



**Физические основы компьютерных и
сетевых технологий**

Семестр 2. Колебания и волны



Музыченко Я.Б.
muzychenko@itmo.ru
2024

Лекция 3. Магнитное поле в веществе



- Контур с током в магнитном поле
- Гипотеза Ампера
- Намагничивание веществ: намагниченность, напряженность магнитного поля.
- Магнетики: диа-, пара-, ферромагнетизм
- Физическая природа диамагнетизма. Спин электрона. Гиромагнитное соотношение.

Как ведет себя контур с током в магнитном поле? Где используют его свойства?

Как записать уравнения Максвелла при исследовании магнитного поля в веществе?

Какие есть типы магнетиков? Почему вещества ведут себя по разному в магнитном поле?

Что такое гиромагнитное соотношение и спин электрона?

Дополнительные источники:

ІТМО

Савельев, т.2 гл. 7,9

МФТИ, Курс лекций Крымского К.М.,

https://www.youtube.com/watch?time_continue=157&v=vpb7XCqMfy8&feature=emb_title

Козел С.М.

https://www.youtube.com/watch?v=RqpLTwww_ZU&list=PLeURvsEJKXbi4m-VYDcy7Bwp92HUTuO98&index=9&t=0s

Walter Lewin 8.02

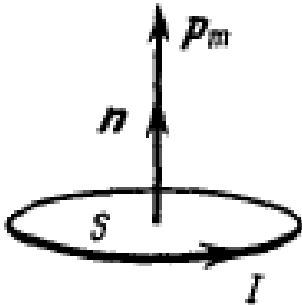
<https://www.youtube.com/watch?v=MXuZ1SRjpbqk&list=PLyQSN7X0ro2314mKyUiOILaOC2hk6Pc3j&index=16>

Леннаучфильм

https://www.youtube.com/watch?time_continue=257&v=ePWRI0EI5Kc&feature=emb_logo



Для исследования магнитного поля применяют пробный контур с током. При внесении контура с током магнитное поле оказывает на него ориентирующее действие. **Вращательный момент** зависит от характеристик поля, силы тока в контуре, площади контура, но **НЕ** зависит от формы контура.



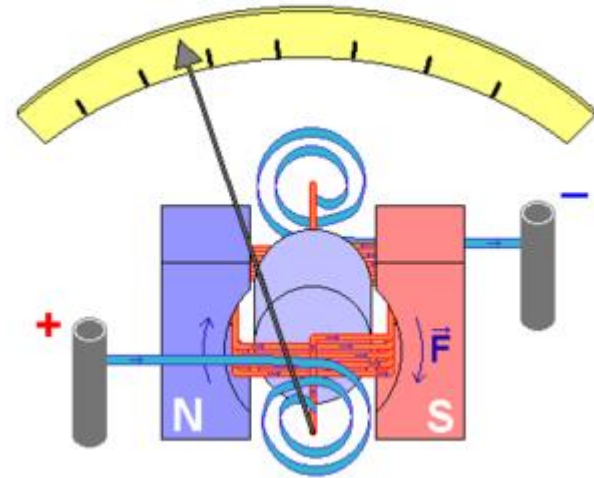
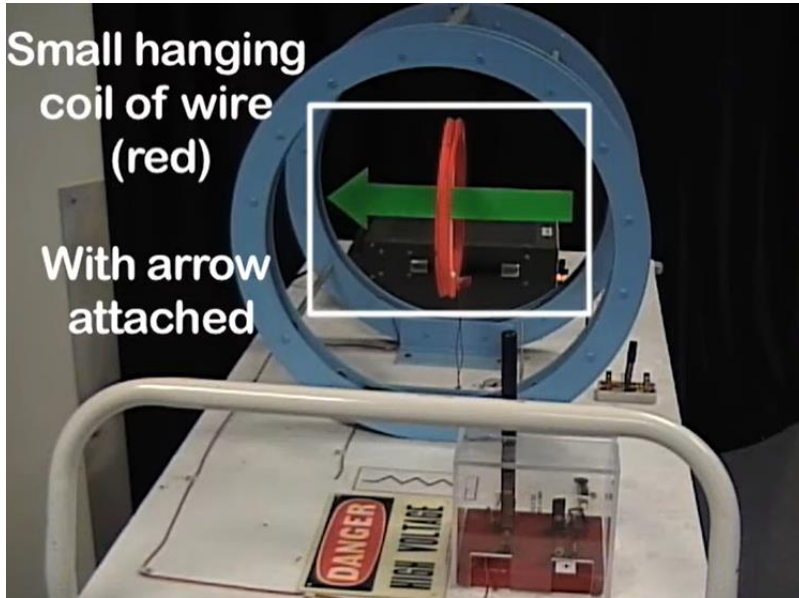
Магнитный момент контура с током:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

$$|\vec{n}| = 1$$

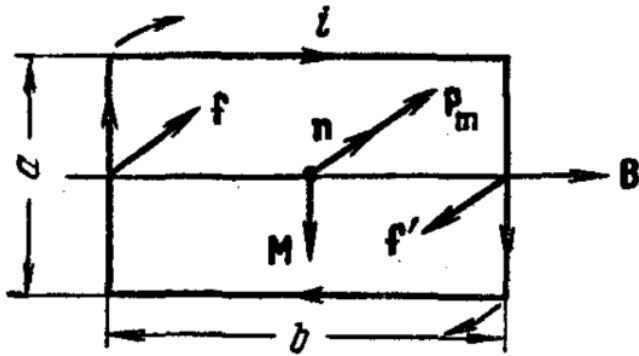
Контур в магнитном поле

Контур поворачивается так, чтобы магнитный момент контура совпал с линиями магнитного поля. На этом явлении основан принцип работы **гальванометра** – прибора, измеряющего малые значения токов.



Силы и момент сил, действующих на контур

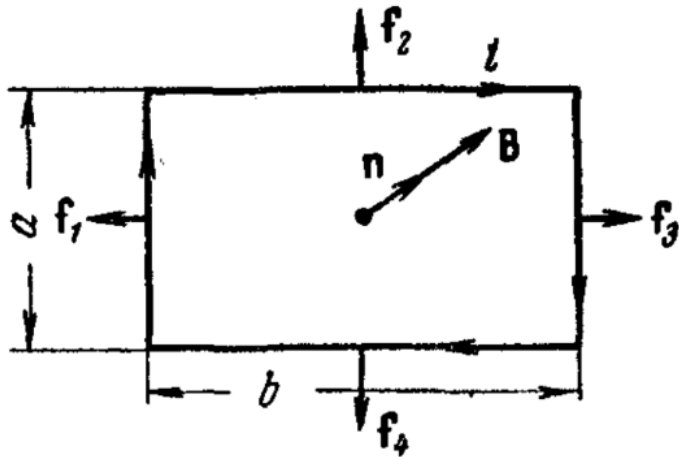
Контур с током i находится в магнитном поле с индукцией B , ориентированной вдоль плоскости контура.



Здесь вывод на доске

Силы и момент сил, действующих на контур

Контур с током i находится в магнитном поле с индукцией B , ориентированной вдоль плоскости контура.



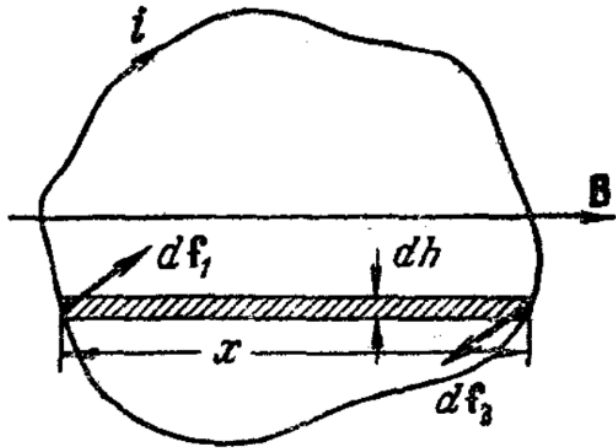
Здесь вывод на доске

$\vec{p}_m \uparrow \uparrow \vec{B}$ - устойчивое равновесие

$\vec{p}_m \uparrow \downarrow \vec{B}$ - неустойчивое равновесие

Контур произвольной формы

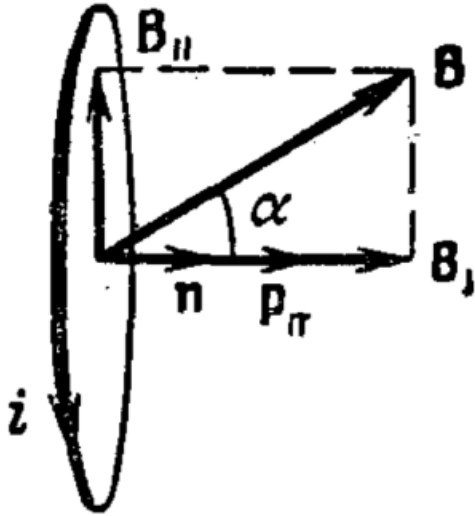
Контур с током i находится в магнитном поле с индукцией B , ориентированной вдоль плоскости контура.



Здесь вывод на доске

Произвольная ориентация контура

Контур с током i находится в магнитном поле с индукцией B



Здесь вывод на доске

Здесь вывод на доске

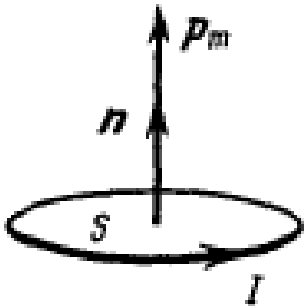
Из многочисленных опытов:

Любое вещество при помещении в магнитное поле начинает намагничиваться (приобретать магнитный момент) и создавать собственное магнитное поле.

Почему это происходит?

Гипотеза Ампера:

магнитные свойства вещества обусловлены элементарными замкнутыми токами, циркулирующими внутри небольших частиц вещества – атомов, молекул.



Магнитный момент контура с током:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

$$|\vec{n}| = 1$$

Любое вещество является **магнетиком** – обладает способностью приобретать магнитный момент – намагничиваться.

Намагниченное вещество (токи намагничивания) создает собственное магнитное поле, которое вместе с внешним (токи проводимости) образует результирующее поле в веществе.

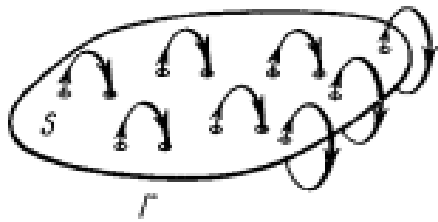
Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции справедлива при наличии магнетика (магнитное поле токов намагничивания и токов проводимости не имеет источников, линии поля замкнуты).

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

Поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю.

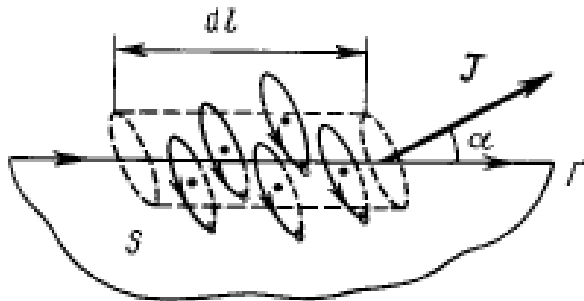
$$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}')$$

Намагниченность – количественная характеристика намагничивания веществ – суммарный магнитный момент в единице объема вещества.



$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_m$$

$$[J] = \frac{A}{M}$$



Здесь вывод на доске

Индукция \mathbf{B} – силовая характеристика магнитного поля.

Намагниченность \mathbf{J} – количественная характеристика намагничивания вещества (действие молекулярных токов).

Напряженность \mathbf{H} – вспомогательная характеристика магнитного поля, описывает действие только токов проводимости.

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I = \mu_0 (I_{\text{пр}} + I_{\text{м}}) \quad \oint \vec{J} d\vec{l} = I_{\text{м}}$$

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{пр}}$$

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

$$[H] = \frac{\text{А}}{\text{М}}$$

Для большинства изотропных магнетиков:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}$$

χ – магнитная восприимчивость среды, безразмерная величина. Может быть положительной и отрицательной

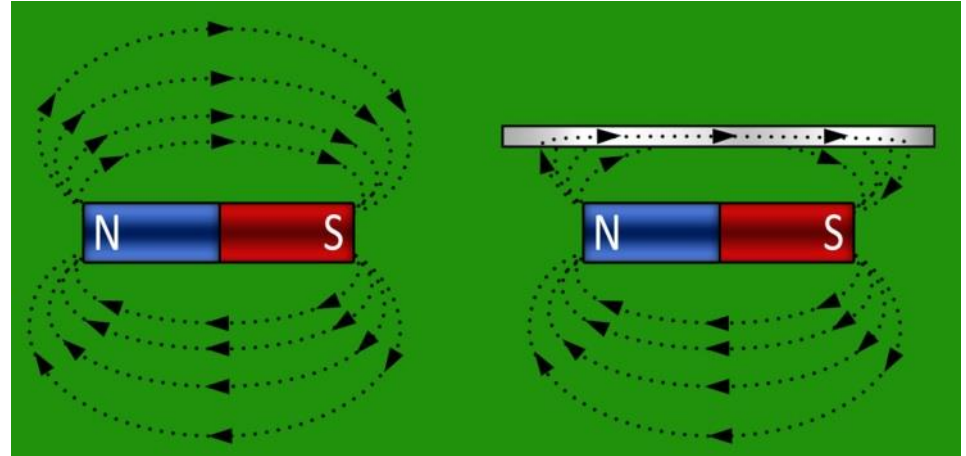
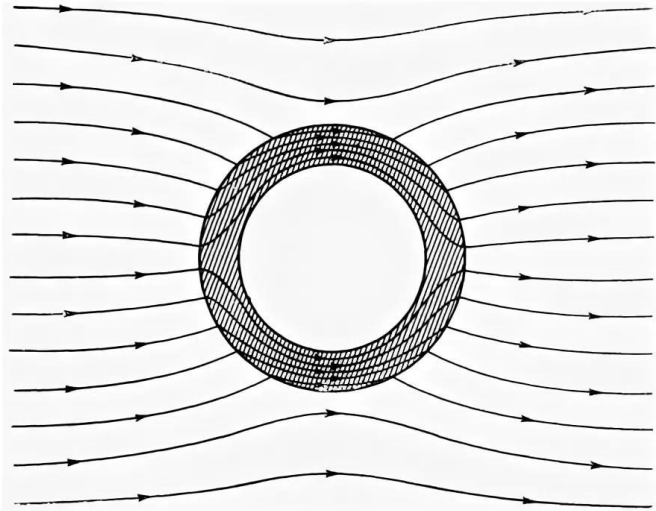
$$\chi = \mu - 1$$

μ - магнитная проницаемость среды, безразмерная величина.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{J} + \vec{H}) = (\chi + 1)\mu_0\vec{H} = \mu\mu_0\vec{H}$$

Есть еще граничные условия для индукции, напряженности и намагниченности... они как и граничные условия для тройки векторов, описывающих электрическое поле всегда записываются с уравнениями Максвелла.

Линии магнитного поля преломляются при попадании в вещество. На этом эффекте основан метод магнитного экранирования.



В отличие от электрического поля магнитное поле полностью экранировать не удастся.

TABLE 28–1 Paramagnetism and Diamagnetism: Magnetic Susceptibilities

Paramagnetic substance	χ_m	Diamagnetic substance	χ_m
Aluminum	2.3×10^{-5}	Copper	-9.8×10^{-6}
Calcium	1.9×10^{-5}	Diamond	-2.2×10^{-5}
Magnesium	1.2×10^{-5}	Gold	-3.6×10^{-5}
Oxygen (STP)	2.1×10^{-6}	Lead	-1.7×10^{-5}
Platinum	2.9×10^{-4}	Nitrogen (STP)	-5.0×10^{-9}
Tungsten	6.8×10^{-5}	Silicon	-4.2×10^{-6}

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ μ .

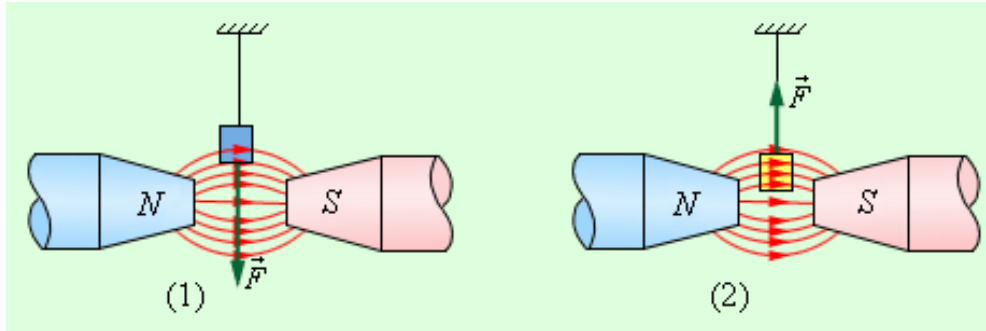
В левой части верхней таблицы -- парамагнитные вещества, в правой -- диамагнитные; в нижней таблице -- ферромагнитные вещества и материалы.

Воздух	1,000 000 36	Графит	0,999 895
Олово	1,000 004	Ртуть	0,999 975
Алюминий	1,000 023	Серебро	0,999 981
Платина	1,000 36	Ртуть	0,999 989
Марганец	1,000 4	Медь	0,999 991
Кобальт	174	Мягкая сталь	2200
Чугун неотожженный	240	Трансформаторная сталь	7500
Чугун отожженный	620	Вакуумное железо	13 000
Никель	1120	Пермаллой	115 000

Что происходит с магнетиками при помещении в м.п.?

Парамагнетики (воздух, алюминий, платина и др.) и **ферромагнетики** (железо, кобальт, никель, различные соединения и др.) втягиваются в область более сильного поля.

Диамагнетики (азот, вода, серебро, висмут и др.) выталкиваются из внешнего магнитного поля.



<https://www.youtube.com/watch?v=u36QpPvEh2c>

<https://www.youtube.com/watch?v=1xFRtdN5IJA>

W. Lewin 21:50, 37:15

Электрон обладает :

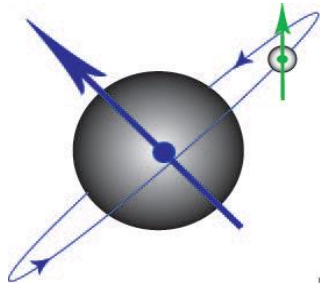
- магнитным моментом (замкнутый контур с током)
- вращающим моментом (частица с массой)
- собственным магнитным моментом (спином).

Магнитный момент электрона:

$$p_m = IS = \frac{\bar{e}}{T} S = \bar{e}vS$$

Механический момент (момент импульса электрона):

$$L = I\omega = mr^2\omega = mr^22\pi\nu$$



Гиромагнитное отношение

$$\Gamma = \frac{\vec{p}_m}{\vec{L}} = -\frac{\bar{e} \nu \pi r^2}{m r^2 2\pi \nu} = -\frac{\bar{e}}{2m}$$

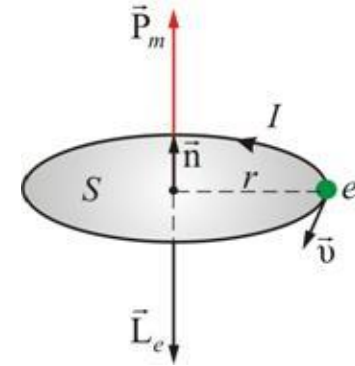
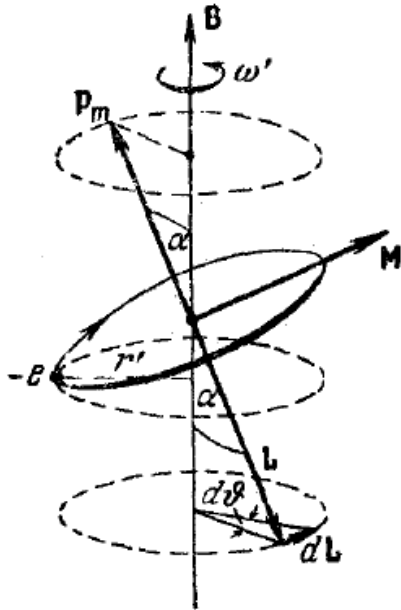
Удельный заряд электрона

$$\frac{\bar{e}}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

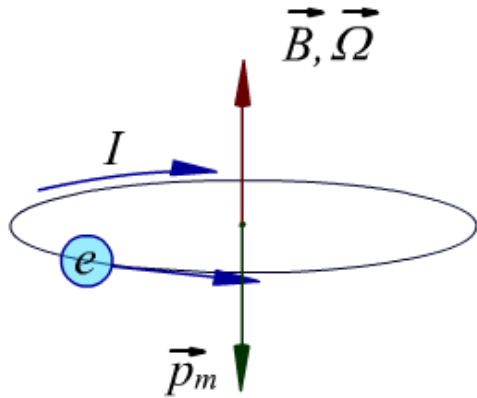
Электрон в атоме подобен волчку, т.е. под действием сил во внешнем магнитном поле совершает прецессионное движение (Ларморова прецессия).

Угловая скорость прецессии:

$$\Omega = \frac{\bar{e} B}{2m}$$



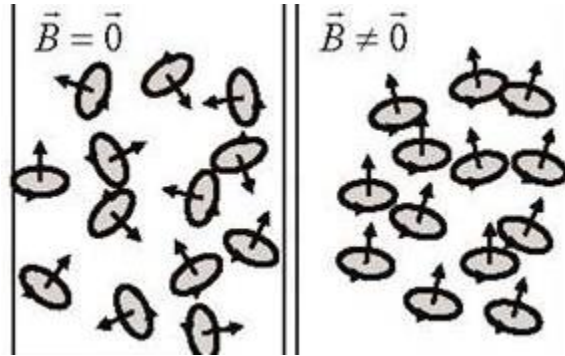
Диамагнетик – вещества, молекулы которых не обладают собственным магнитным моментом. Под действием внешнего магнитного поля в атомах и молекулах возникает магнитный момент, направленный противоположно вектору индукции внешнего поля.



При включении внешнего магнитного поля возникает дополнительное движение электрона – ларморова прецессия, при этом **все вещества** испытывают ларморову прецессию – проявляют диамагнитные свойства.

$$\vec{p}_m \uparrow \downarrow \vec{B}$$

Парамагнетики – вещества, молекулы которых обладают собственным магнитным моментом.



В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов ориентированы хаотично

$$\sum \vec{p}_m = 0 \quad \vec{J} = 0$$

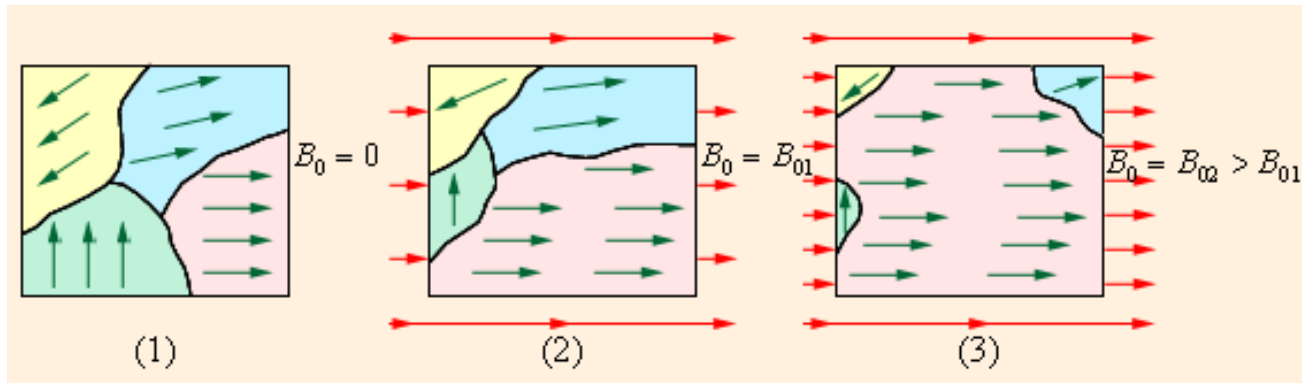
Во внешнем поле на каждую молекулу действуют силы, стремящиеся развернуть магнитный момент вдоль линий поля

$$\sum \vec{p}_m \neq 0 \quad \vec{J} \uparrow \uparrow \vec{B}, \vec{H}$$

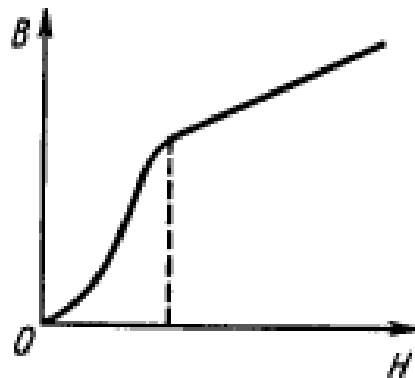
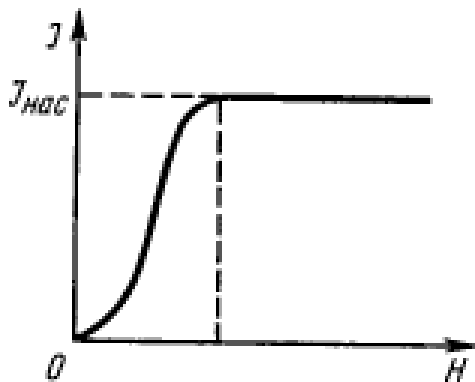
Сильномагнитные вещества, способные сохранять намагниченность в отсутствии внешнего магнитного поля (*Ferrum* – железо, кобальт, никель, сплавы).

Электроны в атомах ферромагнетиков обладают **сильным собственным магнитным моментом (спином)**;

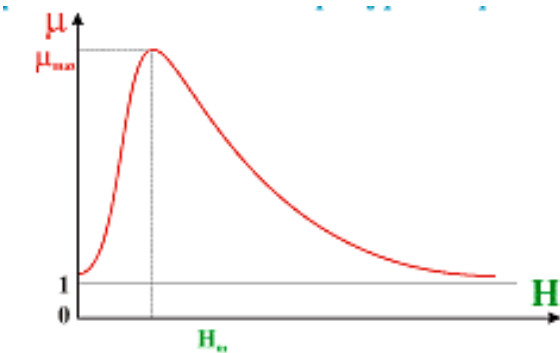
В ферромагнетиках возникают **домены** – области самопроизвольной намагниченности. В магнитном поле происходит ориентация целых доменов по направлению магнитного поля.



$$\mu = 10^2 - 10^5$$

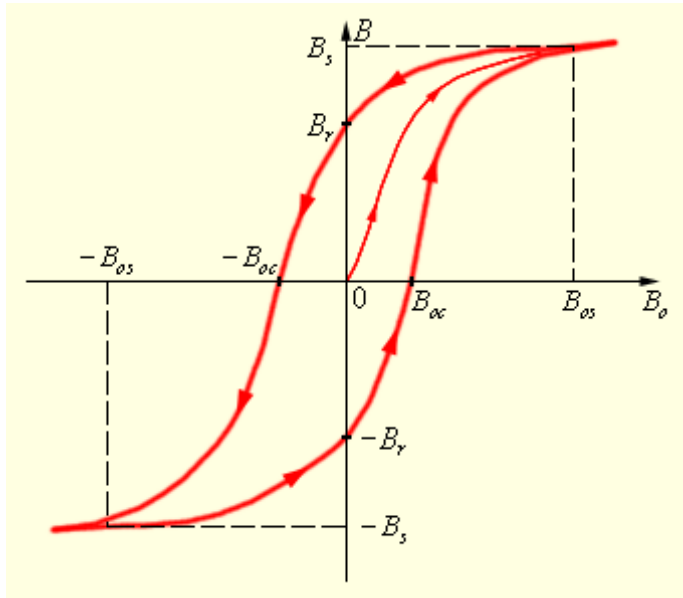


Магнитная проницаемость μ зависит от напряженности магнитного поля:



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

Намагничивание ферромагнетика зависит не только от индукции магнитного поля, но и от предыдущих состояний вещества.



B_r – остаточная индукция
(ферромагнетик становится
постоянным магнитом);
 B_{oc} – коэрцитивная сила.

Магнито-мягкие материалы –
небольшое значение B_{oc} ,
Магнито-жесткие (твердые)
материалы обладают большим
значением B_{oc}

С увеличением температуры способность намагничиваться у ферромагнетиков уменьшается.

Температура Кюри – температура, выше которой ферромагнитные свойства исчезают, а ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Кобальт - 1150° C;

Железо - 770° C;

Никель - 360° C;

Гадолиний -17° C.

1. Моделирование магнитного поля, создаваемого прямыми токами. (с первой лекции)

Входные параметры: величина и расположение токов в двумерном пространстве.

Итоговый вид модели: Исполняемая модель, интегрируемая в html документ, на которой показан вид (линии) магнитного поля в двумерном пространстве, создаваемого несколькими токами ($N < 5$).

1. Поясните природу диамагнетизма. Каким веществам присущ диамагнетизм? Может ли диамагнетизм быть описан на основе представлений классической физики? Ответ обоснуйте.
2. Поясните физические принципы записи информации на жесткий диск.
3. The magnetic moment of the Earth is approximately $8.00 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$. Imagine that the planetary magnetic field were caused by the complete magnetization of a huge iron deposit with density $7\,900 \text{ kg/m}^3$ and approximately 8.50×10^{28} iron atoms/ m^3 .
 - (a) How many unpaired electrons, each with a magnetic moment of $9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$, would participate?
 - (b) At two unpaired electrons per iron atom, how many kilograms of iron would be present in the deposit?





**Спасибо
за внимание!**

muzychenko@itmo.ru



BE in LOV  
with physics