

Електрика та магнетизм

Лекція 9. Постійне магнітне поле.
Магнітні властивості речовин

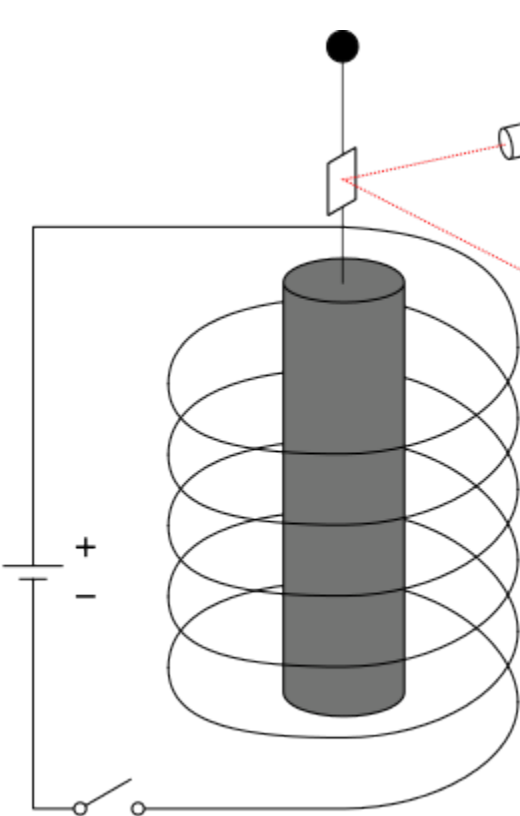
Гіромагнітне співвідношення

$$\vec{m} = \frac{1}{2c} \sum q_i [\vec{r}_i \vec{v}_i]$$

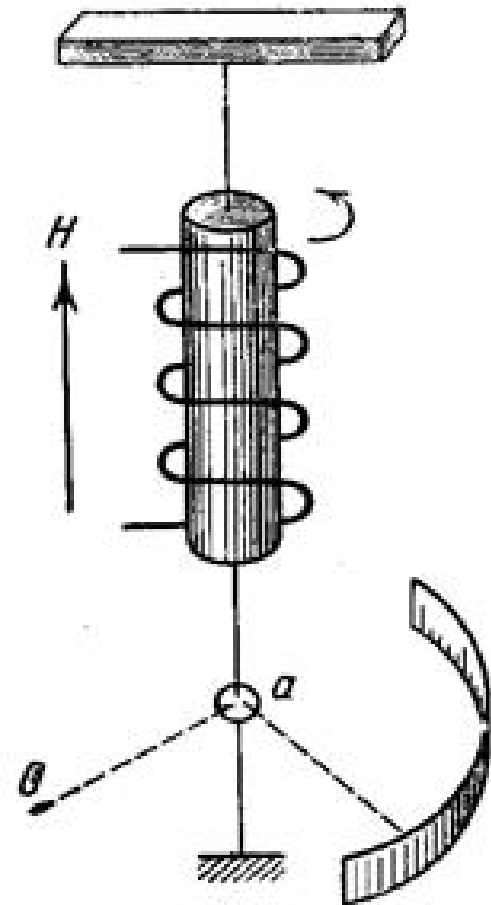
$$\vec{L} = \sum m_i [\vec{r}_i \vec{v}_i]$$

$$\vec{m} = \frac{e}{2mc} \vec{L}$$

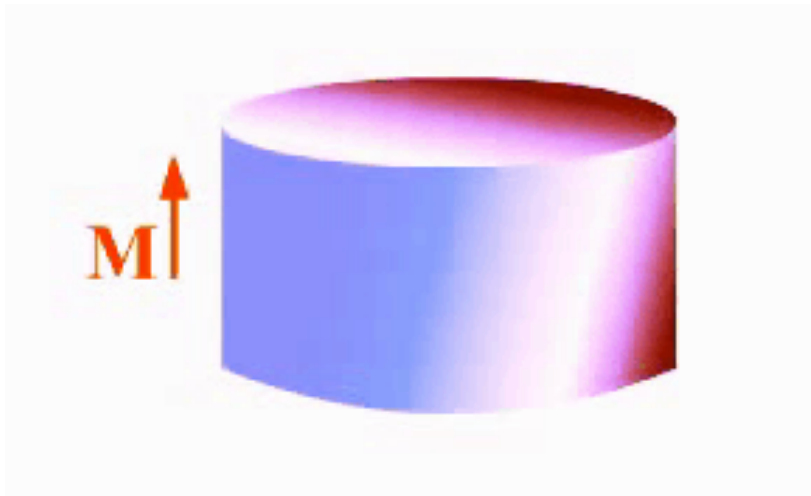
Эффект Эйнштейна — де Хааза (эффект Эйнштейна — де Гааза, эффект Эйнштейна — де Хааза — Ричардсона) — один из магнитомеханических эффектов, состоит в том, что тело (ферромагнетик) при намагничивании вдоль некоторой оси приобретает относительно неё вращательный импульс, пропорциональный приобретённой намагниченности. Это явление было предсказано в 1908 году О. Ричардсоном, открыто и теоретически объяснено в 1915 году Эйнштейном и нидерландским физиком В. де Хаазом.



Цилиндр из мягкого железа подвешивали внутри катушки на тонкой нити так, чтобы его ось была расположена вертикально и совпадала с направлением нити. С помощью катушки цилиндр можно было намагничивать параллельно его оси. При изменении направления тока в катушке наблюдались крутильные колебания цилиндра. Для усиления эффекта через катушку пропускали переменный ток, частота которого совпадала с собственной частотой крутильных колебаний цилиндра.



Эффéкт Бэрнетта — усиление намагниченности вращающегося ферромагнетика вдоль оси его вращения. Открыт Сэмюэлем Барнеттом в 1909 году. Эффект показывает связь атомных магнитных моментов с механическими моментами. Эффект обратен эффекту Эйнштейна — де Хааза.



Эффект Барнетта заключается в намагничивании тел путем их вращения при отсутствии внешнего магнитного поля. Эффект реализуется в ферромагнетиках.

Вещества

Диамагнетики

$$\mu < 1$$

Парамагнетики

$$\mu > 1$$

Ферромагнетики

$$\mu \gg 1$$

Вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле

Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы – ферриты.

Слабо-магнитные вещества

Магнитные свойства вещества

МАГНЕТИКИ

СЛАБОМАГНИТНЫЕ ВЕЩЕСТВА

СИЛЬНОМАГНИТНЫЕ ВЕЩЕСТВА

ДИАМАГНЕТИКИ

- Водород
- Бензол
- Вода
- Медь
- Стекло
- Кварц
- Каменная соль
- Висмут
- Графит

$$\mu \leq 1$$

μ - магнитная проницаемость вещества

ПАРАМАГНЕТИКИ

- Азот
- Воздух
- Кислород
- Эбонит
- Алюминий
- Вольфрам
- Платина

$$\mu \geq 1$$

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

- Железо
- Никель
- Кобальт

$$\mu \gg 1$$

ДИАМАГНЕТИКИ:

- внутреннее магнитное поле направлено

Противоположно внешнему магнитному полю, но слабо выражено.

ПАРАМАГНЕТИКИ:

- внутреннее магнитное поле направлено также, как и внешнее магнитное поле, т.е. усиливает его.

ФЕРРОМАГНЕТИКИ:

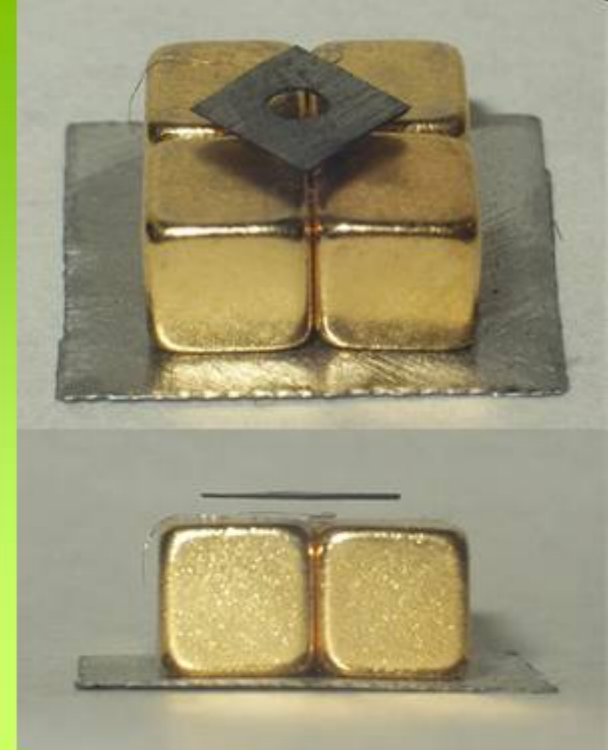
- внутреннее магнитное поле в 100-1000 раз больше внешнего магнитного поля

μ - Показывает во сколько раз индукция магнитного поля в одной среде больше или меньше индукции магнитного поля в вакууме

Диамагнетики

- вода, висмут, медь, золото, сера, ртуть, хлор, инертные газы и практически все органические соединения.

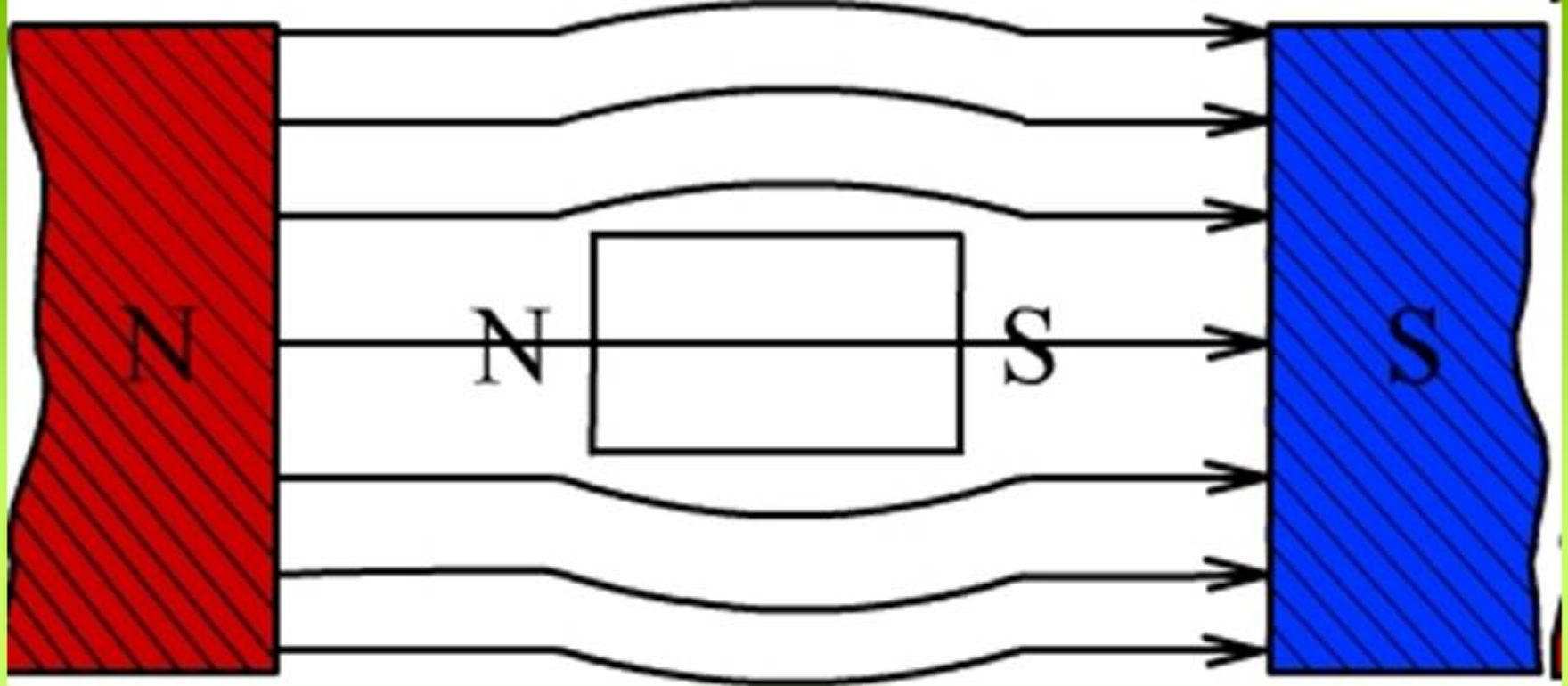
- Если стержень из диамагнетика подвесить в вакууме в однородном магнитном поле, то в положении равновесия он установится перпендикулярно линиям магнитной индукции



Относительная магнитная проницаемость веществ

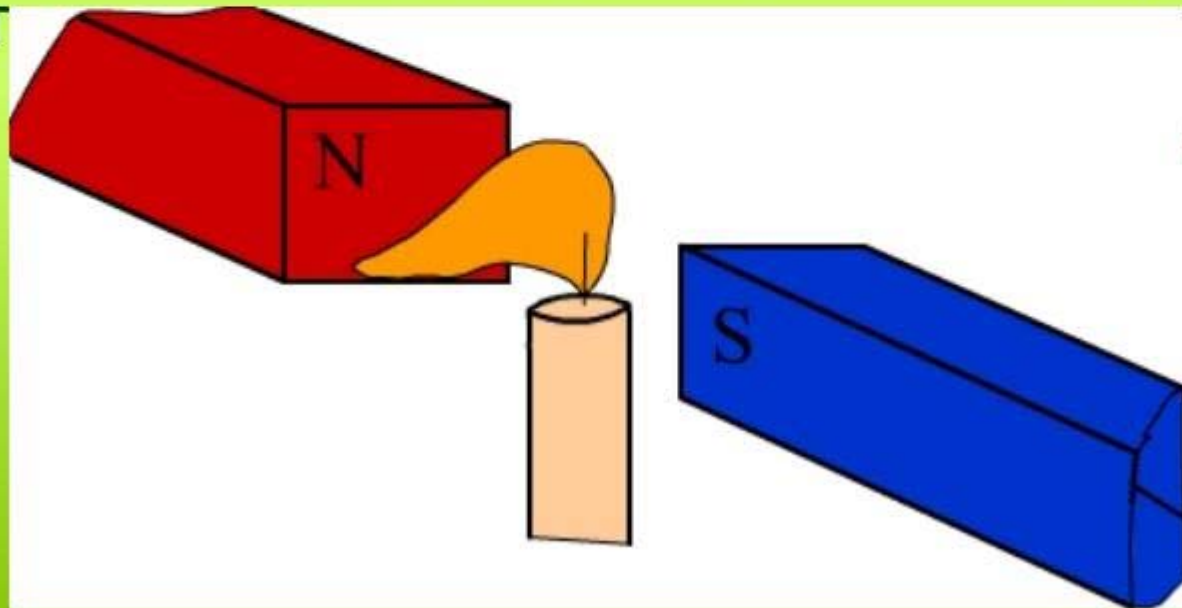


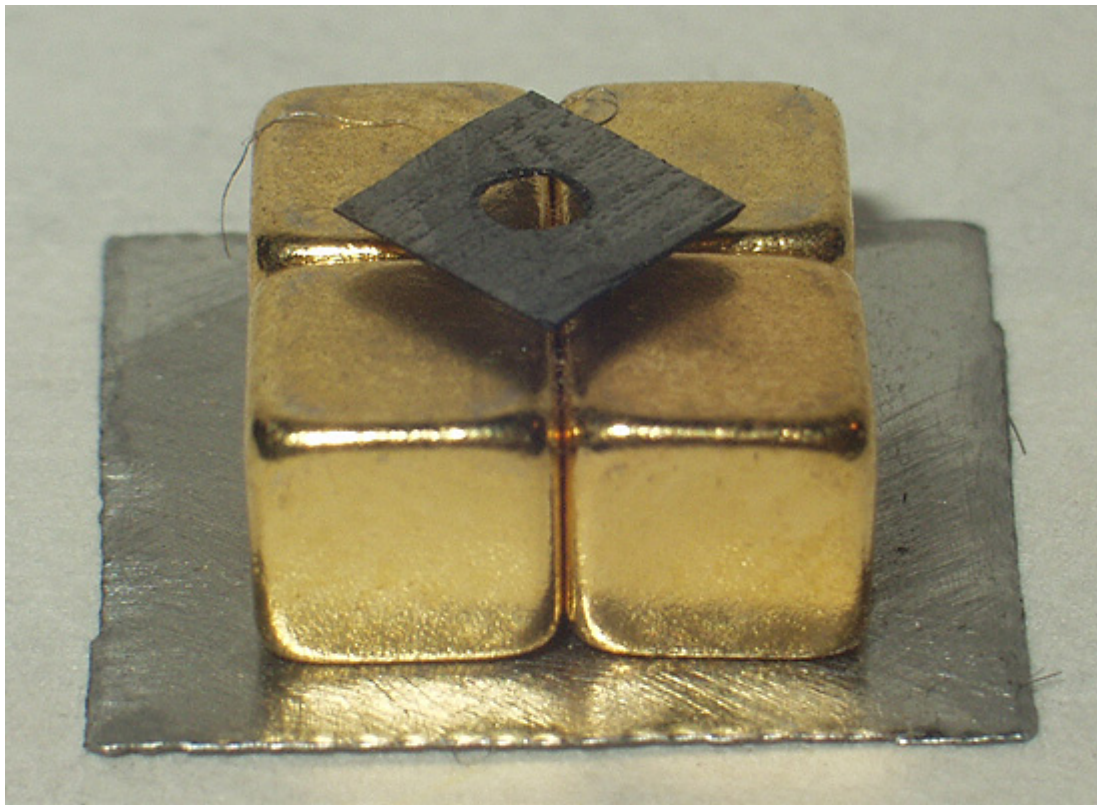
Парамагнетики	μ	Диамгнетики	μ
Алюминий	1,000023	Висмут	0,999824
Воздух	1,00000038	Вода	0,999991
Вольфрам	1,000175	Водород	0,999999937
Кислород	1,0000019	Золото	0,999963
Олово	1,0000044	Медь	0,999991
Платина	1,000360	Серебро	0,999981



- Магнитное поле внутри диамагнитных веществ несколько слабее, чем снаружи. Внешнее поле вблизи диамагнетика искажается; силовые линии поля как бы выталкиваются из диамагнитного тела.

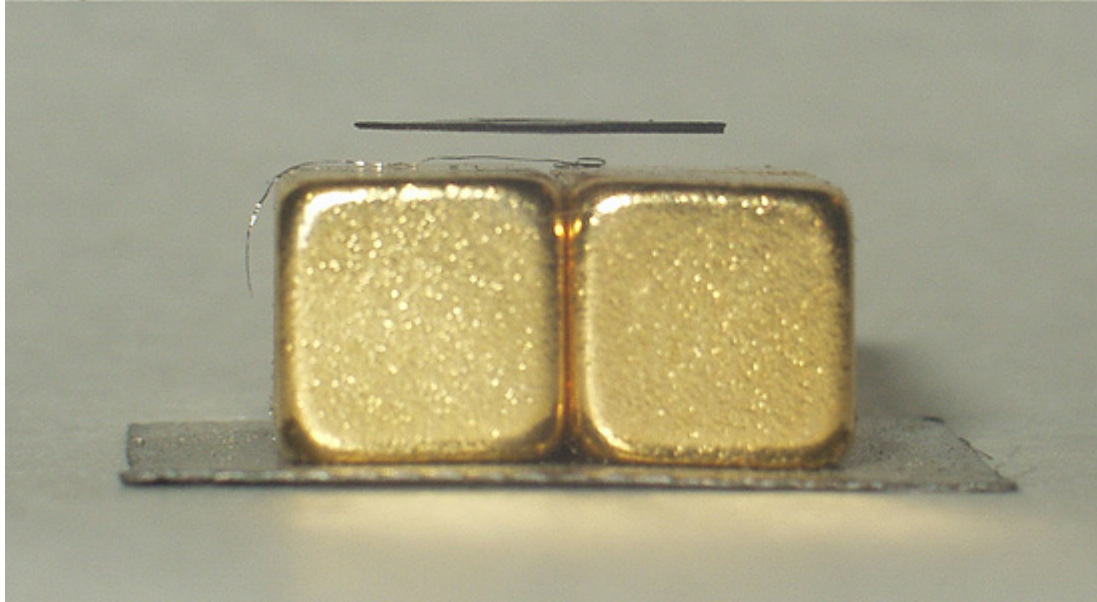
- Если диамагнетик поднести к определенному полюсу магнита, то он будет отталкиваться. Например, так как продуктами сгорания свечи являются диамагнитные частицы, то пламя свечи в магнитном поле будет от





Магнітна левітація

Пиролитический углерод
парящий над неодимовым
магнитом.





Живая лягушка
левитирует в
магнитном поле ~16
Тесла

Парамагнетики

Якщо векторна сума орбітальних магнітних моментів у всіх електронів атома (або молекули) не дорівнює нулю, то атом в цілому має певний магнітний момент m . Такі атоми (молекули) називають парамагнітними, а речовини, що з них складаються, — парамагнетиками. До парамагнетиків належать: кисень, оксид азоту, алюміній, платина, рідкісноземельні елементи, лужні й лужноземельні метали тощо. Процес намагнічування парамагнетика полягає в упорядкуванні розміщення магнітних моментів його атомів (або молекул) щодо напрямку магнітного поля, в подоланні при цьому впливу теплового руху, що зумовлює, якщо немає поля, хаотичний розподіл цих моментів. Магнітний момент окремого атома μ_m має значення порядку 10^{-23} Дж/Тл (10^{-20} ерг/Гс), але сукупна дія магнітних моментів усіх атомів, які містяться в одиниці об'єму речовини, приводить до ефекту намагнічування, що значно перевищує діамангнітний ефект. У парамагнітному тілі виникає власне поле, напрямлене в той самий бік, що й зовнішнє магнітне поле.

$$\chi = \frac{C}{T},$$

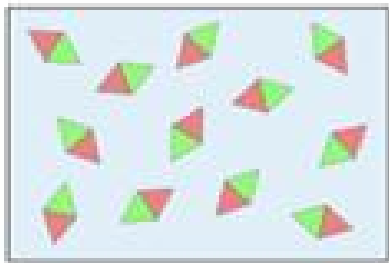
(9.42)

$$\mu = 1 + \chi = 1 + \frac{I}{H}.$$

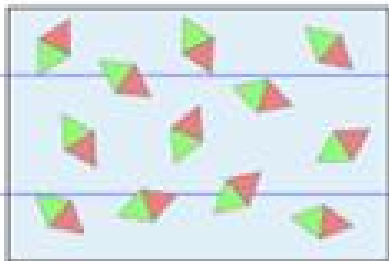


- До парамагнетика відносяться алюміній (Al), платина (Pt), багато інші метали (лужні і лужноземельні метали, а також сплави цих металів), кисень (O_2), оксид азоту (NO), оксид марганцю (MnO), хлорне залізо ($FeCl_2$) та ін.
- Парамагнетиками стають феро-і антиферомагнітні речовини при температурах, що перевищують, відповідно, температуру Кюрі або Нееля (температуру фазового переходу в парамагнітний стан).

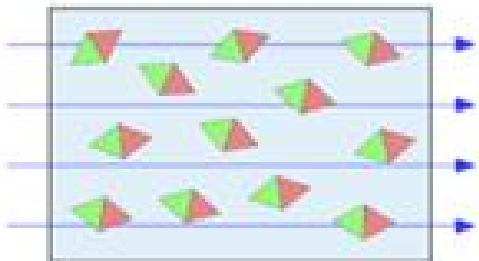




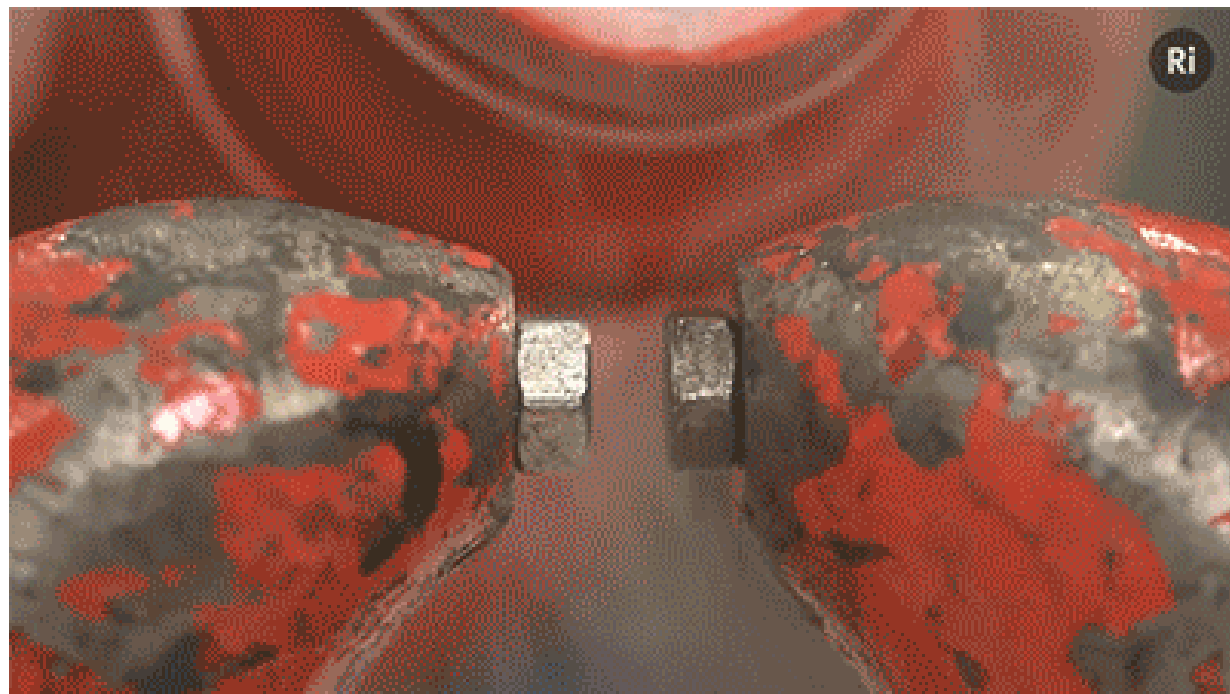
Парамагнетик в отсуствии магнитного поля.



Парамагнетик в присутствии слабого магнитного поля.

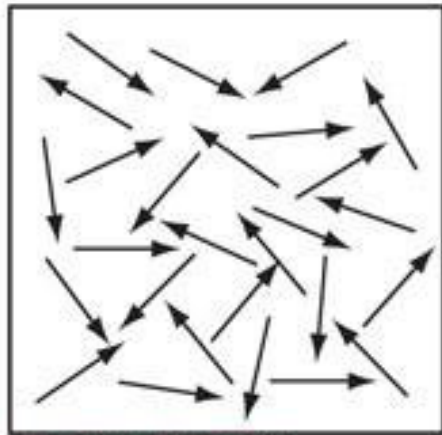


Парамагнетик в присутствии сильного магнитного поля.



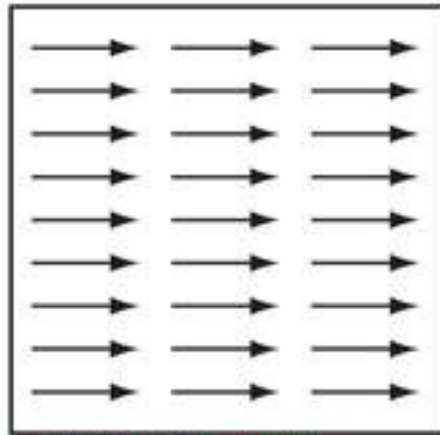
Рідкий кисень

Ферромагнетики. Эффект памяти. Домены. Гистерезис. Постоянные магниты. Точка Кюри.



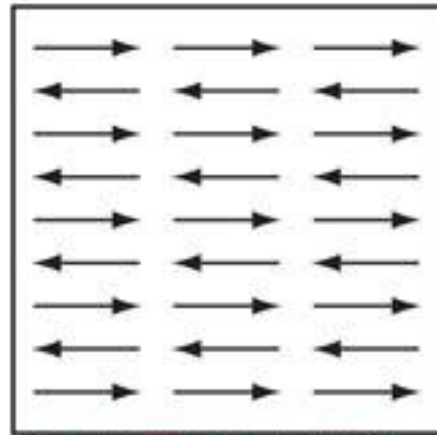
ПАРАМАГНЕТИКИ

магнитные моменты атомов
расположены хаотично



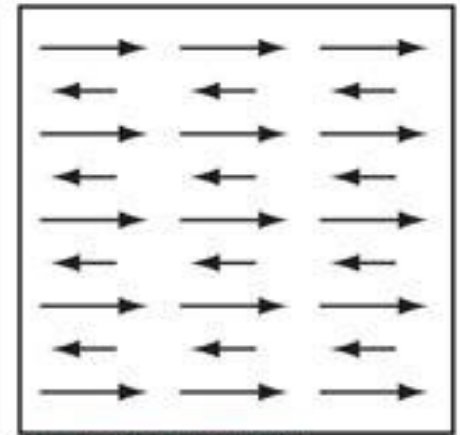
ФЕРРОМАГНЕТИКИ

магнитные моменты атомов
расположены параллельно



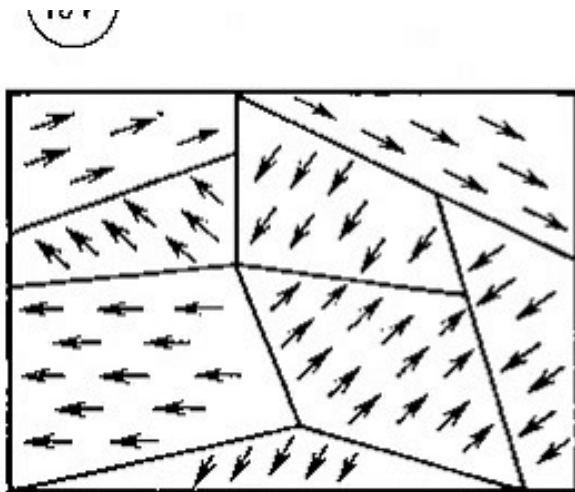
АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

магнитные моменты атомов
расположены антипараллельно

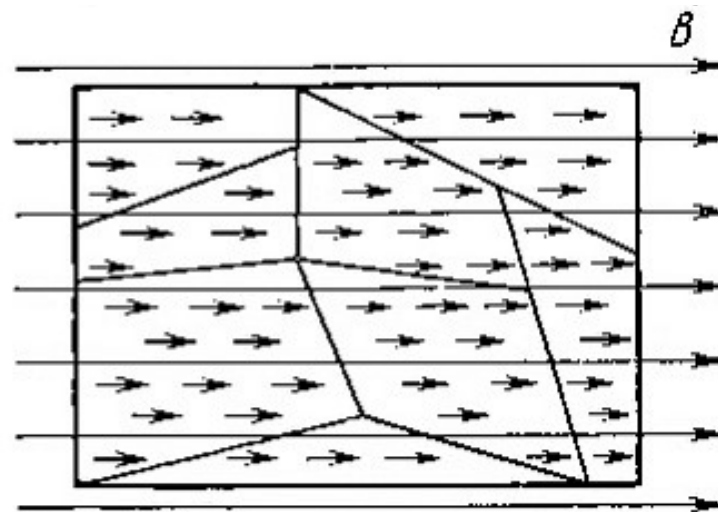


ФЕРРИМАГНЕТИКИ

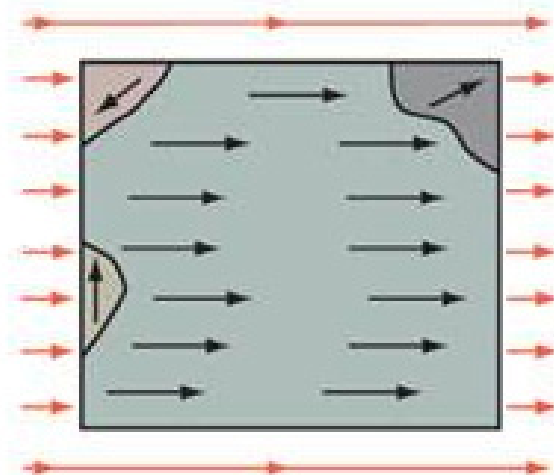
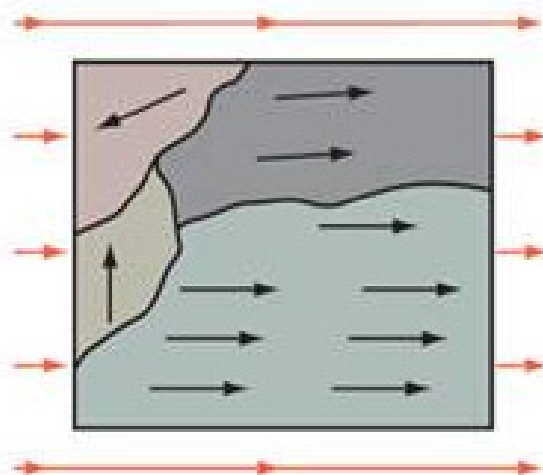
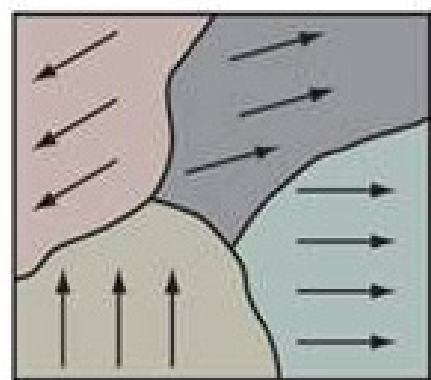
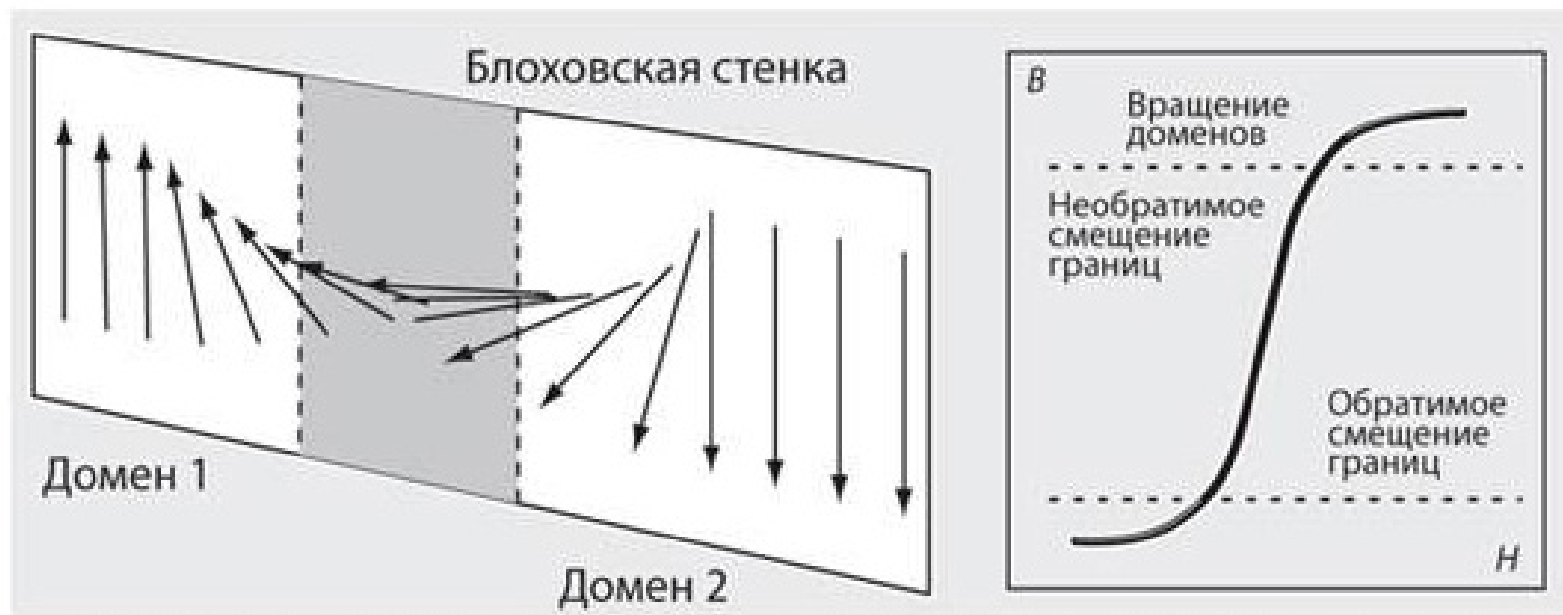
нескомпенсированные магнитные
моменты атомов расположены
антипараллельно

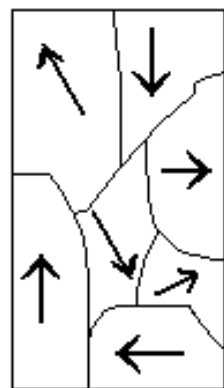


a

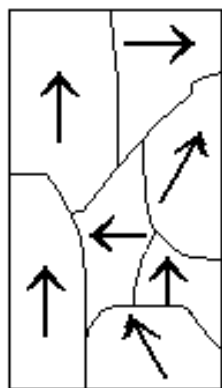


б

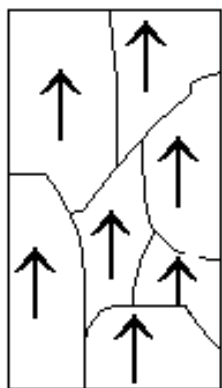




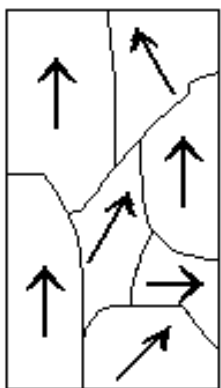
а



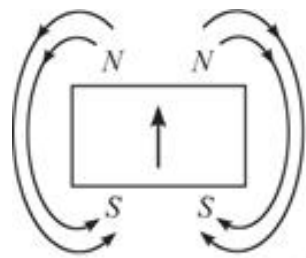
б



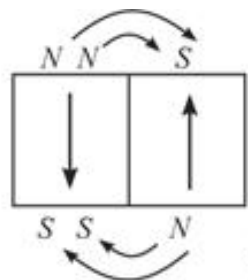
в



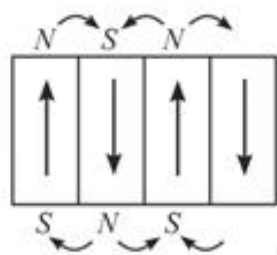
г



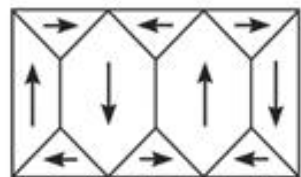
а



б



в



г

Поля нет



$H=0$

Слабое поле



H

Сильное поле



H

Насыщение



H

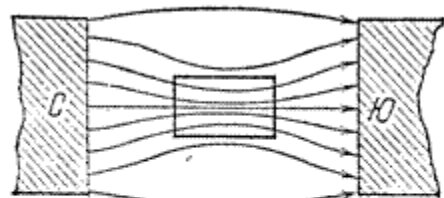
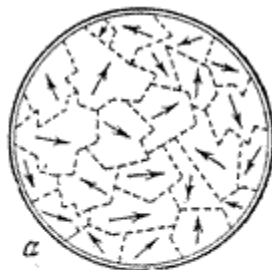
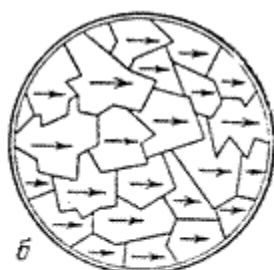


Рисунок 31 – ферромагнетик в магнитном поле

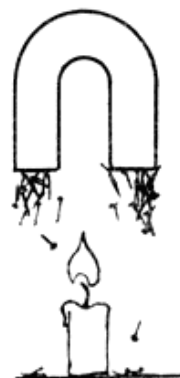


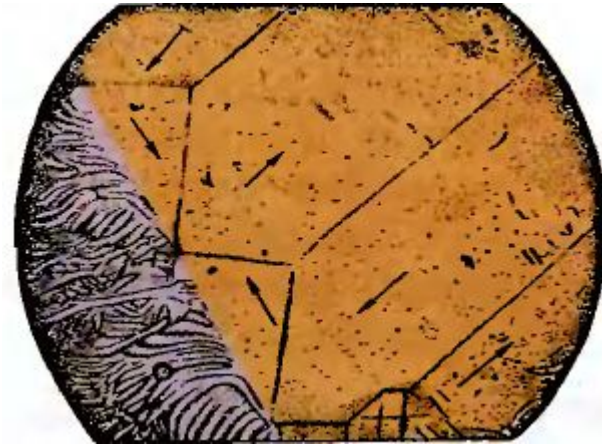
а



б

Рисунок 32 - Домены





Домены можно наблюдать, применив метод порошковых фигур. Поверхность ферромагнетика полируют, а на полированную поверхность наносят суспензию мелкого железного порошка в минеральном масле. Частицы порошка собираются на границах доменов и образуют фигуры, хорошо заметные при наблюдении в металлографический микроскоп.

Изменение размеров доменов при постепенном увеличении магнитной индукции внешнего поля

Точка Кюри

- ▶ Для каждого ферромагнетика существует определенная температура, выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком.
- ▶ У железа, например, температура Кюри равна $770\text{ }^{\circ}\text{C}$, у кобальта $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$, у никеля $360\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У гадолиния $17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

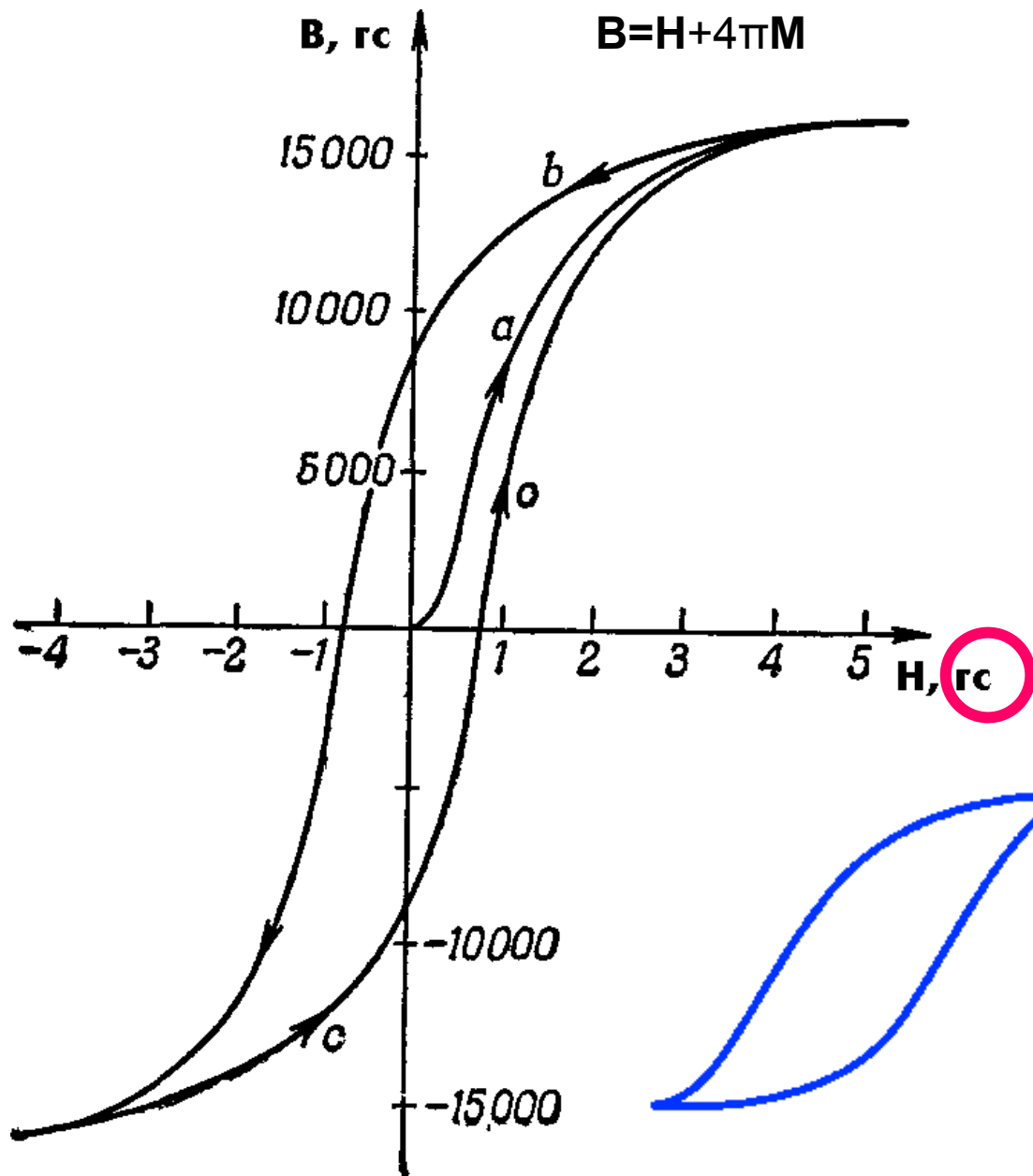


Рис. 3 Изменение петли гистерезиса при приближении к точке Кюри

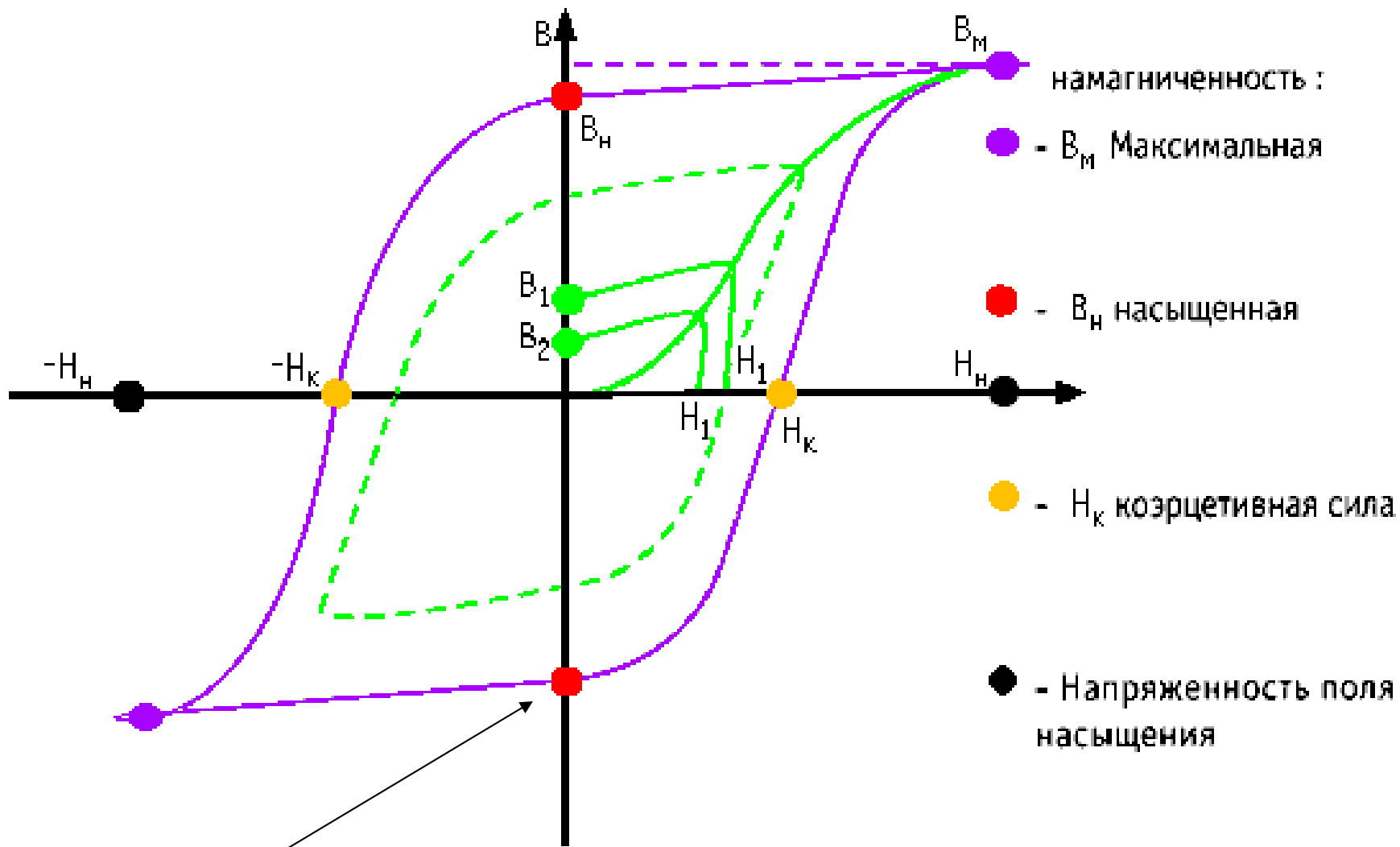
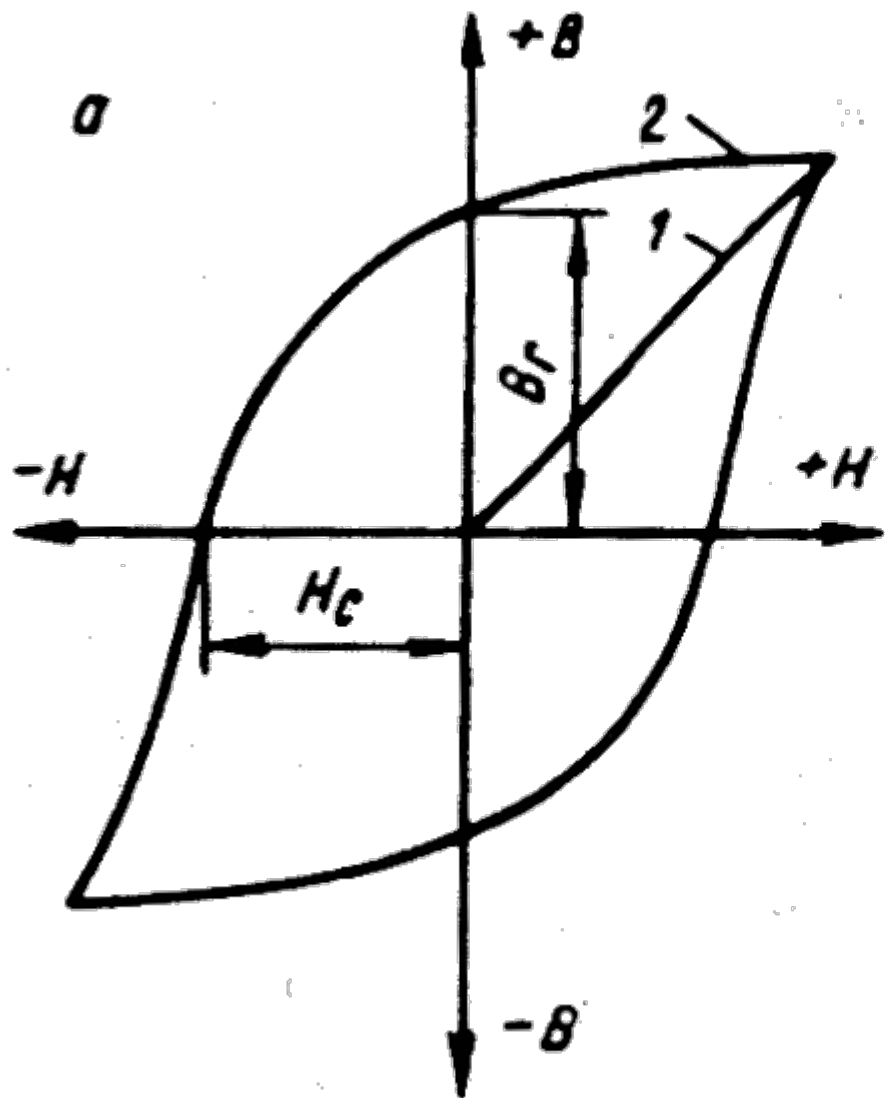


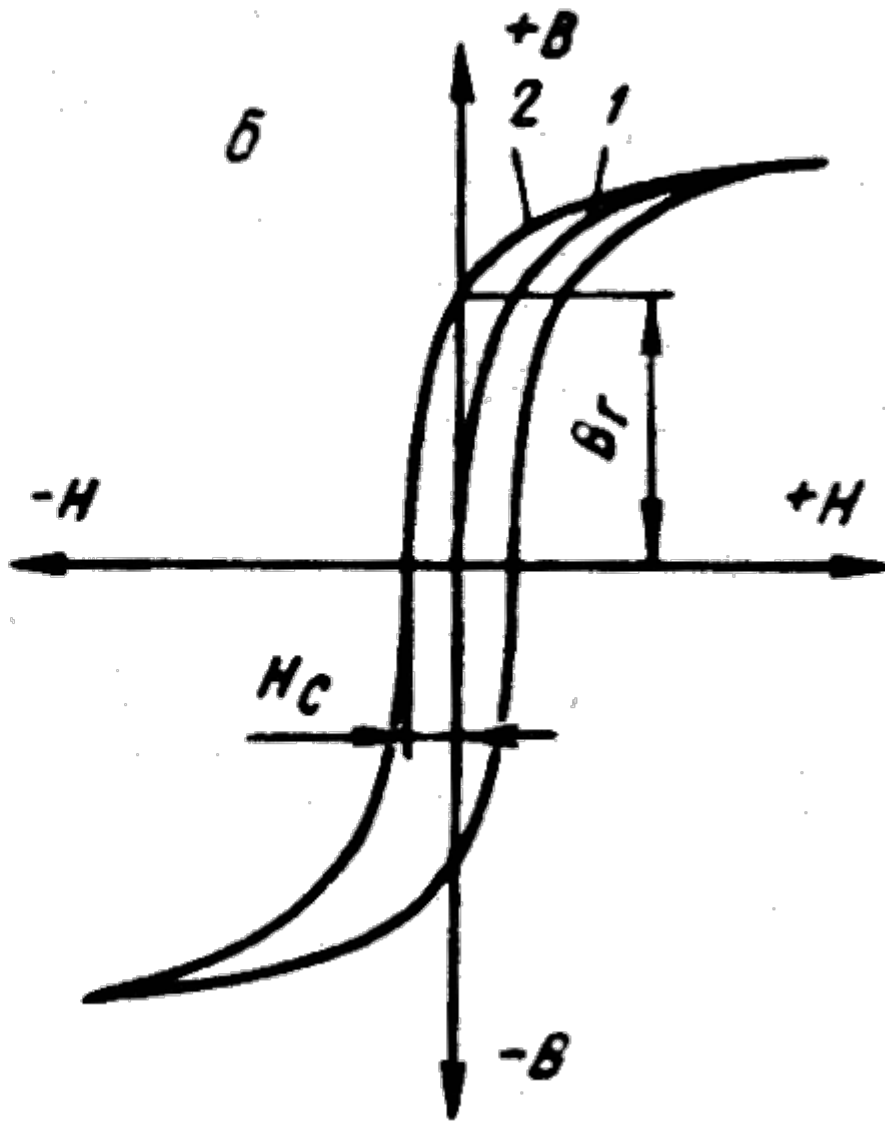
Рис. 2 Петля гистерезиса намагничивания и ее особые точки

Залишкова намагніченість

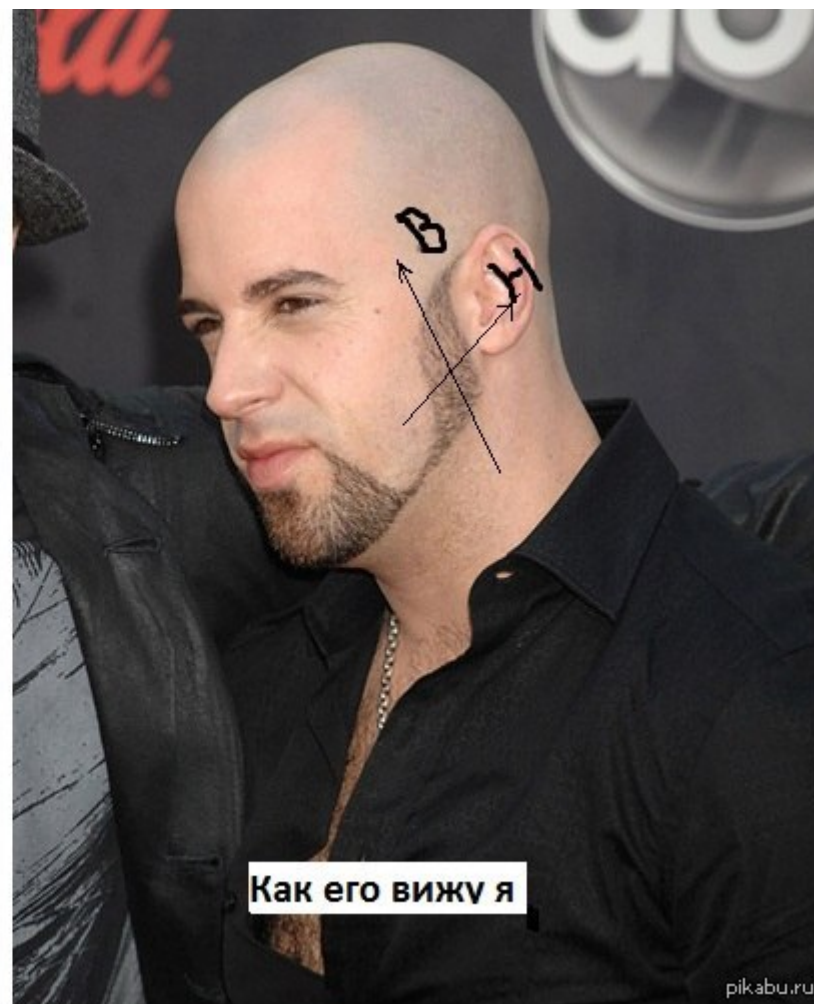
Магнітотвердий матеріал

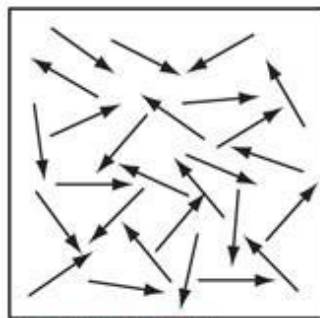


М'який, $H_c < 4$ кА/м

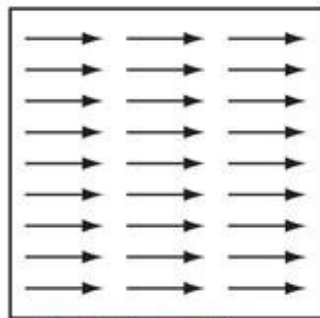


Втрата енергії на перемагнічення пропорційне площі петлі

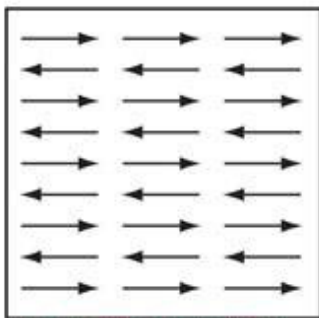




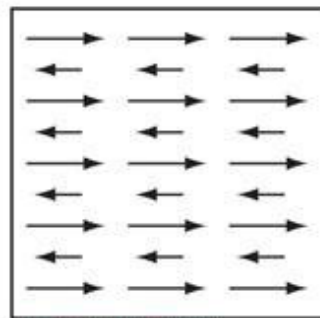
ПАРАМАГНЕТИКИ



ФЕРРОМАГНЕТИКИ



АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

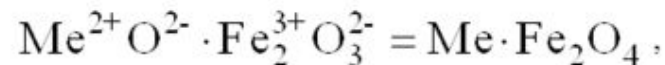


ФЕРРИМАГНЕТИКИ

Антиферромагнетики и ферримагнетики

Антиферромагнетики – это металлы, у которых спонтанно возникает антипараллельная ориентация спиновых магнитных моментов соседних одинаковых атомов (рис. 3.8, а). К антиферромагнетикам относятся металлы переходной группы - **хром** (Cr), **марганец** (Mn) и их окислы.

Ферримагнетики. Это материалы, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. К ферримагнетикам относятся **ферриты** - сложные химические соединения, характеризующиеся антипараллельным расположением неравных магнитных моментов соседних атомов, представляющих различные химические элементы, входящие в состав феррита. Химическая формула феррита записывается в виде



где Me^{2+} - катион двухвалентного металла, так называемый *характеризующий ион*. Ориентация спиновых магнитных моментов атомов соседних ячеек, входящих в состав ферримагнетика, условно изображена на рис. 3.8, б.



Рис. 3.8. Условные изображения ориентации спиновых магнитных моментов в различных материалах: а - антиферромагнетики, б - ферримагнетики

Сегнетоелектрики та антисегнетоелектрики.

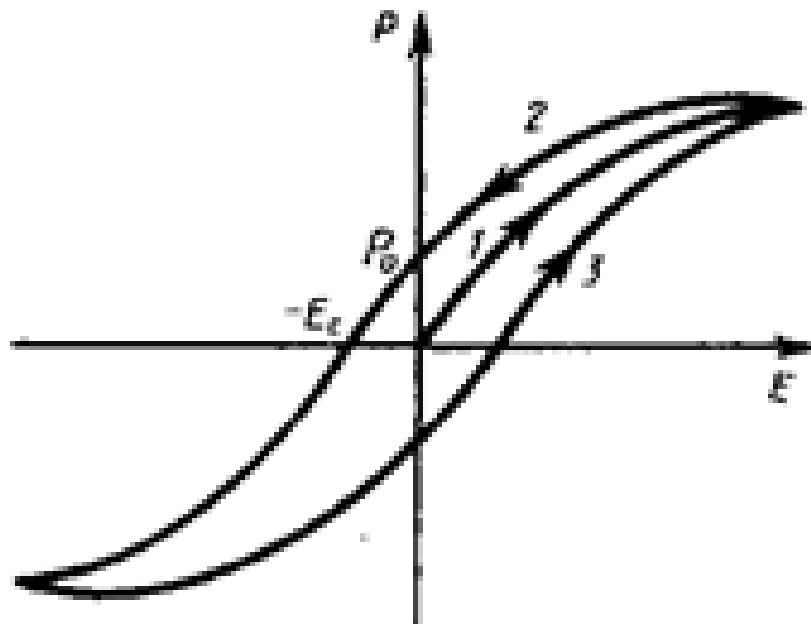
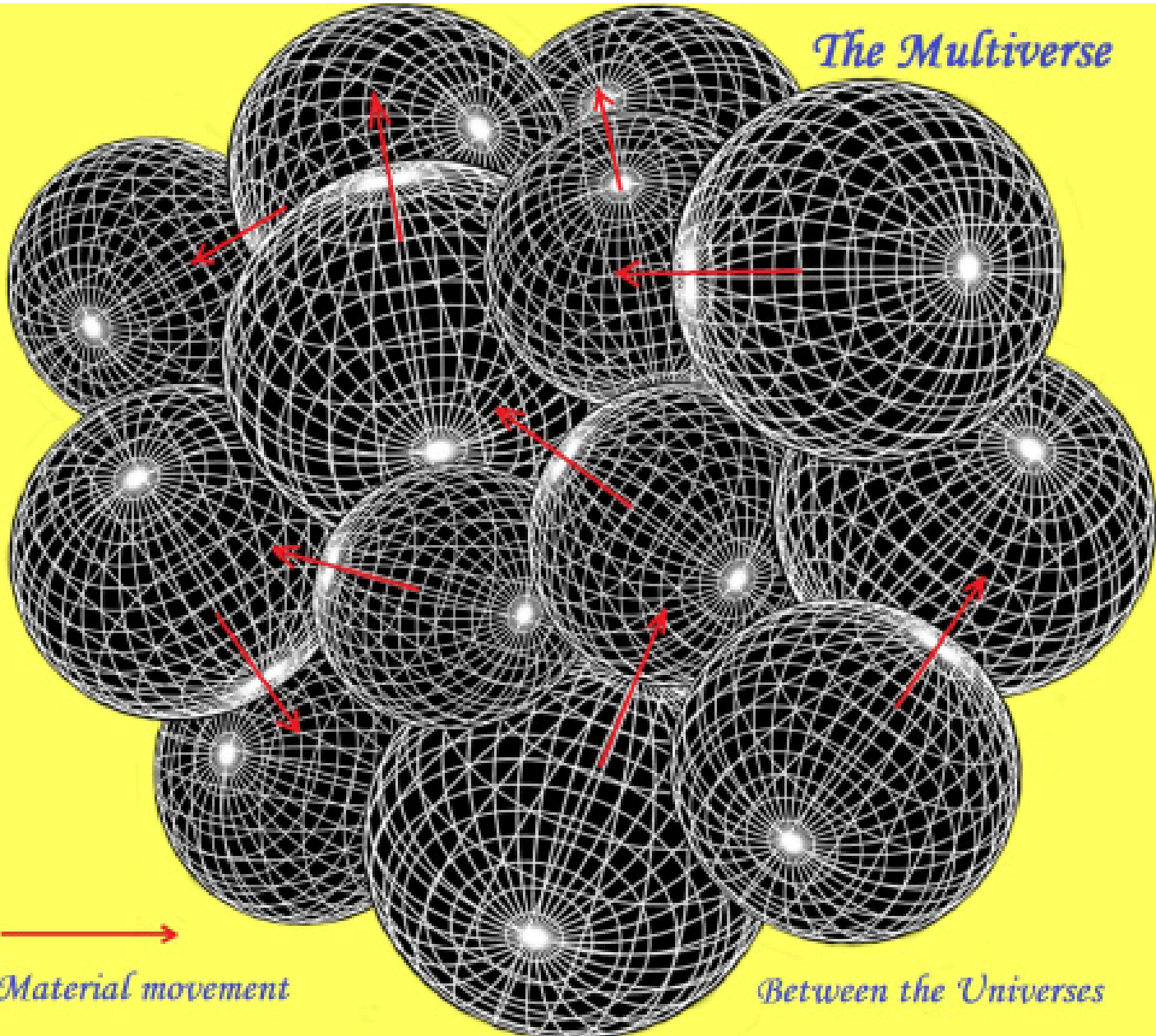


Рис. 140

Спонтанне порушення симетрії у Всесвіті.
Домени, стінки. Різна фізика. Multiverse.

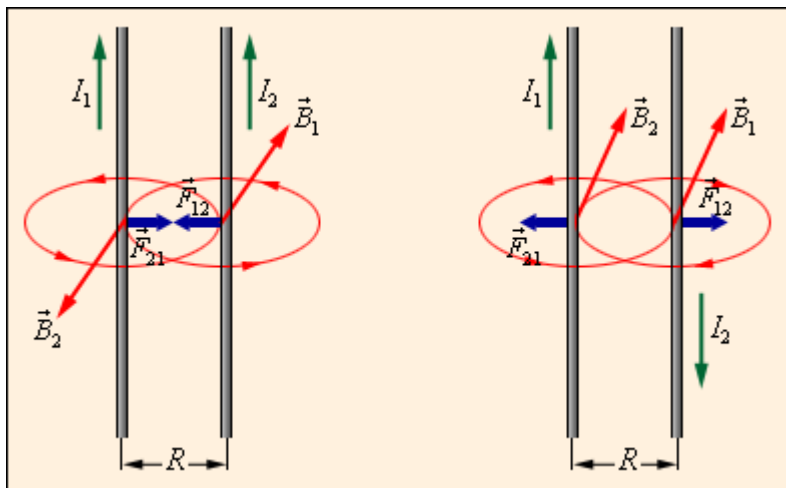


The Multiverse



Material movement

Between the Universes



Магнітне поле та магнітна взаємодія електричних струмів

$$\vec{B} = \frac{\mu}{c} \int \frac{[\vec{j}\vec{r}]}{r^3} dV = \frac{\mu I}{c} \int \frac{[d\vec{l}\vec{r}]}{r^3}$$

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \text{rot}\vec{A} = \text{rot} \frac{1}{c} \int \frac{\vec{j}dV}{r} = \frac{1}{c} \int \text{rot} \frac{\vec{j}dV}{r} = \frac{1}{c} \int dV \text{rot}(\vec{j}r^{-1}) = \\ &= \frac{1}{c} \int \left\{ r^{-1} \text{rot}(\vec{j}) + [\text{grad}(r^{-1})\vec{j}] \right\} dV = -\frac{1}{c} \int r^{-3} [\vec{r}\vec{j}] dV = \frac{1}{c} \int \frac{[\vec{j}\vec{r}]}{r^3} dV. \end{aligned}$$

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

ЛИНИИ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА



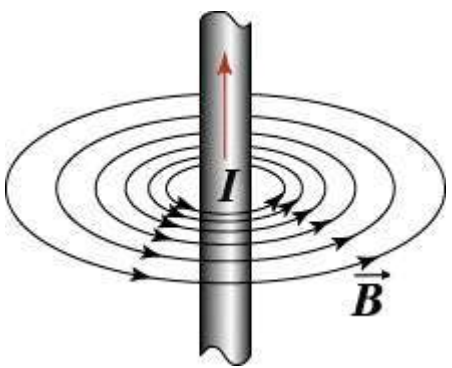
ПРЯМОГО ПРОВОДА

КРУГОВОГО ТОКА

СОЛЕНОИДА

Поле кільця розраховуємо за формулою Біо-Савара

Поле нескінченного дроту



$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \left\{ \frac{4\pi}{c} \right\} \sum I_i = \left\{ \frac{4\pi}{c} \right\} I = 2\pi r H$$

$$H = \frac{2I}{cr} \text{ (CGS)} = \frac{I}{2\pi r} \text{ (SI)}$$

Поле соленоїда

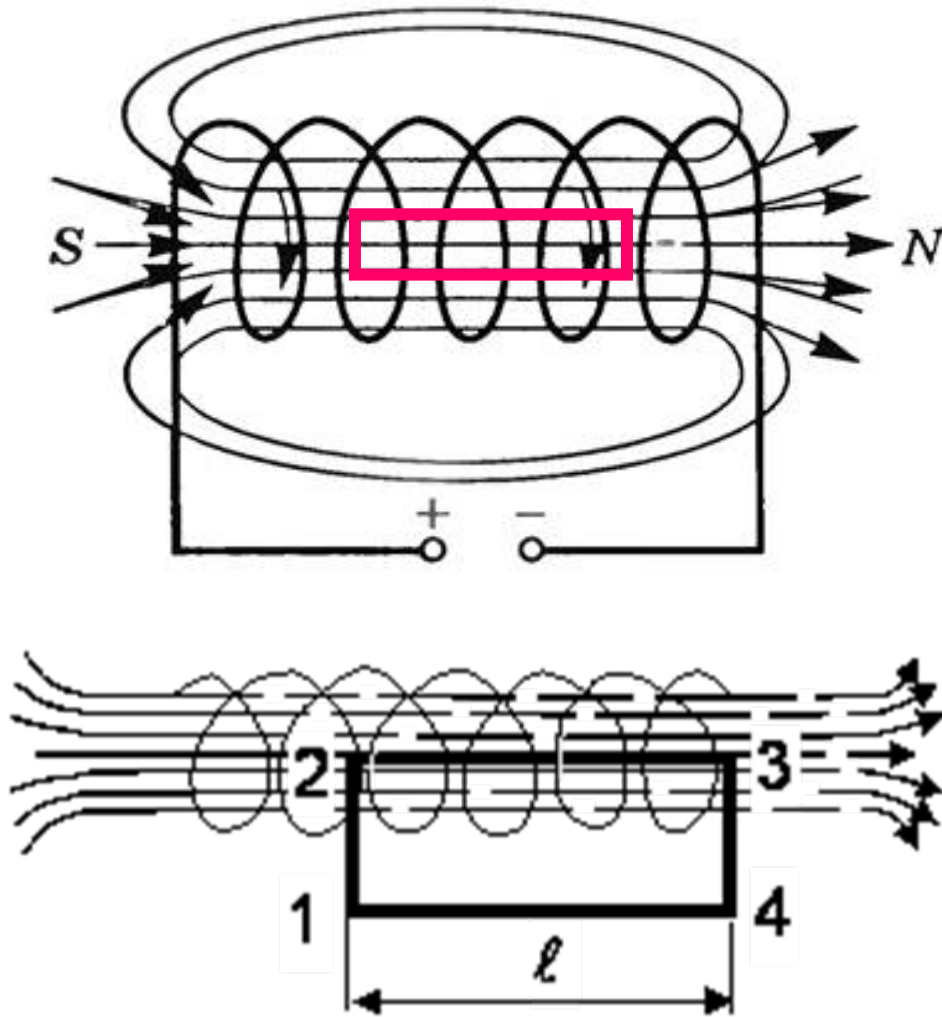


Рис. 2.5. Магнитное поле соленоїда

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \left\{ \frac{4\pi}{c} \right\} \sum I_i =$$

$$= \left\{ \frac{4\pi}{c} \right\} n\ell I = \ell H$$

$$H = \left\{ \frac{4\pi}{c} \right\} nI$$

Потік магнітної індукції через замкнений контур

$$\Phi = \int_S (\vec{B} d\vec{S}) = \int_S (\text{rot} \vec{A} d\vec{S}) = \oint_L \vec{A} d\vec{l} \quad 1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \times 1 \text{ с} = 10^8 \text{ Мкс}$$

$$\Phi = \frac{1}{\{c\}} LI \quad 1 \text{ Гн} = 10^9 \text{ см} \quad \text{Енергія магнітного поля дорівнює}$$

ІНДУКТИВНІСТЬ

$$\delta W = \frac{1}{4\pi} \int \vec{H} \delta \vec{B} dV = \frac{1}{4\pi} \int \vec{H} \text{rot} \delta \vec{A} dV = \quad W = \frac{LI^2}{2} (SI) = \frac{LI^2}{2c^2} (CGS)$$

$$= -\frac{1}{4\pi} \int \text{div} [\vec{H} \delta \vec{A}] dV + \frac{1}{4\pi} \int \delta \vec{A} \text{rot} \vec{H} dV =$$

$$= \frac{1}{c} \int \delta \vec{A} \vec{j} dV$$

$$W = \frac{1}{2c} \int \vec{A} \vec{j} dV \Rightarrow \frac{I}{2c} \int \vec{A} d\vec{l} = \frac{\Phi I}{2c} (CGS)$$

$$W = \frac{\Phi I}{2} (SI)$$

Знайдемо індуктивність соленоїда, S -площа перерізу, l – довжина, n - кількість витків на одиницю довжини, $N=nl$ - повна кількість витків.

Через потік

$$\Phi = N\Psi, \Psi = BS, B = \mu \frac{4\pi}{c} nI$$

$$\Phi = nlS\mu \frac{4\pi}{c} nI = \frac{4\pi}{c} n^2 lS\mu I = \frac{L}{c} I$$

$$L = 4\pi n^2 lS\mu \text{ (CGS)}$$

$$\Phi = N\Psi, \Psi = BS, B = \mu\mu_0 nI$$

$$\Phi = nlS\mu\mu_0 nI = n^2 lS\mu\mu_0 I = LI$$

$$L = \mu\mu_0 n^2 lS \text{ (SI)}$$

Через енергію

$$W = wSl, w = \frac{\mu H^2}{8\pi}, H = \frac{4\pi}{c} nI,$$

$$W = \frac{\mu}{8\pi} \left(\frac{4\pi}{c} nI \right)^2 Sl = \frac{LI^2}{2c^2}$$

$$L = 4\pi\mu SLn^2 \text{ (CGS)}$$

$$W = wSl, w = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}, H = nI,$$

$$W = \frac{\mu\mu_0}{2} (nI)^2 Sl = \frac{LI^2}{2}$$

$$L = \mu\mu_0 SLn^2 \text{ (SI)}$$

Знайдемо індуктивність дроту радіуса a довжиною L

$$W = \int \frac{\mu H^2}{8\pi} dV, H = \frac{2I}{cr},$$

$$W = L \int 2\pi r dr \frac{\mu}{8\pi} \left(\frac{2I}{cr} \right)^2 Sl = \frac{LI^2}{2c^2}$$

$$L = 2\mu L \int_a^L \frac{dr}{r} = 2\mu L \ln \left(\frac{L}{a} \right) (CGS)$$

Коефіцієнти самоїндукції та взаємної індукції

Якщо контурів зі струмами багато, то сили струмів та потоки магнітної індукції пов'язані співвідношеннями

$$\Phi_i = \frac{1}{\{c\}} \sum L_{ik} I_k, \quad I_i = \{c\} \sum L_{ik}^{-1} \Phi_k,$$

$$W = \frac{1}{2\{c^2\}} \sum \sum L_{ik} I_i I_k = \frac{1}{2} \sum \sum L_{ik}^{-1} \Phi_i \Phi_k$$

Матриця L_{ik} є симетричною ($L_{ik} = L_{ki}$), діагональні члени це коефіцієнти самоїндукції, недіагональні - коефіцієнти взаємної індукції.

$$L_{ik} = \mu \iint_{L_i, L_k} \frac{d\vec{l}_i \cdot d\vec{l}_k}{R}$$