

Лекция 9

Магнитное поле в веществе

Гипотеза Ампера. Молекулярные токи.

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

$$\sum \vec{p}_{mi} = 0$$

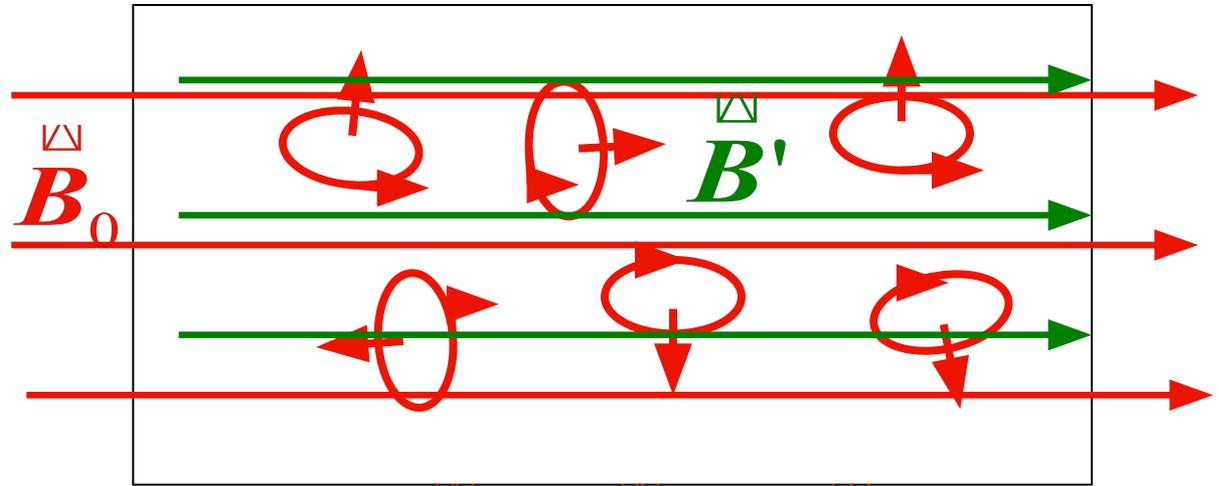
$$\vec{B}' = 0$$

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

$$\sum \vec{p}_{mi} \neq 0$$

$$\vec{B}' \neq 0$$

$$[J] = \frac{A \cdot m^2}{m^3} = \frac{A}{m}$$



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

Вектор

намагниченности

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_{mi} = \frac{\vec{B}'}{\mu_0}$$

Вычисление поля в магнетиках

Вектор намагниченности

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_{mi} = \frac{\vec{B}'}{\mu_0}$$

$$\vec{H} + \chi \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

Напряженность магнитного поля

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \frac{\vec{B} - \vec{B}'}{\mu_0}$$

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

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

$$[\vec{H}] = \frac{A}{m}$$

$$\mu = 1 + \chi$$

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

μ – магнитная проницаемость вещества

χ – магнитная восприимчивость вещества

Магнитная проницаемость

- $B = \mu_0 \mu H$
- $\mu = B/B_0$

Циркуляция поля в магнетиках

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I$$

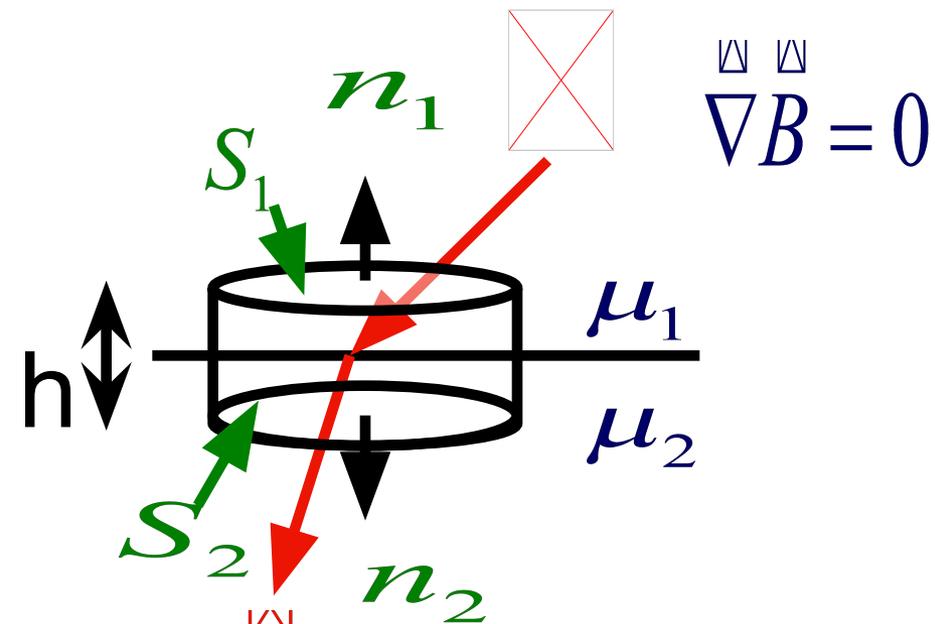
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$$

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum p_{mi} = \frac{\vec{B}'}{\mu_0}$$

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

$$\oint \vec{J} d\vec{l} = I_{\text{мол}}$$

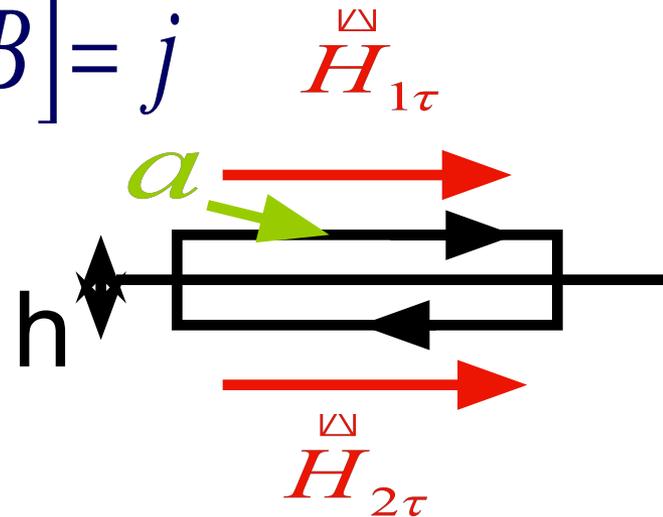
Граничные условия



$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = S(B_{n2} - B_{n1})$$

$$B_{n1} = B_{n2}$$

$$\left[\nabla B \right] = j$$



$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \mu_0(\mu_1 H_1 - \mu_2 H_2)$$

$$H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$$

Граничные условия

$B_{n1} = B_{n2}$

$H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$

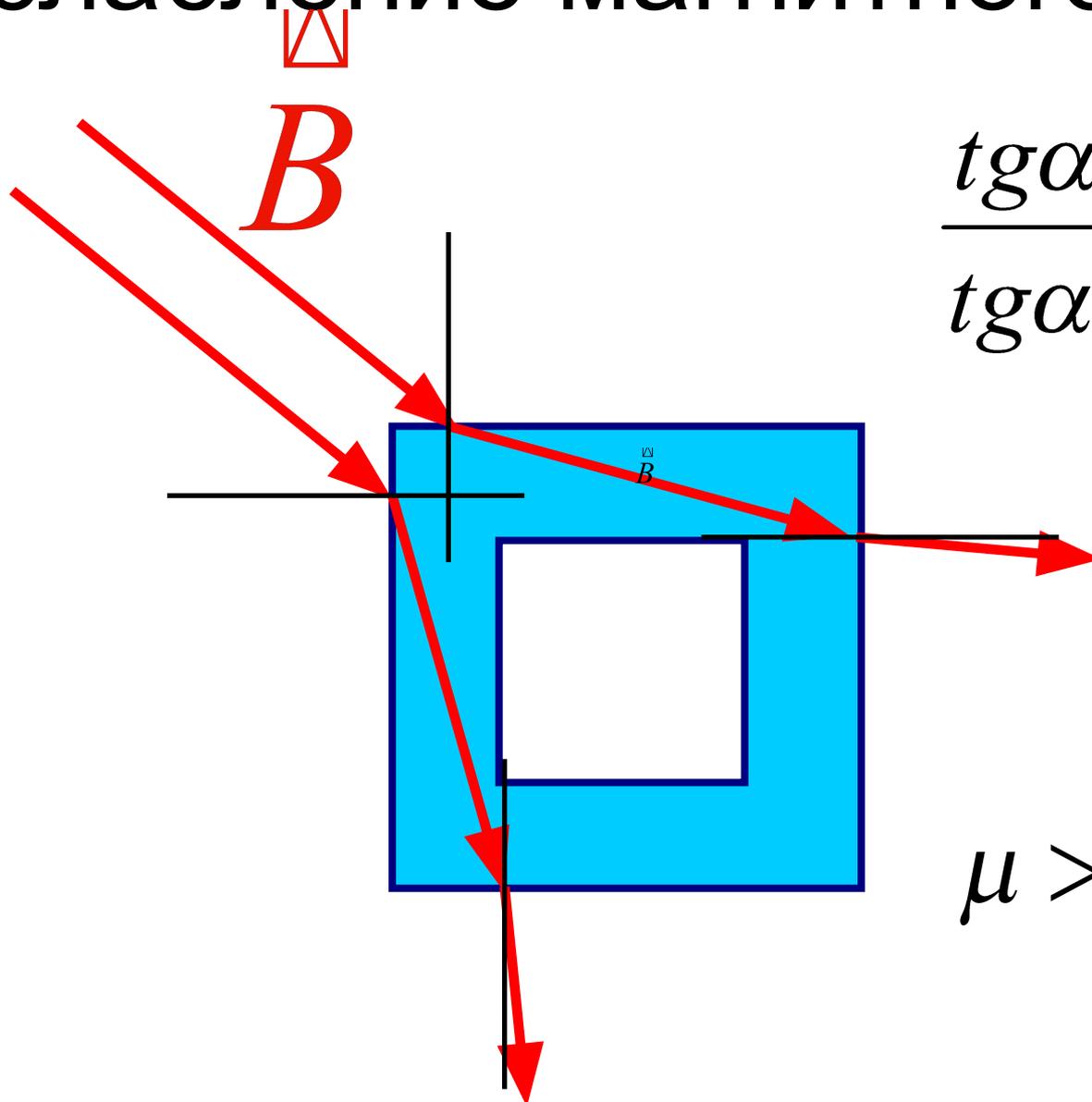
$\frac{B_{\tau 1}}{\mu_0 \cdot \mu_1} = \frac{B_{\tau 2}}{\mu_0 \cdot \mu_2}$

$\text{tg} \alpha = \frac{B_{\tau}}{B_n}$

$\frac{\text{tg} \alpha_1}{\text{tg} \alpha_2} = \frac{B_{\tau 1} \cdot B_{n 2}}{B_{n 1} \cdot B_{\tau 2}}$

$\frac{\text{tg} \alpha_1}{\text{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$

Ослабление магнитного поля



$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

$$\mu \gg 1$$

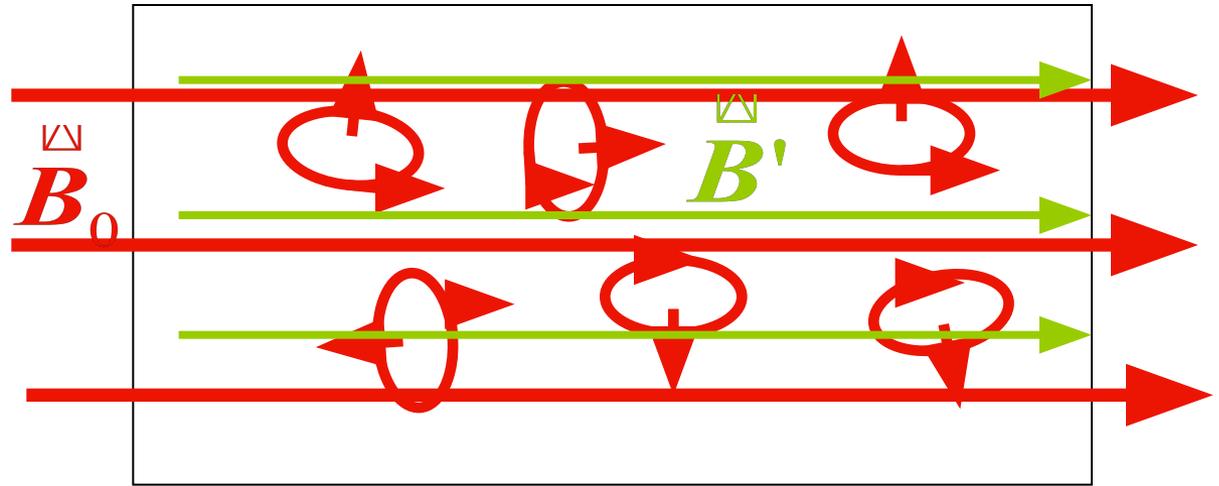
Магнетики

| Тип магнетика | Магнитная восприимчивость, χ | Магнитная проницаемость, μ |
|--------------------------|---|--|
| <i>Диамагнетик</i> | $-(10^{-9} - 10^{-4})$ | $\mu < 1$ |
| <i>Парамагнетик</i> | $+(10^{-6} - 10^{-3})$ | $\mu > 1$ |
| <i>Суперпарамагнетик</i> | $+(10^{-3} - 10^3)$ | $\mu > 1$ |
| <i>Ферромагнетик</i> | $+(10^3 - 10^7)$ | $\mu(H) \gg 1$ |
| <i>Ферримагнетик</i> | $+(10^1 - 10^4)$ | $\mu(H) \gg 1$ |
| <i>Антиферромагнетик</i> | $+(10^{-4} - 10^{-6})$ | $\mu > 1$ |

Природа парамагнетизма

$$\begin{aligned} \vec{B}_0 &= 0 \\ \sum \vec{p}_{mi} &= 0 \\ \vec{B}' &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_0 &\neq 0 \\ \sum \vec{p}_{mi} &\neq 0 \\ \vec{B}' &\neq 0 \end{aligned}$$

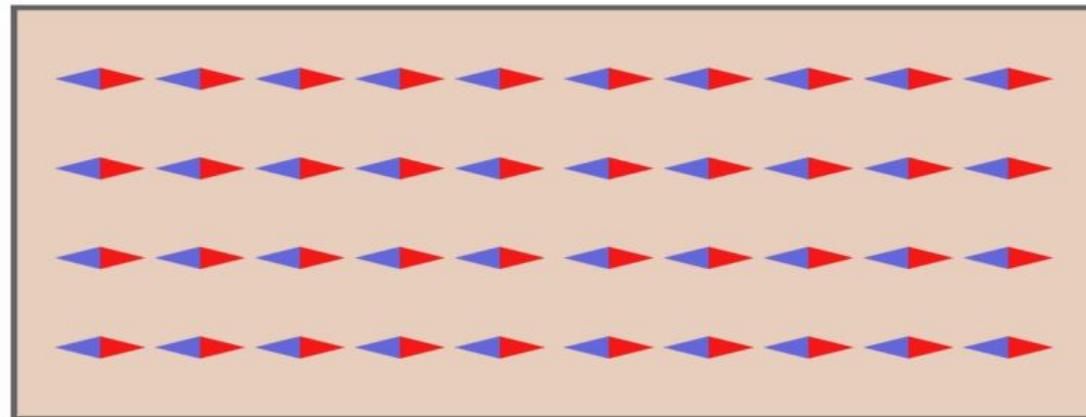


$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J})$$

Закон Кюри: $\chi = \frac{C}{T}$

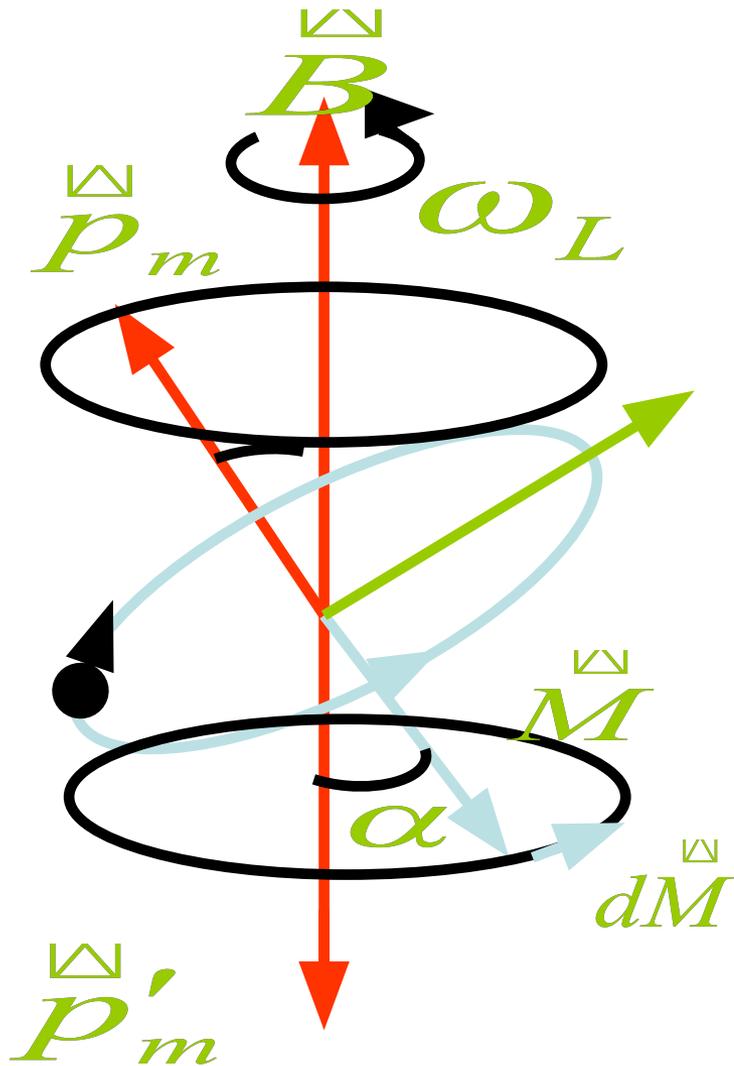
Перемагничивание парамагнетиков

H



Природа диамагнетизма.

Ларморова прецессия связанных электронов



$$\omega_L = \frac{eB}{2m}$$

$$\langle p'_m \rangle = -\frac{e^2}{6m} r^2 B$$



Paul Langevin
1872 — 1946

Природа диамагнетизма. Диамагнетизм свободных электронов



Ландау
Лев Давидович
1908 - 1968

Скорость частицы

$$\vec{v} \perp \vec{B}$$

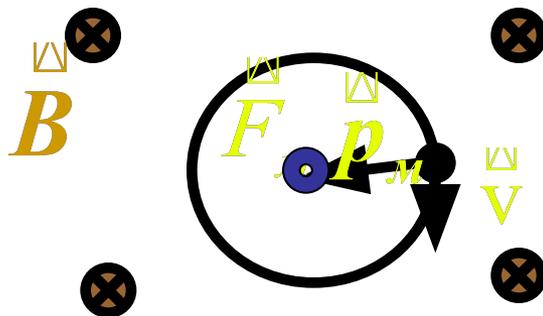
Сила Лоренца

$$\vec{F}_m = q [\vec{v}; \vec{B}] = m \vec{a}_n = m \cdot \frac{v^2}{R} \cdot (-\vec{e}_R)$$

$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

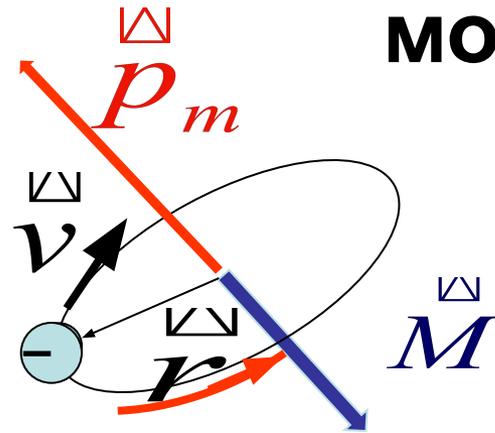
$$R = \frac{m}{qB} \cdot \frac{2\pi R}{T} \quad T = \frac{2\pi m}{qB}$$



$$P_m = IS = \frac{e}{T} \pi R^2 = \frac{e \cdot \pi \cdot m_e^2 v^2 \cdot eB}{e^2 B^2 \cdot 2\pi m_e}$$

$$P_m = \frac{m_e v^2}{2B}$$

Магнитные моменты атомов и молекул



Гиромагнитное отношение

$$\frac{P_m}{M} = -\frac{e}{2m}$$

$$M = mvr$$

$$P_m = I \cdot S = \frac{evr}{2}$$

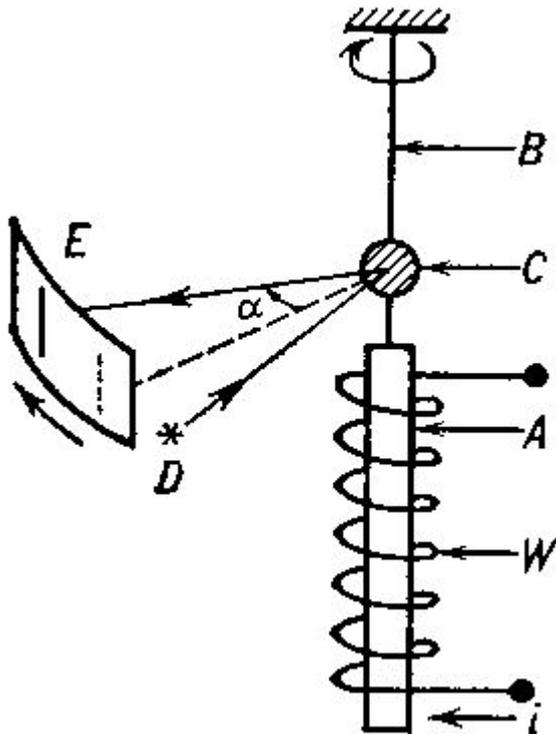
Опыт Эйнштейна- де Хааса

Опыт Барнетта

Магнитные моменты атомов и молекул

Опыт Эйнштейна- де Хааса
1909 - 1915 г.

Опыт Барнетта
1909 - 1914 г.



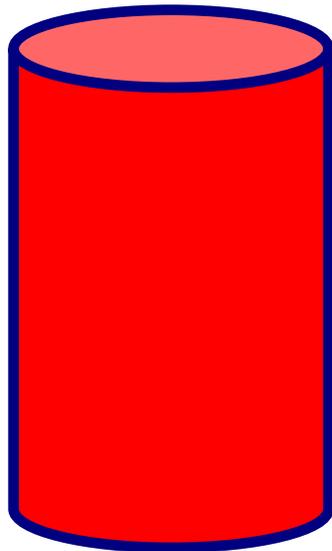
Намагничивание магнетика
при его вращении.

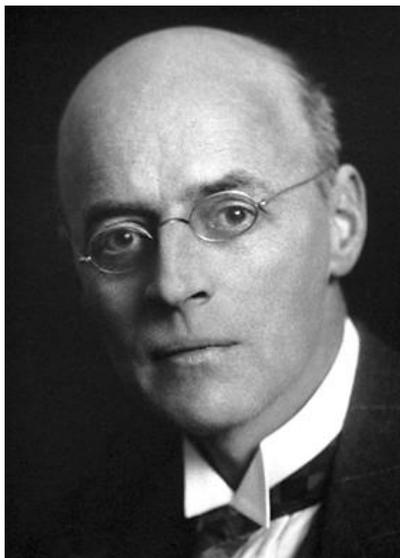
В опытах Барнетта при
вращении железного
цилиндра с частотой
6000 об/мин наблюдалось
намагничивание,
эквивалентное наличию
внешнего поля 10^{-5} Тл

Сводка результатов по измерению величины g -фактора

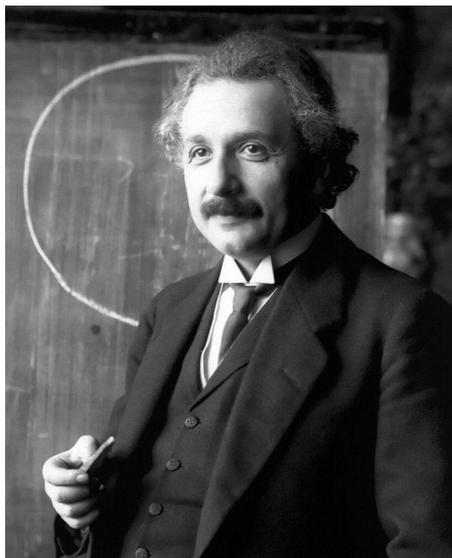
| Экспериментатор | Место проведения работы | Время публикации | Результат |
|---------------------------|--|------------------|--|
| Барнетт С. | Физическая лаборатория Университета штата Огайо, США | 1915 | 2,0 (1914 г.) 2,3 (1915 г.) |
| Эйнштейн - де Гааз | Высшая физико-техническая школа, Берлин, Германия | 1915 | 1,02±0,10 |
| Де Гааз | Институт Тейлера, Харлем, Голландия | 1916 | 1,2 |
| Барнетт С. | Там же, где проводилась работа 1915 г. | 1917 | 1,4-1,1 |
| Стюарт | Пальмеровская лаборатория, Принстон, США | 1918 | 2,02±0,02 |
| Бек | Цюрихский Политехнический институт, Швейцария | 1919 | 1,88 |
| Арвидссон | Физический институт, Уппсала, Швеция | 1920 | 2,12 |
| Барнетт С., Барнетт Л. | Институт Карнеги, Вашингтон, США | 1922 | ~2 |
| Де Гааз | Там же, где проводилась работа 1916 г. | 1923 | 1,55 (март 1921 г.) 1,11 (июль 1921 г.) |
| Чатток, Бейтс | Бристольский университет, Англия | 1922 | 1,97 |
| Сукемпт, Бейтс | Там же | 1923 | 1,99±0,024 |
| Барнетт С. | Калифорнийский технологический институт, США | 1925 1931 | 1,89±0,04 1,929±0,006 |
| Скотт | Фирма «Джеперал моторс», США | 1962 | 1,919±0,002 |

$$\frac{P_{ms}}{M_s} = -g \cdot \frac{e}{2 \cdot m}$$





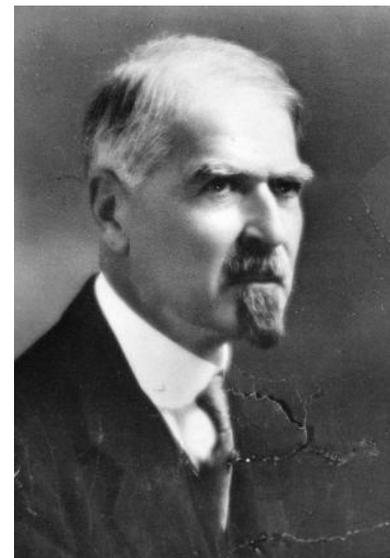
Owen Willans
Richardson
1879 – 1959
Великобритания



Albert
Einstein
1879 – 1955
Германия,
Швейцария,
Чехословакия,
США



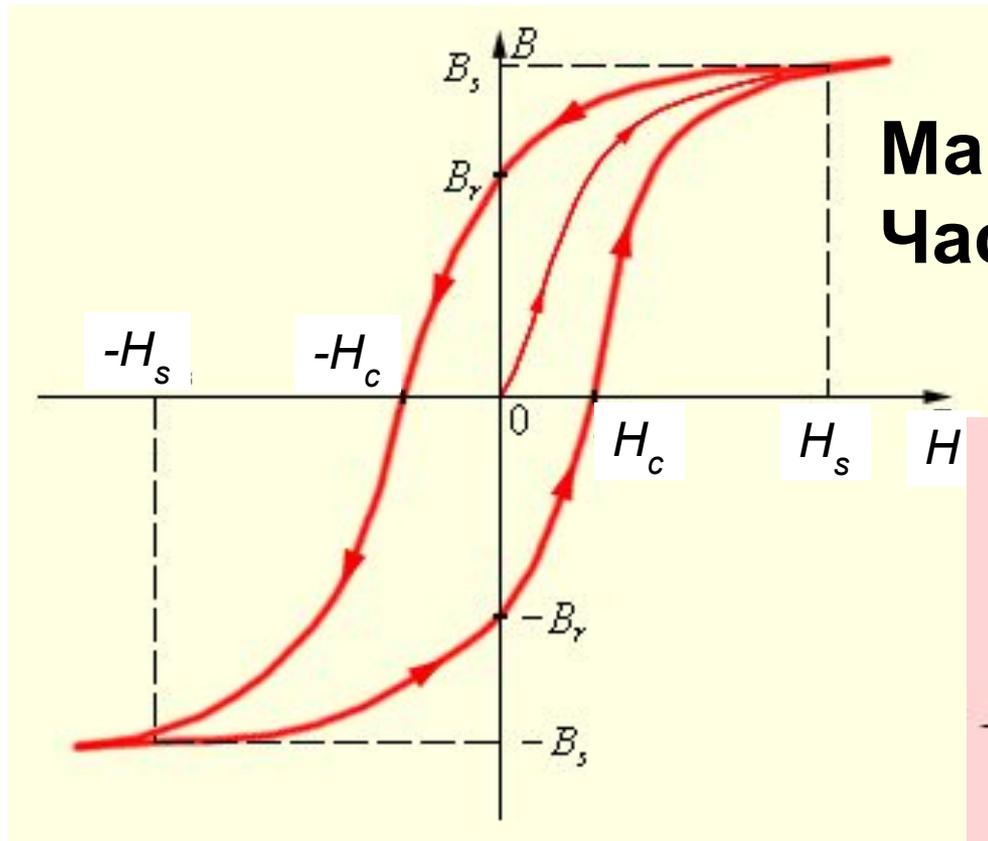
Wander Johannes
de Haas
1878 – 1960
Нидерланды



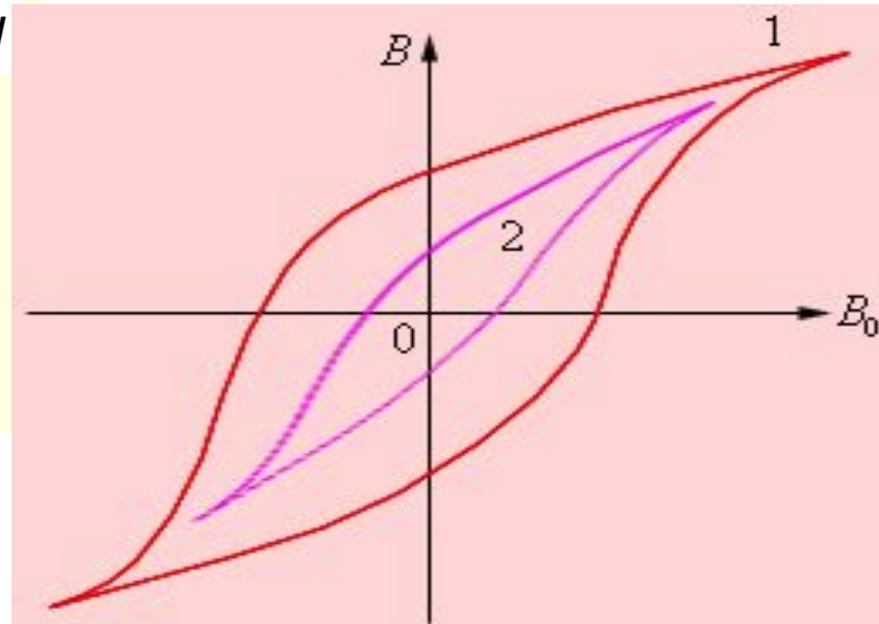
Samuel Jackson
Barnett
1873 — 1956
США

Ферромагнетизм

Петля гистерезиса

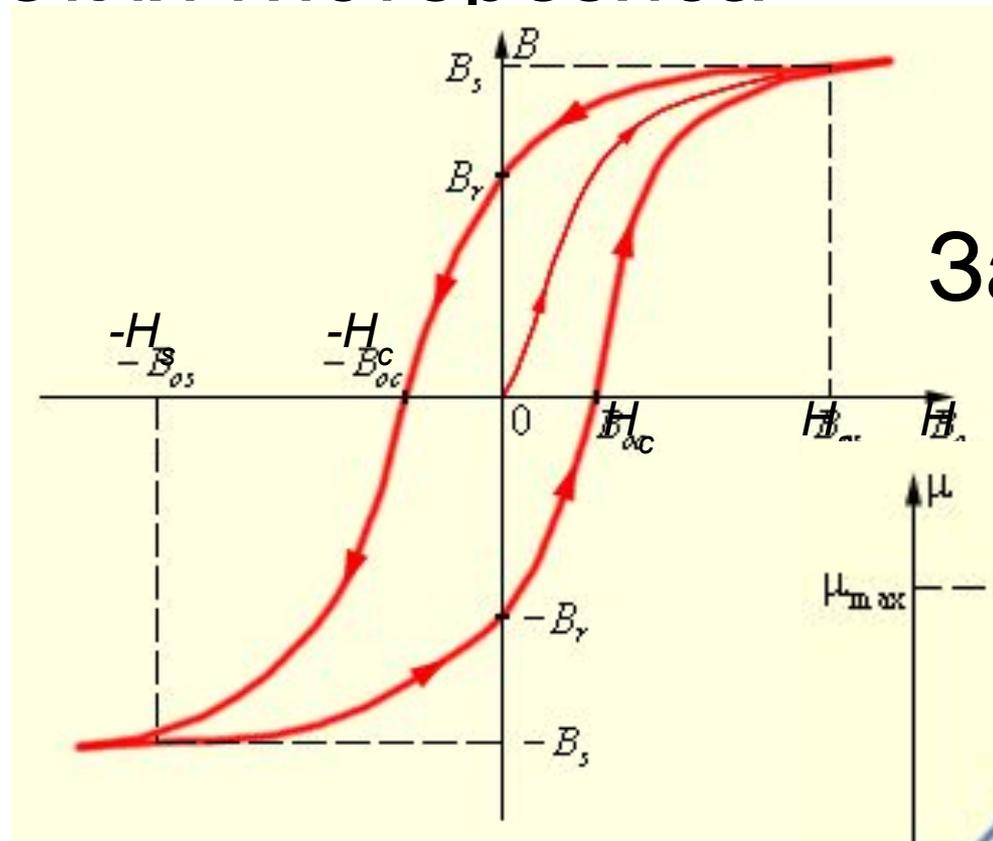


Максимальная петля 1
Частный цикл 2

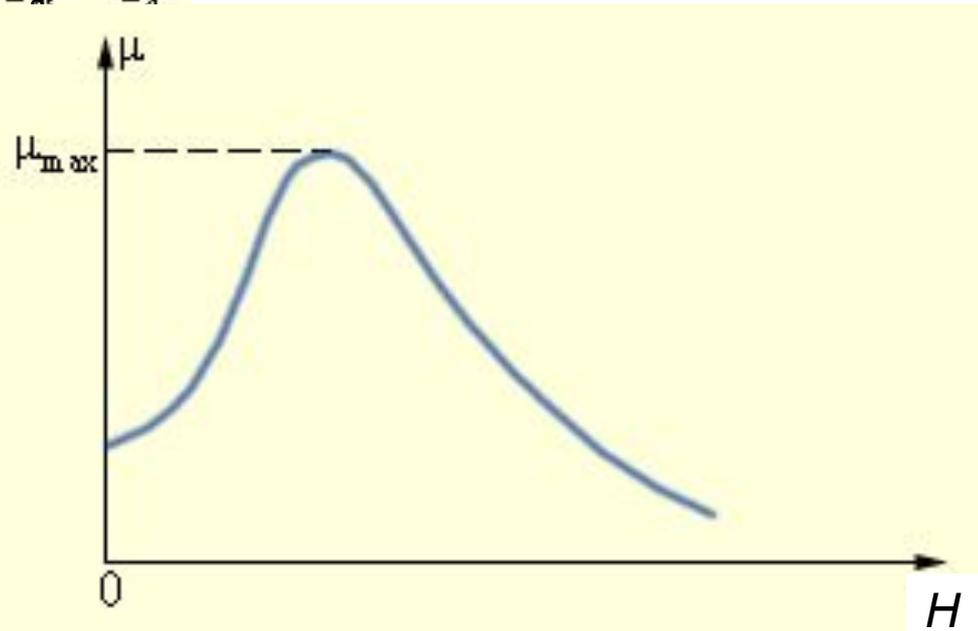


Ферромагнетизм

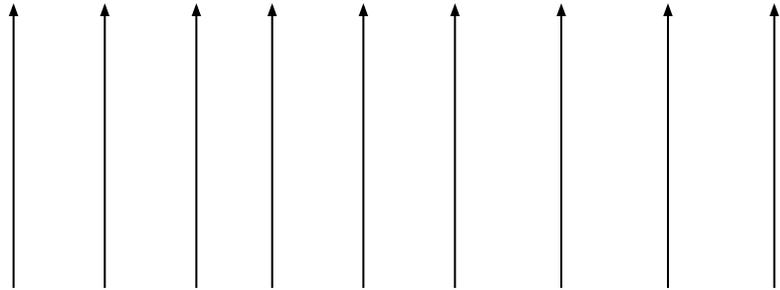
Петля гистерезиса



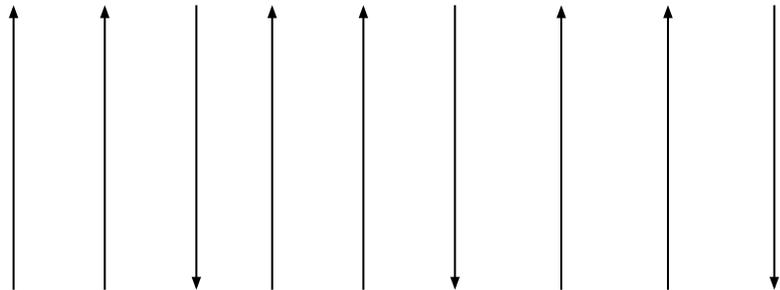
Зависимость μ от H



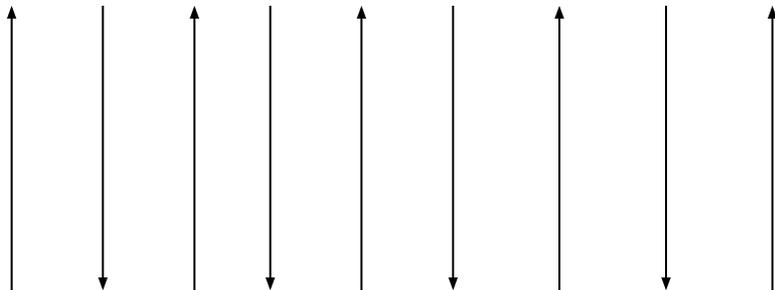
Природа упорядоченного магнетизма



- ферромагнетизм:
Fe, Ni, Co, Gd



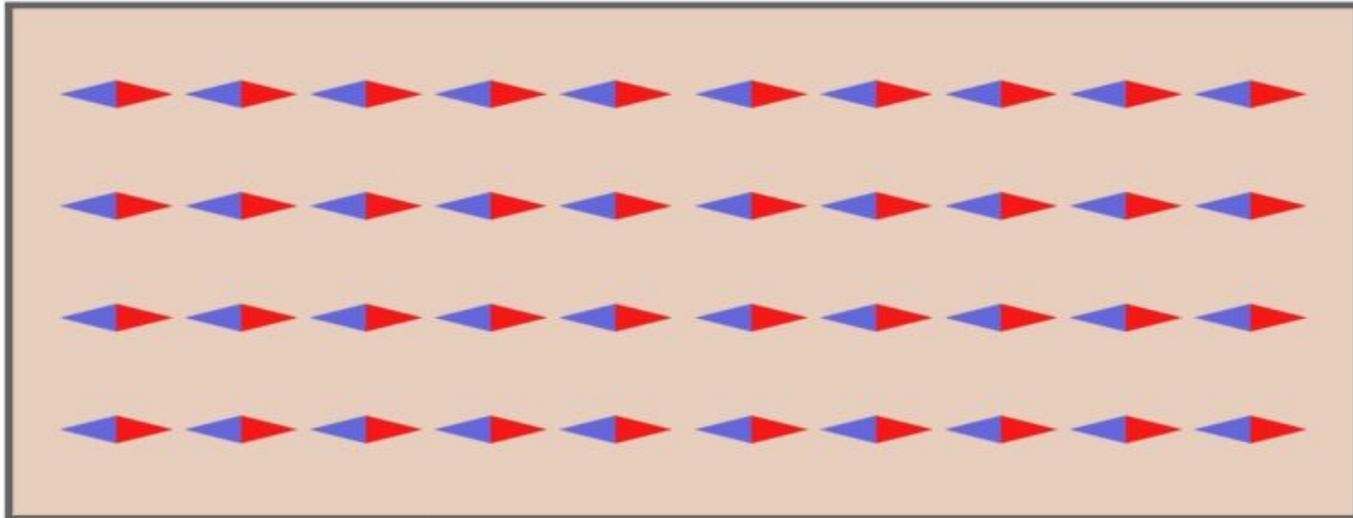
- ферримагнетизм
 Fe_3O_4



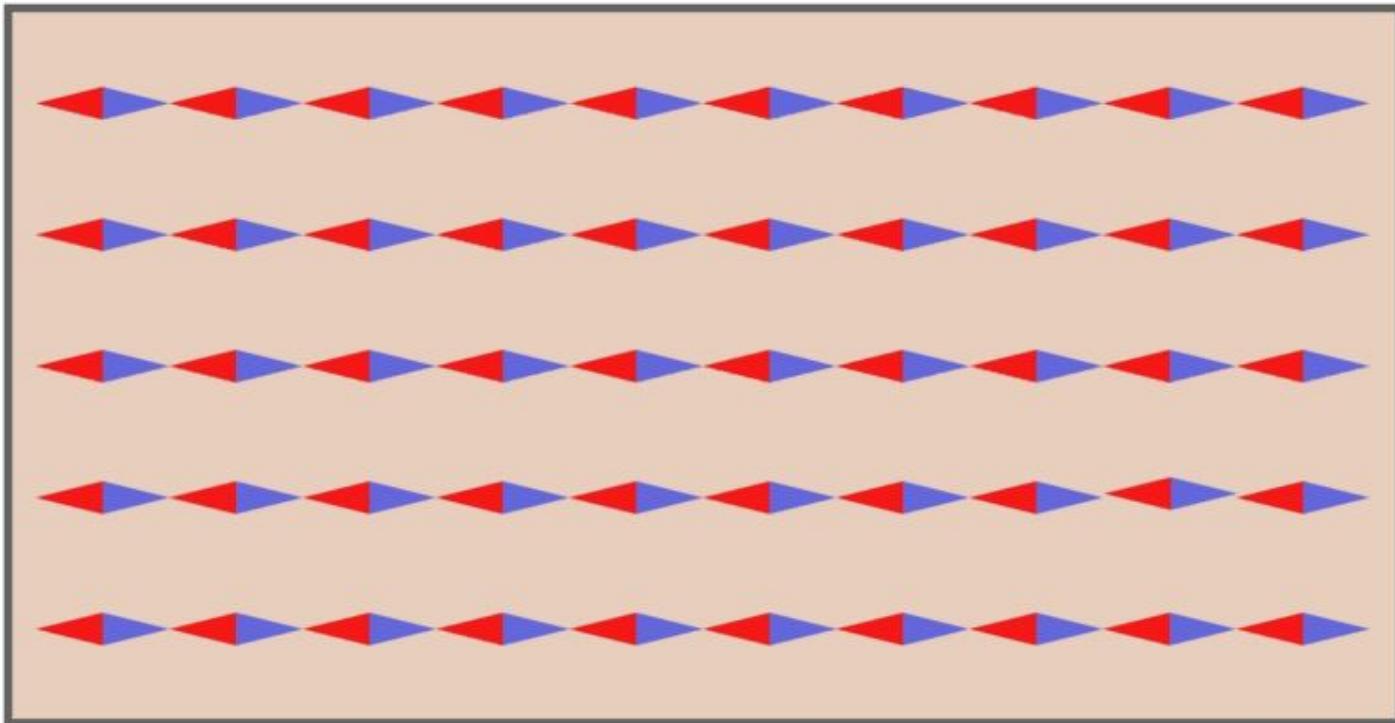
- антиферромагнетизм:
Cr

Перемагничивание парамагнетиков

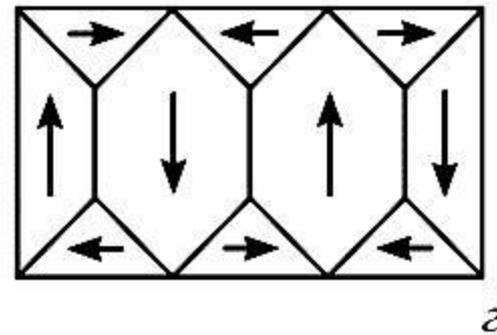
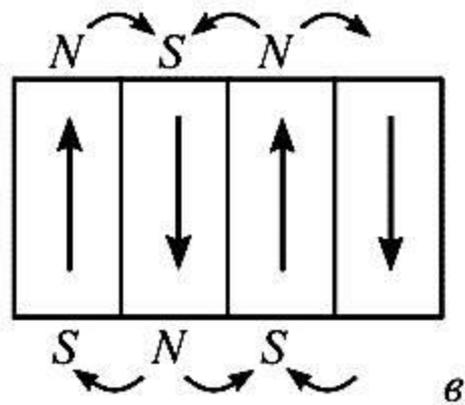
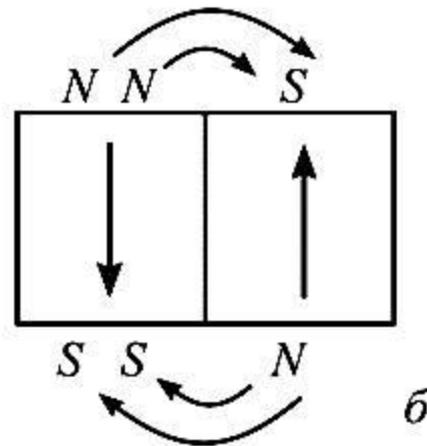
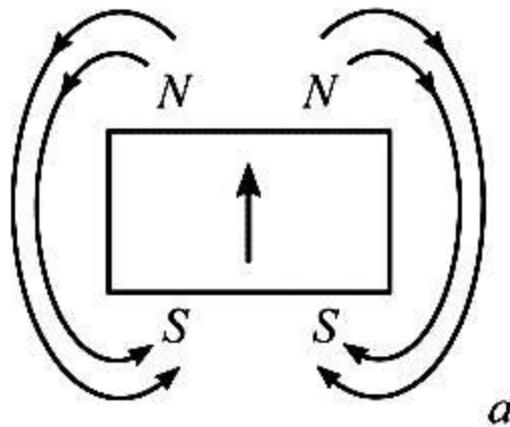
H



Перемагничивание ферромагнетиков

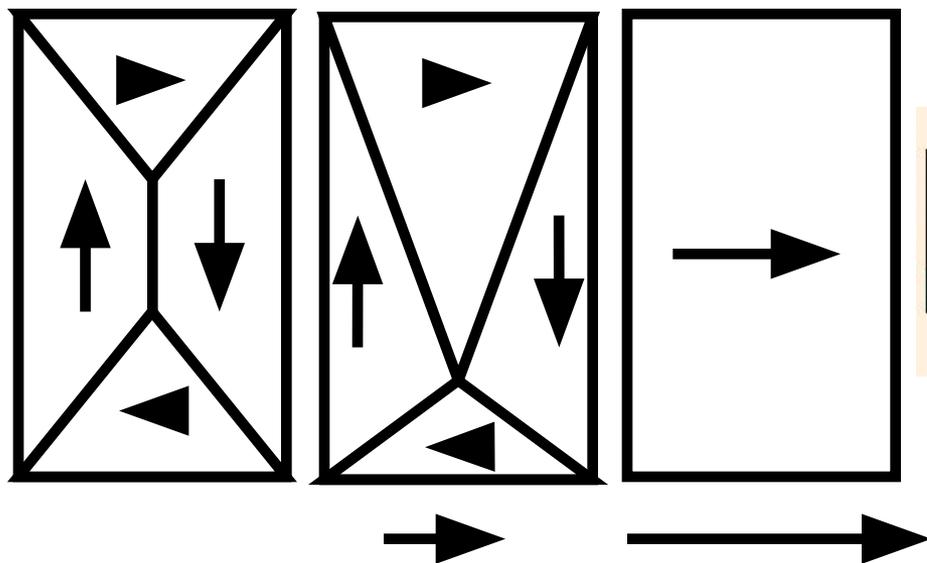


Магнитные домены

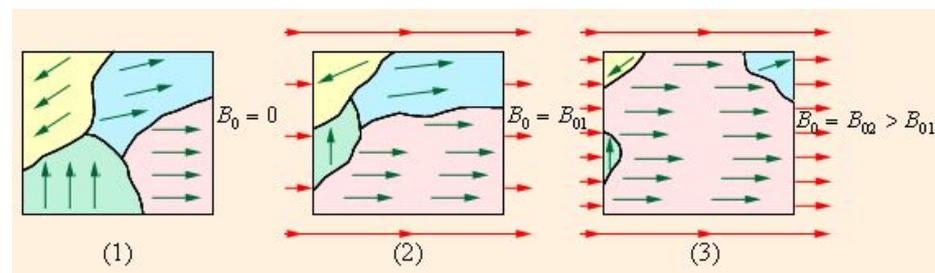


Смещение границ доменов в ферро- или ферримагнетике

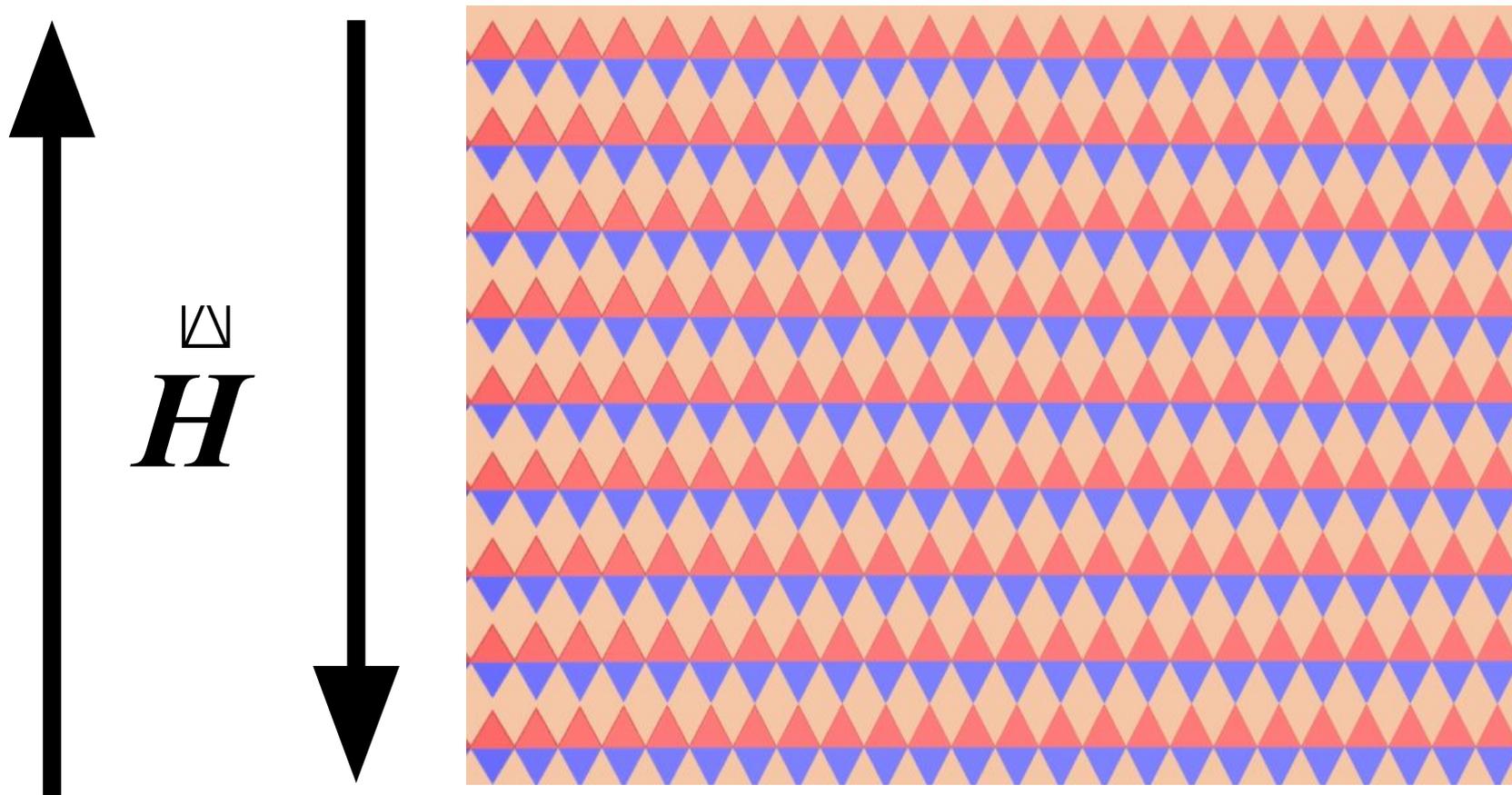
Модель Л.Д.Ландау



Доменная структура - эксперимент

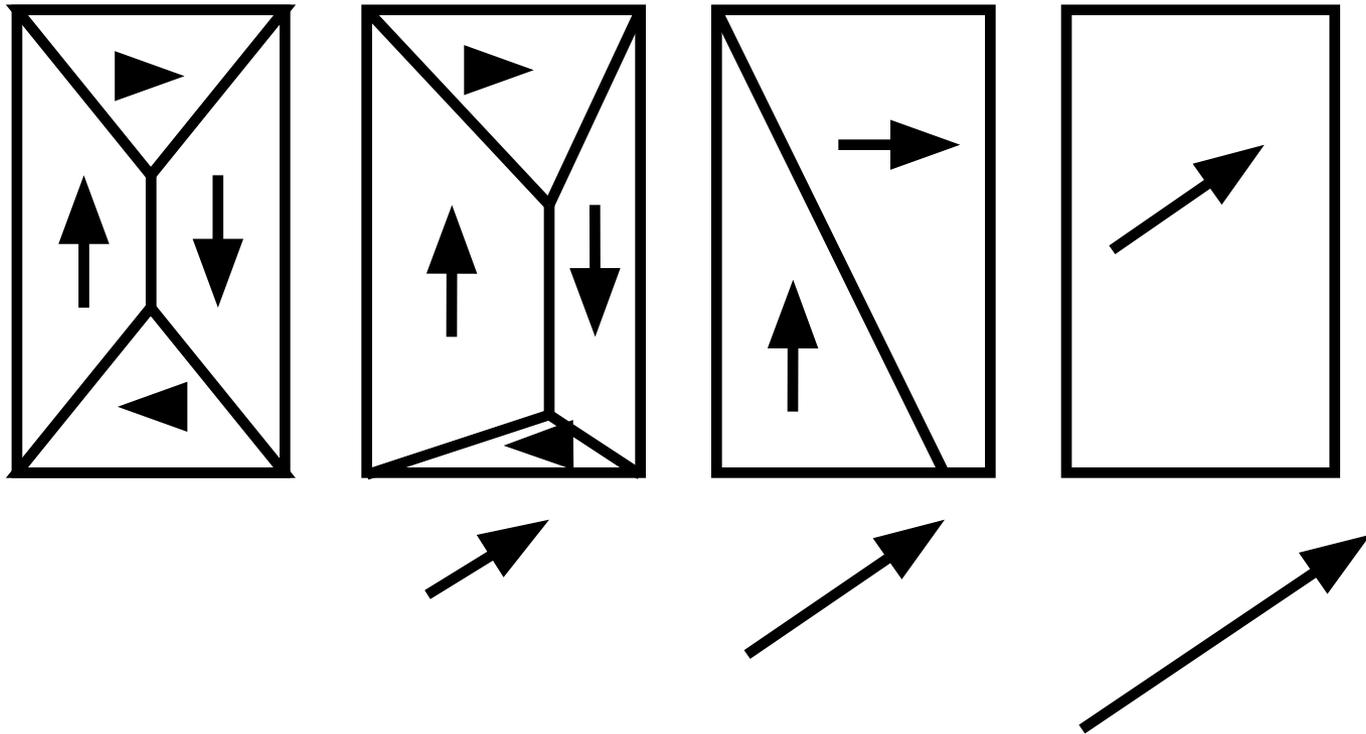


Движение доменной стенки при перемагничивании

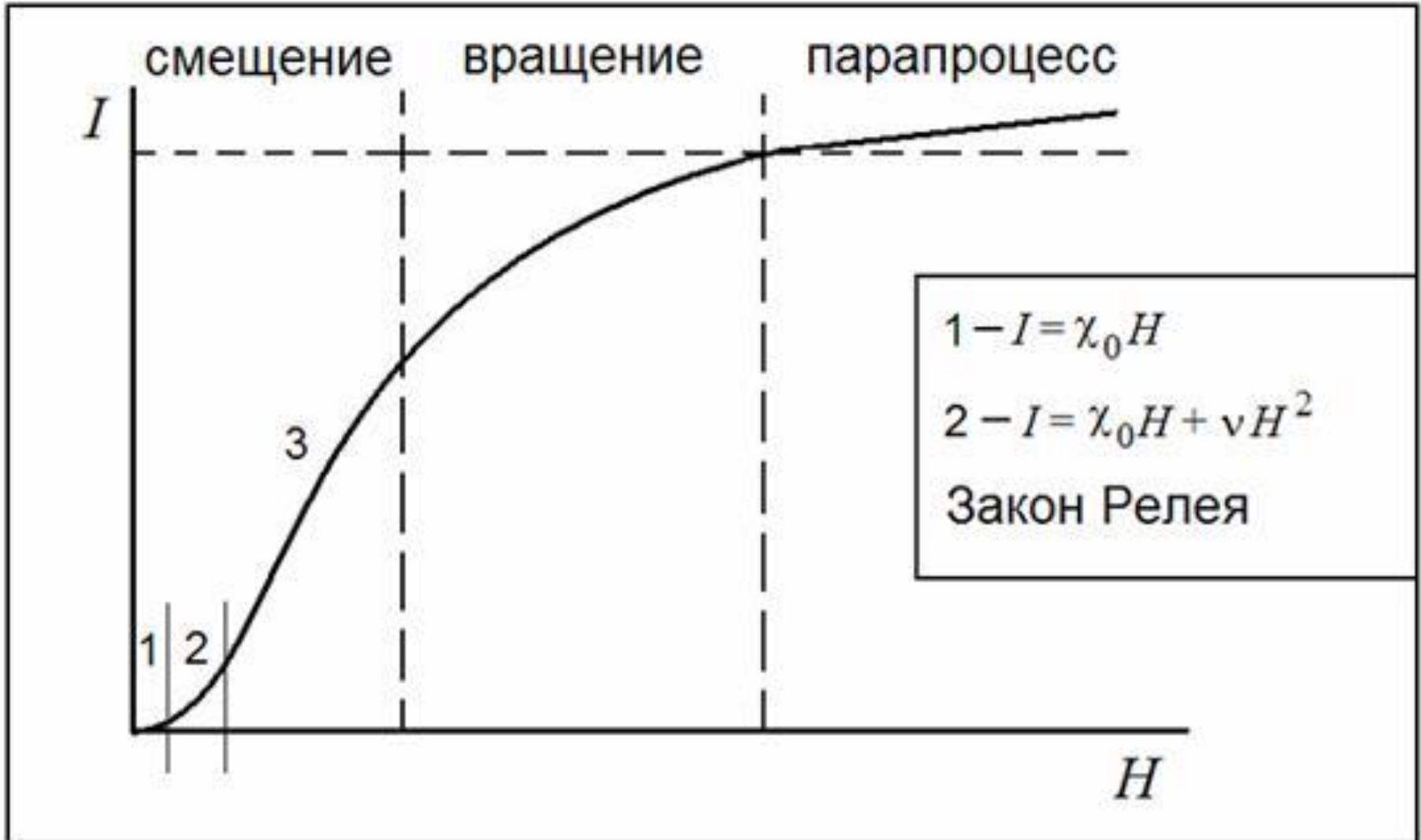


Смещение границ доменов в ферро- или ферримагнетике

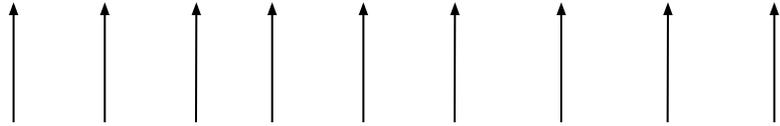
Модель Л.Д.Ландау



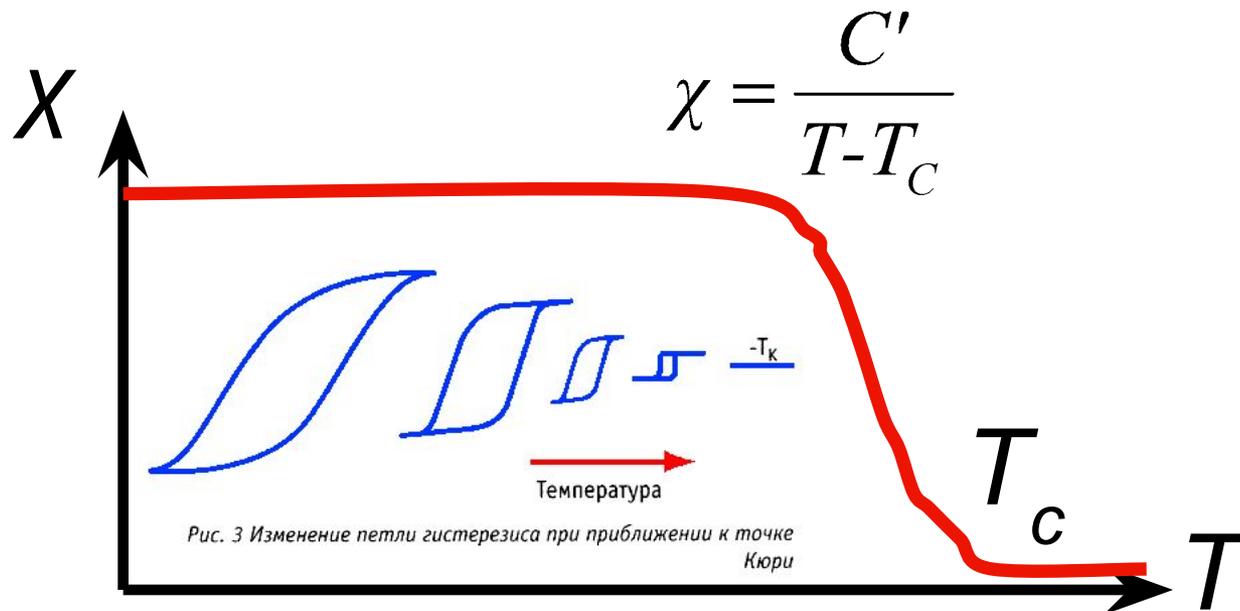
Стадии первичного намагничивания



Температура Кюри



Закон Кюри - Вейса : при $T > T_C$



$$w_{обм} = k_B \cdot T_C$$



Pierre Curie
1859 - 1906

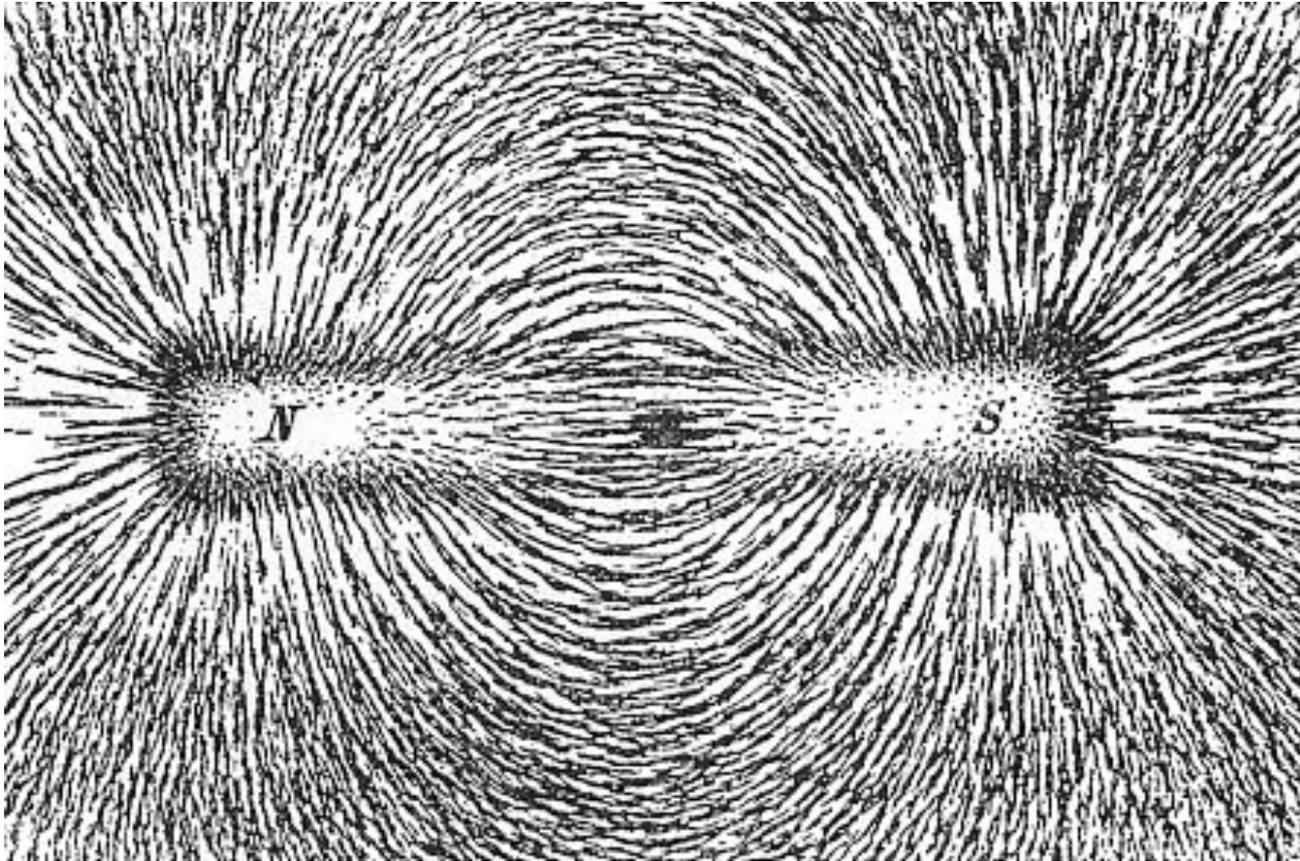


Pierre-Ernest
Weiss
1865 - 1940

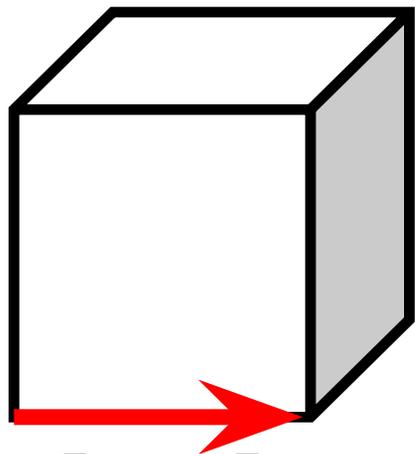
Свойства некоторых ферромагнетиков

| Материал | $J_s \cdot 10^5,$ А/м | $B_s,$ Тл (Гс) | $T_c,$ К |
|----------|--------------------------|----------------|----------|
| Железо | 1,270 | 2,1 (21580) | 1043 |
| Никель | 0,387 | 0,6 (6080) | 631 |
| Кобальт | 1,140 | 1.7 (17900) | 1394 |

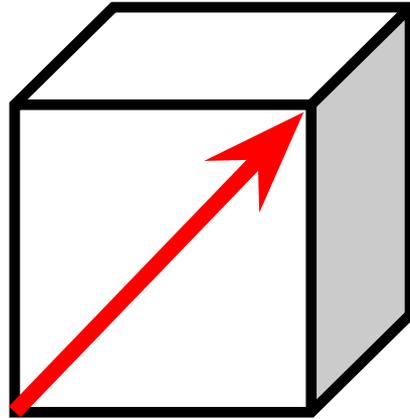
Визуализация магнитных СИЛОВЫХ ЛИНИЙ



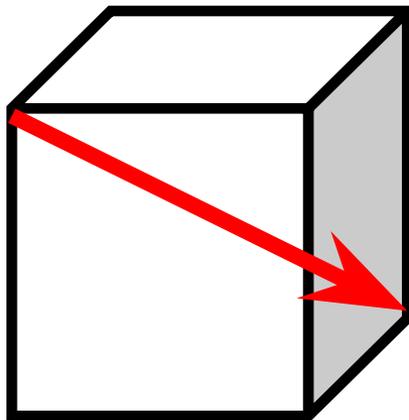
Оси лёгкого и тяжёлого намагничивания



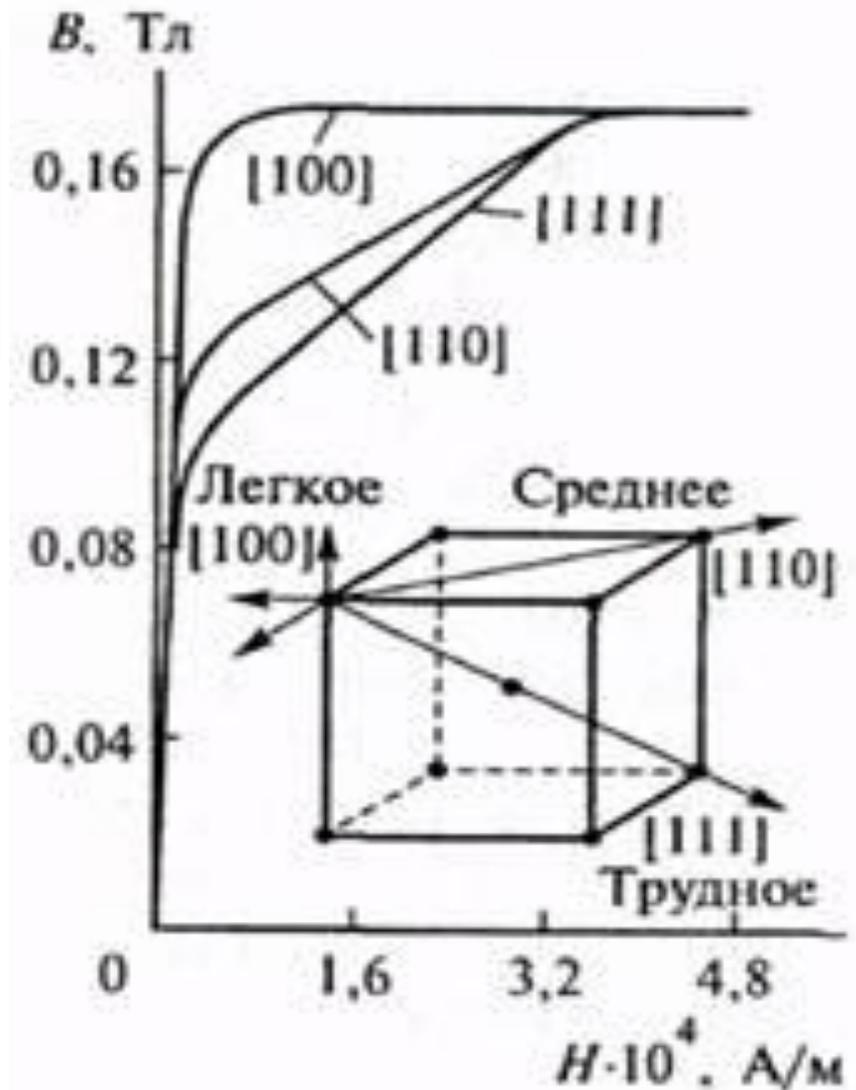
[100]



[110]

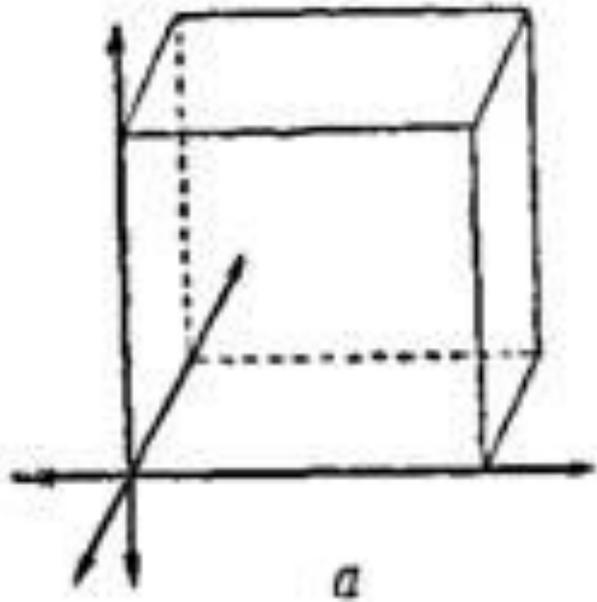


[111]

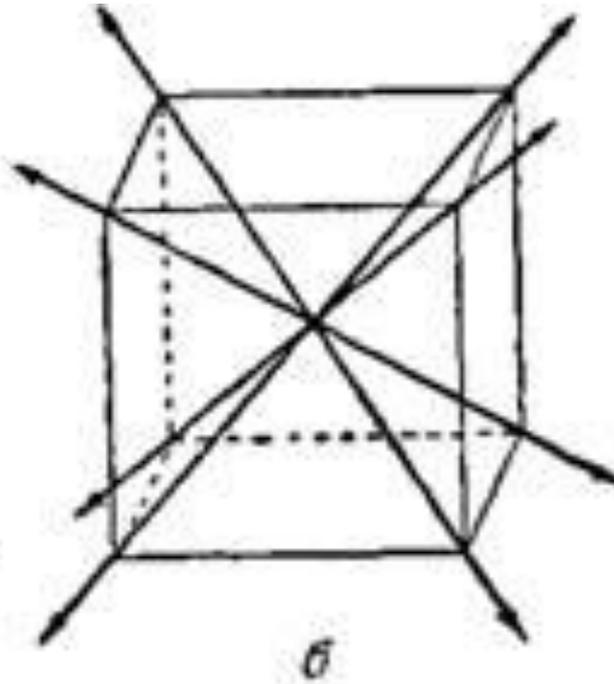


Оси лёгкого намагничивания

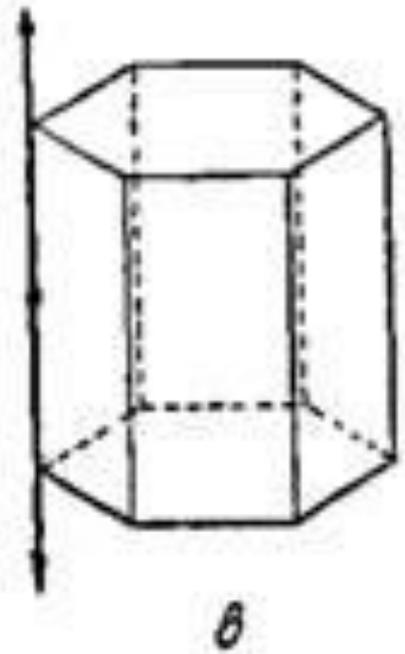
Fe



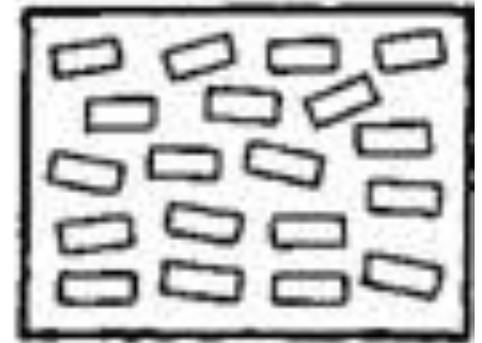
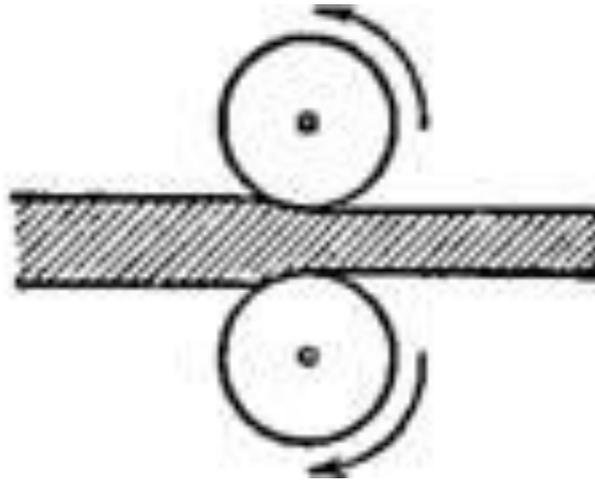
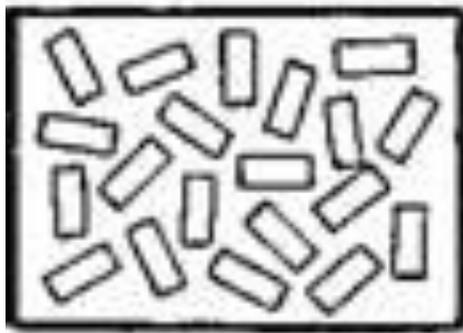
Ni



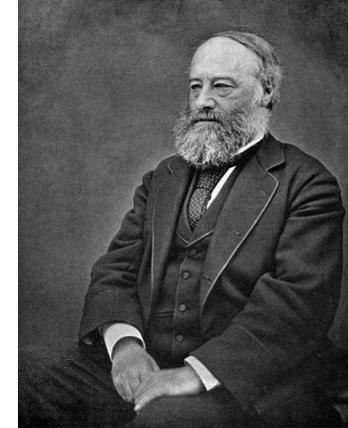
Co



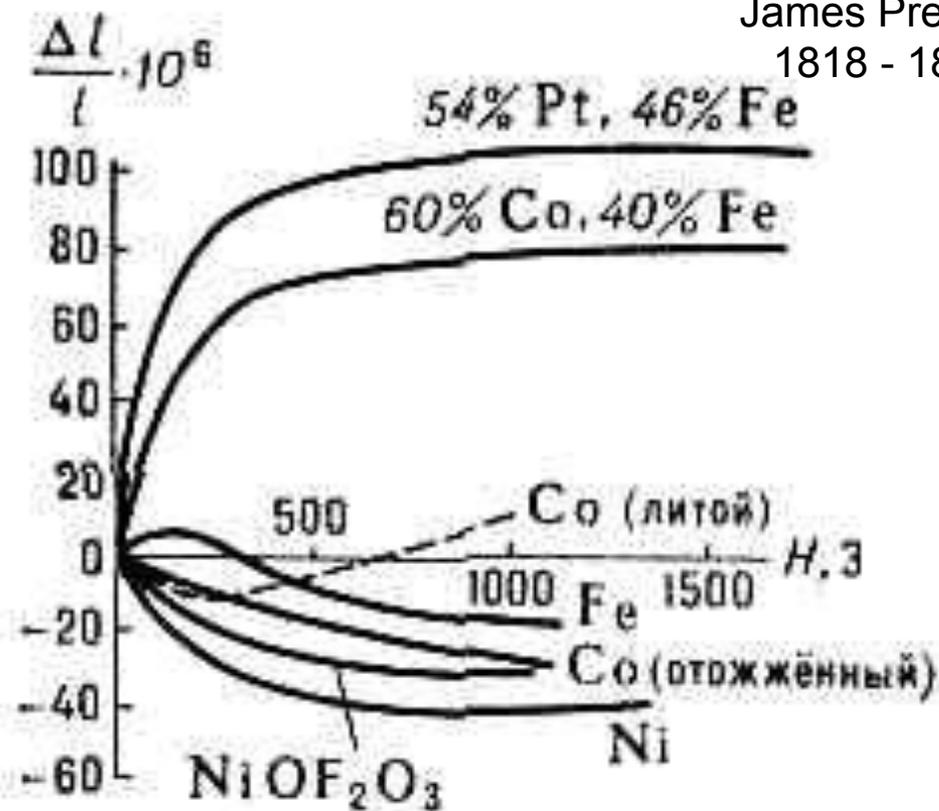
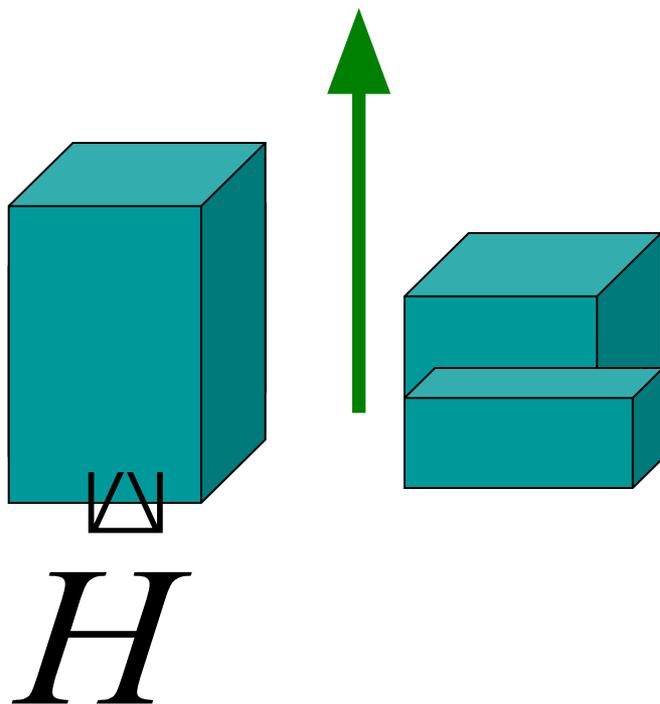
Текстура прокатки



Магнитострикция (1842)

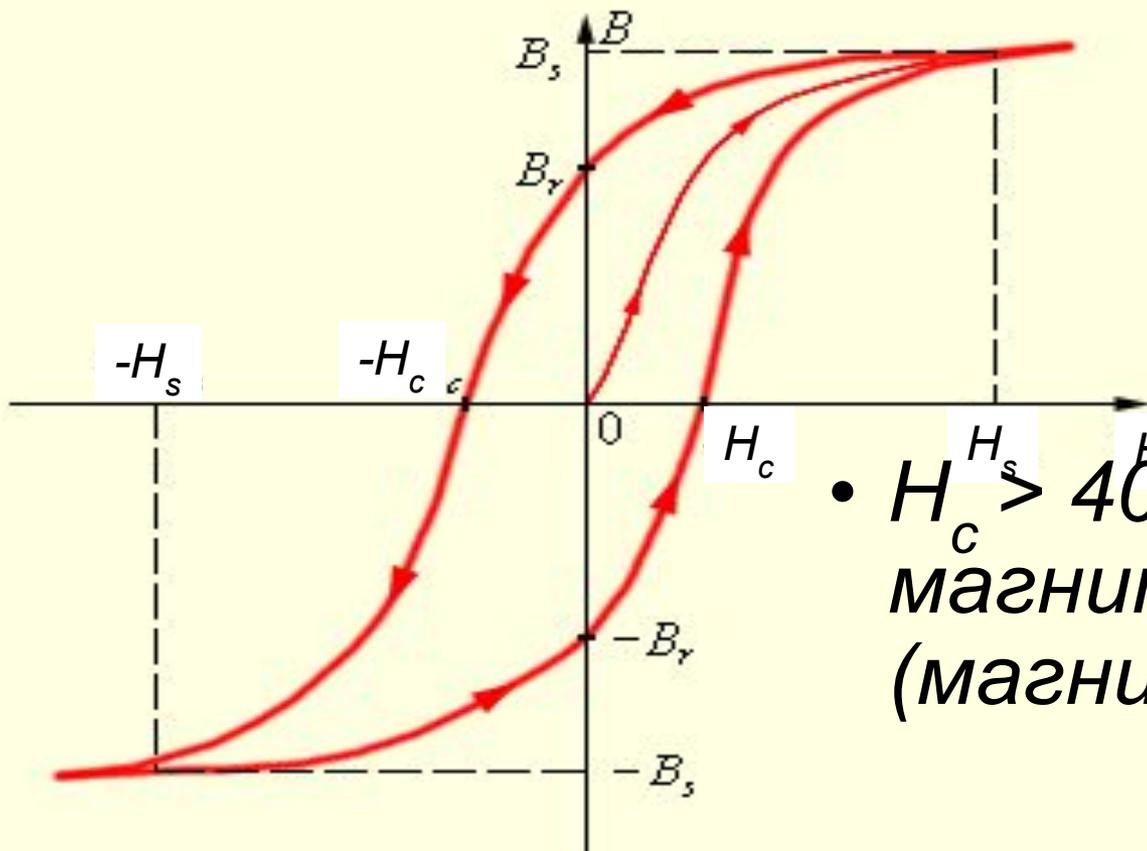


Joule
James Prescott
1818 - 1889



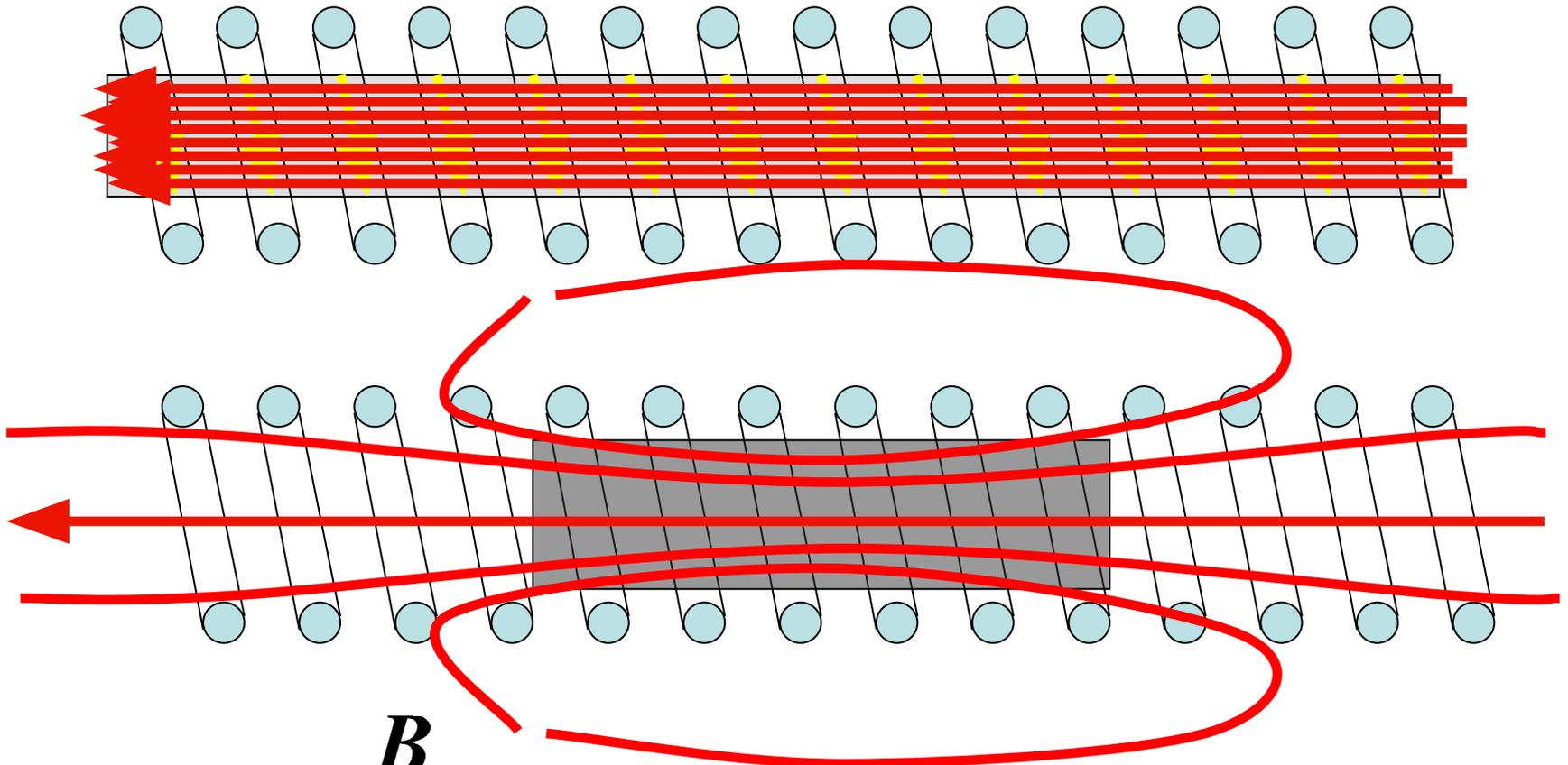
Классификация ферро- и ферримангнетиков

- $H_c < 4000 \text{ А/м}$ (50 Э) – магнитномягкие



- $H_c > 4000 \text{ А/м}$ (50 Э) – магнитножесткие (магнитотвёрдые)

Размагничивающий фактор



$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu} = H_0 - H_{\square} = H_0 - N \cdot I$$

Размагничивающий фактор

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu} = H_0 - H_{\text{с}} = H_0 - N \cdot I$$

$$I = (\mu - 1) \cdot H$$

$$\frac{B}{\mu_0 \mu} = H_0 - N \cdot (\mu - 1) \cdot \frac{B}{\mu_0 \mu}$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu H_0}{1 + N(\mu - 1)}$$

Значения размагничивающего фактора

Для эллипсоидов вращения ($b = c$) значение N_a может быть вычислено по формулам

$$N_a = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left[\frac{\gamma}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} \ln (\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - 1 \right] \text{ при } \gamma = \frac{a}{b} > 1$$

(о в о и д),

$$N_a = \frac{1}{1 - \gamma^2} \left[1 - \frac{\gamma}{(1 - \gamma^2)^{1/2}} \arccos \gamma \right] \text{ при } \gamma = \frac{a}{b} < 1$$

(с ф е р о и д).

где $\gamma = a/b$.

В единицах СИ $N_a + N_b + N_c = 1$, поэтому для однородного шара $N_a = N_b = N_c = 1/3$.

Значения размагничивающего фактора

| Отношение осей γ | | Цилиндр | Эллипсоид |
|--|-----|----------|-----------|
| $H = \frac{H_0}{1 + N(\mu - 1)}$ | 0 | 1,000000 | 1,000000 |
| | 1 | 0,270701 | 0,332803 |
| | 2 | 0,140127 | 0,173567 |
| | 5 | 0,039968 | 0,055892 |
| | 10 | 0,017197 | 0,020303 |
| $B = \frac{\mu_0 \mu H_0}{1 + N(\mu - 1)}$ | 20 | 0,006186 | 0,006775 |
| | 50 | 0,001291 | 0,001443 |
| | 100 | 0,000361 | 0,000431 |
| | 500 | 0,000014 | 0,000024 |

Намагничивание постоянного магнита

