

Лекция 9

Магнитное поле в веществе

Гипотеза Ампера. Молекулярные токи.

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

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

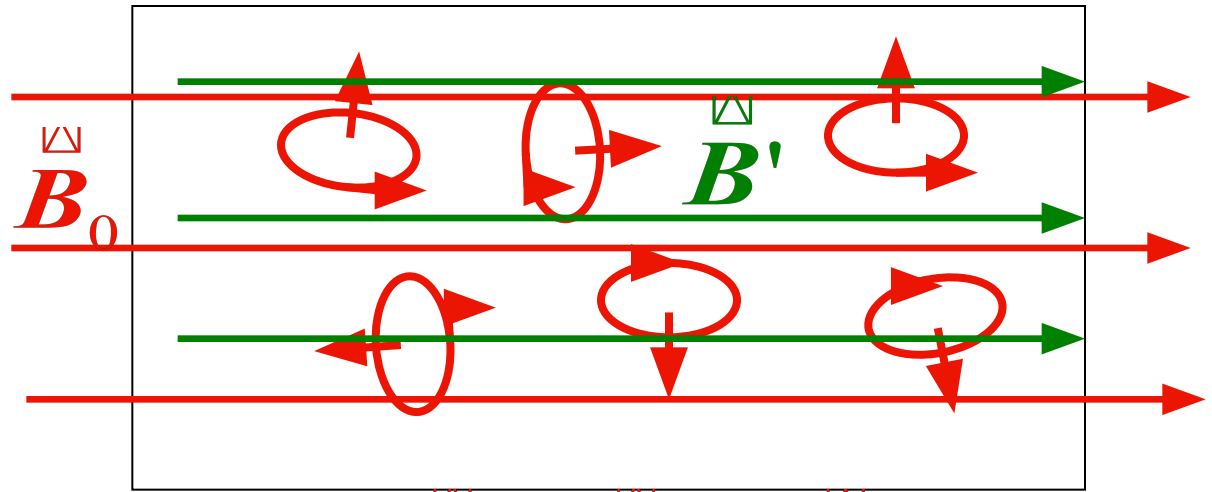
$$\vec{B}' = 0$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

$$\mu = 1 + \chi$$

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

μ – магнитная проницаемость вещества

χ – магнитная восприимчивость вещества

Магнитная проницаемость

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

Циркуляция поля в магнетиках

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

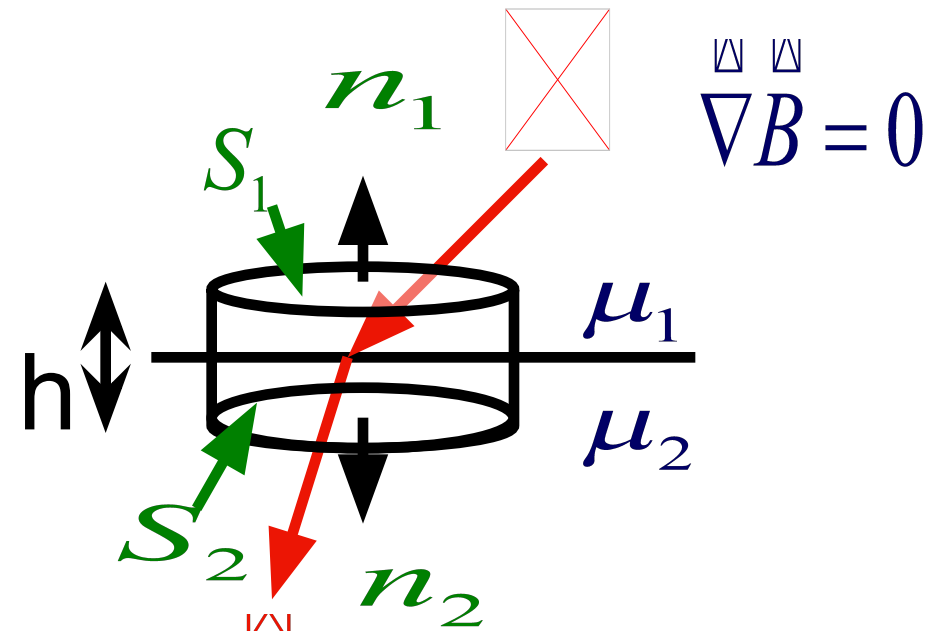
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$$

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

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

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

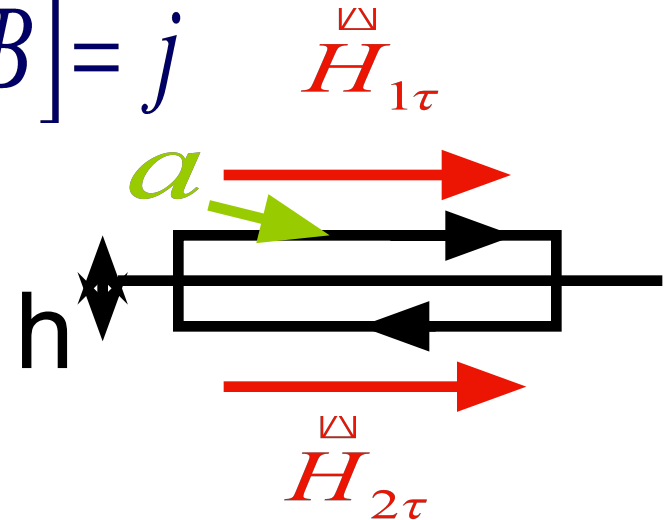
Граничные условия



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

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

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



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

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

Граничные условия

$B_{n1} = B_{n2}$

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

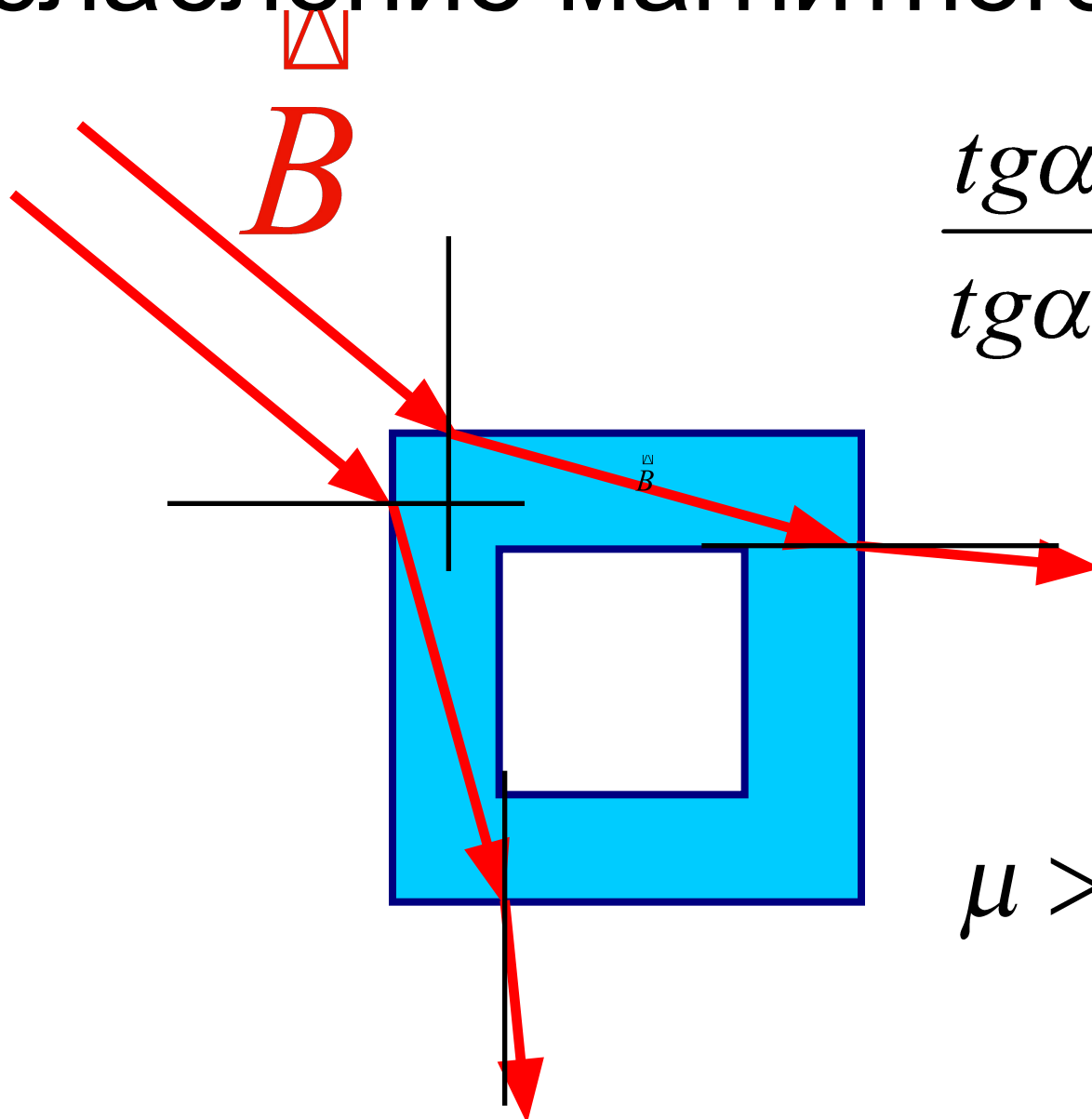
$\frac{B_{\tau 1}}{\mu_0 \cdot \mu_1} = \frac{B_{\tau 2}}{\mu_0 \cdot \mu_2}$

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

$\frac{\text{tg} \alpha_1}{\text{tg} \alpha_2} = \frac{B_{\tau 1} \cdot B_{n2}}{B_{n1} \cdot B_{\tau 2}}$

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

Ослабление магнитного поля



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

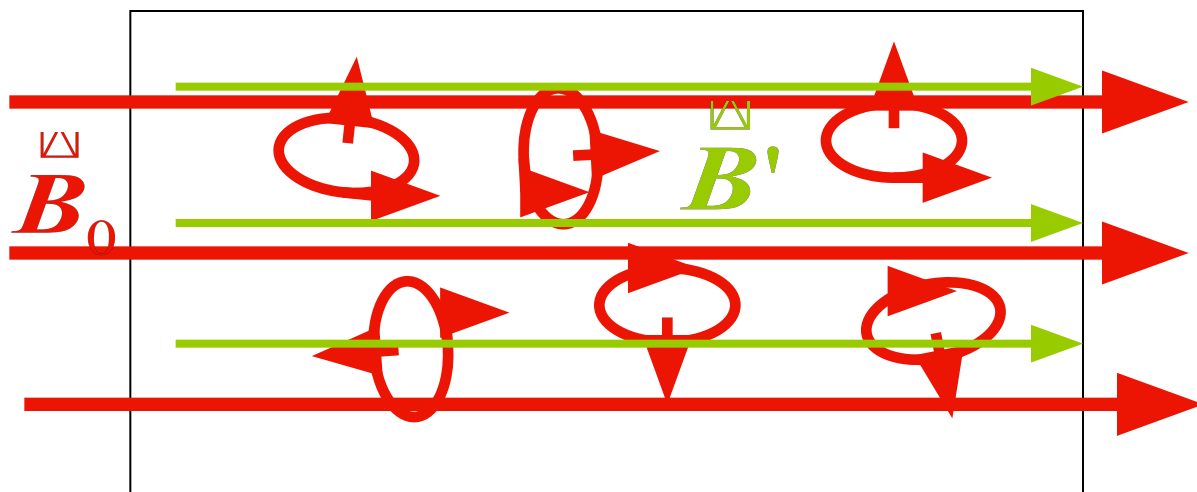
$$\mu \gg 1$$

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

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



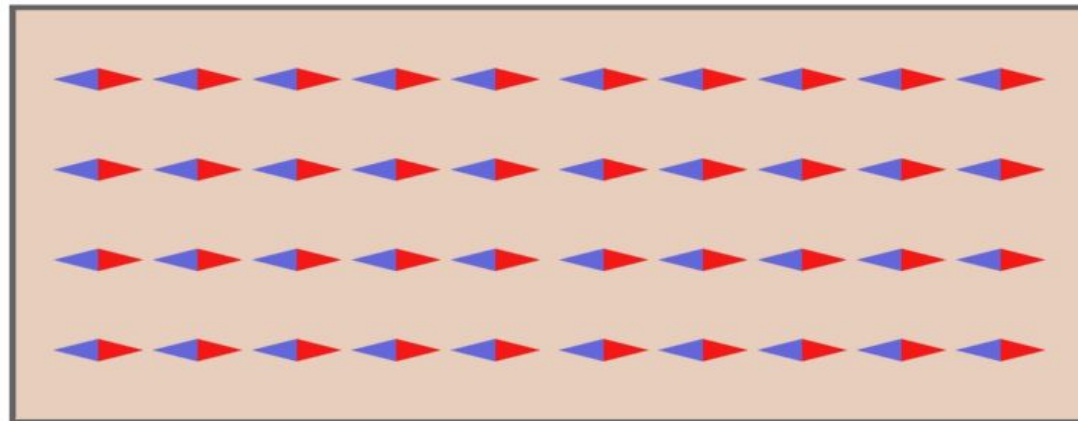
$$\begin{aligned} \vec{B}_0 &\neq 0 \\ \sum \vec{p}_{mi} &\neq 0 \\ \vec{B}' &\neq 0 \end{aligned}$$

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

Закон Кюри: $\chi = \frac{C}{T}$

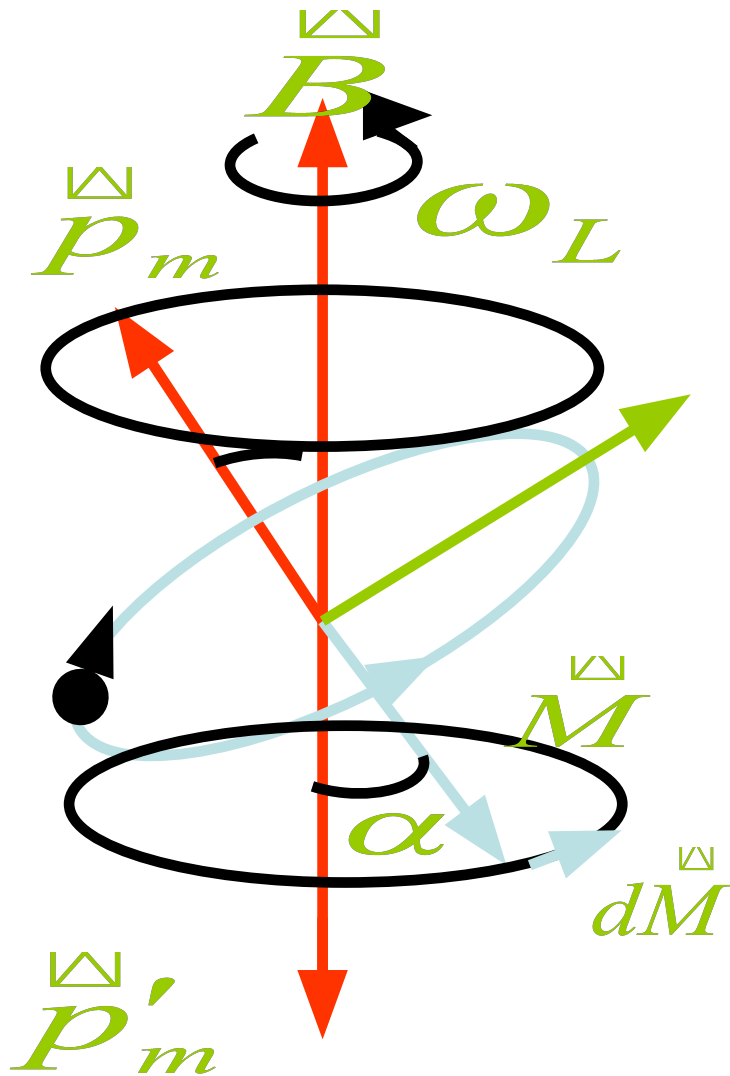
Перемагничивание парамагнетиков

H



Природа диамагнетизма.

Ларморова прецессия связанных электронов



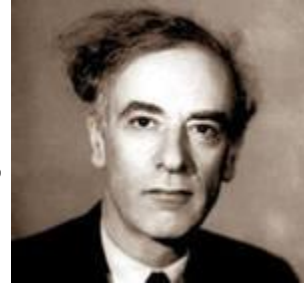
$$\omega_L = \frac{eB}{2m}$$

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



Paul Langevin
1872 — 1946

Природа диамагнетизма. Диамагнетизм свободных электронов



Ландау
Лев Давидович
1908 - 1968

Скорость частицы

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

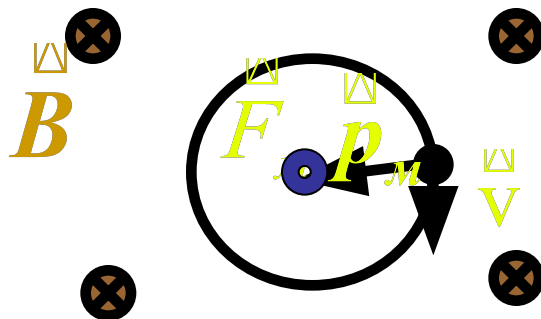
Сила Лоренца

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

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

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

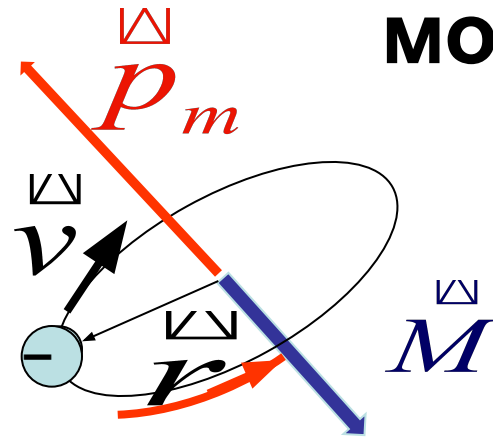
$$R = \frac{m}{qB} \cdot \frac{2\pi R}{T} \quad T = \frac{2\pi m}{qB}$$



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

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

Магнитные моменты атомов и молекул



Гиромагнитное отношение

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

$$M = mvr$$

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

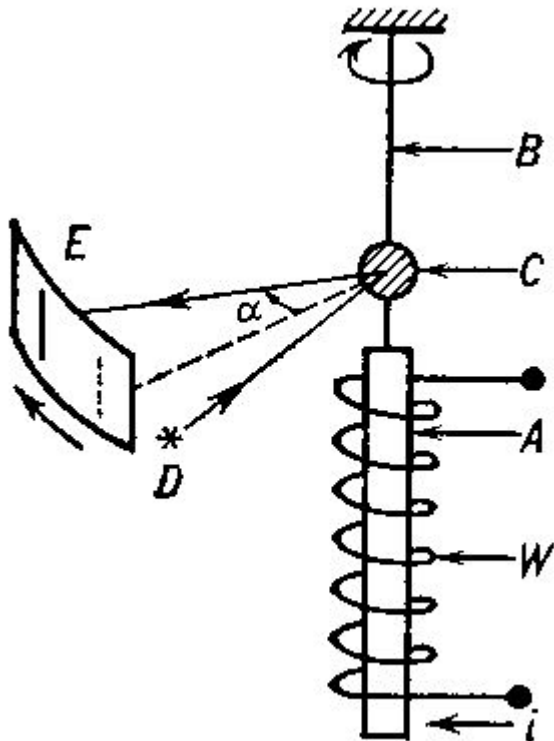
Опыт Эйнштейна- де Хааса

Опыт Барнетта

Магнитные моменты атомов и молекул

Опыт Эйнштейна- де Хааса
1909 - 1915 г.

Опыт Барнетта
1909 - 1914 г.



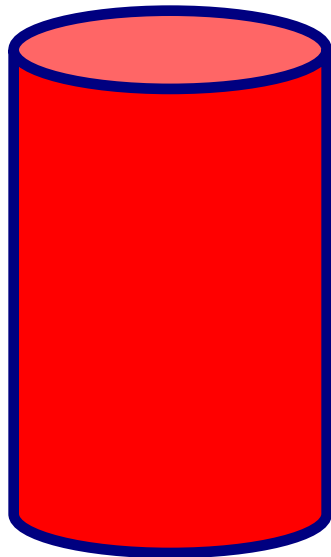
Намагничивание магнетика
при его вращении.

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

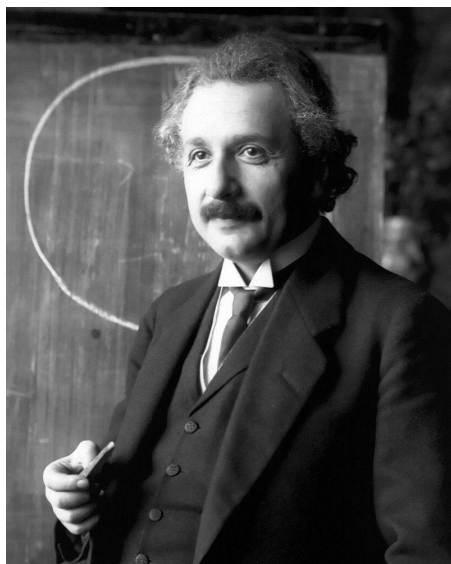
Экспериментатор	Место проведения работы	Время публикации	Результат
Барнетт С.	Физическая лаборатория Университета штата Огайо, США	1915	2,0 (1914 г.) 2,3 (1915 г.)
Эйнштейн – де Гааз	Высшая физико-техническая школа, Берлин, Германия	1915	1,02±0,10
Де Гааз	Институт Тейлера, Харлем, Голландия	1916	1,2
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
Суксепт, 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

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





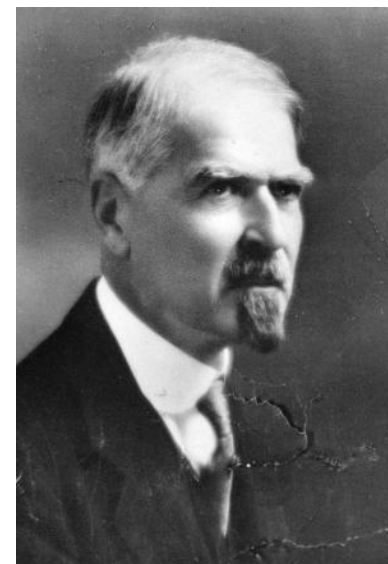
Owen Willans
Richardson
1879 – 1959
Великобритания



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



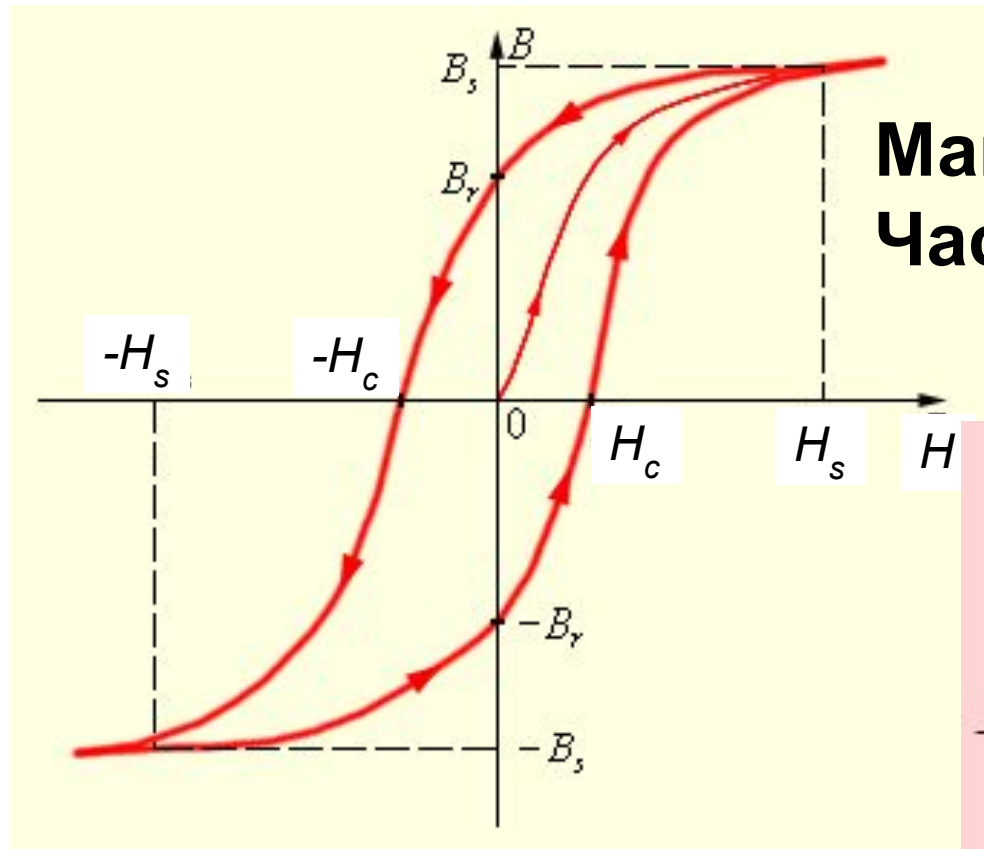
Wander Johannes
de Haas
1878 – 1960
Нидерланды



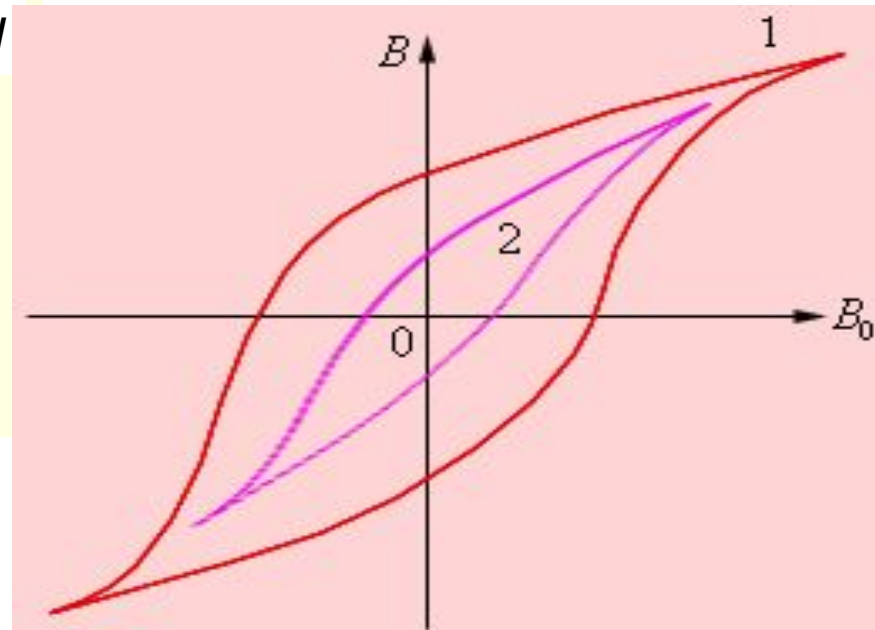
Samuel Jackson
Barnett
1873 — 1956
США

Ферромагнетизм

Петля гистерезиса

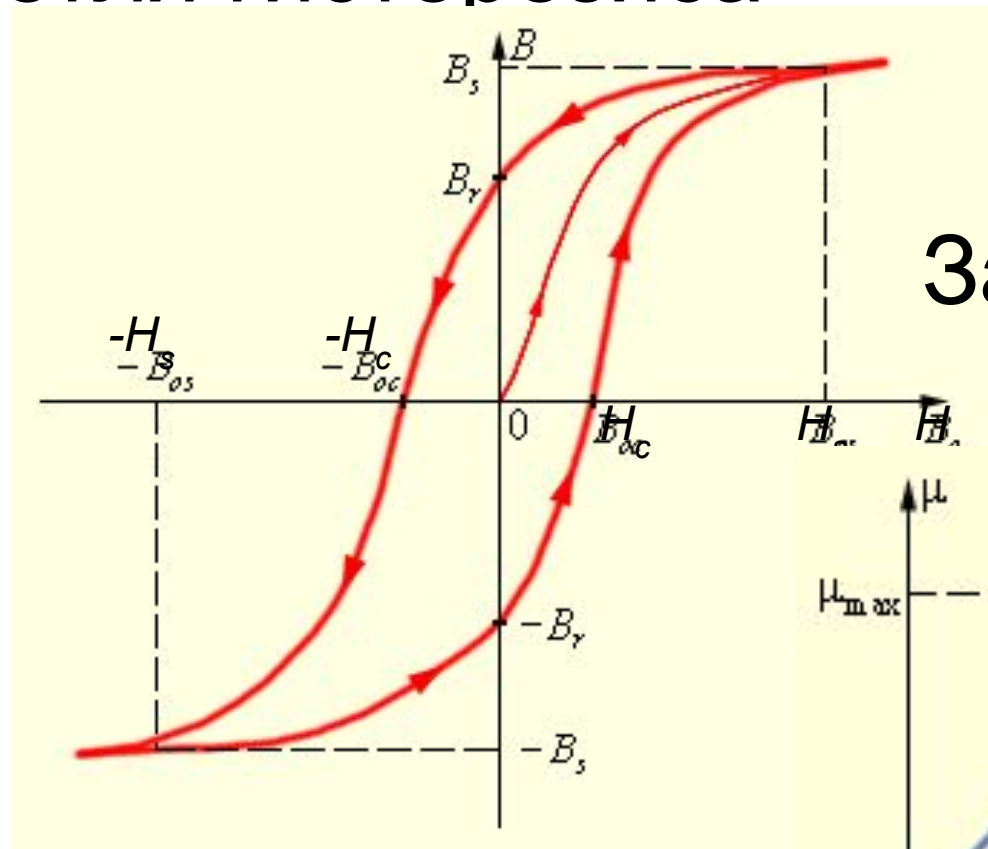


Максимальная петля 1
Частный цикл 2

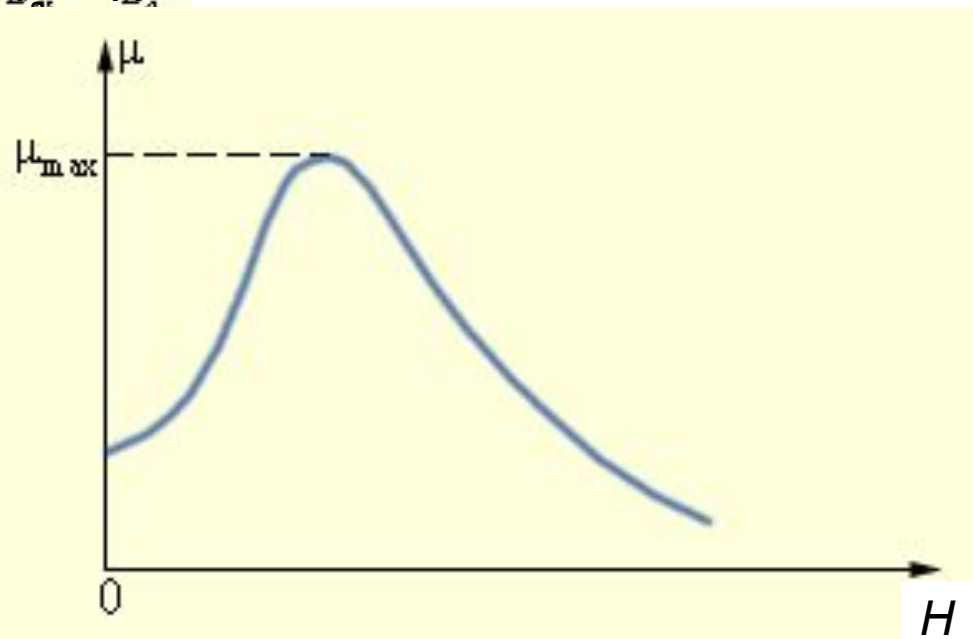


Ферромагнетизм

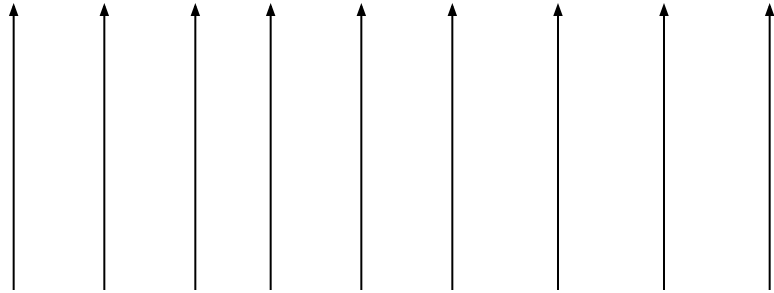
Петля гистерезиса



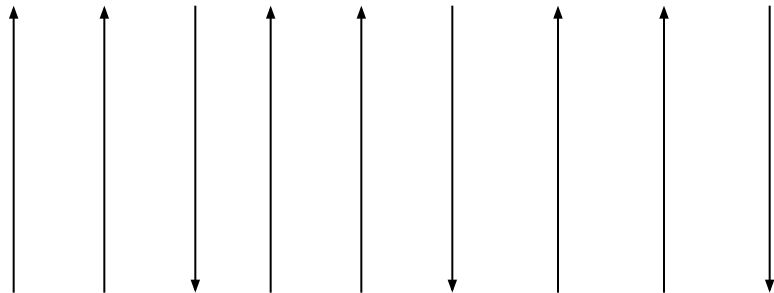
Зависимость μ от H



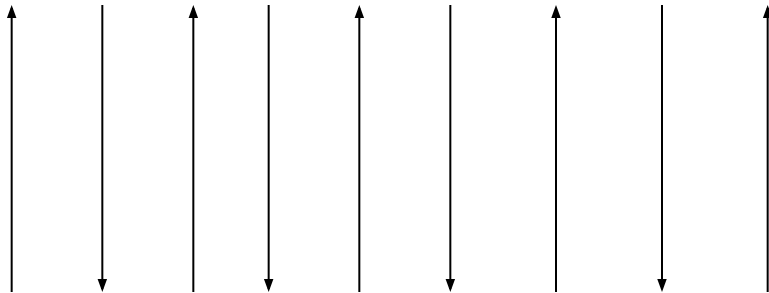
Природа упорядоченного магнетизма



- ферромагнетизм:
Fe, Ni, Co, Gd



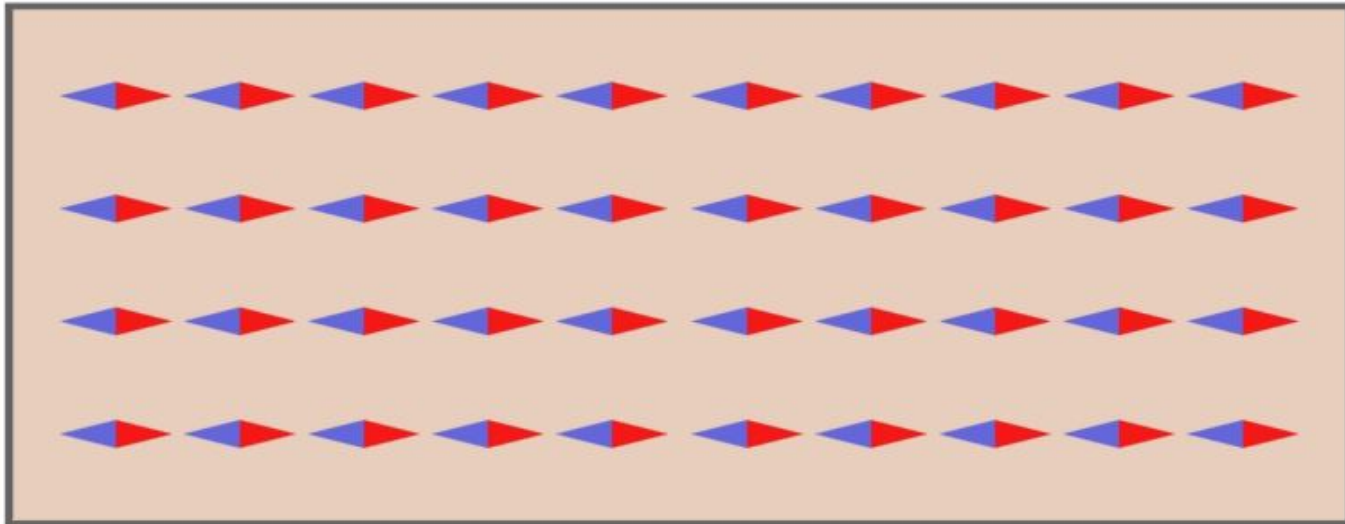
- ферримагнетизм
 Fe_3O_4



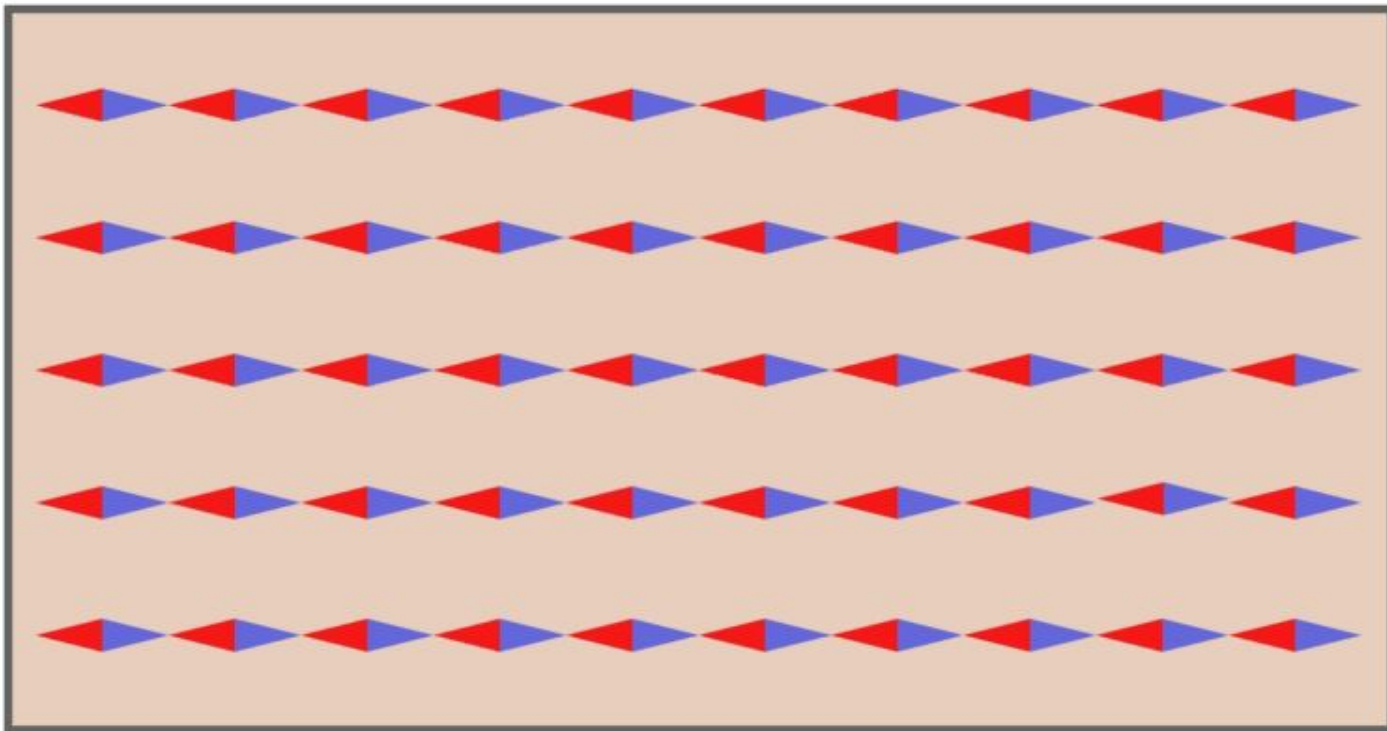
- антиферромагнетизм:
Cr

Перемагничивание парамагнетиков

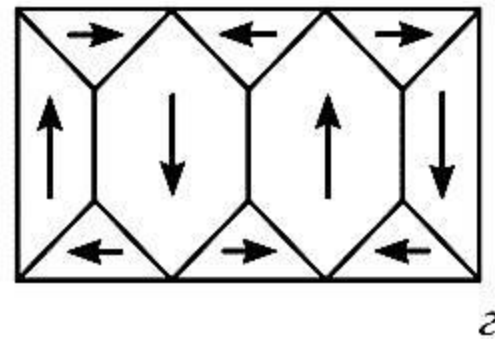
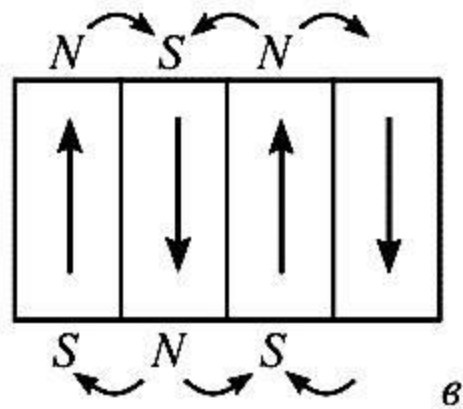
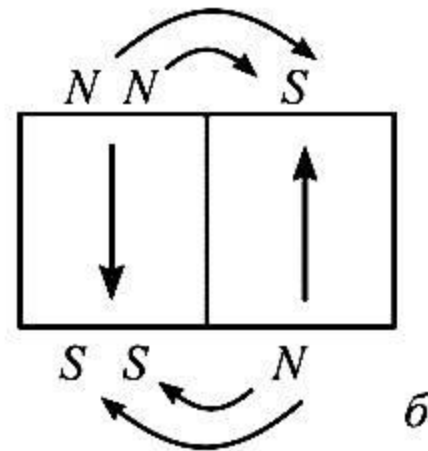
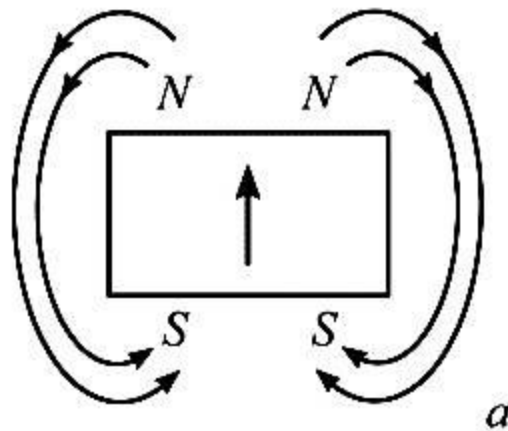
H



Перемагничивание ферромагнетиков

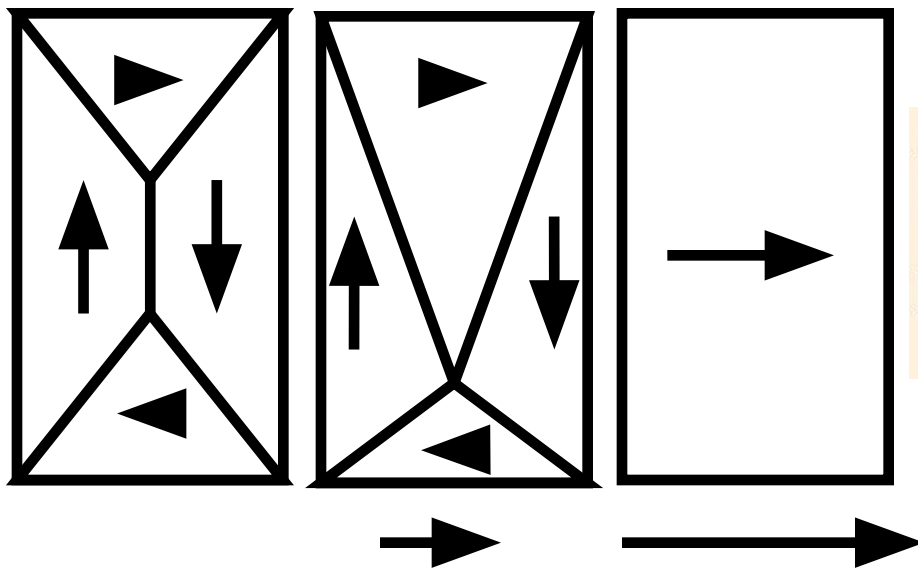


Магнитные домены

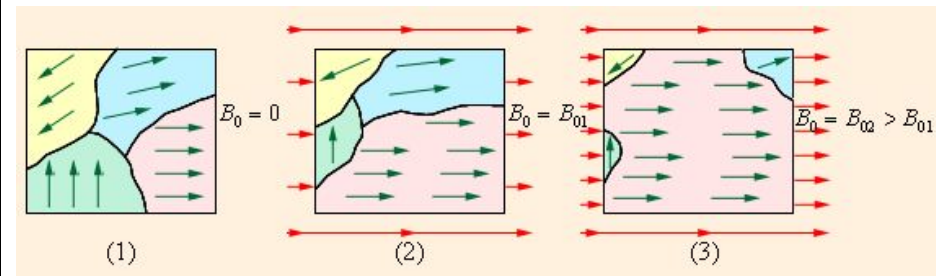


Смещение границ доменов в ферро- или ферримагнетике

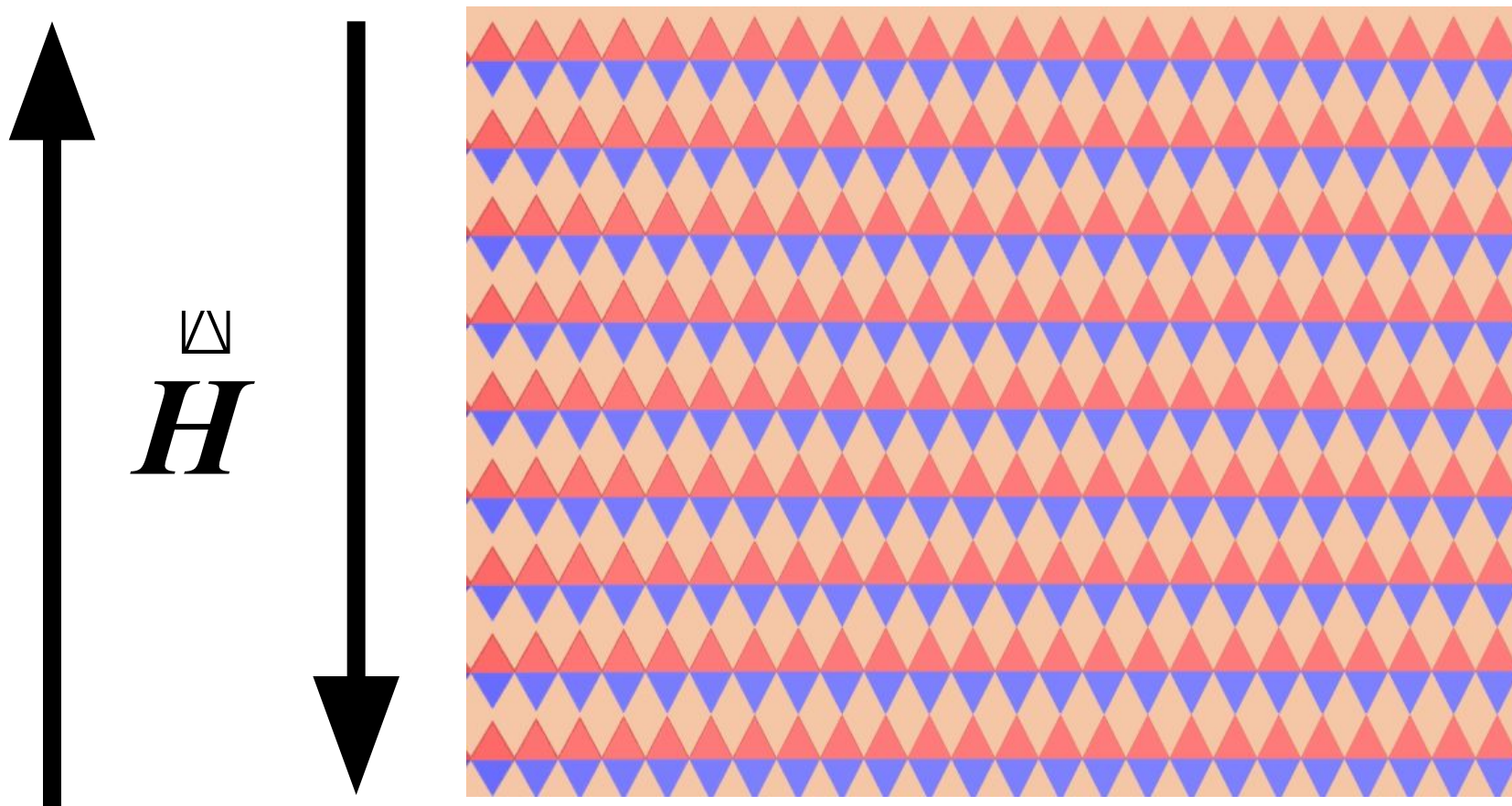
Модель Л.Д.Ландау



Доменная структура - эксперимент

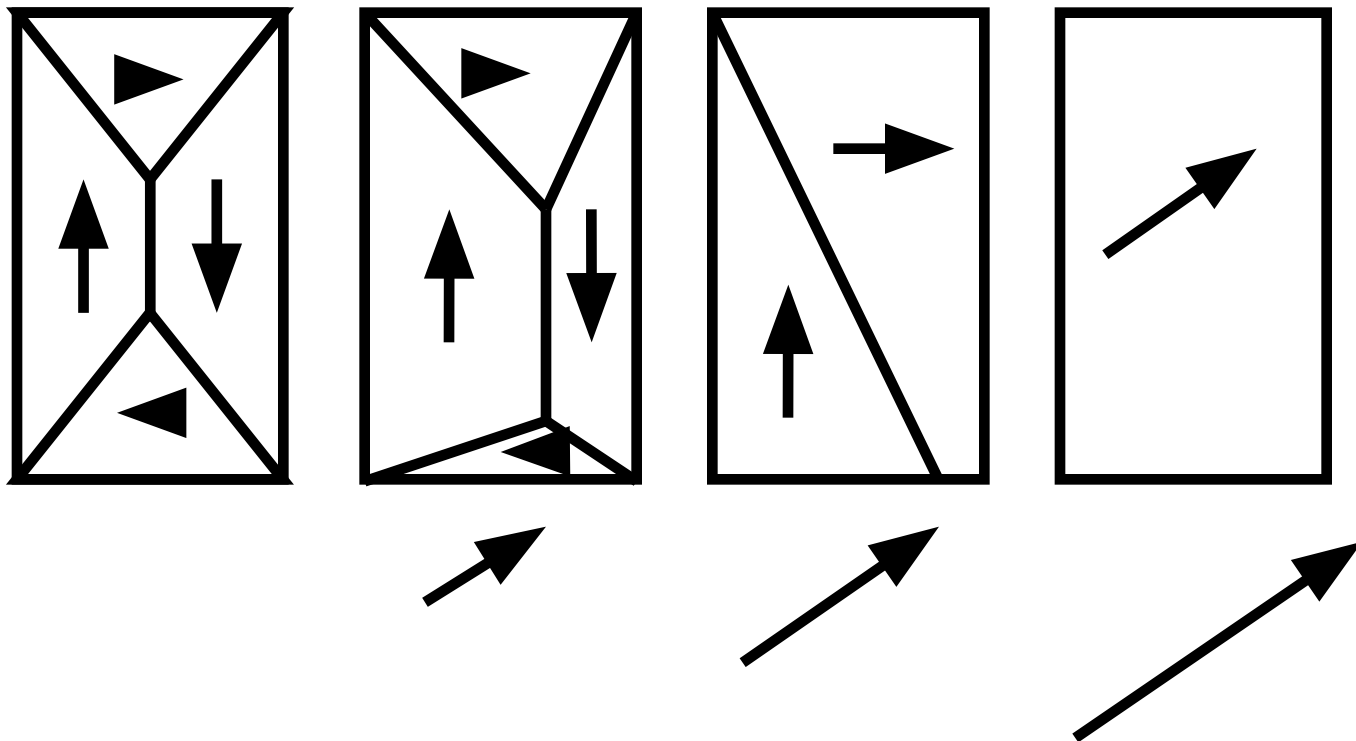


Движение доменной стенки при перемагничивании

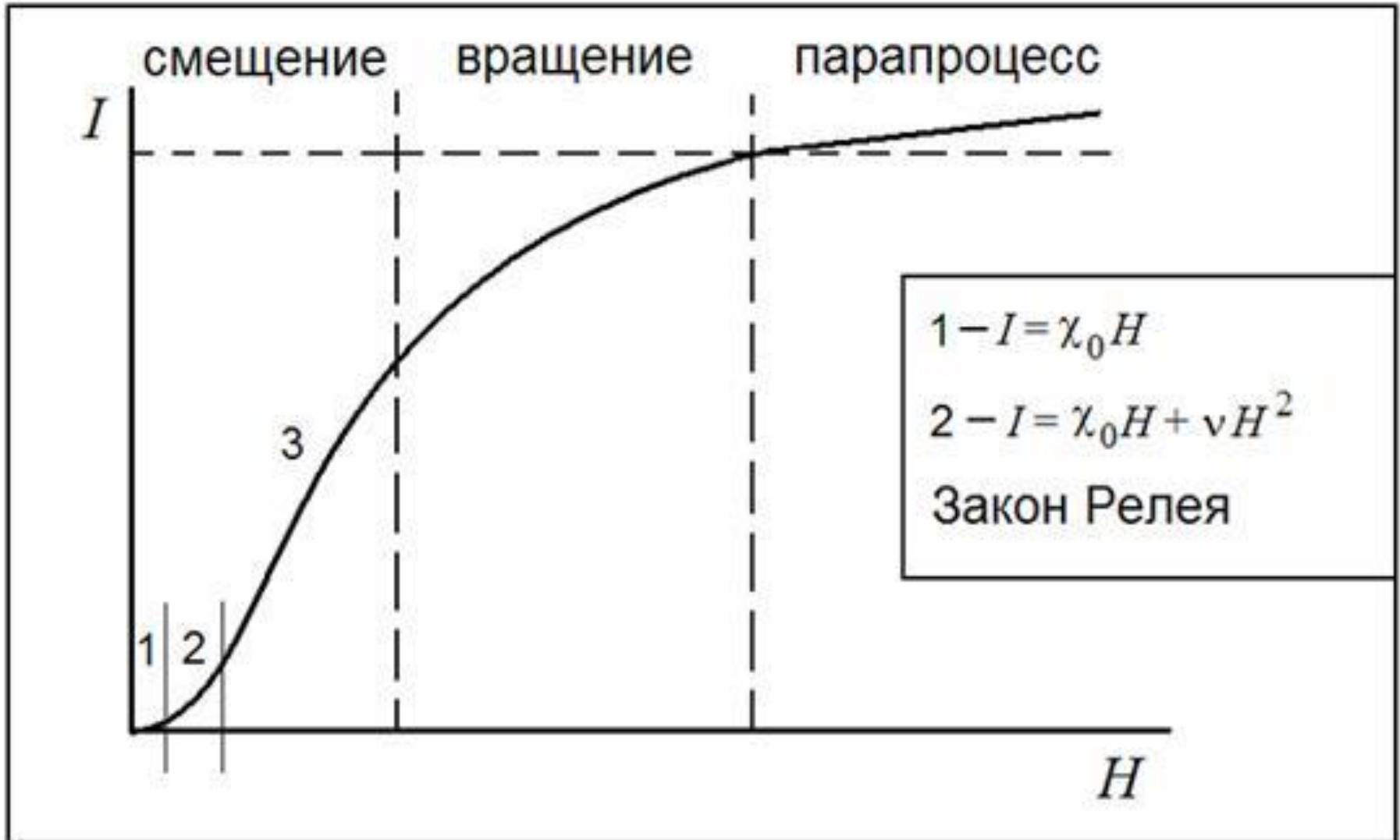


Смещение границ доменов в ферро- или ферримагнетике

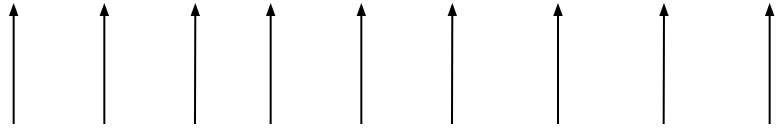
Модель Л.Д.Ландау



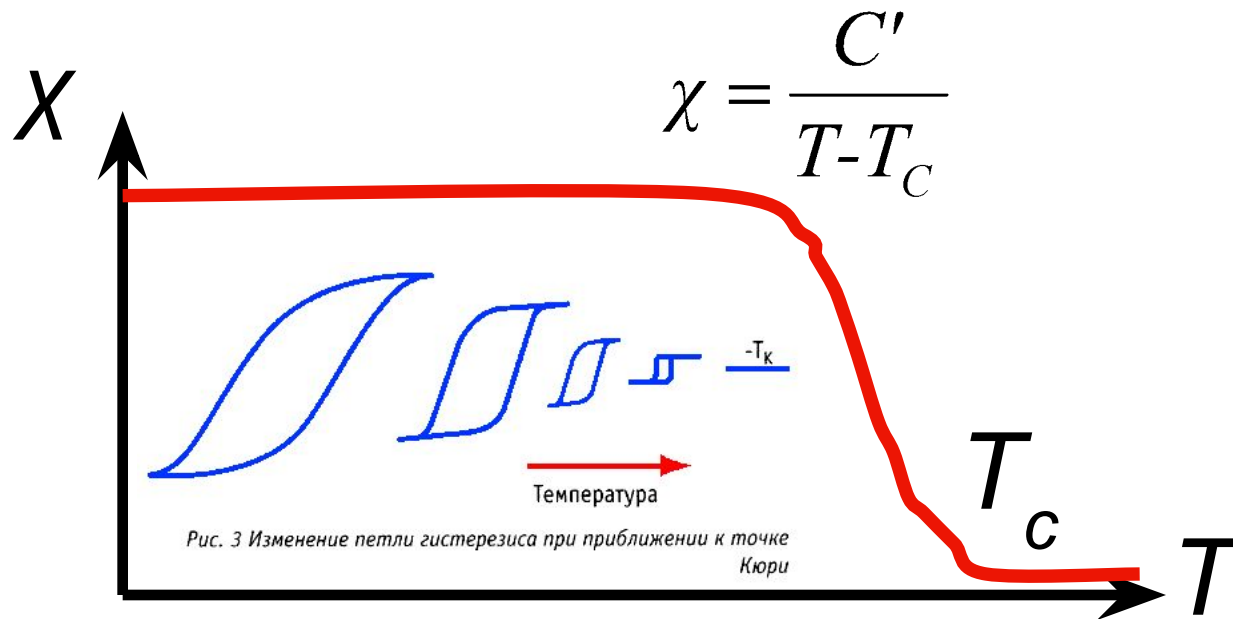
Стадии первичного намагничивания



Температура Кюри



Закон Кюри - Вейса : при $T > T_C$



$$w_{обм} = k_B \cdot T_C$$



Pierre Curie
1859 - 1906

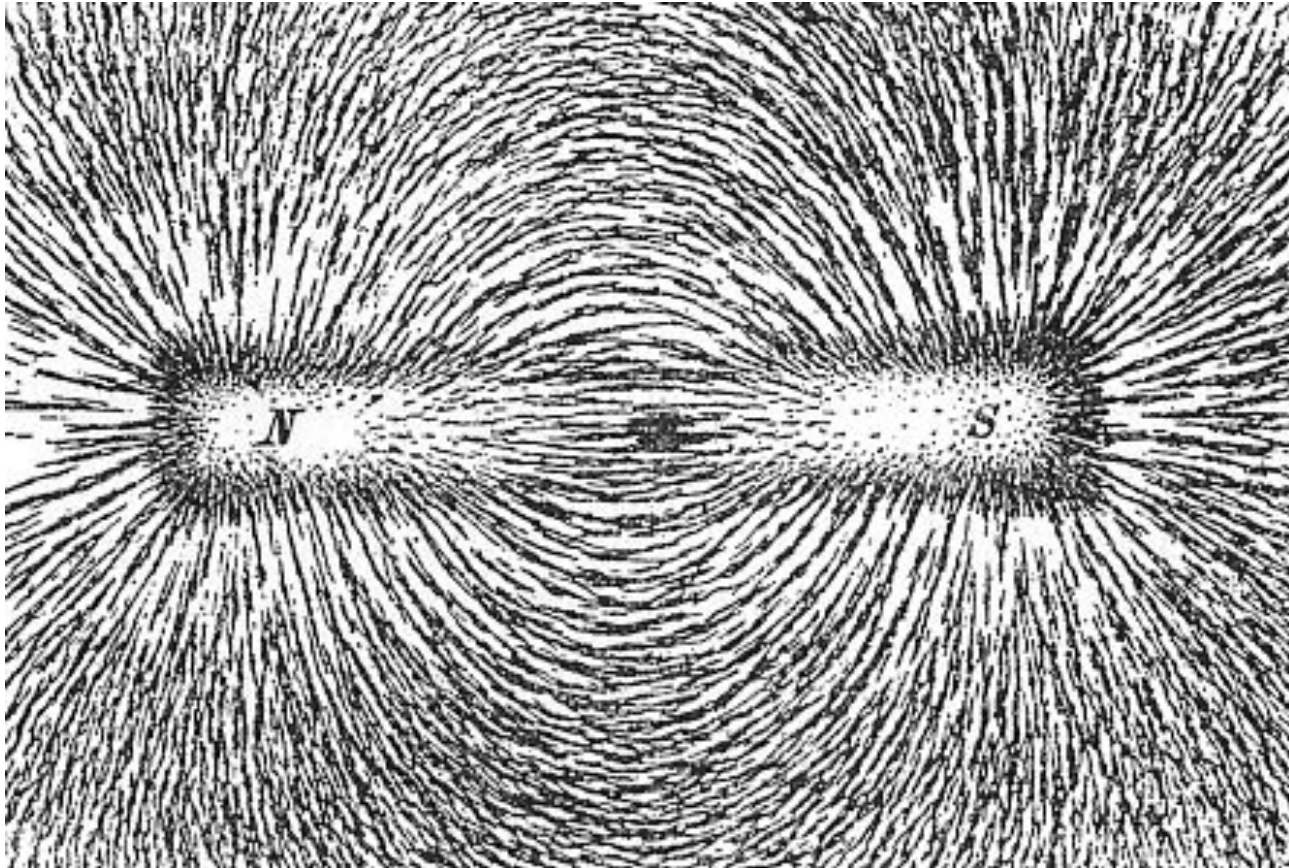


Pierre-Ernest
Weiss
1865 - 1940

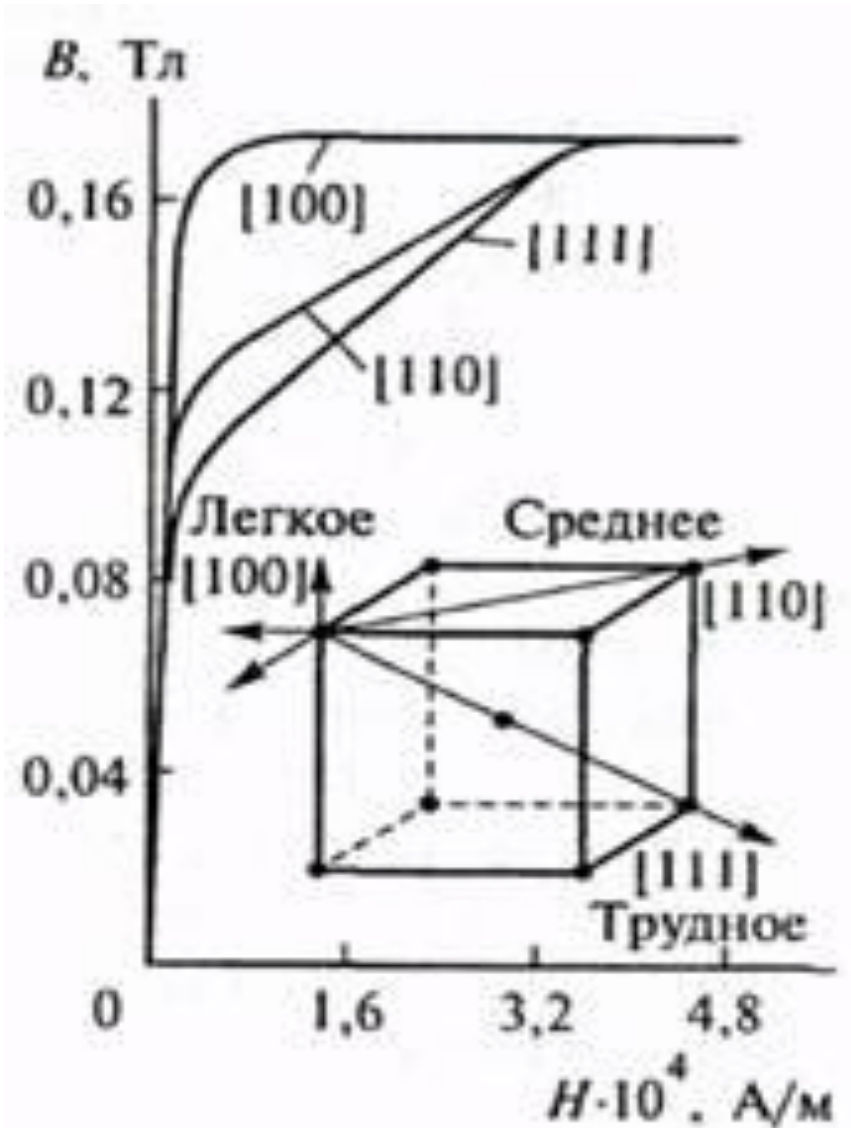
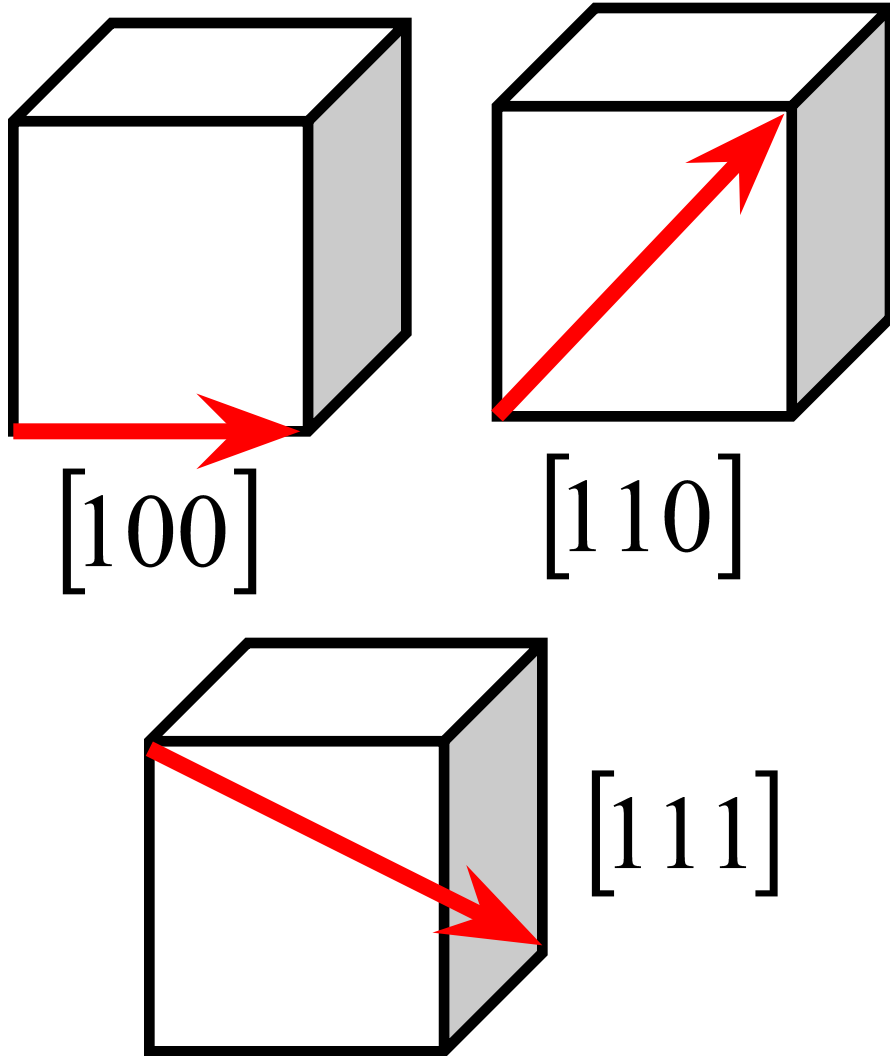
Свойства некоторых ферромагнетиков

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

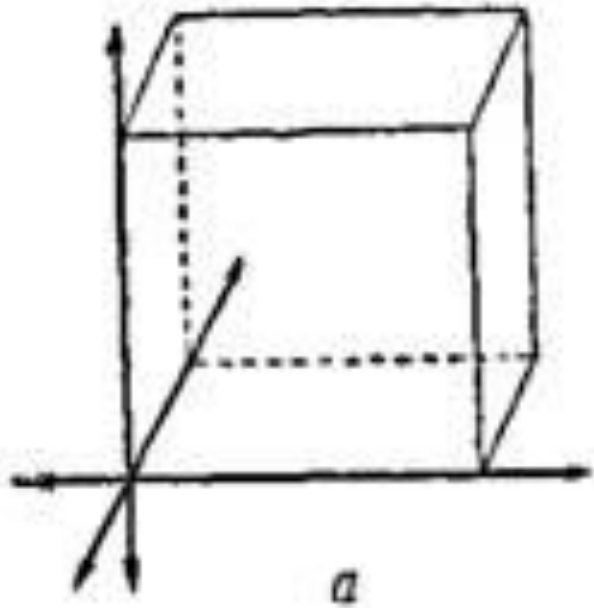


Оси лёгкого и тяжёлого намагничивания

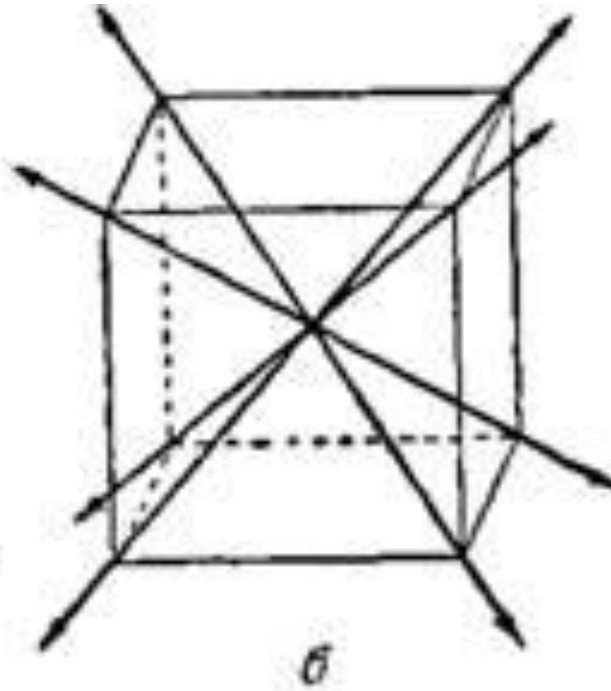


Оси лёгкого намагничивания

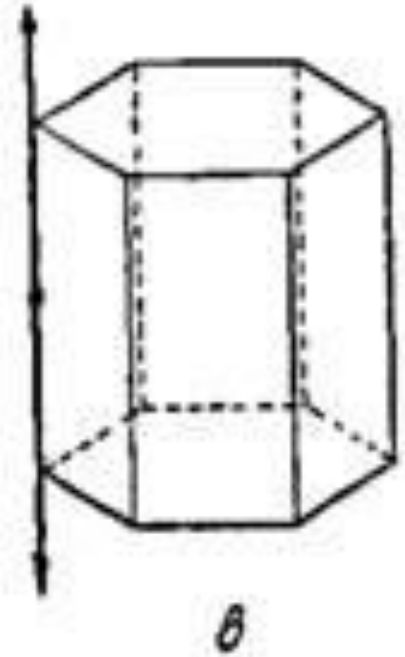
Fe



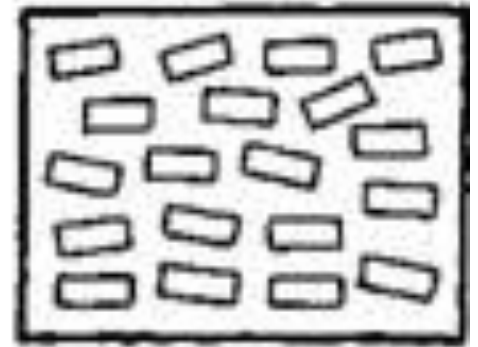
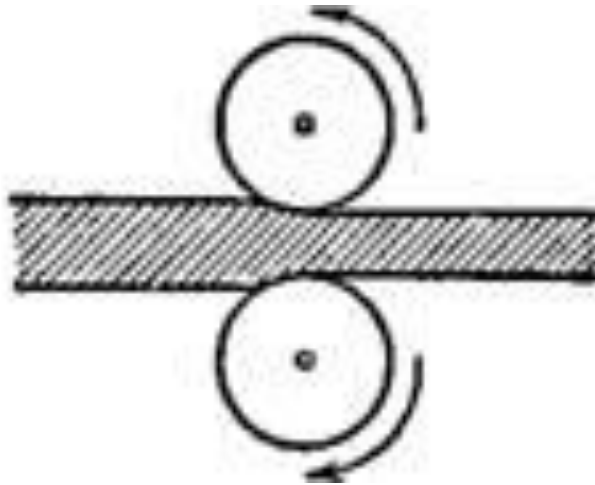
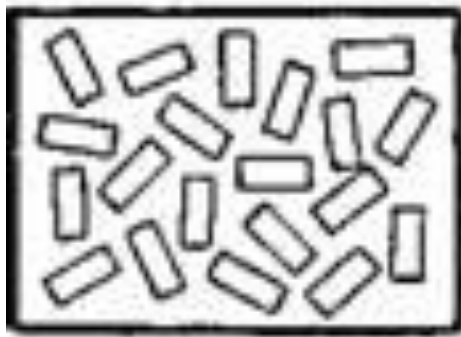
Ni



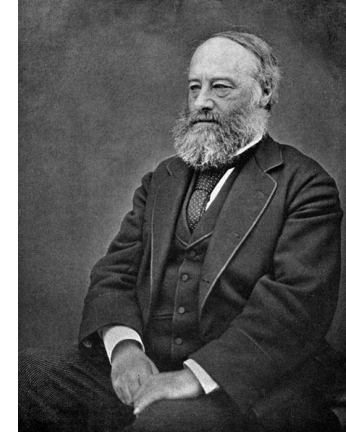
Co



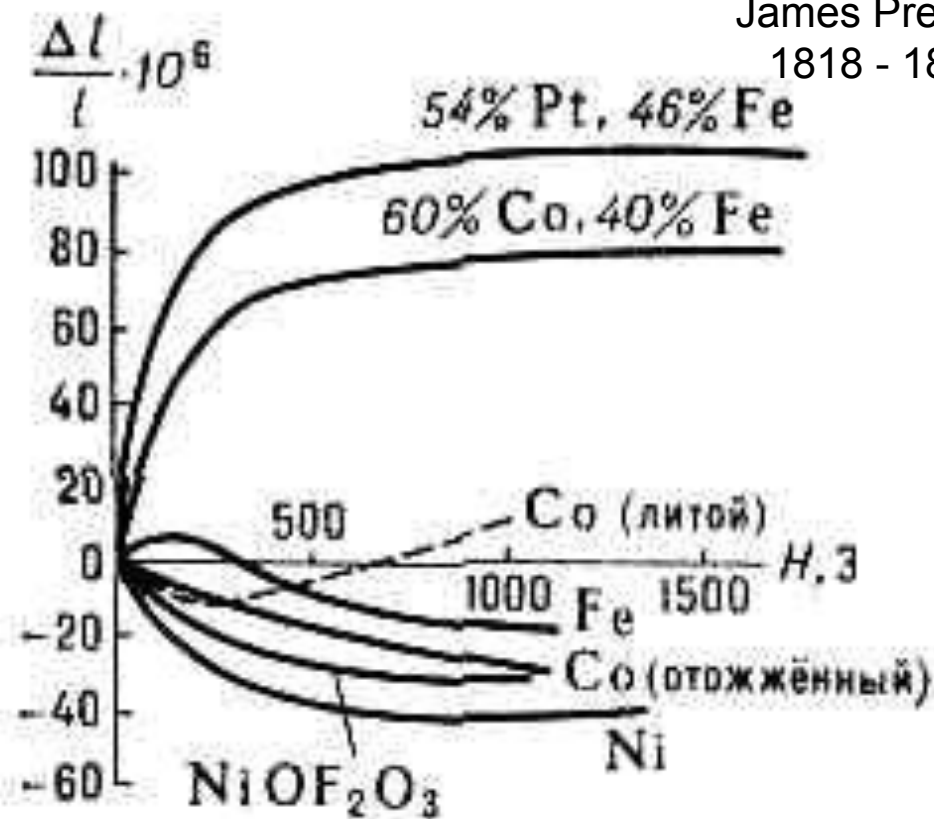
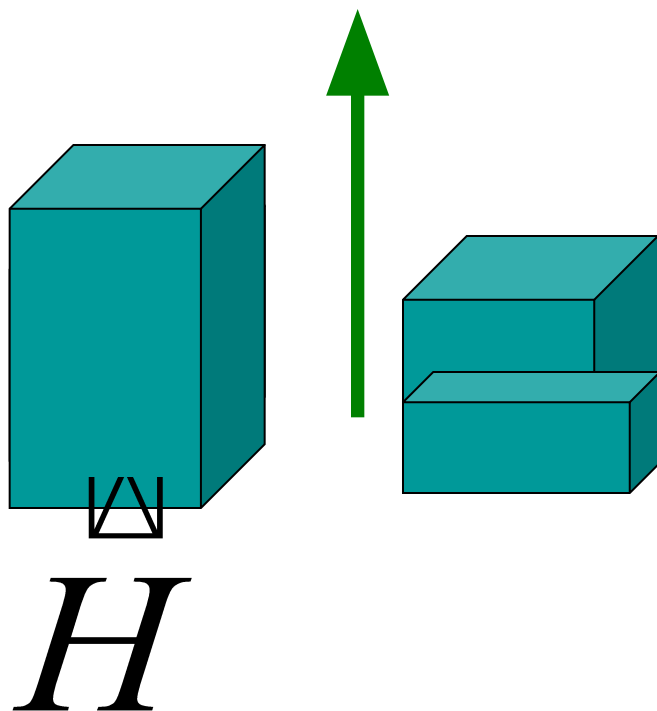
Текстура прокатки



Магнитострикция (1842)

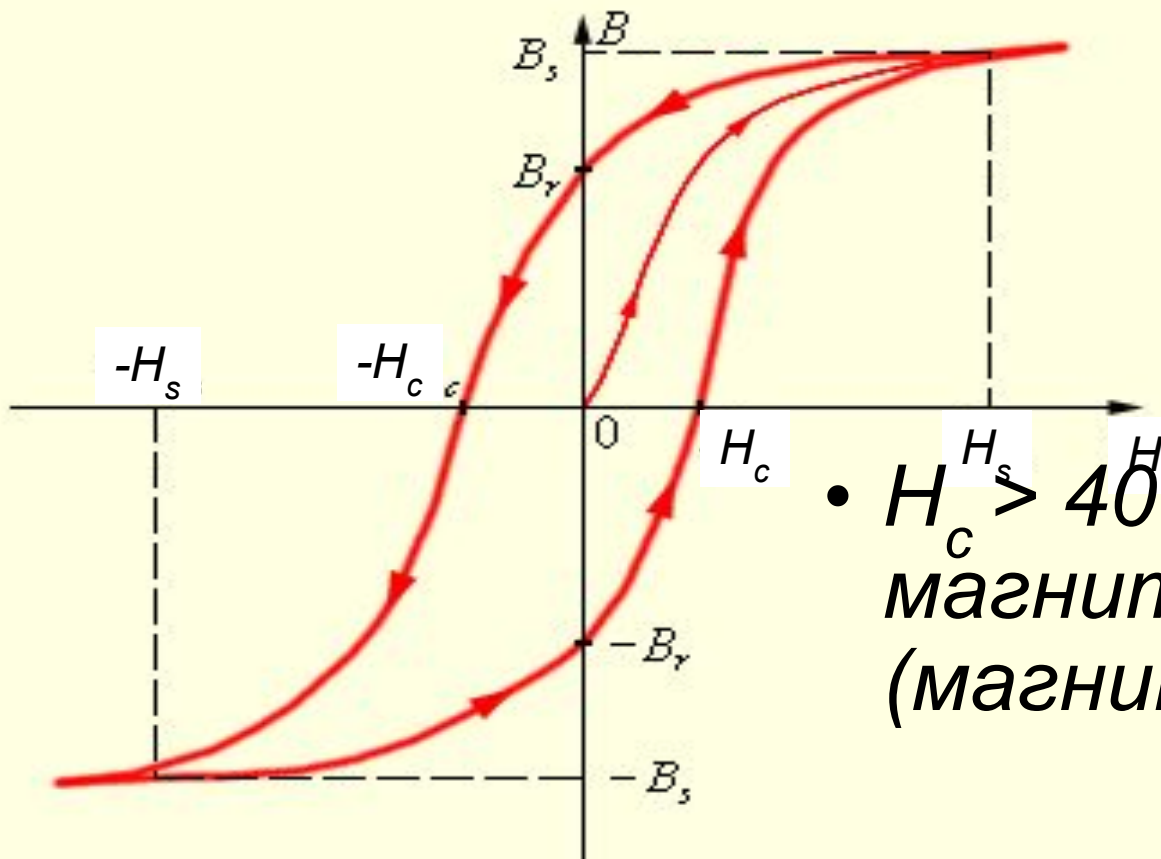


Joule
James Prescott
1818 - 1889



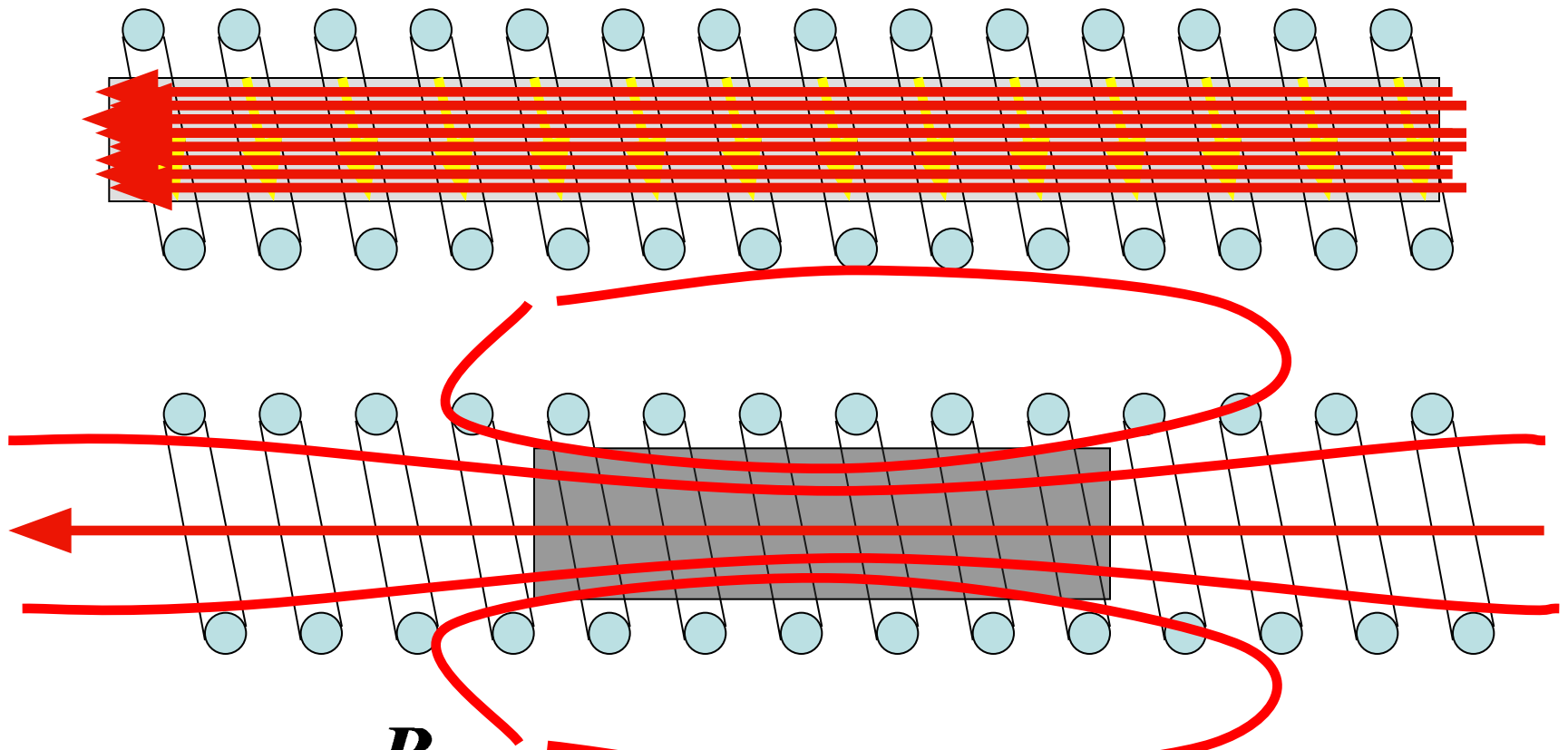
Классификация ферро- и ферримагнетиков

- $H_c < 4000 \text{ А/м}$ (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

