

Лекция № 15

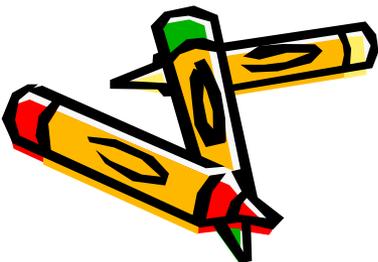


Силы в магнитном поле. Магнитные свойства вещества

А. А. Детлаф, Б. М. Яворский,
21.1 – 21.3; 24.1 – 24.5

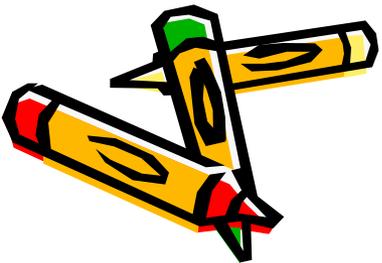
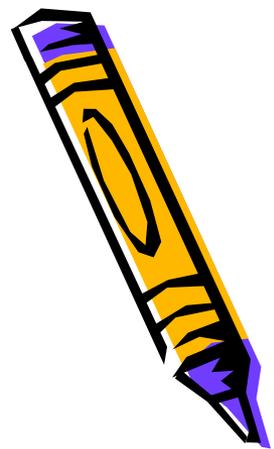
Н.П.Калашников,
Н.М. Кожевников.

Интернет-тестирование
базовых знаний, 3 ДЕ



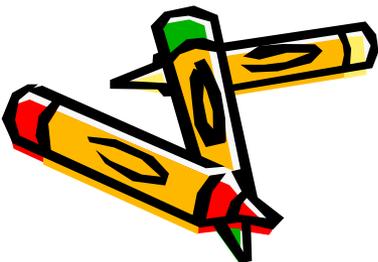
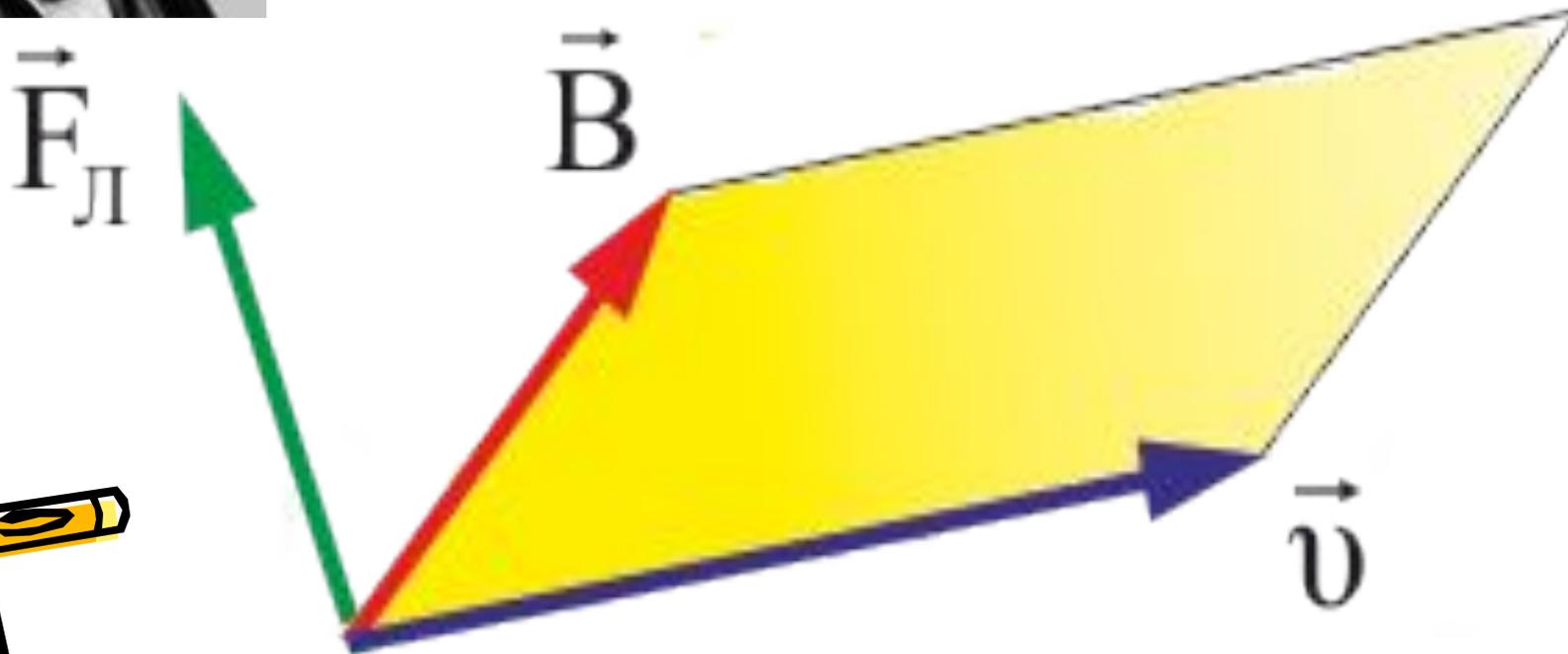
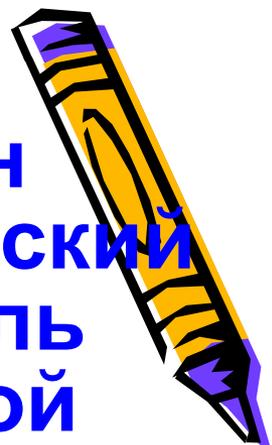
СИЛЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ:

сила Лоренца;
сила Ампера.





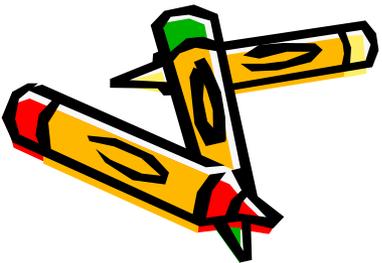
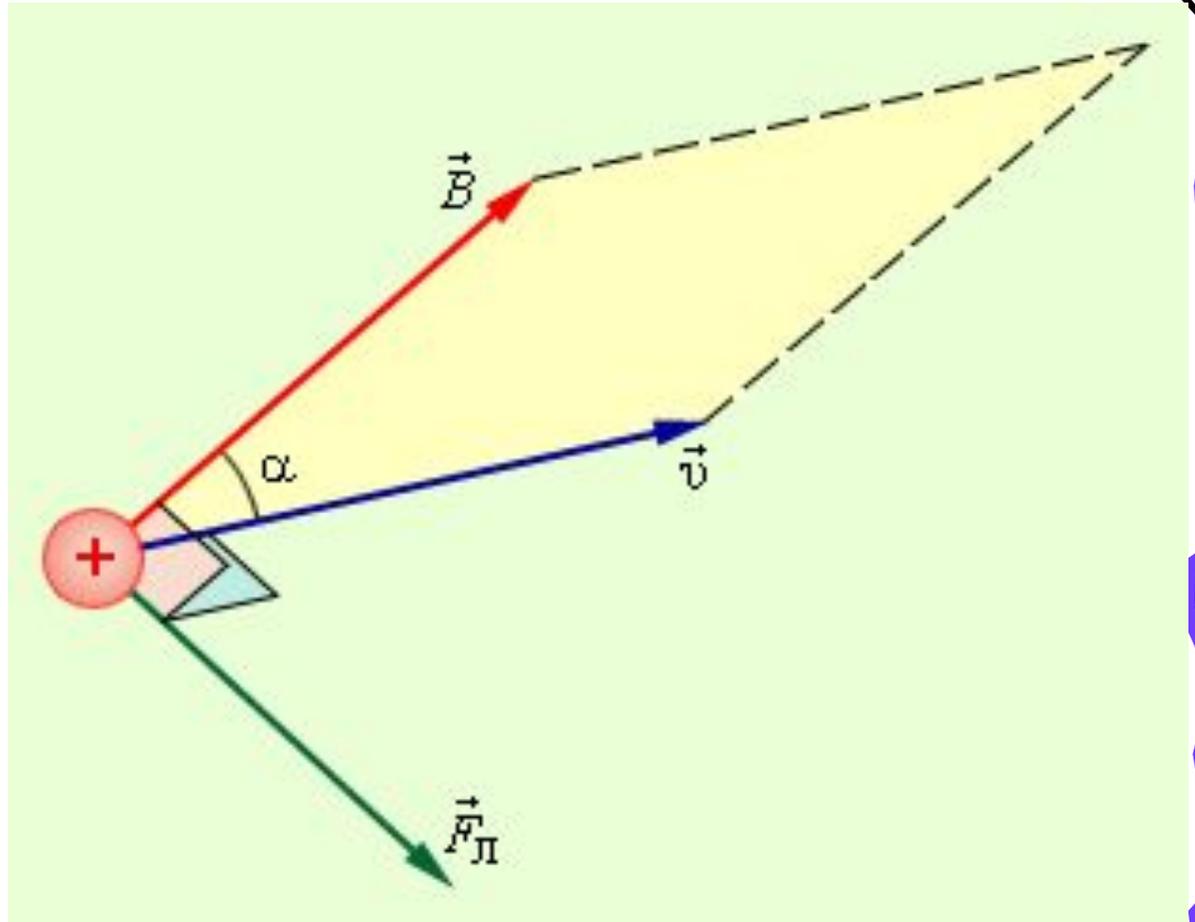
ЛОРЕНЦ Хендрик Антон
(1853 - 1928) – нидерландский
физик-теоретик, создатель
классической электронной
теории, член Нидерландской
АН.



Сила Лоренца

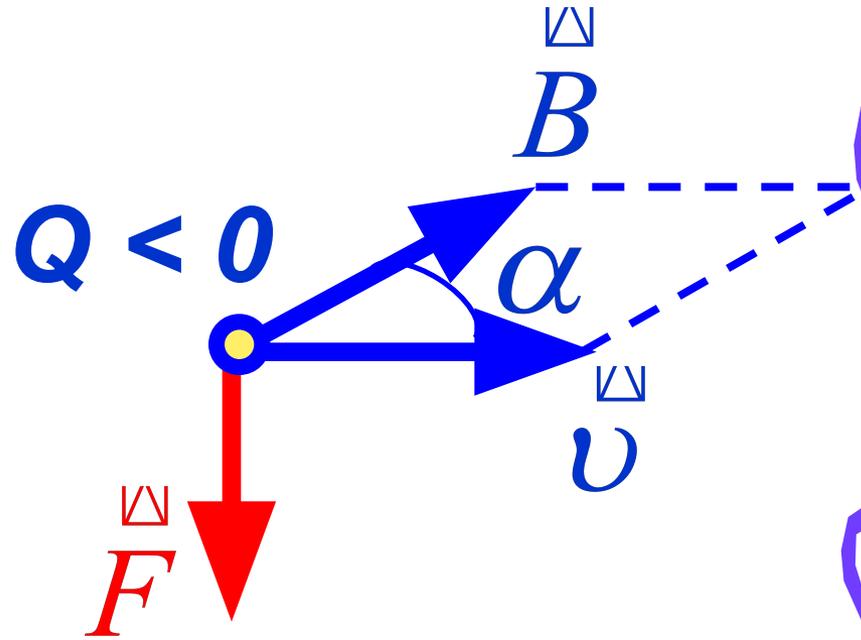
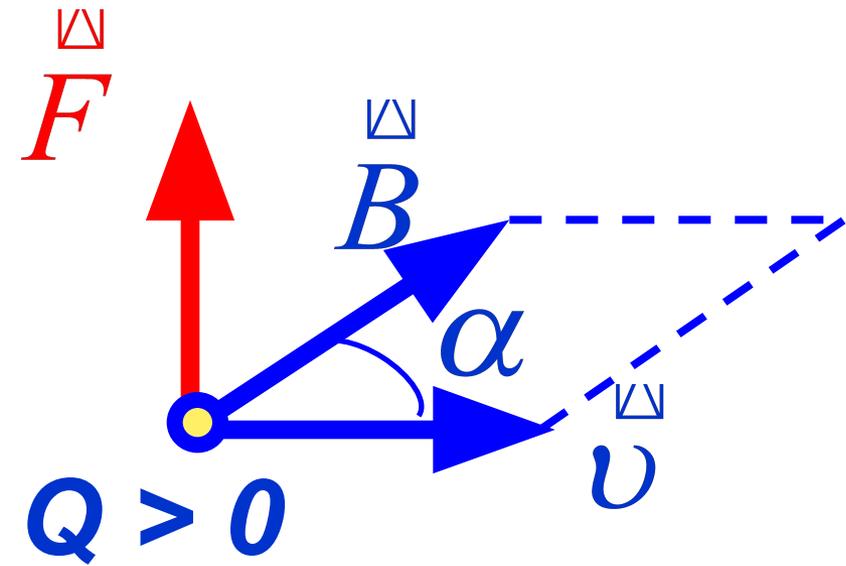
Действует на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле

$$\vec{F} = Q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

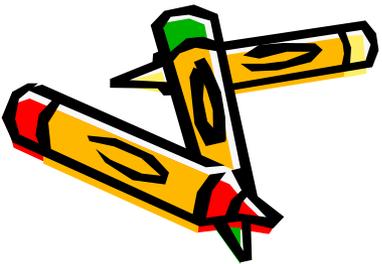




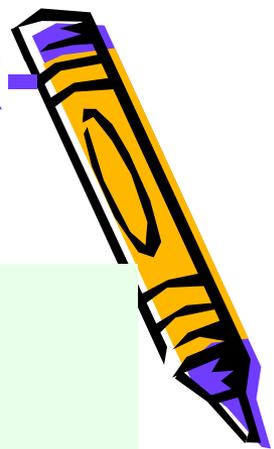
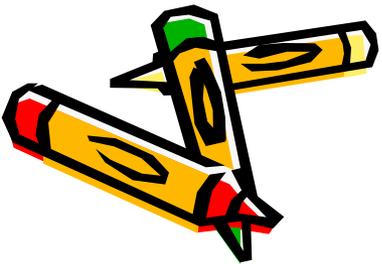
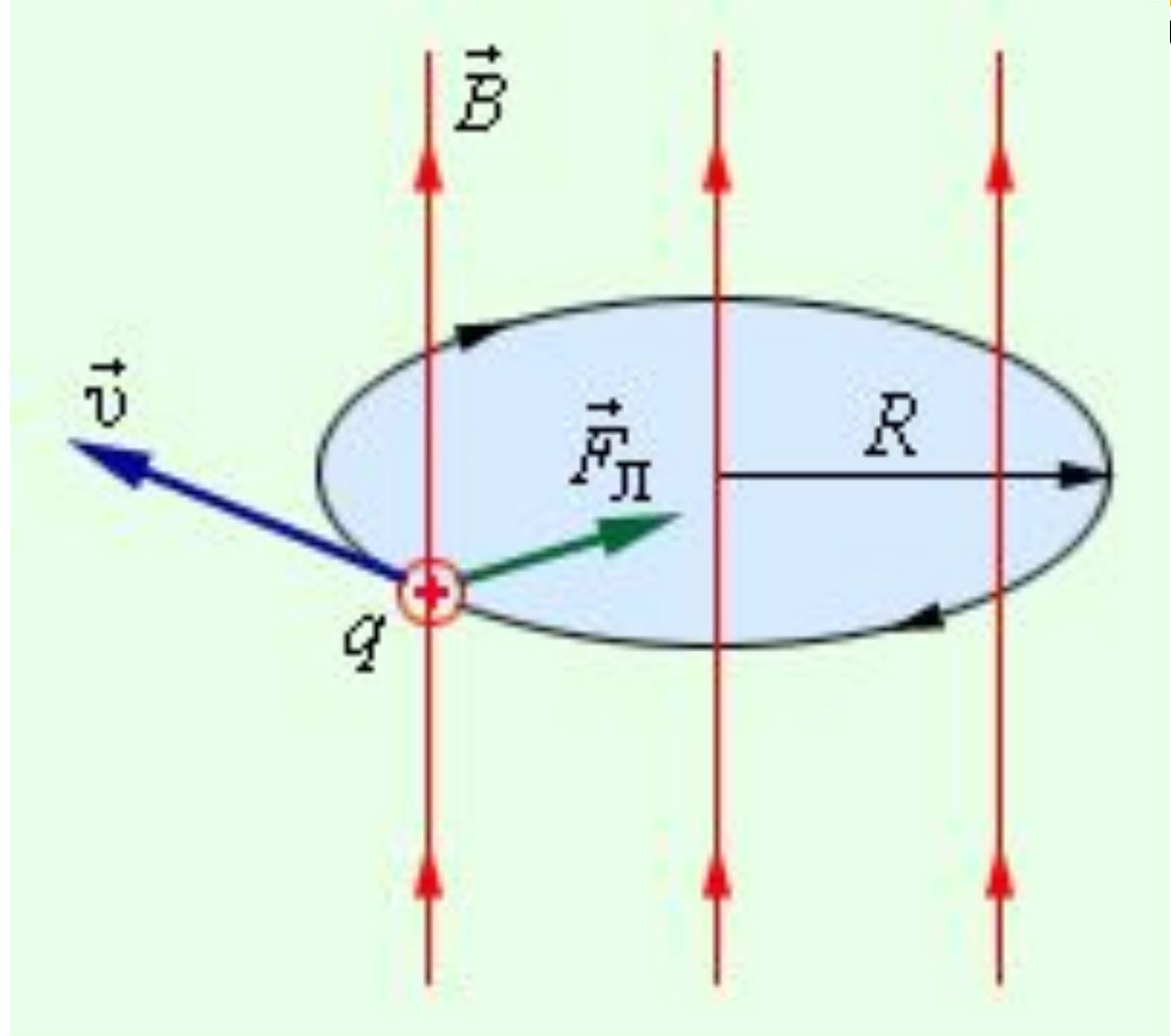
Если $\vec{v} \perp \vec{B}$, то направление силы Лоренца определяют по правилу левой руки.



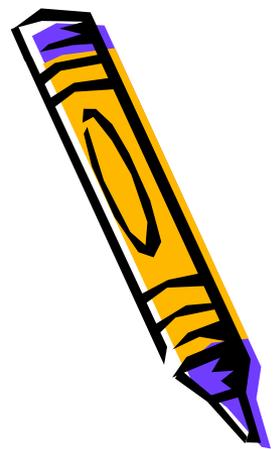
$$F = QvB \sin \alpha$$



Сила Лоренца изменяет траекторию движения заряженной частицы

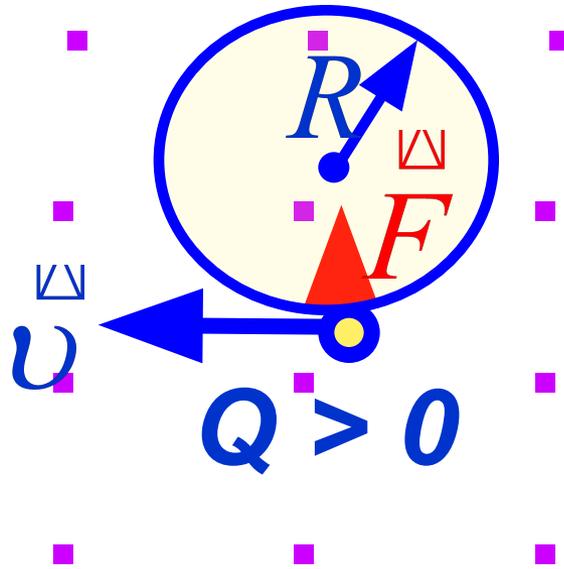


К расчету параметров движущейся частицы:



$$v = \text{const}$$

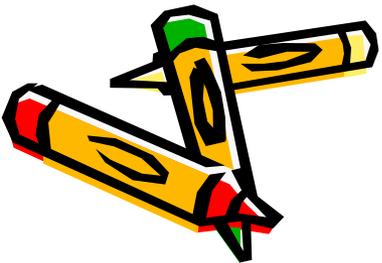
$$mg \ll F$$



$$QvB = \frac{mv^2}{R};$$

$$R = \frac{mv}{QB};$$

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{QB}; \quad v = \frac{QB}{2\pi m}.$$



Заряженная частица влетает в магнитное поле под углом

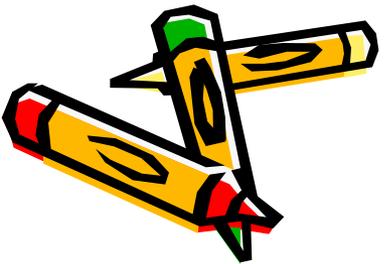
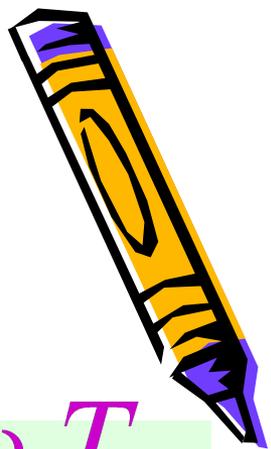
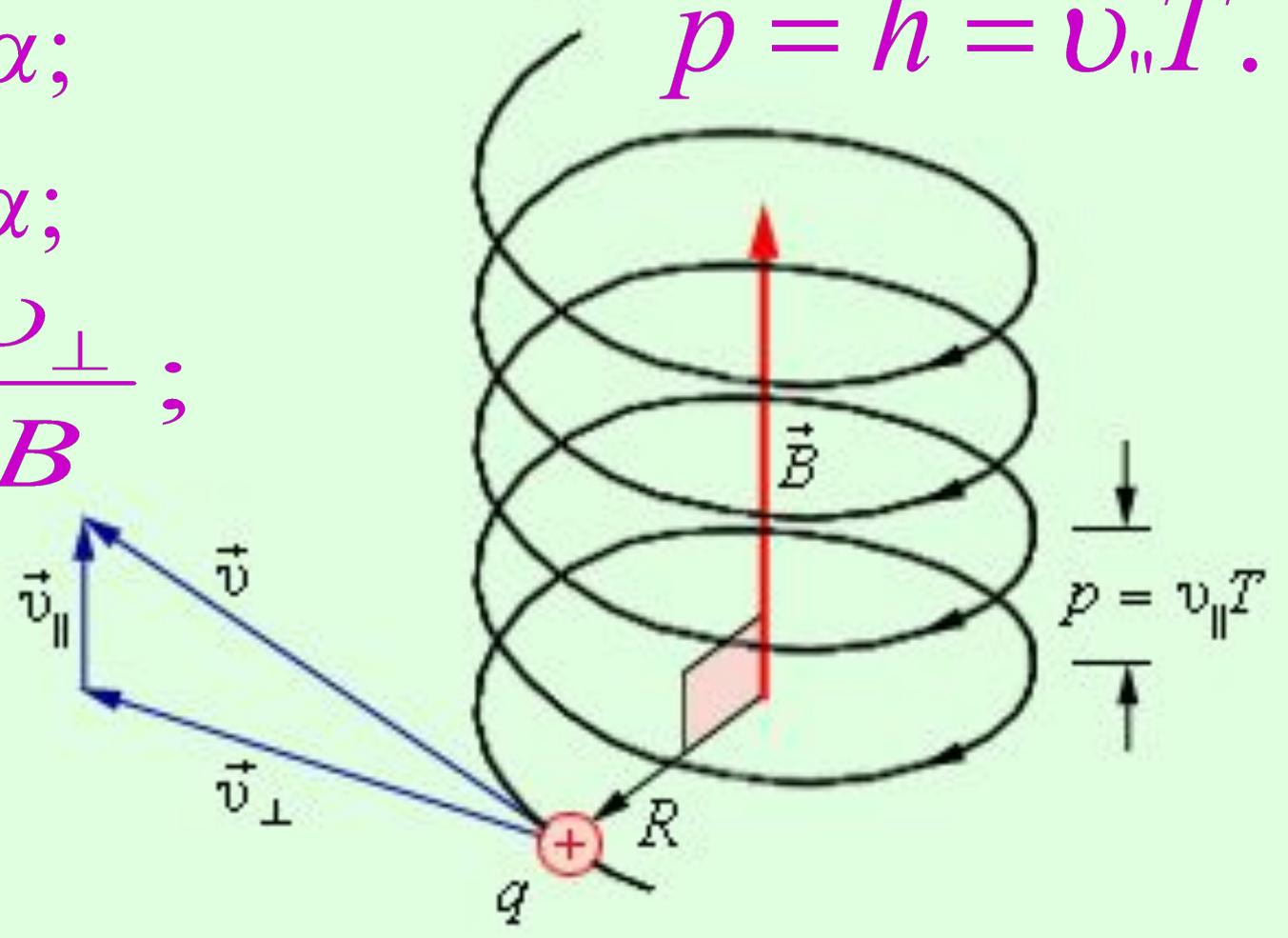
$$0 < \alpha < \pi / 2:$$

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

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

$$R = \frac{mv_{\perp}}{QB};$$

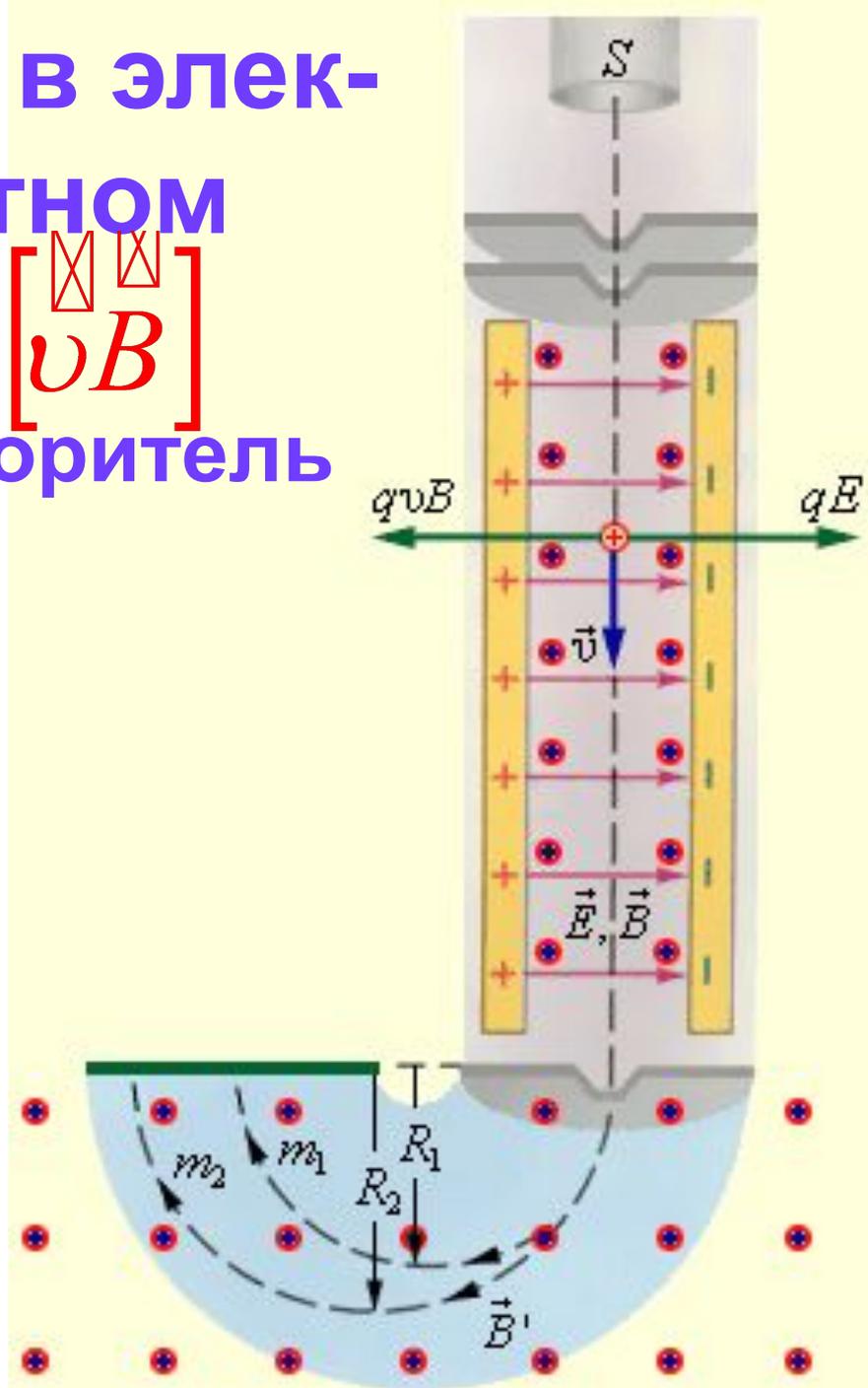
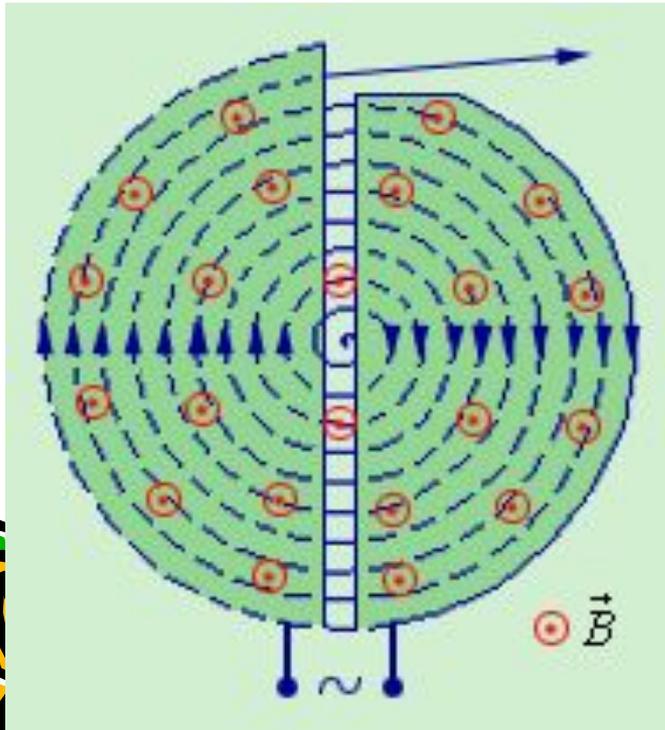
$$p = h = v_{\parallel} T.$$



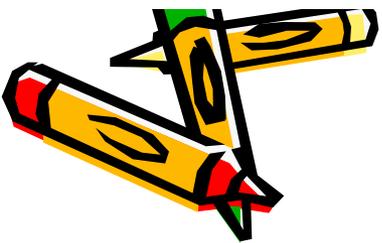
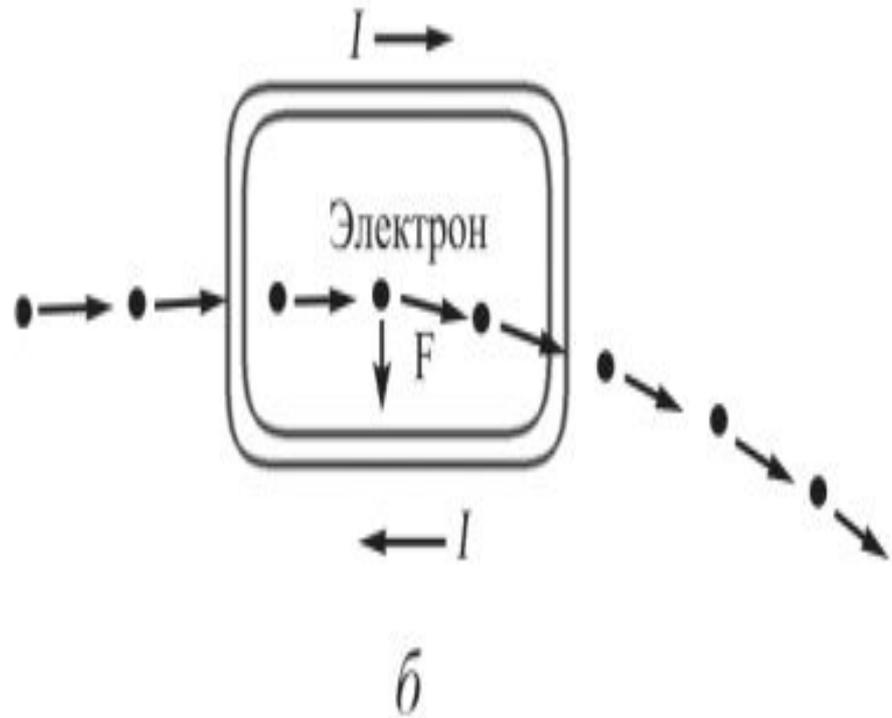
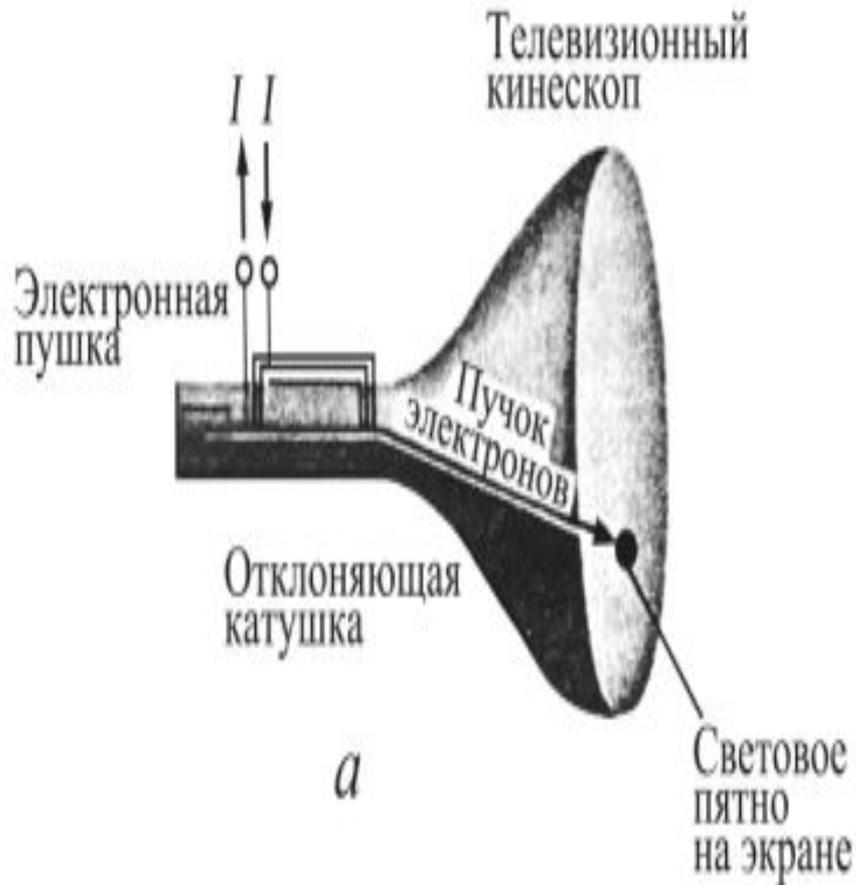
Частицы движутся в электрическом и магнитном полях:

$$F = QE + Q[vB]$$

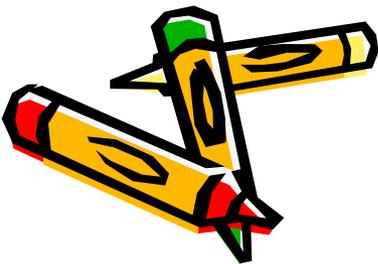
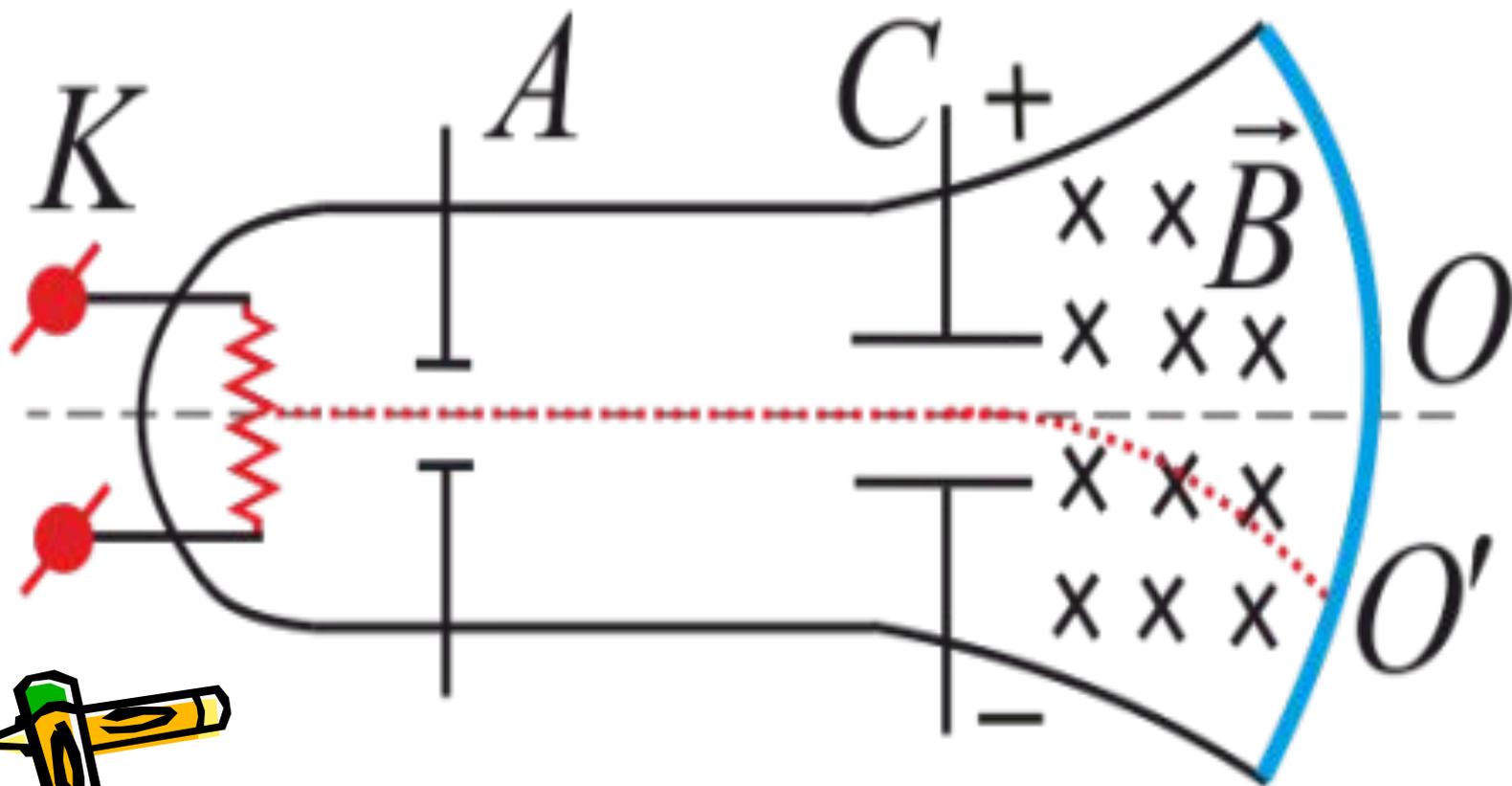
(масс-спектрометр, ускоритель заряженных частиц).



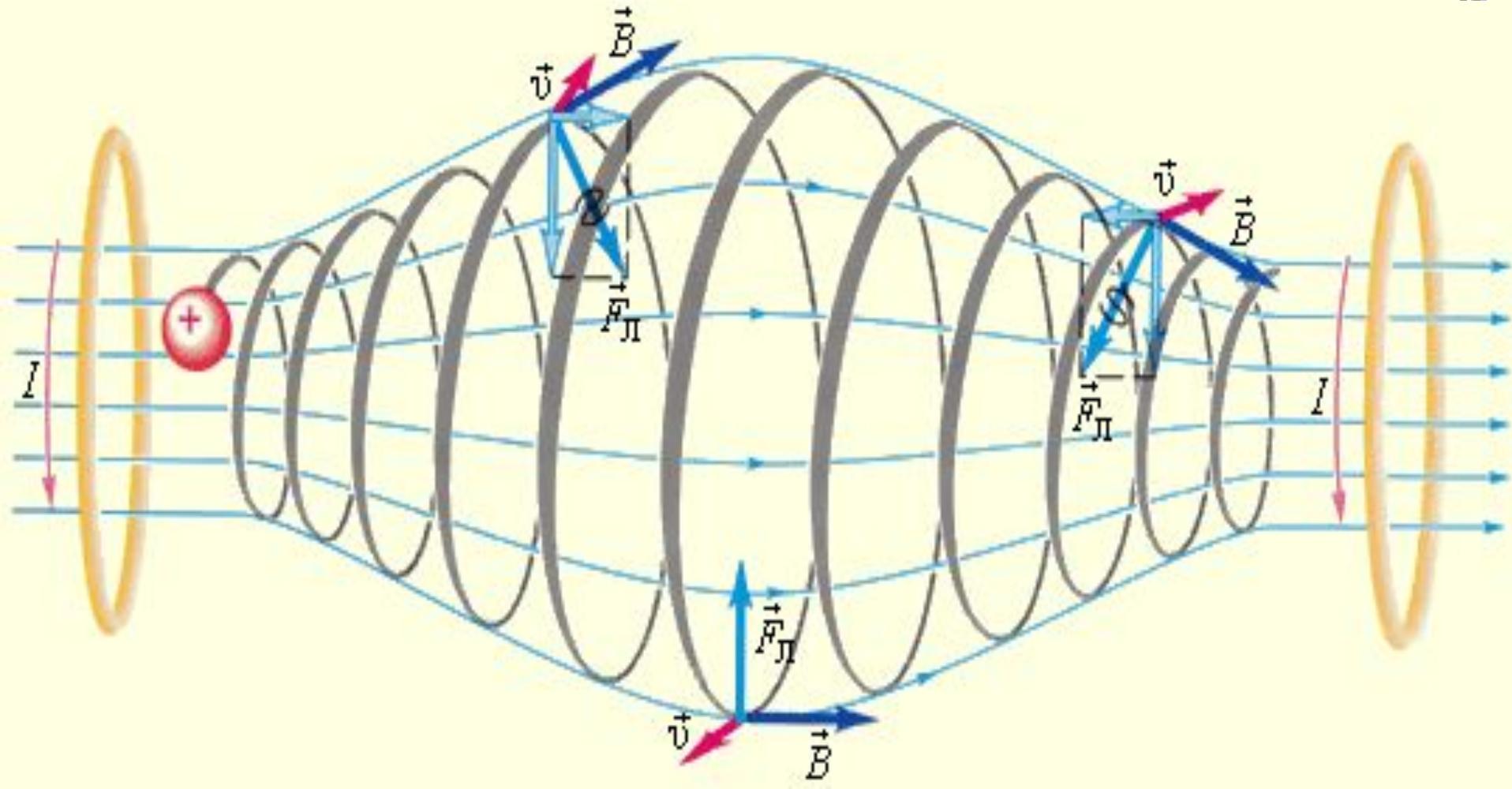
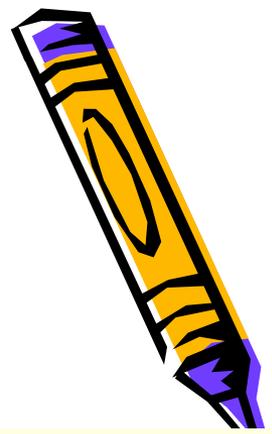
Использование силы Лоренца в электронно-лучевой трубке



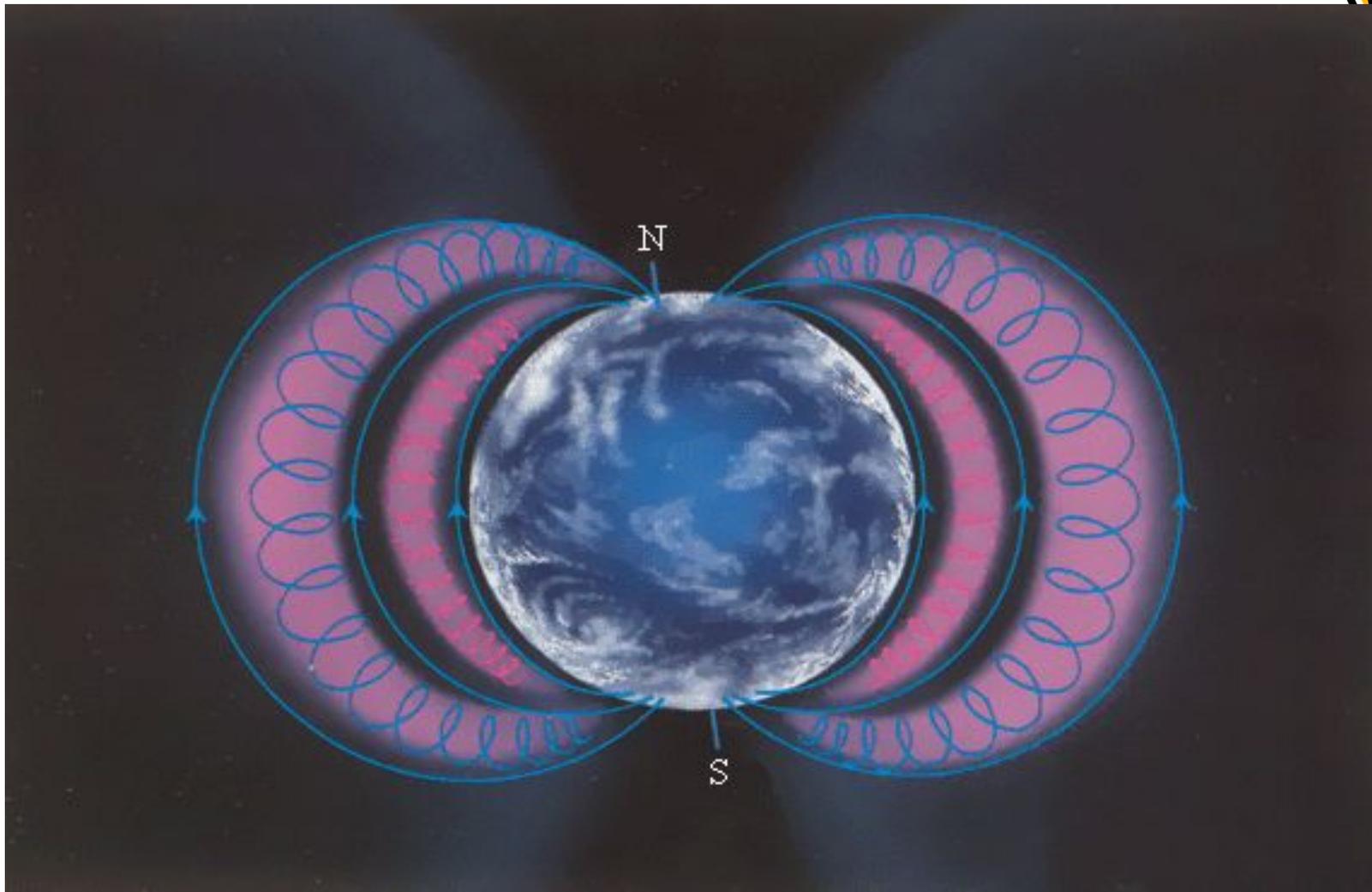
Движение электронов в электрическом и магнитном поле



Магнитная термоизоляция высокотемпературной плазмы ($10^6 K$)



Радиационные пояса Земли



Заряженные частицы в магнитных ловушках радиационных поясов

Сила Ампера

действует на проводник с током в магнитном поле.

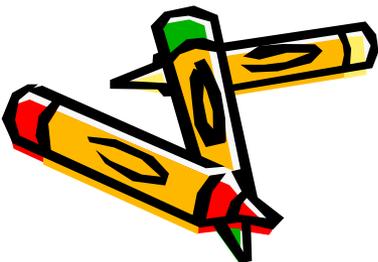


На элемент $d\vec{l}$ длины проводника с током I в магнитном поле индукцией \vec{B} действует сила

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

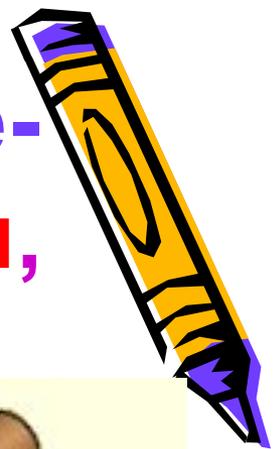
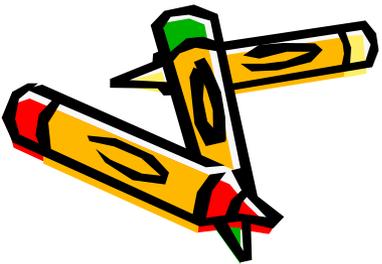
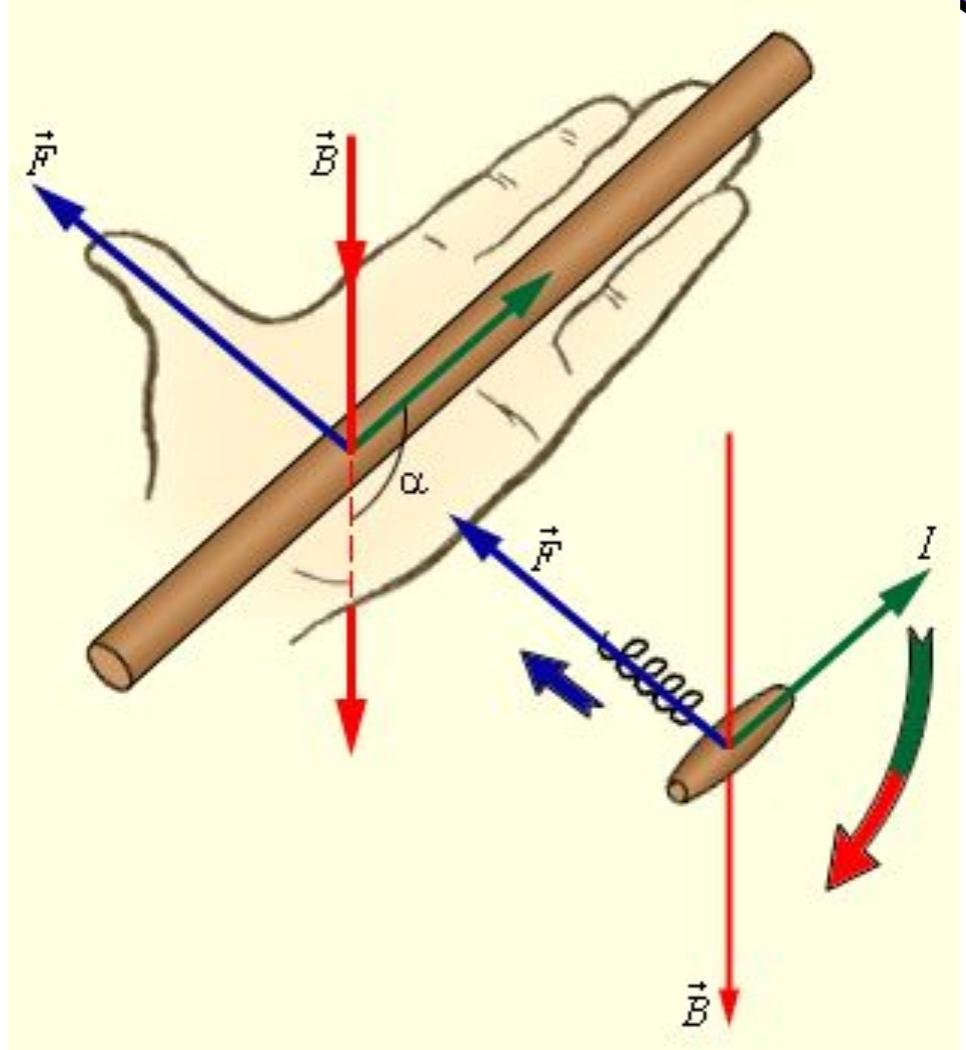
модуль которой $dF = IdlB \sin \alpha$,

где $\alpha = (\vec{d\vec{l}} \vec{B})$.



Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки, если $\alpha = \pi / 2$.

$$\vec{F} = \int (\vec{I} d\vec{l} \times \vec{B}) ;$$

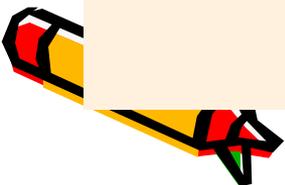
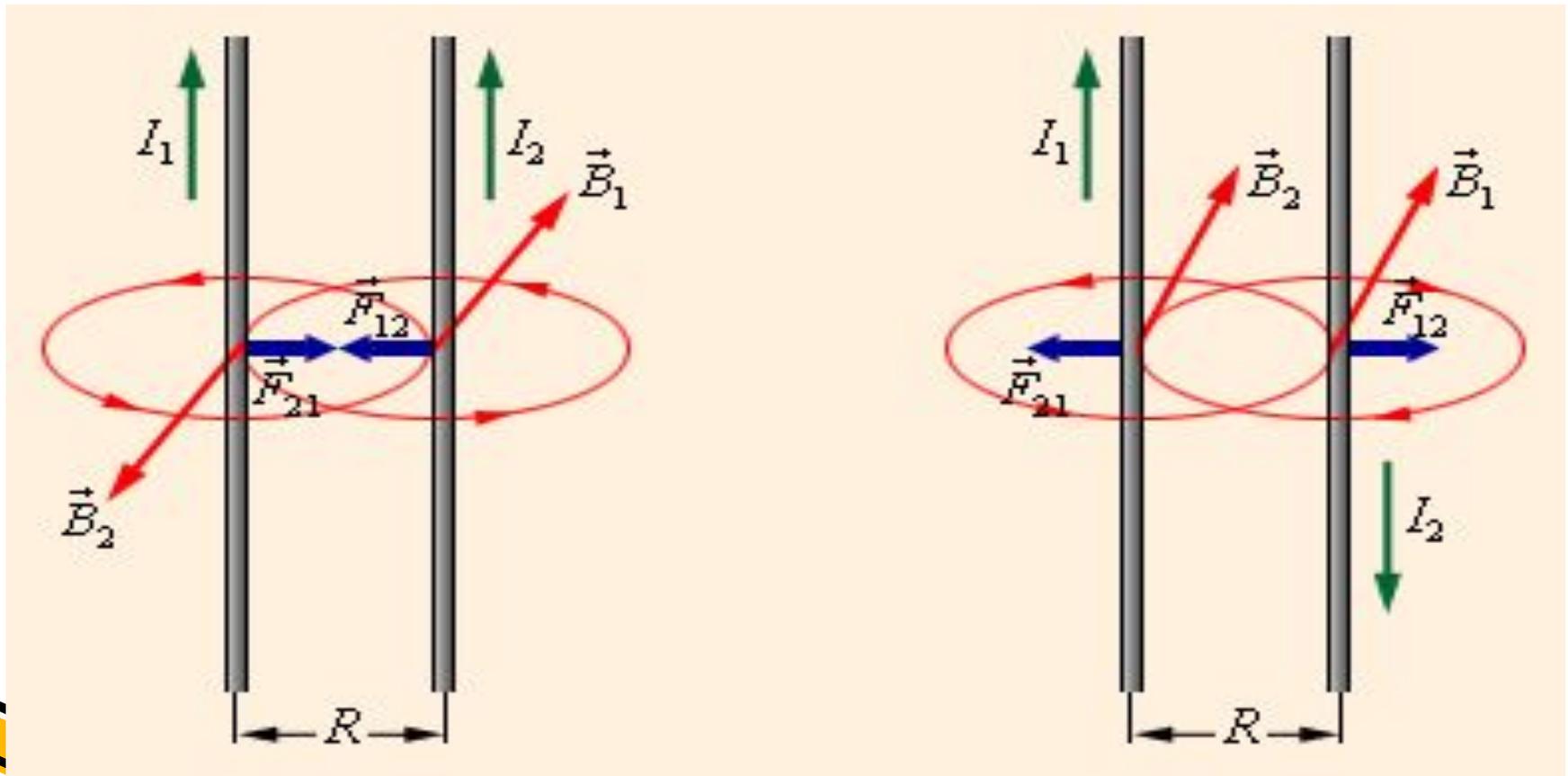


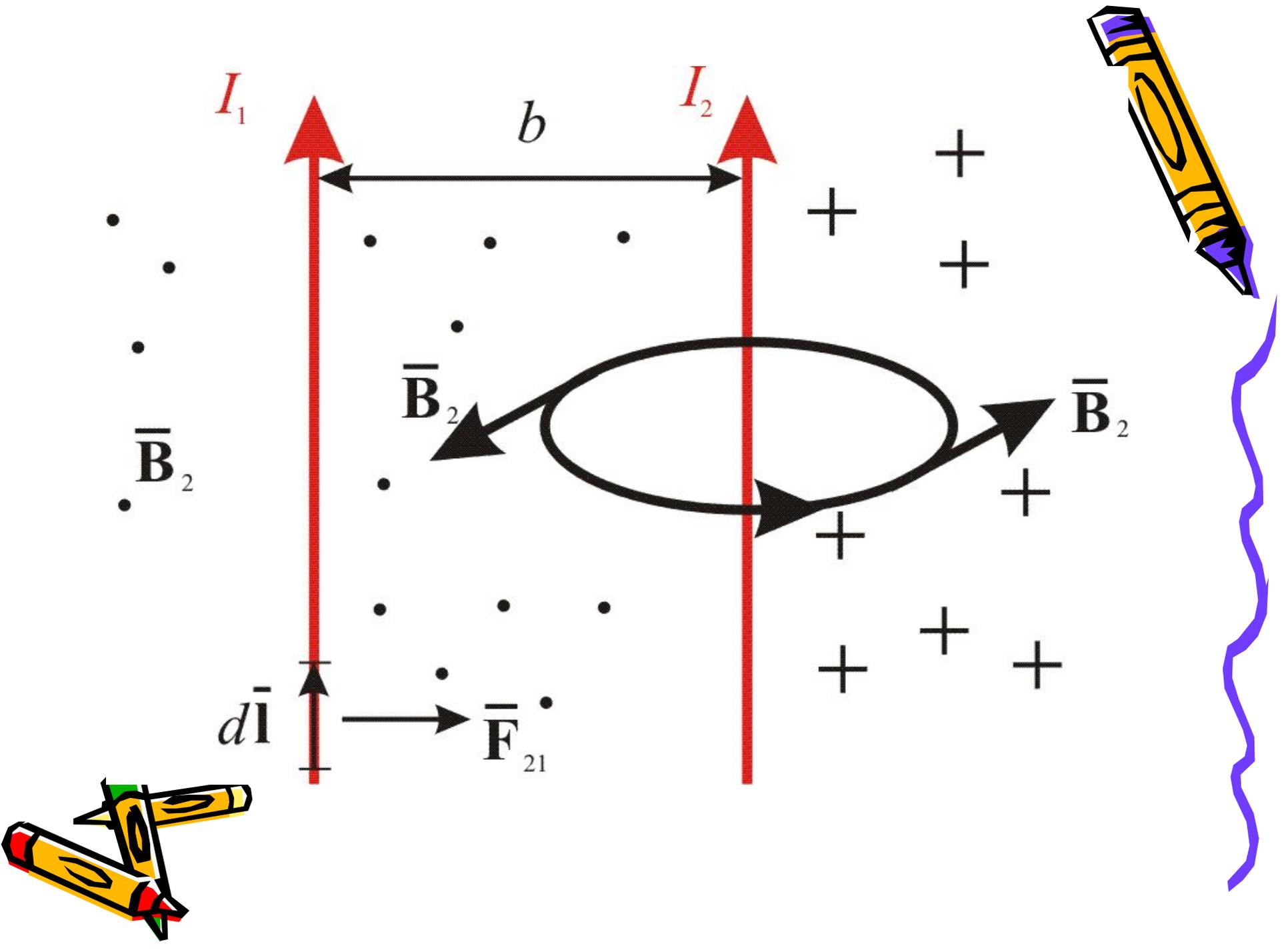


ПРАВИЛО левой руки



Магнитное взаимодействие параллельных токов





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

индукция МП, созданного
током I_1 в месте нахождения
проводника с током I_2 ,

$$F_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l_2$$

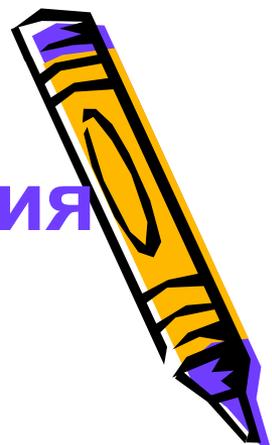
— сила, действующая на провод-
ник с током I_2 ,

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

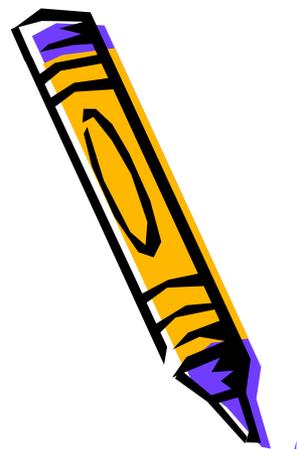
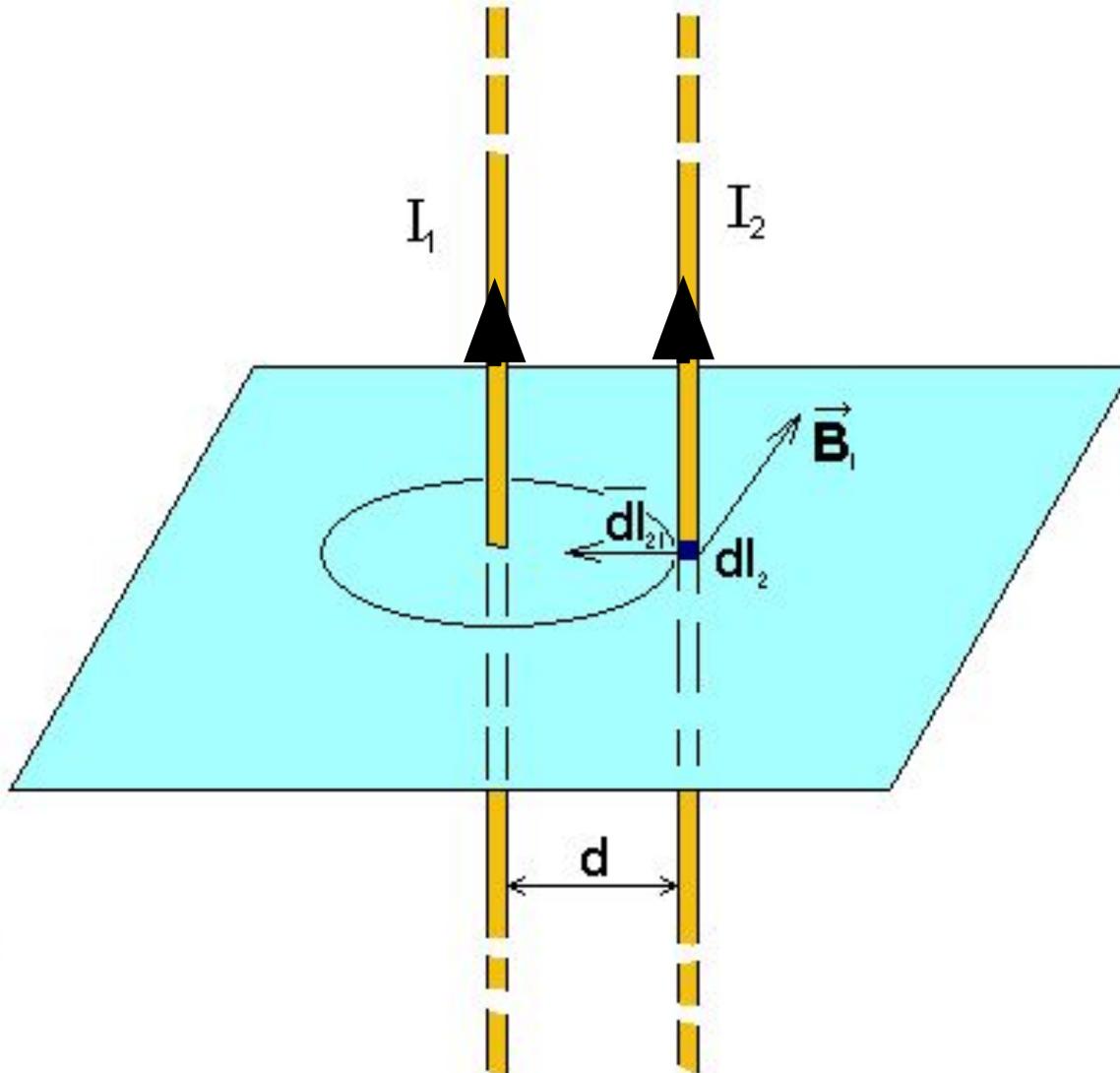
индукция МП, созданного
током I_2 в месте нахождения
проводника с током I_1 ,

$$F_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l_1$$

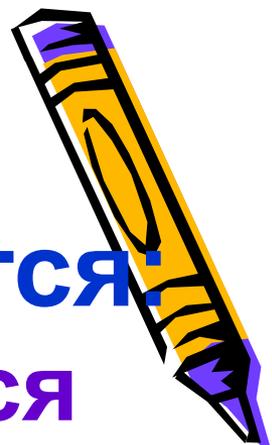
— сила, действующая на провод-
ник с током I_1 .



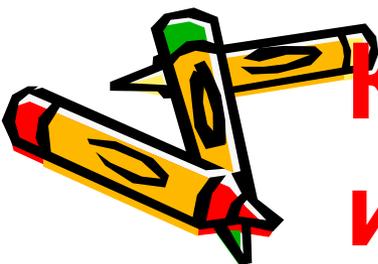
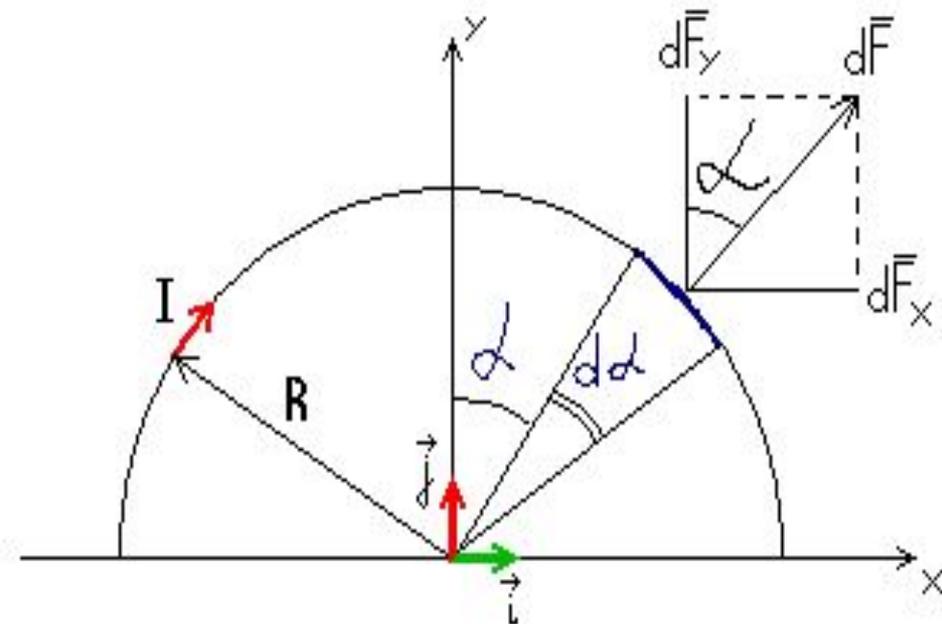
Определить направление токов в проводниках



Контур с током в однородном магнитном поле деформируется:



растягивается
или сжимается
в зависимости
от направления
вектора индук-
ции магнитного
поля и направ-
ления тока в
проводнике.



Как направлен вектор
индукции магнитного поля?

МАГНЕТИКИ

По магнитным свойствам

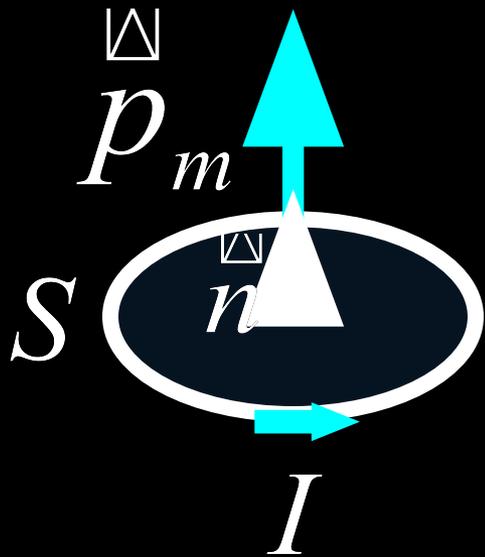
вещества подразделяют на:

диамагнетики ,

парамагнетики ,

ферромагнетики .

Контур с током обладает магнитным моментом



I - сила тока,

\vec{n} - нормаль к контуру,

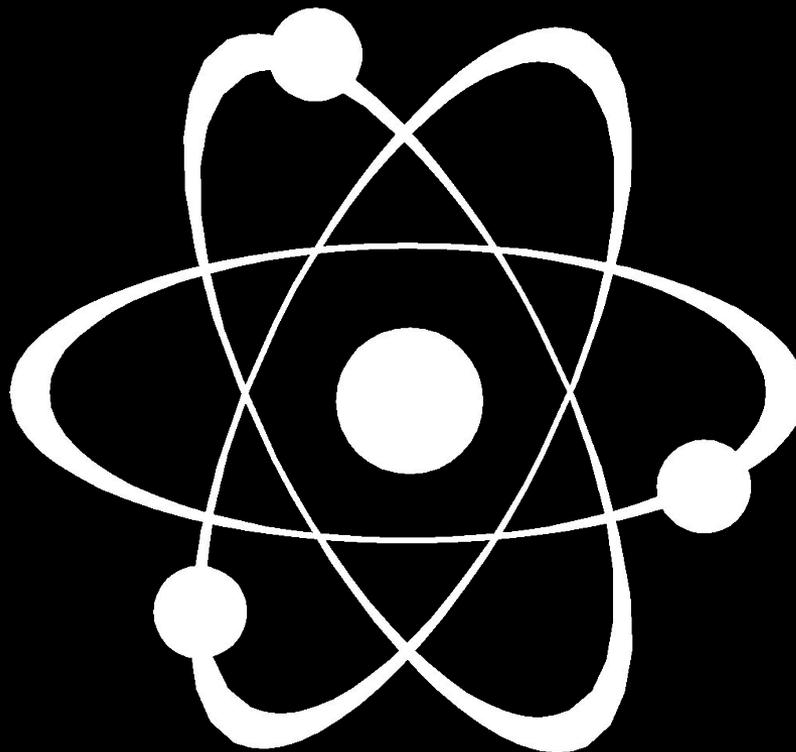
S - площадь контура,

\vec{p}_m магнитный момент контура с током.

$$\vec{p}_m = \vec{n} I S$$

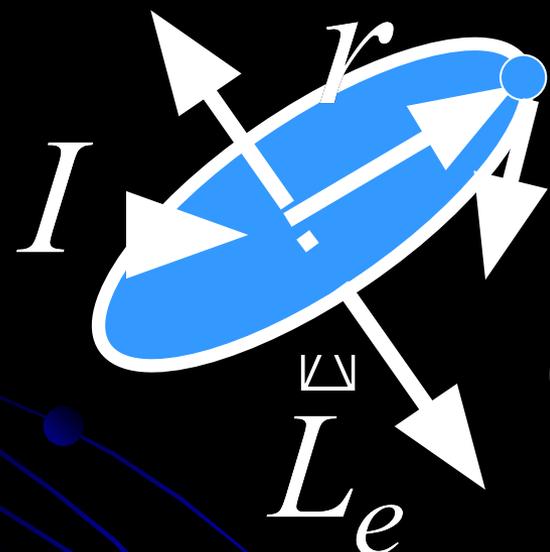
$$[p_m] - A \cdot m^2$$

Магнитные свойства веществ в основном определяются **электронами**, входящими в состав атомов.



Орбитальный магнитный момент электрона

$$\vec{p}_m = I S = \frac{evr}{2};$$



$$L_e = mvr;$$

$$\vec{p}_m = \gamma \vec{L}_e;$$

$$I = ev = ev / 2\pi r;$$

$$S = \pi r^2;$$

$$\gamma = \frac{e}{2m}.$$

Орбитальный магнитный момент атома

РАВЕН СУММЕ ОРБИТАЛЬНЫХ
МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ
ЭЛЕКТРОНОВ АТОМА

$$\vec{P}_m = \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{m i},$$

Z – число электронов в атоме

Вектор намагниченности

- количественно характеризует намагниченное состояние вещества;
- равен отношению магнитного момента малого объема ΔV вещества к этому объему:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{mi},$$

\vec{P}_{mi}

- магнитный момент i -го атома

n — число атомов в объеме ΔV вещества

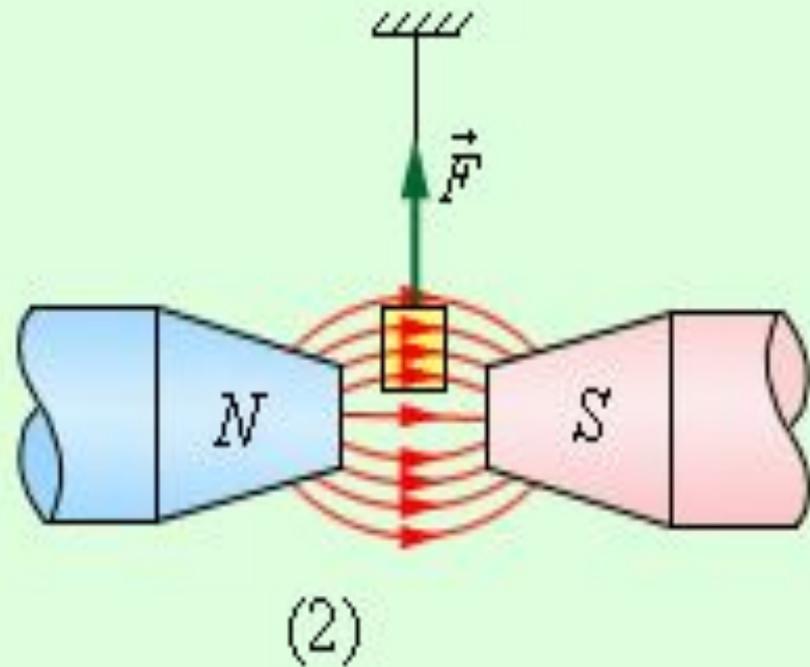
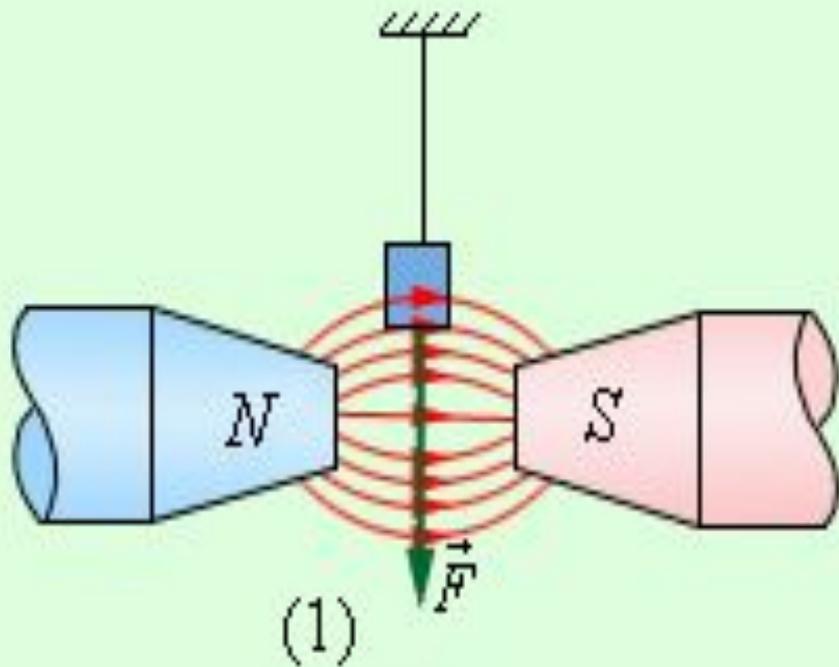
Диамагнетики

- НАМАГНИЧИВАЮТСЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ТАК, ЧТО $\vec{J} \uparrow \downarrow \vec{B}$; К НИМ ОТНОСЯТСЯ ВЕЩЕСТВА, МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ АТОМОВ, МОЛЕКУЛ ИЛИ ИОНОВ КОТОРЫХ В ОТСУТСТВИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАВНЫ НУЛЮ.

He, Ne, H₂, N₂, Zn, Cu, Au, H₂O...

Парамагнетики

- Намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении вектора $J \uparrow \uparrow B$.
- Атомы, молекулы или ионы обладают собственным магнитным моментом, но в отсутствие внешнего магнитного поля эти моменты ориентированы беспорядочно.
- Это щелочные и щелочноземельные металлы,
 $O_2, NO, MnO, FeCl_2, FeCl_3, Al \dots$



Парамагнетик (1) и диамагнетик (2) в неоднородном магнитном поле: парамагнетик **втягивается** в область **сильного** поля, диамагнетик – **выталкивается** из него.

Ферромагнетики

- Обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью.
- Внутреннее магнитное поле значительно превосходит внешнее магнитное поле.
- Это переходные металлы (железо, кобальт, никель), ферриты, металлические стекла и др.

ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВЕЩЕСТВЕ

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{внеш}} + \vec{B}_{\text{внутр}};$$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}});$$

$$I_{\text{микро}} = \oint_L \vec{J} d\vec{l}; \quad I_{\text{макро}} = \oint_L \vec{H} d\vec{l}.$$

- Циркуляция вектора \vec{H} магнитного поля вдоль произвольного замкнутого контура L равна результирующему макроток^у сквозь поверхность, натянутую на этот контур

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{макро}}.$$

Связь \vec{B} и \vec{H} магнитного поля

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad \mu = 1 + \chi$$

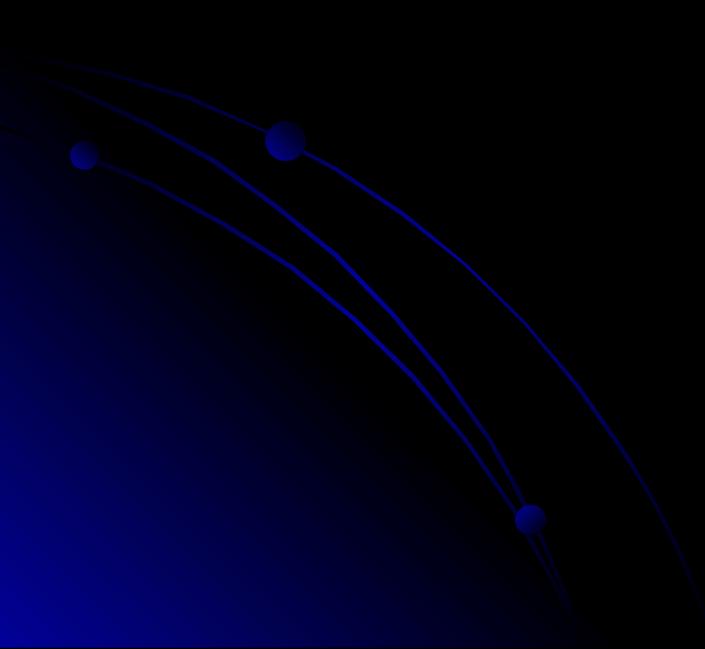
μ - относительная магнитная
- проницаемость среды,

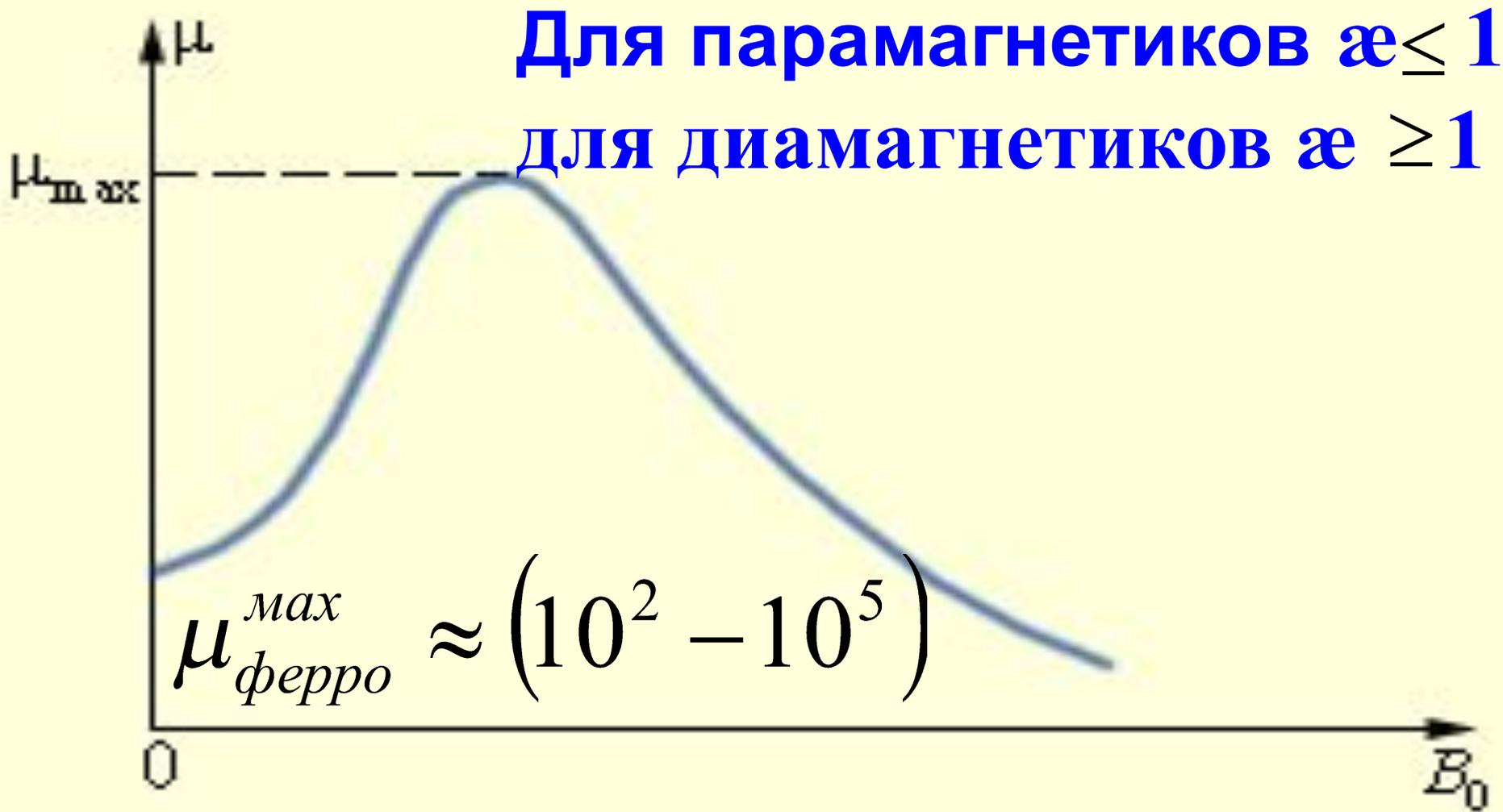
χ - магнитная восприимчивость
среды.

Магнитная проницаемость μ
показывает во сколько раз
индукция B магнитного поля в
однородной среде отличается
от индукции B_0 магнитного поля
в вакууме

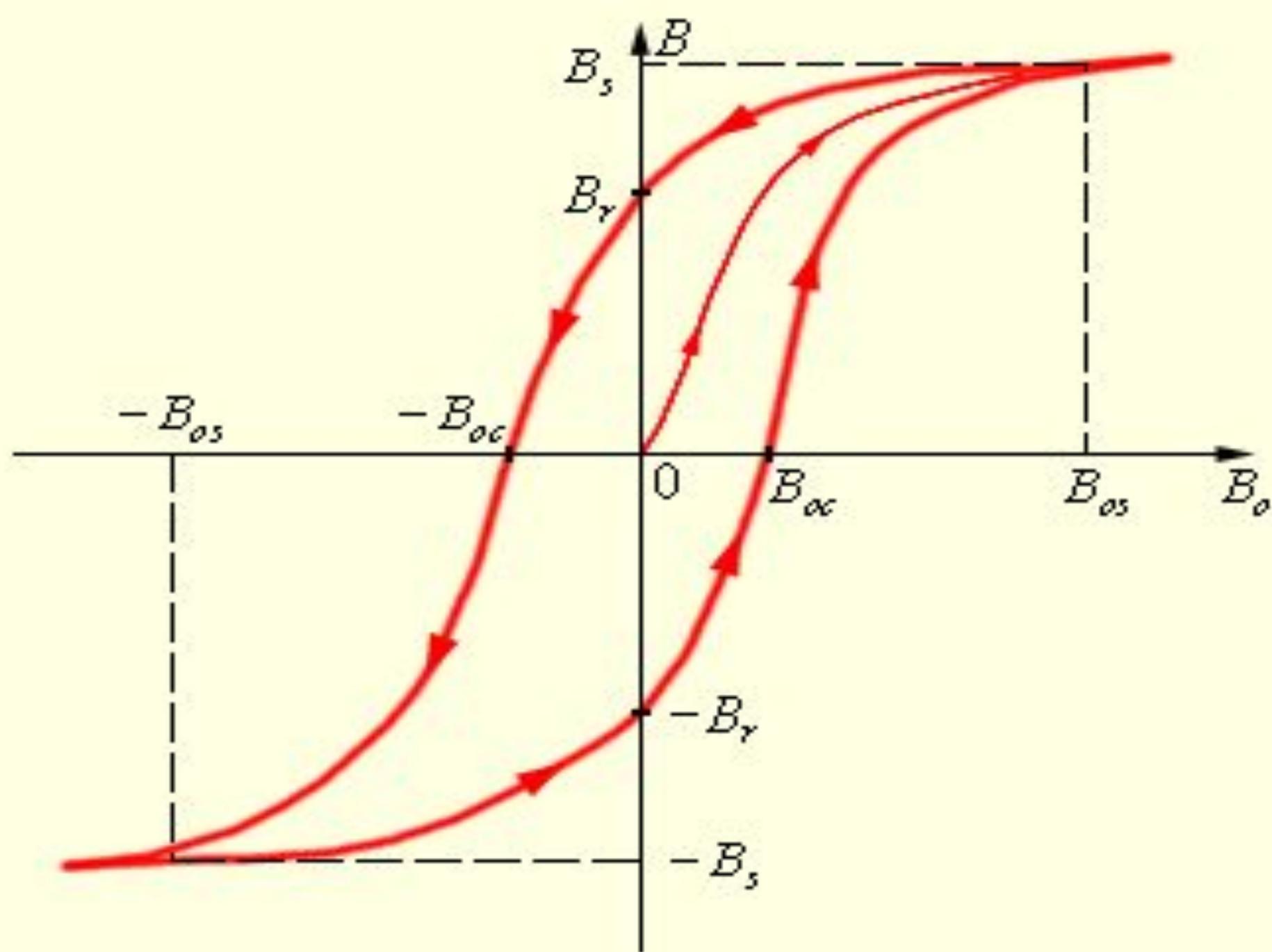
$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$



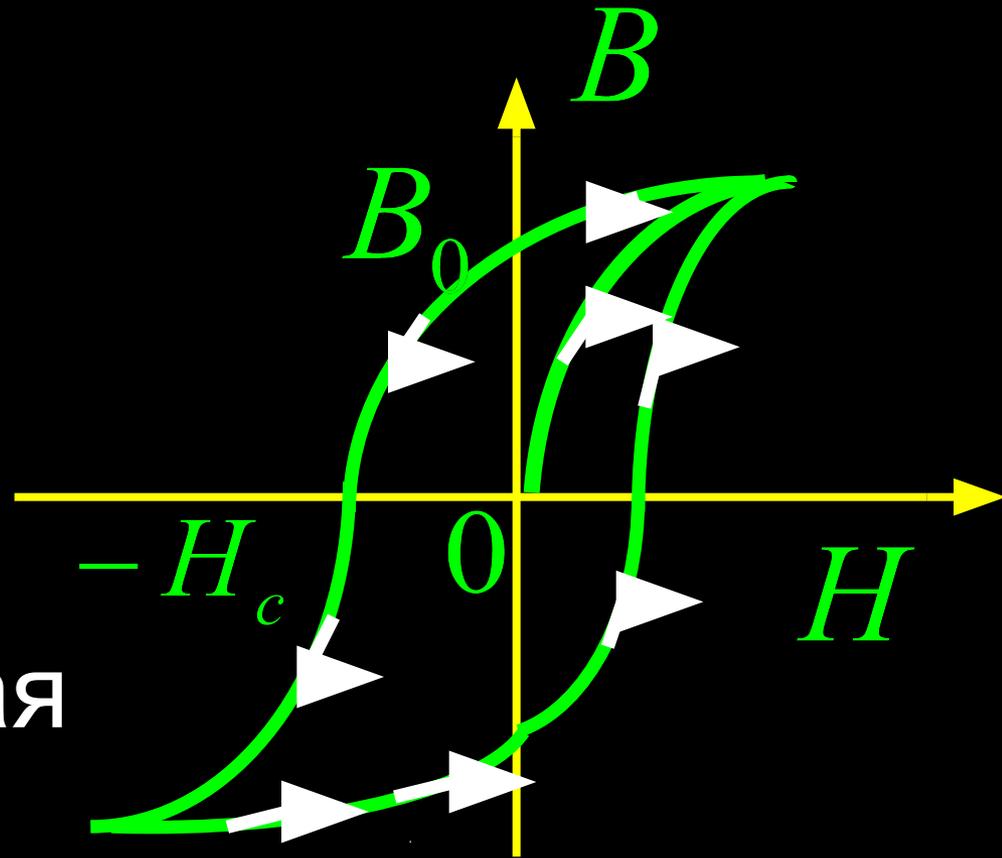


Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции внешнего магнитного поля

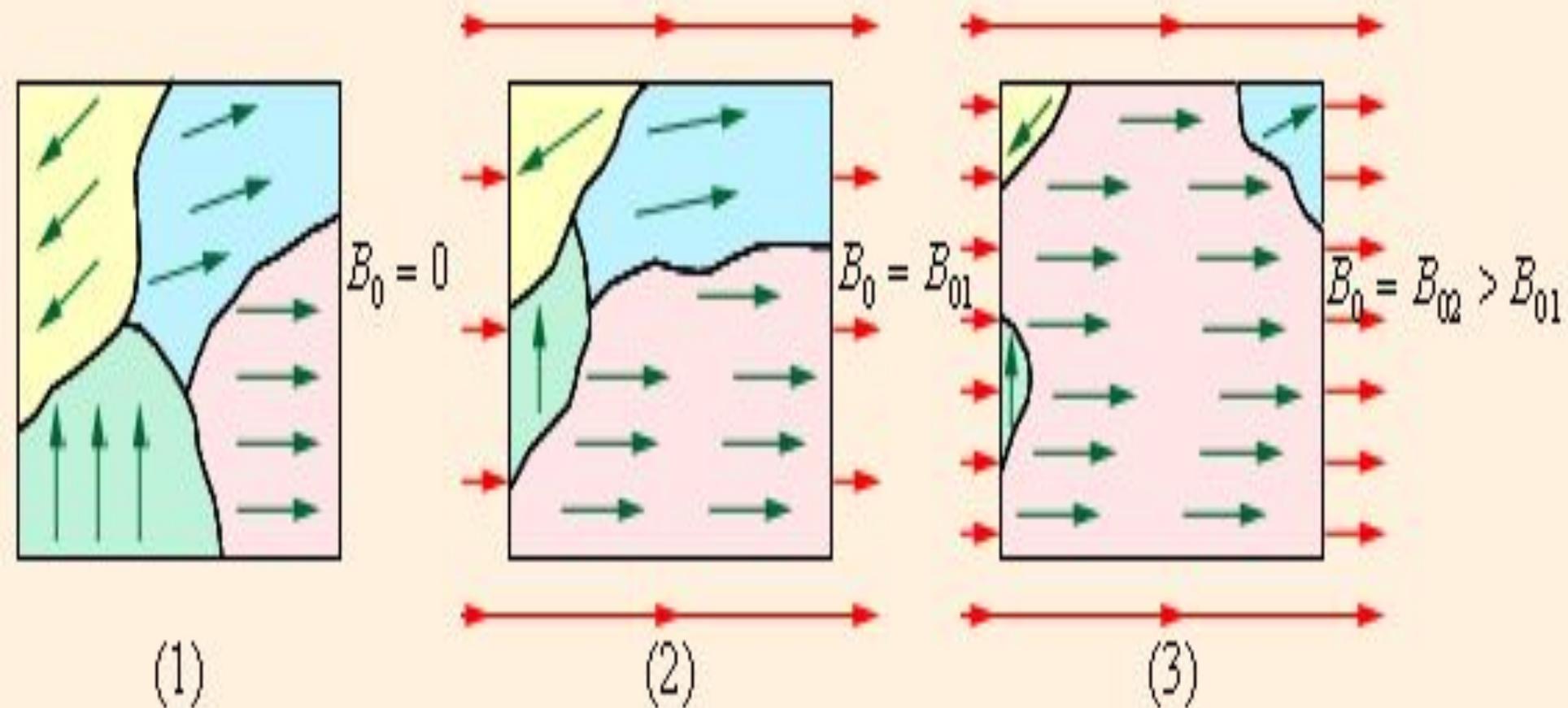


ПЕТЛЯ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

B_0 - остаточная
индукция,



H_c - коэрцитивная
сила.



Намагничивание ферромагнитного образца.

Размер доменов $\sim (10^{-2} - 10^{-4})$ см

Полярные
Неполярные
Сегнетоэлектрики

Диамагнетики
Парамагнетики
Ферромагнетики

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{i=1}^n Q_i^{\text{своб}}$$

-теорема Гаусса

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\text{макро}}$$

-закон полного тока

Сегнетоэлектрики
остаточная
поляризованность

Ферромагнетики
остаточная
намагниченность

Электрические и магнитные свойства

Диэлектрики

Дипольный момент

$$\vec{p}_e = Q \vec{d}$$

Вектор

поляризации

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{ei}$$

Магнетики

Магнитный момент

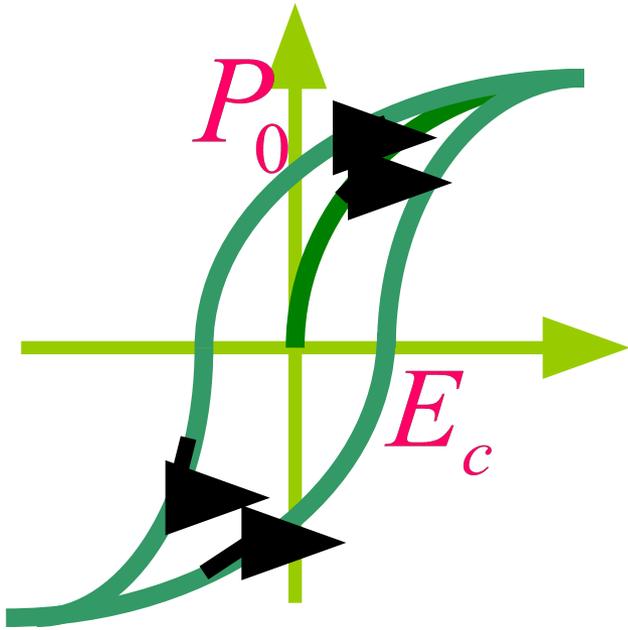
$$\vec{p}_m = ISn$$

Вектор

намагниченности

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi}$$

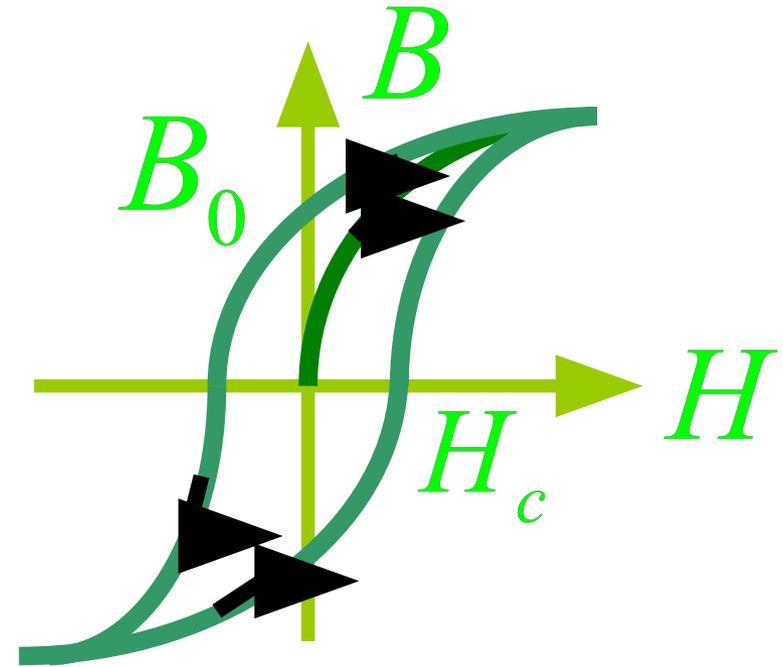
Гистерезис



P_0 - остаточная поляризованность,

E_c - коэрцитивная сила.

Гистерезис



B_0 - остаточная индукция,

H_c - коэрцитивная сила.