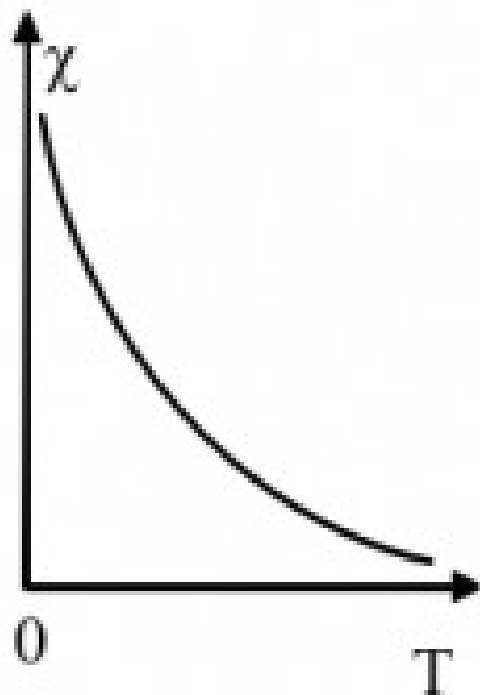


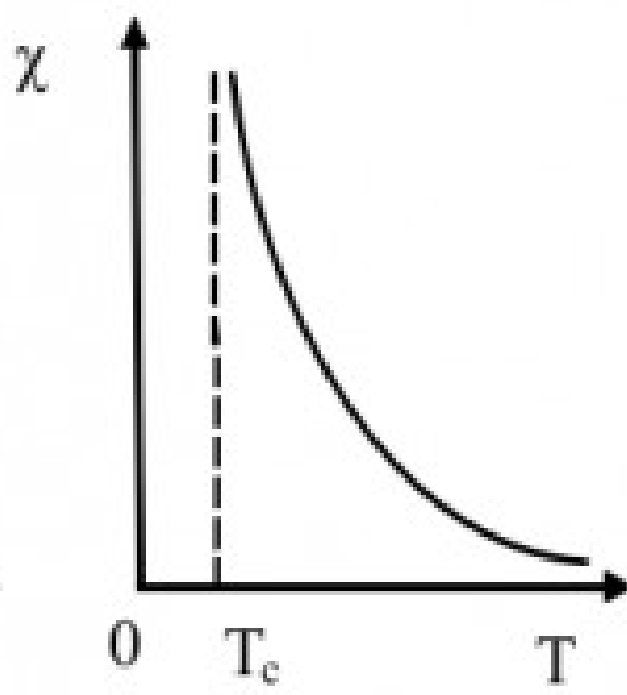
Ферромагнитный переход. Зависимость восприимчивости от температуры.

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

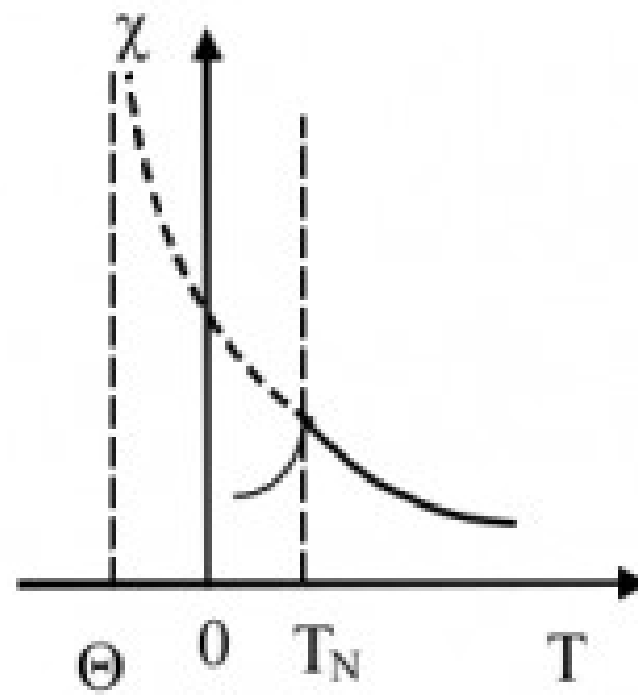
Парамагнетик



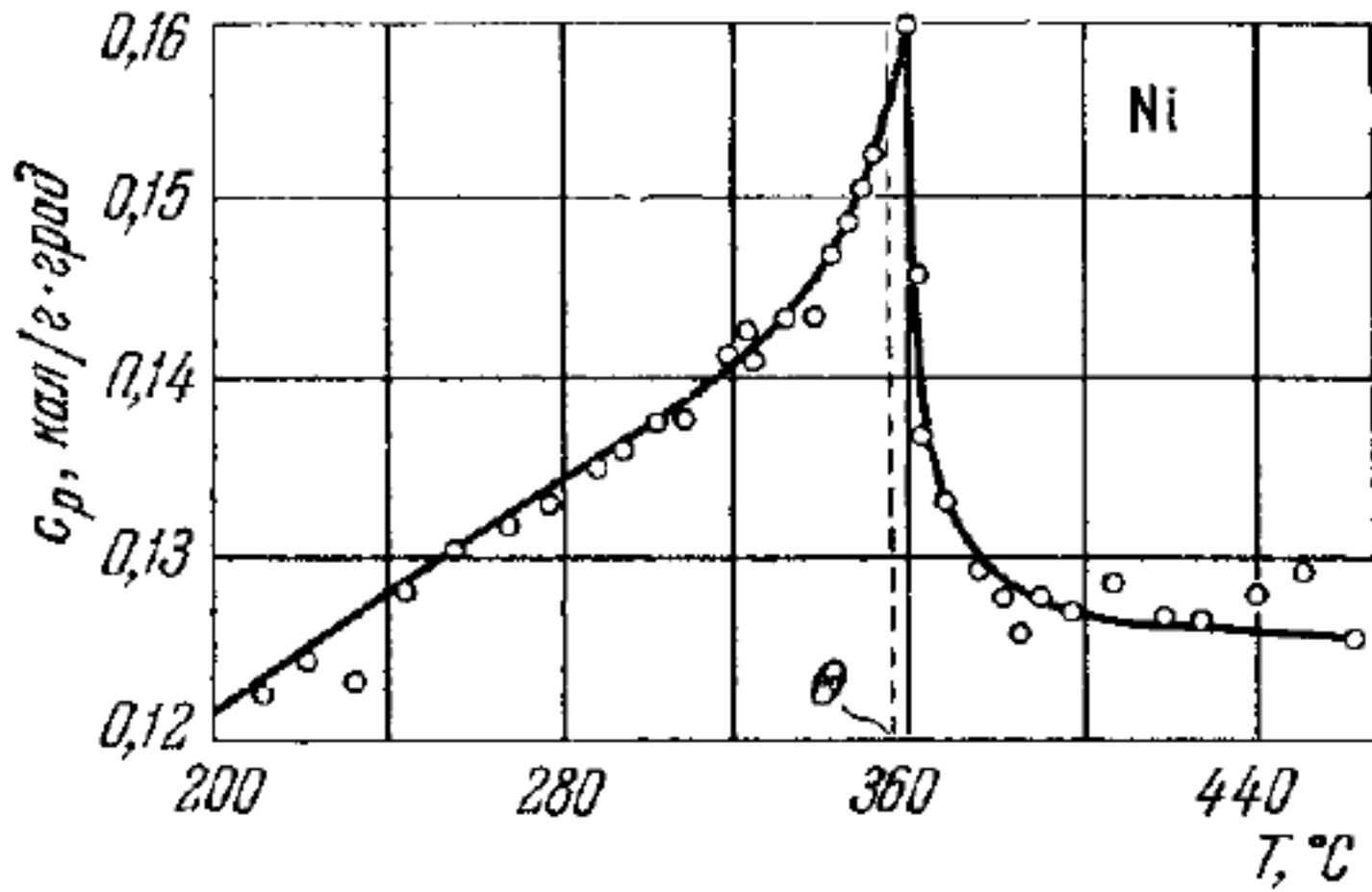
Ферромагнетик



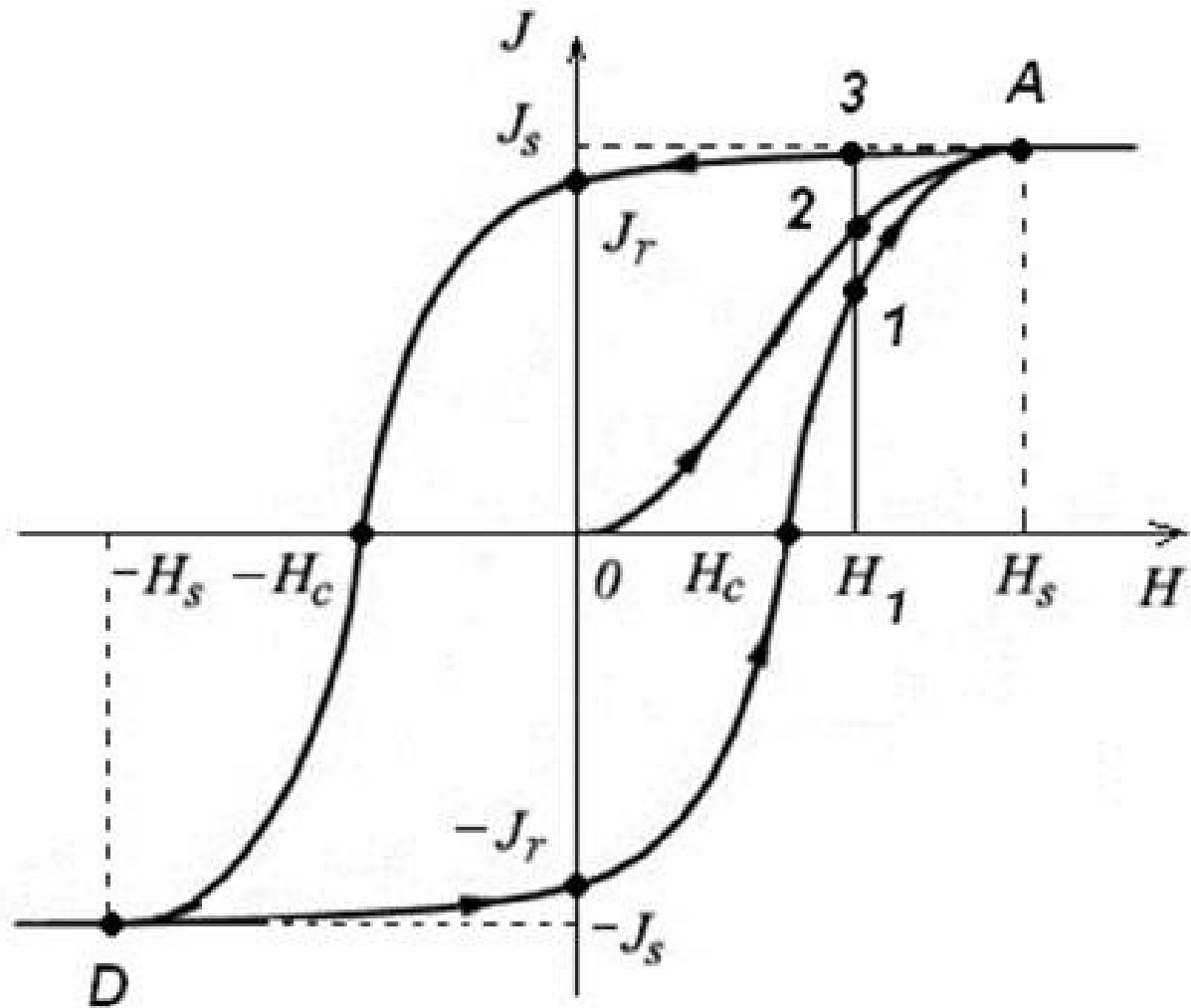
Антиферромагнетик



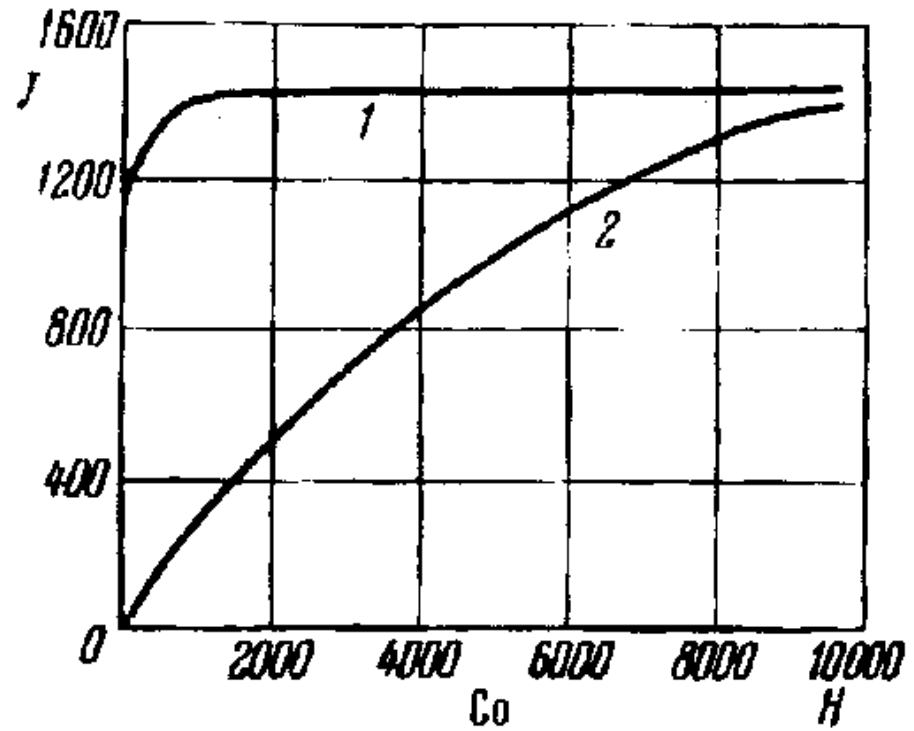
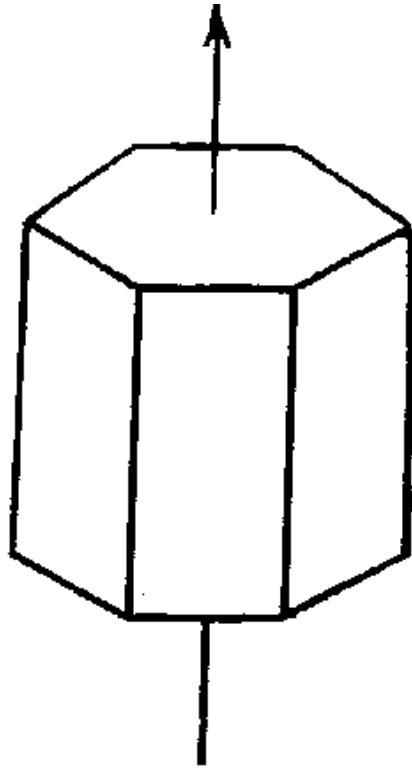
Аномалия теплоёмкости при переходе в ферромагнитное состояние



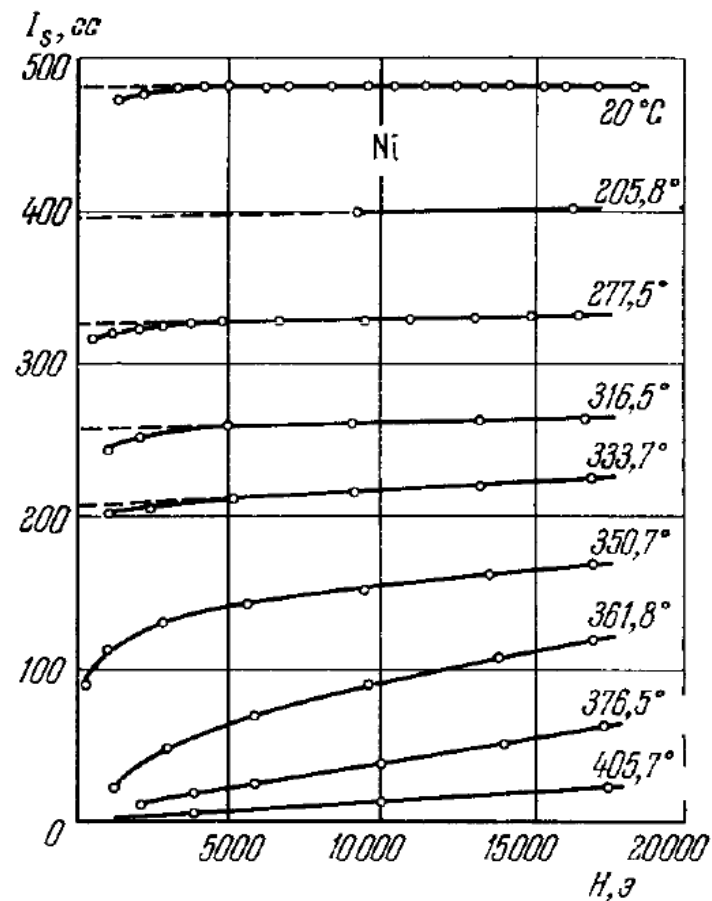
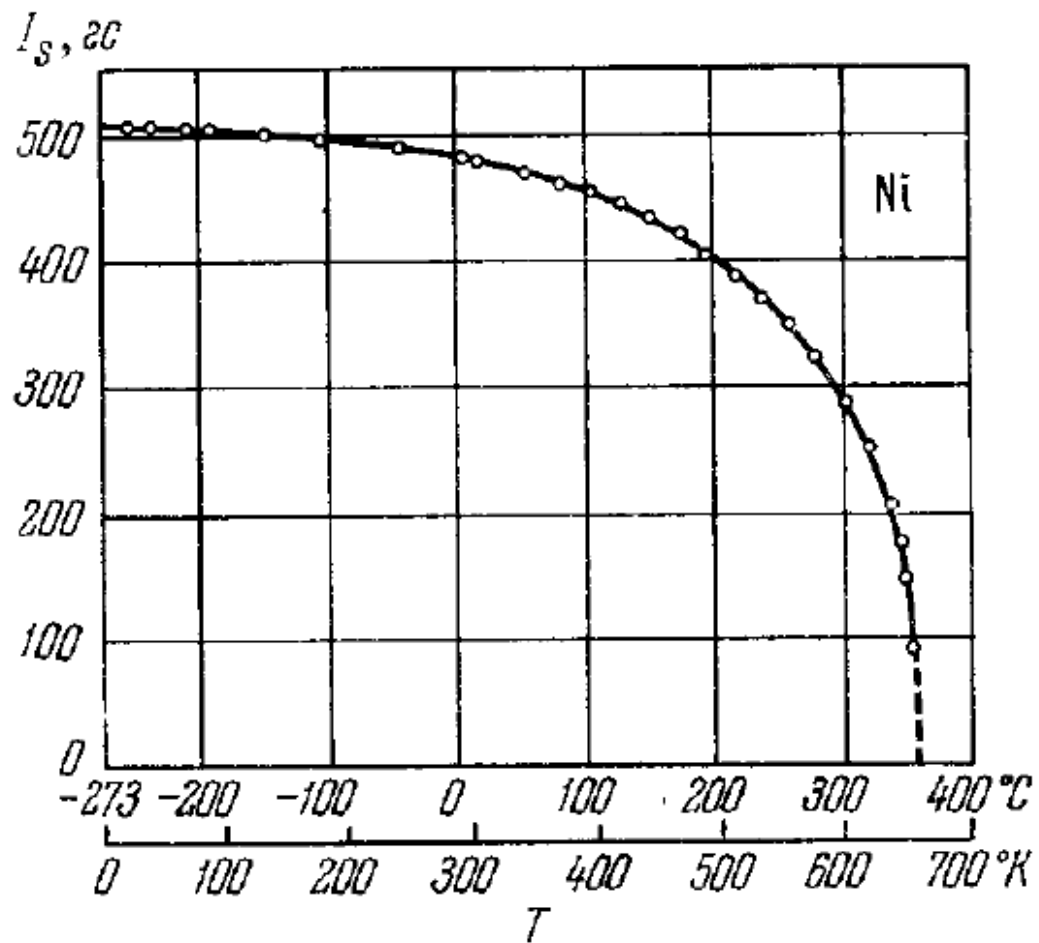
Намагничивание ферромагнетика. Петля гистерезиса



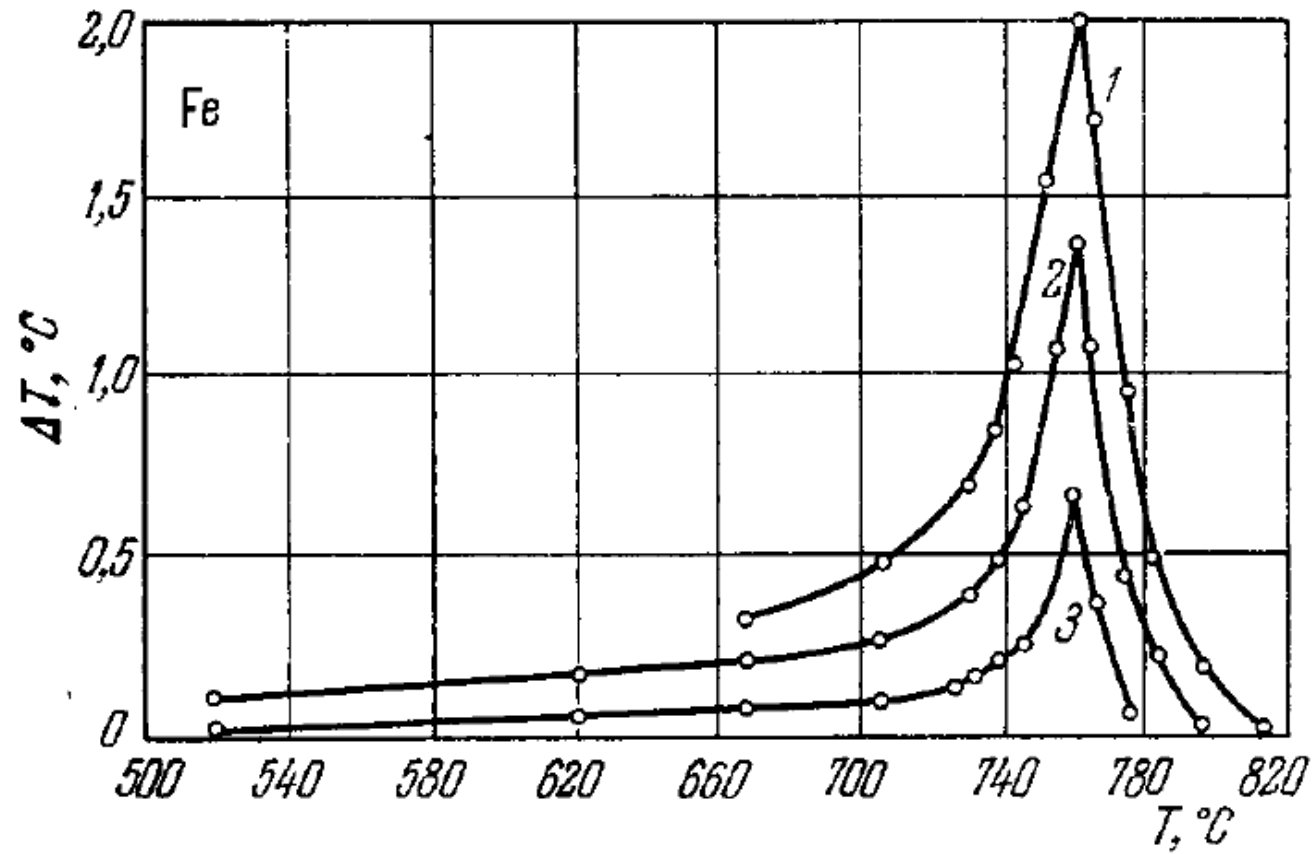
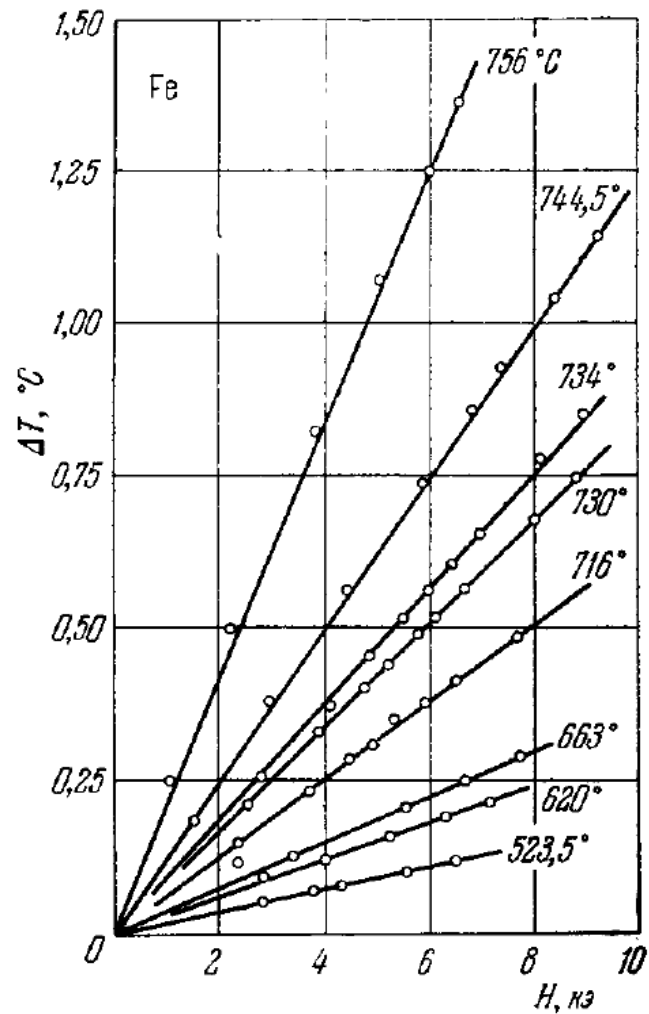
Оси намагичивания.



Зависимость намагниченности насыщения от температуры

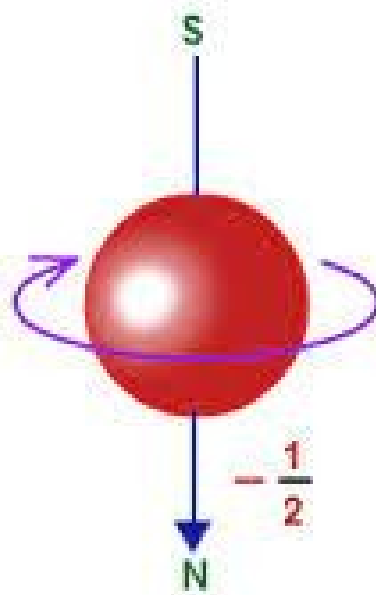
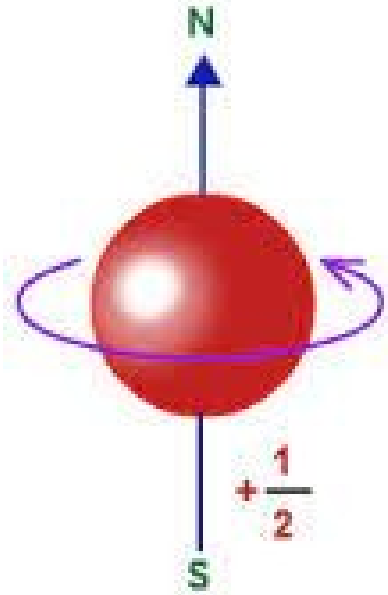


Магнитокалорический эффект



Спин и магнитный момент электрона.

Спин



$$\hat{s}^2 = \hbar s(s+1), s=1/2$$

$$\hat{s}_z = \hbar m, m=\pm 1/2$$

Магнитный момент

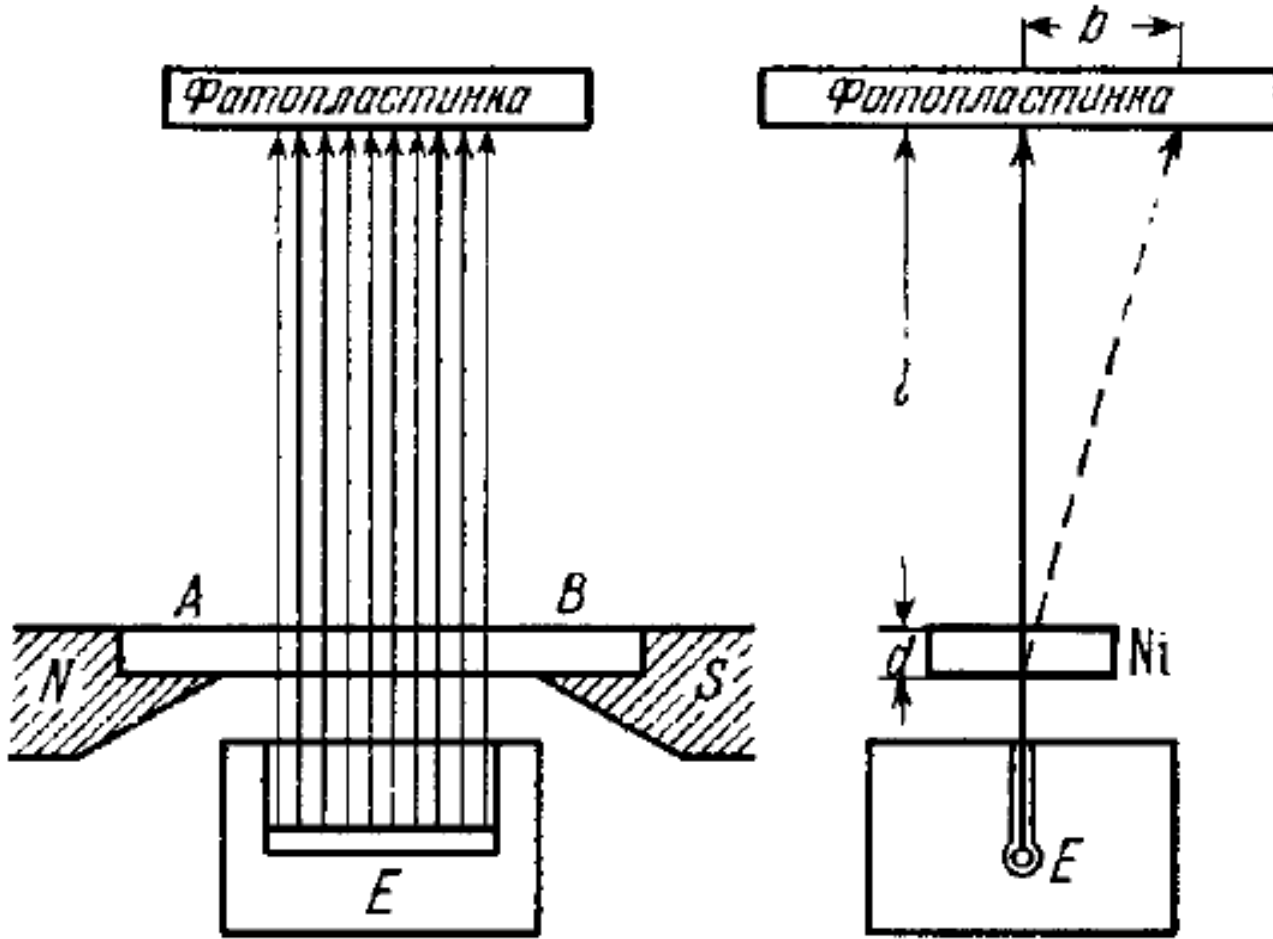
$$\hat{\mu} = g \mu_B \hat{s}$$

$$\mu_B = \frac{e \hbar}{2 m}$$

$$\hat{\mu}^2 = g^2 \mu_B^2 \hbar s(s+1), s=1/2$$

$$\hat{\mu}_z = g \mu_B \hbar m, m=\pm 1/2$$

Опыт Дорфмана по измерению внутреннего поля ферромагнетика (никеля)



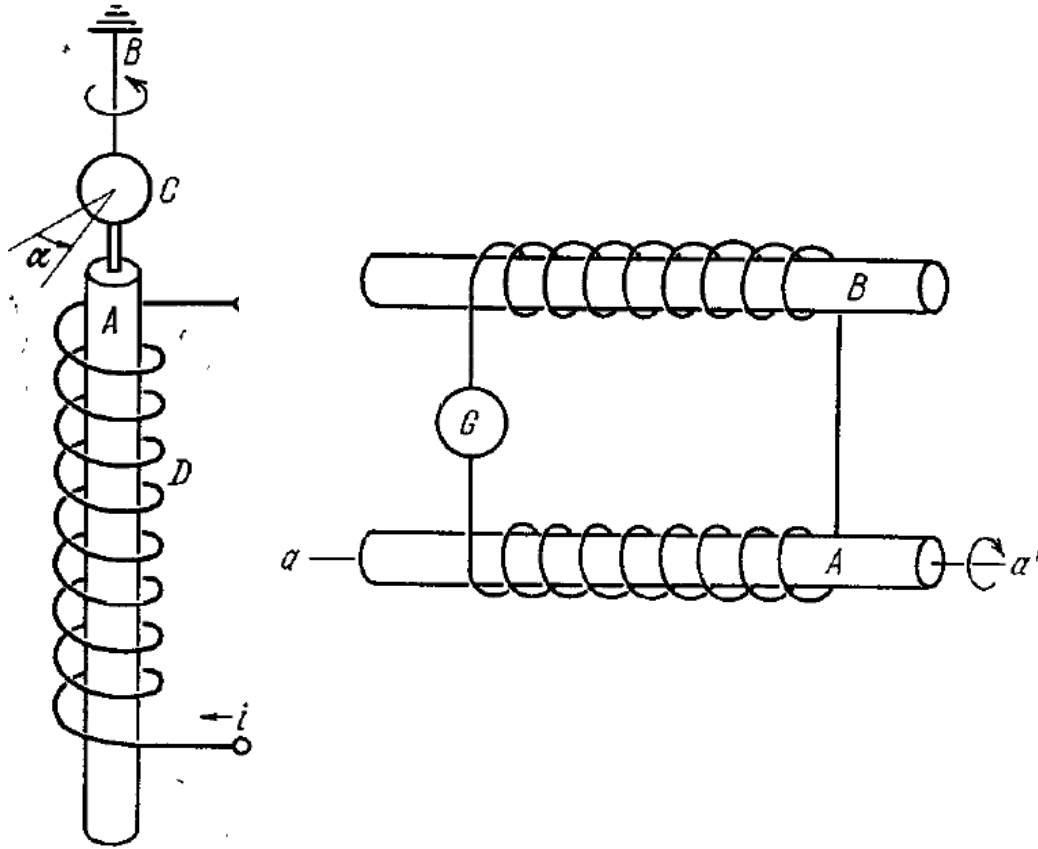
Измеренное поле более чем в 60 раз меньше необходимого для поддержания параллельной ориентации спинов

$$E = -\vec{\mu} \vec{B}$$

Эффект Эйнштейна-де Гааза, эффект Барнета

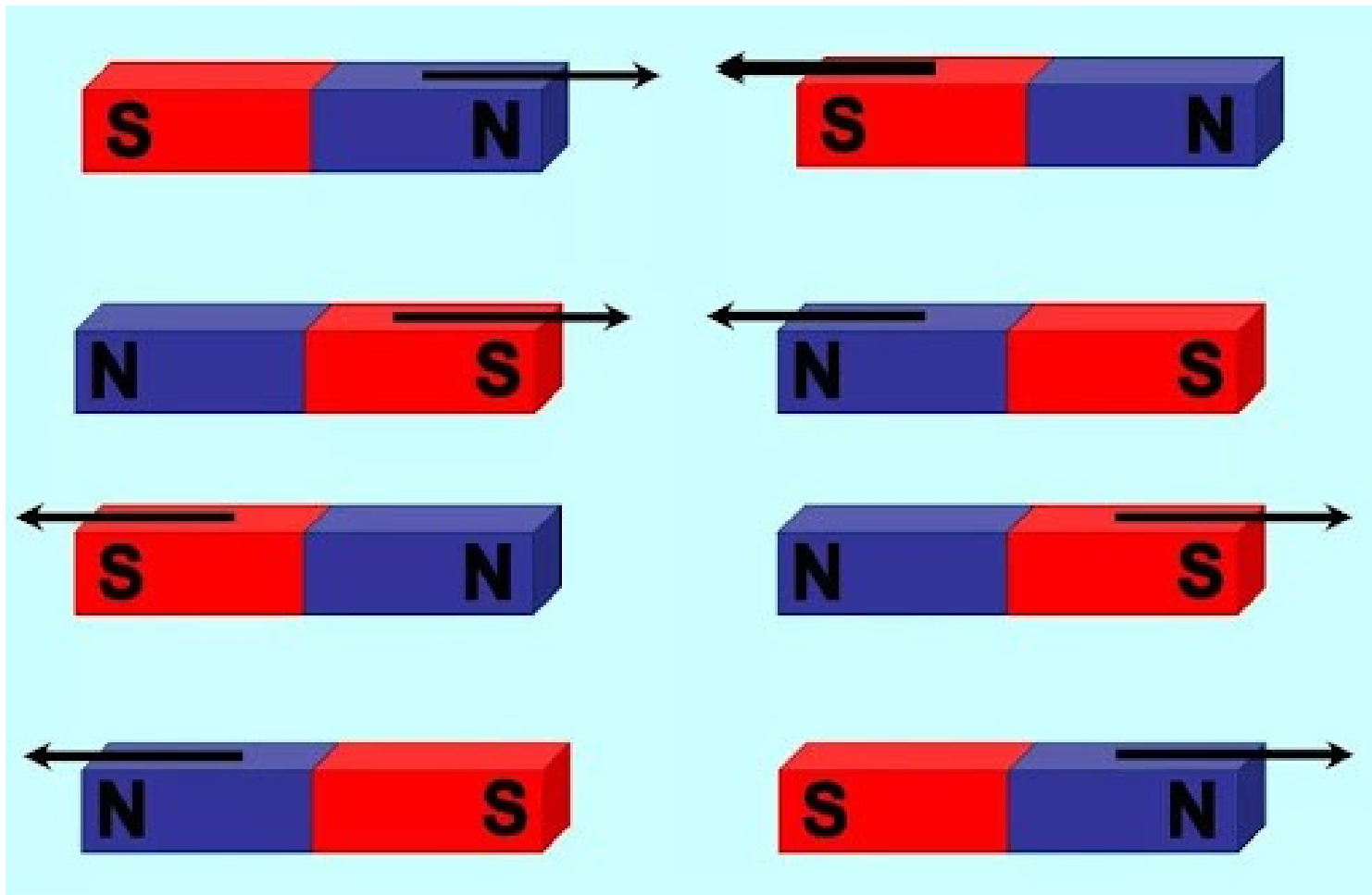
Измеренные гироманнитные отношения

$$\vec{\mu} = g \mu_B \vec{J}$$

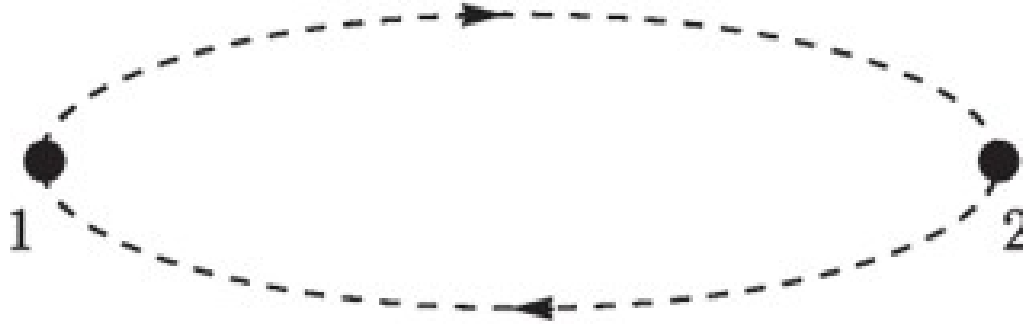


| Вещество | g | Год исследования |
|----------------------|-------------------|------------------|
| Fe | $1,919 \pm 0,002$ | 1959 |
| Co | $1,850 \pm 0,004$ | 1956 |
| Ni | $1,835 \pm 0,002$ | 1951—1959 |
| $Fe_{0,90}Ni_{0,10}$ | $1,915 \pm 0,004$ | 1954 |
| $Fe_{0,75}Ni_{0,25}$ | $1,914 \pm 0,004$ | 1954 |
| $Fe_{0,65}Ni_{0,35}$ | $1,912 \pm 0,002$ | 1955 |
| $Fe_{0,50}Ni_{0,50}$ | $1,908 \pm 0,004$ | 1954 |
| $Fe_{0,35}Ni_{0,65}$ | $1,904 \pm 0,004$ | 1955 |
| $Fe_{0,25}Ni_{0,75}$ | $1,895 \pm 0,004$ | 1955 |
| $Fe_{0,10}Ni_{0,90}$ | $1,880 \pm 0,006$ | 1955 |
| $Co_{0,90}Ni_{0,10}$ | $1,850 \pm 0,002$ | 1960 |
| $Co_{0,50}Ni_{0,50}$ | $1,843 \pm 0,002$ | 1960 |
| Супермаллой | $1,905 \pm 0,002$ | 1960 |
| $NiO \cdot Fe_2O_3$ | $1,849 \pm 0,002$ | 1961 |
| Cu_2MnAl | $1,993 \pm 0,002$ | 1960 |
| MnSb | $1,978 \pm 0,002$ | 1960 |
| Пирротит | $1,9 \pm 15\%$ | 1960 |

Магнитное диполь-дипольное взаимодействие



Принцип тождественности частиц и симметрия волновых функций электронов



Принцип тождественности частиц: Перестановка двух одинаковых частиц не должна изменять состояние системы.

В квантовой механике проследить частицу невозможно в общем случае (вероятностное описание). Поэтому нумеровать частицы не имеет смысла.

Математическая формулировка принципа тождественности для электронов

$$\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \sigma_1, \sigma_2) = -\psi(\vec{r}_2, \vec{r}_1, \sigma_2, \sigma_1)$$

При слабом спин-орбитальном взаимодействии

$$\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \sigma_1, \sigma_2) = \phi(\vec{r}_2, \vec{r}_1) \chi(\sigma_2, \sigma_1)$$

Средняя энергия кулоновского взаимодействия электронов.

$$U(S=1) = \int \phi_{S=1}^*(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \phi_{S=1}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) d^3r_1 d^3r_2$$

$$U(S=0) = \int \phi_{S=0}^*(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \phi_{S=0}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) d^3r_1 d^3r_2$$

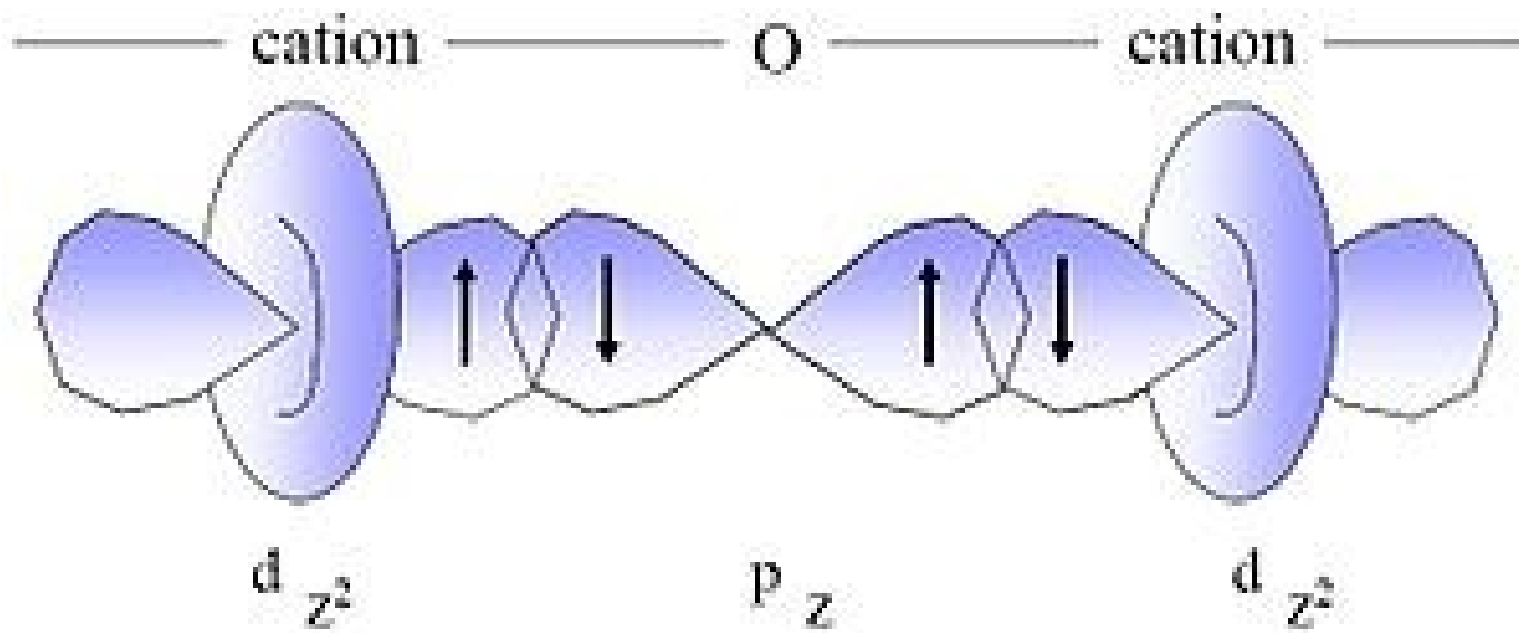
$$\chi_{S=1}(\sigma_1, \sigma_2) = \chi_{S=1}(\sigma_2, \sigma_1) \quad \phi_{S=1}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = -\phi_{S=1}(\vec{r}_2, \vec{r}_1) \quad \phi_{S=1}(\vec{r}_1, \vec{r}_1) = 0$$

$$\chi_{S=0}(\sigma_1, \sigma_2) = -\chi_{S=0}(\sigma_2, \sigma_1) \quad \phi_{S=0}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \phi_{S=0}(\vec{r}_2, \vec{r}_1)$$

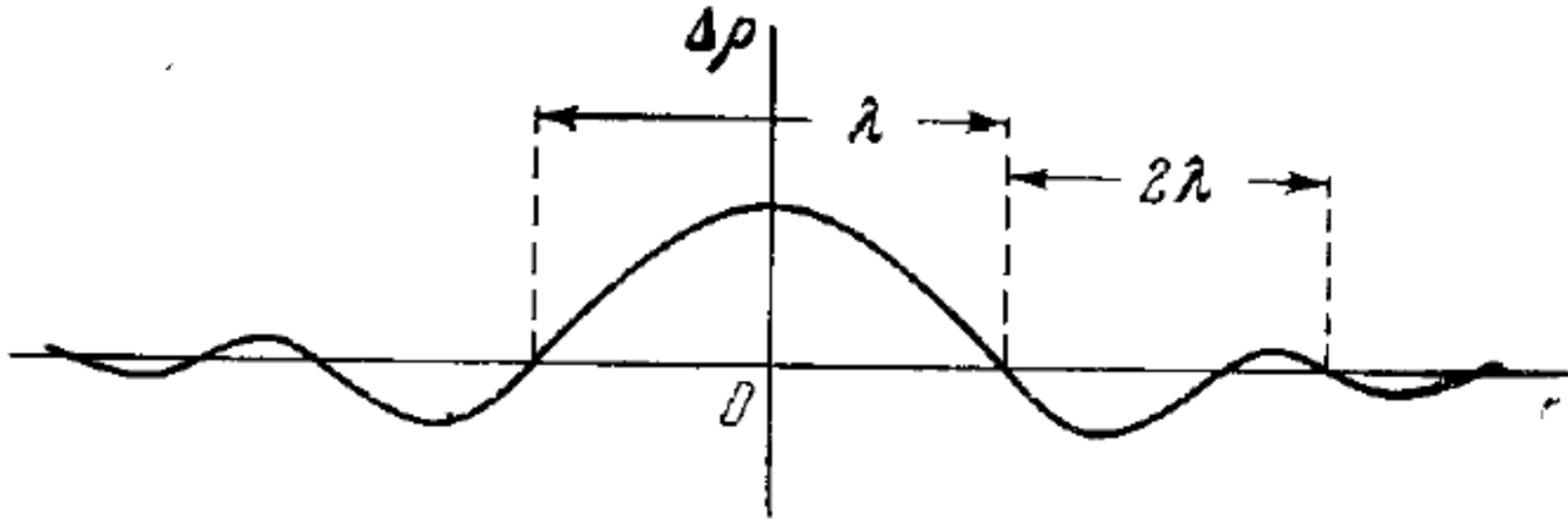
$$U(S=0) > U(S=1)$$

При максимальном суммарном спине электроны в среднем расположены дальше друг от друга и энергия их отталкивания наименьшая

Косвенное обменное взаимодействие.



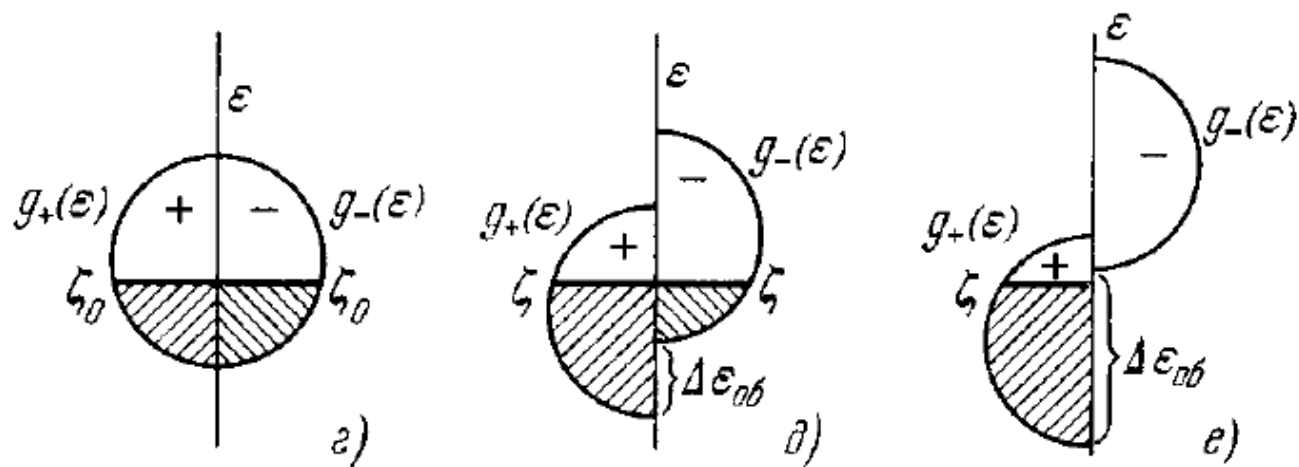
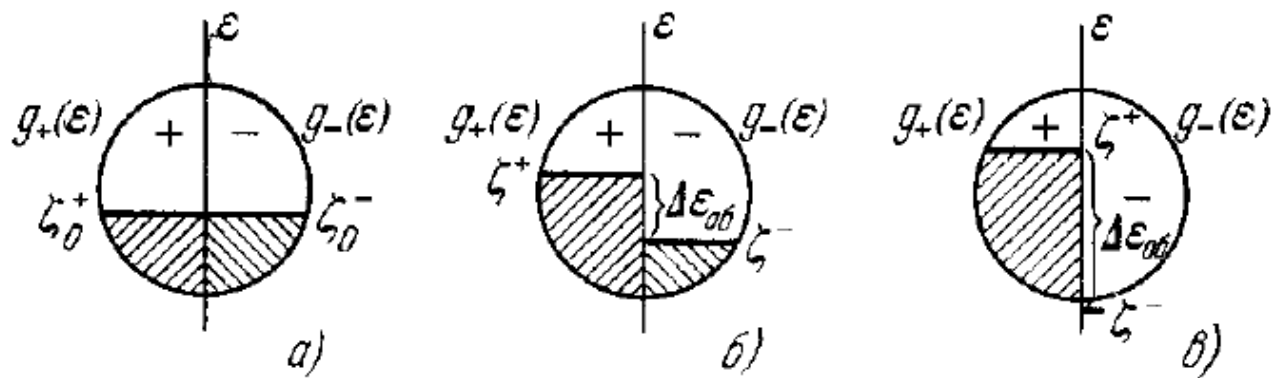
Обменное взаимодействие в металлах через электроны проводимости



$$\lambda \sim 1/k_F$$

Средняя намагниченность уменьшается при удалении от магнитного иона и при этом осциллирует

Особенности основного состояния металлического ферромагнетика. Спиновая поляризация электронов проводимости

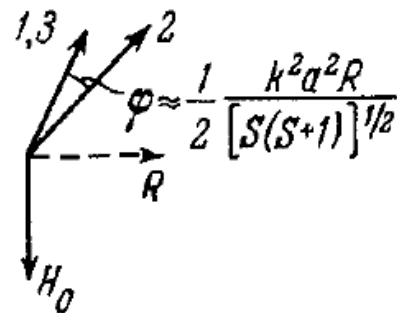
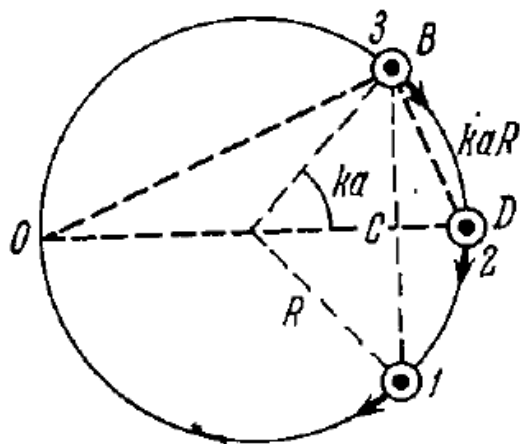
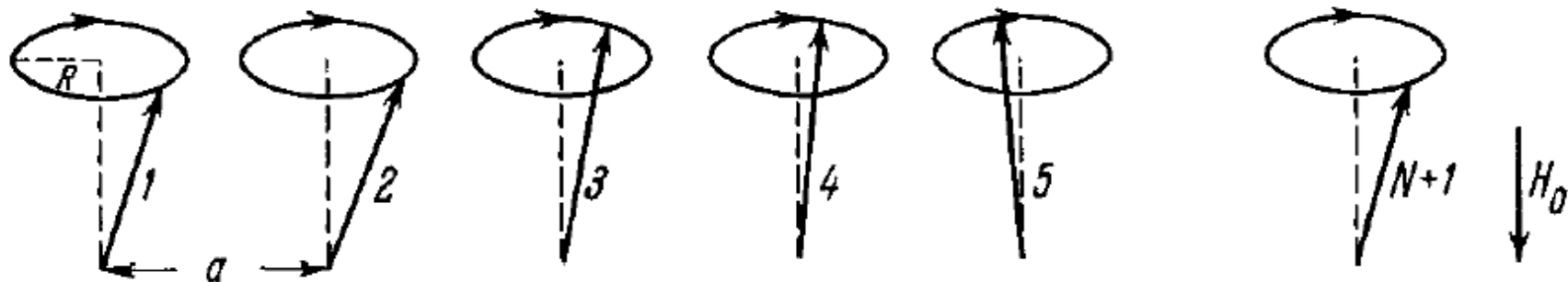


$$|\epsilon_{ab}| \leq |\epsilon_{ab}|_{кр1}$$

$$|\epsilon_{ab}|_{кр1} < |\epsilon_{ab}| < |\epsilon_{ab}|_{кр2}$$

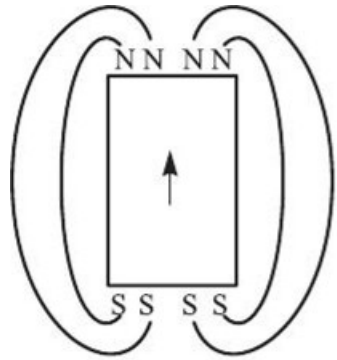
$$|\epsilon_{ab}| \geq |\epsilon_{ab}|_{кр2}$$

Элементарные возбуждения в ферромагнетиках. Спиновые волны. Магноны.

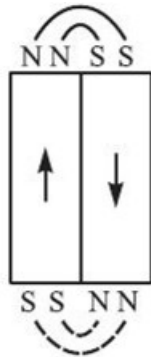


$$E(\vec{k}) = \frac{4\mu A}{I_0 d} k^2 + \mu H$$

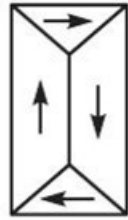
Доменная структура ферромагнетиков.



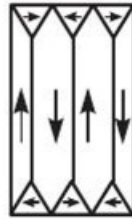
Насыщение



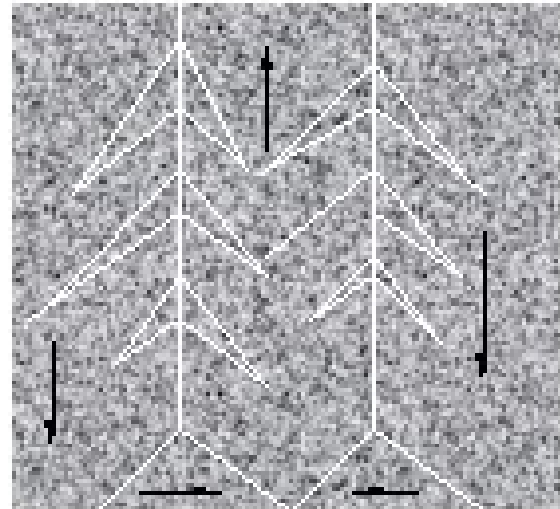
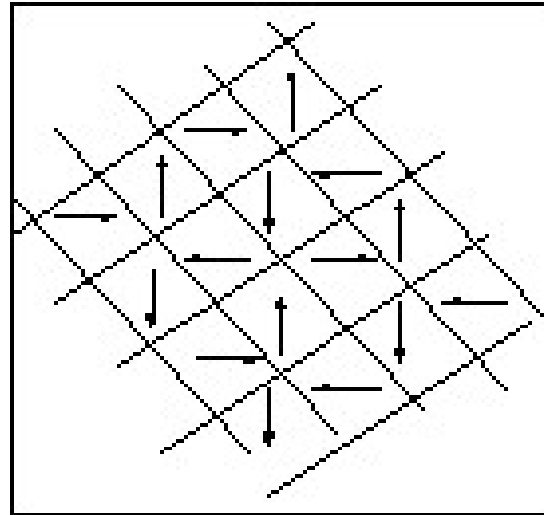
Сильное поле



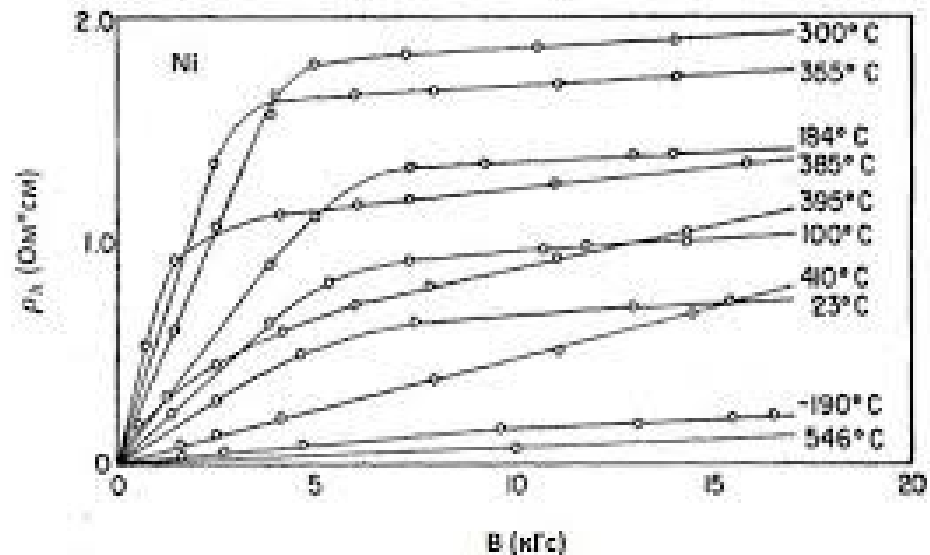
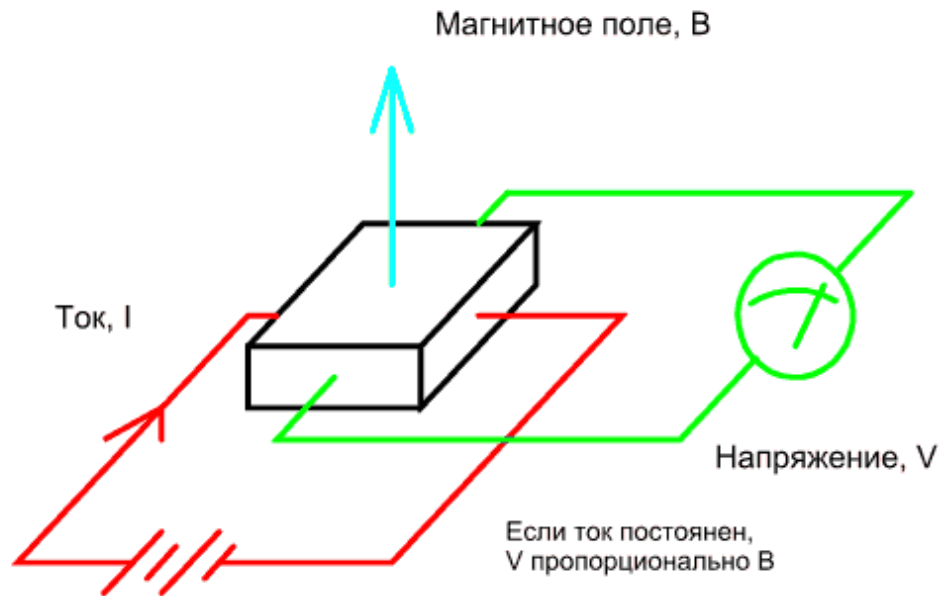
Слабое поле



Нет поля



Аномальный эффект Холла.



$$\rho_h = \frac{V_h}{I} = R_n I B + R_a I J$$