



Санкт-Петербургский государственный университет
Физический факультет
Кафедра ядерно-физических методов исследования



Сыромятников

Арсений Владиславович

*Физика магнетизма и
рассеяние поляризованных и
неполяризованных нейтронов*

Лекция 4. Электронный парамагнитный резонанс. Спектроскопия Мёсбауэра. Мюонные исследования.

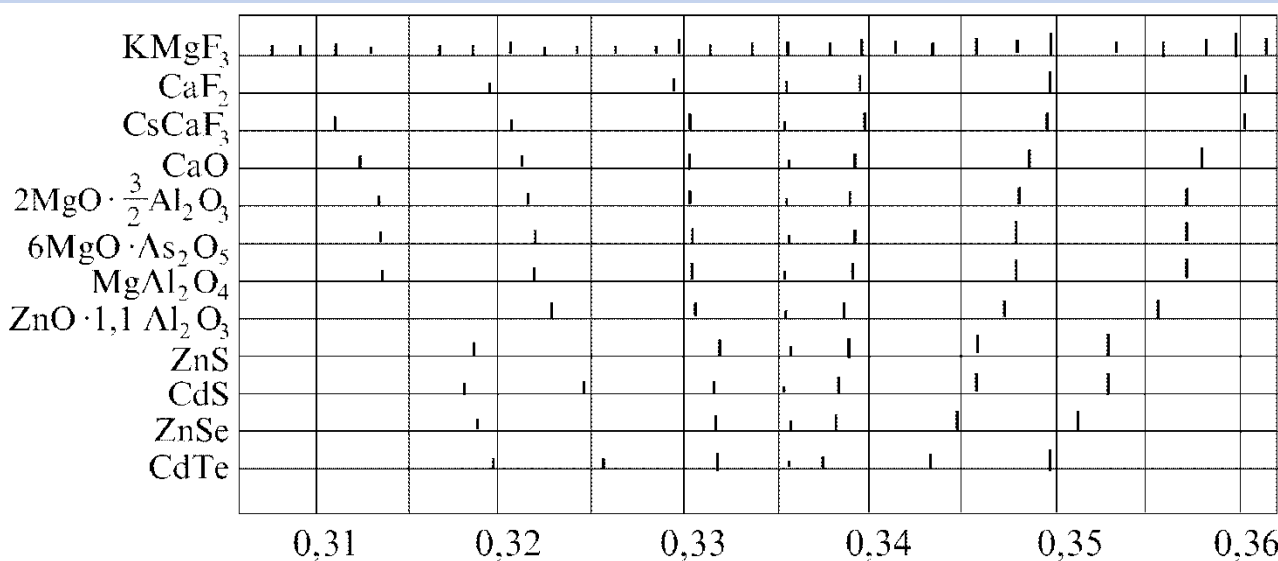
Электронный парамагнитный резонанс

$$h\nu = (g + \Delta) \mu_B (H + \delta H)$$

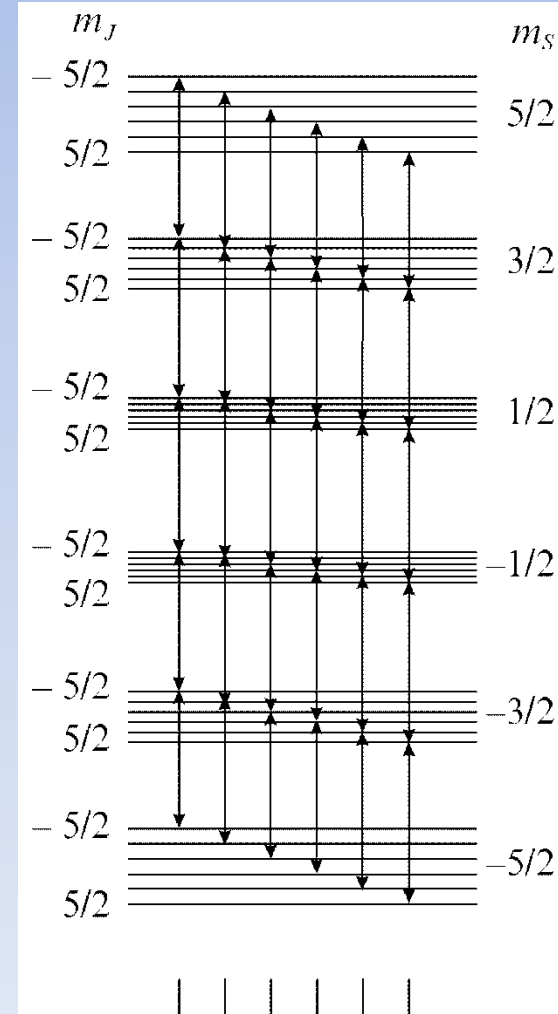
Взаимодействие с магнитным моментом ядра

$$E_Z = g_S \mu_B m_S H - g_I \mu_{\text{яд}} m_I H + A m_I m_S$$

$$\Delta m_S = \pm 1 \quad \Delta m_I = 0$$

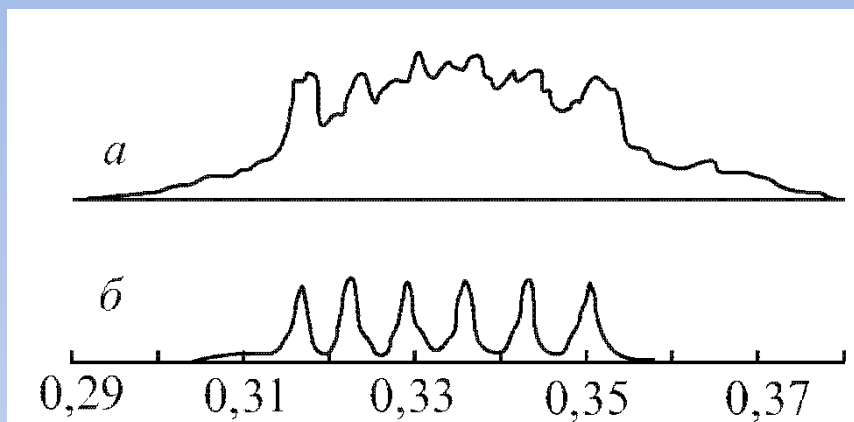


Mn²⁺



Взаимодействие с полем кристаллической решетки ($g + \Delta$) анизотропия g-фактора

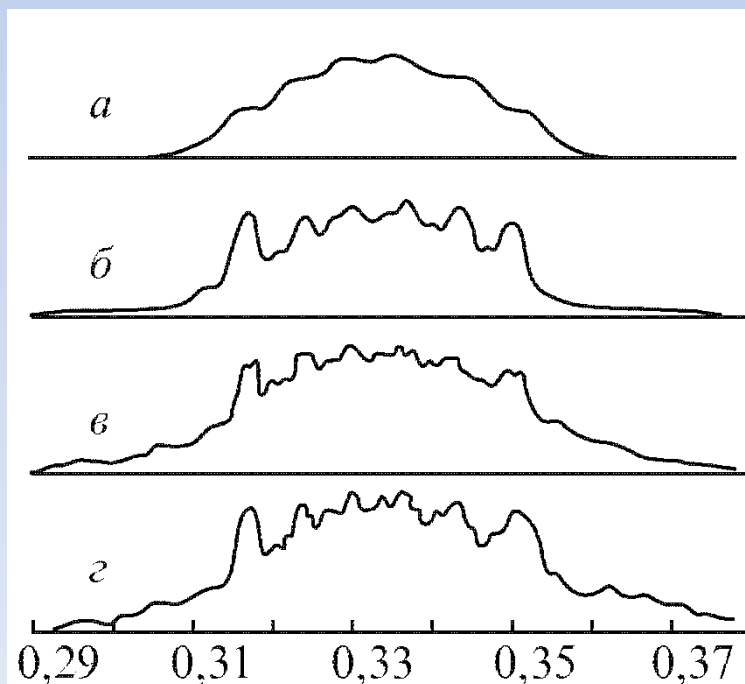
Mn²⁺ в ZnS



гексагональный

кубический

Взаимодействие с соседними парамагнитными
спинами



Эффективный гамильтониан

$$\mathcal{H}_S = g\mu_B \mathbf{H} \cdot \mathbf{S} \quad \rightarrow \quad \mathcal{H}_{eff} = \mu_B \mathbf{H} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{S} = \mu_B \sum_{i,j=x,y,z} H_i g_{ij} S_j$$

$$\mathcal{H}_{eff} = \mu_B \left(g_{xx} H_x S_x + g_{yy} H_y S_y + g_{zz} H_z S_z \right)$$

$$\mathbf{H} = \left(\gamma_x \mathbf{e}_x + \gamma_y \mathbf{e}_y + \gamma_z \mathbf{e}_z \right) H$$

$$\mathcal{H}_{eff} = \mu_B H \left(g_{xx} \gamma_x S_x + g_{yy} \gamma_y S_y + g_{zz} \gamma_z S_z \right)$$

$$= g\mu_B H \left(\frac{g_{xx} \gamma_x}{g} S_x + \frac{g_{yy} \gamma_y}{g} S_y + \frac{g_{zz} \gamma_z}{g} S_z \right) \quad \Rightarrow \quad E_Z = g\mu_B H M$$

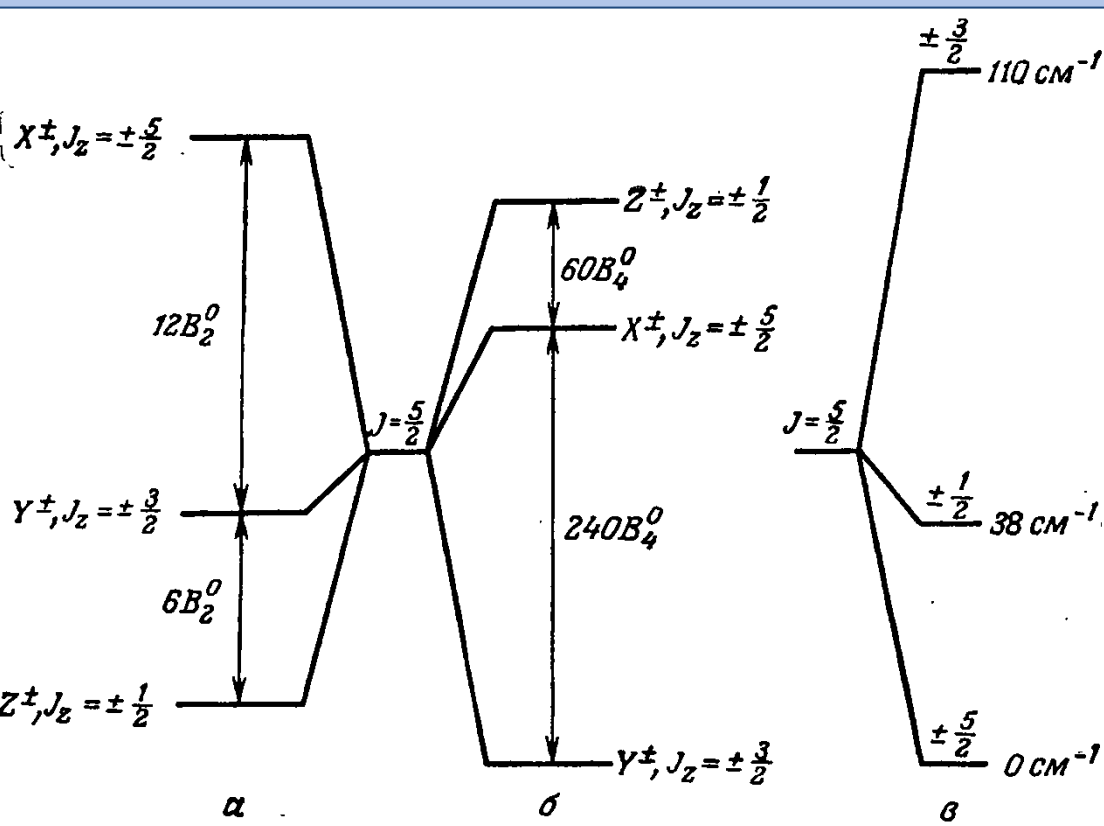
$$g = \sqrt{(g_{xx} \gamma_x)^2 + (g_{yy} \gamma_y)^2 + (g_{zz} \gamma_z)^2}$$

аксиальная симметрия

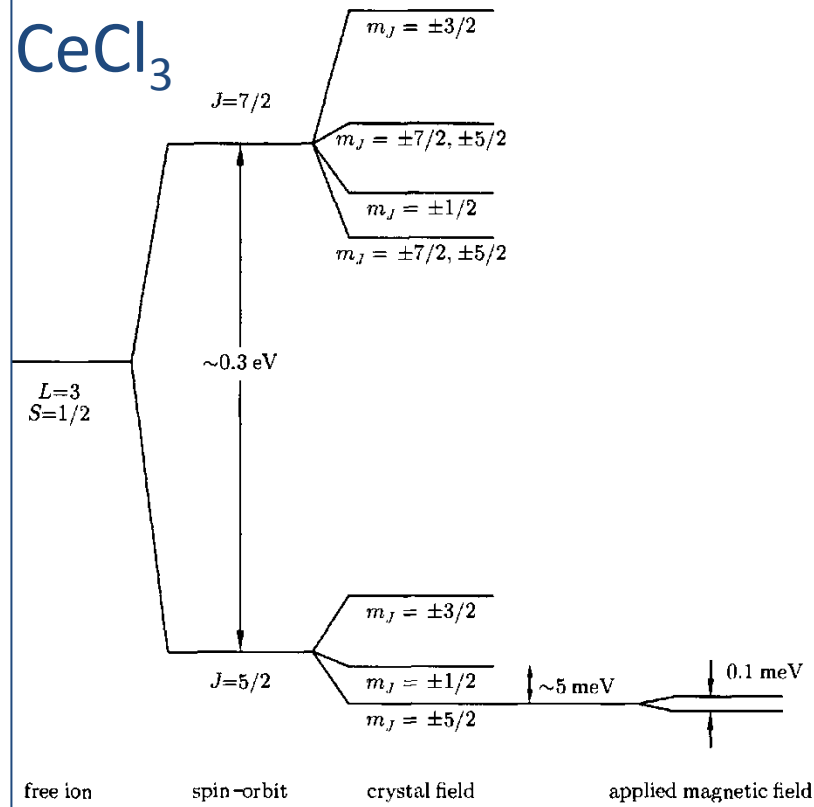
$$g_{xx} = g_{yy} = g_{\perp} \quad g_{zz} = g_{\parallel} \quad g = \sqrt{g_{\parallel}^2 \cos^2 \theta + g_{\perp}^2 \sin^2 \theta}$$

Пример. Ce^{3+} в поле аксиальной симметрии.

$$\mathcal{H}_{\text{лиганды}} = B_2^0 \left(3J_z^2 - J(J+1) \right)$$



CeCl_3



Пример. Ce^{3+} в поле аксиальной симметрии.

$$\mathcal{H} = g_J \mu_B (\mathbf{H} \cdot \mathbf{J})$$

$$\langle \pm | g_J \mu_B H J_z | \pm \rangle \quad \langle \pm | g_J \mu_B H J_{\pm} | \mp \rangle$$

$$X \quad \pm \frac{5}{2} g_J \mu_B H \quad 0$$

$$Y \quad \pm \frac{3}{2} g_J \mu_B H \quad 0$$

$$Z \quad \pm \frac{1}{2} g_J \mu_B H \quad \frac{3}{2} g_J \mu_B H$$

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = \mu_B H \left(g_{\perp} (H_x S_x + H_y S_y) + g_{\parallel} H_{\parallel} S_z \right)$$

$$\langle \pm | g_{\parallel} \mu_B H S_z | \pm \rangle \quad \langle \pm | \frac{1}{2} g_{\perp} \mu_B H S_{\pm} | \mp \rangle$$

$$\pm \frac{1}{2} g_{\parallel} \mu_B H \quad \frac{1}{2} g_{\perp} \mu_B H$$

	g_{\parallel}	g_{\perp}
X	$5g_J$	0
Y	$3g_J$	0
Z	g_J	$3g_J$

Переходы между близлежащими уровнями

$$S = 1 \quad \mathcal{H}_{eff} = \mu_B \mathbf{H} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{S} + D \left(S_z^2 - \frac{1}{3} S(S+1) \right)$$

$$\mathbf{H} \parallel z$$

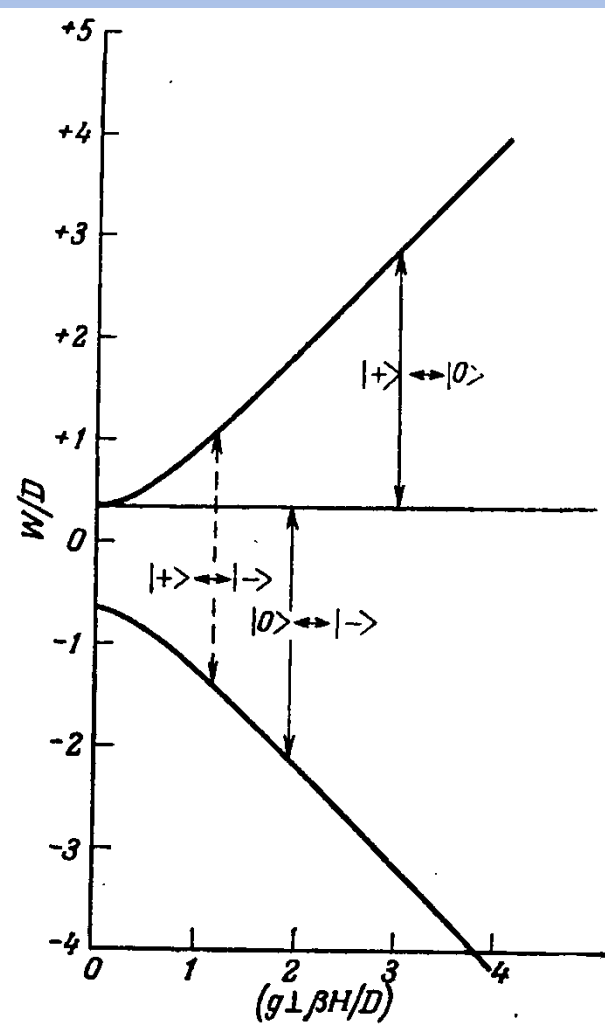
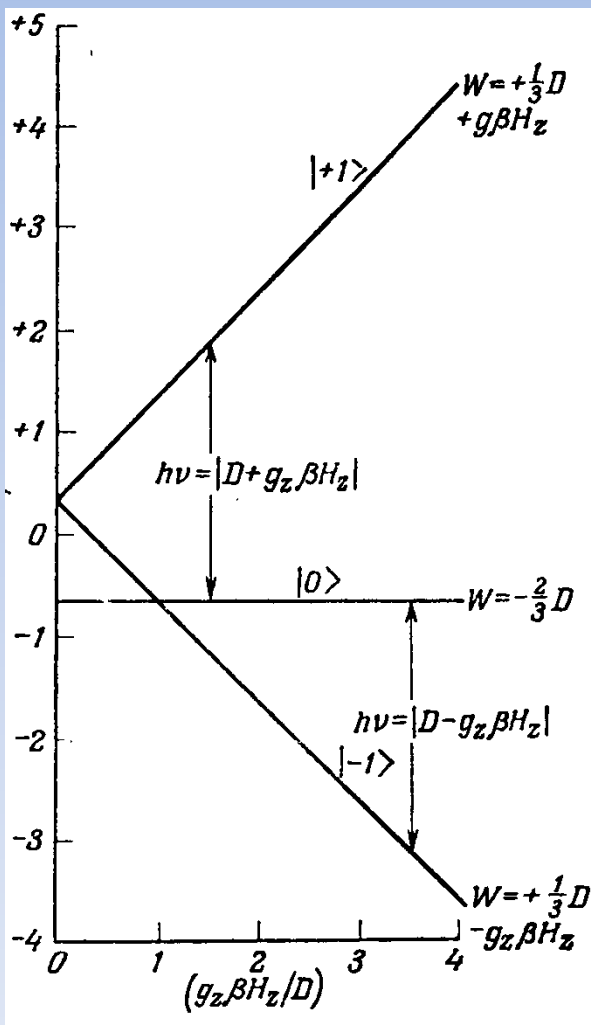
$$E_{\pm 1} = \frac{1}{3} D \pm g_z \mu_B H$$

$$E_0 = -\frac{2}{3} D$$

$$\mathbf{H} \parallel x \quad g_x \mu_B H \gg D$$

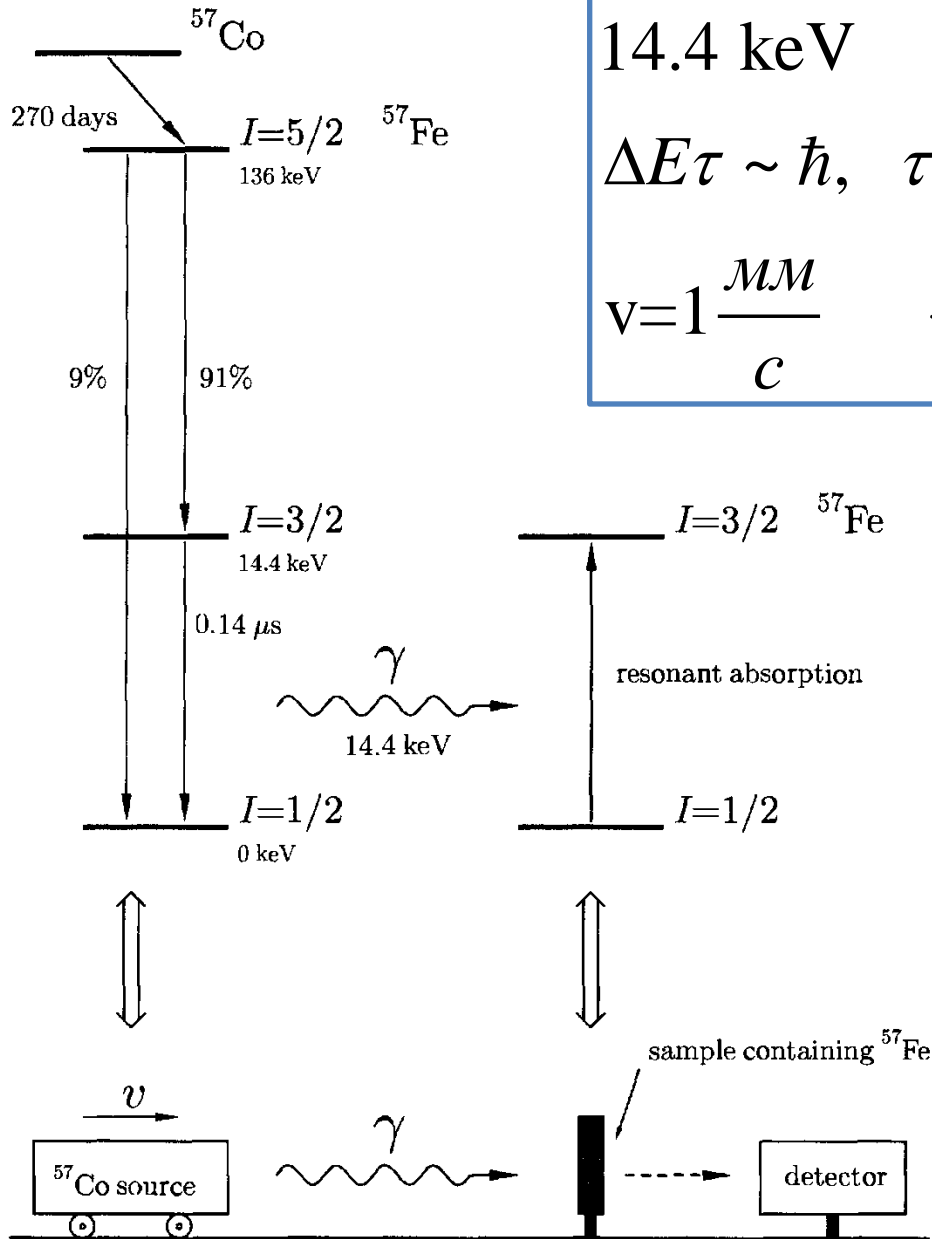
$$E_{\pm 1} = -\frac{1}{6} D \pm g_x \mu_B H$$

$$E_0 = \frac{1}{3} D$$



Упражнение. Получить две последние формулы

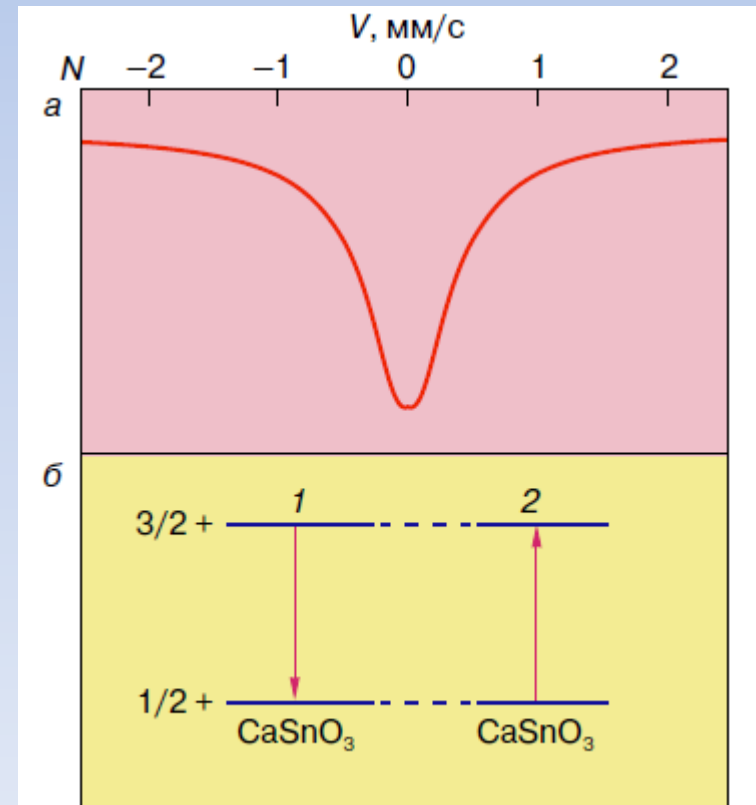
Спектроскопия Мёсбауэра



$$14.4 \text{ keV} \Leftrightarrow \nu = 3.5 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$$

$$\Delta E \tau \sim \hbar, \quad \tau \sim 0.2 \mu\text{s} \Rightarrow \Delta \nu = 2 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

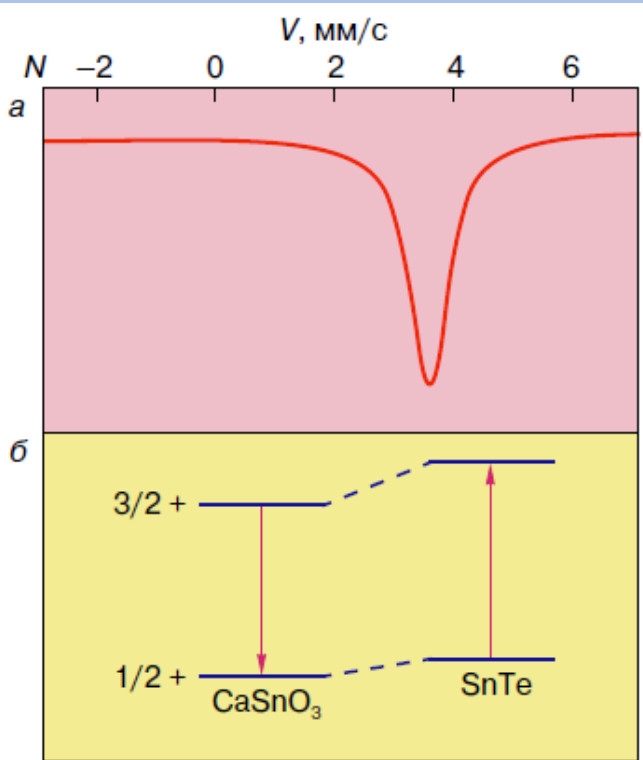
$$\nu = 1 \frac{\text{mm}}{c} \Leftrightarrow \Delta \nu = 1.2 \cdot 10^7 \text{ Hz}$$



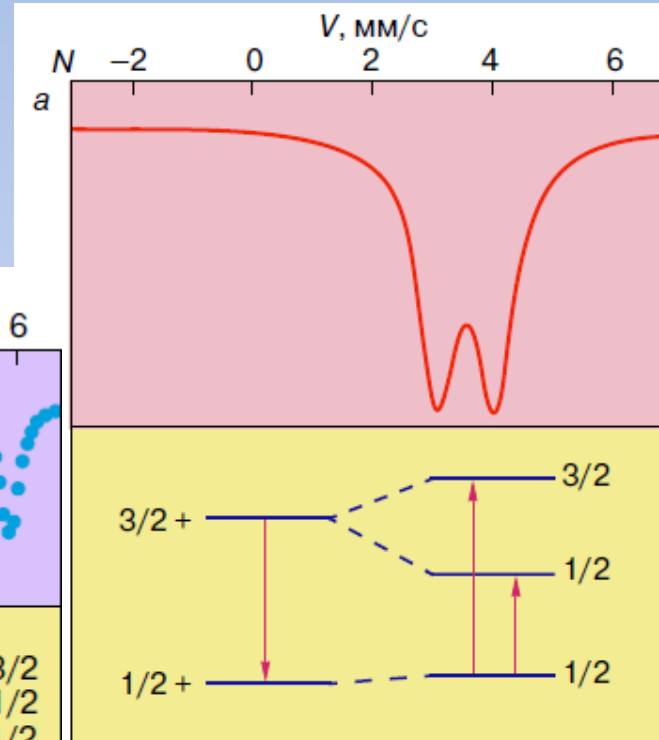
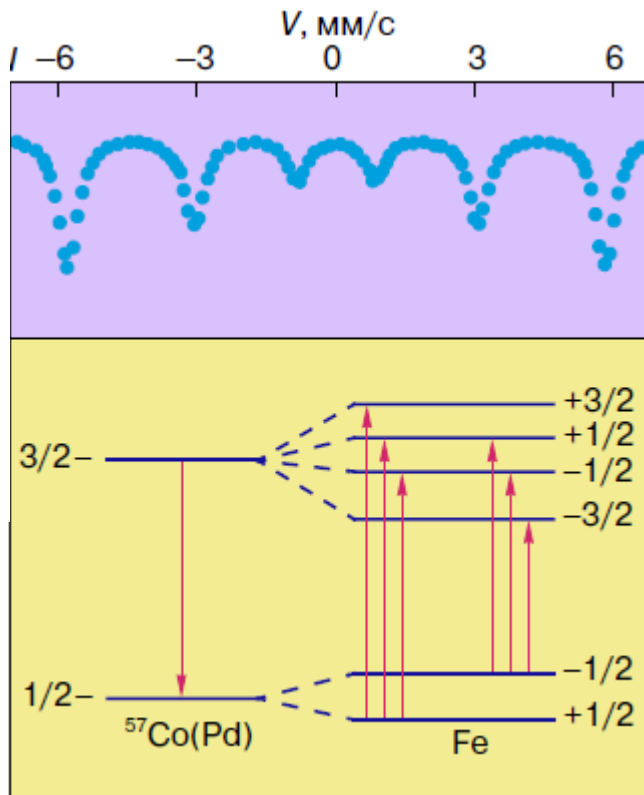
Спектроскопия Мёсбауэра

Изомерный сдвиг

Квадрупольное расщепление

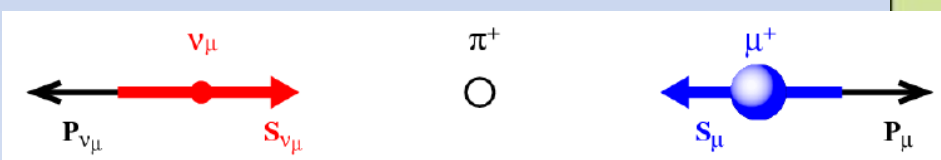
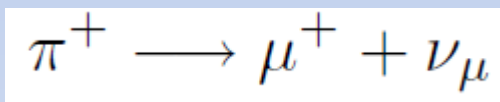
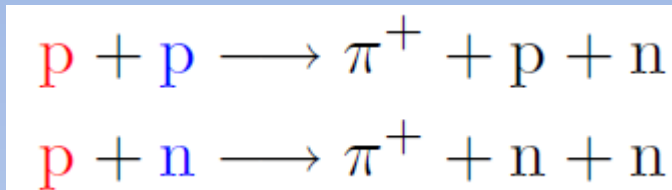


Магнитное расщепление

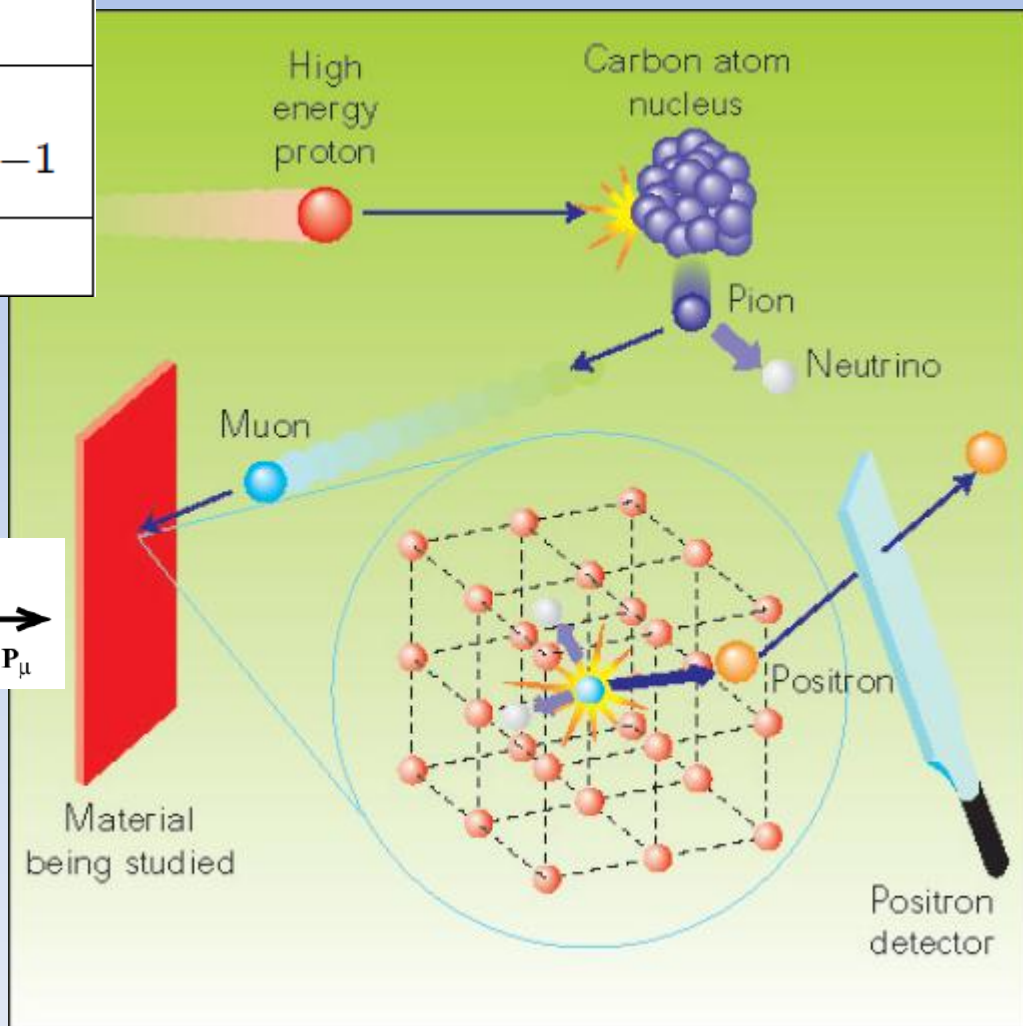
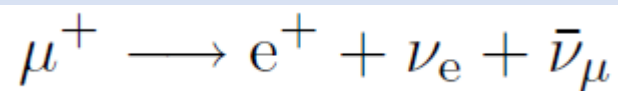


Мюонные исследования (μ SR)

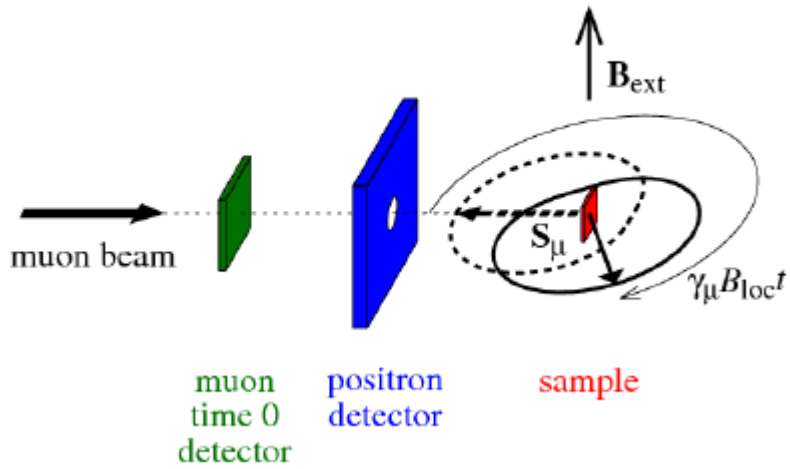
Mass		$0.112 M_p$ $\simeq 207 M_e$
Charge		$\pm e$
Spin	S_μ	$1/2$
Gyromagnetic ratio	γ_μ	$851.6 \text{ Mrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$
Lifetime	τ_μ	$2.197 \mu\text{s}$



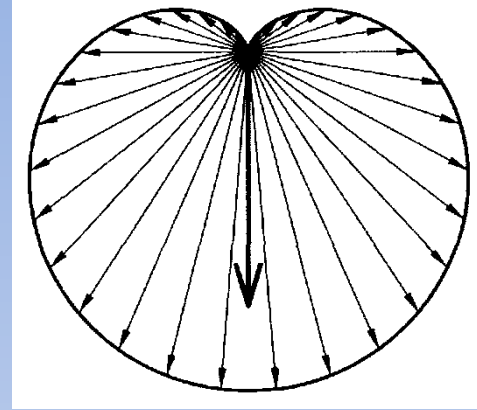
$$E_\mu = 4.12 \text{ MeV}$$



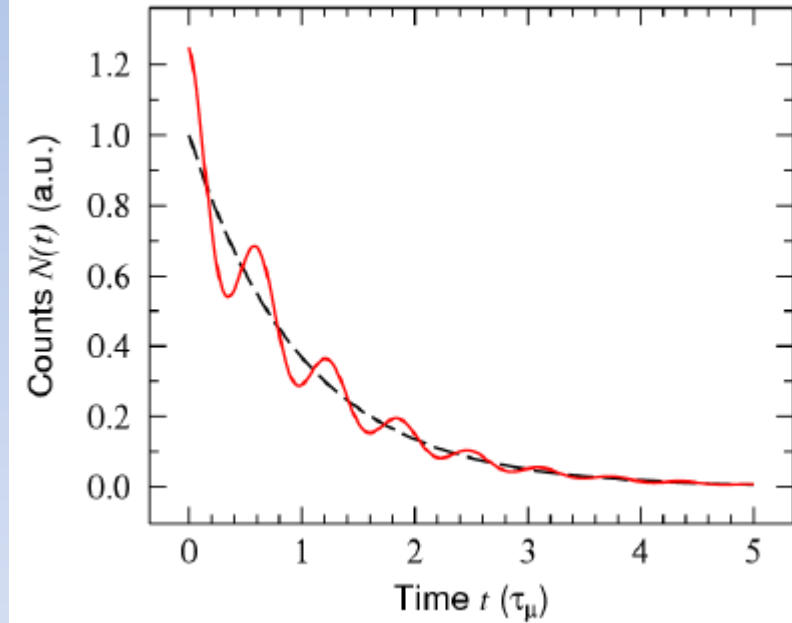
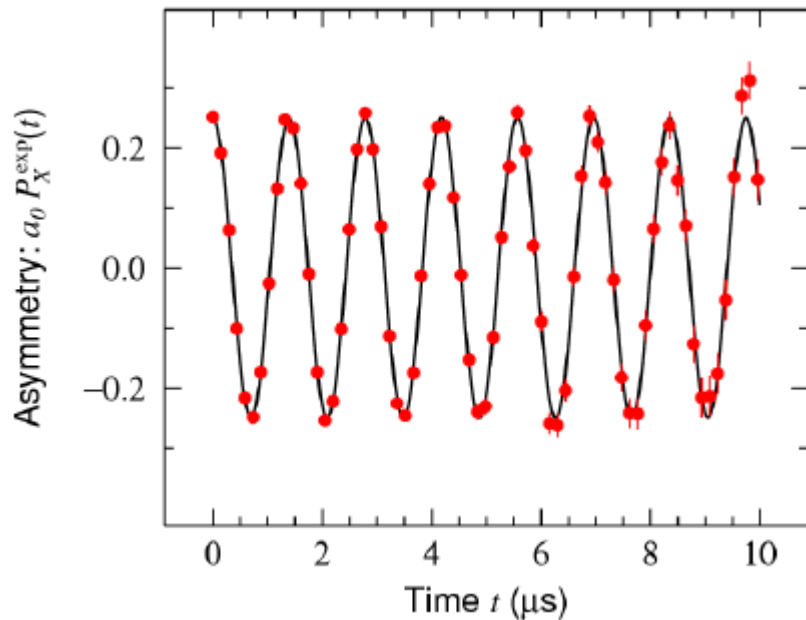
Transverse-field geometry



$$W(\theta) \approx 1 + a_0 \cos \theta$$



$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_{\mu}} (1 + a_0 P_x(t))$$



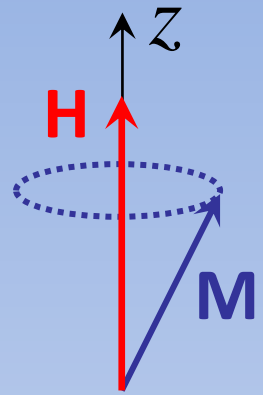
$$M_x = M_{\perp} \cos(\omega_L t + \varphi) \quad M_y = M_{\perp} \sin(\omega_L t + \varphi)$$

$$M_z = M_{\parallel}$$

$$\mathbf{M}(t) = M_{\parallel} \mathbf{e}_z + M_{\perp} (\mathbf{e}_x \cos(\omega_L t) + \mathbf{e}_y \sin(\omega_L t))$$

$$\mathbf{M}(0) = M_{\parallel} \mathbf{e}_z + M_{\perp} \mathbf{e}_x$$

$$P_x(t) = \frac{\mathbf{M}(t) \cdot \mathbf{M}(0)}{\mathbf{M}(0)^2} = \cos^2 \theta + \cos(\omega_L t) \sin^2 \theta$$



$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_{\mu}} (1 + a_0 P_x(t))$$

1.1. $\mathbf{M}(0) \perp \mathbf{H}$

$$P_x(t) = \cos(\omega_L t)$$

1.2. $\mathbf{M}(0) \parallel \mathbf{H}$

$$P_x(t) = 1$$

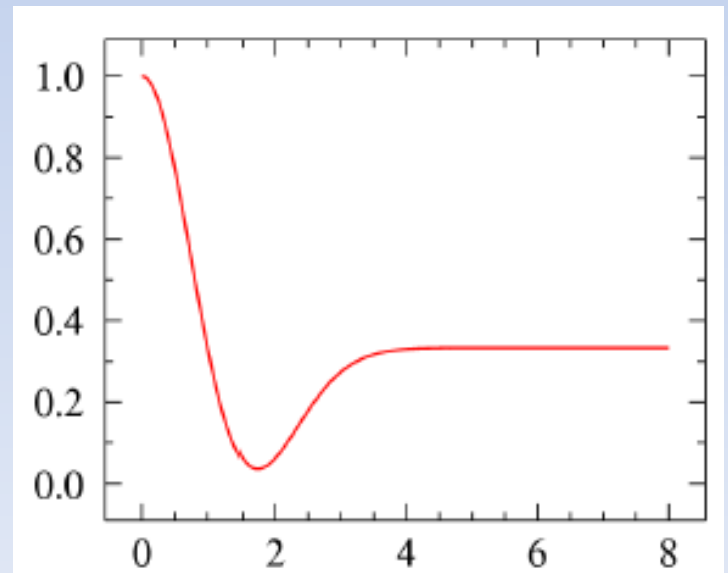
$$P_x(t) = \int d\mathbf{H}_{loc} \left(\cos^2 \theta + \cos(\omega_L t) \sin^2 \theta \right) \rho(\mathbf{H}_{loc})$$

2. поликристалл $\rho(\mathbf{H}_{loc}) = \frac{1}{4\pi H_0^2} \delta(H_{loc} - H_0)$

$$P_x(t) = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cos(\omega_L t)$$

3. разупорядоченная система $\rho(\mathbf{H}_{loc}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \right)^3 e^{-H_{loc}^2/2\Delta^2}$

$$P_x(t) = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \left(1 - \gamma_\mu^2 \Delta^2 t^2 \right) e^{-\gamma_\mu^2 \Delta^2 t^2 / 2}$$



Задача.

Найти расщепление d-уровня атома в кристаллическом поле $V=A(x^4+y^4+z^4-3r^4/5)$.

$$|\pm 2\rangle = f(r) \sin^2 \theta e^{\pm 2i\phi}$$

$$|\pm 1\rangle = \mp f(r) \sin 2\theta e^{\pm i\phi}$$

$$|0\rangle = \sqrt{\frac{2}{3}} f(r) (3 \cos^2 \theta - 1)$$