

# **Тема 2. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

- **2.1. Закон Ампера.**
- **2.2. Взаимодействие двух параллельных бесконечных проводников с током.**
- **2.3. Воздействие магнитного поля на рамку с током.**
- **2.4. Единицы измерения магнитных величин.**
- **2.5. Сила Лоренца.**
- **2.6. Эффект Холла.**
- **2.7. Циркуляция вектора магнитной индукции.**
- **2.8. Магнитное поле соленоида.**
- **2.9. Магнитное поле тороида.**
- **2.10. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле.**

## 2.1. Закон Ампера



*АМПЕР Андре Мари (1775 – 1836) – французский физик математик и химик.*

*Основные физические работы посвящены электродинамике. Сформулировал правило для определения действия магнитного поля тока на магнитную стрелку. Обнаружил влияние магнитного поля Земли на движущиеся проводники с током.*

В 1820 г. А. М. Ампер экспериментально установил, что два проводника с током взаимодействуют друг с другом с силой:

$$F = k \frac{I_1 I_2}{b} \quad (2.1.1)$$

где  $b$  – расстояние между проводниками, а  $k$  – коэффициент пропорциональности зависящий от системы единиц.

В первоначальное выражение закона Ампера не входила никакая величина характеризующая магнитное поле. Потом разобрались, что взаимодействие токов осуществляется через магнитное поле и следовательно в закон должна входить характеристика магнитного поля.

В современной записи в системе СИ, **закон Ампера выражается формулой:**

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}] \quad (2.1.2)$$

**Это сила с которой магнитное поле действует на бесконечно малый проводник с током  $I$ .**

Модуль силы действующей на проводник

$$dF = IBdl \sin (d\vec{l}, \vec{B}). \quad (2.1.3)$$

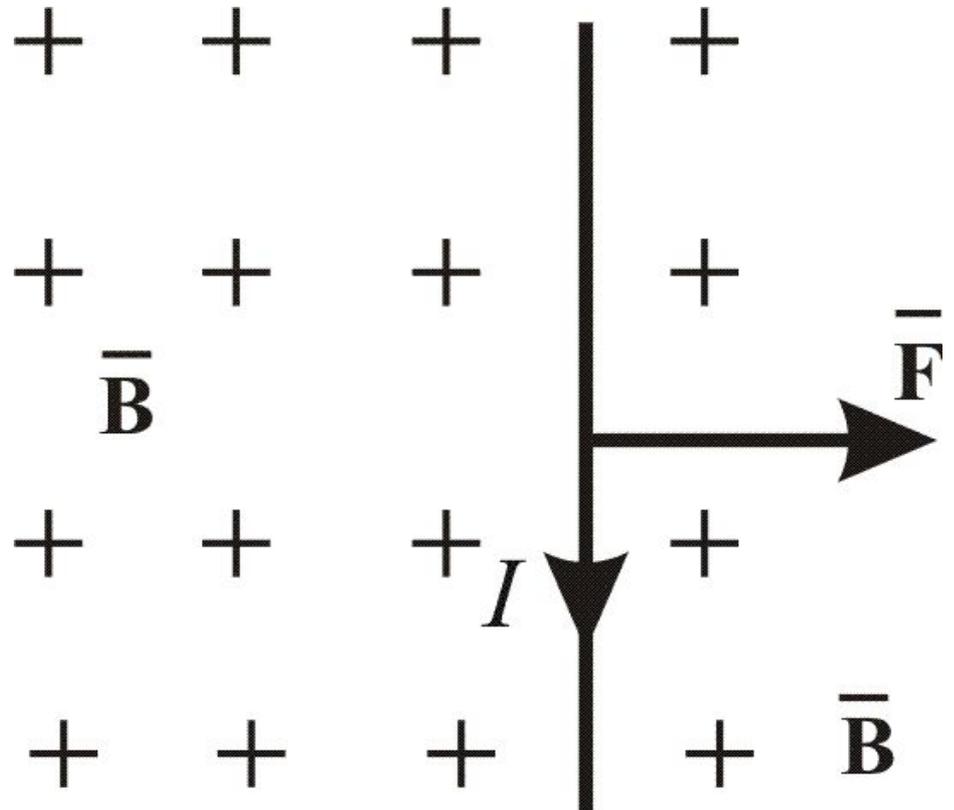
# Сила Ампера:

$$F_A = I \ell B \sin \alpha$$

Если магнитное поле однородно и проводник перпендикулярен силовым линиям магнитного поля, то

$$F = IlB, \quad (1.4)$$

где  $I = qnvS$  — ток через проводник сечением  $S$ .



# Работа силы Ампера:

$$dA = F_A \cdot dx = I \square B \cdot dx$$

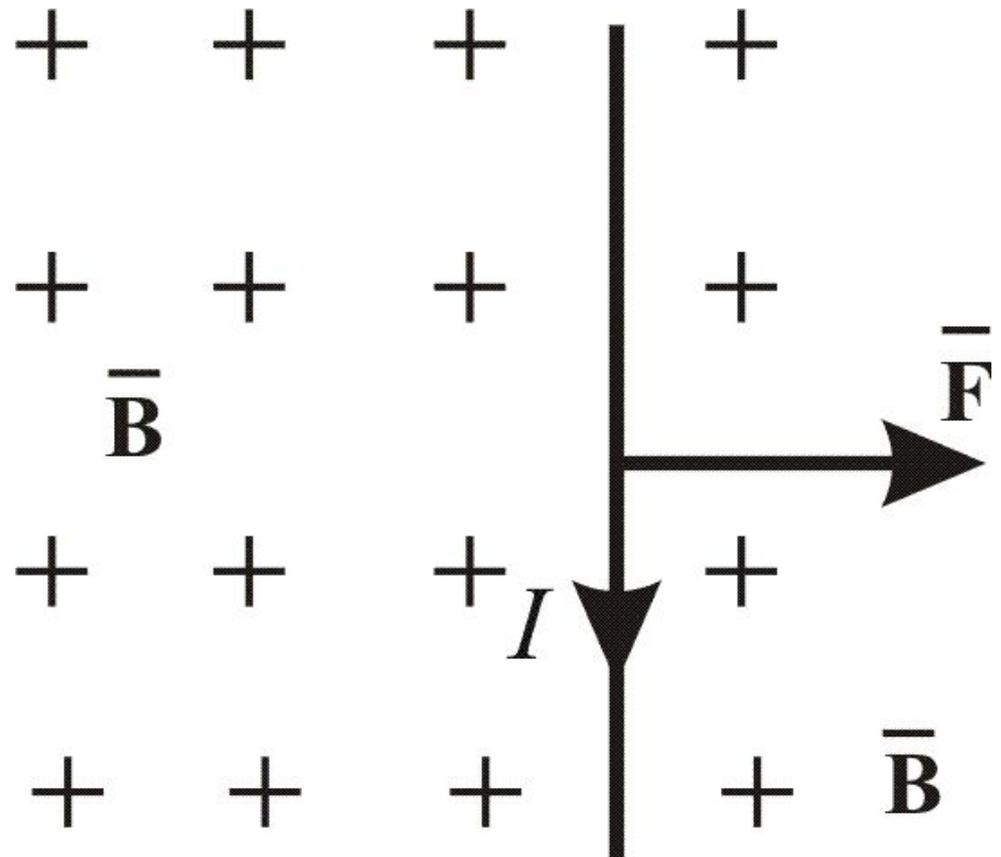
# Работа силы Ампера:

$$dA = I \cdot (\square B \cdot dx \cos \alpha)$$

$$dA = I \cdot d\Phi$$

**Направление силы определяется направлением векторного произведения или правилом левой руки (что одно и тоже). Ориентируем пальцы по направлению первого вектора, второй вектор должен входить в ладонь и большой палец показывает направление векторного произведения.**

**Закон Ампера – это первое открытие фундаментальных сил, зависящих от скоростей.**



**Рис. 2.1**

# ПРАВИЛО левой руки



Из закона Ампера хорошо виден физический смысл магнитной индукции:  $B$  – величина, численно равная силе, с которой магнитное поле действует на проводник единичной длины, по которому течет единичный ток.

$$B = \frac{F}{Il}$$

Размерность индукции

$$[B] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

## 10.2. Взаимодействие двух параллельных бесконечных проводников с током

Пусть  $b$  – расстояние между проводниками. Задачу следует решать так: один из проводников  $I_2$  создаёт магнитное поле, второй  $I_1$  находится в этом поле.

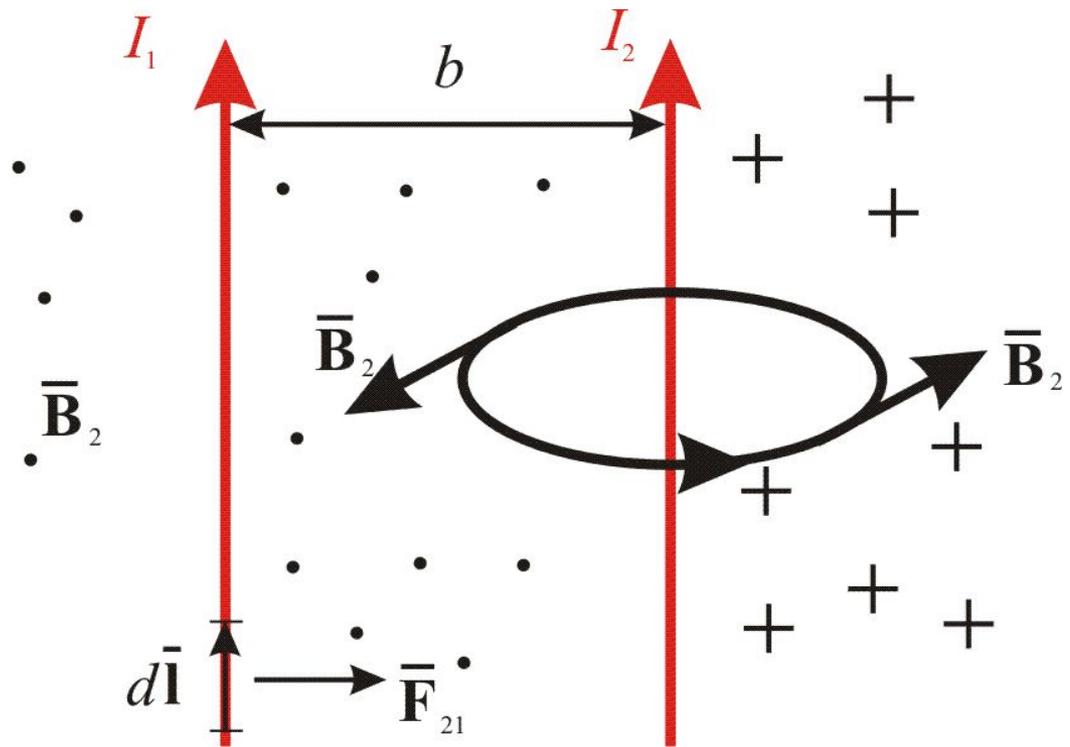


Рис. 2.2

Магнитная индукция, создаваемая током  $I_2$  на расстоянии  $b$  от него:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi b} \quad (2.2.1)$$

Если  $I_1$  и  $I_2$  лежат в одной плоскости, то угол между  $B_2$  и  $I_1$  прямой, следовательно сила, действующая на элемент тока  $I_1 dl$

$$F_{21} = B_2 I_1 dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2 dl}{2\pi b}. \quad (2.2.2)$$

На каждую единицу длины проводника действует сила:

$$F_{21ed} = \frac{F_{21}}{dl} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{b} \quad (2.2.3)$$

(разумеется, со стороны первого проводника на второй действует точно такая же сила).

Результирующая сила равна одной из этих сил! Если эти два проводника будут воздействовать на третий, тогда их магнитные поля  $\vec{B}_1$  нужно сложить векторно.

$$F_{21} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{b}$$

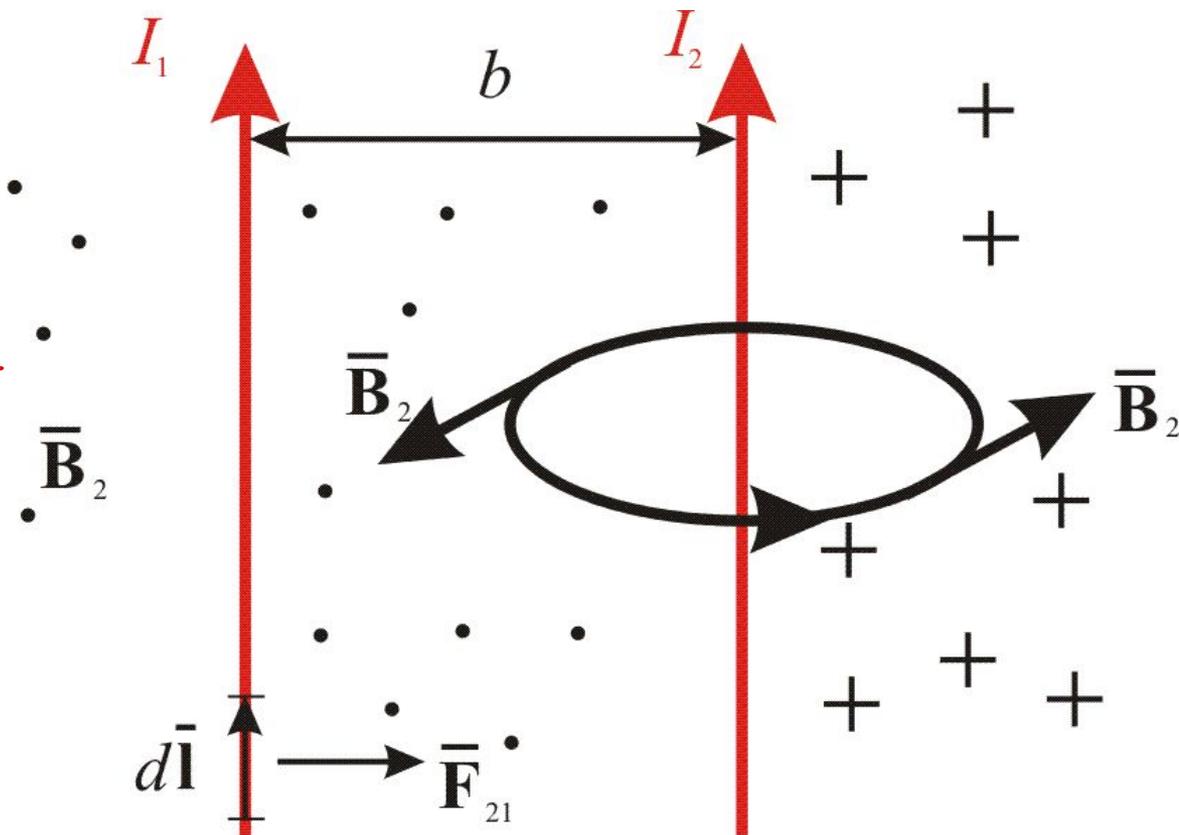
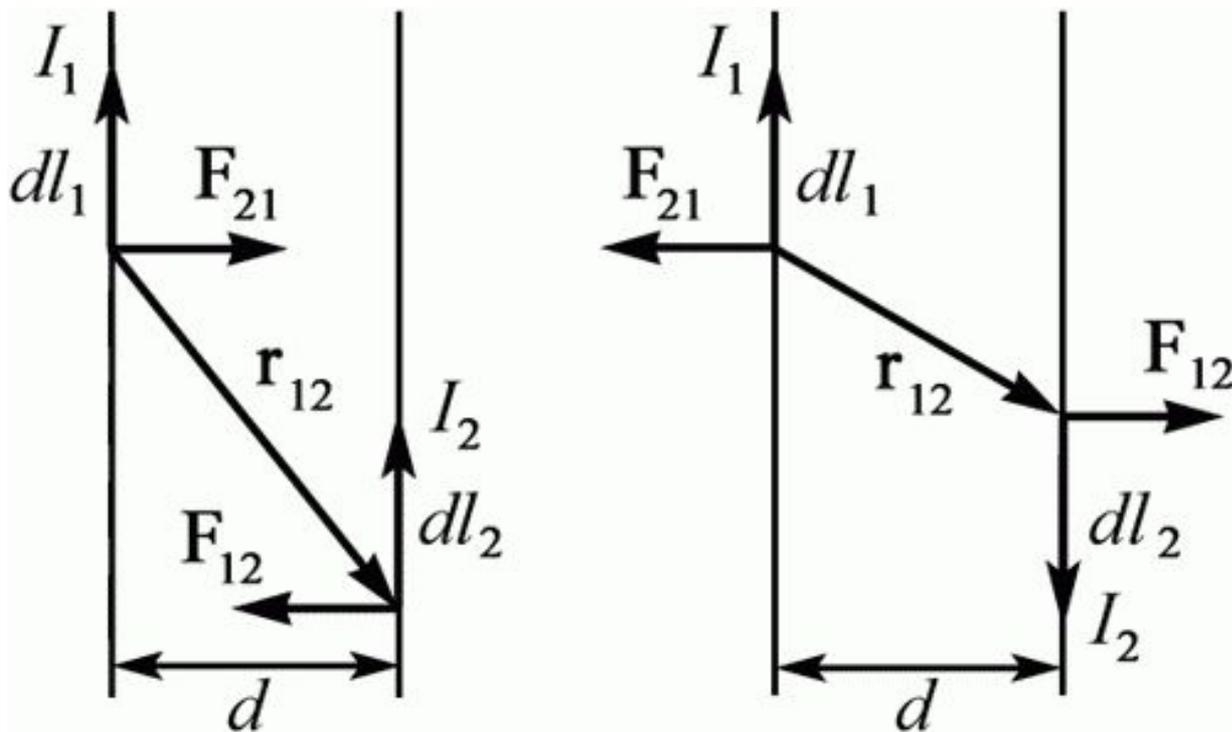


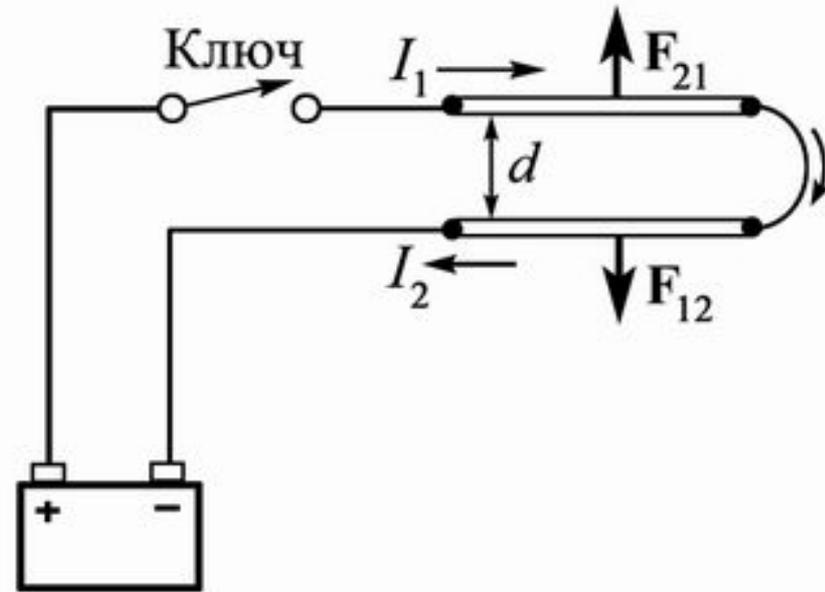
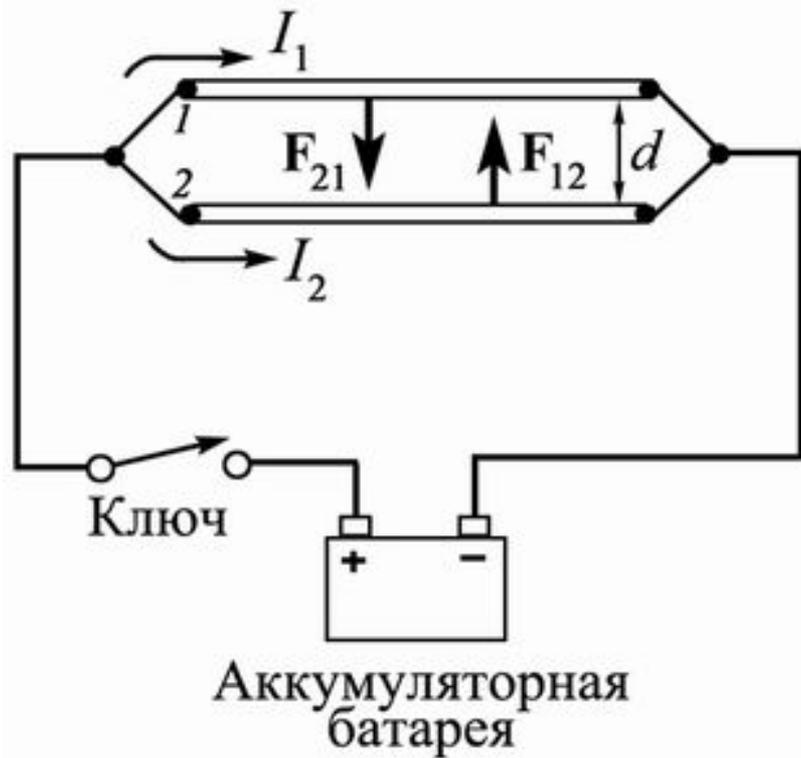
Рис. 2.2



Взаимодействие бесконечно малых элементов  $dl_1$ ,  $dl_2$  параллельных токов  $I_1$  и  $I_2$ :

**– токи, текущие в одном направлении притягиваются;**

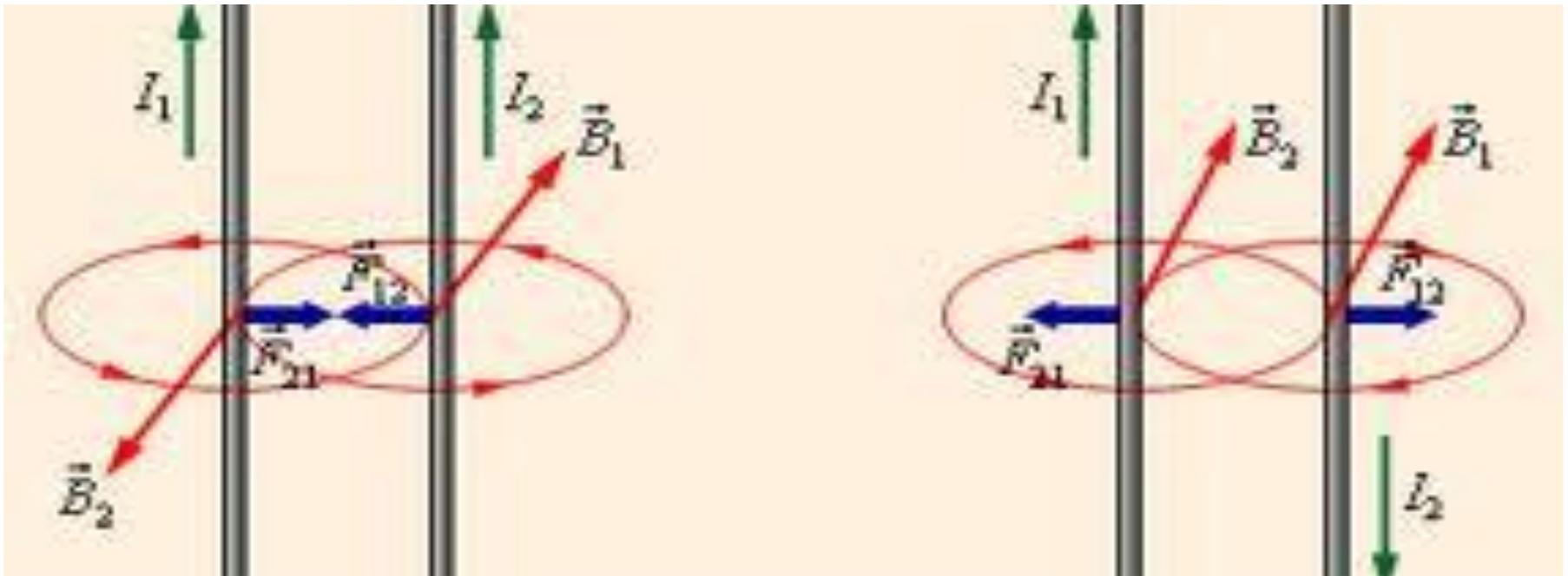
**– токи, текущие в разных направлениях, отталкиваются**



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 направлениях.**

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

$$\text{При } I_1 = I_2 = 1 \text{ А, } d = 1 \text{ м } F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$$



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

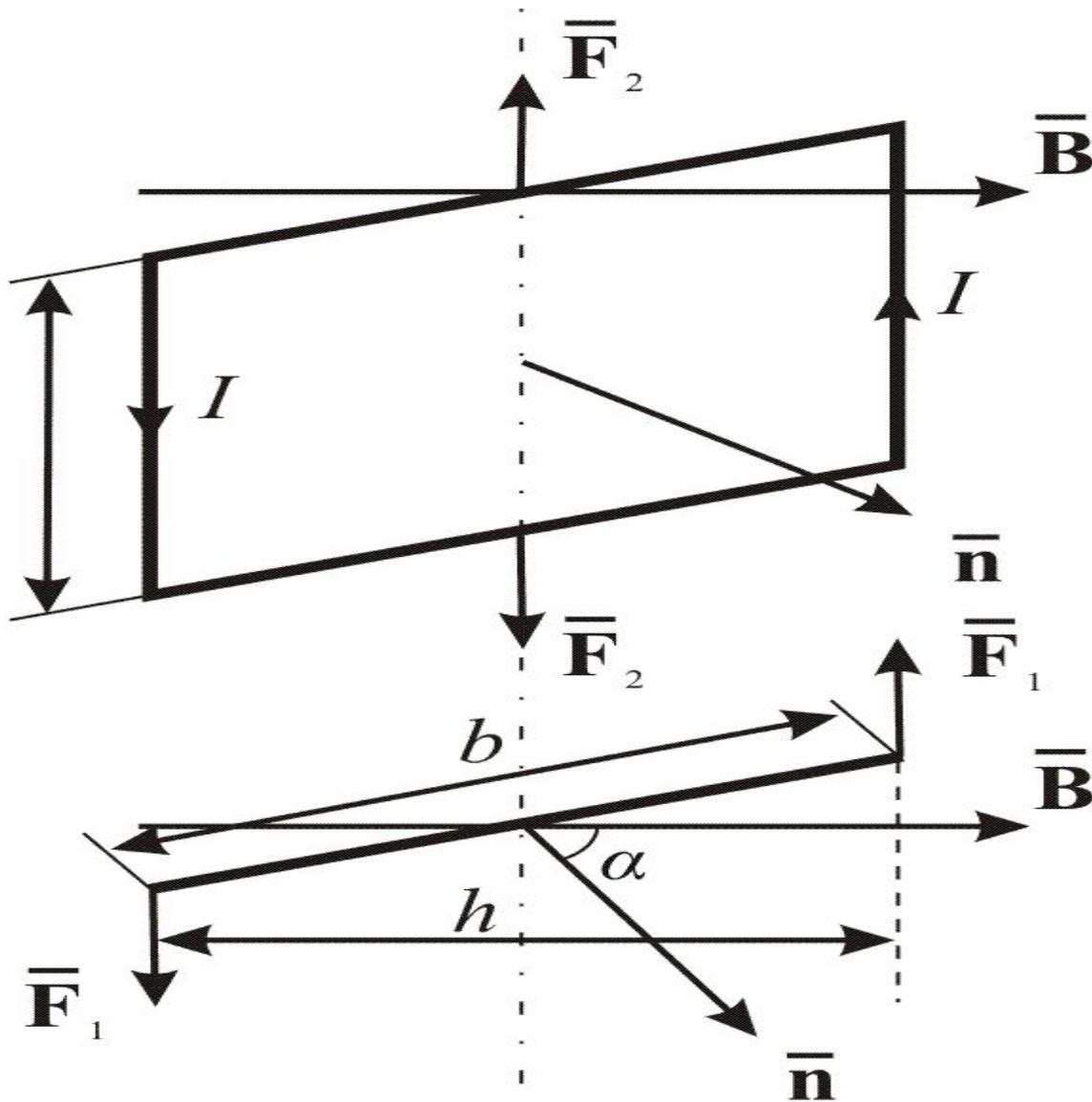
Силе неизменяющегося тока в 1 ампер соответствует ток, при прохождении которого по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии одного метра, соответствует сила магнитного взаимодействия на каждый метр длины проводников, равная  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

Таким образом, на основе закона Ампера устанавливается эталон единицы силы тока в СИ.

# 10.3. Воздействие магнитного поля на рамку с током

Рамка с током  $I$  находится в однородном магнитном поле

$\alpha$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$  (направление нормали связано с направлением тока правилом буравчика).



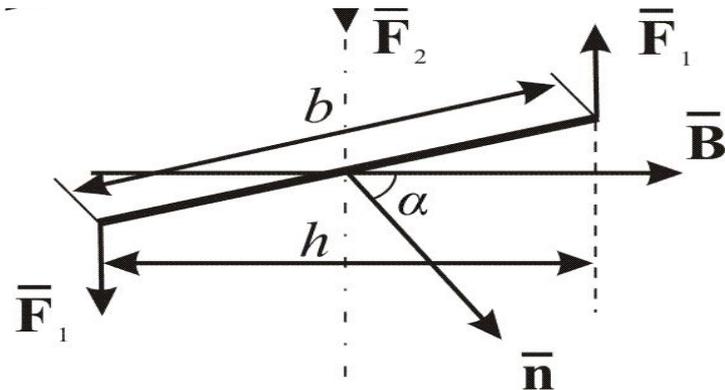
- Сила Ампера, действующая на сторону рамки длиной  $l$ , равна:  $F_1 = IlB$
- здесь  $(\vec{B} \perp \vec{I})$ .
- На другую сторону длиной  $l$  действует такая же сила. Получается «пара сил», или вращающий момент.

$$M = F_1 h = IlBb \sin \alpha, \quad (2.3.1)$$

где плечо:  $h = b \sin \alpha$ .

Так как  $lb = S$  – площадь рамки, тогда можно записать:

$$M = IBS \sin \alpha = P_m \sin \alpha$$

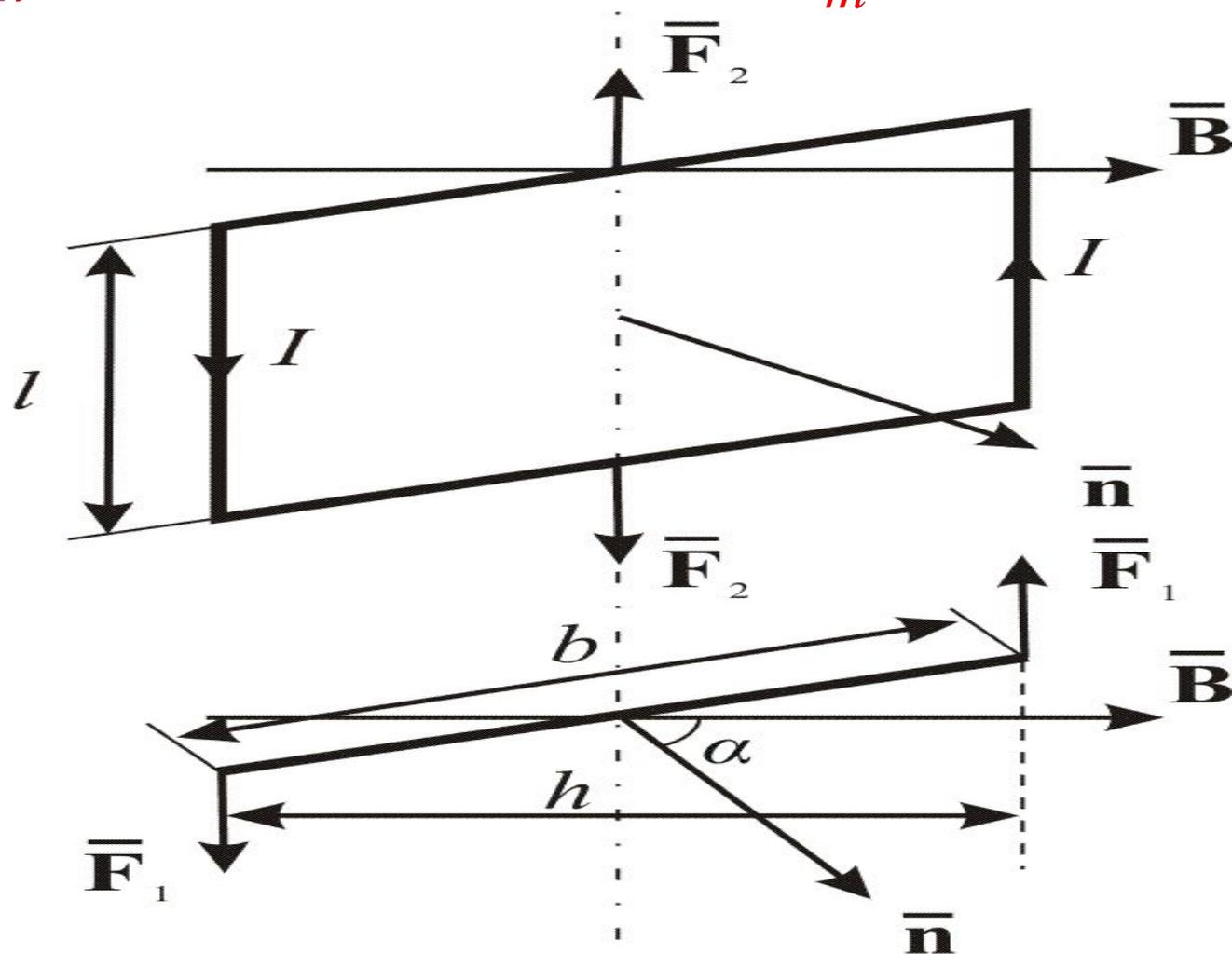


Вот откуда мы писали с вами выражение для магнитной индукции:

$$B = \frac{M}{P_m \sin \alpha}$$

$$B = \frac{M_{\text{макс}}}{P_m} \quad (2.3.3)$$

$M$  – вращающий момент силы,  
 $P$  – магнитный момент.



Итак, под действием этого вращательного момента рамка повернётся так, что

На стороны длиной  $b$  тоже действует сила Ампера  $F_2$  – растягивает рамку и так как силы равны по величине и противоположны по направлению рамка не смещается, в этом случае  $M = 0$ , состояние ***устойчивого равновесия***.

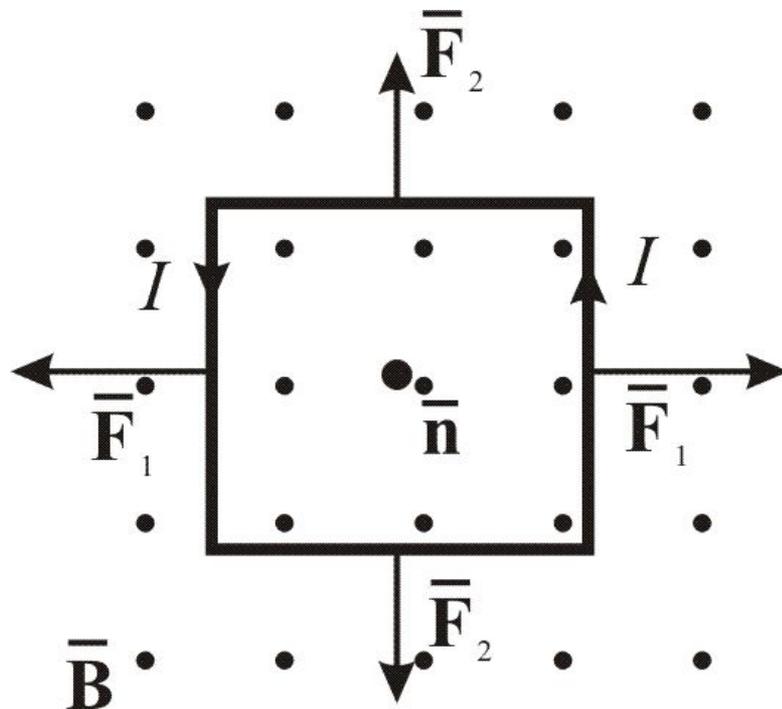
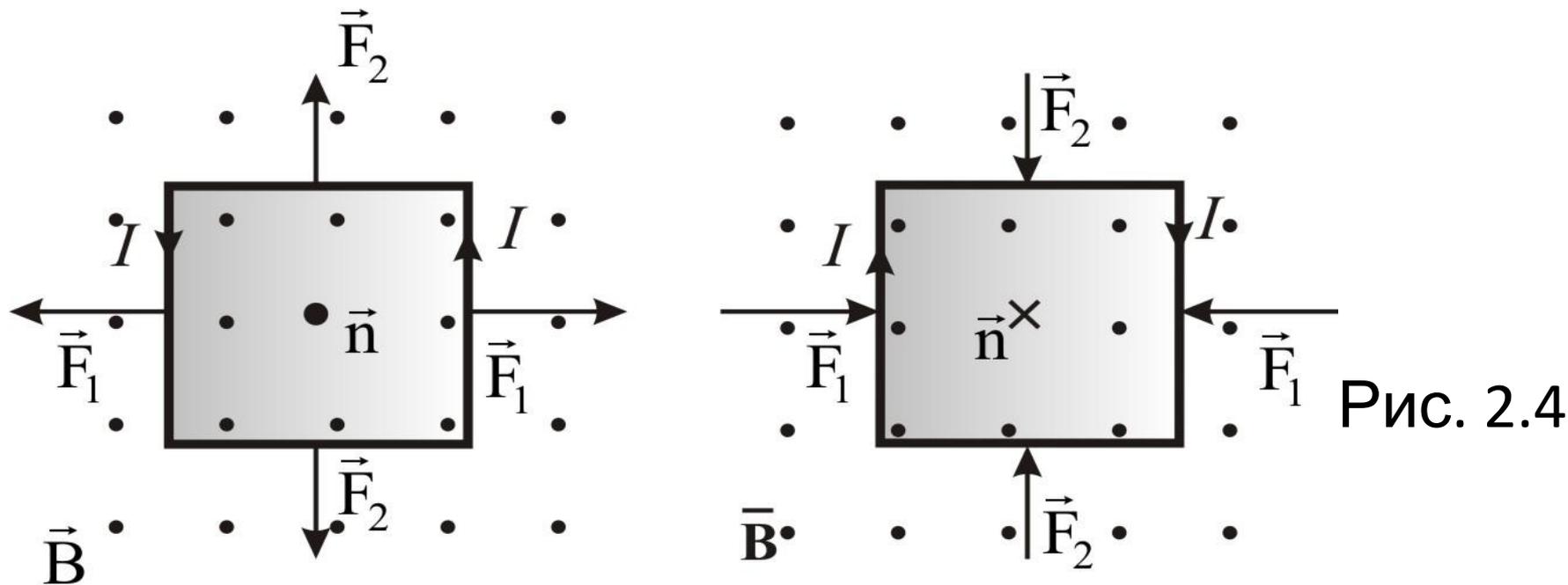


Рис. 2.4

Когда  $\vec{n}$  и  $\vec{B}$  антипараллельны,  $M = 0$  (так как плечо равно нулю), это состояние, **неустойчивого равновесия**. Рамка сжимается и, если чуть сместится, сразу возникает вращающий момент такой что она **перевернется**.

В неоднородном поле рамка повернется и будет вытягиваться в область более сильного поля.



## 2.4. Единицы измерения магнитных величин

Закон Ампера используется для установления единицы силы тока – ампер.

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0^{(2.4.1)} I_1 I_2}{4\pi b}$$

где

$$dl = 1 \text{ м} \quad b = 1 \text{ м} \quad I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$$

$$\frac{dF}{dl} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

- Итак, **Ампер** – сила тока неизменного по величине, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого сечения, расположенным на расстоянии один метр, один от другого в вакууме вызывает между этими проводниками силу

$$2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{b}$$

Определим отсюда размерность и величину  $\mu_0$

В СИ:  $2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 2A^2$   $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$

Или

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

В СГС:  $\mu_0 = 1$

Из закона Био-Савара-Лапласа, для прямолинейного проводника с током  $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b}$  можно найти размерность индукции магнитного поля:

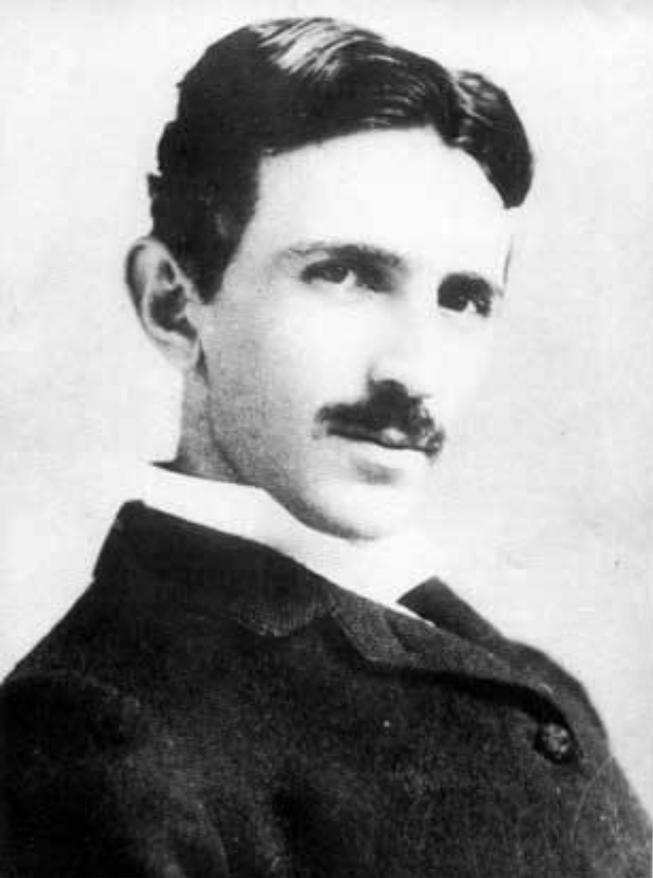
$$[B] = \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{Тл}$$

**1 Тл** (один тесла равен магнитной индукции однородного магнитного поля, в котором на плоский контур с током, имеющим магнитный момент  $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$  действует вращающий момент  $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ).

$$[B] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{ Тл.}$$

Один тесла  $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ .

Гаусс – единица измерения в Гауссовой системе единиц (СГС).



**ТЕСЛА Никола (1856 - 1943)-  
сербский ученый в области  
электротехники, радиотехники**

Разработал ряд конструкций многофазных генераторов, электродвигателей и трансформаторов. Сконструировал ряд радиоуправляемых самоходных механизмов.

Изучал физиологическое действие токов высокой частоты. Построил в 1899 радиостанцию на 200 кВт в Колорадо и радиоантенну высотой 57,6 м в Лонг-Айленде. Изобрел электрический счетчик, частотомер и др.

# Этот безумный изобретатель

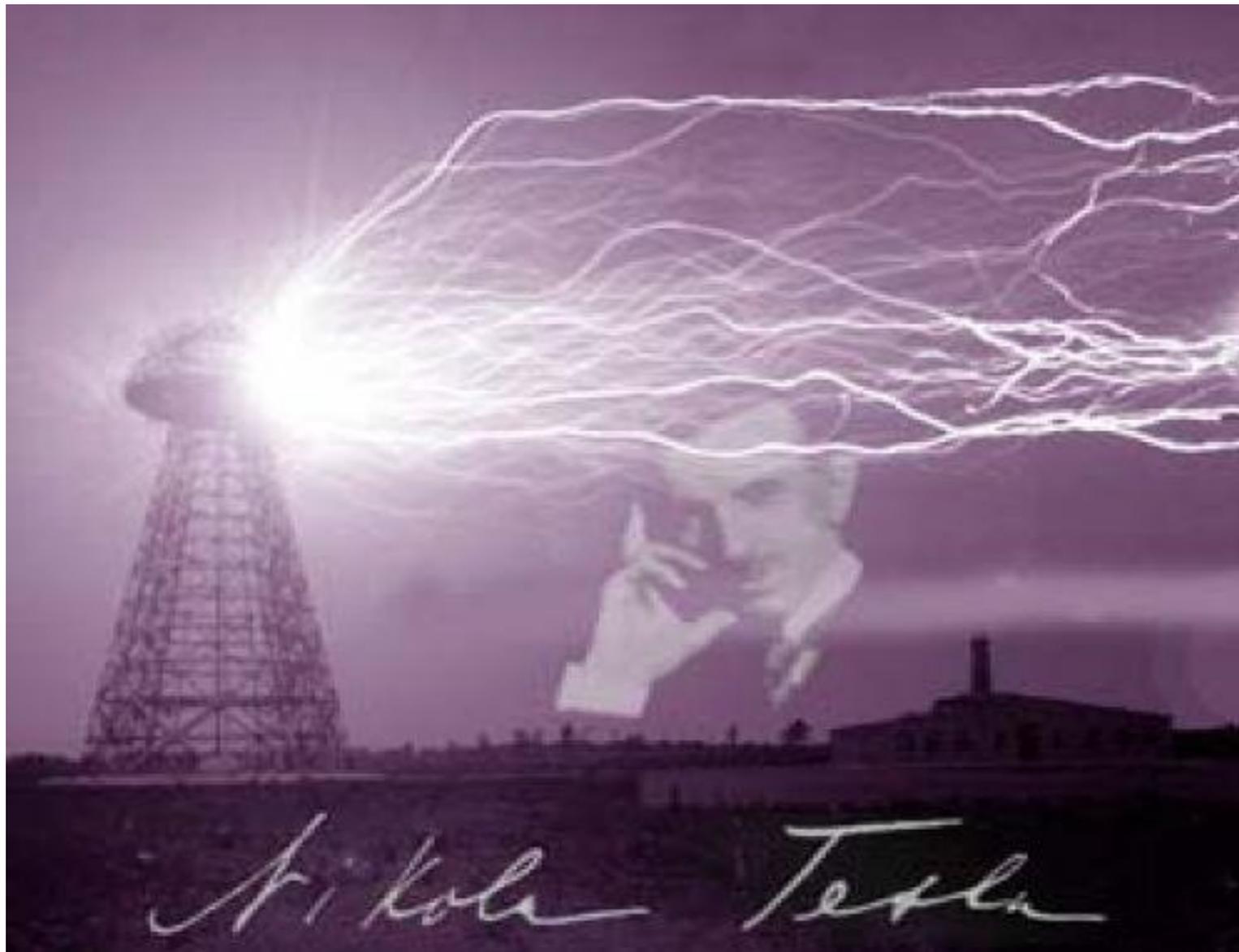


# «Я мог бы обрушить Бруклинский мост за час»



Ôèëù3.wmv

# Мировая башня связи

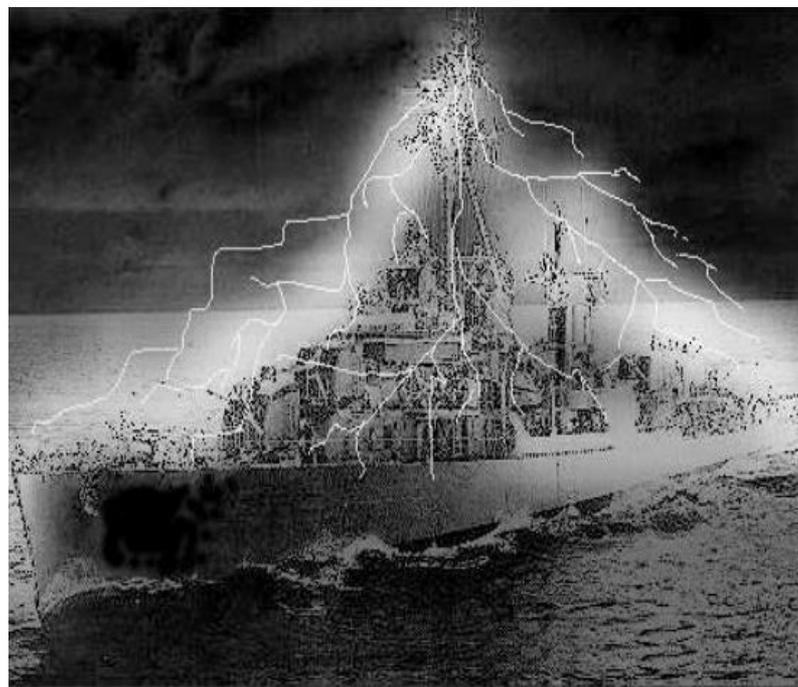




Главным сооружением была каркасная башня высотой 57 метров с огромной медной «тарелкой» наверху – гигантским усилительным передатчиком. И со стальной шахтой, углубленной в землю на 36 метров.



Тесла зажѐг небо  
над океаном на  
тысячи миль...



Другое определение: 1 Тл равен магнитной индукции при которой магнитный поток сквозь площадку 1 м<sup>2</sup>, перпендикулярную направлению поля равен 1 Вб.

$$d\Phi_B = B dS \cos(\angle \vec{n}, \vec{B})$$

$$\Phi = \int_S B_n dS.$$

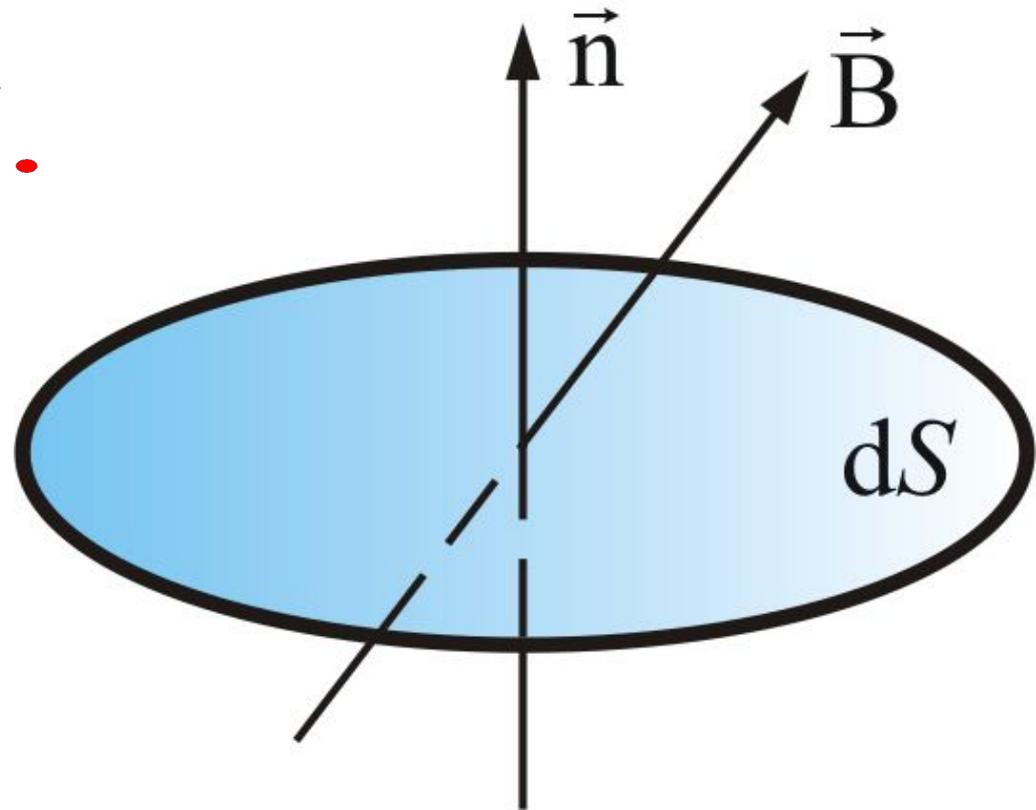


Рис. 2.5

Единица измерения магнитного потока Вб, получила свое название в честь немецкого физика Вильгельма Вебера (1804 – 1891 г.) – профессора университетов в Галле, Геттингене, Лейпциге.

Как мы уже говорили, *магнитный поток  $\Phi$ , через поверхность  $S$  – одна из характеристик магнитного поля* (Рис. 2.5)

$$d\Phi_B = B dS \cos(\angle d\vec{n}, \vec{B}),$$

$$\Phi = \int_S B_n dS.$$

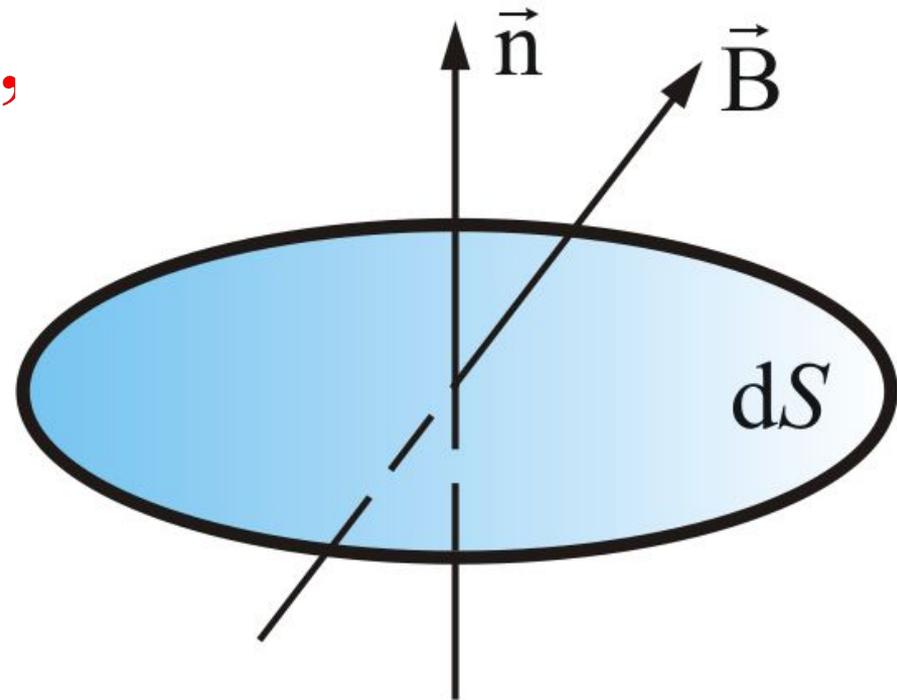


Рис. 2.5

- Единица измерения магнитного потока в СИ:

- $[\Phi_B] = [B] \cdot [S] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}$

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} \quad 1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$$

$$1 \text{ Вб} = 10^4 \text{ Гс} \cdot 10^4 \text{ см}^2 = 10^8 \text{ Мкс}$$

- Здесь *Максвелл* (*Мкс*) – единица измерения магнитного потока в СГС названа в честь знаменитого ученого Джеймса Максвелла (1831 – 1879 г.), создателя теории электромагнитного поля.
- Напряженность магнитного поля измеряется  $\text{А} \cdot \text{м}^{-1}$

$$1 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э} \quad 1 \text{ Э} = 79,6 \approx 80 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$$

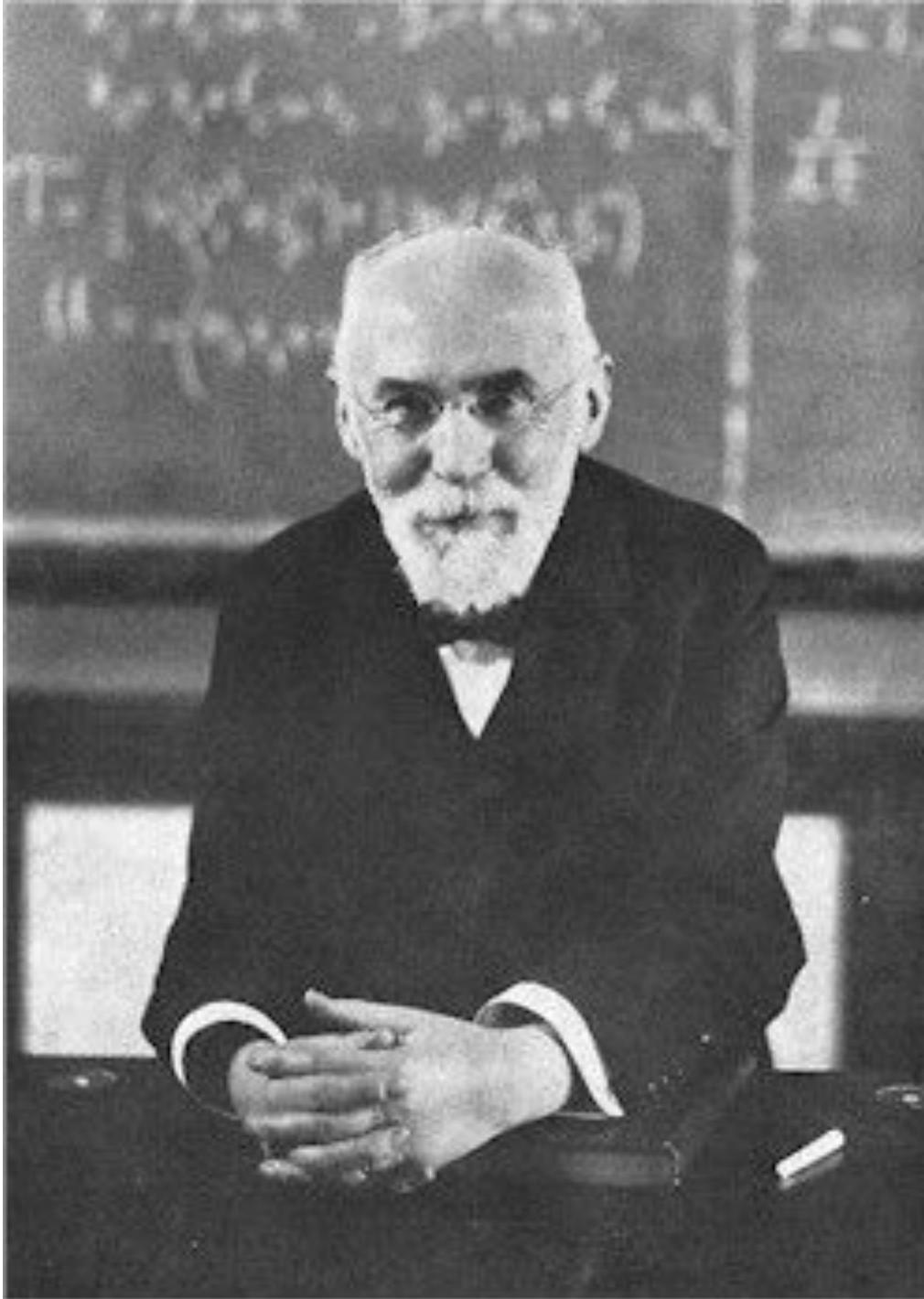
## Таблица основных характеристик магнитного поля

Наименование	Обозначение	СИ	СГС	СИ/СГС
Магнитная индукция	$B$	$Tл \left( \frac{H}{A \cdot м} \right)$	Гс	$10^4$
Напряженность магнитного поля	$H$	$A/м$	Э	$4\pi \cdot 10^{-3}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$\frac{H}{A^2}; \frac{\Phi}{м}$	1	$4\pi \cdot 10^{-7}$
Поток магнитной индукции	$\Phi_B$	$Вб$ ( $Tл \cdot м^2$ )	Мкс	$10^8$

## 2.5 Сила Лоренца

Сила, действующая на электрический заряд  $q$  во внешнем электромагнитном поле, **зависит** не только от его местоположения и напряженности электрического поля  $\mathbf{E}(x,y,z)$  в этой точке:  $q\mathbf{E}(x,y,z)$ , но, **в общем случае, и от скорости его движения  $\mathbf{v}$  и величины индукции магнитного поля  $\mathbf{B}(x,y,z)$ .**

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



**Голландский  
физик  
Г. А. Лоренц**

# Получим формулу для расчета силы Лоренца

*Электрический ток это совокупность большого  
числа  $n$  движущихся со скоростью  $v$   
зарядов.*

Найдем силу, действующую на один заряд со  
стороны магнитного поля.

По закону Ампера сила, действующая на проводник  
с током в магнитном поле (2.5.1)

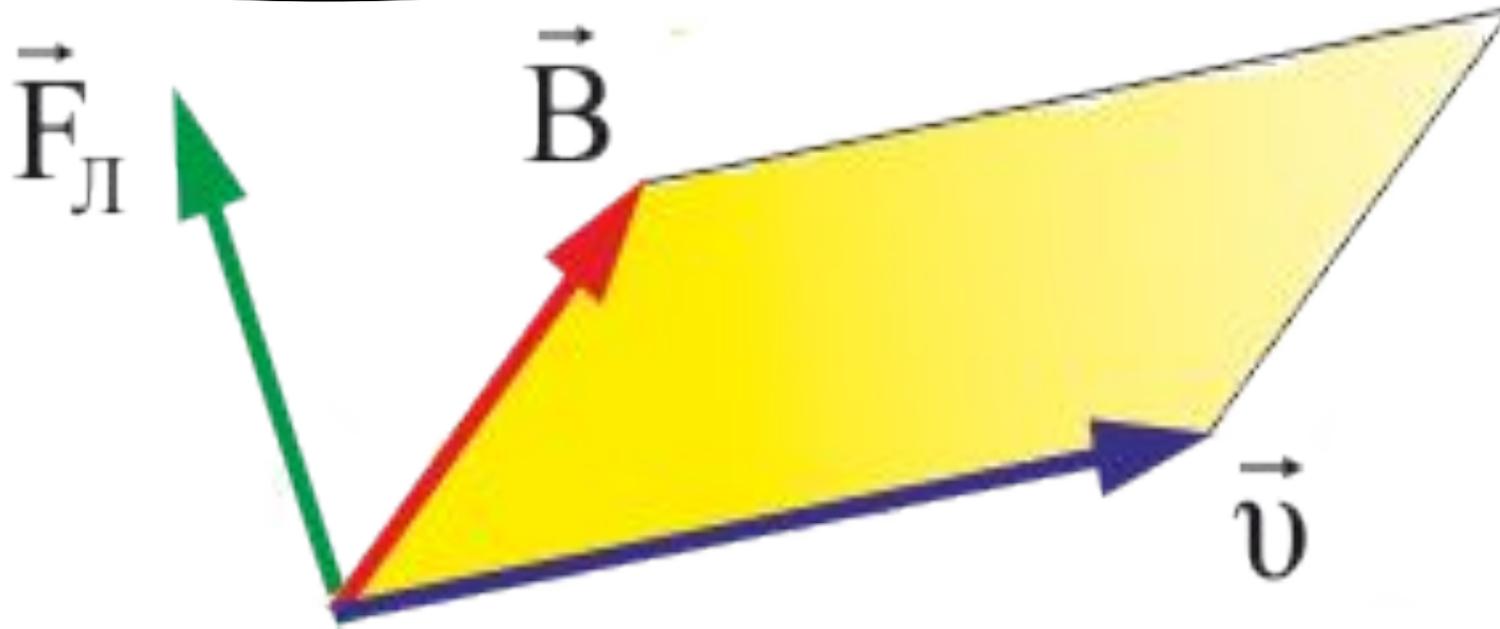
но ток  $I = jS$ , причем  $j = qnv$ , тогда

$$d\mathbf{F} = qnvS [d\mathbf{l}, \mathbf{B}] = qnSdl [\mathbf{v}, \mathbf{B}],$$

- Т.к.  $nSdl$  – число зарядов в объёме  $Sdl$ , тогда для одного заряда

$$\frac{d\vec{F}}{nSdl} = q[\vec{v}, \vec{B}],$$

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$





**ЛОРЕНЦ Хендрик Антон (1853 - 1928) – нидерландский физик-теоретик, создатель классической электронной теории, член Нидерландской АН.**

Учился в Лейденском ун-те, В 23г. защитил докторскую диссертацию «К теории отражения и преломления света». В 25 профессор Лейденского ун-та и заведующий кафедрой теоретической физики.

Вывел формулу, связывающую диэлектрическую проницаемость с плотностью диэлектрика, дал выражение для силы, действующей на движущийся заряд в электромагнитном поле (сила Лоренца), объяснил зависимость электропроводности вещества от теплопроводности, развил теорию дисперсии света. Разработал электродинамику движущихся тел. В 1904 вывел формулы, связывающие между собой пространственные координаты и моменты времени одного и того же события в двух различных инерциальных системах отсчета (преобразования Лоренца).

Модуль лоренцевой силы:

$$F_l = qvB \sin \alpha \quad (2.5.3)$$

где  $\alpha$  – угол между  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

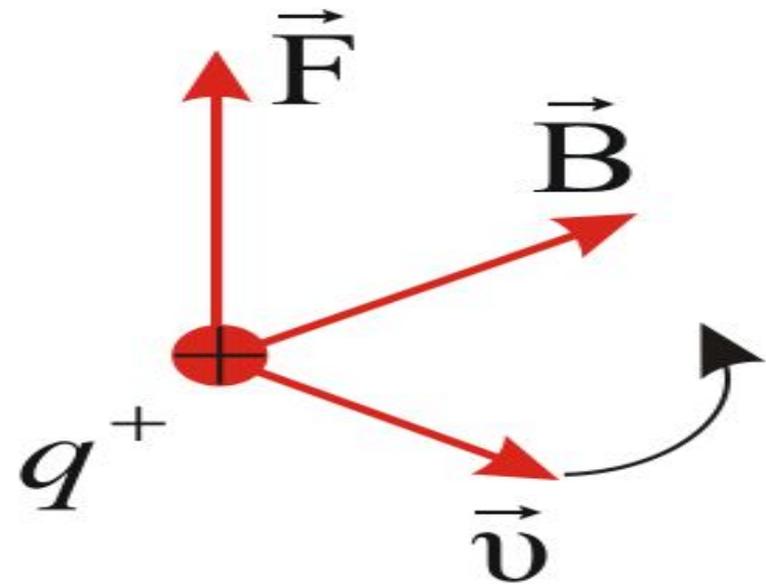
Из (2.5.4) видно, что на заряд, движущийся вдоль линии  $\vec{B}$   $\sin 0 = 0$

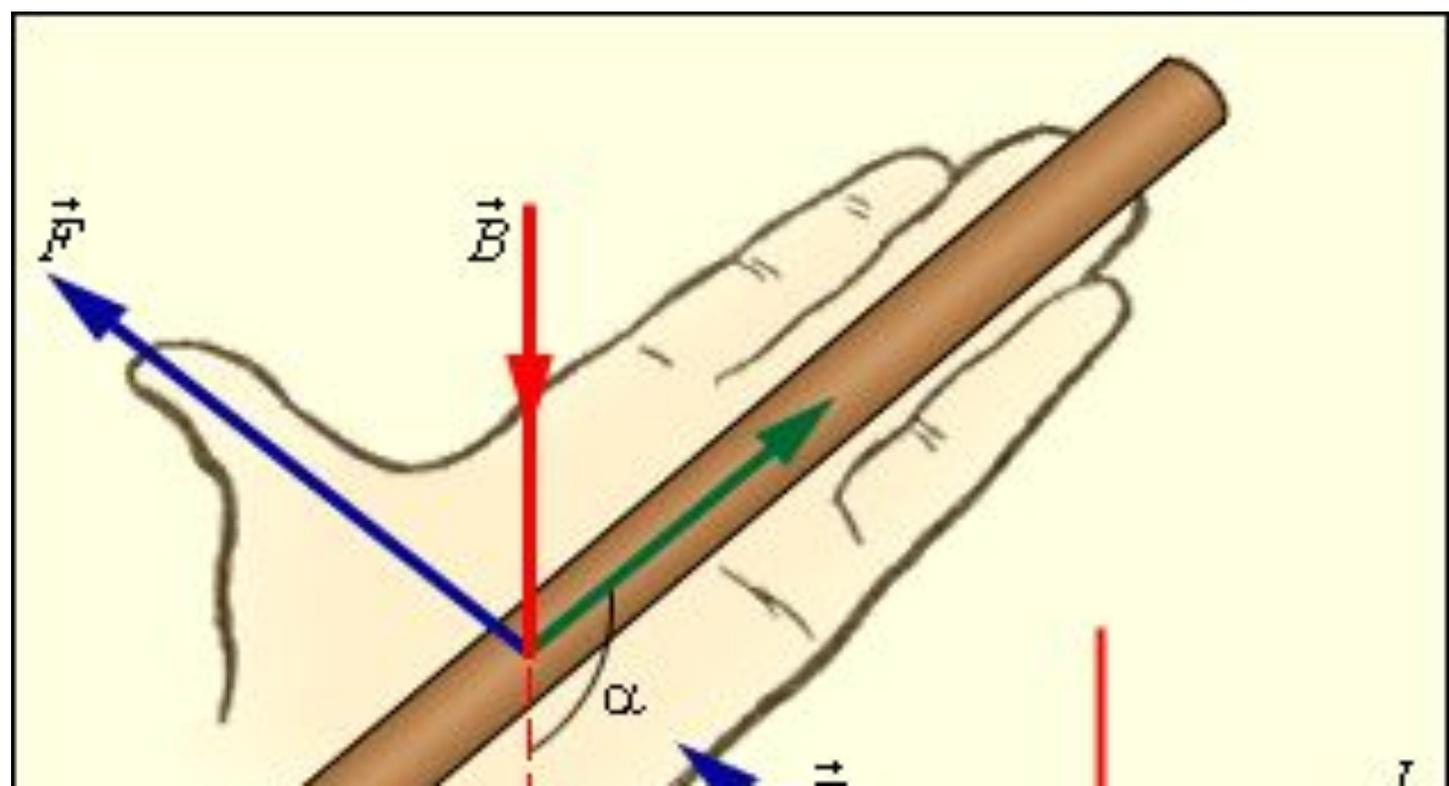
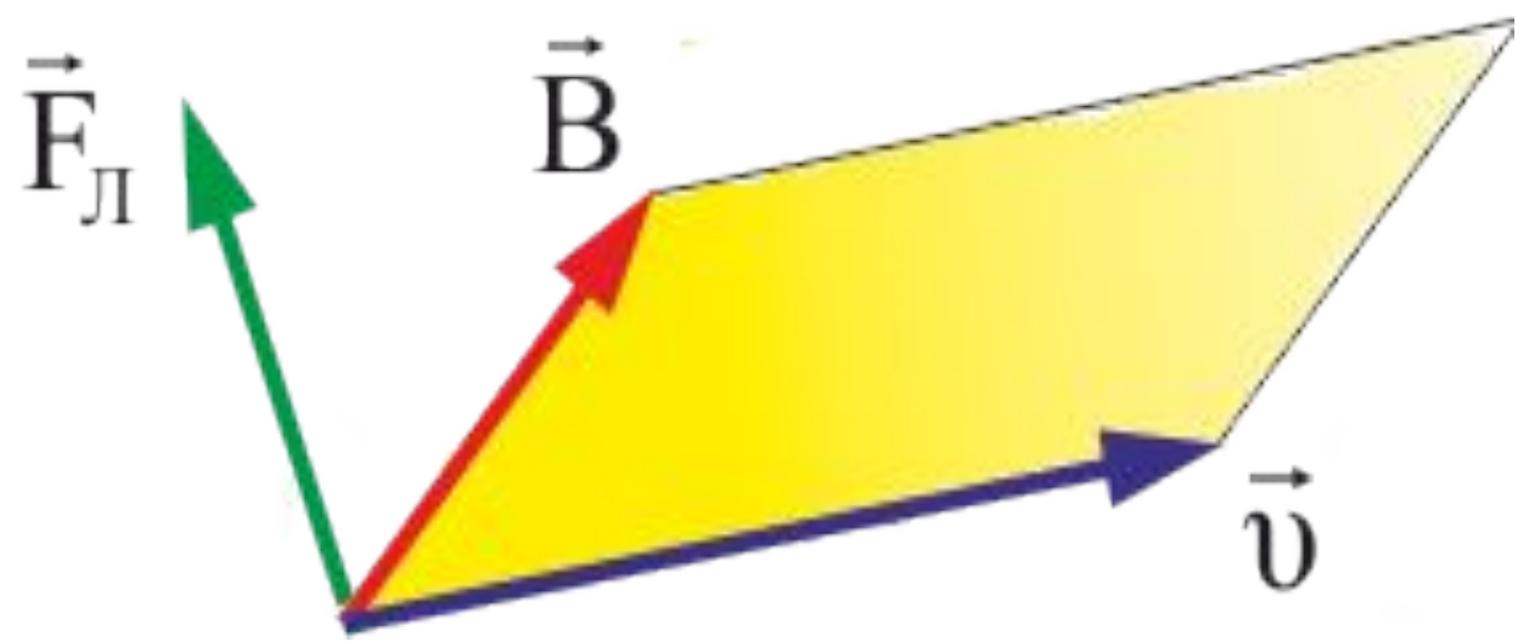
не действует сила ( ).

Направлена сила Лоренца перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . К движущемуся положительному заряду  $q^+$  применяется *правило левой руки* или

«правило буравчика»

$$\vec{F}_l = q[\vec{v}, \vec{B}]$$





- Направление действия силы для отрицательного заряда – противоположно, следовательно, **к электронам применимо правило правой руки.**
- **Так как сила Лоренца направлена перпендикулярно движущемуся заряду, т.е. перпендикулярно , работа этой силы всегда равна нулю.**  
Следовательно, действуя на заряженную частицу, сила Лоренца не может изменить кинетическую энергию частицы.
- **Часто лоренцевой силой называют сумму электрических и магнитных сил:**

$$\mathbf{F}_l = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}] \quad (2.5.4)$$

- здесь электрическая сила  $q\mathbf{E}$  ускоряет частицу, изменяет ее энергию.

**Постоянное магнитное поле изменяет направление движения частицы, но не величину скорости.**

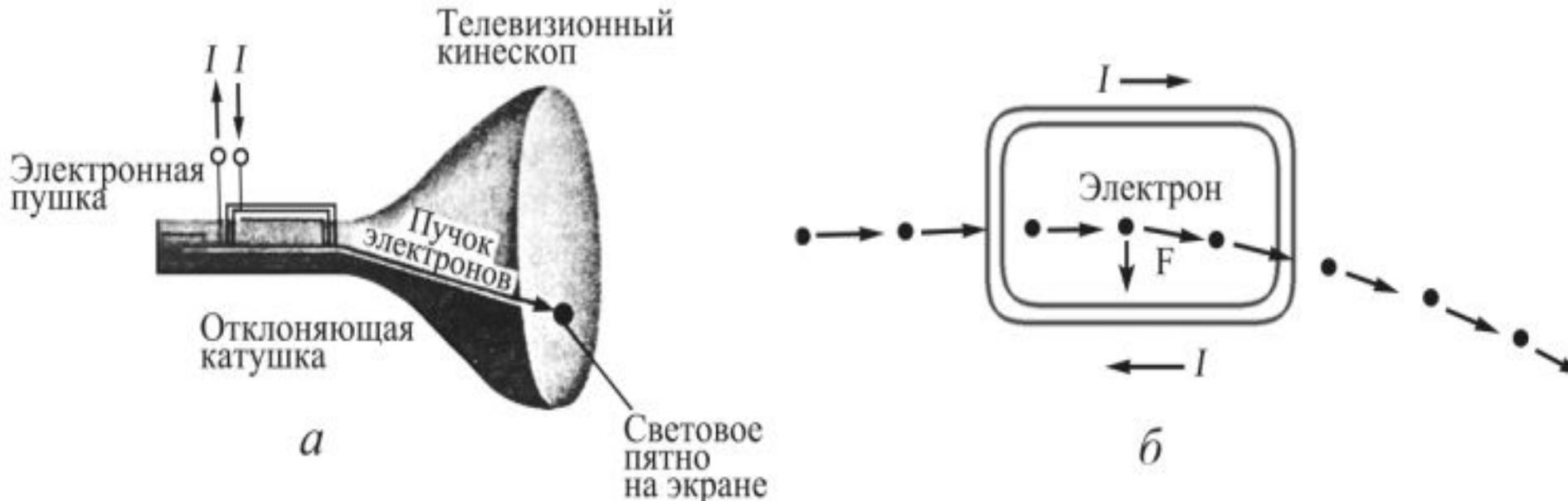
**Магнитная часть силы Лоренца оставляет неизменной энергию заряда, а меняет лишь направление импульса.**

**Формула Лоренца позволяет связать уравнения электромагнитного поля с уравнениями движения заряженных частиц:**

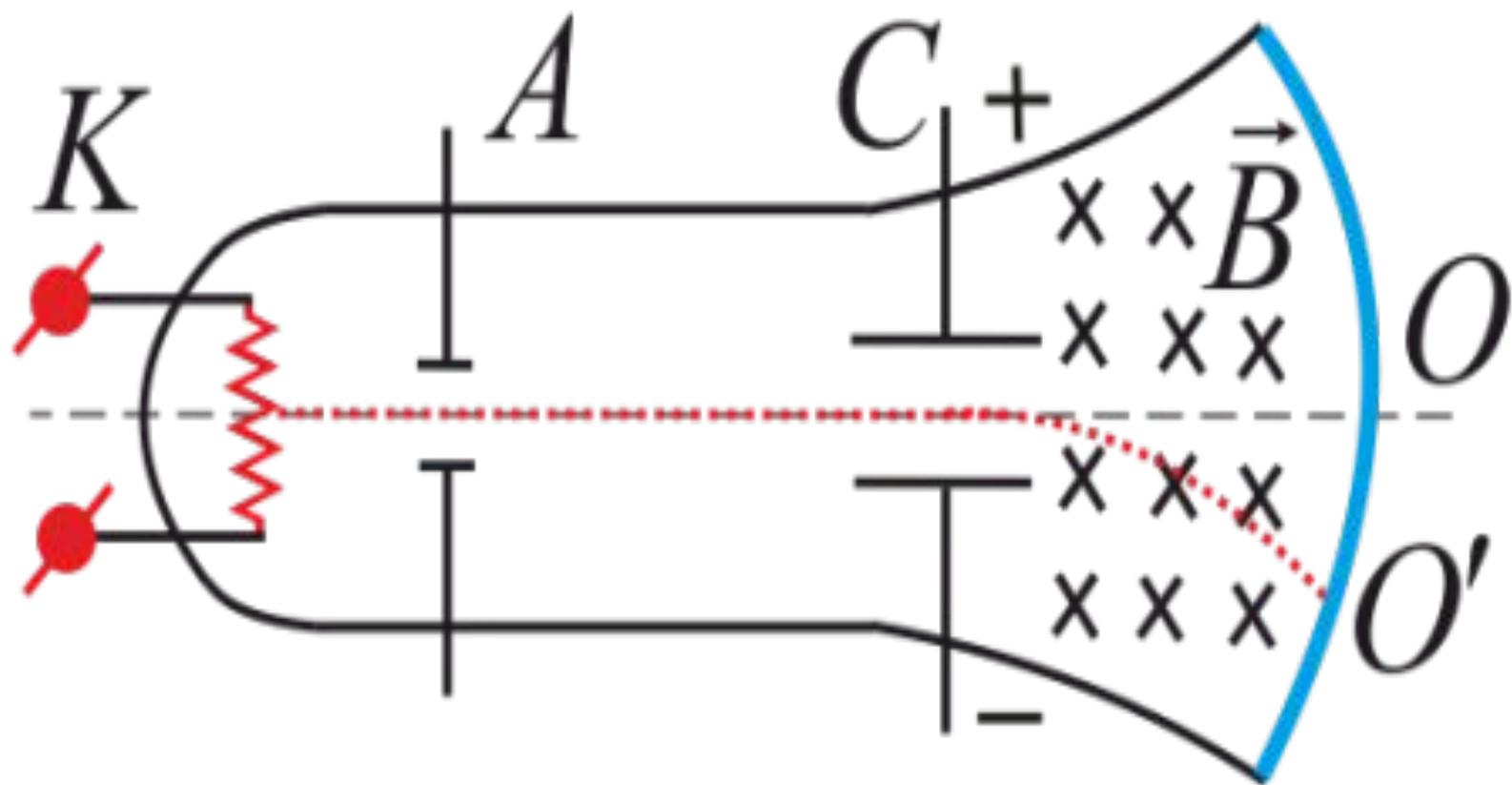
$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = q \mathbf{E} + q [\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

**Действуют оба поля - электрическое  $\mathbf{E}$  и магнитное  $\mathbf{B}$ .**

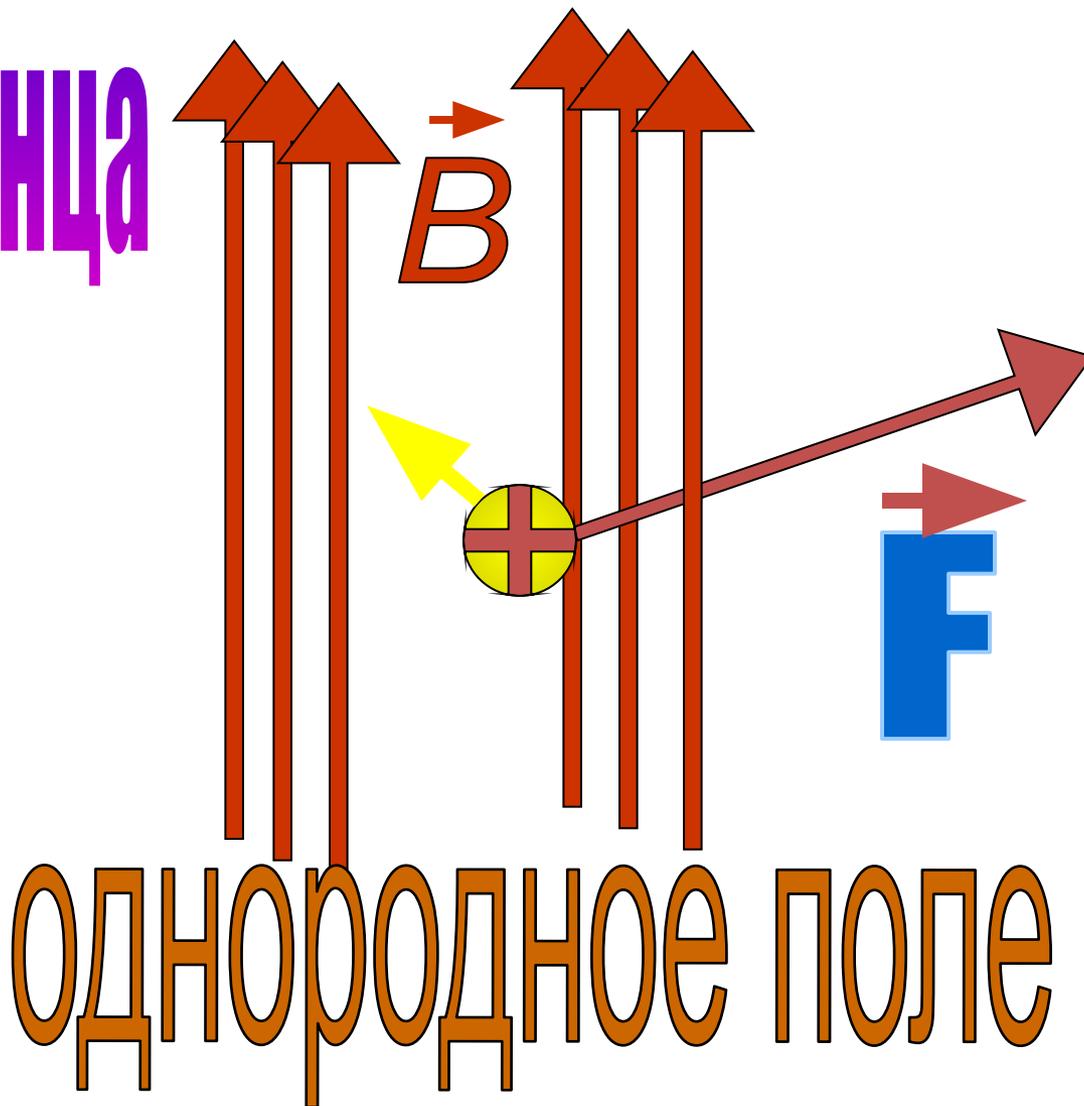
- Повседневное действие магнитной силы на движущийся заряд мы наблюдаем на телевизионном экране (рис. 2.7).



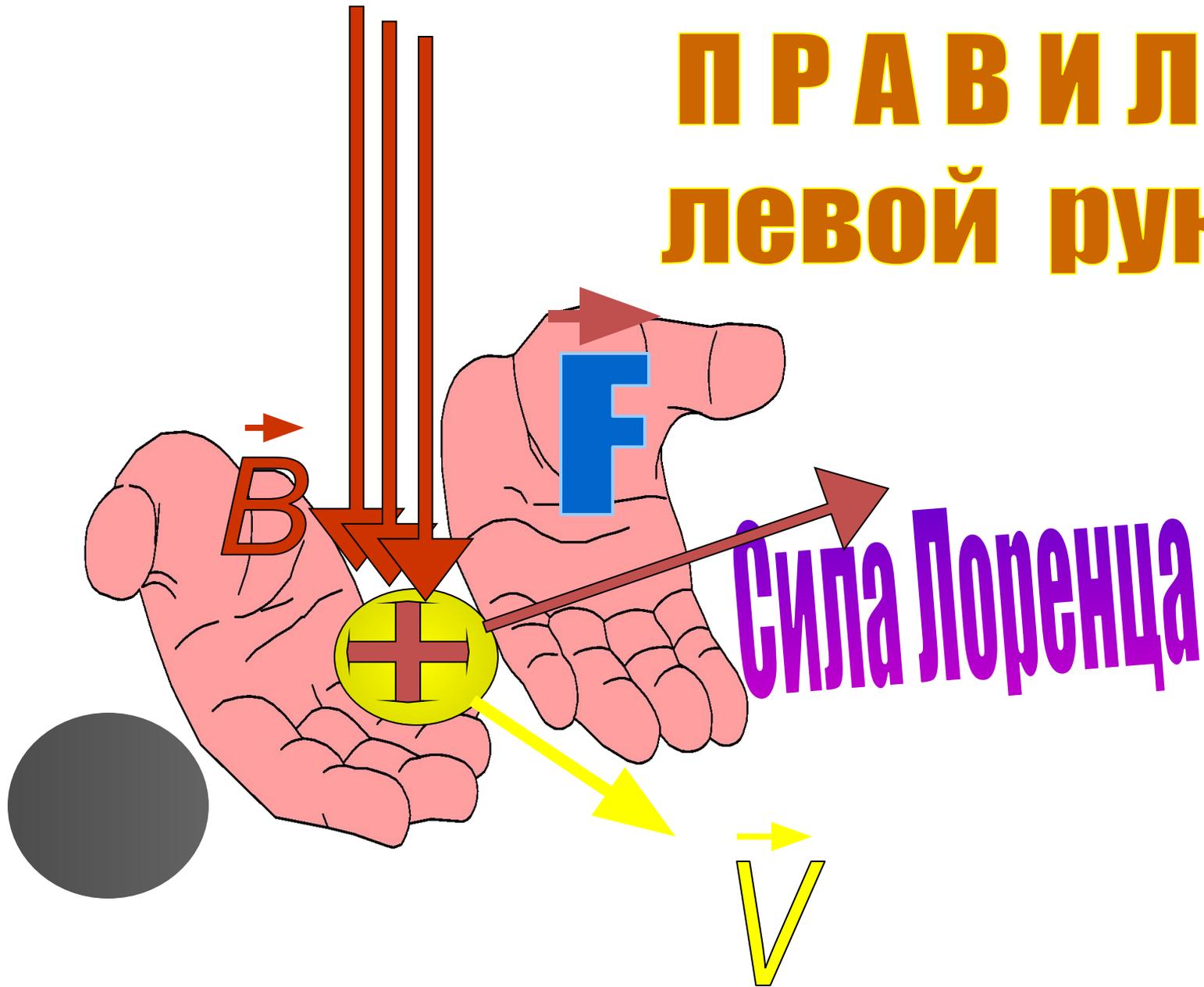
- движение пучка электронов по плоскости экрана стимулируется магнитным полем отклоняющей катушки. Если поднести постоянный магнит к плоскости экрана, то легко заметить его воздействие на электронный пучок по возникающим в изображении искажениям.



# Сила Лоренца



# ПРАВИЛО левой руки



# Сила Лоренца:

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha$$

# Особенность силы Лоренца:

$$A = F_{\text{Л}} \cdot dr \cdot \cos \alpha = 0,$$

$$\cos \alpha = \cos 90^\circ = 0$$

**Движение заряженной частицы  
в наложенных электрическом  
и магнитном полях**

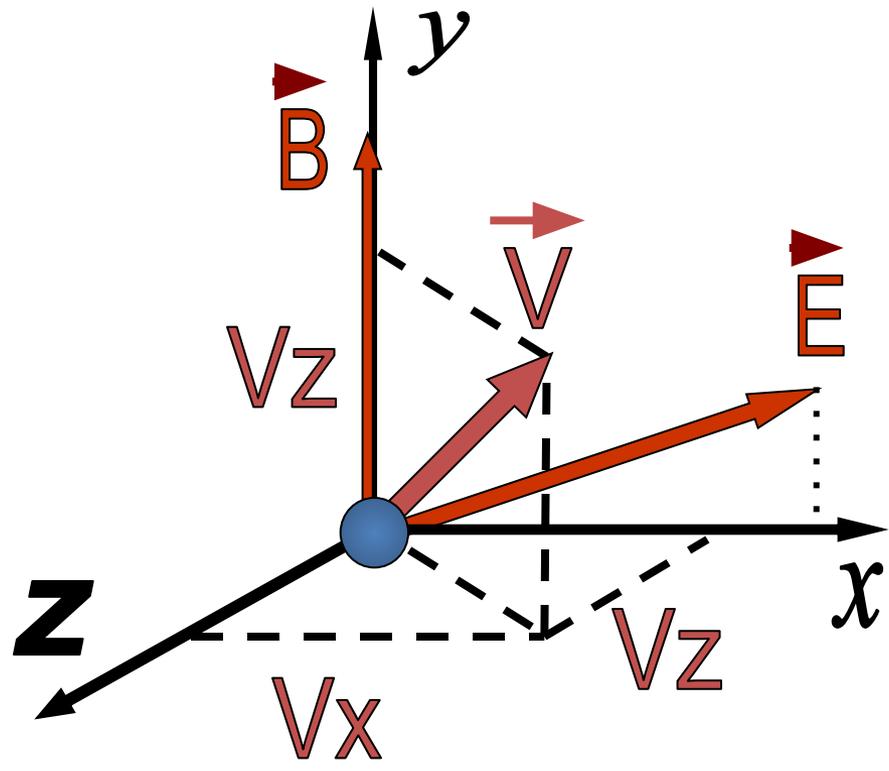
Используем  
законы:

$$\vec{F} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

$$\vec{F} = \vec{F}_K + \vec{F}_L$$

$$\vec{F}_L = q [\vec{V} \vec{B}]$$

$$\vec{F}_K = q \vec{E}$$



# Основные выводы

## Сила Лоренца:

Полная сила, действующая на заряд в электромагнитном поле, равна

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_m = q\mathbf{E} + q[\mathbf{u}, \mathbf{B}].$$

*Магнитная составляющая силы Лоренца перпендикулярна вектору скорости, элементарная работа этой силы равна нулю.*

- Сила  $F_t$  меняет направление движения, но не величину скорости.
- Индукция магнитного поля  $B$  измеряется в СИ в теслах (Тл).
- На элемент  $d\mathbf{l}$  проводника с током  $I$  в магнитном поле индукцией  $B$  действует сила, определяемая законом Ампера:

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

- В пространстве вокруг проводника с током возникает вихревое магнитное поле.
- Индукция магнитного поля  $d\mathbf{B}$  элементарного отрезка  $d\mathbf{l}$  с током  $I$  на расстоянии  $\mathbf{r}$  от него определяется законом Био – Савара – Лапласа :

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{r^3} \quad \text{или по модулю} \quad dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2}$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м =  $1,25663706144 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная, определяемая выбором системы единиц.

- Для вектора индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$  справедлив принцип суперпозиции:

– магнитная индукция результирующего поля равна геометрической сумме магнитных индукций  $\mathbf{B}_i$  складываемых полей

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i$$

или в случае непрерывного проводника

$$\mathbf{B} = \int_{(L)} d\mathbf{B}$$

- Магнитная индукция в центре кругового витка с током радиусом  $R$ :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

- Магнитная индукция от бесконечно длинного проводника с током на расстоянии  $R$ :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$