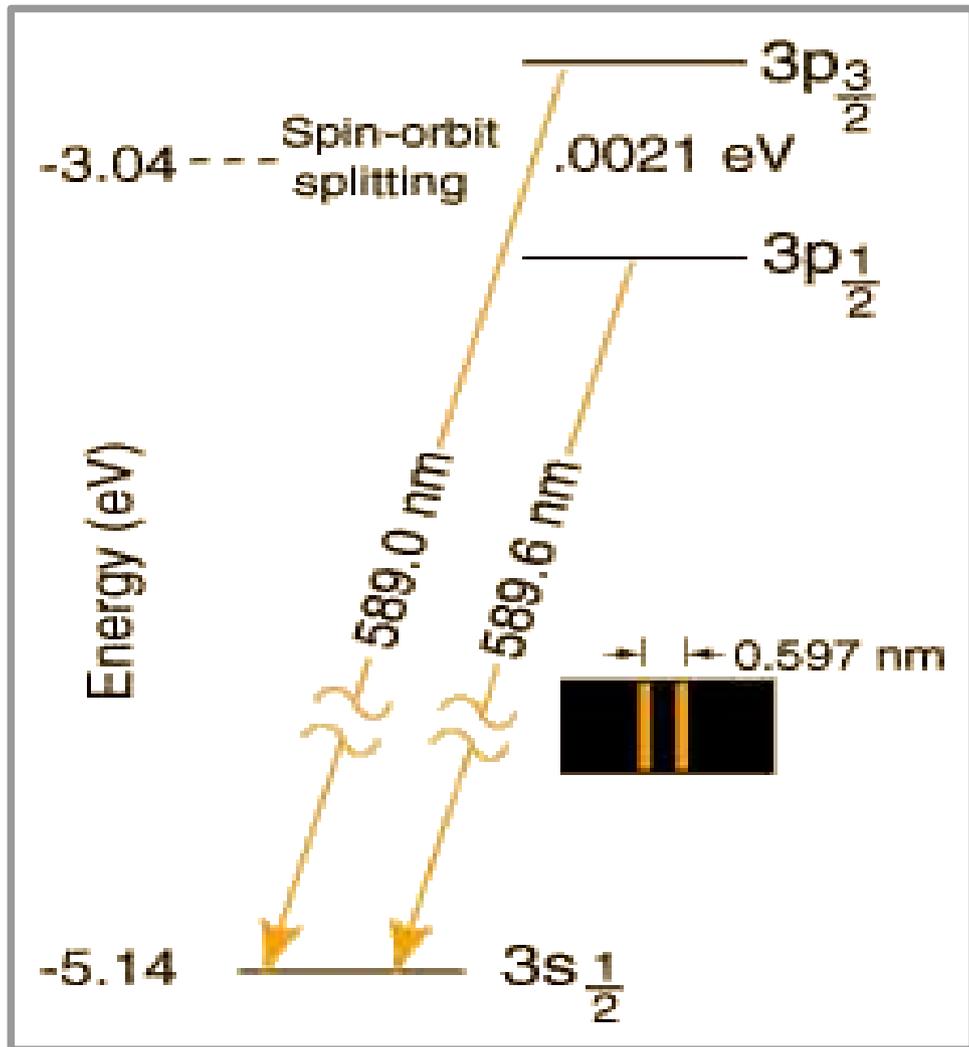


## Лекция 9

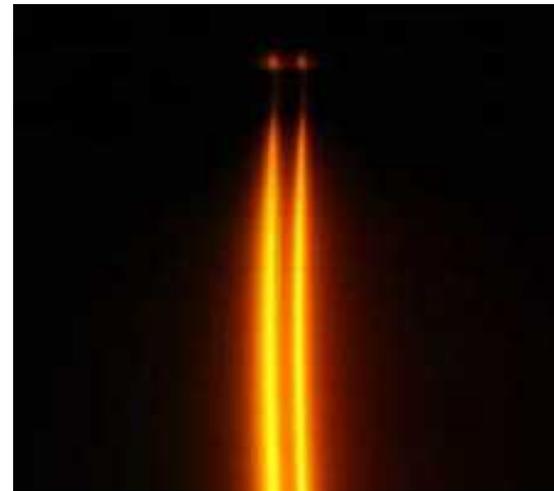
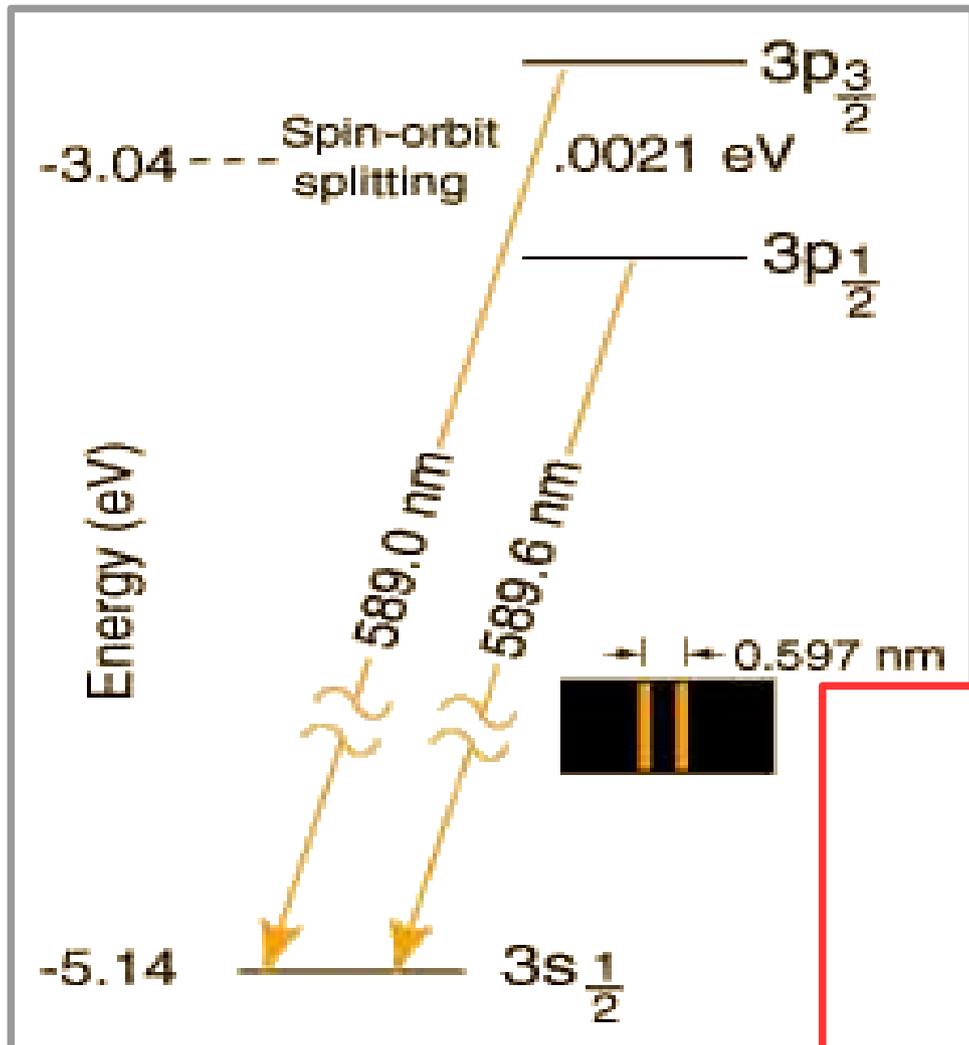
1. Оптический эффект Зеемана
2. Правила отбора для излучения и поглощения.
3. «Не-оптические и постаси» эффекта Зеемана: ЭПР и ЯМР.
4. Спонтанное и индуцированное излучение, лазеры.

# Часть 1. Оптический эффект Зеемана: переходы, спектры и правила отбора

# Эффект Зеемана в слабом поле на примере желтого дублета натрия



# Эффект Зеемана в слабом поле на примере желтого дублета натрия



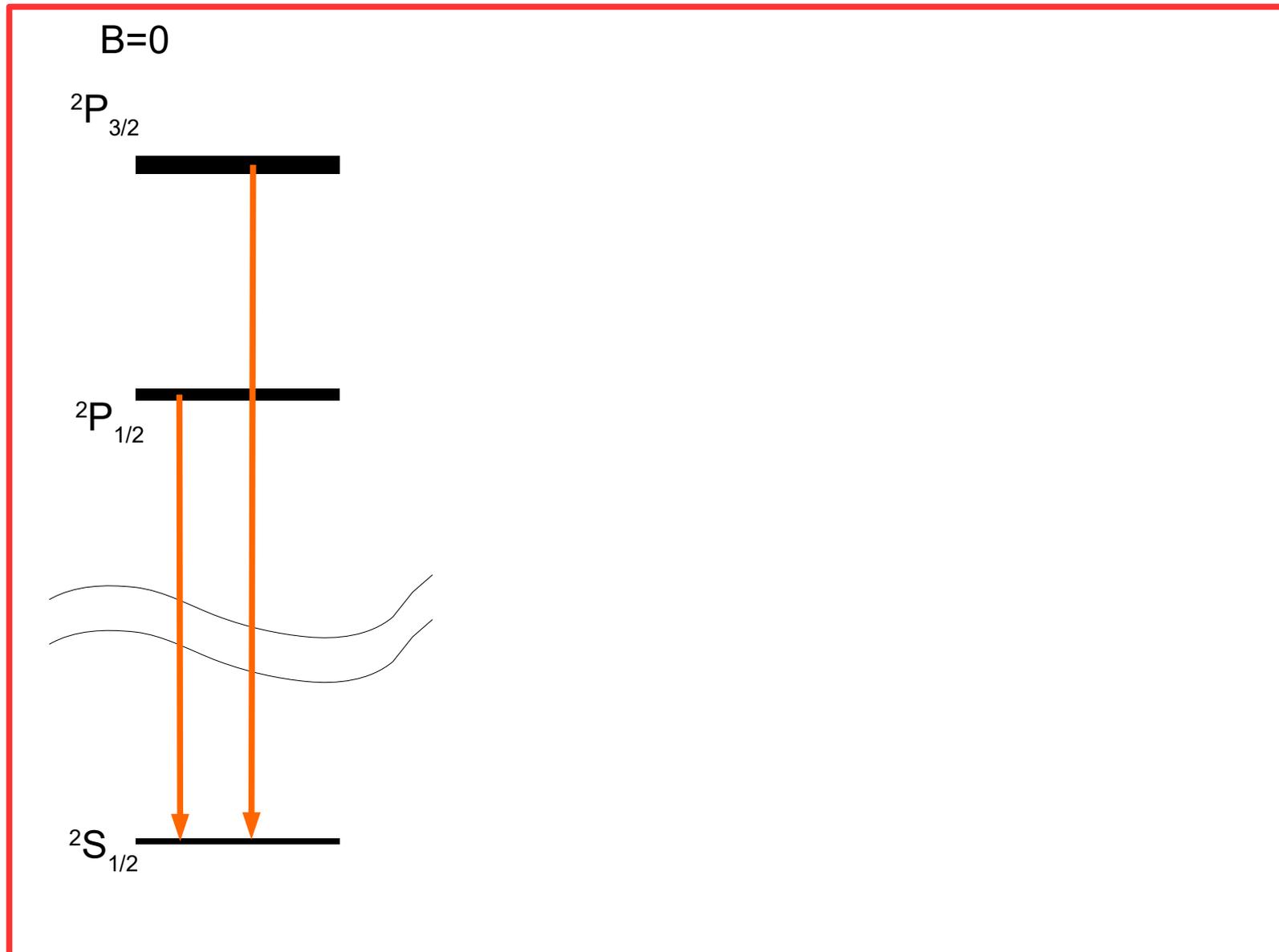
$$E_{SL} \gg g \mu_B J_z B$$

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

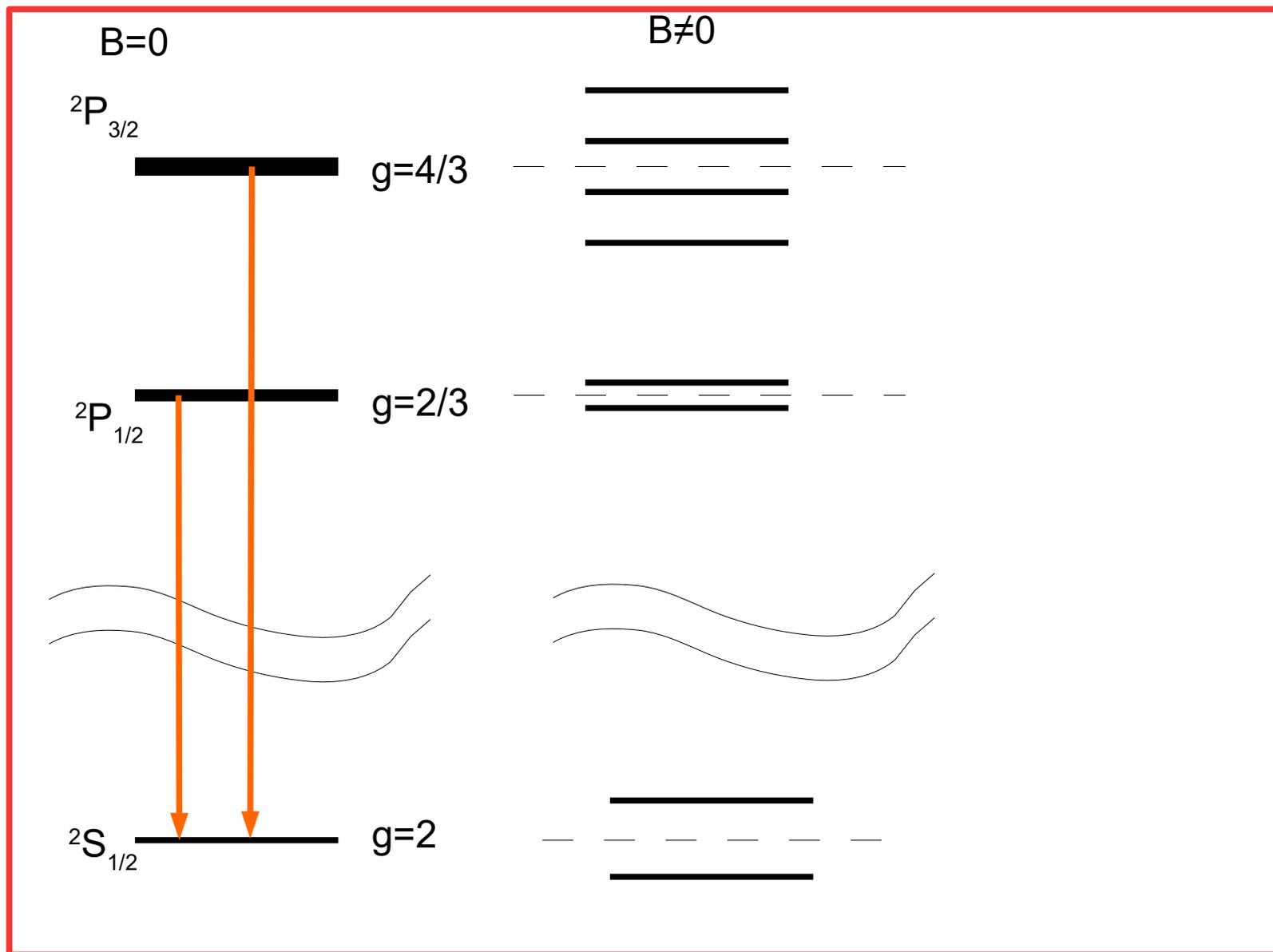
$$1 \text{ Тл} \sim 1 \text{ К} \sim 0.1 \text{ мэВ}$$

для Na 2 мэВ  $\sim$  20 Тл

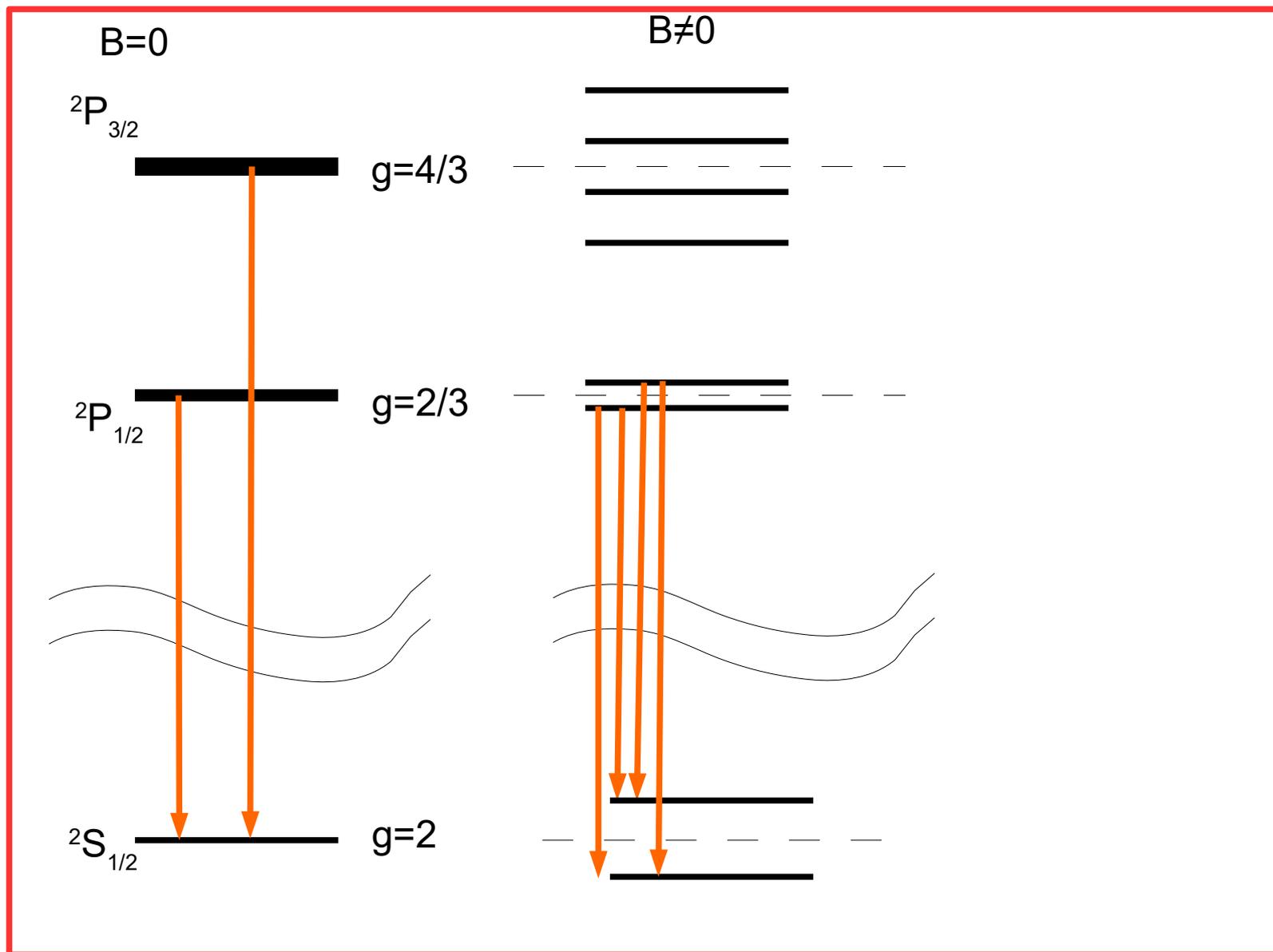
# Эффект Зеемана в слабом поле на примере желтого дублета натрия



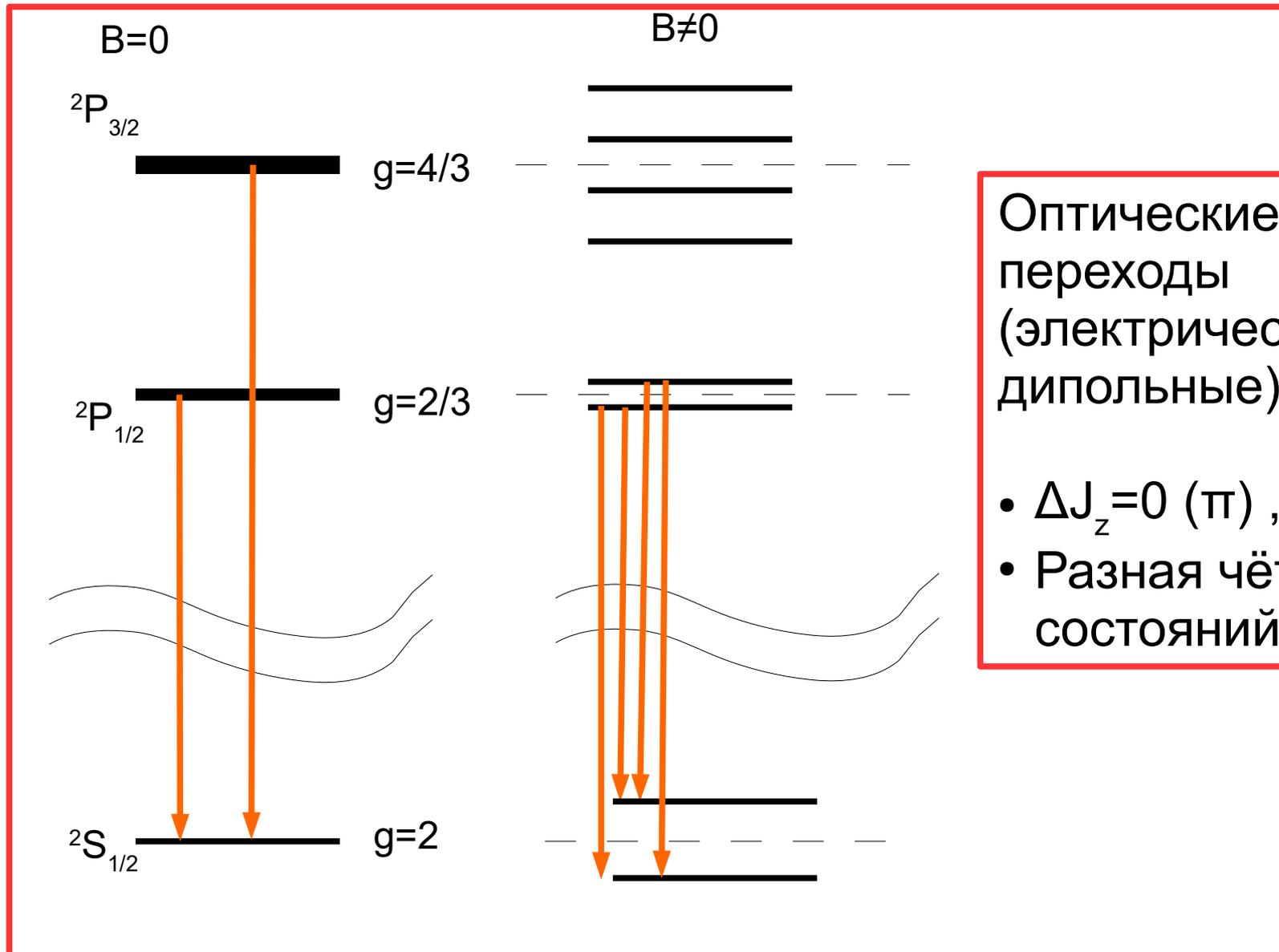
# Эффект Зеемана в слабом поле на примере желтого дублета натрия



# Эффект Зеемана в слабом поле на примере желтого дублета натрия



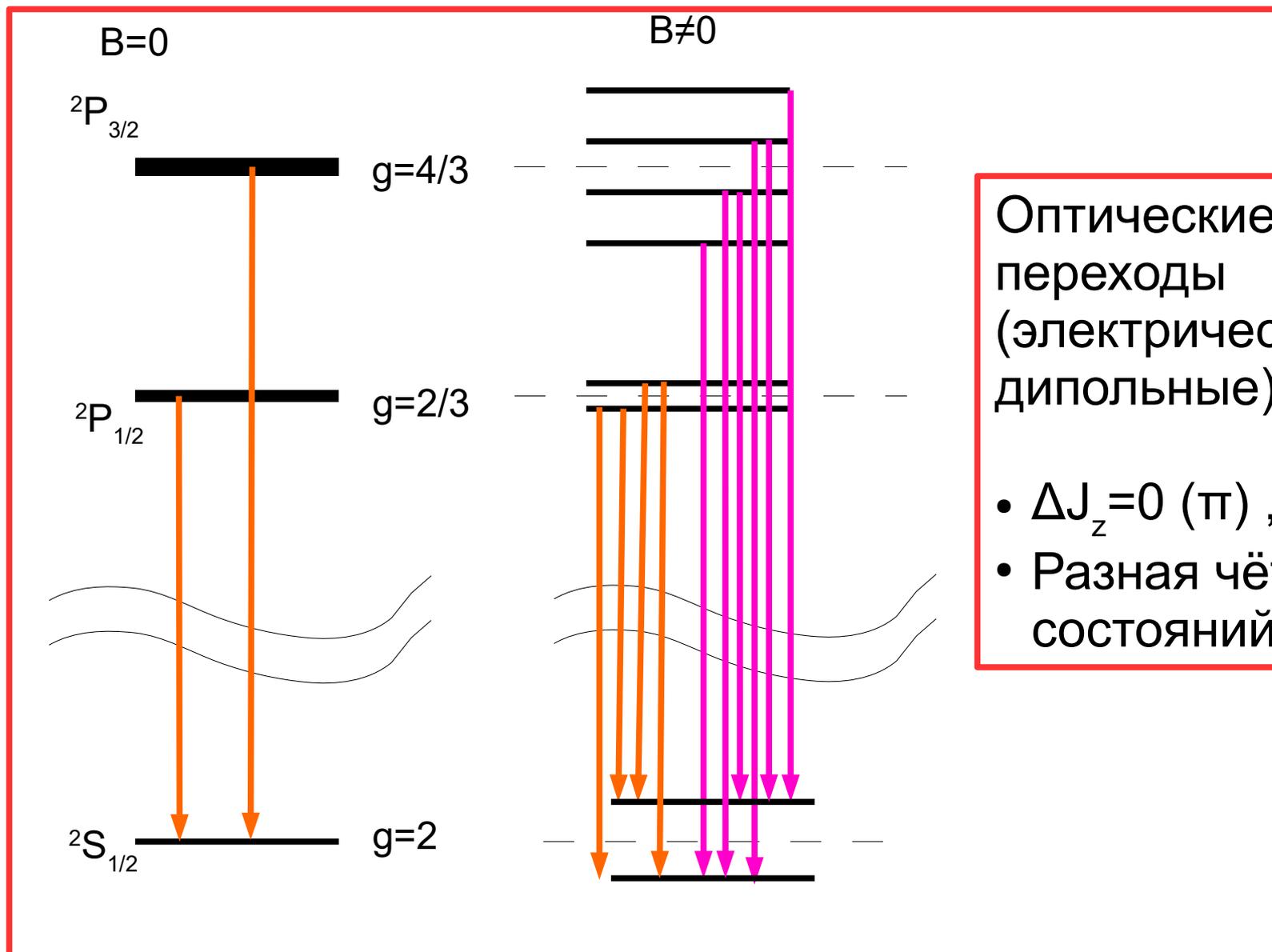
# Эффект Зеемана в слабом поле на примере желтого дублета натрия



Оптические переходы (электрические дипольные):

- $\Delta J_z = 0$  ( $\pi$ ),  $\pm 1$  ( $\sigma$ )
- Разная чётность состояний

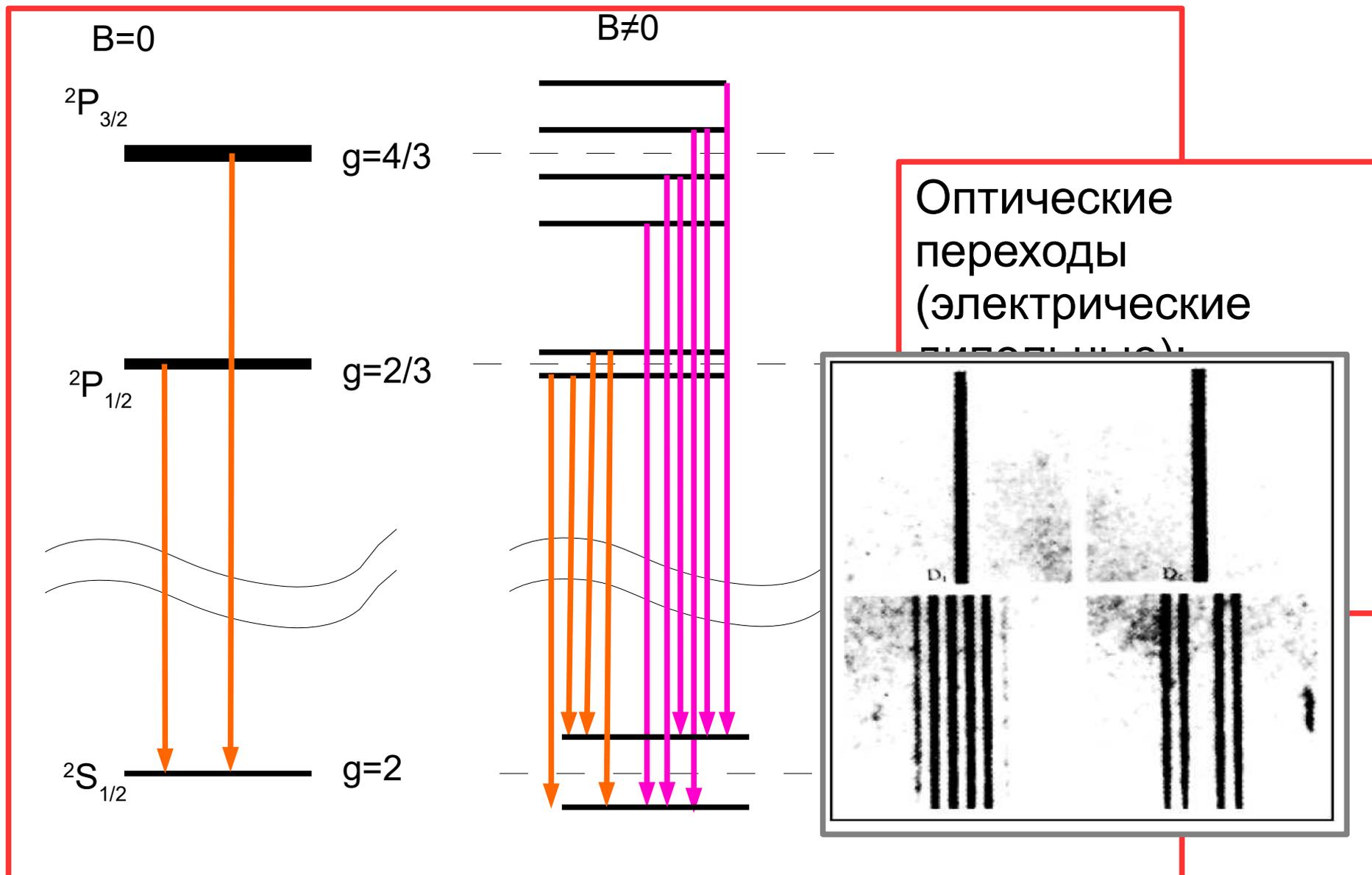
# Эффект Зеемана в слабом поле на примере желтого дублета натрия



Оптические переходы (электрические дипольные):

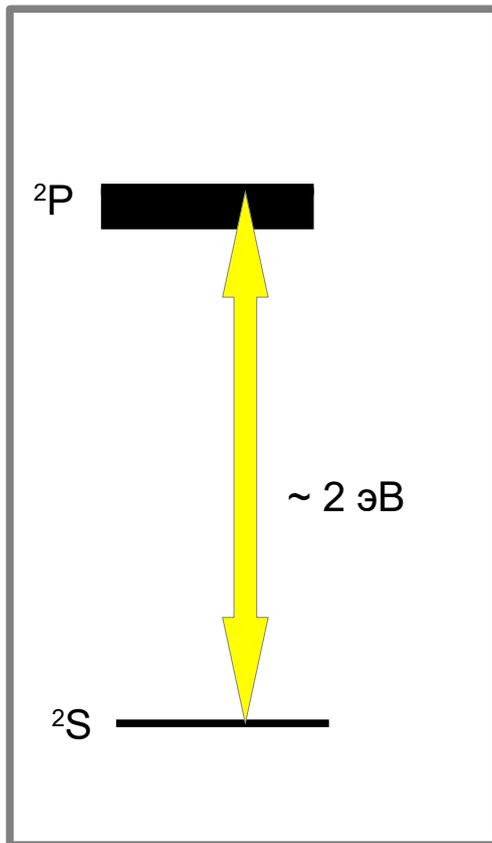
- $\Delta J_z = 0$  ( $\pi$ ),  $\pm 1$  ( $\sigma$ )
- Разная чётность состояний

# Эффект Зеемана в слабом поле на примере желтого дублета натрия



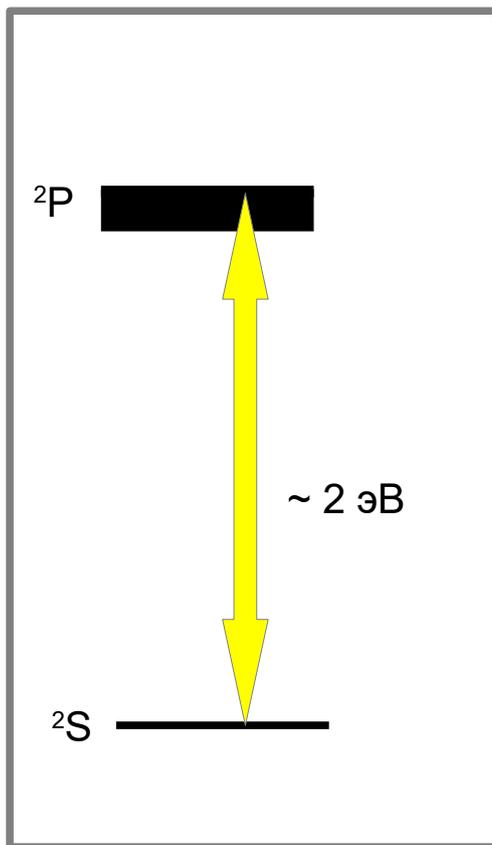
# Эффект Зеемана в сильном поле

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



# Эффект Зеемана в сильном поле

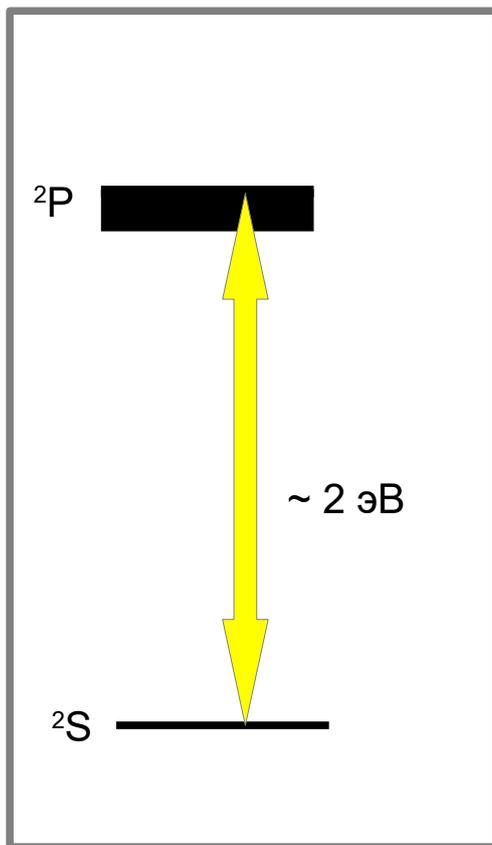
$$\vec{\mu} = \mu_B (\vec{L} + 2\vec{S})$$



$$E_Z = -B \langle \mu_z \rangle$$
$$\hbar \omega = \Delta E_0 - \mu_B (L_Z + 2S_Z)_{[2P]} B +$$
$$+ \mu_B (L_Z + 2S_Z)_{[2S]} B$$

# Эффект Зеемана в сильном поле

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



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

$$\hbar \omega = \Delta E_0 - \mu_B (L_Z + 2S_z)_{[2P]} B +$$

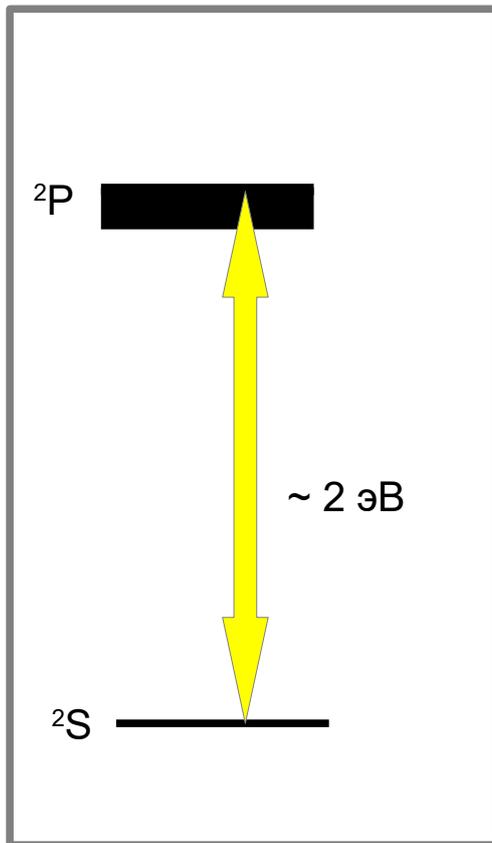
$$+ \mu_B (L_Z + 2S_z)_{[2S]} B$$

$2P$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
1	0,5	2
1	-0,5	0
0	0,5	1
0	-0,5	-1
-1	0,5	0
-1	-0,5	-2

$2S$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
0	0,5	1
0	-0,5	-1

# Эффект Зеемана в сильном поле

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



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

$$\hbar \omega = \Delta E_0 - \mu_B (L_z + 2S_z)_{[2P]} B +$$

$$+ \mu_B (L_z + 2S_z)_{[2S]} B$$

$2P$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
1	0,5	2
1	-0,5	0
0	0,5	1
0	-0,5	-1
-1	0,5	0
-1	-0,5	-2

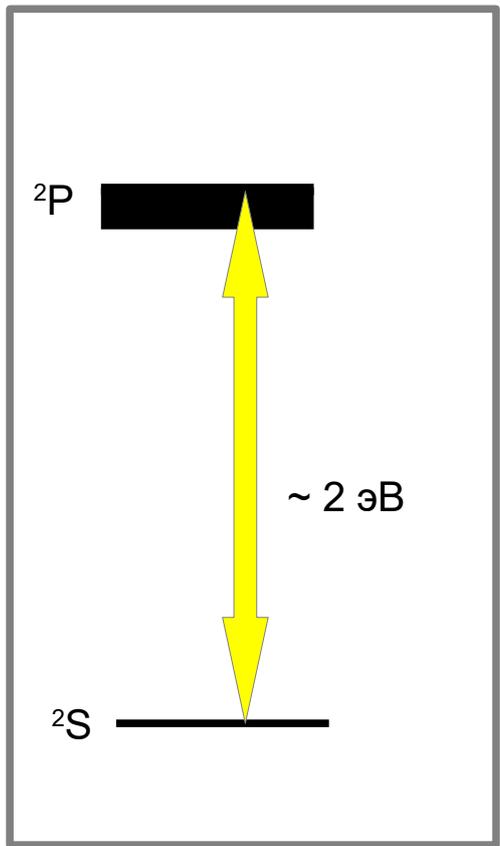
$2S$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
0	0,5	1
0	-0,5	-1

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

$$\Delta S_z = 0$$

# Эффект Зеемана в сильном поле

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



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

$$\hbar \omega = \Delta E_0 - \mu_B (L_Z + 2S_z)_{[2P]} B + \mu_B (L_Z + 2S_z)_{[2S]} B$$

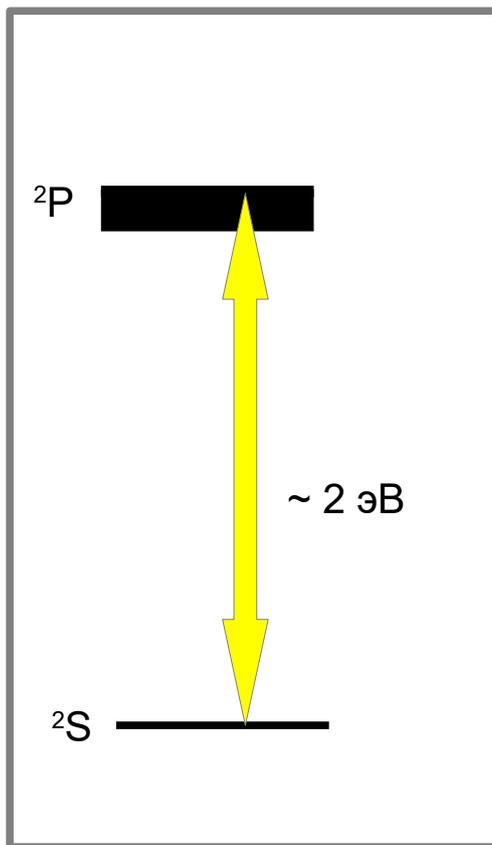
$2P$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
1	0,5	2
1	-0,5	0
0	0,5	1
0	-0,5	-1
-1	0,5	0
-1	-0,5	-2

$2S$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
0	0,5	1
0	-0,5	-1

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

# Эффект Зеемана в сильном поле

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



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

$$\hbar \omega = \Delta E_0 - \mu_B (L_Z + 2S_z)_{[2P]} B +$$

$$+ \mu_B (L_Z + 2S_z)_{[2S]} B$$

$$\hbar \omega = \Delta E_0 + \{ \mu_B B, 0, -\mu_B B \}$$

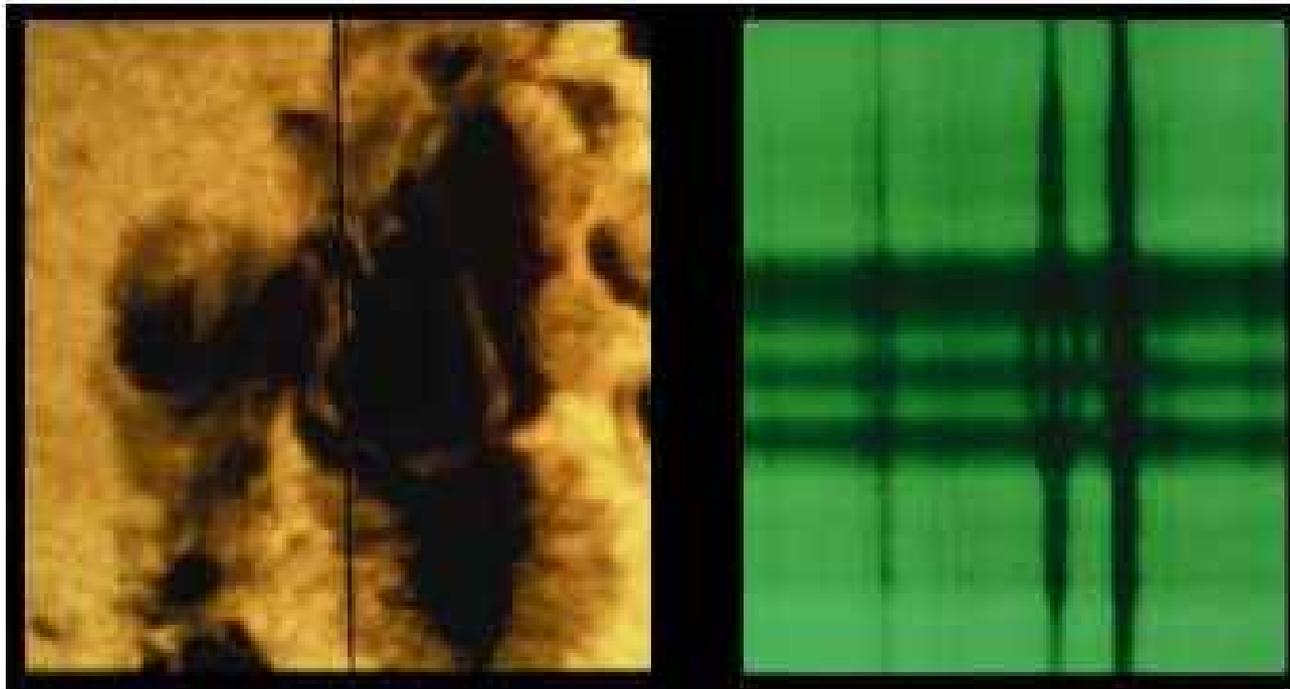
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
1	0,5	2
1	-0,5	0
0	0,5	1
0	-0,5	-1
-1	0,5	0
-1	-0,5	-2

$2S$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
0	0,5	1
0	-0,5	-1

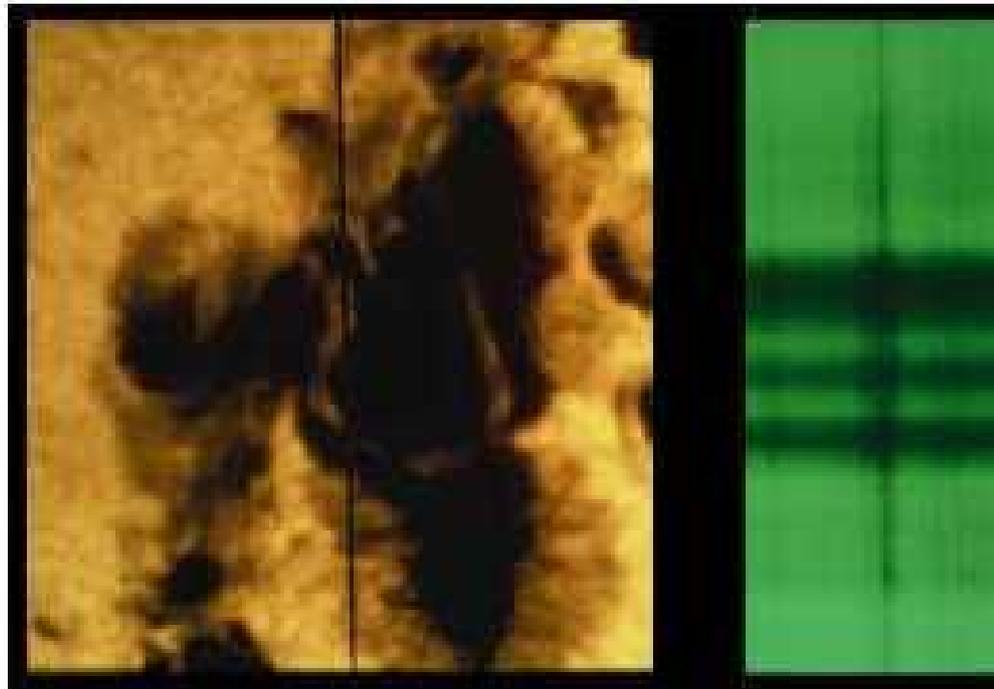
$$\Delta L_z = \pm 1, 0$$

$$\Delta S_z = 0$$

# Как измерить магнитное поле на Солнце



# Как измерить магнитное поле Солнца

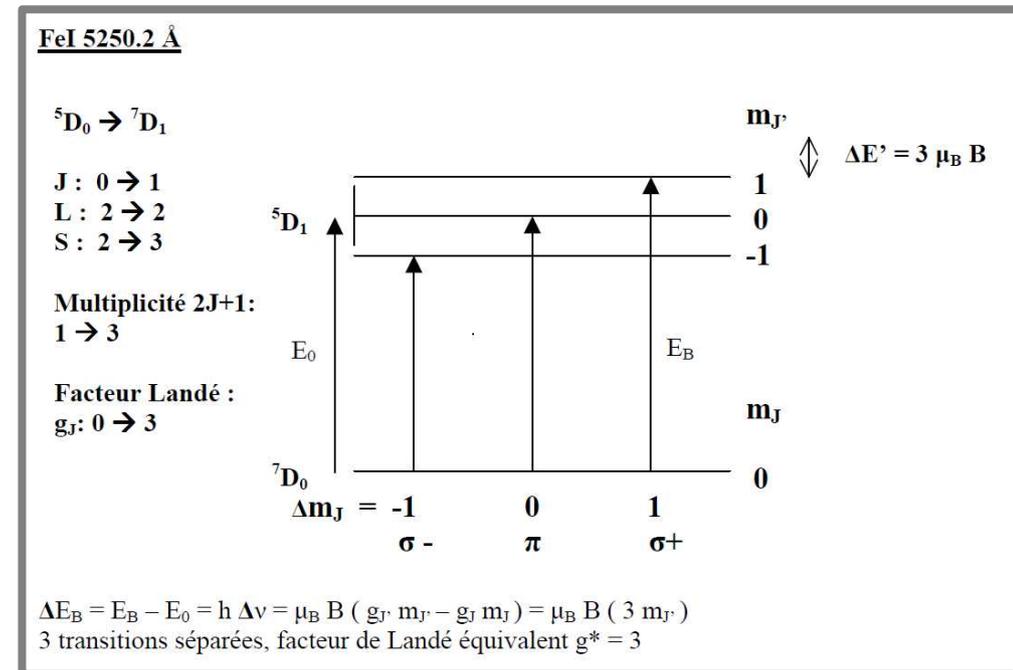
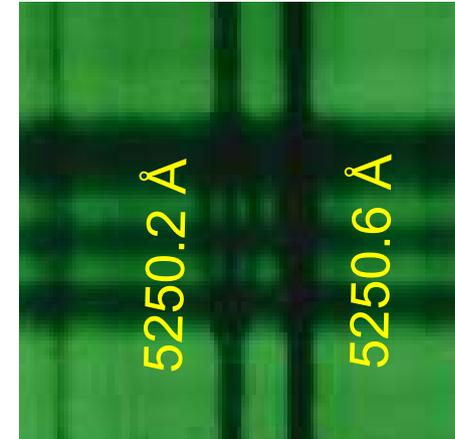
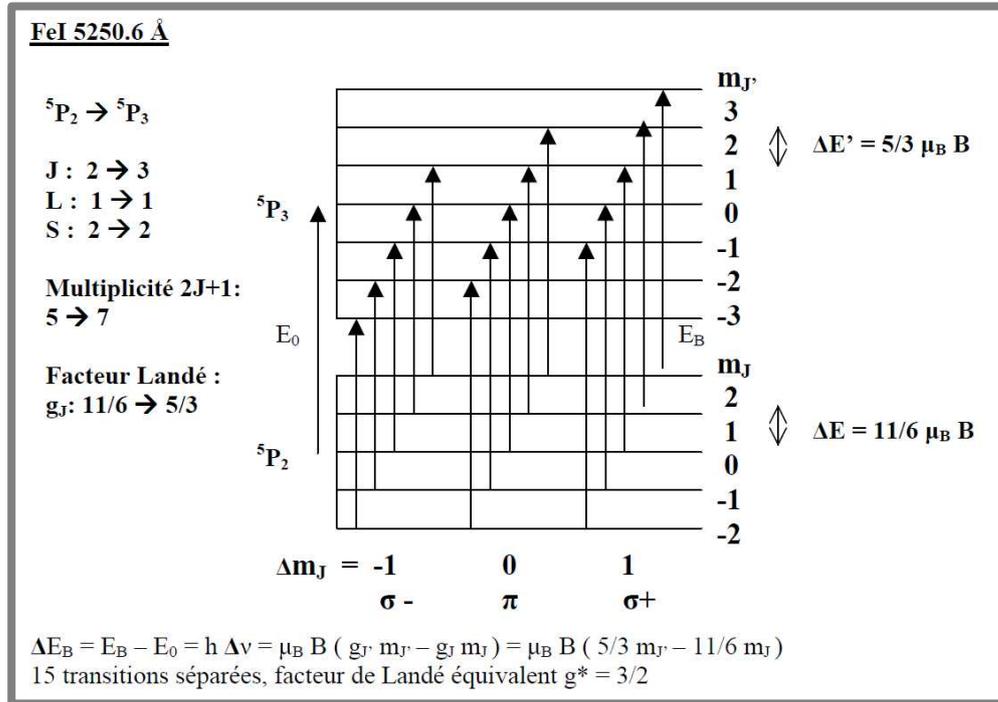


Fe  
5250.2 Å  
 $^5D_0 \rightarrow ^7D_1$   
 $^5D_0$  синглет  
 $^7D_1$   $g=3$

Fe  
5250.6 Å  
 $^5P_2 \rightarrow ^5P_3$   
 $^5P_2$   $g=11/12$   
 $^5P_3$   $g=5/3$

4.13 кЭ

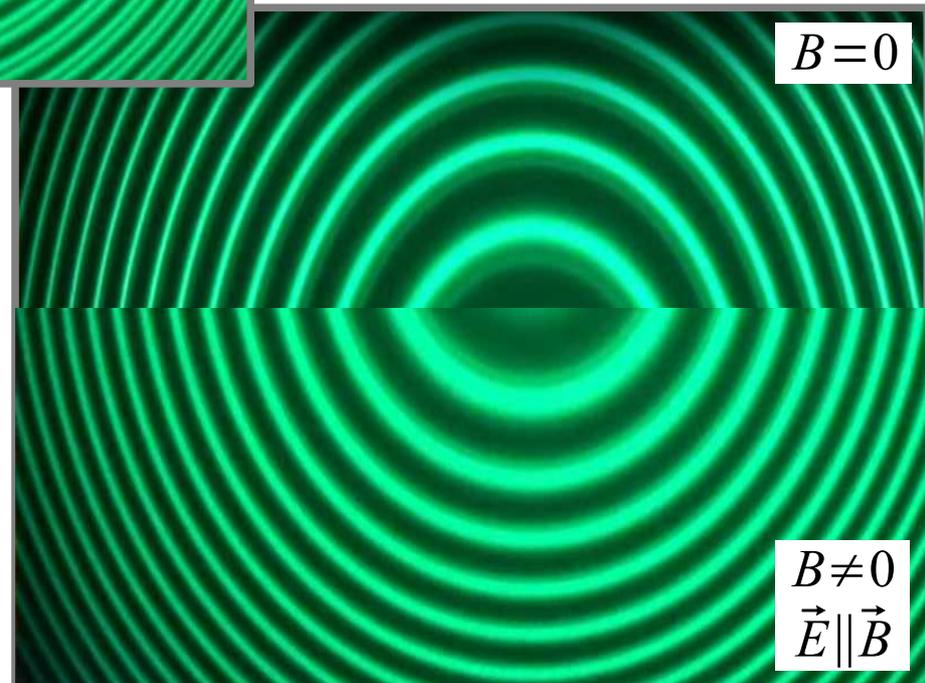
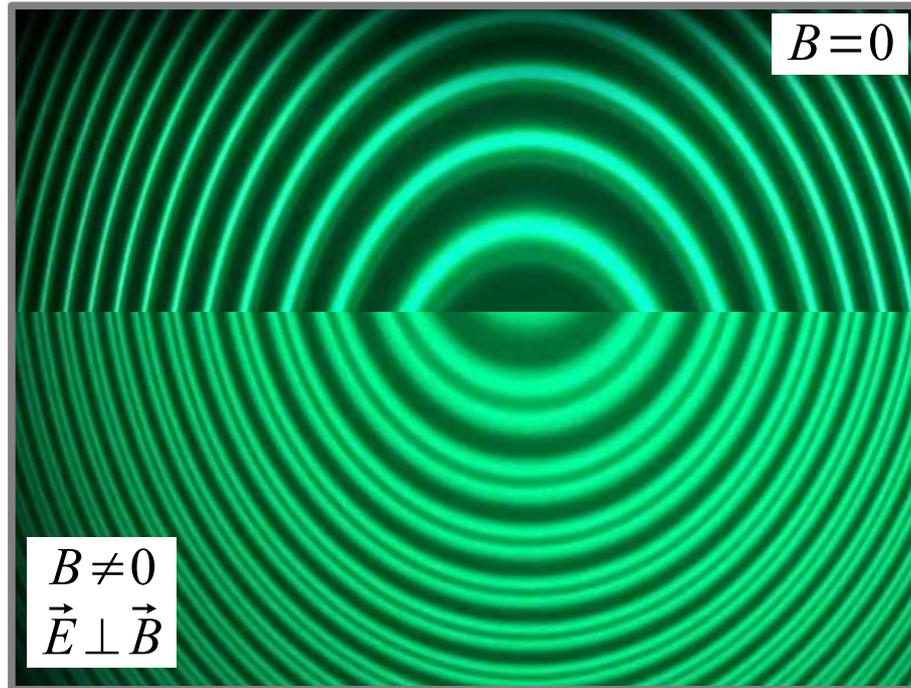
# Солнечные линии Fe I 5250.2 Å и 5250.6 Å (справочно)



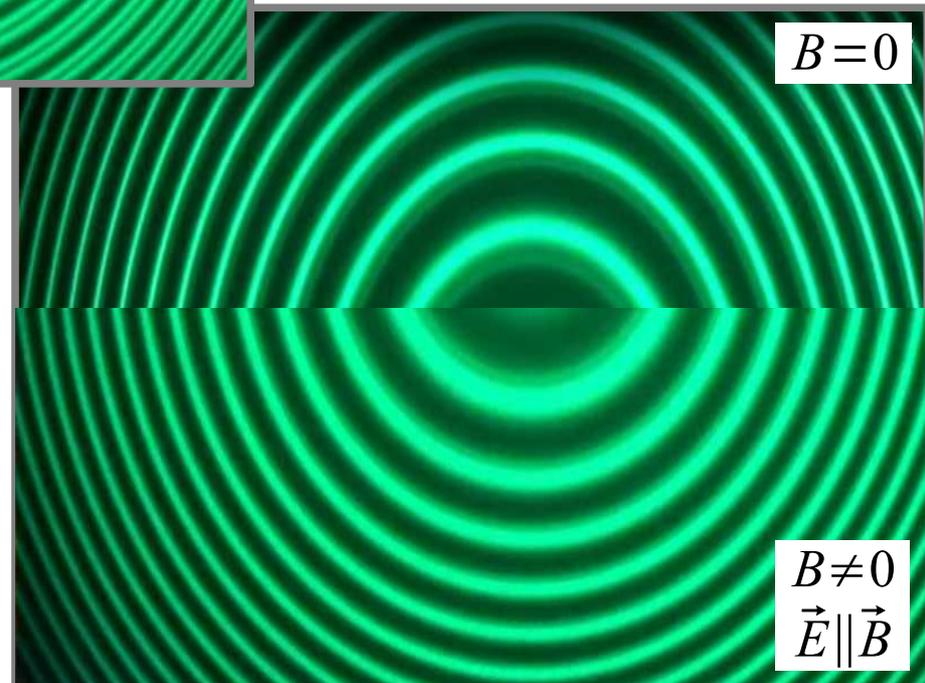
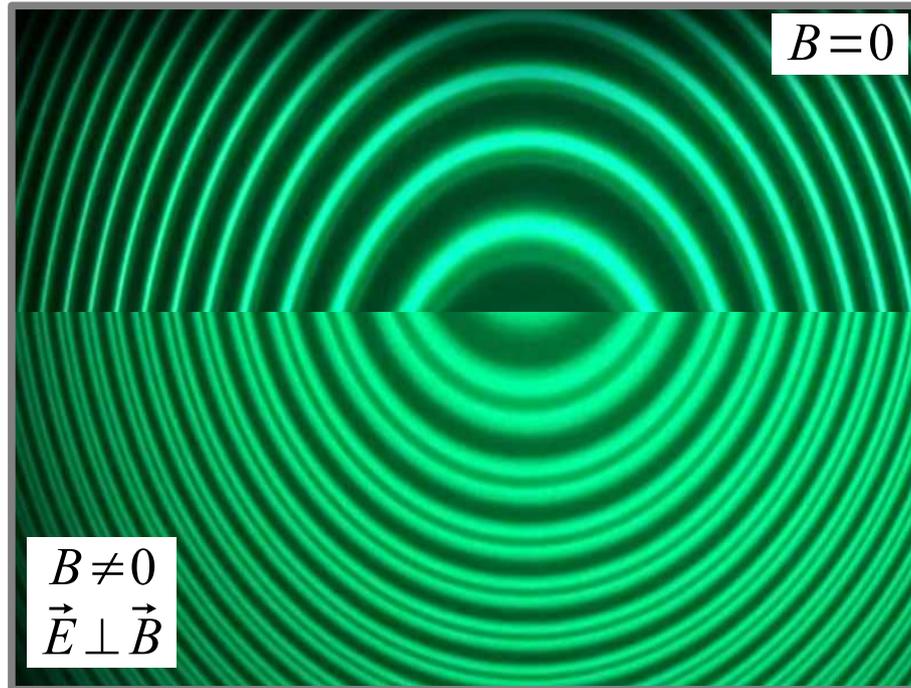
# Демонстрация эффекта Зеемана



# Демонстрация: что же мы видим

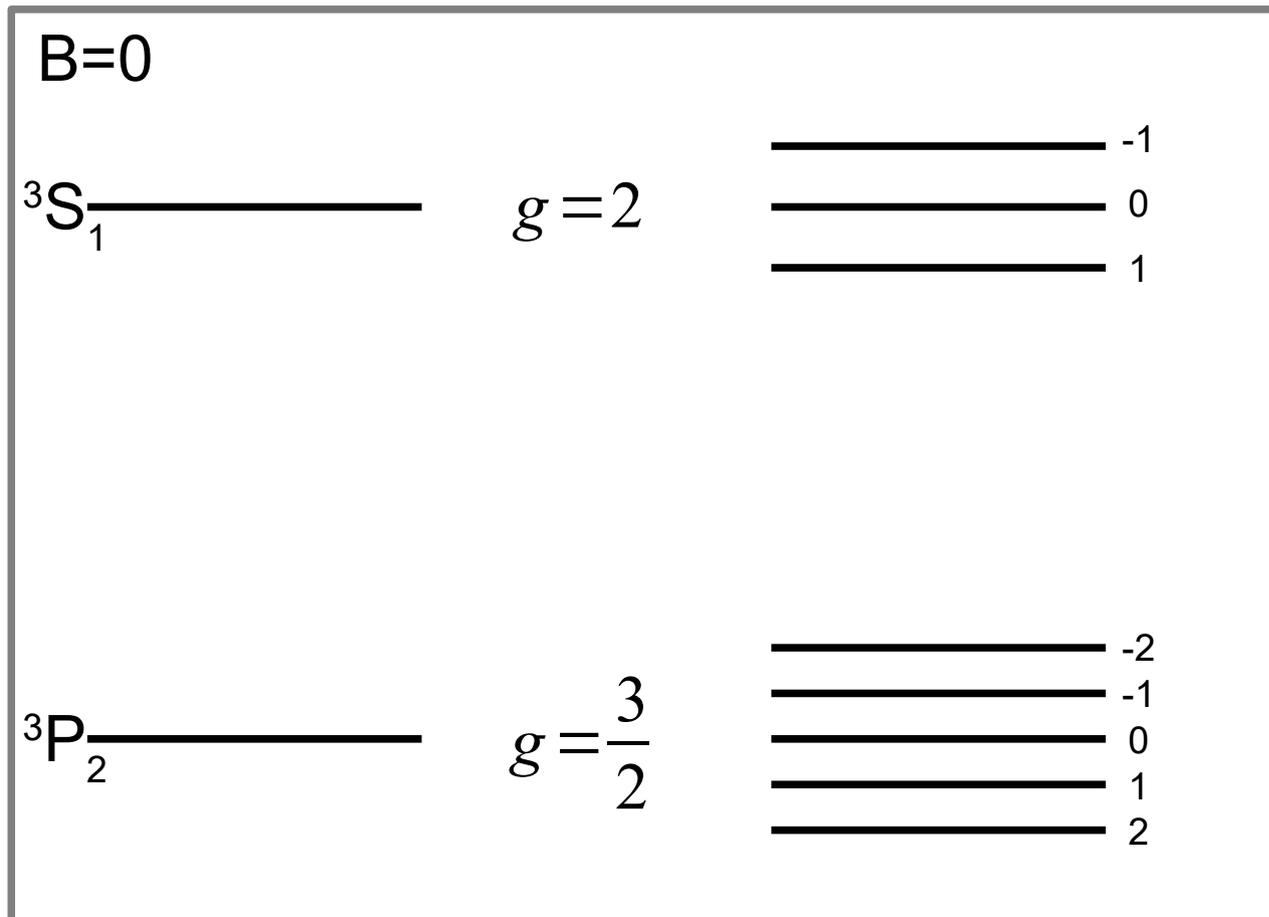


# Демонстрация: что же мы видим

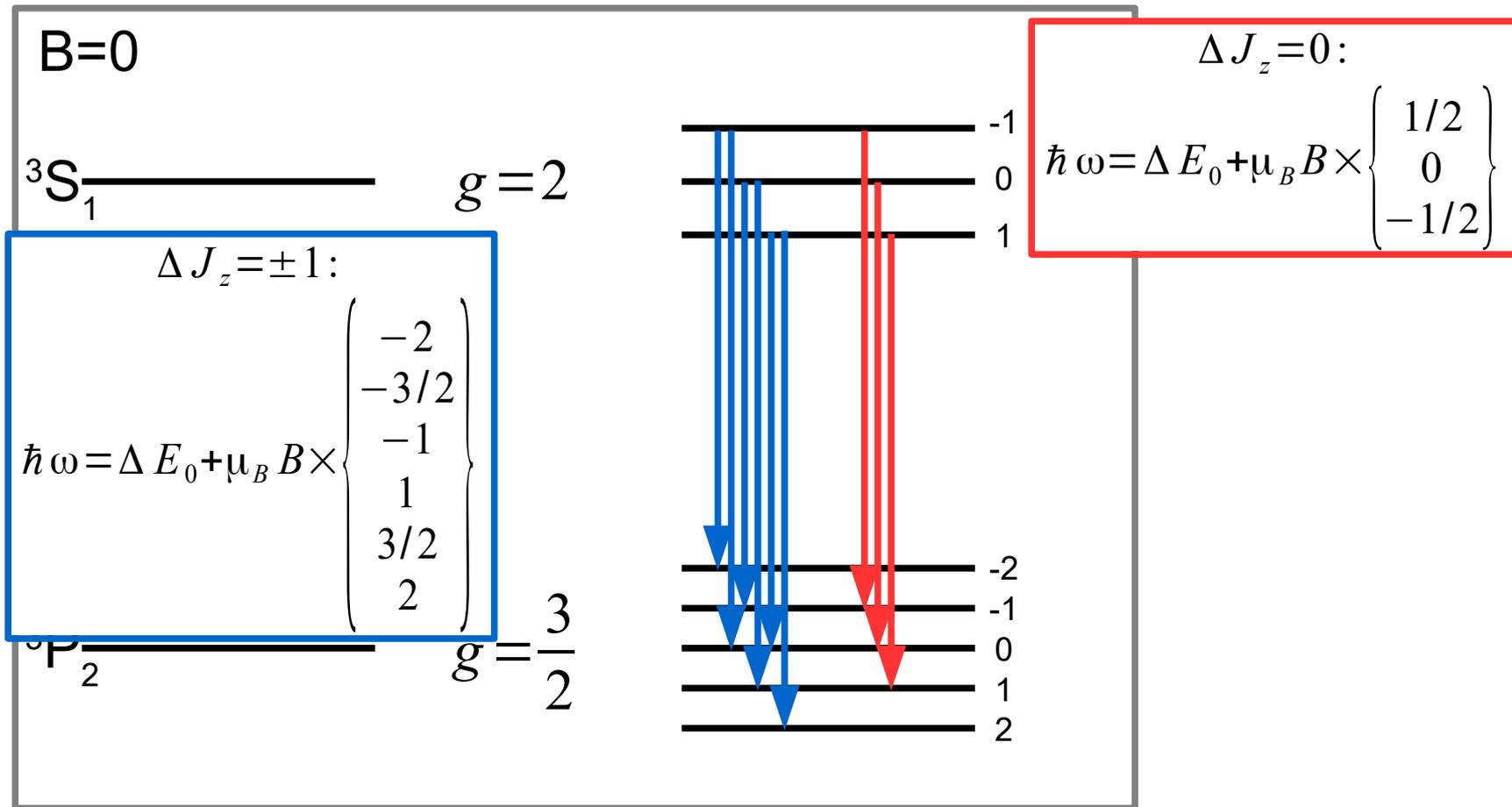


Сложный эффект Зеемана  
с неразрешенными  
спектральными  
компонентами

# Расщепление голубой линии кадмия $\lambda=508$ нм



# Расщепление голубой линии кадмия $\lambda=508$ нм



## Часть 2. Правила отбора: чуть более формально

# Формальности: смешивание состояний

$$\begin{array}{c} \hat{H}_0 \\ \left\{ \Psi_i^{(0)} \right\} \end{array} \longrightarrow \hat{H}_0 \Psi_i^{(0)} = E_i \Psi_i^{(0)}$$

$\hat{V}$

«слабая» добавка, например:  
взаимодействие с внешним полем

# Формальности: смешивание состояний

$$\begin{array}{c} \hat{H}_0 \\ \{ \Psi_i^{(0)} \} \end{array} \longrightarrow \hat{H}_0 \Psi_i^{(0)} = E_i \Psi_i^{(0)}$$

$\hat{V}$  «слабая» добавка, например:  
взаимодействие с внешним полем

$$\begin{aligned} (\hat{H}_0 + \hat{V}) \Psi_i^{(0)} &= E_i \Psi_i^{(0)} + \hat{V} \Psi_i^{(0)} = \\ &= E_i \Psi_i^{(0)} + \sum \alpha_{ij} \Psi_j^{(0)} \end{aligned}$$

$$\alpha_{ij} = \int (\Psi_j^{(0)})^* \hat{V} \Psi_i^{(0)} dx$$

# Формальности: смешивание состояний

$$\begin{matrix} \hat{H}_0 \\ \{ \Psi_i^{(0)} \} \end{matrix} \longrightarrow \hat{H}_0 \Psi_i^{(0)} = E_i \Psi_i^{(0)}$$

$\hat{V}$  «слабая» добавка, например:  
взаимодействие с внешним полем

$$\begin{aligned} (\hat{H}_0 + \hat{V}) \Psi_i^{(0)} &= E_i \Psi_i^{(0)} + \hat{V} \Psi_i^{(0)} = \\ &= E_i \Psi_i^{(0)} + \sum \alpha_{ij} \Psi_j^{(0)} \end{aligned}$$

$$\alpha_{ij} = \int (\Psi_j^{(0)})^* \hat{V} \Psi_i^{(0)} dx$$

Смысл результата:

$$\text{если } \int (\Psi_j^{(0)})^* \hat{V} \Psi_i^{(0)} dx \neq 0$$

то при «включении» добавки система  
перейдёт из  $i$ -ого в  $j$ -ое состояние  
с некоторой вероятностью

# Строгий результат для периодического возмущения: «Золотое правило Ферми»

$$\hat{H}_0 \Psi_i = E_i \Psi_i$$
$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{A} \xi \cos(\omega t)$$

например:

- напряженность электрического поля и электрический дипольный момент
- индукция магнитного поля и магнитный дипольный момент

# Строгий результат для периодического возмущения: «Золотое правило Ферми»

$$\hat{H}_0 \Psi_i = E_i \Psi_i$$
$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{A} \xi \cos(\omega t)$$

например:

- вероятность перехода между состояниями  $i$  и  $j$  в единицу времени:

$$\rho_{ij} \propto \left| \langle i | \hat{A} \xi | j \rangle \right|^2 \delta(E_i - E_j \pm \hbar \omega)$$

# Оптический эффект Зеемана: электрические дипольные переходы

$$\hat{A} = -\vec{E} \hat{d} = -E_z q r \cos \Theta - E_x q r \sin \Theta \cos \phi$$

*упрощение: только L*

D \_\_\_\_\_

P \_\_\_\_\_

S \_\_\_\_\_

$$\Psi(\vec{r}) = \Psi_{nlm} = F_{nl}(r) Y_{lm}(\Theta, \phi)$$
$$\Psi(-\vec{r}) = (-1)^l \Psi(\vec{r})$$

# Отбор по чётности состояний

$$\hat{A} = -\vec{E} \hat{d} = -E_z q r \cos \Theta - E_x q r \sin \Theta \cos \phi$$

$$\Psi(\vec{r}) = \Psi_{nlm} = F_{nl}(r) Y_{lm}(\Theta, \phi)$$

$$\Psi(-\vec{r}) = (-1)^l \Psi(\vec{r})$$

$$\rho_{ij} \propto \left| \langle i | \hat{A} \xi | j \rangle \right|^2 \delta(E_i - E_j \pm \hbar \omega)$$

упрощ.

D

P

S

Электрический дипольный переход  
возможен только между  
состояниями с разной  
пространственной чётностью

# Отбор по проекции момента импульса

$$\hat{A} = -\vec{E} \hat{d} = -E_z q r \cos \Theta - E_x q r \sin \Theta \cos \phi$$

упрощение: только  $L$

D

P

S

Л. Д. ЛАНДАУ и Е. М. ЛИФШИЦ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ  
ФИЗИКА

$$Y_{00} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}},$$

$$Y_{1, \pm 1} = \mp i \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta \cdot e^{\pm i\phi},$$

$$Y_{10} = i \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta,$$

$$Y_{20} = \sqrt{\frac{5}{16\pi}} (1 - 3 \cos^2 \theta),$$

$$Y_{2, \pm 2} = -\sqrt{\frac{15}{32\pi}} \sin^2 \theta \cdot e^{\pm 2i\phi},$$

$$Y_{00} = \text{const}$$

$$Y_{10} \propto \cos \Theta$$

$$Y_{11} \propto \sin \Theta e^{i\phi}$$

$$Y_{22} \propto \sin^2 \Theta e^{2i\phi}$$

$$\Psi(\vec{r}) = \Psi_{nlm} = F_{nl}(r) Y_{lm}(\Theta, \phi)$$

# Отбор по проекции момента импульса

$$\hat{A} = -\vec{E} \hat{d} = -E_z q r \cos \Theta - E_x q r \sin \Theta \cos \phi$$

упрощение: только  $L$

D

P

S

Л. Д. ЛАНДАУ и Е. М. ЛИФШИЦ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ  
ФИЗИКА

$$Y_{00} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}}$$

$$Y_{00} = \text{const}$$

$$Y_{10} \propto \cos \Theta$$

$$Y_{11} \propto \sin \Theta e^{i\phi}$$

$$Y_{22} \propto \sin^2 \Theta e^{2i\phi}$$

$$\rho \propto \left| \int Y_{(i)}^* \begin{pmatrix} \text{для Z: } \cos \Theta \\ \text{для X: } \sin \Theta \cos \phi \end{pmatrix} Y_{(f)} \sin \Theta d\Theta d\phi \right|^2$$

$$Y_{20} = \sqrt{\frac{5}{16\pi}} (1 - 3 \cos^2 \Theta),$$

$$Y_{2, \pm 2} = -\sqrt{\frac{15}{32\pi}} \sin^2 \Theta \cdot e^{\pm 2i\phi},$$

$$\Psi(\vec{r}) = \Psi_{nlm} = F_{nl}(r) Y_{lm}(\Theta, \phi)$$

# Отбор по проекции момента импульса:

$$\Delta L_z = 2$$

$$\rho \propto \left| \int Y_{(i)}^* \begin{pmatrix} \cos \Theta \\ \sin \Theta \cos \phi \end{pmatrix} Y_{(f)} \sin \Theta d \Theta d \phi \right|^2$$

$$Y_{00} = \text{const}$$

$$Y_{10} \propto \cos \Theta$$

$$Y_{11} \propto \sin \Theta e^{i\phi}$$

$$Y_{22} \propto \sin^2 \Theta e^{2i\phi}$$

$$|22\rangle \rightarrow |10\rangle$$

для  $\vec{E} \parallel z$ :

$$\iint \cos \Theta \cos \Theta \sin^2 \Theta e^{2i\phi} \sin \Theta d \Theta d \phi = 0$$

для  $\vec{E} \perp z$ :

$$\iint \cos \Theta \sin \Theta \cos \phi \sin^2 \Theta e^{2i\phi} \sin \Theta d \Theta d \phi = 0$$

# Отбор по проекции момента импульса:

$$\Delta L_z = 1$$

$$\rho \propto \left| \int Y_{(i)}^* \begin{pmatrix} \cos \Theta \\ \sin \Theta \cos \phi \end{pmatrix} Y_{(f)} \sin \Theta d \Theta d \phi \right|^2$$

$$Y_{00} = \text{const}$$

$$Y_{10} \propto \cos \Theta$$

$$Y_{11} \propto \sin \Theta e^{i\phi}$$

$$Y_{22} \propto \sin^2 \Theta e^{2i\phi}$$

$$|11\rangle \rightarrow |00\rangle$$

для  $\vec{E} \parallel z$ :

$$\iint \cos \Theta \sin \Theta e^{i\phi} \sin \Theta d \Theta d \phi = 0$$

для  $\vec{E} \perp z$ :

$$\iint \sin \Theta \cos \phi \sin \Theta e^{i\phi} \sin \Theta d \Theta d \phi \neq 0$$

# Отбор по проекции момента импульса:

$$\Delta L_z = 0$$

$$\rho \propto \left| \int Y_{(i)}^* \begin{pmatrix} \cos \Theta \\ \sin \Theta \cos \phi \end{pmatrix} Y_{(f)} \sin \Theta d \Theta d \phi \right|^2$$

$$Y_{00} = \text{const}$$

$$Y_{10} \propto \cos \Theta$$

$$Y_{11} \propto \sin \Theta e^{i\phi}$$

$$Y_{22} \propto \sin^2 \Theta e^{2i\phi}$$

$$|10\rangle \rightarrow |00\rangle$$

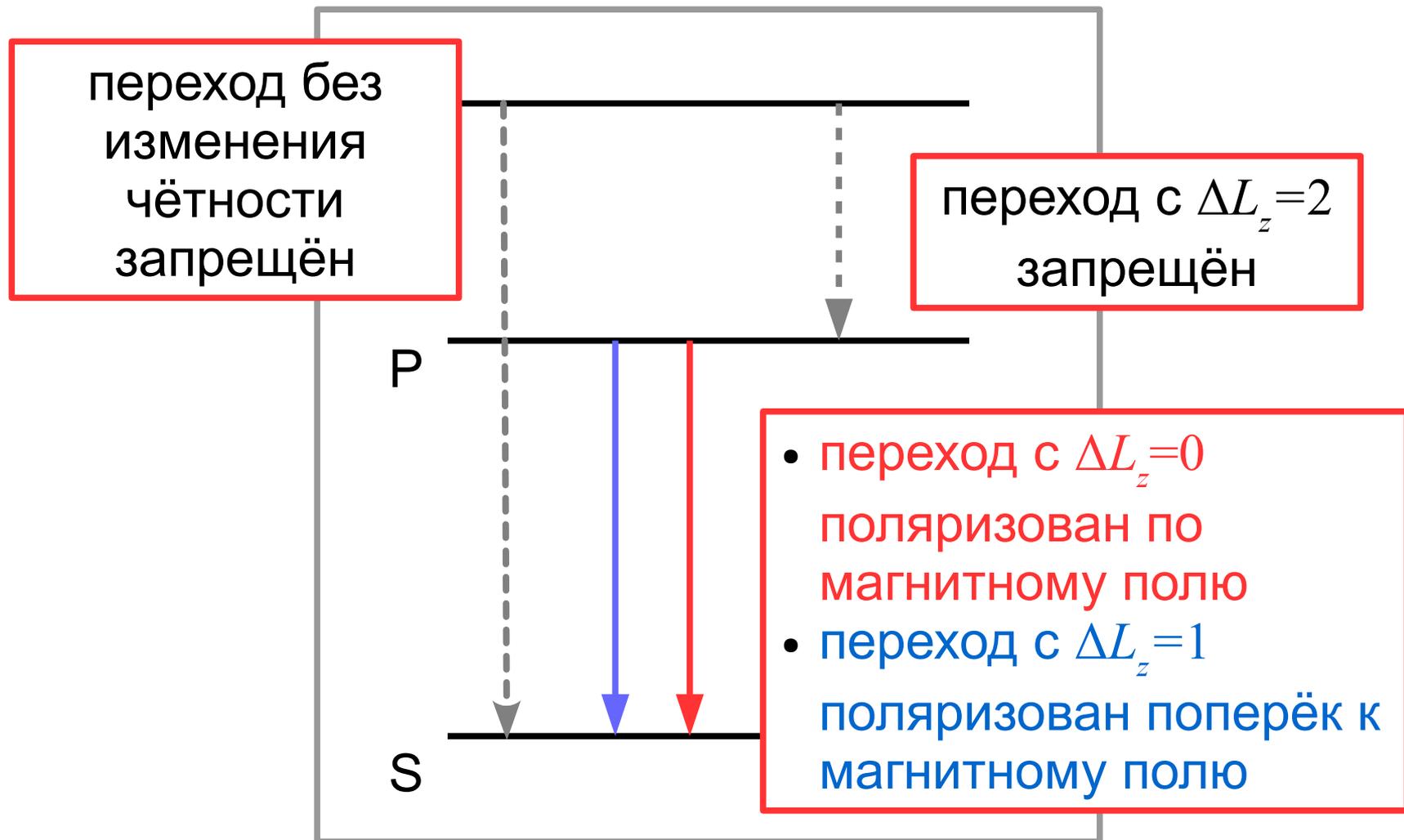
для  $\vec{E} \parallel z$ :

$$\iint \cos \Theta \cos \Theta \sin \Theta d \Theta d \phi \neq 0$$

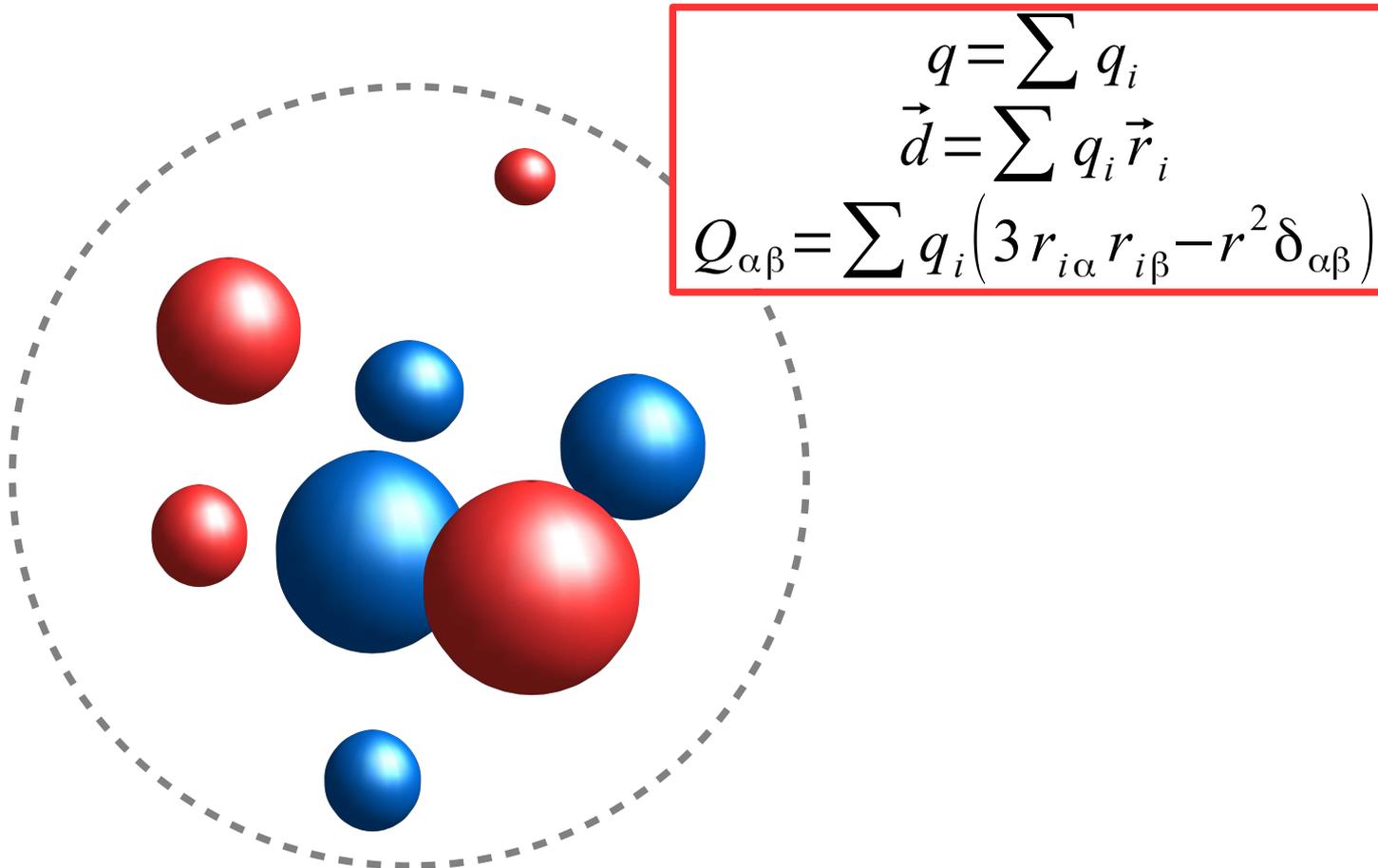
для  $\vec{E} \perp z$ :

$$\iint \sin \Theta \cos \phi \cos \Theta \sin \Theta d \Theta d \phi = 0$$

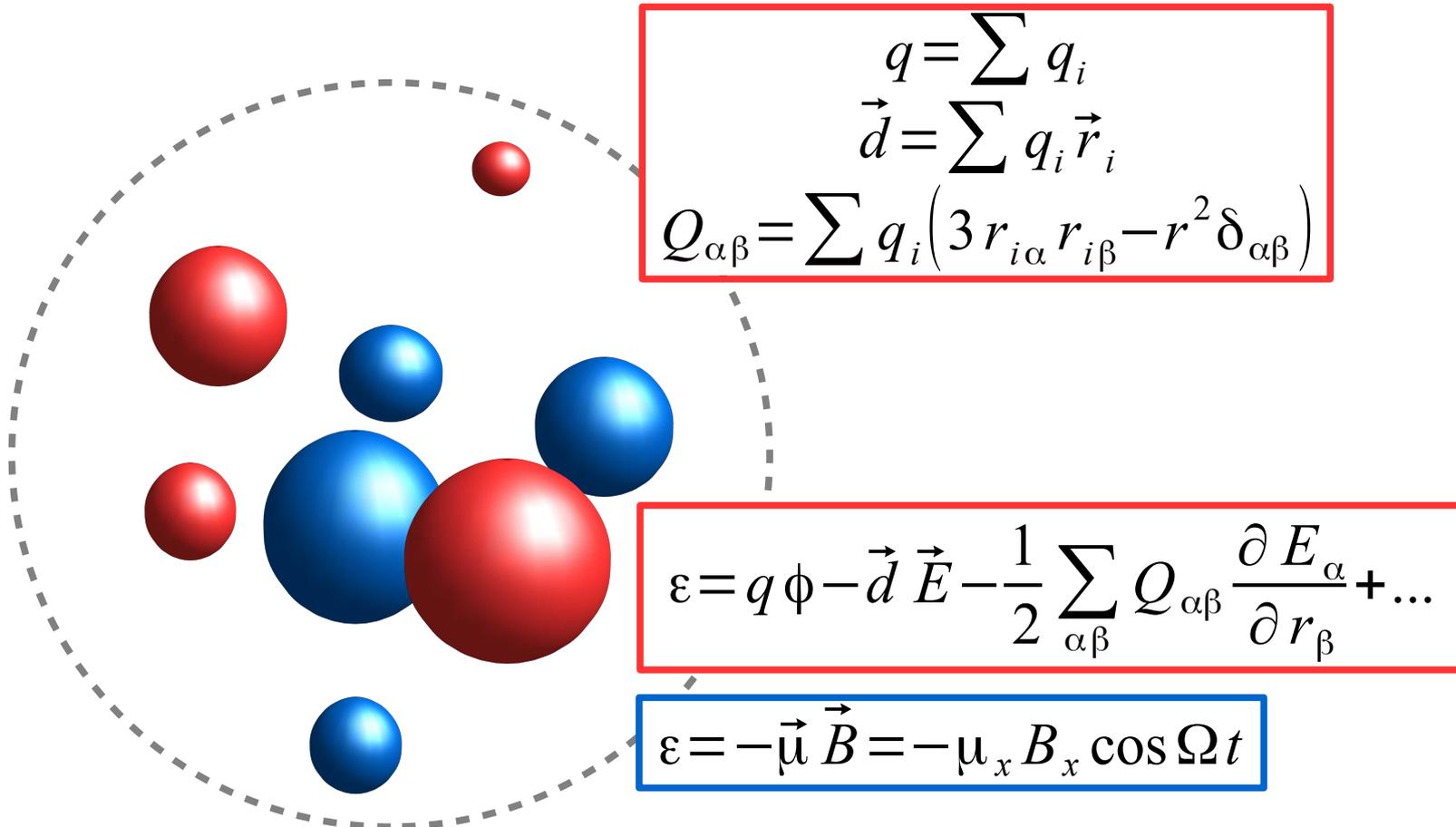
# Электрические дипольные переходы



# Излучение и поглощение: Взаимодействие с **электромагнитным** полем



# Излучение и поглощение: Взаимодействие с **электромагнитным** полем

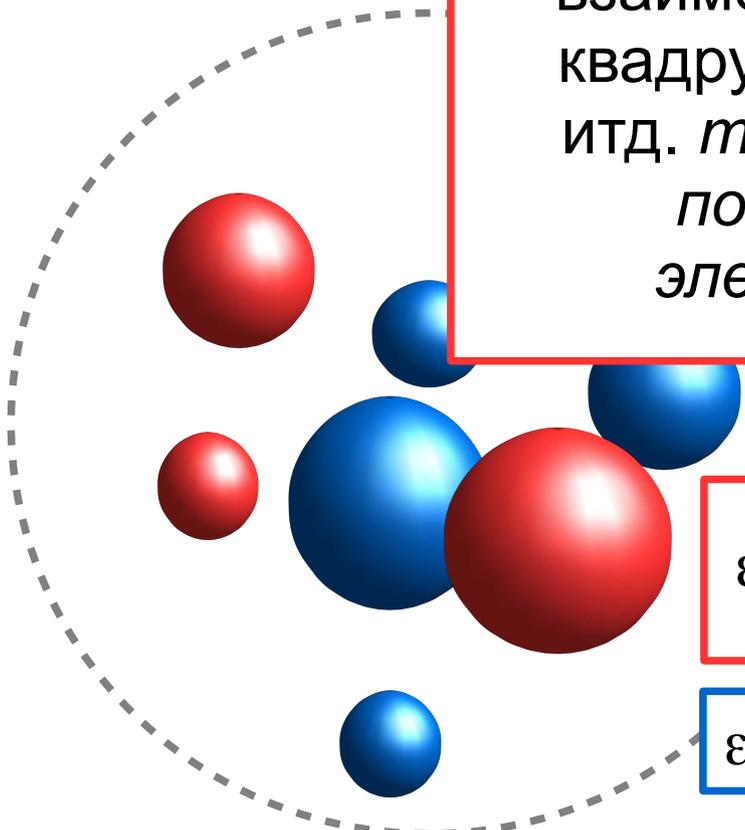


# Излучение и поглощение: Взаимодействие с **электромагнитным** полем

Магнитно-дипольное взаимодействие, электрическое квадрупольное взаимодействие итд. *также могут приводить к поглощению/излучению электромагнитных волн*

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

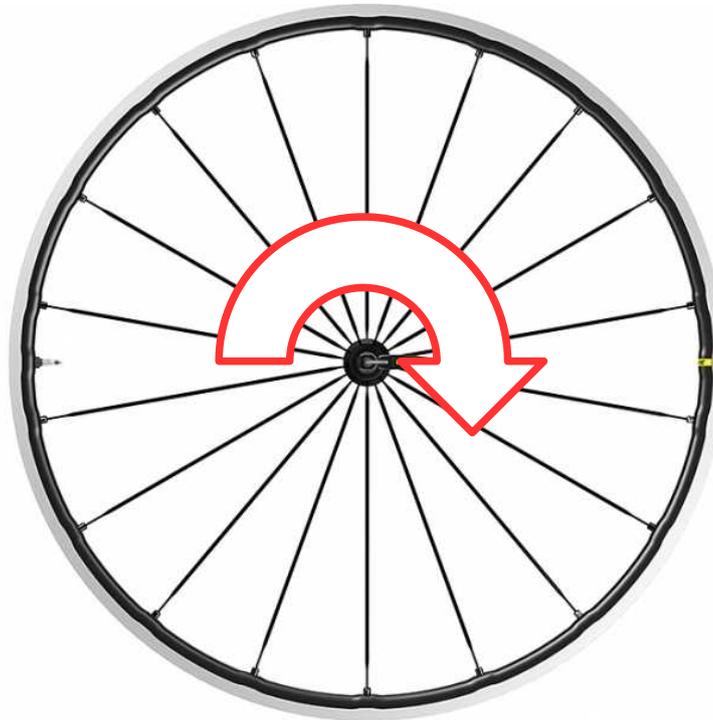
$$\varepsilon = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_x B_x \cos \Omega t$$



# Магнитно-дипольные переходы: отбор по чётности

$$\varepsilon = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_x B_x \cos \Omega t$$

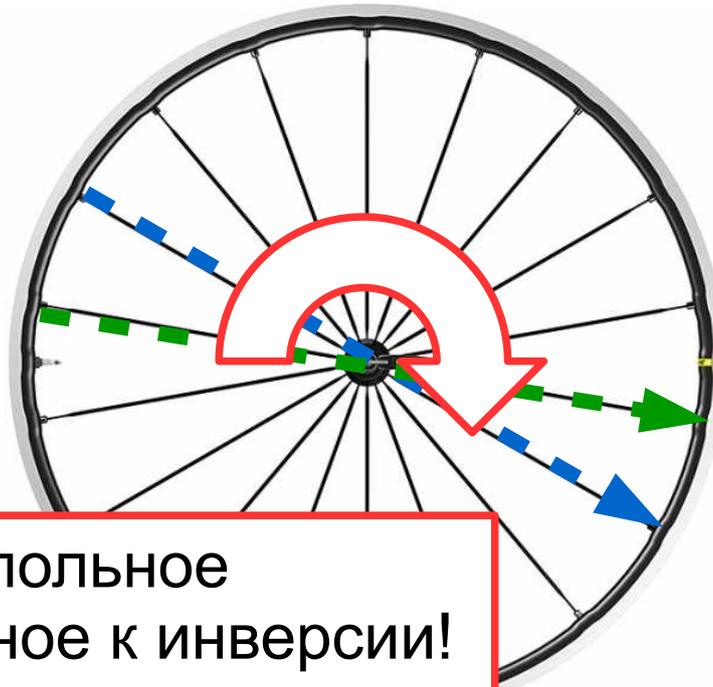
$$\hat{\mu}_x = g \mu_B \hat{J}_x$$



# Магнитно-дипольные переходы: отбор по чётности

$$\varepsilon = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_x B_x \cos \Omega t$$

$$\hat{\mu}_x = g \mu_B \hat{J}_x$$



Магнитно-дипольное взаимодействие чётное к инверсии!  
Будут переходы между состояниями одной чётности.

# Магнитно-дипольные переходы: вероятность в атоме

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_B \sim \frac{e\hbar}{mc} B; \quad B = E \\ \alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \simeq \frac{V}{c} \\ \varepsilon_E = (er)E; \quad r \simeq \frac{\hbar^2}{me^2} \end{array} \right\} \rightarrow \varepsilon_B = \left( e \frac{\hbar^2}{me^2} B \right) \times \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{V}{c} \varepsilon_E$$

$$\rho_{ij} \propto \left| \langle i | \hat{A} \xi | j \rangle \right|^2 \delta(E_i - E_j \pm \hbar \omega)$$

$$\rho_M \sim \left( \frac{V}{c} \right)^2 \rho_E \sim \alpha^2 \rho_E$$

# Электрические квадрупольные переходы: вероятность (для атома) и правила отбора.

$$\varepsilon_{quad} = -\frac{1}{2} \sum_{\alpha\beta} Q_{\alpha\beta} \frac{\partial E_{\alpha}}{\partial r_{\beta}}$$

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

$$\rho_{ij} \propto \left| \langle i | \hat{A} \xi | j \rangle \right|^2 \delta(E_i - E_j \pm \hbar \omega)$$

$$\rho_{E2} \propto \left( e a^2 \frac{E}{\lambda} \right)^2 \sim \rho_{E1} \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2$$

- При электрическом квадрупольном переходе пространственная чётность не меняется;
- Правило отбора по проекции  $J_z$  — в пределах 2

# Обобщение: Классификация фотонов по мультиплетности

*электрические*

**E1** — электрический дипольный

**E2** — электрический квадрупольный и т.д.

*магнитные*

**M1** — магнитный дипольный

**M2** — магнитный квадрупольный и т.д.

*пространственная чётность*

$$P = (-1)^j$$

$$P = (-1)^{j+1}$$

*максимальное изменение проекции момента*

$$\max(\Delta J_z) = j$$

# Обобщение: Классификация фотонов по мультиплетности

**электрические**

**E1** — электрический дипольный

**E2** — электрический квадрупольный и т.д.

**магнитные**

**M1** — магнитный дипольный

**M2** — магнитный квадрупольный и т.д.

для переходов в атоме

$P =$

$$\rho_{Mj} \sim \left(\frac{V}{c}\right)^2 \rho_{Ej} \sim \alpha^2 \rho_{Ej}$$

$j+1$

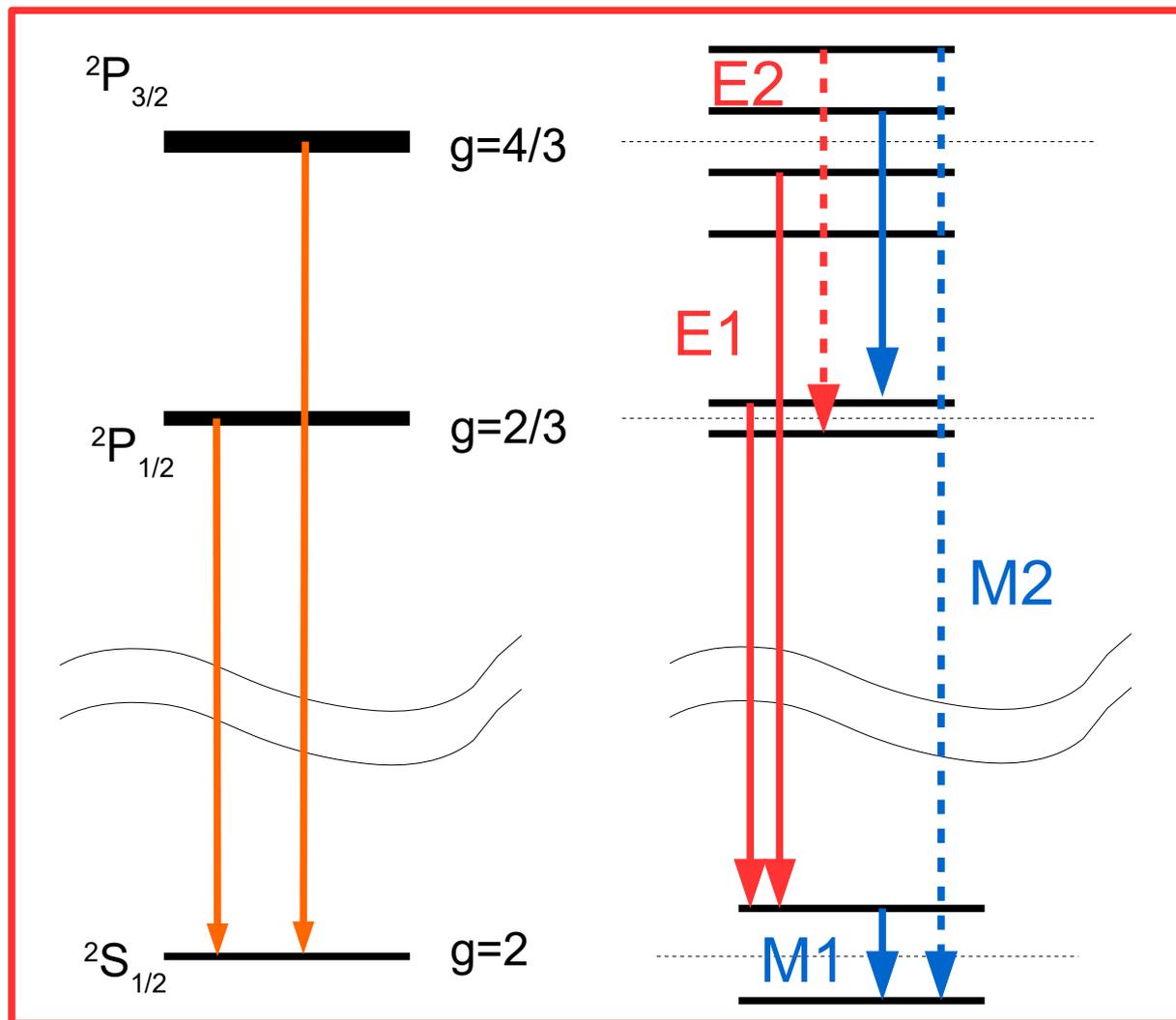
**максим**

$$\rho_{E(j+1)} \sim \left(\frac{a}{\lambda}\right)^2 \rho_{Ej}$$

**омента**

$\max(\Delta J_z) = J$

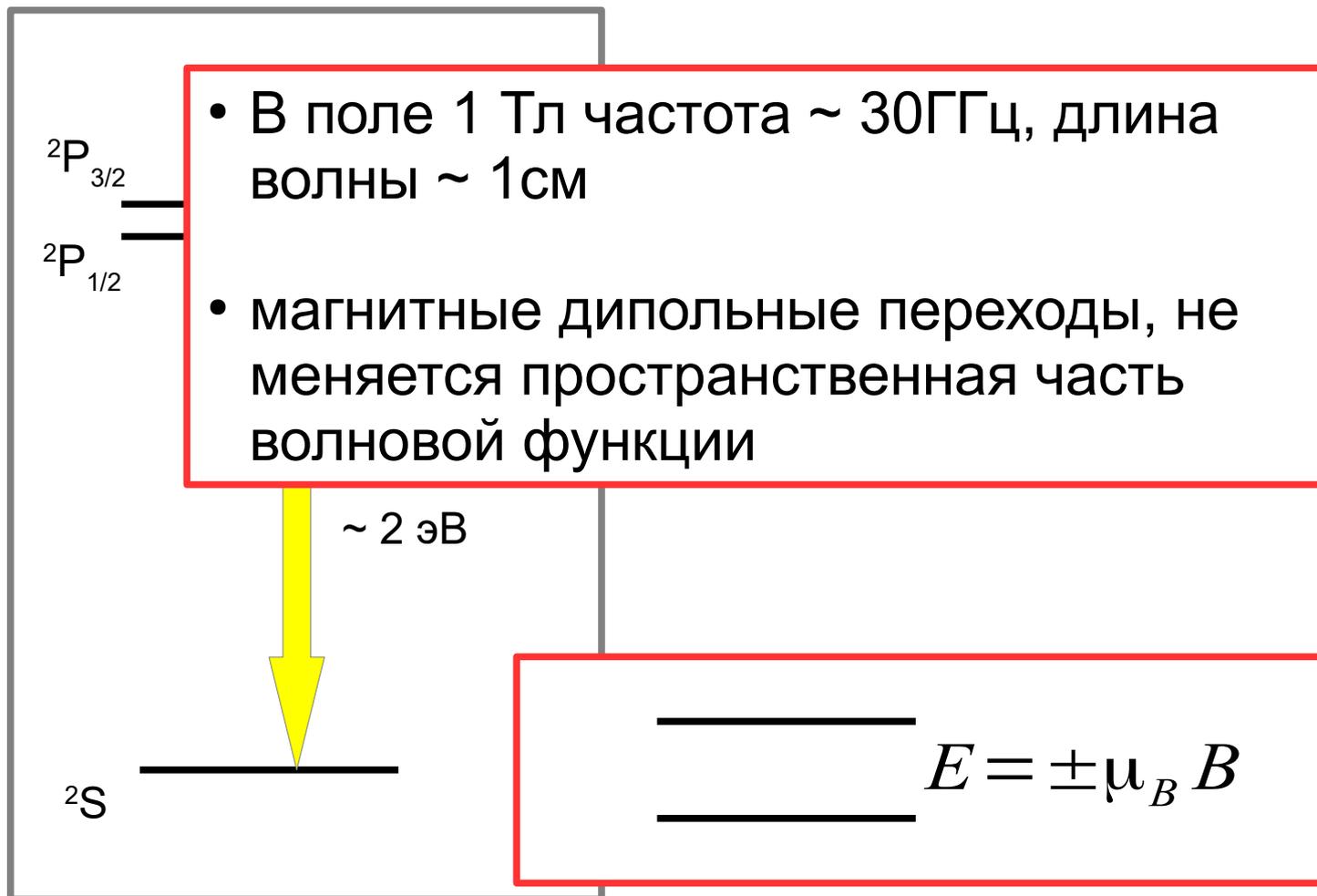
# Переходы в оптическом эффекте Зеемана: классификация фотонов



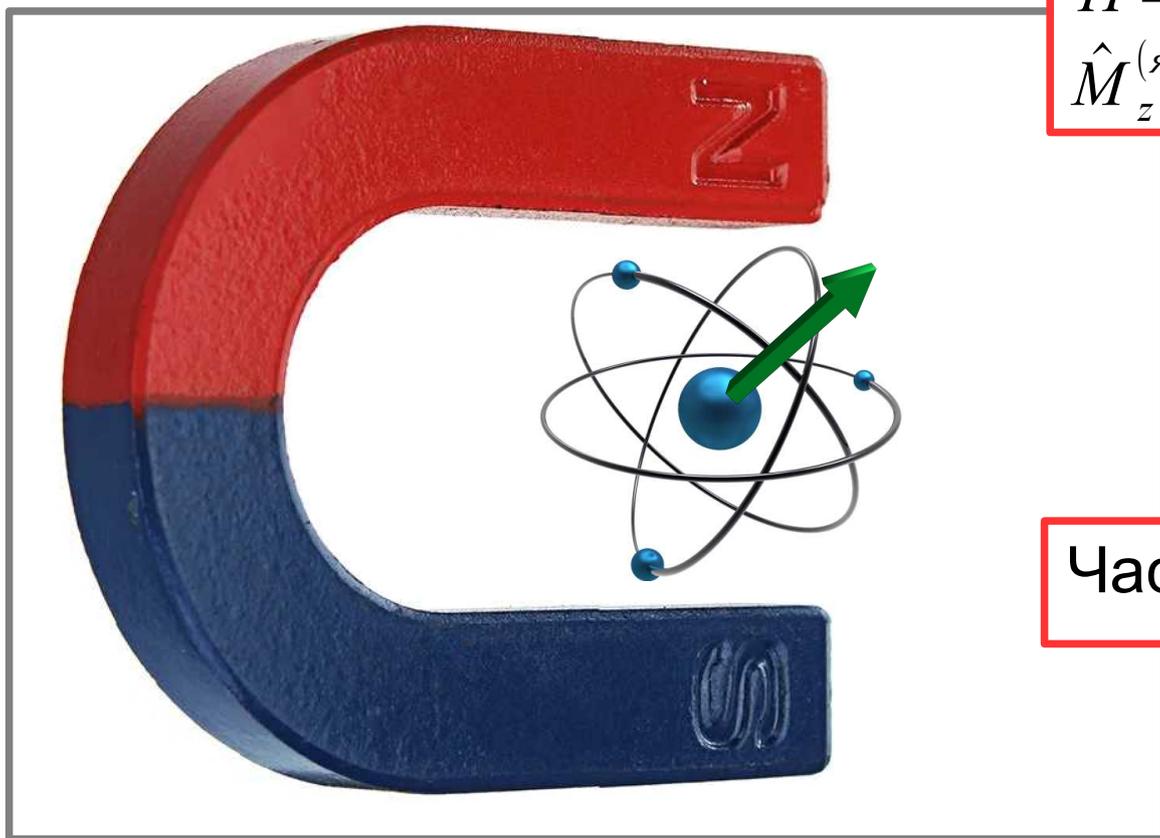
# Часть 3: ЭПР и ЯМР



# Электронный парамагнитный резонанс



# Ядерный магнитный резонанс



$$\hat{H} = -\hat{M}_z^{(\text{яд})} B_z$$
$$\hat{M}_z^{(\text{яд})} = g \mu_{\text{яд}} \hat{I}_z$$

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e \hbar}{2 M_p c} = \frac{1}{1840} \mu_B$$

Частоты  $\sim 10 \dots 100$  МГц

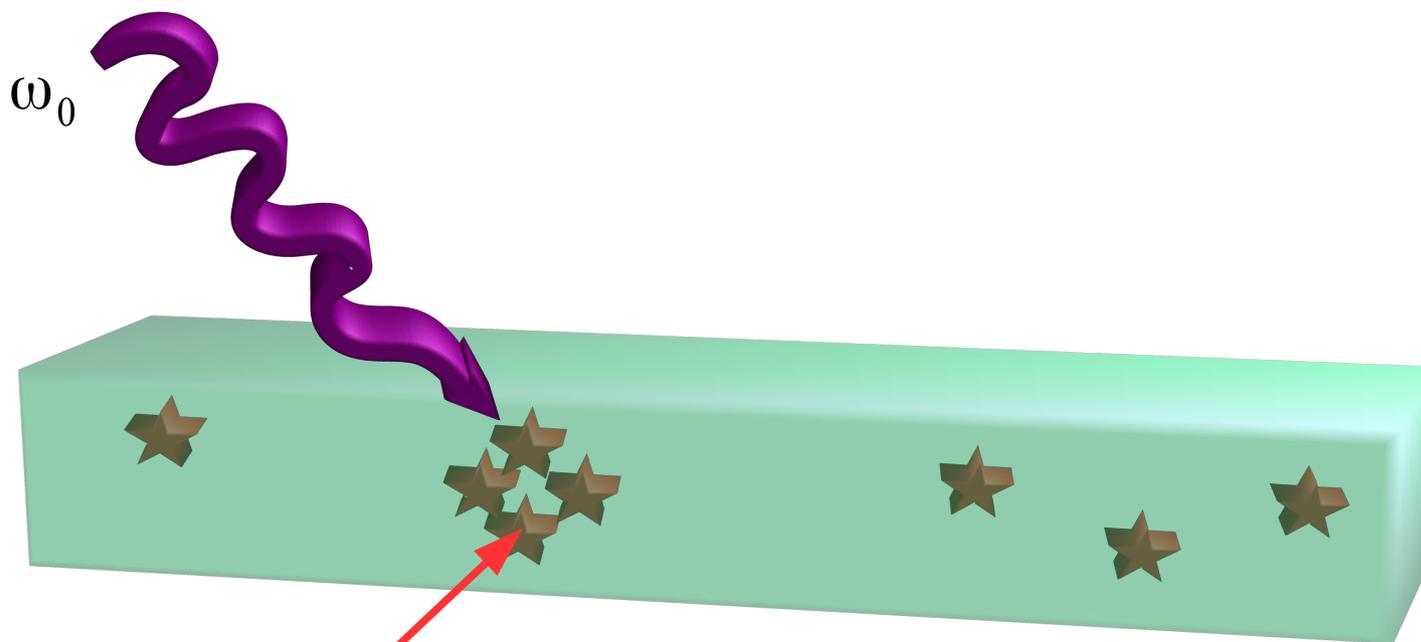
# ЯМР-томография



7 T MRI system with a superconducting 32-ton magnet

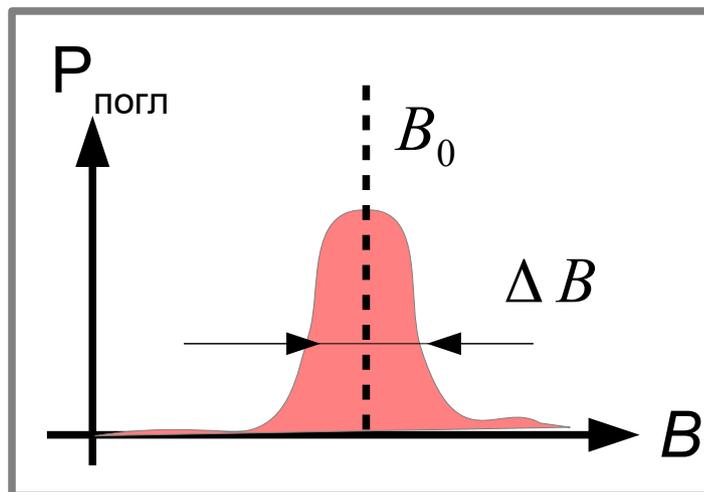
© dkfz.de

# Грубая идея работы ЯМР-томографии

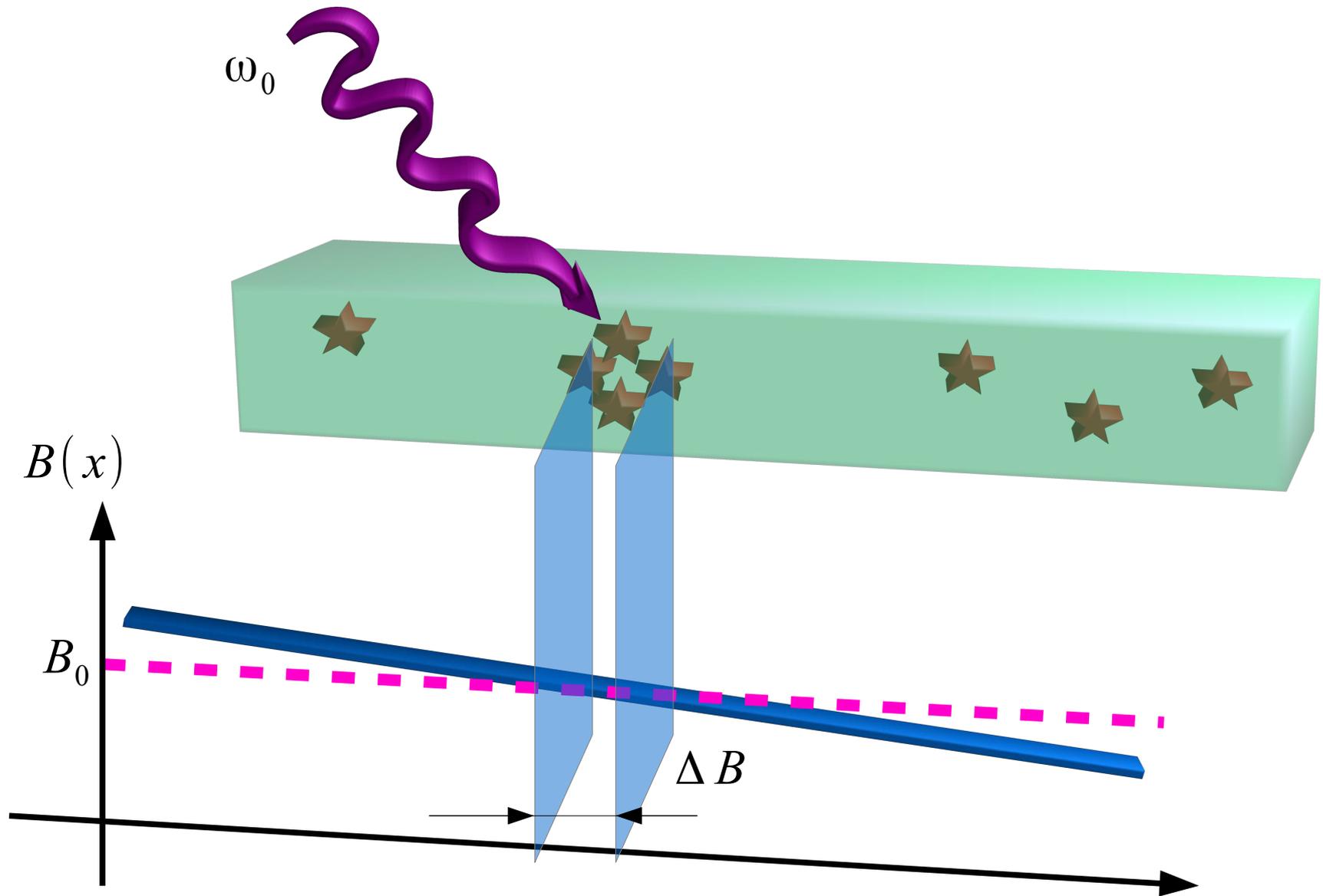


ЯМР-активные  
«ЗОНДЫ»

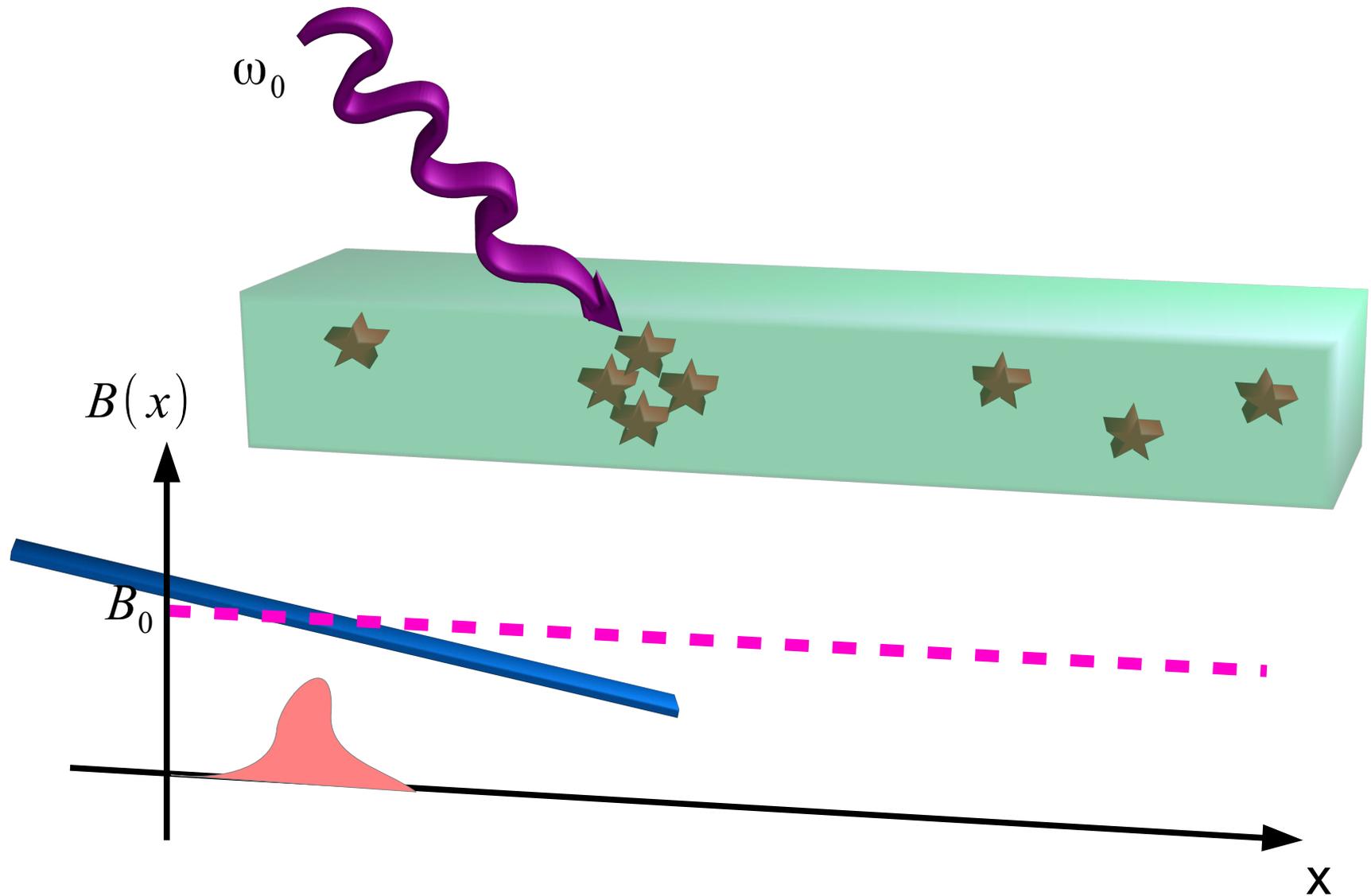
$$\hbar \omega_0 = g \mu_{\text{яд}} B_0$$



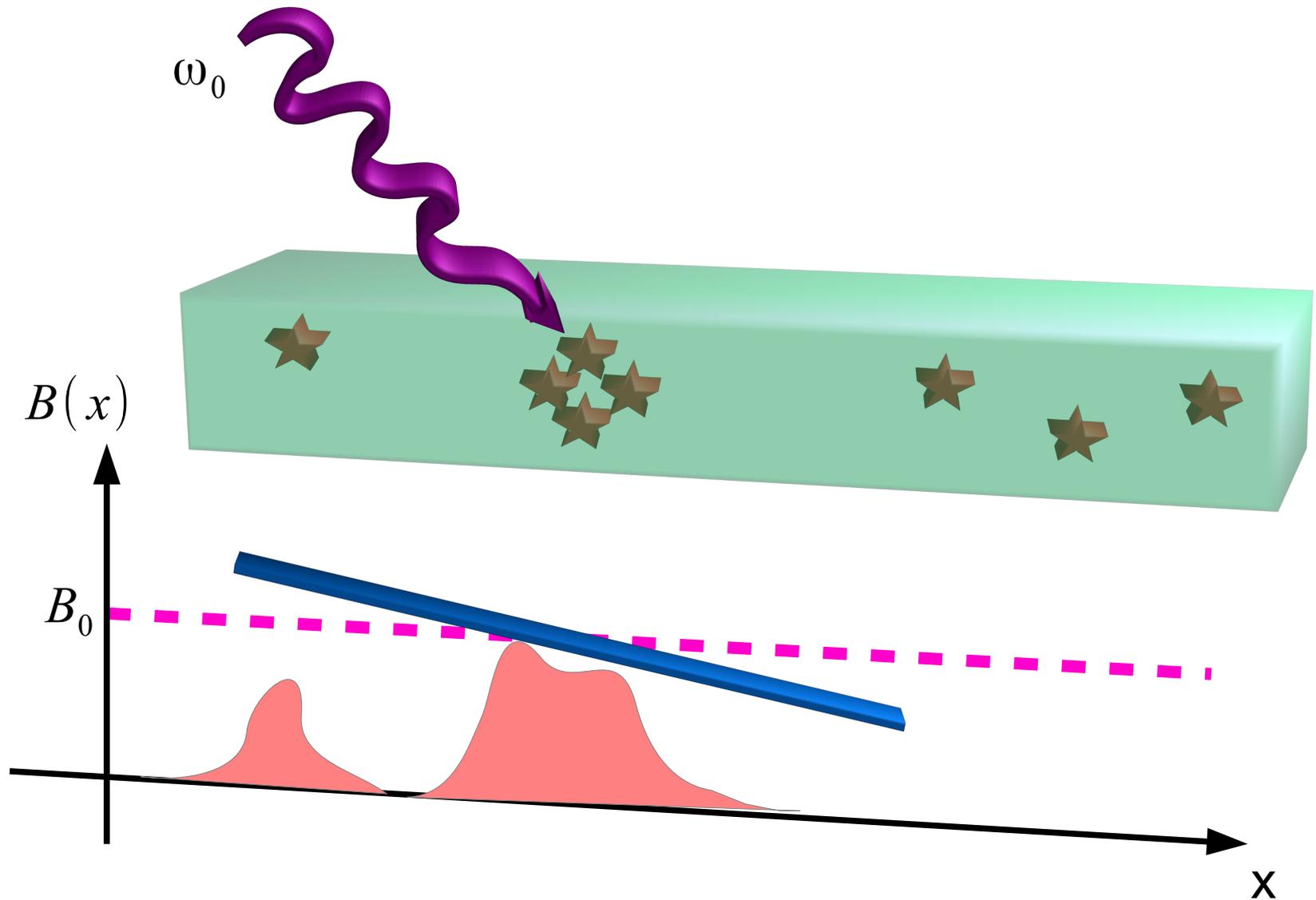
# Грубая идея работы ЯМР-томографии



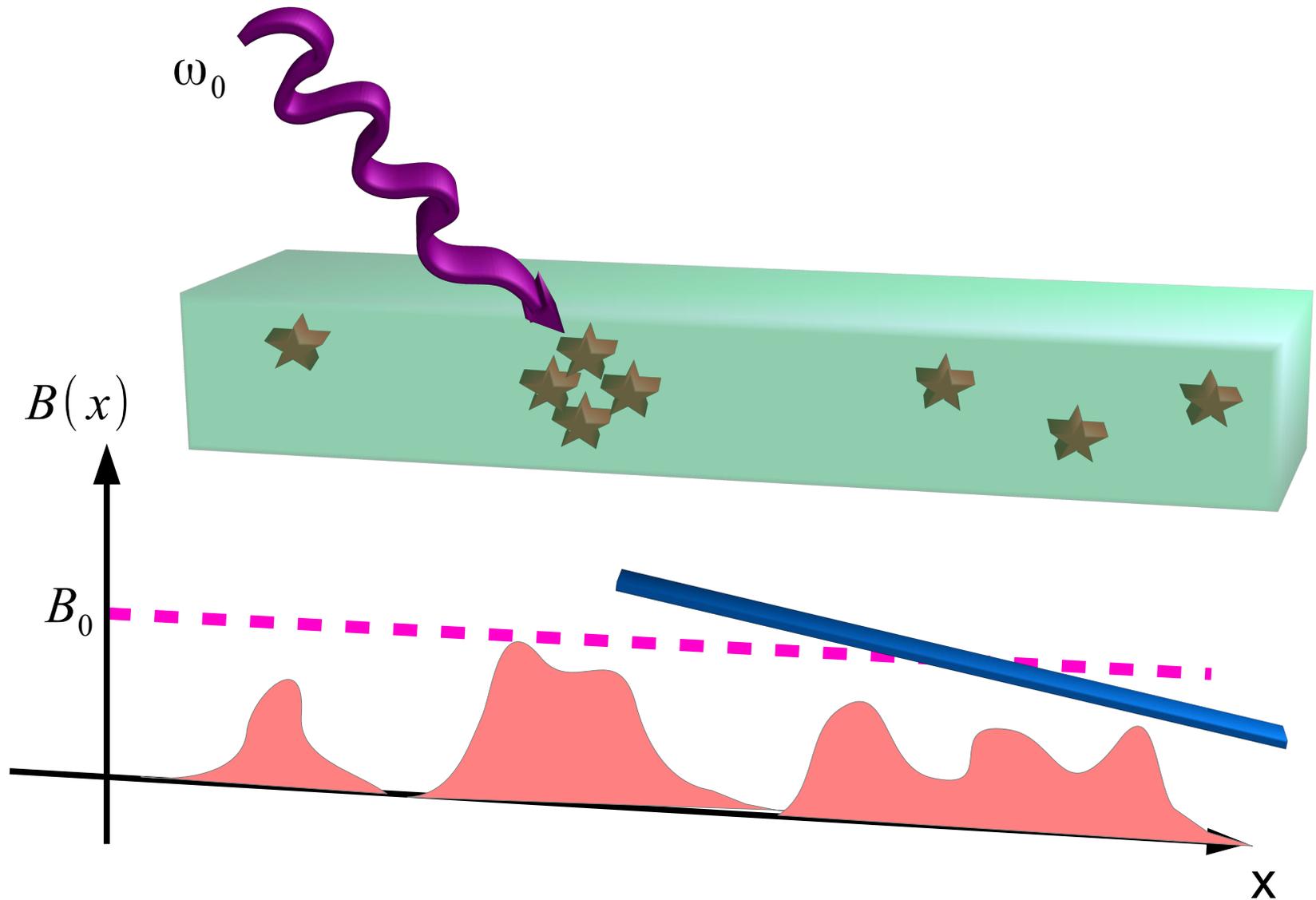
# Грубая идея работы ЯМР-томографии



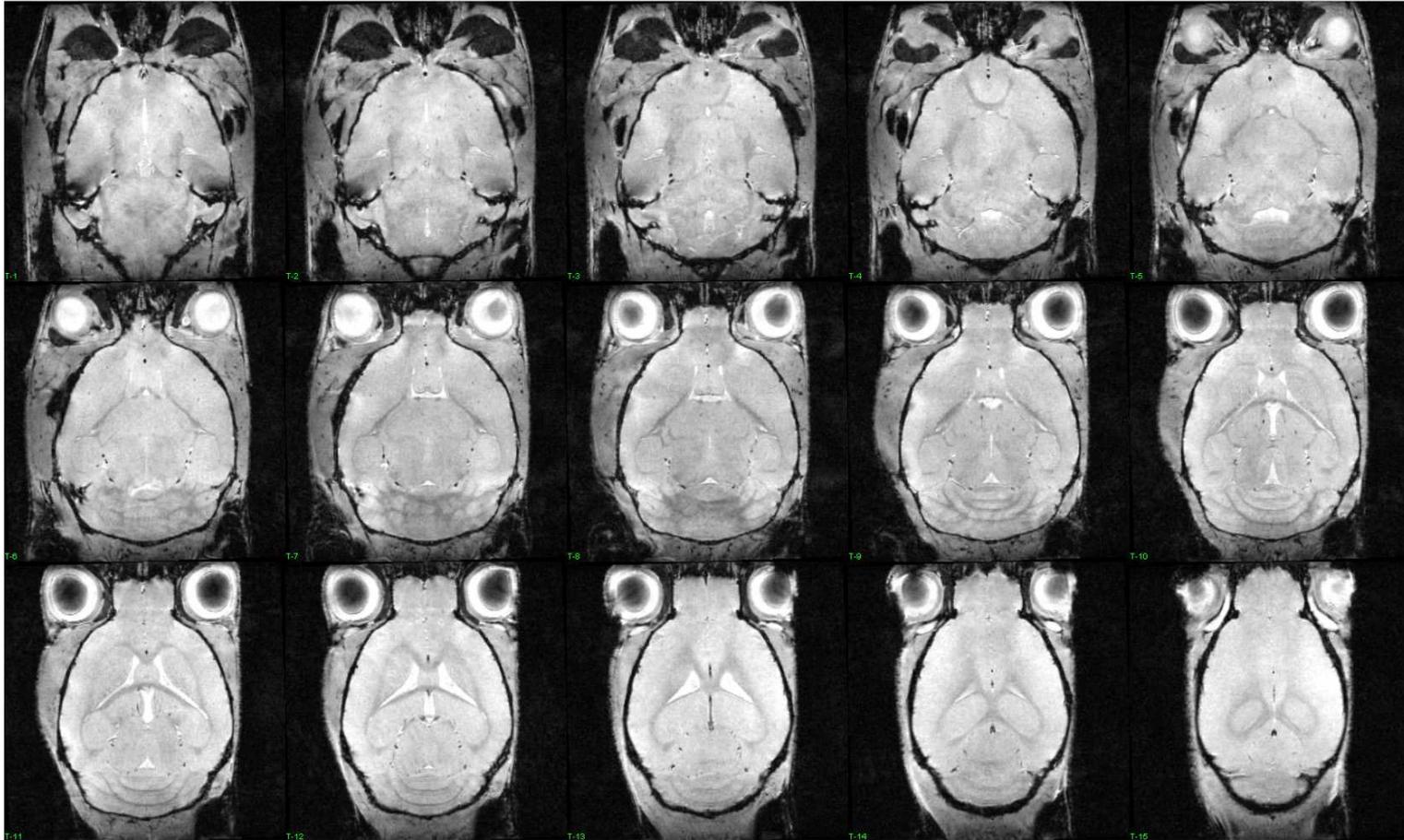
# Грубая идея работы ЯМР-томографии



# Грубая идея работы ЯМР-томографии



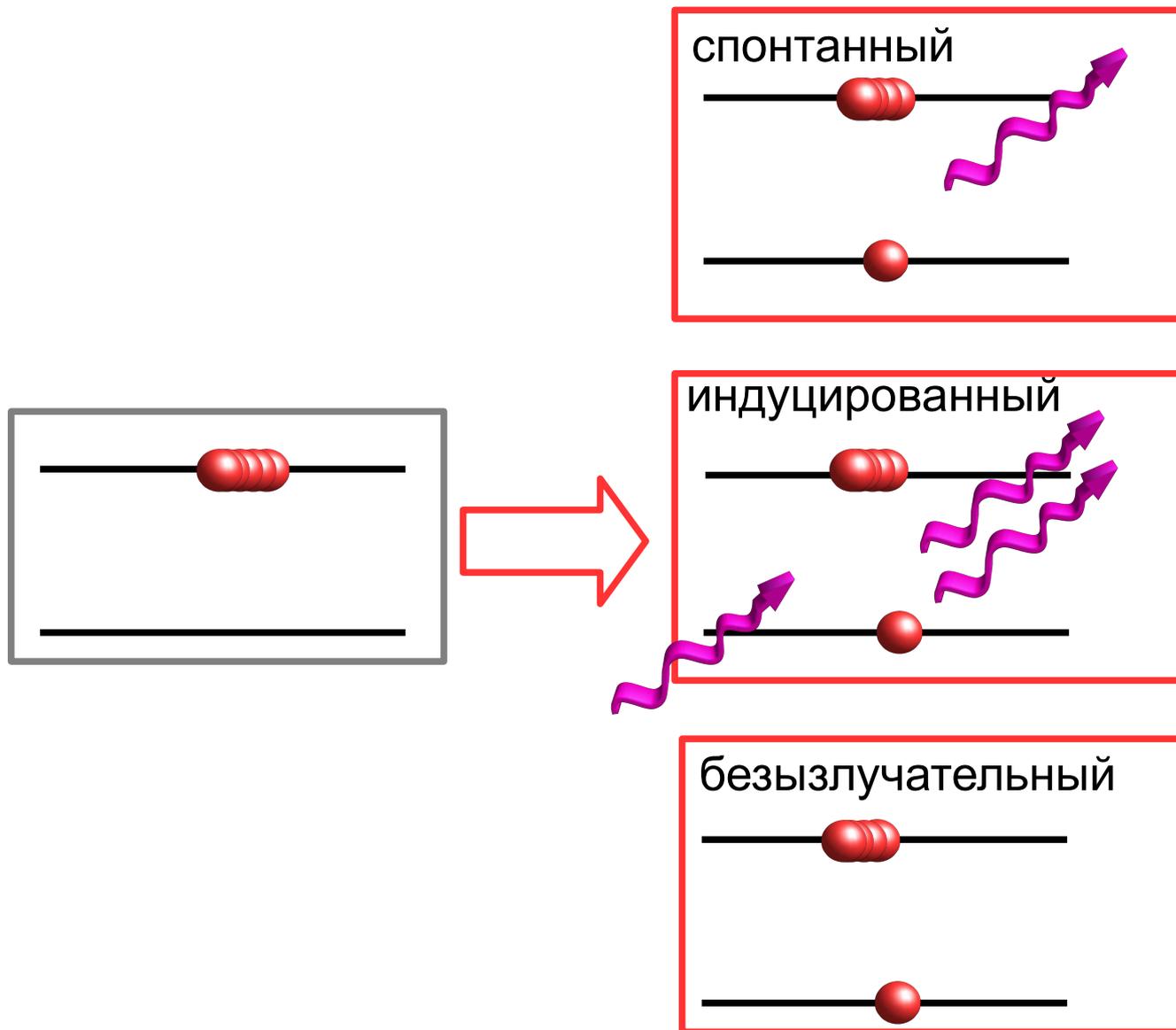
# 21 Tл *in vivo* MPT



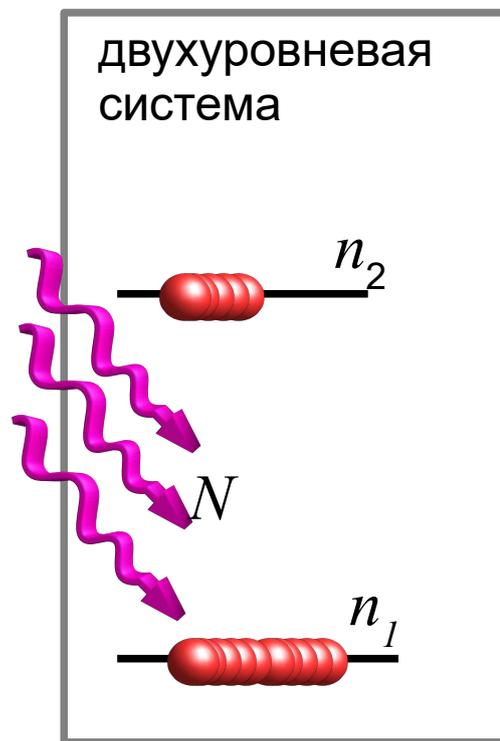
Proton *in-vivo* MR images of mouse head acquired on the UWB 900 MRI scanner. Resolution in coronal plane was 62x62  $\mu\text{m}$ , slice thickness was 150  $\mu\text{m}$  [*In vivo* MRImaging at 21.1 T Victor D. Schepkin, Samuel C. Grant and Timothy A. Cross]

# Часть 4: Спонтанные и индуцированные переходы

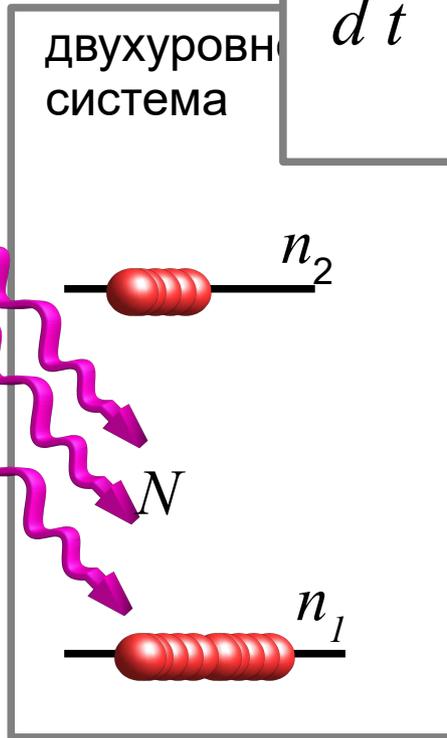
# Спонтанные и индуцированные переходы



# Заселенность уровней



# Заселенность уровней



$$\frac{d n_2}{d t} = n_1 N w_{\text{инд}} - n_2 N w_{\text{инд}} - (n_2 - n_2^{(0)}) w_{\text{сп}}$$
$$n_1 + n_2 = n_0$$

# Заселенность уровней

двухуровневая система

$$\frac{d n_2}{d t} = n_1 N w_{\text{инд}} - n_2 N w_{\text{инд}} - (n_2 - n_2^{(0)}) w_{\text{сп}}$$

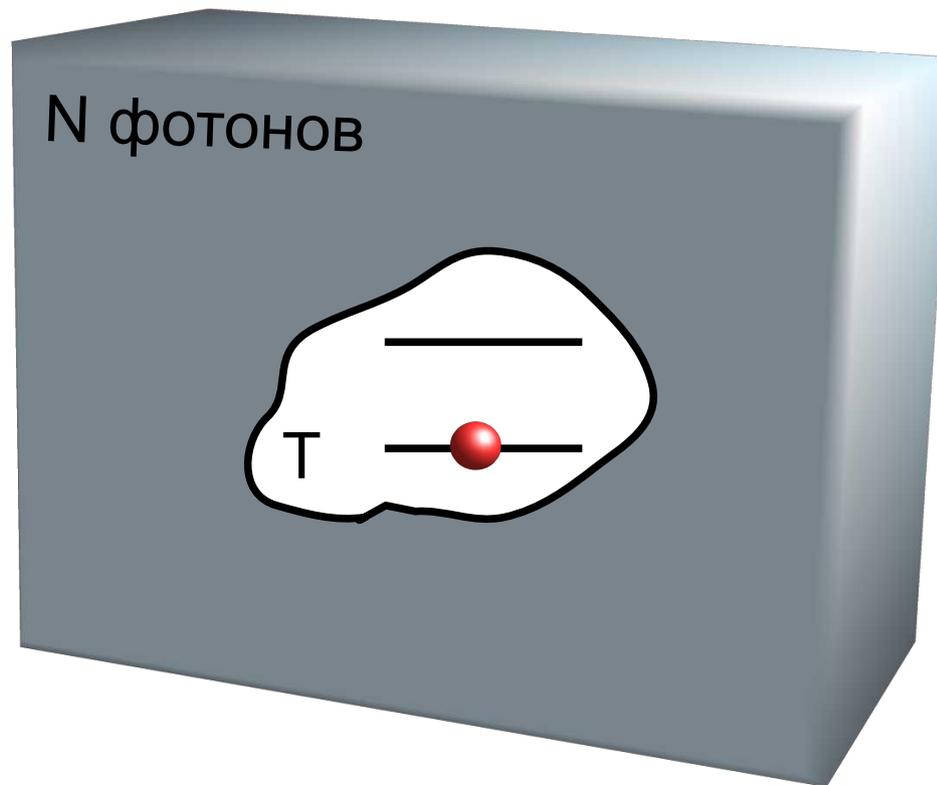
$$n_1 + n_2 = n_0$$

стационарное решение

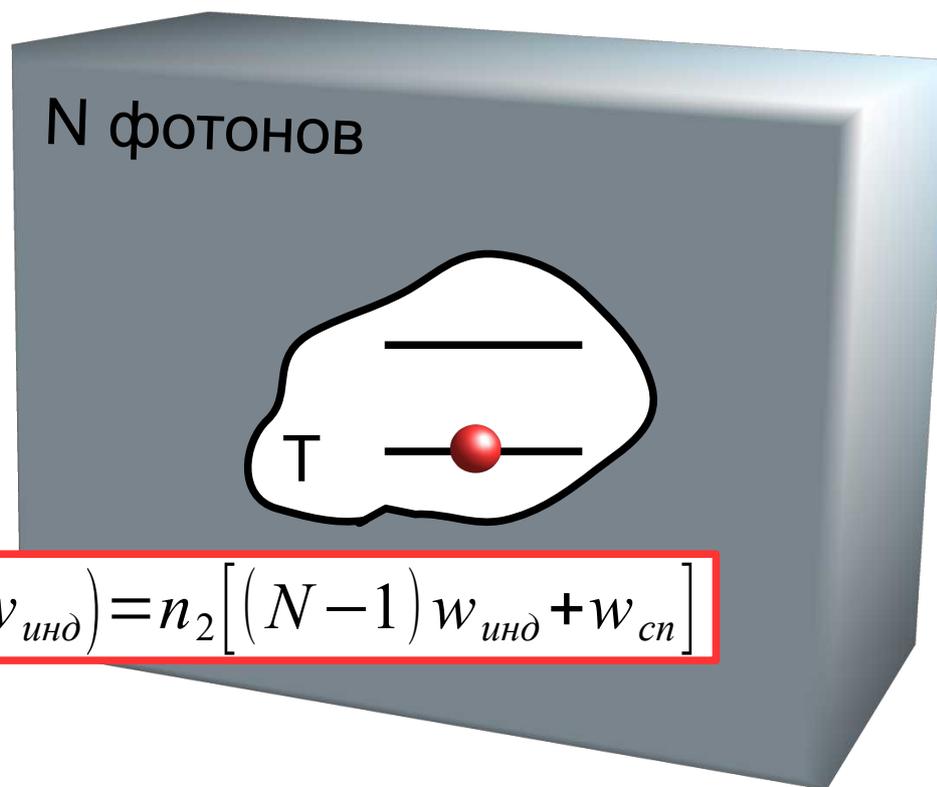
$$(2 w_{\text{инд}} N + w_{\text{сп}}) n_2 = n_0 N w_{\text{инд}} + n_2^{(0)} w_{\text{сп}}$$

$$n_2 = n_0 \frac{N w_{\text{инд}} + \frac{e^{-\hbar\omega/T}}{1 + e^{-\hbar\omega/T}} w_{\text{сп}}}{2 N w_{\text{инд}} + w_{\text{сп}}} < \frac{n_0}{2}$$

Если спонтанные переходы  
только излучательные...

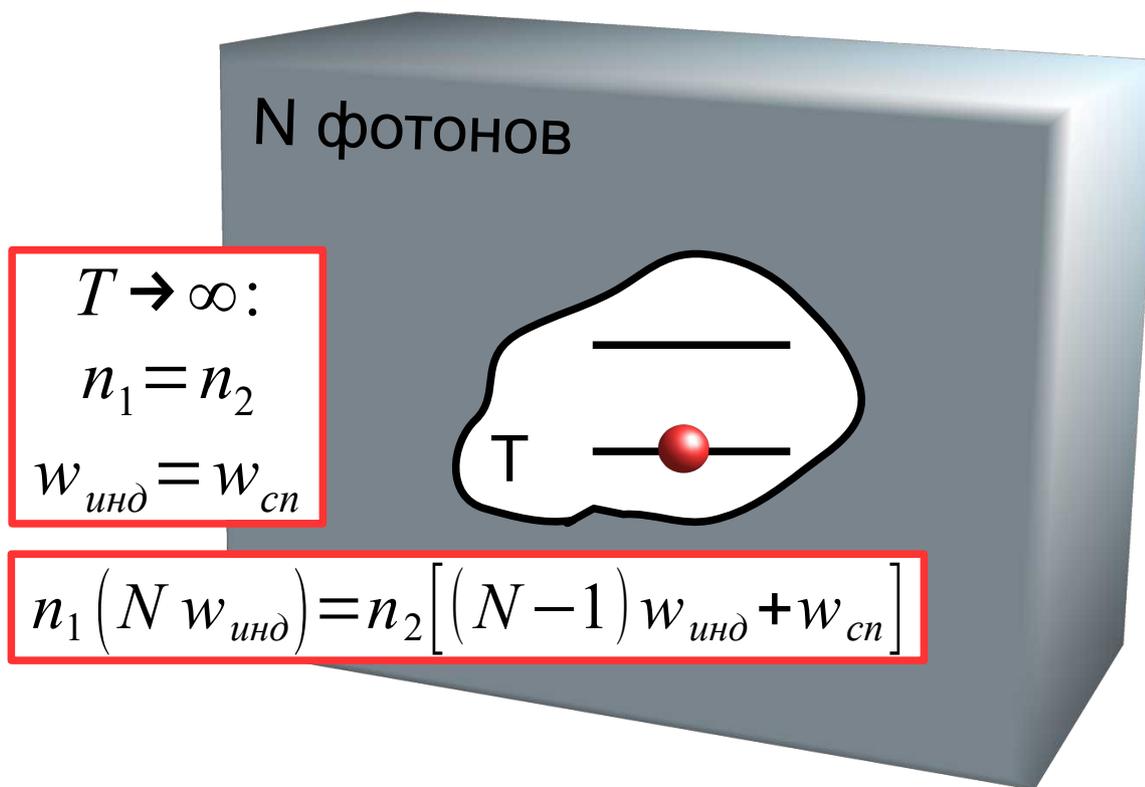


Если спонтанные переходы  
только излучательные...



$$n_1 (N w_{инд}) = n_2 [(N-1) w_{инд} + w_{сп}]$$

# Если спонтанные переходы только излучательные...



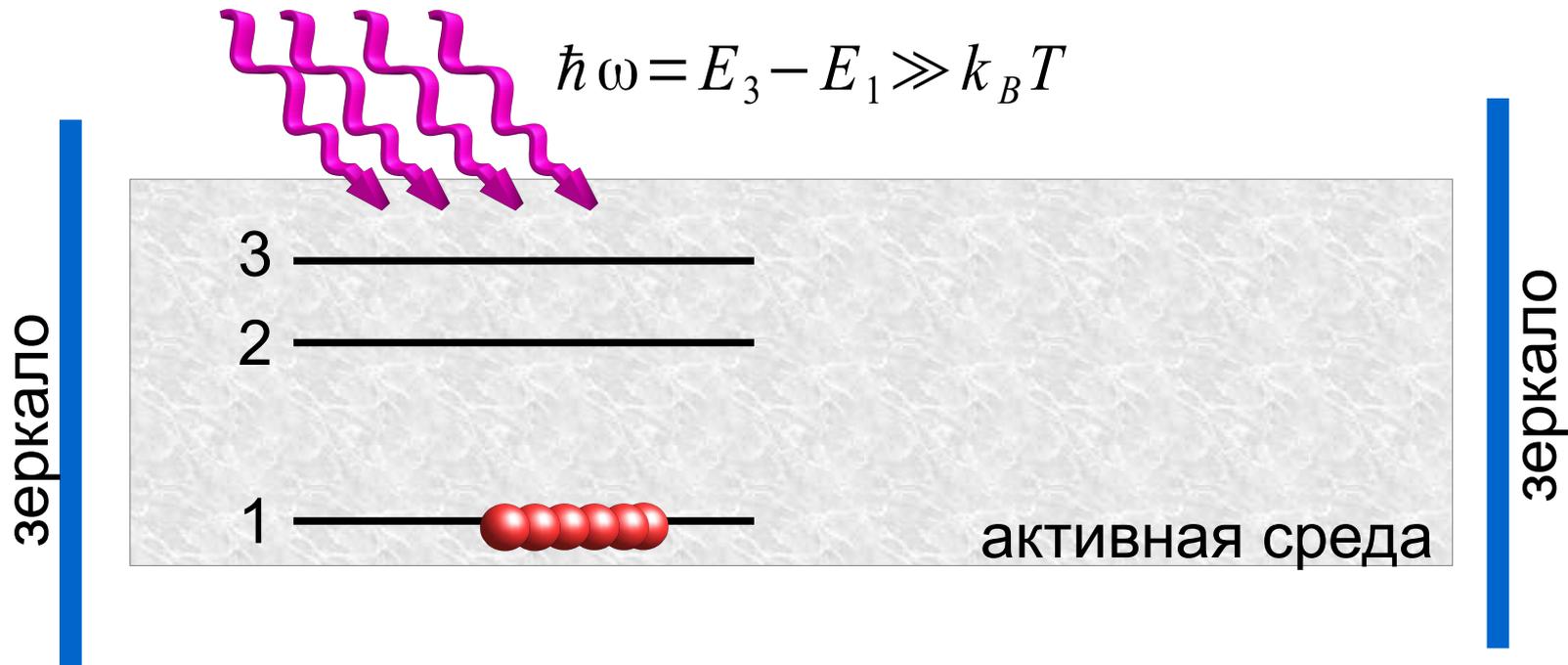
$$T \rightarrow \infty:$$

$$n_1 = n_2$$

$$w_{инд} = w_{сп}$$

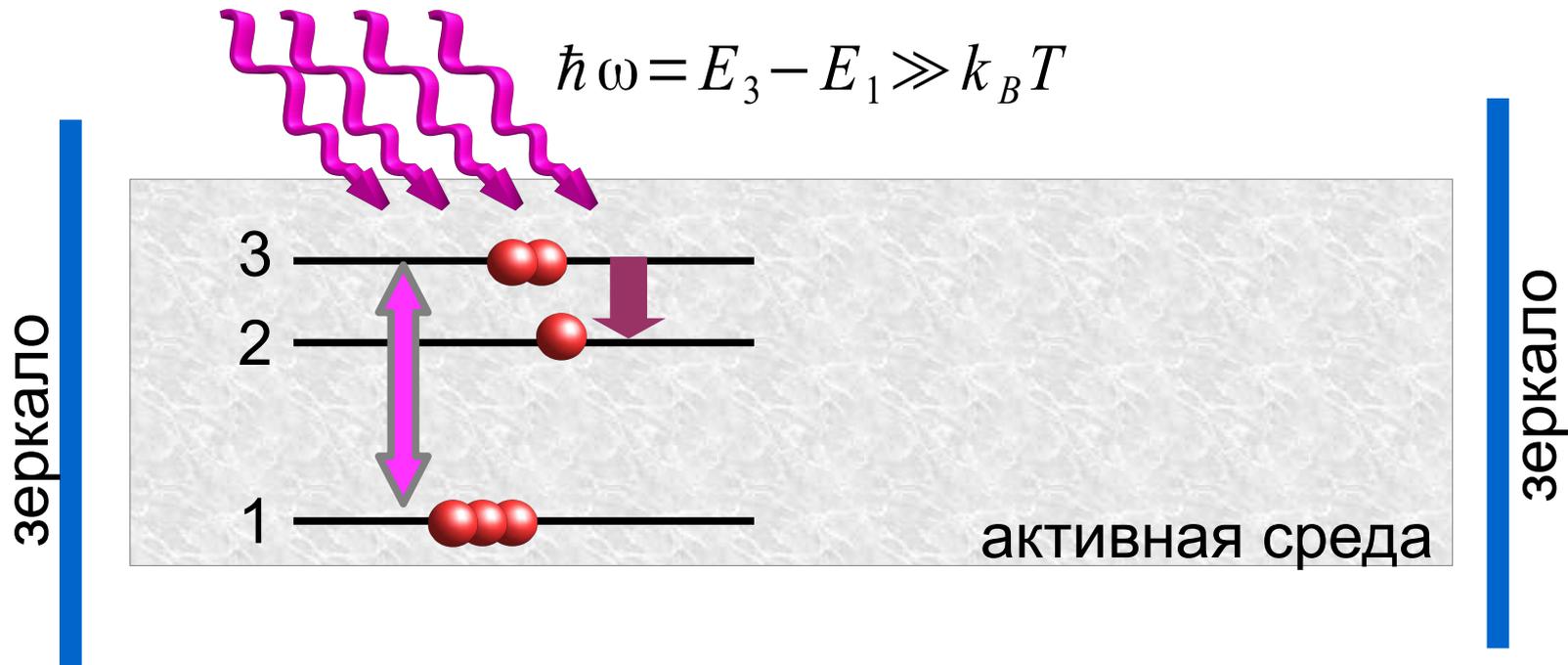
$$n_1 (N w_{инд}) = n_2 [(N-1) w_{инд} + w_{сп}]$$

# LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



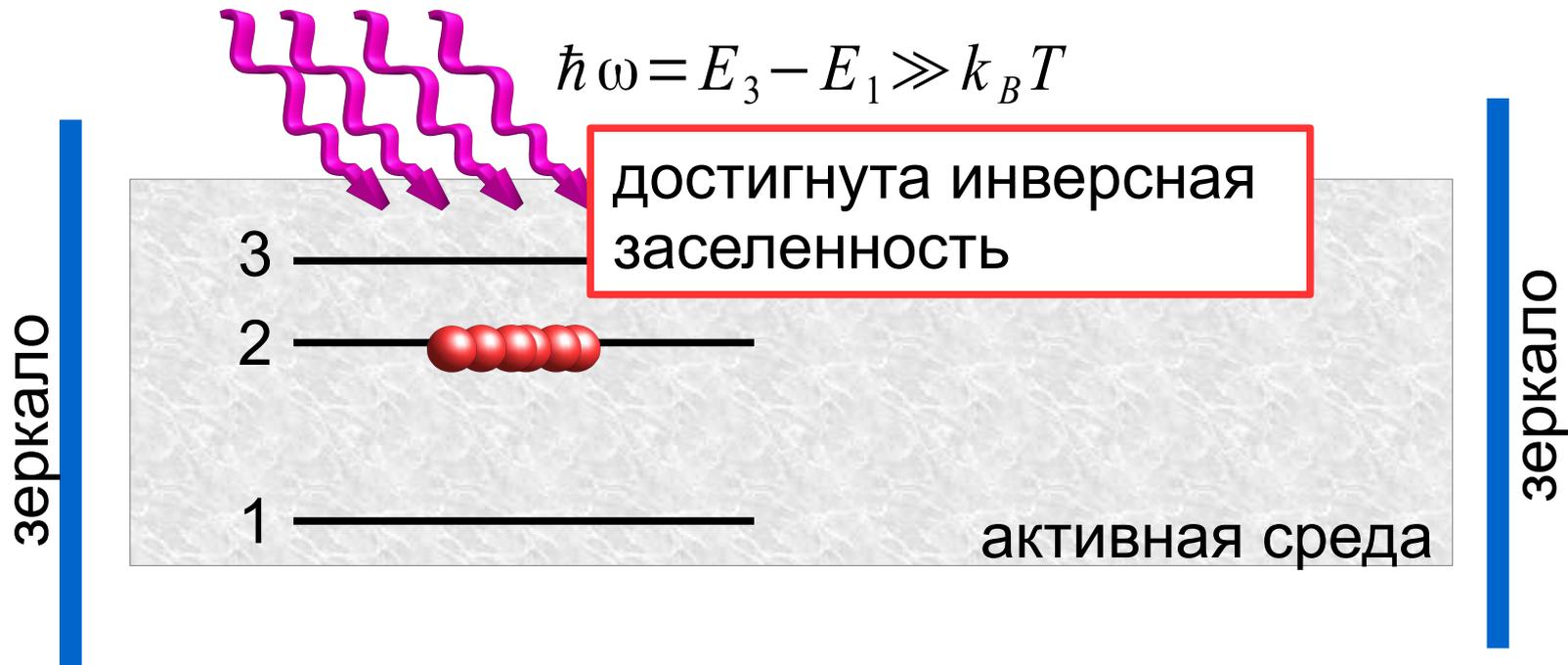
- большое время жизни на уровне 2
- маленькое время жизни на уровне 3
- большая вероятность перехода  $3 \Rightarrow 2$
- резонатор настроен на переход  $2 \Rightarrow 1$

# LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



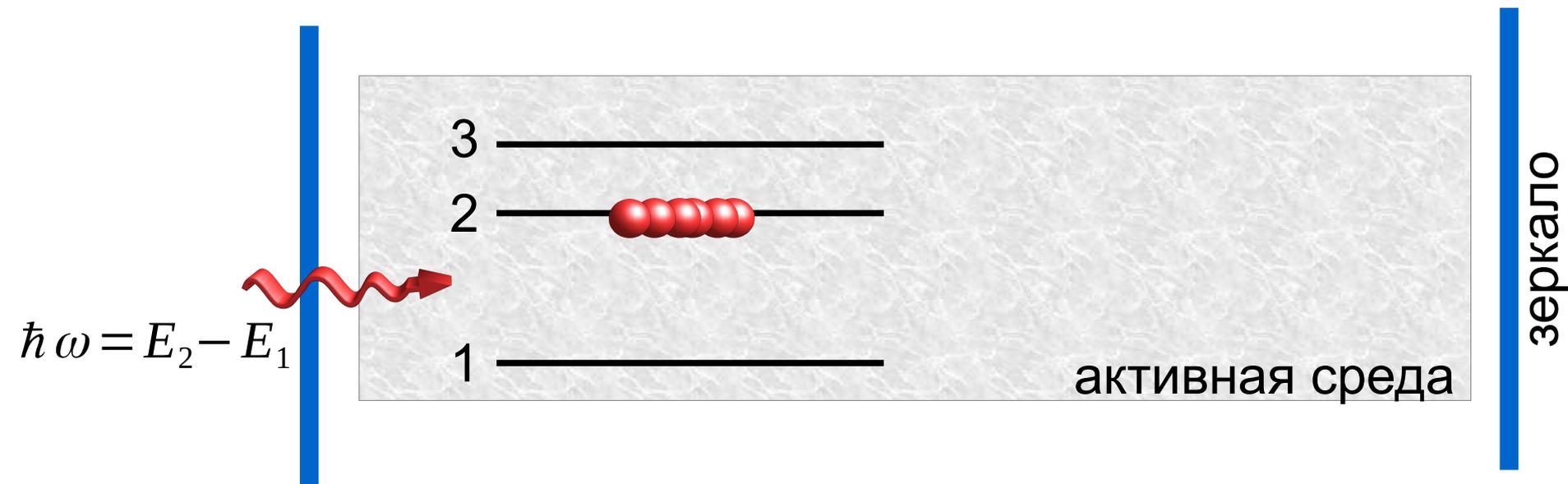
- большое время жизни на уровне 2
- маленькое время жизни на уровне 3
- большая вероятность перехода  $3 \Rightarrow 2$
- резонатор настроен на переход  $2 \Rightarrow 1$

# LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



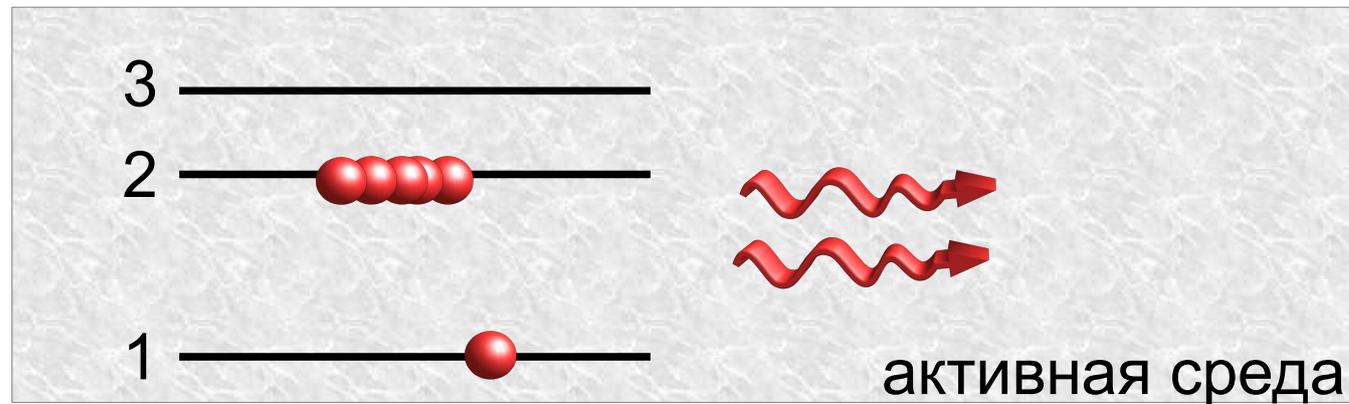
- большое время жизни на уровне 2
- маленькое время жизни на уровне 3
- большая вероятность перехода  $3 \Rightarrow 2$
- резонатор настроен на переход  $2 \Rightarrow 1$

# LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



- большое время жизни на уровне 2
- маленькое время жизни на уровне 3
- большая вероятность перехода  $3 \Rightarrow 2$
- резонатор настроен на переход  $2 \Rightarrow 1$

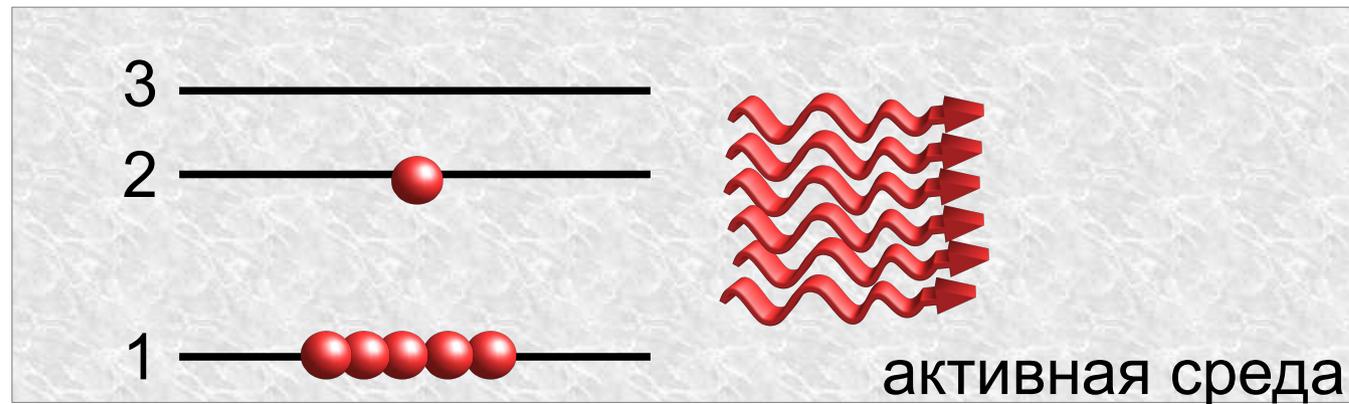
# LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



зеркало

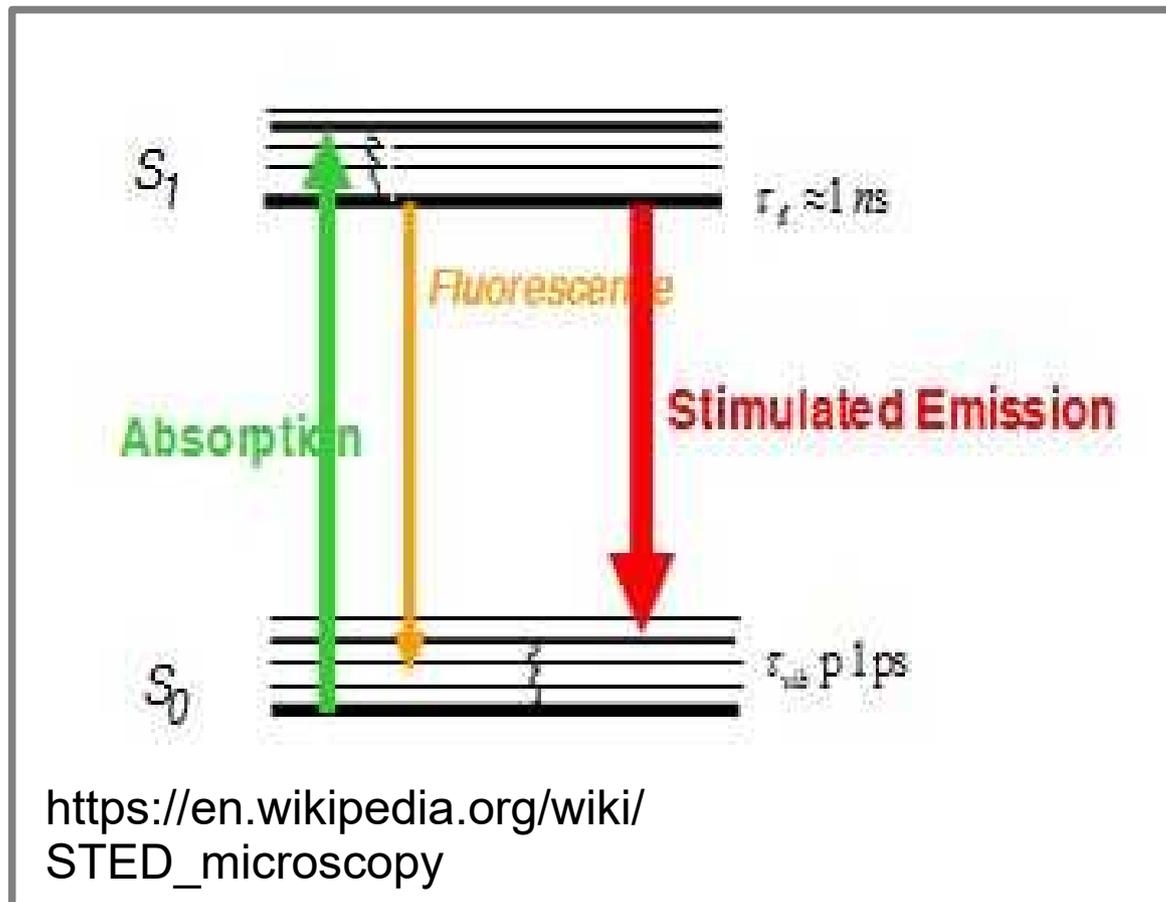
- большое время жизни на уровне 2
- маленькое время жизни на уровне 3
- большая вероятность перехода  $3 \Rightarrow 2$
- резонатор настроен на переход  $2 \Rightarrow 1$

# LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

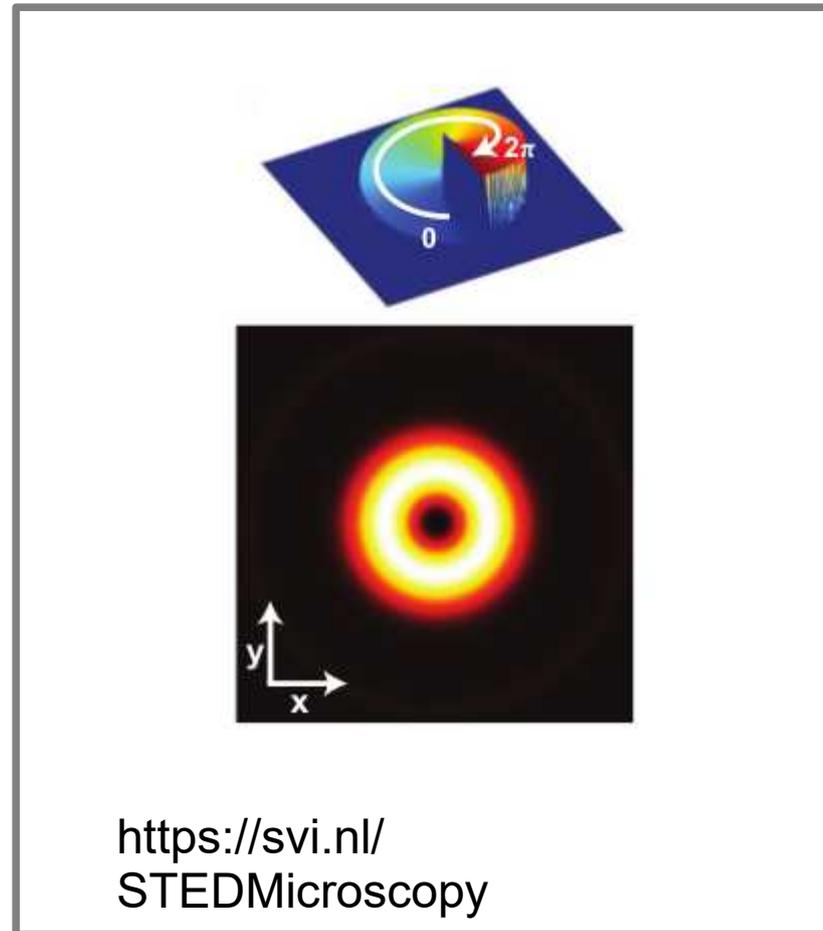


- большое время жизни на уровне 2
- маленькое время жизни на уровне 3
- большая вероятность перехода  $3 \Rightarrow 2$
- резонатор настроен на переход  $2 \Rightarrow 1$

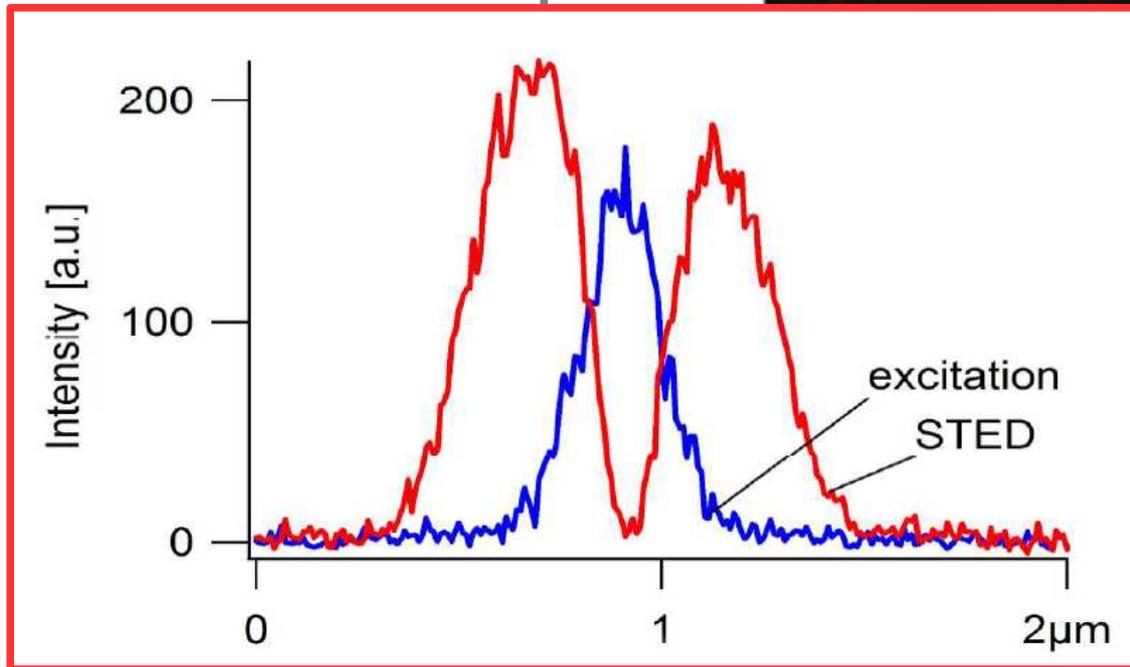
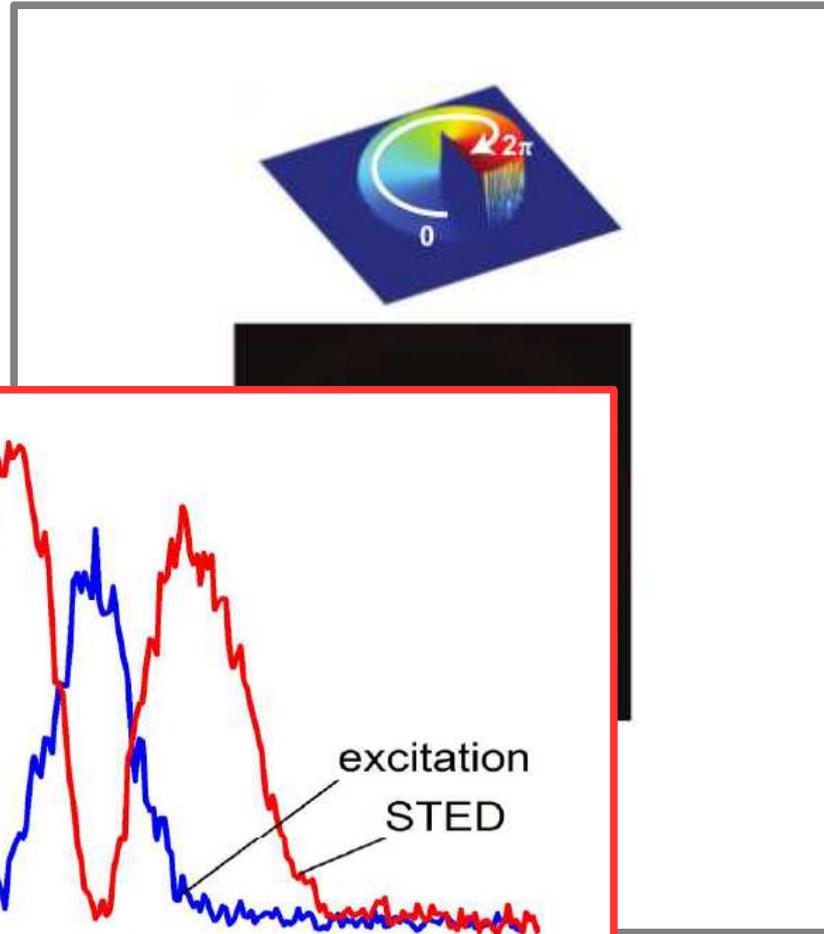
# STED (Stimulated Emission Depletion Microscopy)



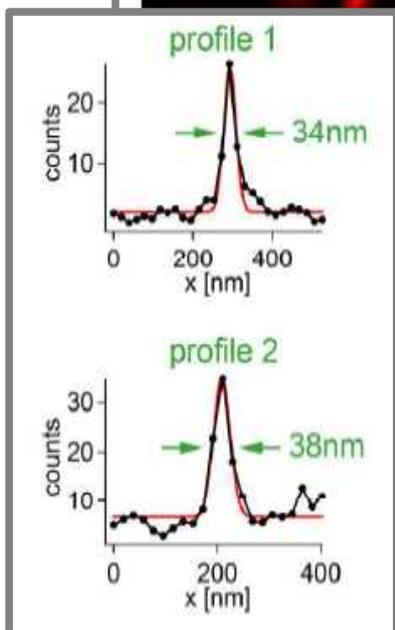
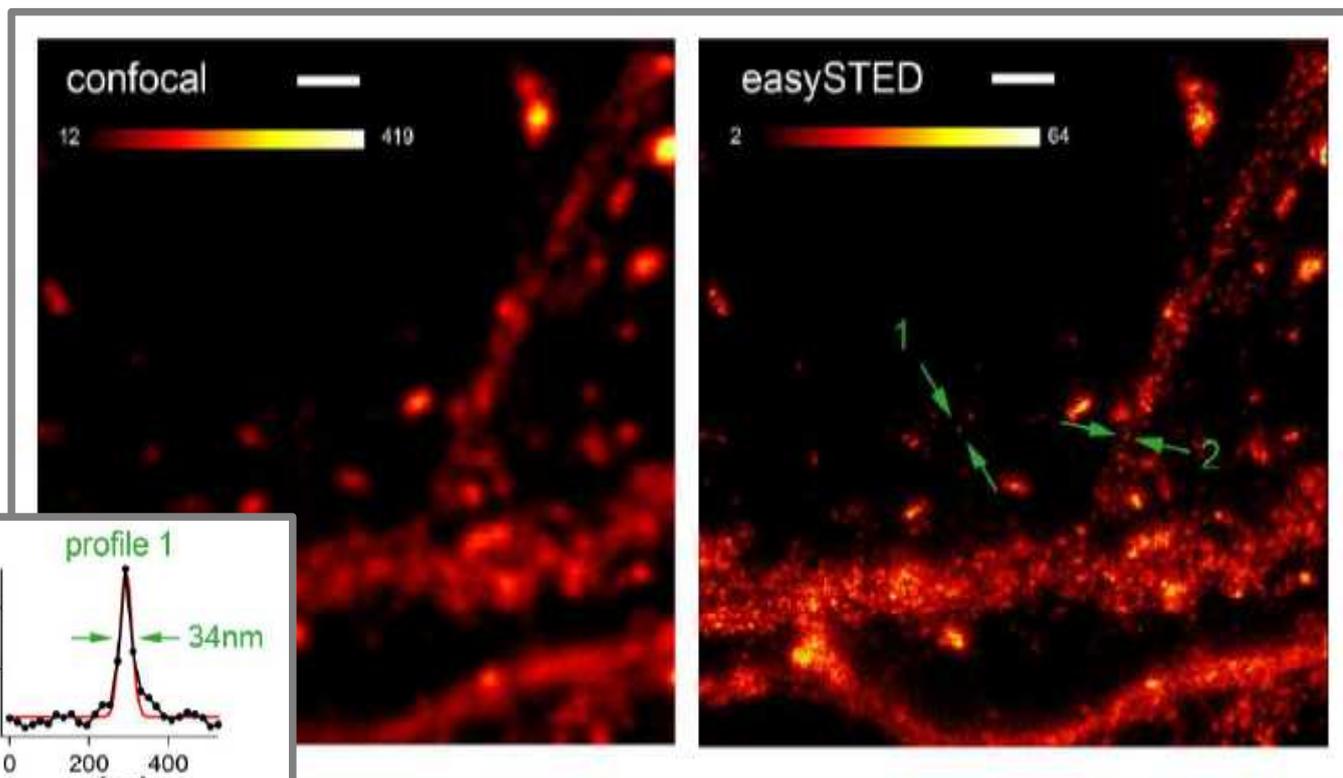
# STED (Stimulated Emission Depletion Microscopy)



# STED (Stimulated Emission Depletion Microscopy)



# STED



возбуждение 532 нм  
гашение 647 нм