует магнитную ловушку для заряженных частиц высоких энергий.

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***

