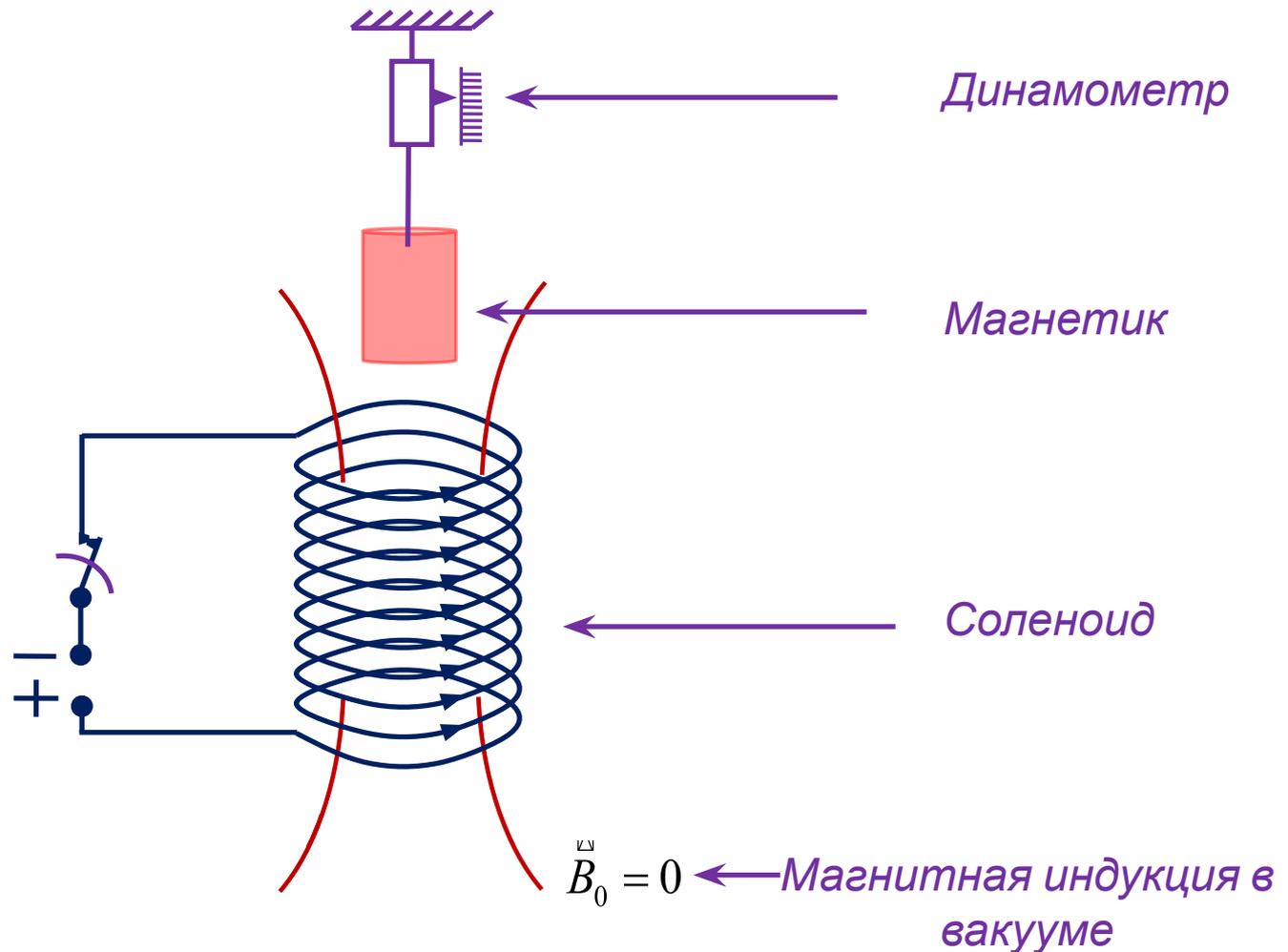
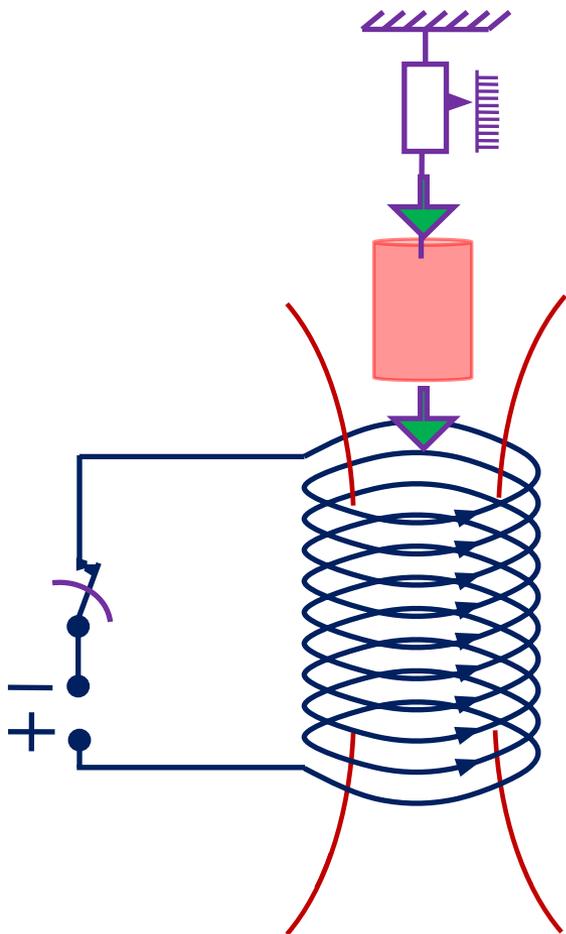


11. Классификация магнетиков. Магнитные свойства атомов.

Схема опыта: «Исследование действия магнитного поля на вещество»

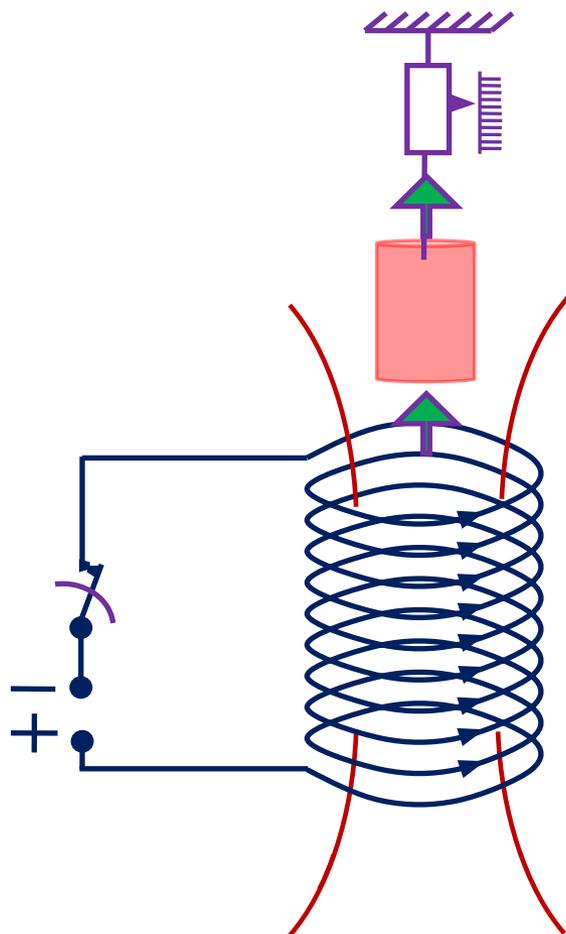




1. Относительно слабое
втягивание...

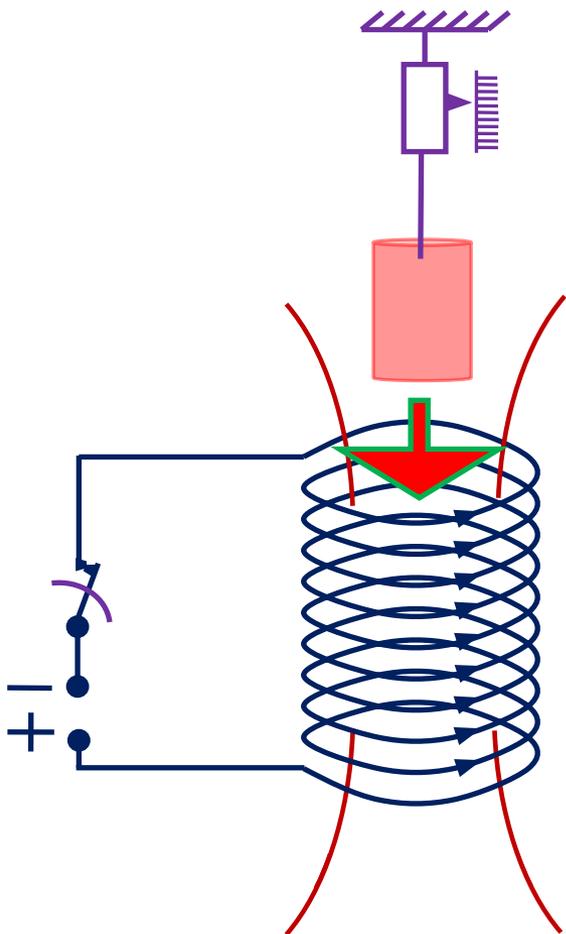
ПАРАМАГНЕТИКИ

Al, Pt, Na, CuCl₂, O₂....



2. Относительно
слабое
выталкивание...

ДИАМАГНЕТИКИ
Cu, Ag, Bi, C, H₂O, N₂....



3. Сильное втягивание...

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Fe, Co, Ni....

Магнитные свойства вещества связаны с магнитными свойствами атомов:



Магнитный момент атома

$$\vec{p}_m = \left[\sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si}) \right] + \vec{p}$$

Магнитный момент, связанный с орбитальным движением электрона

Собственный магнитный момент электрона имеет квантовую природу и является таким же неотъемлемым его свойством, как масса и заряд.

Магнитный момент ядра

$$\vec{P}_\text{я} = \sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si}) \quad \Rightarrow \quad \vec{P}_\text{м} \approx \sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si})$$

$$\vec{P}_\text{м} \neq 0$$



для атома (молекулы)
парамагнетика

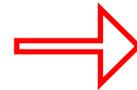
$$\vec{P}_\text{м} = 0$$



для атома (молекулы)
диамагнетиков

В ферромагнетиках

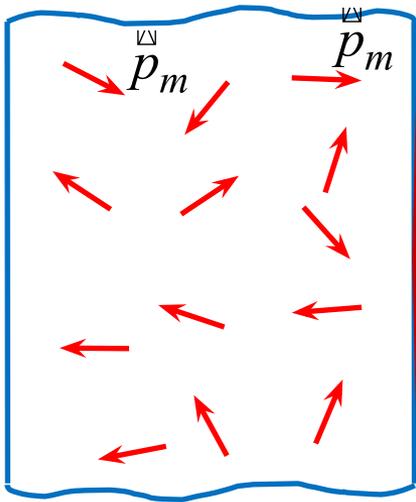
существуют области спонтанного намагничивания: «домены», магнитный момент которых отличен от нуля.



$$\vec{P}_\text{домена} \neq 0$$

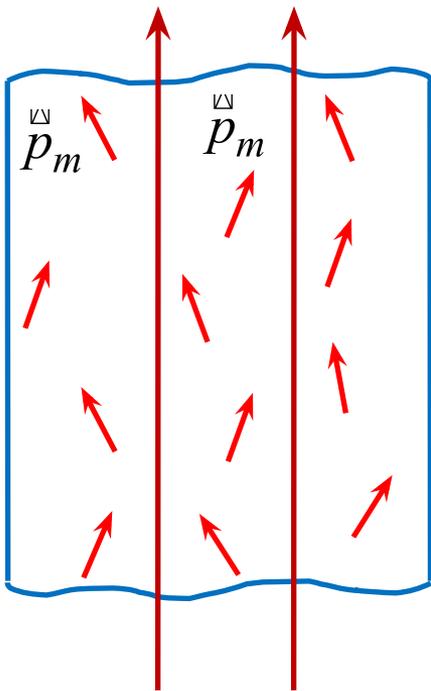
12. Парамагнетики

$$\vec{p}_m \neq 0$$



$$\vec{B}_0 = 0$$

Ориентация магнитных моментов атомов носит случайный характер



$$\vec{B}_0 \neq 0 \Rightarrow \vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}_0] + T \Rightarrow$$

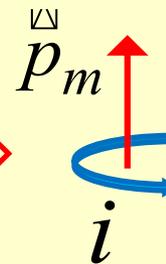
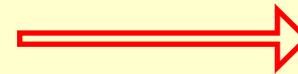
Преимущественная ориентация магнитных моментов атомов вдоль линий магнитной индукции

Вектор намагничивания
A/m

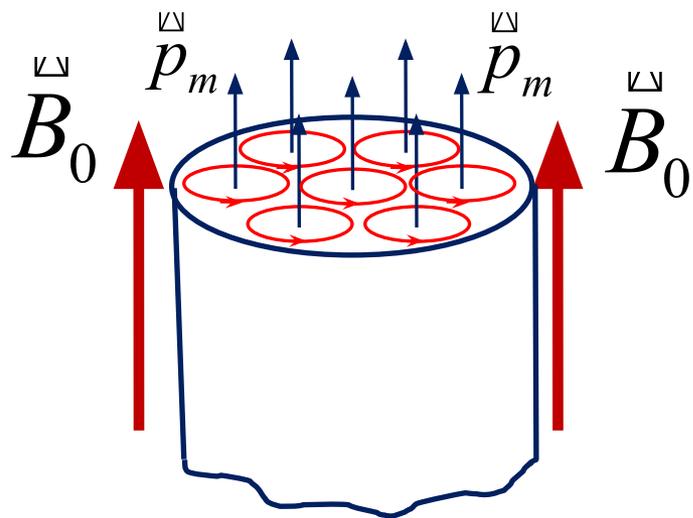
$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{j=1}^N \vec{p}_{mj} \neq 0$$

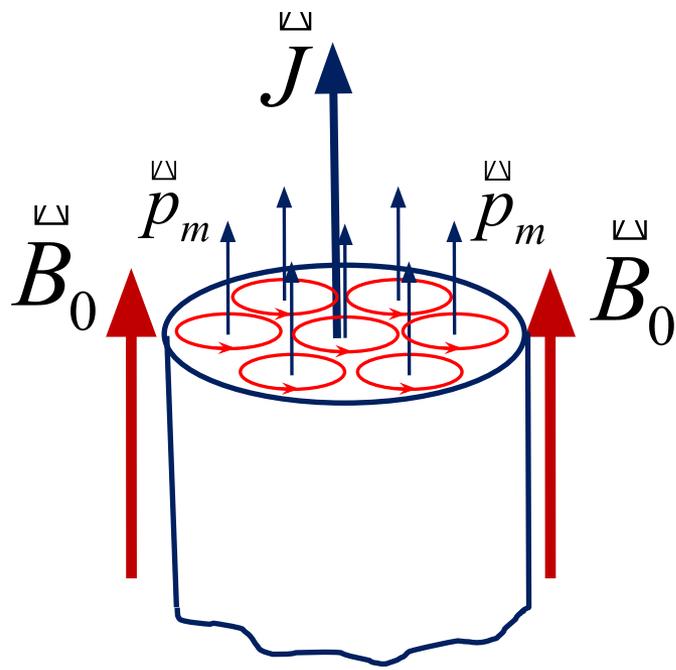
Гипотеза молекулярных токов

Ампера: каждому атому (молекуле) можно сопоставить некоторый круговой ток с соответствующим магнитным моментом.

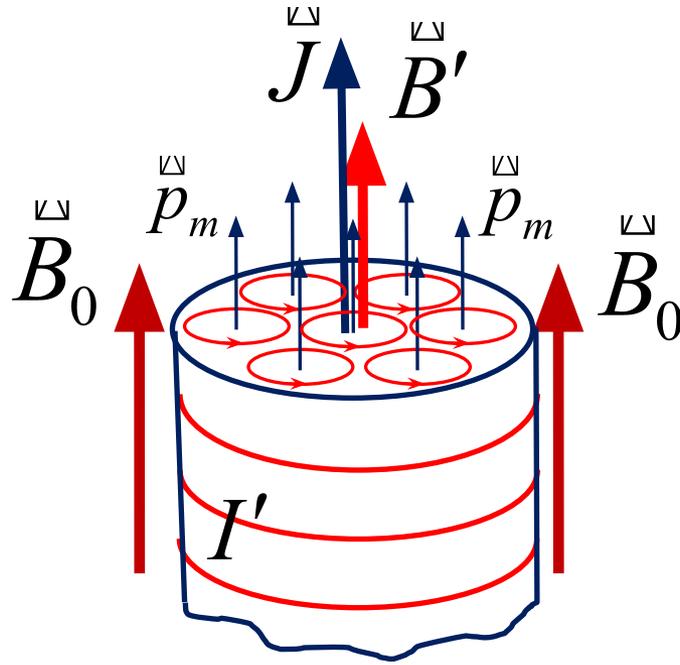








Рассмотрим парамагнетик в однородном магнитном поле:



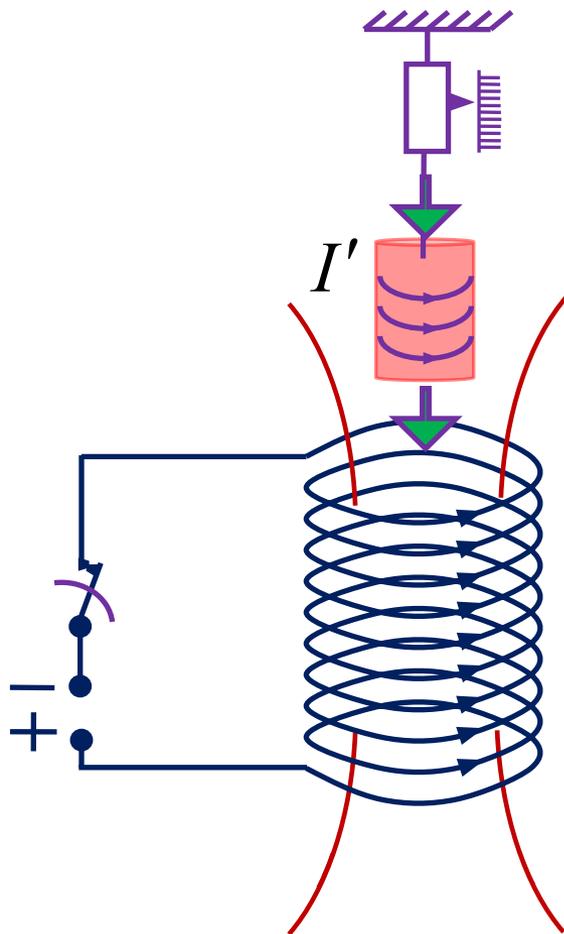
$$\vec{p}_m \rightarrow \vec{J} \rightarrow I' \rightarrow \vec{B}'$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

$$B = B_0 + B'$$

$$B > B_0$$

Парамагнетики усиливают магнитное поле



$$\vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}_0 \Rightarrow B > B_0$$

1. Относительно слабое
втягивание...

ПАРАМАГНЕТИКИ

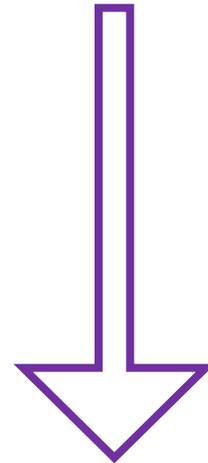
Al, Pt, Na, CuCl₂, O₂....

13. Диамagnetики

$$\vec{B}_0 = 0 \Rightarrow \vec{p}_m = 0$$

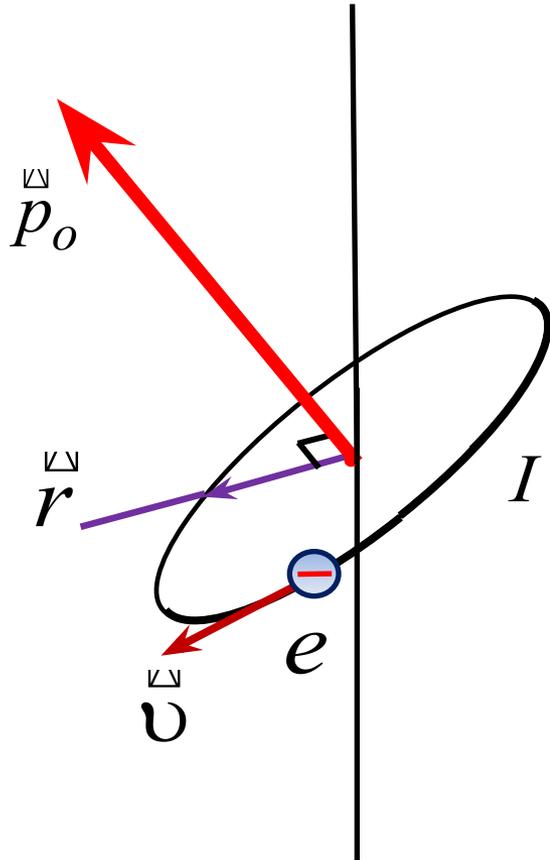
$$\vec{B}_0 \neq 0 \Rightarrow \vec{p}'_m \neq 0$$

Индукцированный
магнитный момент
атома



Вычислим магнитный момент орбитального движения электрона по круговой орбите радиуса r вокруг ядра как магнитный момент контура с током I .

Орбитальный магнитный момент
электрона



$$p_o = I \cdot S = \frac{dq}{dt} \cdot S = \frac{e}{T} \cdot S = e \frac{\omega}{2\pi} \cdot \pi r^2 = \frac{1}{2} e \omega r^2$$

$$p_o = \frac{1}{2} e \omega r^2$$

Орбитальный механический момент
импульса электрона

$$L_0 = mvr = m\omega r^2$$

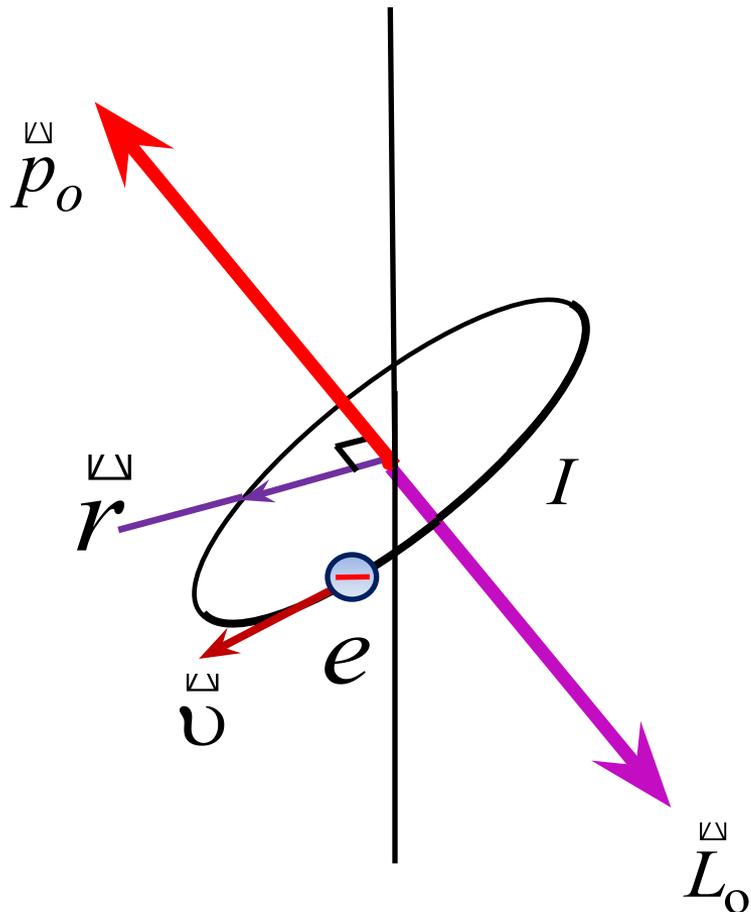


Гиромагнитное отношение

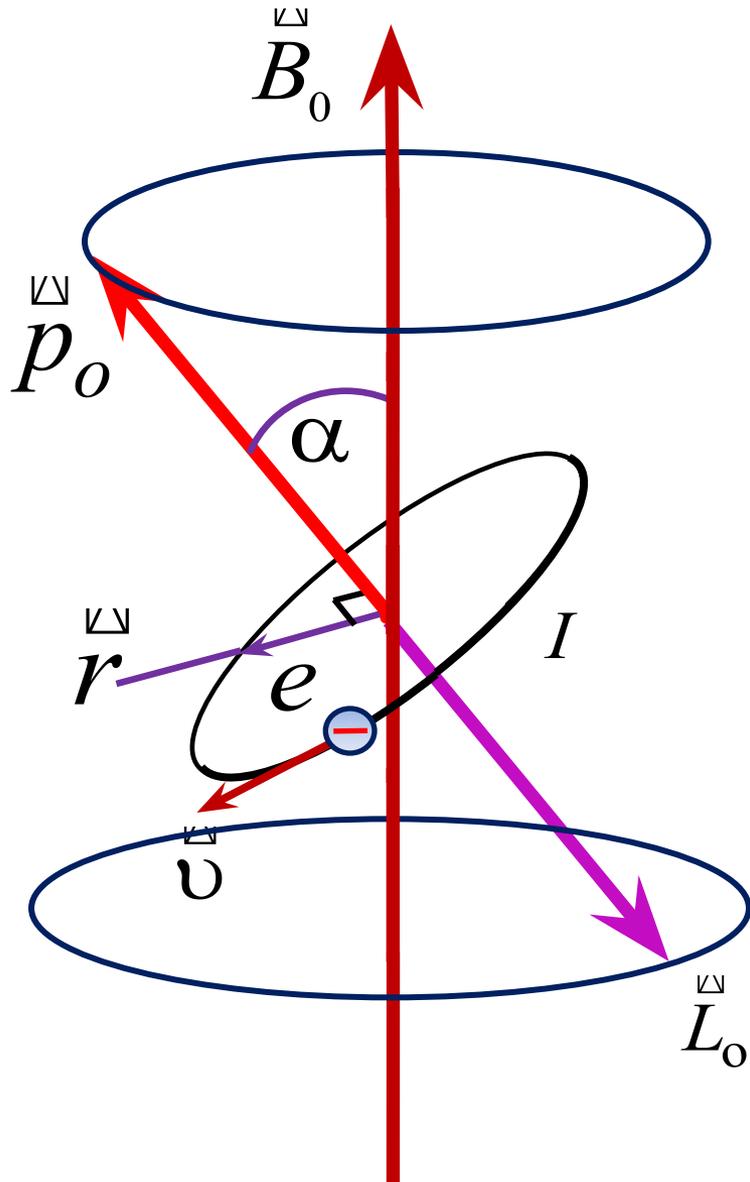
$$\gamma = \frac{\vec{p}_0}{L_0} = -\frac{1}{2} \frac{e\omega r^2}{m\omega r^2} = -\frac{1}{2} \frac{e}{m}$$



Гиромагнитное отношение не
зависит от параметров
орбитального движения и для всех
электронов атома одинаково.



Рассмотрим орбитальное движение электрона в магнитном поле:



$$\vec{M} = \left[\vec{p}_0 \times \vec{B}_0 \right] = \frac{d\vec{L}_0}{dt}$$

Работа силы Лоренца равна нулю

$$|\vec{L}_0| = const.$$



$\vec{L}_0 \Rightarrow$ Меняется только по направлению !!!!



Концы векторов \vec{L}_0 и \vec{p}_0 движутся по окружностям в плоскостях, перпендикулярных линиям магнитной индукции с угловой скоростью ω_L .



С такой же угловой скоростью ω_L происходит «движение» (катание) орбиты электрона по плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции.

Это явление называется: «прецессия электронной орбиты».

(Аналогично прецессии оси волчка в поле силы тяжести)

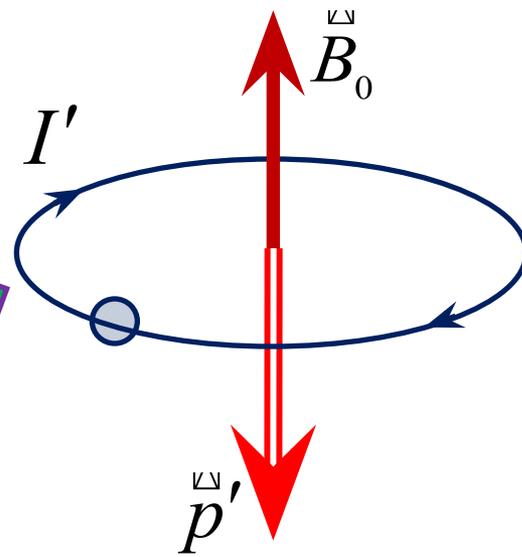
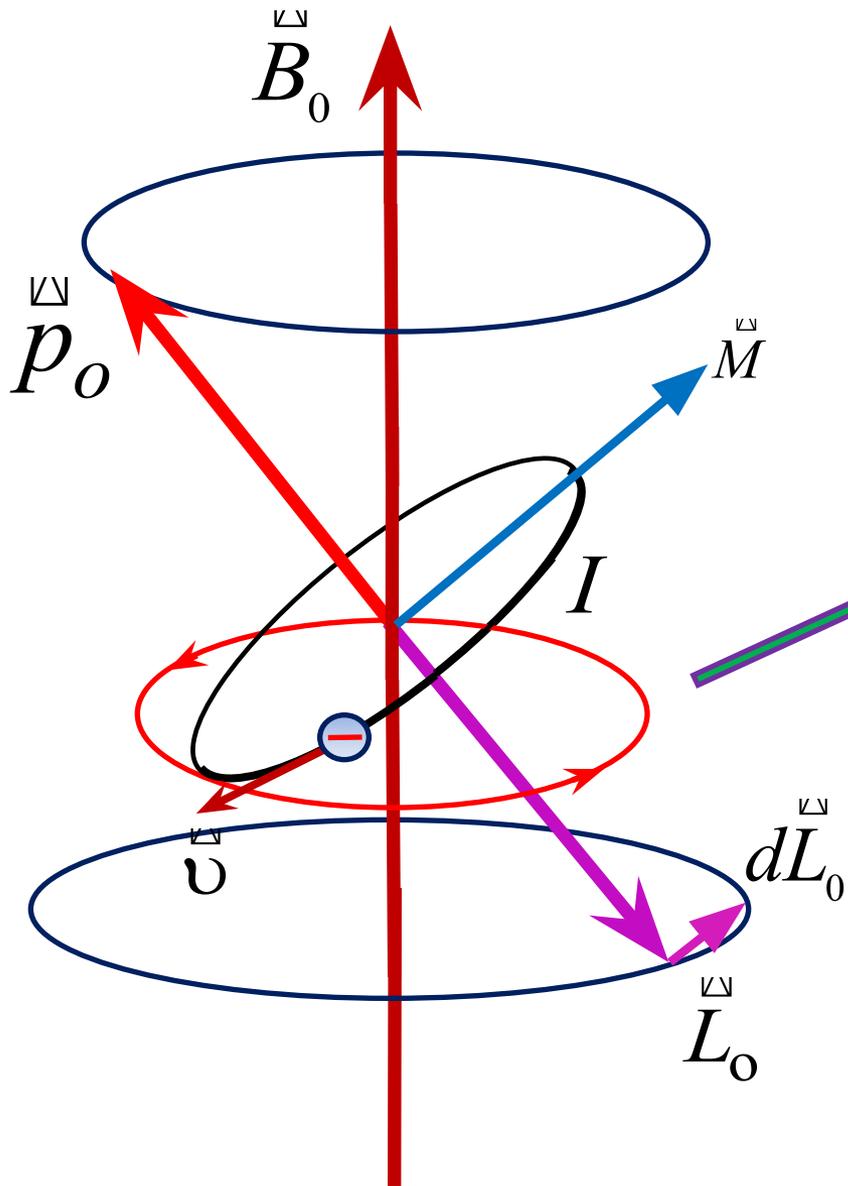
Можно показать (см. учебник), что частота прецессии (частота Лармора) орбиты для всех электронов атома одинакова и зависит только от величины индукции магнитного поля:

$$\omega_L = \frac{e}{2m} B_0$$

Т.о., движение электрона вокруг ядра в атоме становится сложным и представляет собой суперпозицию орбитального движения и дополнительного движения по окружности с угловой скоростью ω_L в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции.



$$\vec{M} = [\vec{p}_0 \times \vec{B}_0] = \frac{d\vec{L}_0}{dt} \longrightarrow \vec{M} \uparrow \uparrow d\vec{L}_0$$



Индукционный
орбитальный
магнитный момент

$$\vec{p}' \uparrow \downarrow \vec{B}_0$$

Т.о., в магнитном поле магнитный момент атома диамагнетика отличен от нуля и равен суммарному индуцированному орбитальному магнитному моменту электронов, направленному в сторону, противоположную направлению вектора магнитной индукции:

$$\vec{p}_m = \sum_{i=1}^Z (\vec{p}_{oi} + \vec{p}_{si} + \vec{p}'_{mi}) = 0 + \sum_{i=1}^Z \vec{p}'_{mi} = \vec{p}'_m \neq 0$$

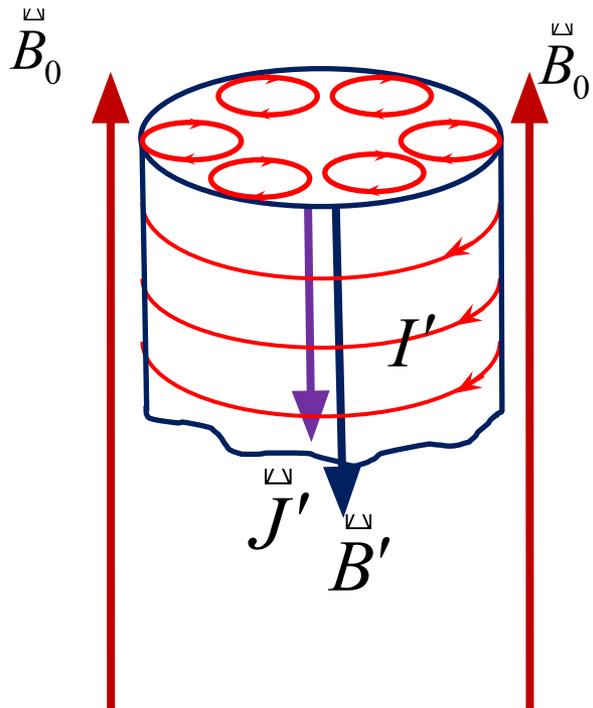
Магнитный момент единицы объёма диамагнетика (вектор намагничивания) в магнитном поле:

$$\vec{J}' = \frac{1}{\Delta V} \sum_{j=1}^N \vec{p}'_{mj} \neq 0$$



$$\vec{J}' \uparrow \downarrow \vec{B}_0$$

Рассмотрим диамагнетик в однородном магнитном поле:



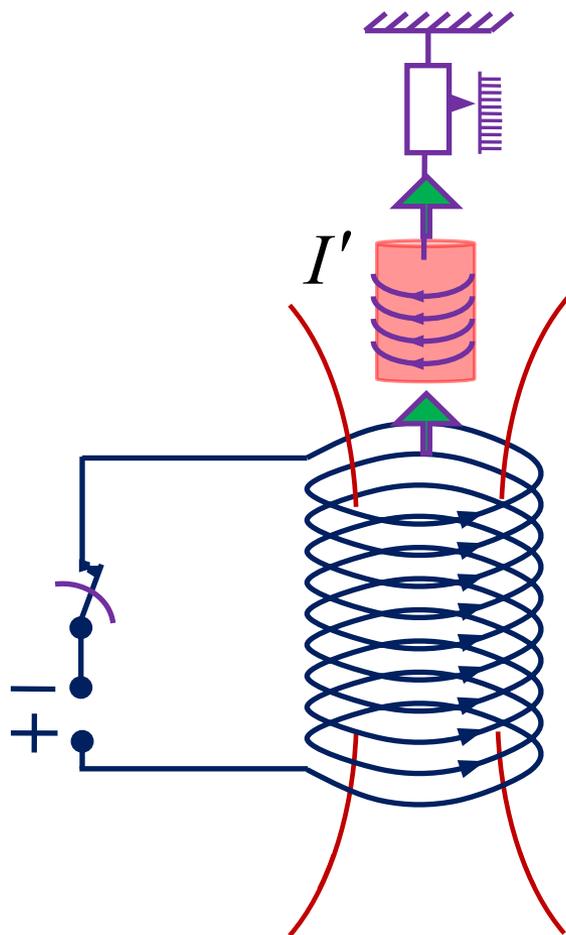
$$\vec{p}'_m \rightarrow \vec{J}' \rightarrow I' \rightarrow \vec{B}'$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

$$B = B_0 - B'$$

Диамагнетики ослабляют магнитное поле

$$B < B_0$$



$$\vec{B}_0 \uparrow \downarrow \vec{B}' \Rightarrow B < B_0$$

2. Относительно
слабое
выталкивание...

ДИАМАГНЕТИКИ
Cu, Ag, Bi, C, H₂O, N₂....

14. Характеристики магнитного поля в магнетиках.

Опыт:

$$\longrightarrow \boxed{\vec{B}' = \chi \vec{B}_0}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = \vec{B}_0 + \chi \vec{B}_0 = (1 + \chi) \vec{B}_0 = \mu \vec{B}_0$$

Магнитная
восприимчивость
парамагнетика



$$\chi = 10^{-5} \div 10^{-3} > 0$$

Закон Кюри
(для парамагнетиков)

$$\chi \propto \frac{1}{T}$$

Магнитная
проницаемость
парамагнетика



$$\mu = (1 + \chi) > 1$$

Магнитная проницаемость
показывает во сколько раз
парамагнетик усиливает
магнитное поле.



$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{B}_0}$$

Магнитная
восприимчивость
диамагнетика



$$\chi = -(10^{-6} \div 10^{-5}) < 0$$

Магнитная
проницаемость
диамагнетика



$$\mu = (1 + \chi) < 1$$

Магнитная проницаемость
показывает во сколько раз
диамагнетик ослабляет
магнитное поле.



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

Напряженность
магнитного поля
(вспомогательная
характеристика)



$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$$


$$\left[\frac{A}{m} \right]$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}$$

Вакуум

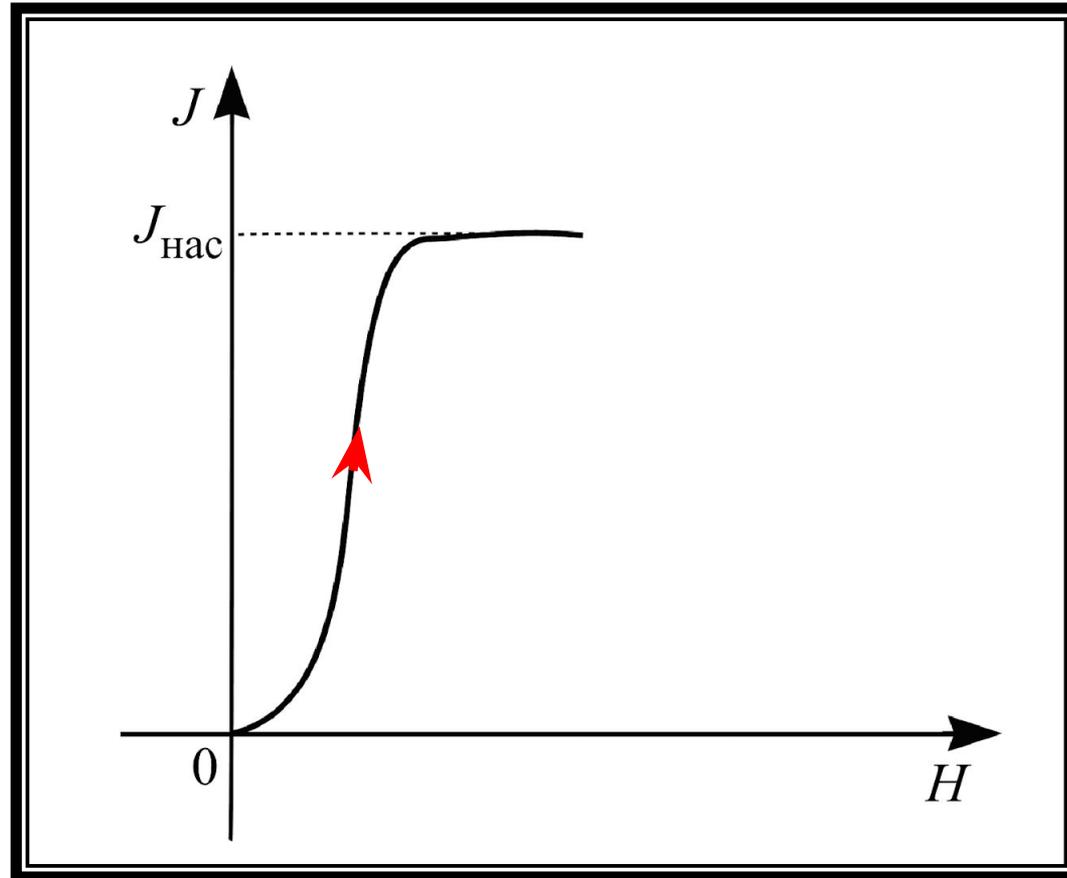
$$J = 0$$

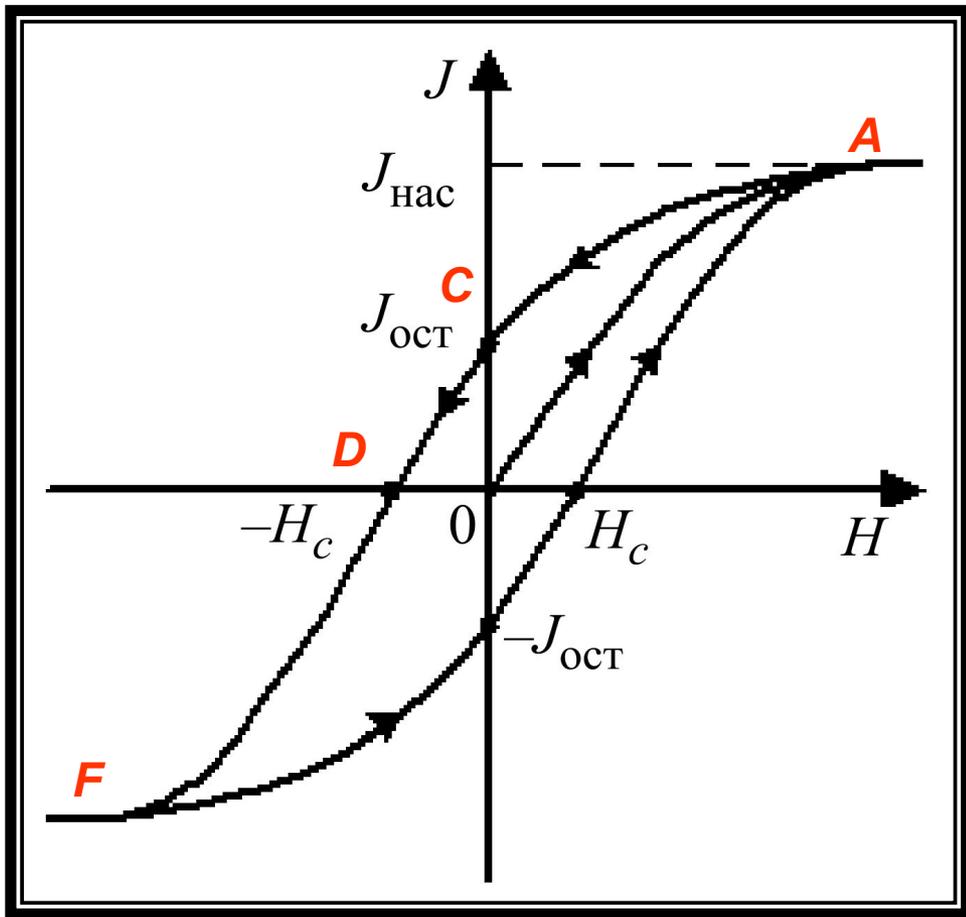
$$\chi = 0$$

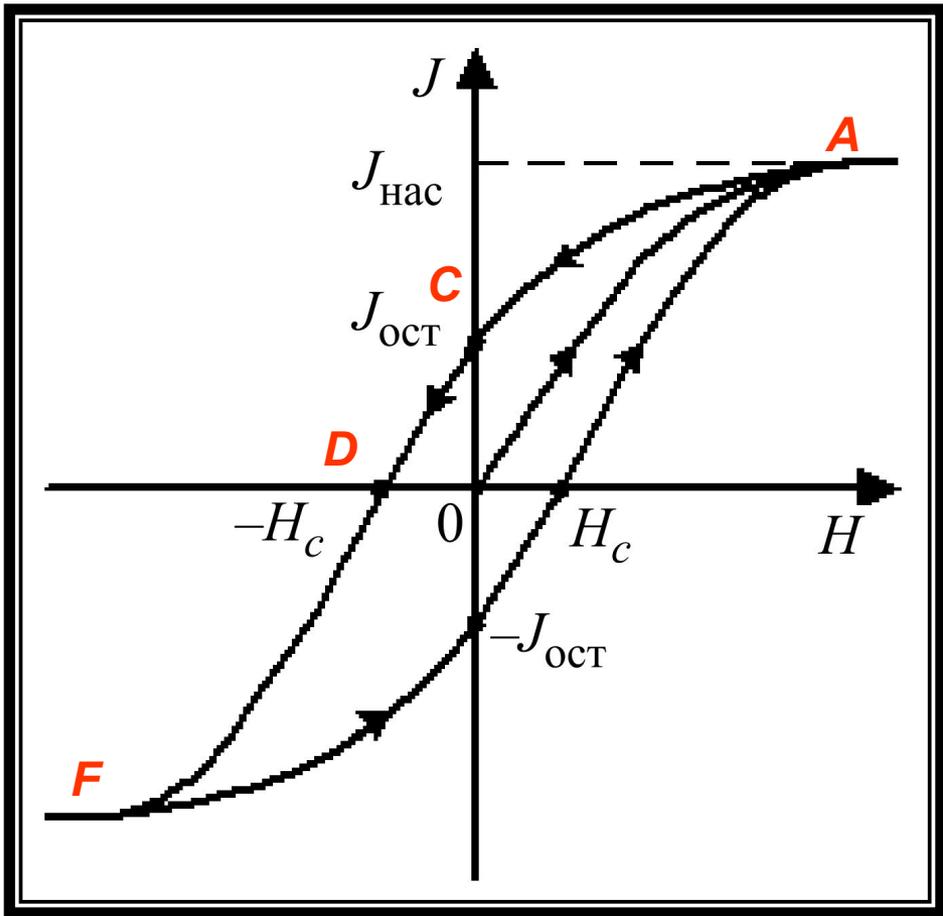
$$\mu = 1$$

15. Ферромагнетики

Нулевая кривая намагничения $J(H)$ для
изначально-ненамагниченного ферромагнетика





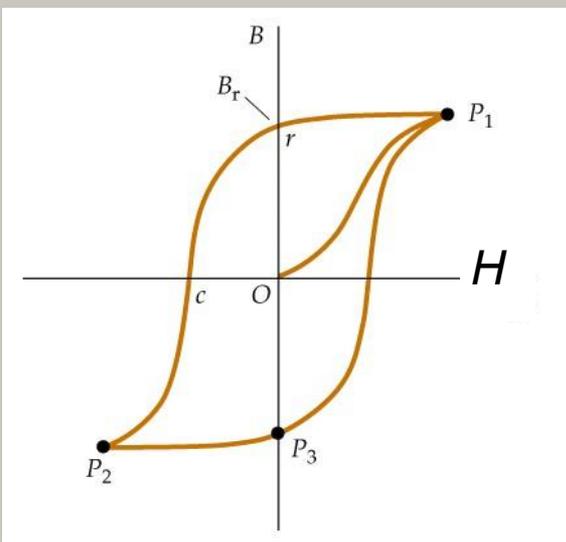


1. Нулевая кривая намагничения (OA)
2. Насыщение намагничивания (A;F)
3. Остаточная намагниченность (C)
4. Коэрцитивная сила (D)
5. Гистерезис, петля гистерезиса

Коэрцитивная сила

Остаточная намагниченность

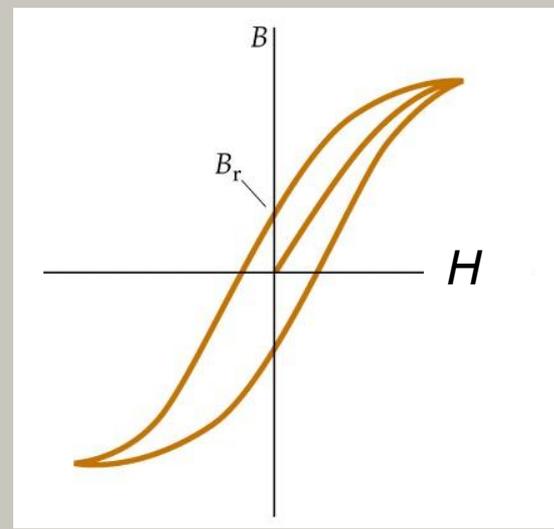
Вещество	Состав	μ_{max}	B_r в Тл	H_c в а/м
Железо	99,9% Fe	5 000	—	80
Супермал-лой	79% Ni, 5% Mo, 16% Fe	800 000	—	0,3
Алнико	10% Al, 19% Ni, 18% Co, 53% Fe	—	0,9	52 000
Магнико	14% Ni, 24% Co, 8% Al, 3% Cu, 51% Fe	—	1,25	46 000
Колумакс	13% Ni, 24% Co, 8% Al, 3% Cu, 0,7% Ti, остальное Fe	—	1,3	59 000



Жесткие ферромагнетики



Применяются для создания
постоянных магнитов



Мягкие ферромагнетики



Применяются для
изготовления сердечников
трансформаторов

Точка Кюри: T_k

ферромагнитик \longrightarrow парамагнетик



Fe

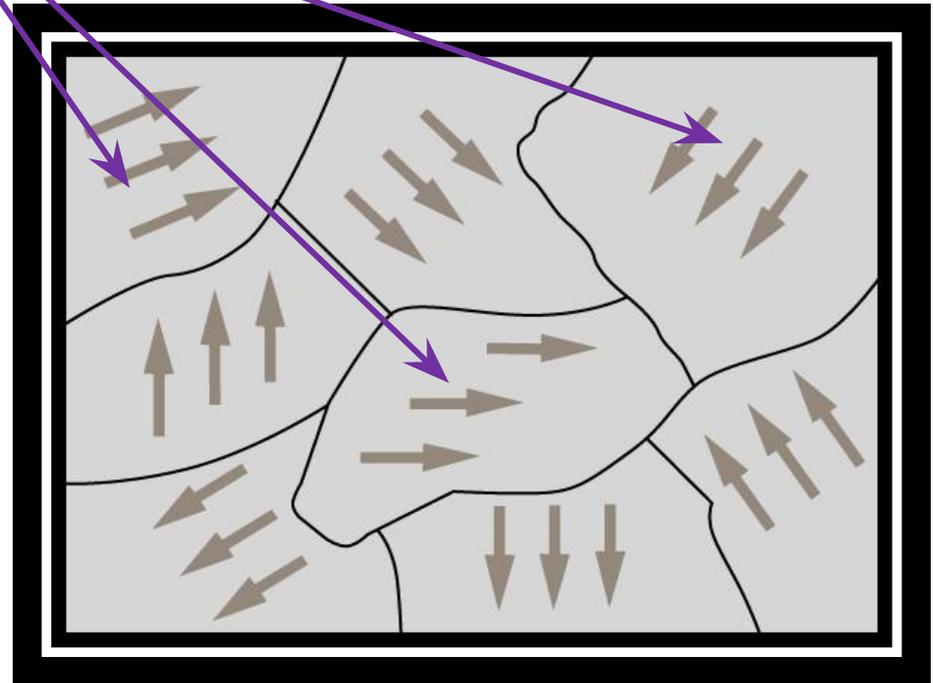
$T_k = 1040K$

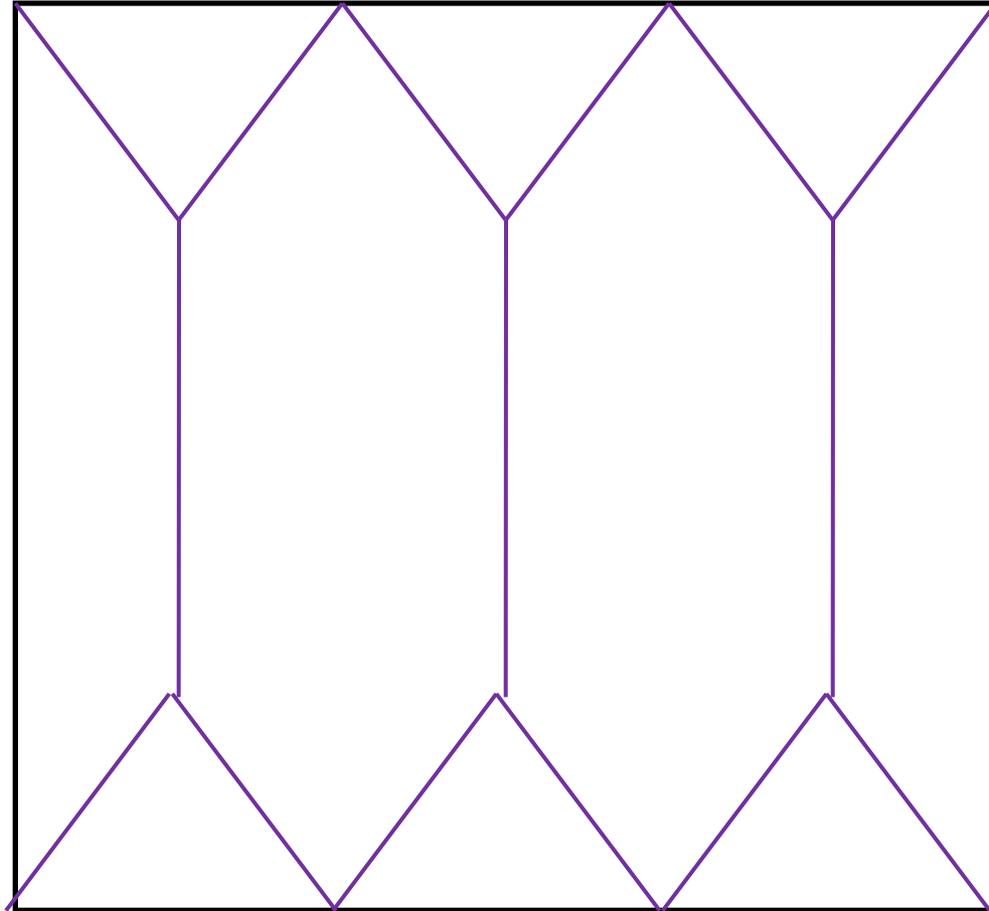
В основе теории ферромагнетизма лежит представление о доменах, областях спонтанного (самопроизвольного) намагничивания: все магнитные моменты атомов в пределах одного домена имеют одинаковую ориентацию.

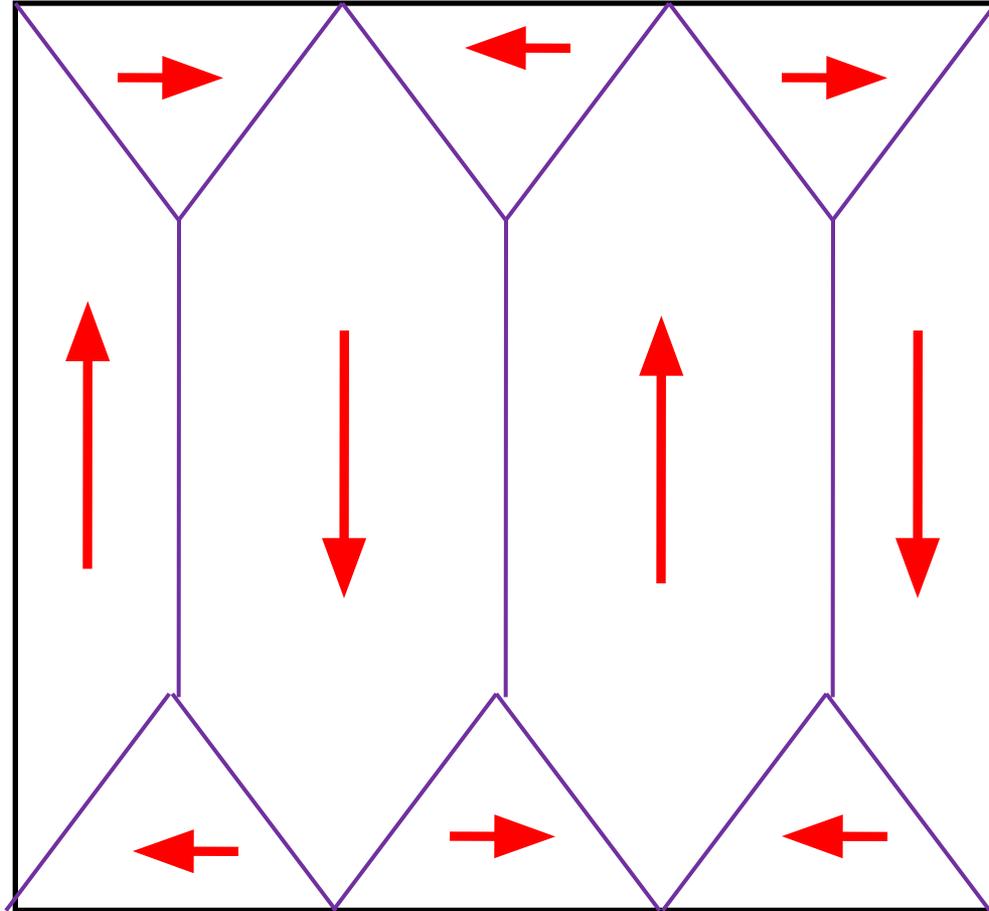
Линейные размеры доменов - 1–100 мкм.

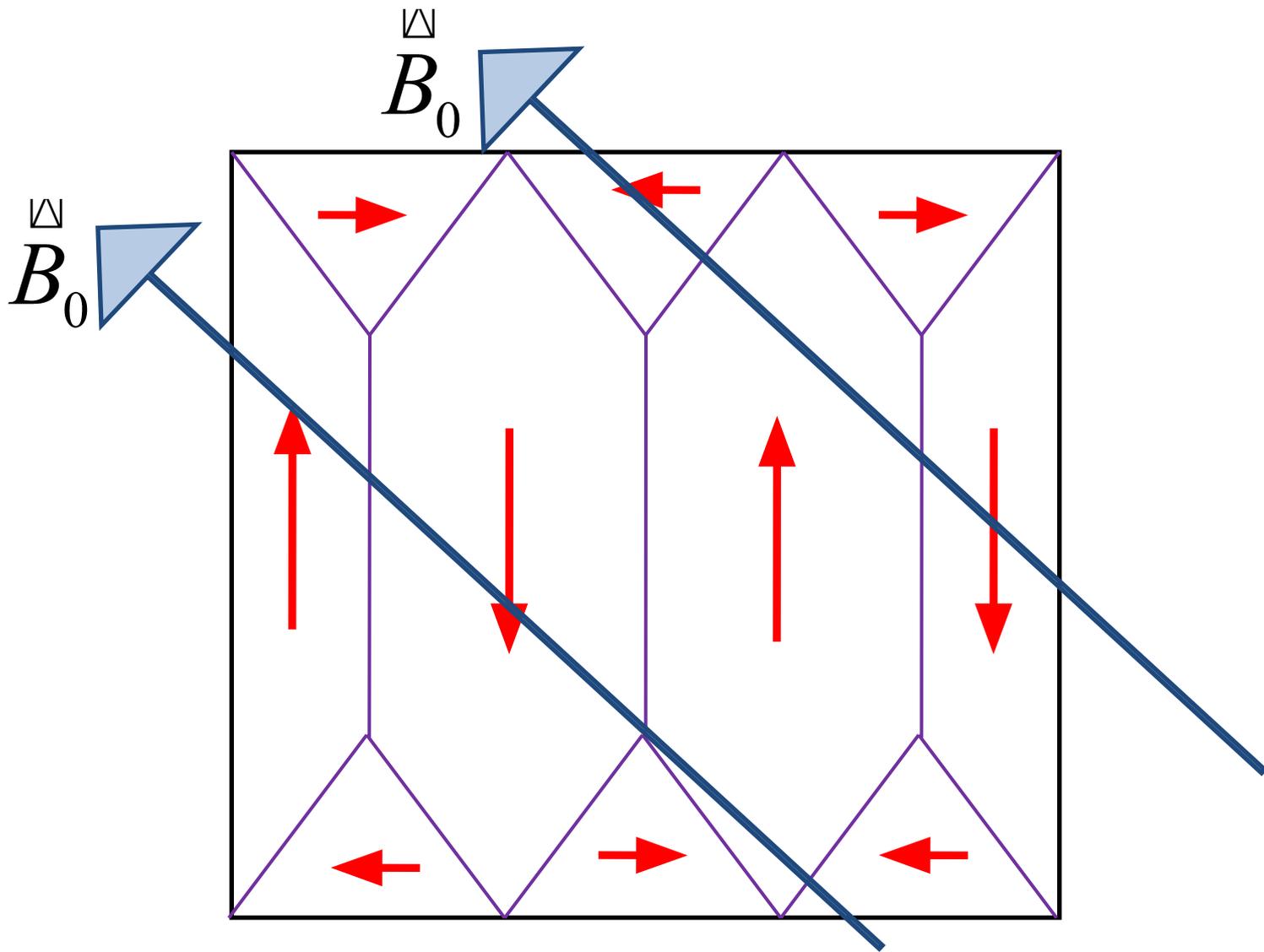
Характеристика домена – его магнитный момент:

\vec{I}_m (домена)

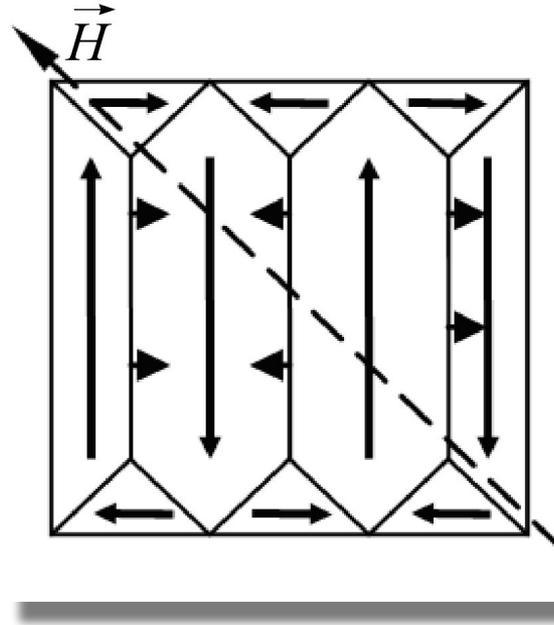








Слабое магнитное поле \longrightarrow Смещение границ доменов....

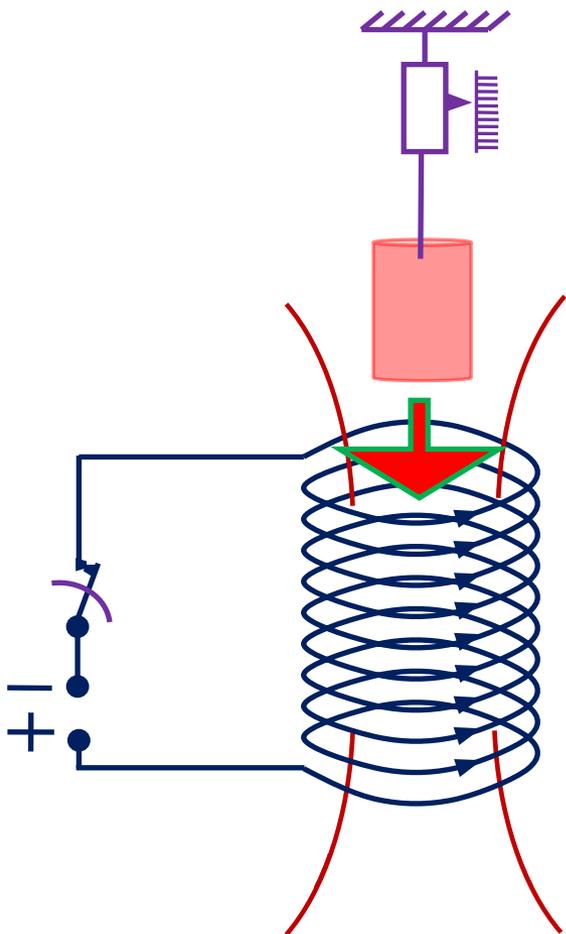


Сильное магнитное поле \longrightarrow Поворот магнитных моментов доменов вдоль вектора магнитной индукции.

\vec{M}_m (домена) $\uparrow \uparrow$

Необратимость
намагничивания \longrightarrow Гистерезис

(точка Кюри) \longrightarrow (парамагнетик)



3. Сильное втягивание...

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Fe, Co, Ni....