

Семинар №10

Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана.
Излучение, правила отбора. ЭПР и ЯМР. Лазеры.

Желтый дублет Na в слабом поле (аномальный эффект Зеемана)

$$E_{SL} \gg g \mu_B J_z B$$

$$(\mu_B \sim 10^{-23} \text{ Дж/Т})$$

$$1 \text{ Тл} \sim 1 \text{ К} \sim 0.1 \text{ мэВ}$$

$$\text{для Na } 2 \text{ мэВ} \sim 20 \text{ Тл}$$

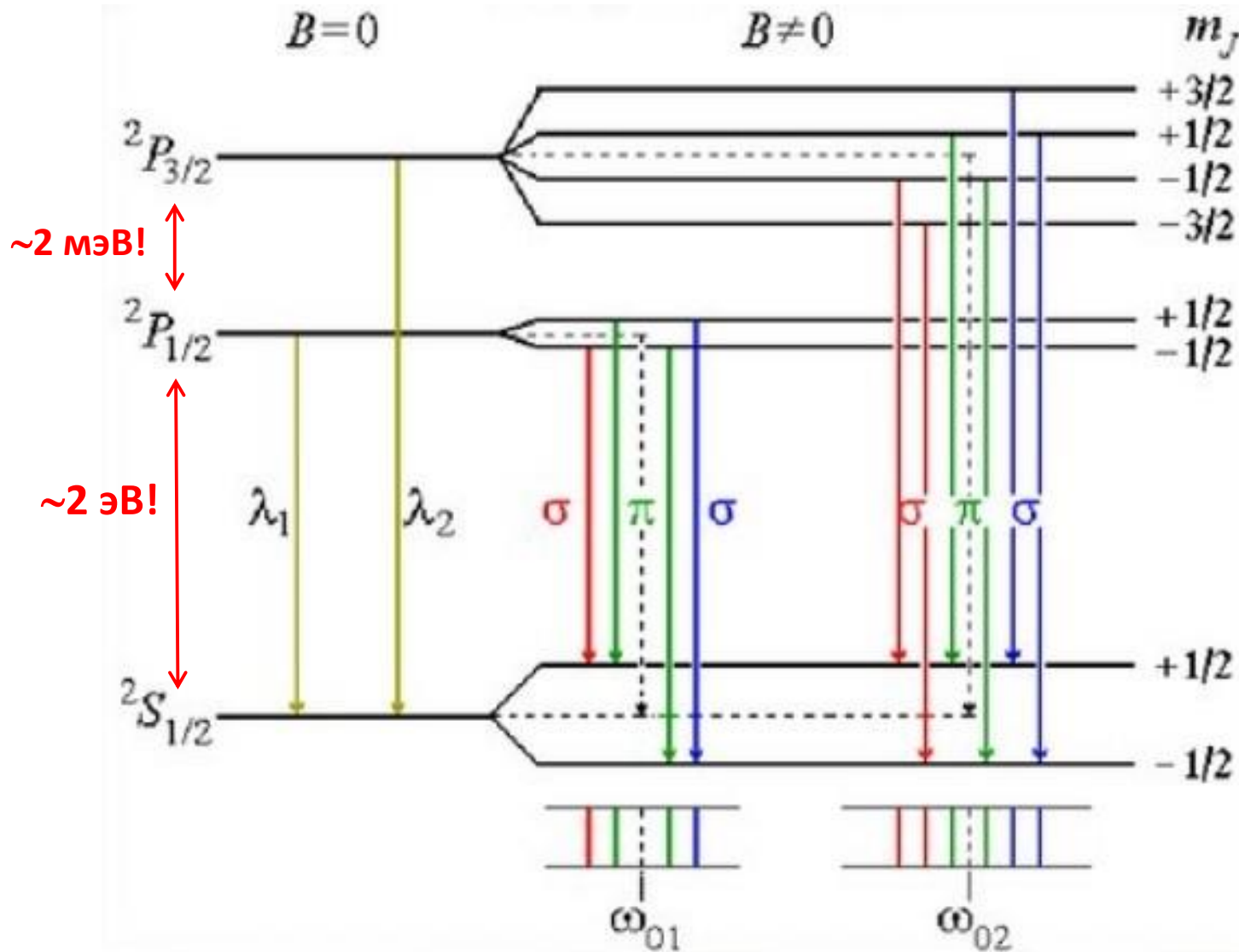


$$E_B = -(\mu B) = g \mu_B (J B) = g \mu_B m_J B$$

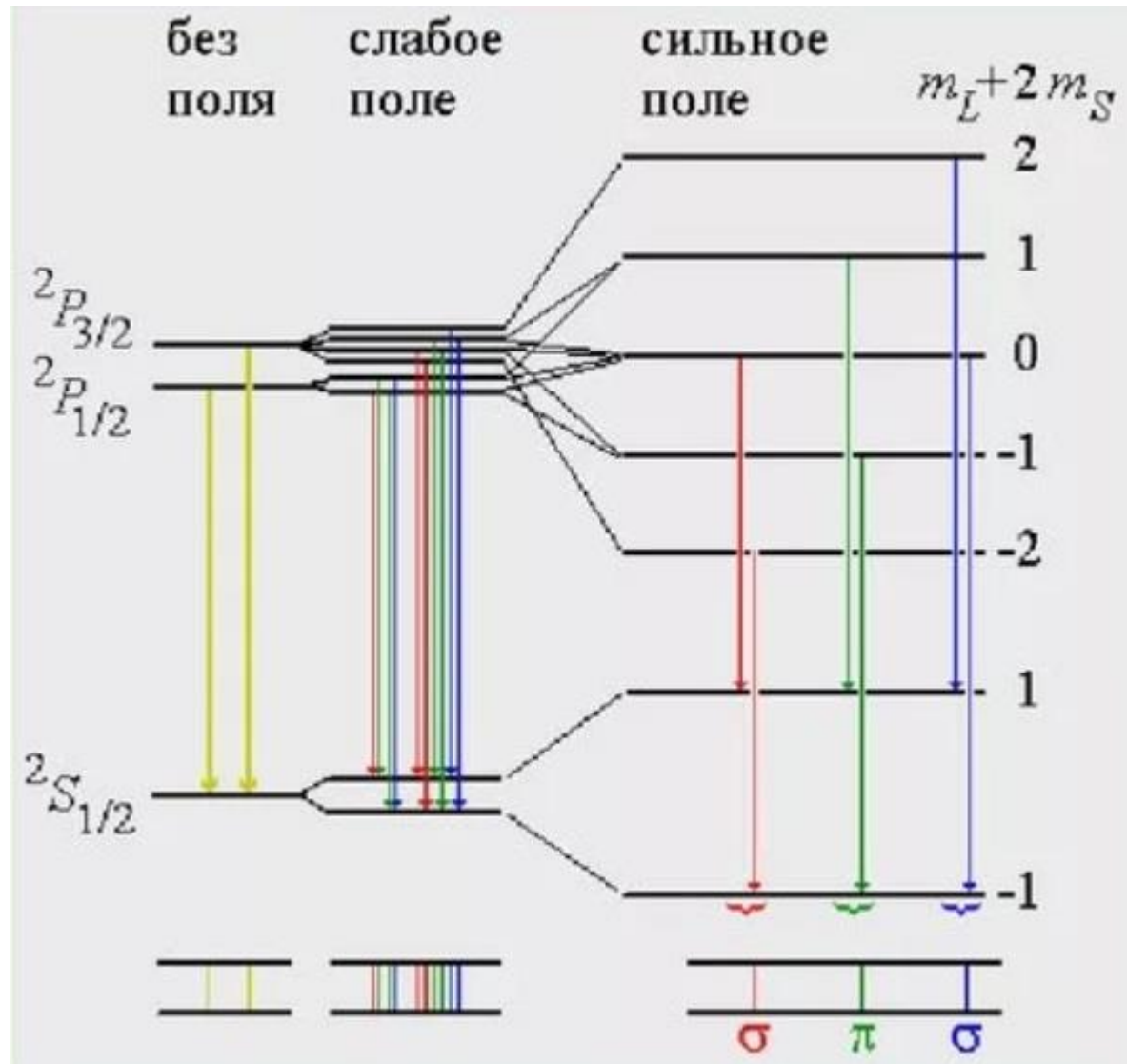
$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

+ правила отбора!

$$\Delta J = \pm 1, 0 \quad \Delta S = 0$$



Желтый дублет Na в сильном поле (нормальный или простой эффект Зеемана - подобен классической прецессии μ)



$$\vec{\mu} = \mu_B (\vec{L} + 2\vec{S})$$

$$E_Z = -B \langle \mu_z \rangle$$

$$\hbar \omega = \Delta E_0 - \mu_B \left(L_z(^2P) + 2S_z(^2P) \right) B + \mu_B \left(L_z(^2S) + 2S_z(^2S) \right) B$$

² P		
L _z	S _z	L _z +2S _z
1	0,5	2
1	-0,5	0
0	0,5	1
0	-0,5	-1
-1	0,5	0
-1	-0,5	-2

² S		
L _z	S _z	L _z +2S _z
0	0,5	1
0	-0,5	-1

$$\Delta L_z = \pm 1, 0$$

$$\Delta S_z = 0$$

Немного теорфиза для любителей Ландау и Лифшица!

$$H = \frac{1}{2m} \left(\vec{p} - \frac{q}{c} \vec{A} \right)^2 + q\Phi; \quad \hat{H} = \frac{1}{2m} \left(\hat{\vec{p}} - \frac{q}{c} \vec{A} \right)^2 + U; \quad \vec{A} = \frac{1}{2} [\vec{H} \vec{r}], \quad q = -e$$

$$\hat{H} = H_0 + \frac{e}{mc} \sum_a \vec{A}_a \vec{p}_a + \frac{e^2}{2mc^2} \sum_a \vec{A}_a^2 \approx \hat{H}_0 + \frac{e}{2mc} \vec{H} \sum_a [\vec{r}_a \hat{\vec{p}}_a] = \hat{H}_0 + \mu_B \hat{\vec{L}} \vec{H},$$

$$\hat{V} = \mu_B \hat{\vec{L}} \vec{H} = \mu_B H \hat{L}_z, \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2mc} \quad \text{Магнетон Бора}$$

$\vec{H} \longrightarrow \longrightarrow \vec{z}$ оператор взаимодействия

$$\psi = \sum_{M=-L}^L c_M \psi_M^{(0)}$$

Поправка к энергии состояния с орбитальным моментом L по формуле для наличия вырождения по орбитальному магнитному квантовому числу $M = -L, \dots, L$

$$V_{M'M} = \int \psi_{LM'}^{(0)*} \hat{V} \psi_{LM}^{(0)} dq = \mu_B H \int \psi_{LM'}^{(0)*} \hat{L}_z \psi_{LM}^{(0)} dq = \mu_B H \int \psi_{LM'}^{(0)*} M \psi_{LM}^{(0)} dq$$

$$= \mu_B H M \delta_{M'M} \quad \left| V_{M'M} - E_M^{(1)} \delta_{M'M} \right| = 0 \quad \left| \mu_B H M \delta_{M'M} - E_M^{(1)} \delta_{M'M} \right| = 0$$

Какие бывают фотоны? E1, M1, E2, M2, E3, ...!

Мультипольное разложение
электромагнитного поля

$$q = \sum q_i$$

$$\vec{d} = \sum q_i \vec{r}_i$$

$$Q_{\alpha\beta} = \sum q_i (3 r_{i\alpha} r_{i\beta} - r^2 \delta_{\alpha\beta})$$



$$\varepsilon = q \phi - \vec{d} \cdot \vec{E} - \frac{1}{2} \sum_{\alpha\beta} Q_{\alpha\beta} \frac{\partial E_{\alpha}}{\partial r_{\beta}} + \dots$$

Четность атомных состояний и
излучаемых фотонов

$$\Psi(\mathbf{r}) = R(r) Y_{lm}(\theta, \varphi),$$

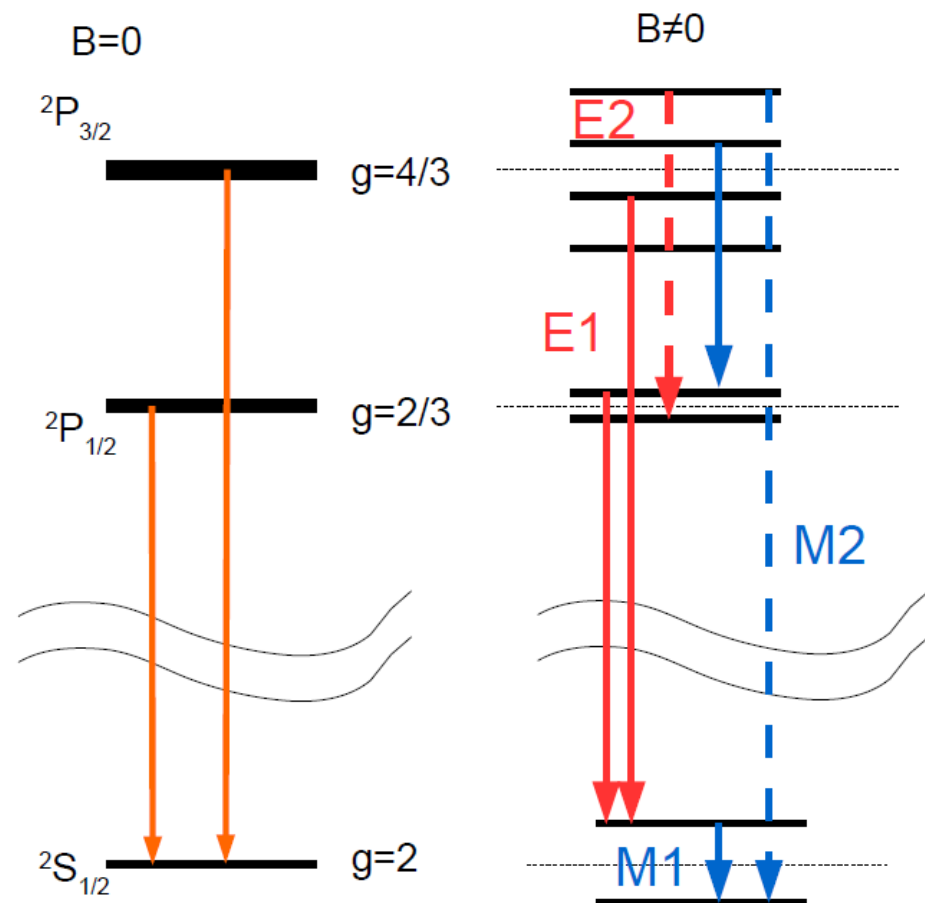
$$Y_{lm}(\theta, \varphi) = e^{im\varphi} P_l^m(\cos \theta).$$

$$Y_{lm}(\pi - \theta, \pi + \varphi) = (-1)^m (-1)^{l-m} Y_{lm}(\theta, \varphi) = (-1)^l Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

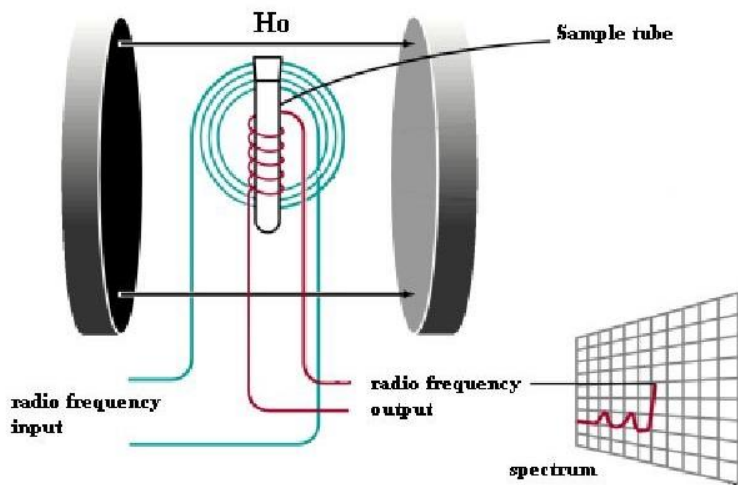
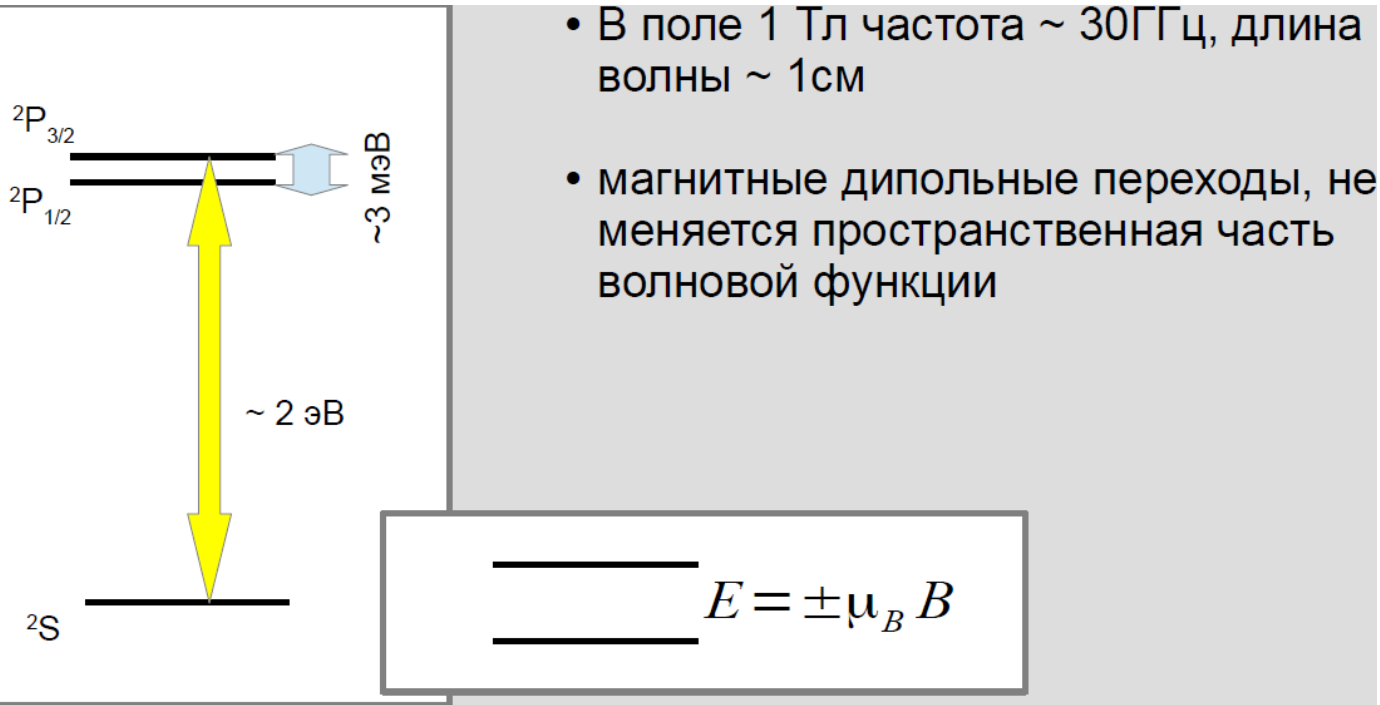
$$P = P_A P_B (-1)^l$$

$E1 (1^-), E2 (2^+), E3 (3^-), \dots,$
 $M1 (1^+), M2 (2^-), M3 (3^+), \dots$

Типы фотонов,
излучаемые желтым
дублетом натрия в
слабом поле

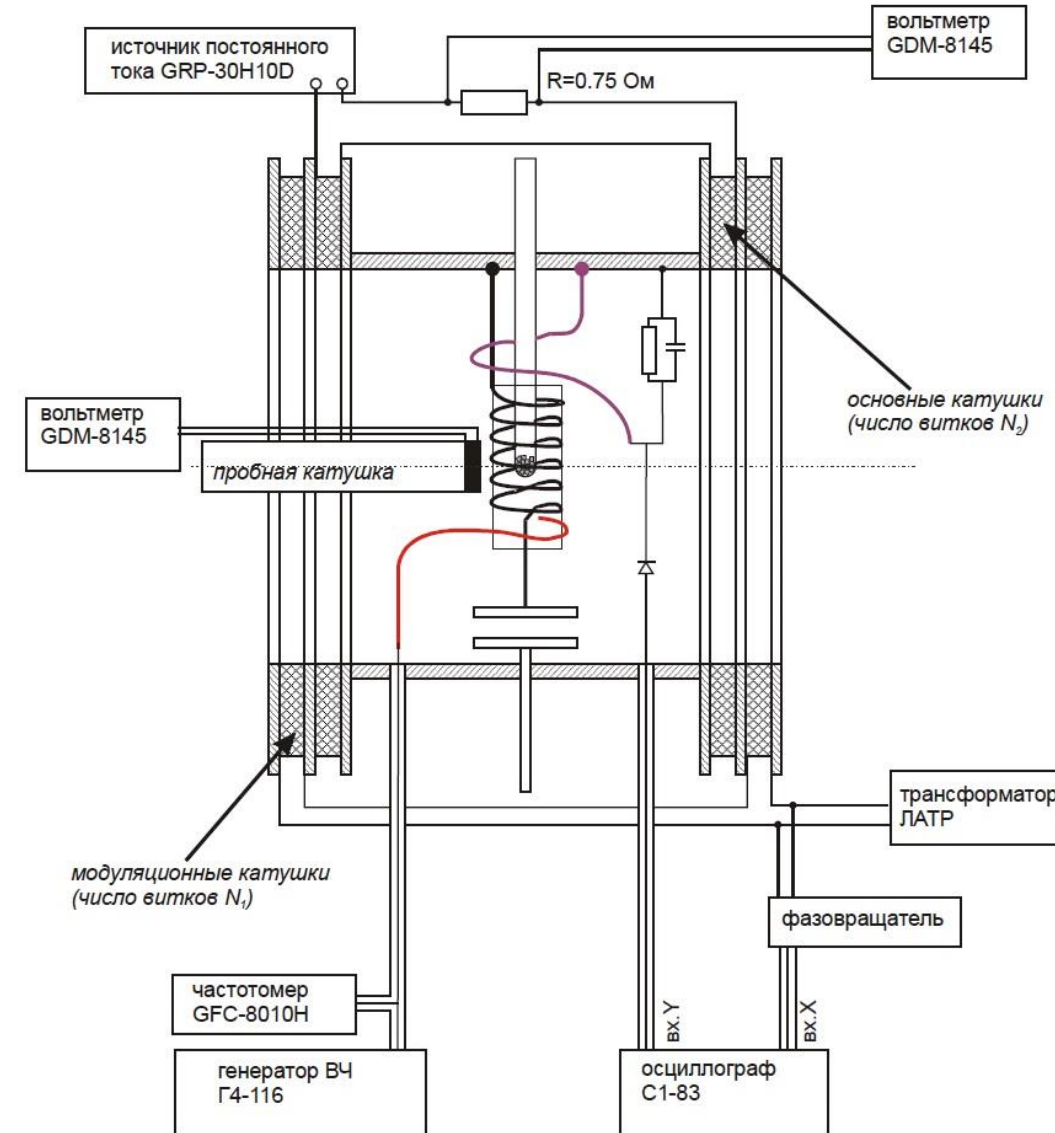


ЭПР и ЯМР как примеры генерации магнитных фотонов



$$M_z^{(\text{яд})} = g \mu_{\text{яд}} I_z$$

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{1}{1840} \mu_B$$



• Частоты ~10...100 МГц

Лабы 10.1 и 10.4!

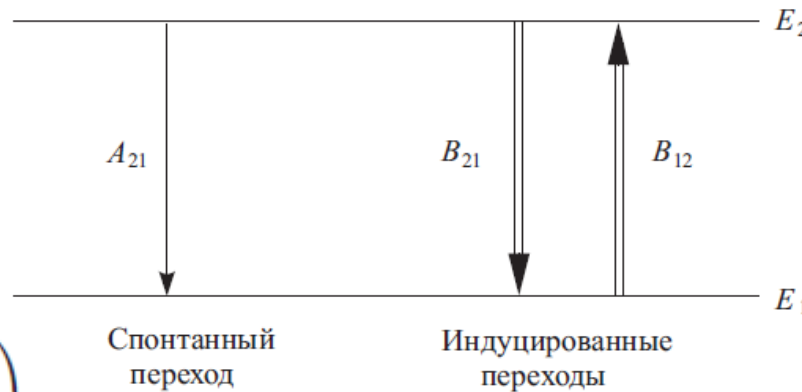
Лазеры: физические принципы и типовые схемы

Среднее число квантов в данной моде

$$n = \frac{\pi c^3}{2 \hbar \omega^3} u_\nu = \frac{1}{\exp(\hbar \omega / kT) - 1} = \frac{W_{\text{вын}}}{W_{\text{сп}}}$$

Условие самовозбуждения

$$j(x) = j(0)e^{\alpha x}, \quad \alpha > \alpha_c = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$



Коэффициенты Эйнштейна

$$A_{21} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \hbar \omega B_{21}$$

$$B_{21} = B_{12}$$

