

# КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

## ЦИКЛ ЛЕКЦИЙ

### НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

Лекции читают сотрудники кафедры общей физики

Главная физическая аудитория. Четверг 15-30



11 октября	Ядерный магнитный резонанс. Профессор А. В. Максимычев.
18 октября	Магнитные явления. Постоянные магниты. Доцент А. В. Гуденко
25 октября	Лазеры. Профессор А. И. Миланч
1 ноября	Ускорители. Доцент С. В. Виноградов
8 ноября	Приемники электромагнитного излучения ближнего инфракрасного и видимого диапазонов. Профессор О.И.Смирнова
15 ноября	Шаровые молнии. Профессор Ю. Р. Аланакян
22 ноября	Получение и применение низких температур и высоких магнитных полей в физике. Доцент В. Н. Глазков
29нояб.	Физико-технические основы современной безопасности. Профессор А.В.Кубышкин

## **Лекция 9-10.**

### **Атом в магнитном поле.**

**Эффект Зеемана: для оптических переходов, ЭПР, ЯМР.**

**Правила отбора для излучения и поглощения.**

**Спонтанные и индуцированные переходы.**

## Атомные термы

В сложном атоме полные  $S$  и  $L$  фиксируются сильными (кулоновскими) силами (**правила Хунда**).

Спин-орбитальное взаимодействие выбирает полный момент атома  $J$  (тонкая структура).

Fe:  $3d^6$

$\max S_z = 4 \times \frac{1}{2} = 2$

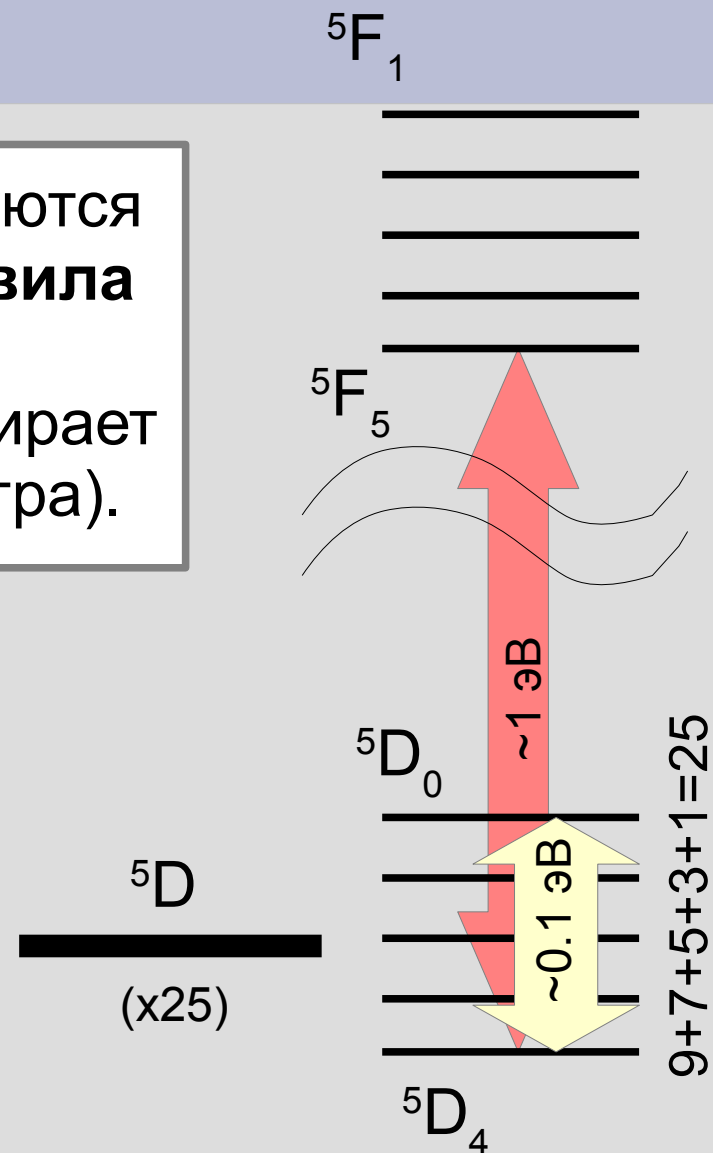


$\max L_z = 2$

терм  $^5D$

полный момент  $J$ :

от 0 до 4



# Достоверный источник сведений по термам и спектрам атомов

**NIST**  
National Institute of  
Standards and Technology  
Physical Meas. Laboratory

## Basic Atomic Spectroscopic Data

### Iron (Fe)

Other Elements

Neutral Atom

Singly Ionized

<a href="#">Main Page</a>	<a href="#">Finding List</a>	<a href="#">Element Name</a>	<a href="#">Atomic Number</a>	<a href="#">Periodic Table</a>	<a href="#">Atomic Data</a>	<a href="#">Strong Lines</a>	<a href="#">Persistent Lines</a>	<a href="#">Energy Levels</a>	<a href="#">Persistent Lines</a>	<a href="#">Energy Levels</a>	<a href="#">Ref.</a>
<a href="#">Switch to ASCII Version</a>											

### Energy Levels of Neutral Iron ( Fe I )

Configuration	Term	<i>J</i>	Level (cm <sup>-1</sup> )	Ref.
3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	a <sup>5</sup> D	4	0.000	NJLT94
		3	415.933	NJLT94
		2	704.007	NJLT94
		1	888.132	NJLT94
		0	978.074	NJLT94
3d <sup>7</sup> ( <sup>4</sup> F) 4s	a <sup>5</sup> F	5	6928.268	NJLT94
		4	7376.764	NJLT94
		3	7728.059	NJLT94
		2	7985.784	NJLT94
		1	8154.713	NJLT94
3d <sup>7</sup> ( <sup>4</sup> F) 4s	a <sup>3</sup> F	4	11976.238	NJLT94
		3	12560.933	NJLT94
		2	12968.553	NJLT94
3d <sup>7</sup> ( <sup>4</sup> P) 4s	a <sup>5</sup> P	3	17550.180	NJLT94
		2	17726.987	NJLT94
		1	17927.381	NJLT94

## Атомные термы

В сложном атоме с сильными (кулоновскими) взаимодействиями энергетические уровни остаются вырожденными (2J+1) раз по проекции момента. Спин-орбитальное взаимодействие снимает вырождение, и полный момент атома определяется суммой спина и орбитального моментов.

Fe: 3d<sup>6</sup>  
 max S<sub>z</sub> = 4 × 1/2 = 2  
 max L<sub>z</sub> = 2

терм <sup>5</sup>D  
 полный момент от 0 до 4

Даже с учётом тонкой структуры атома уровни остаются вырожденными (2J+1) раз по проекции момента.

Такое вырождение может быть снято магнитным полем.

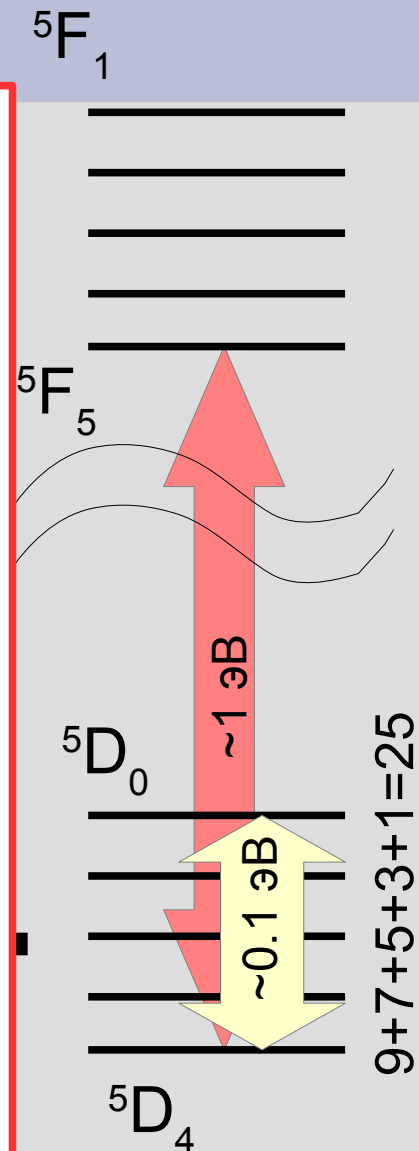
Два предела:

слабое поле

$$\mu B \ll E_{LS}$$

сильное поле

$$\mu B \gg E_{LS}$$



## Атом с LS-связью в слабом магнитном поле. Спектроскопический множитель Ланде

4 квантовых числа:  $\{L, S, L_z, S_z\}$  или  $\{L, S, J, J_z\}$

до учёта спин-  
орбитального  
взаимодействия

учёт спин-орбитального  
взаимодействия фиксирует  
 $J$ , можем выбрать  
определённое  $J_z$ , но  $L_z$  и  $S_z$   
теперь не зафиксированы

При орбитальном движении возникает момент

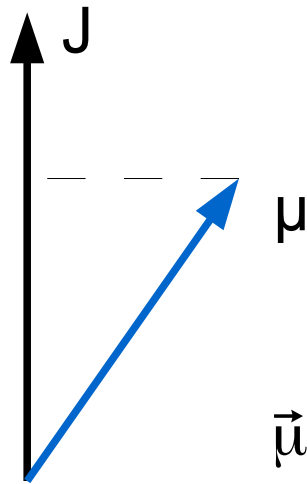
$$\hat{\mu}_L = \mu_B \hat{L}$$

Из релятивистской теории и опытов Эйнштейна-де Гааза, со спином связан магнитный момент

$$\hat{\mu}_S = 2 \mu_B \hat{S}$$

## Атом с LS-связью в слабом магнитном поле. Спектроскопический множитель Ланде

4 к



$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

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

учёт спин-орбитального взаимодействия фиксирует, можем выбрать определённое  $J_z$ , но  $L_z$  и  $S_z$  теперь не зафиксированы

Пр в слабом поле

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

Из  
сп

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

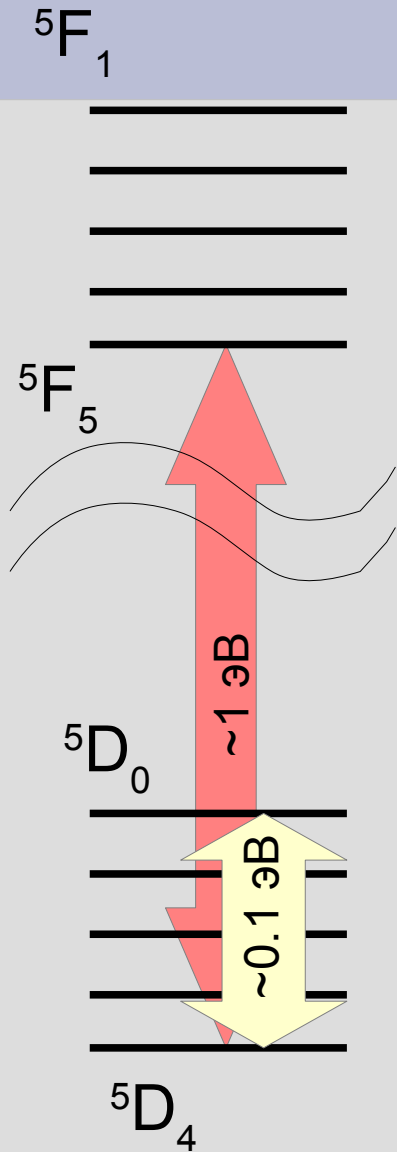
ент

$$\hat{\mu}_L = \mu_B \hat{L}$$

ейна-де Гааза, со

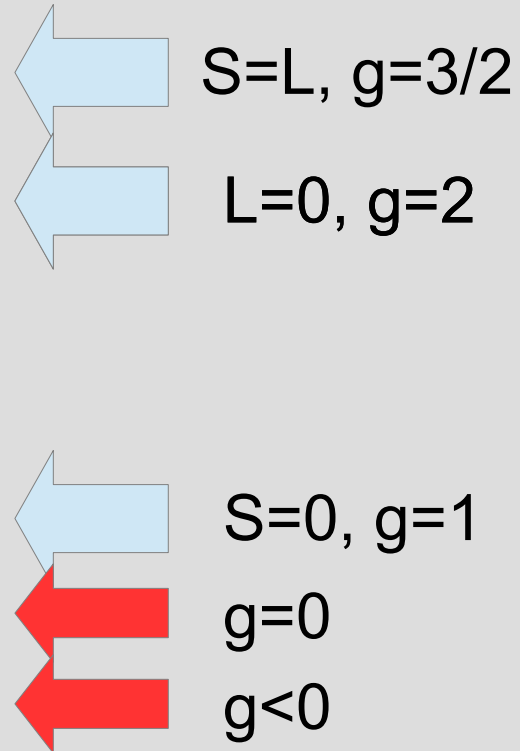
$$\hat{\mu}_S = 2 \mu_B \hat{S}$$

# Чему равен g-фактор?



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

терм	J	L	S	g
$5D_4$	4	2	2	1,5
$5D_3$	3	2	2	1,5
$3S_1$	1	0	1	2
$2P_{1/2}$	0,5	1	0,5	0,667
$2P_{3/2}$	1,5	1	0,5	1,333
$5F_5$	5	3	2	1,4
$1P_1$	1	1	0	1
$5F_1$	1	3	2	0
$7G_1$	1	4	3	-0,5





# Расщепление оптического спектра в слабых полях для 3P ->3S перехода натрия

**NIST**  
National Institute of  
Standards and Technology  
Physical Meas. Laboratory

## Basic Atomic Spectroscopic Data

### Sodium (Na)

Other Elements

Neutral Atom

Singly Ionized

Main Page

Finding List

Element Name

Atomic Number

Periodic Table

Atomic Data

Strong Lines

Persistent Lines

Energy Levels

Persistent Lines

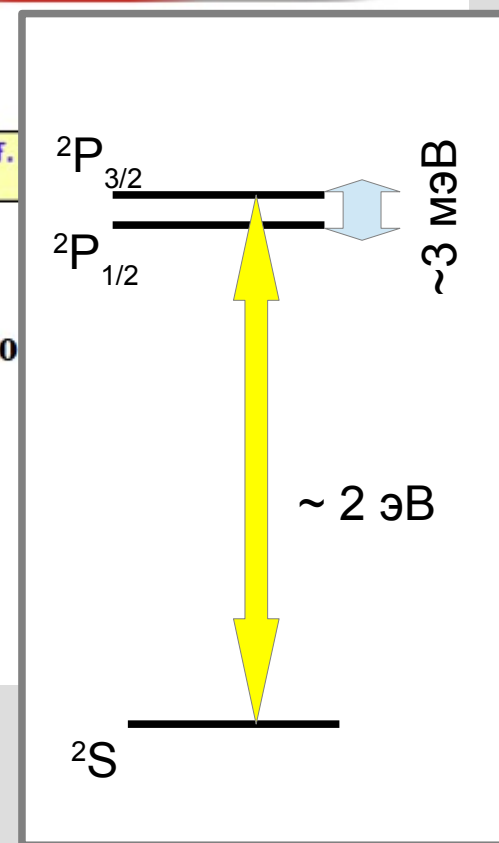
Energy Levels

Ref.

Switch to  
ASCII Version

### Energy Levels of Neutral So

Configuration	Term	$J$	Level ( $\text{cm}^{-1}$ )	Ref.
3s	$2S$	1/2	0.000	MZ81
3p	$2P^{\circ}$	1/2	16956.172	MZ81
		3/2	16973.368	MZ81



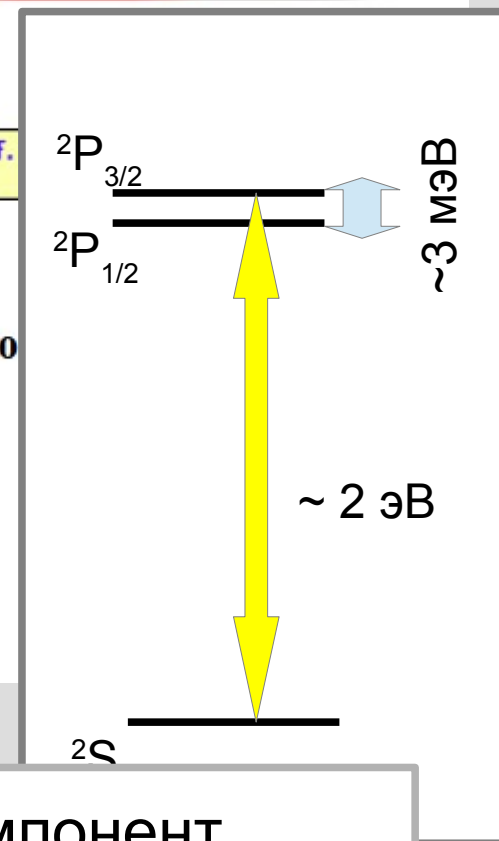
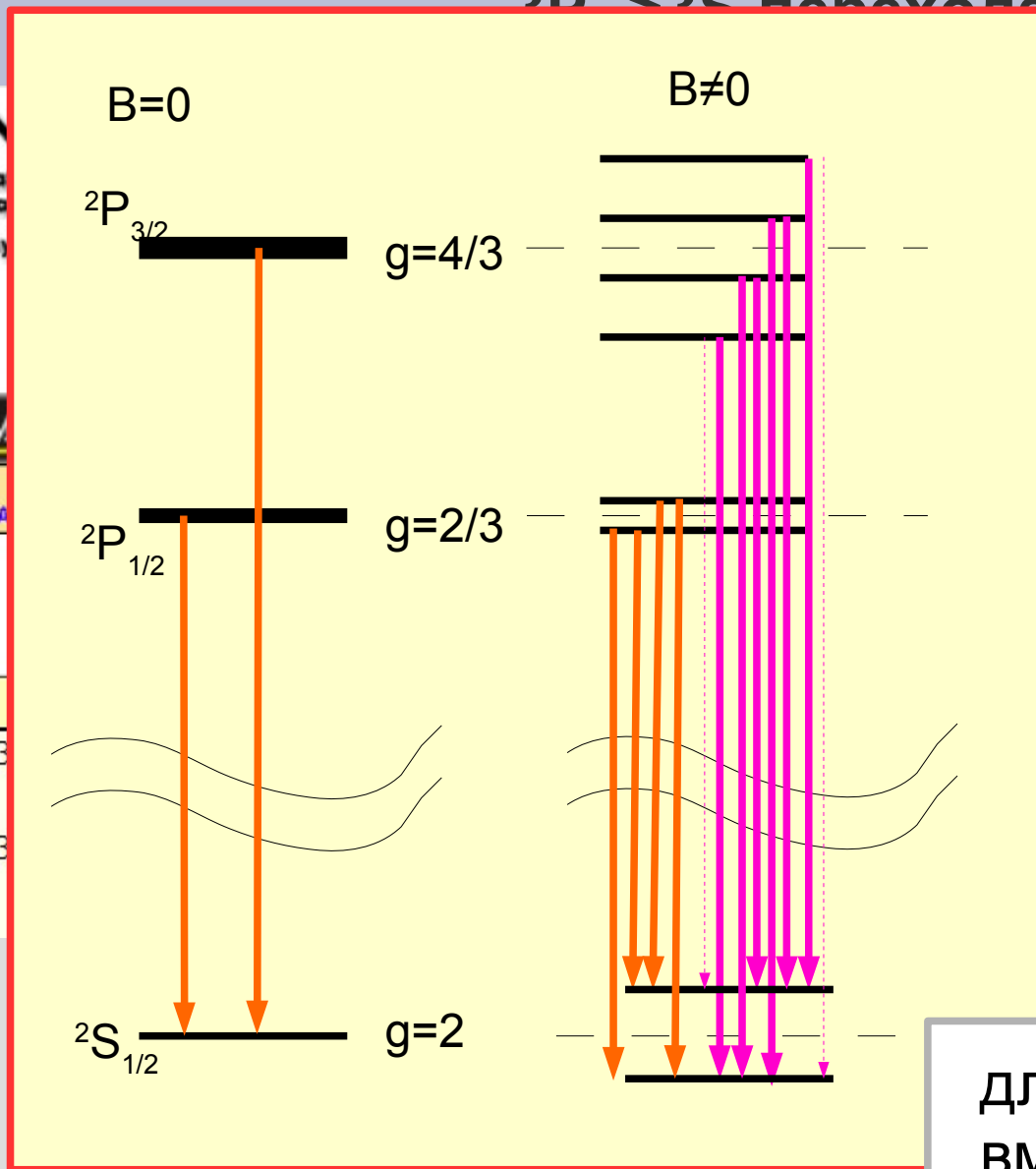
# Расщепление оптического спектра

$2P \rightarrow 2S$  переход

Слабость поля:

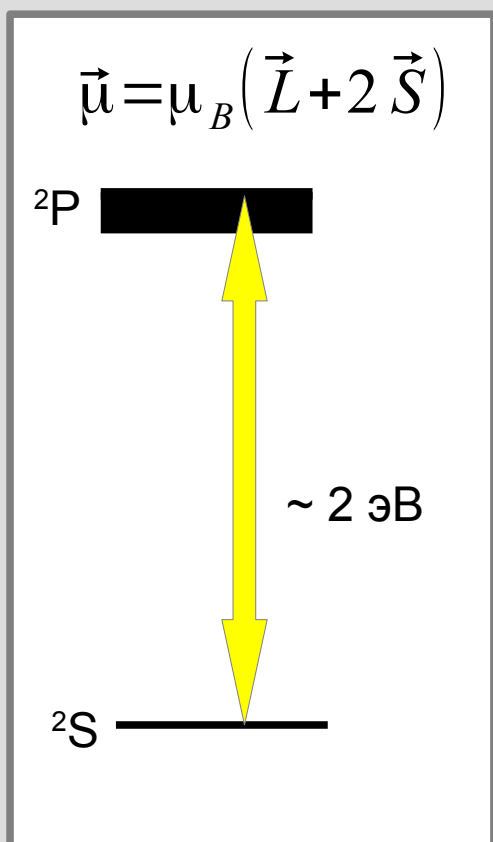
$$E_{SL} \gg g \mu_B J_z B$$

1Тл  $\sim 10^{-4}$  эВ  $\sim 1$ К  
 для Na 3 мэВ  $\sim 30$  Тл  
 (достижимо)



для Na: 10 компонент  
 вместо дублета,  
*сложный* эффект Зеемана

## Случай сильного поля



- Спин-орбитальное взаимодействие — самый слабый эффект,  $J$  не зафиксировано,
- $g$ -фактор вводить не надо, можно использовать набор квантовых чисел  $\{L, S, L_z, S_z\}$

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

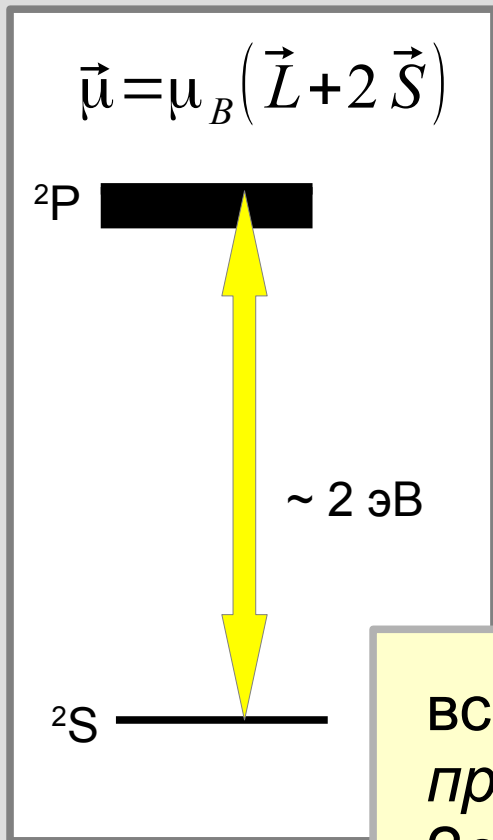
${}^2P$			${}^2S$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$	$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
1	0,5	2	0	0,5	1
1	-0,5	0	0	-0,5	-1
0	0,5	1			
0	-0,5	-1			
-1	0,5	0			
-1	-0,5	-2			

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

## Случай сильного поля

- Спин-орбитальное взаимодействие — самый слабый эффект, J не зафиксировано,
- g-фактор вводить не надо, можно использовать набор квантовых чисел  $\{L, S, L_z, S_z\}$

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



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

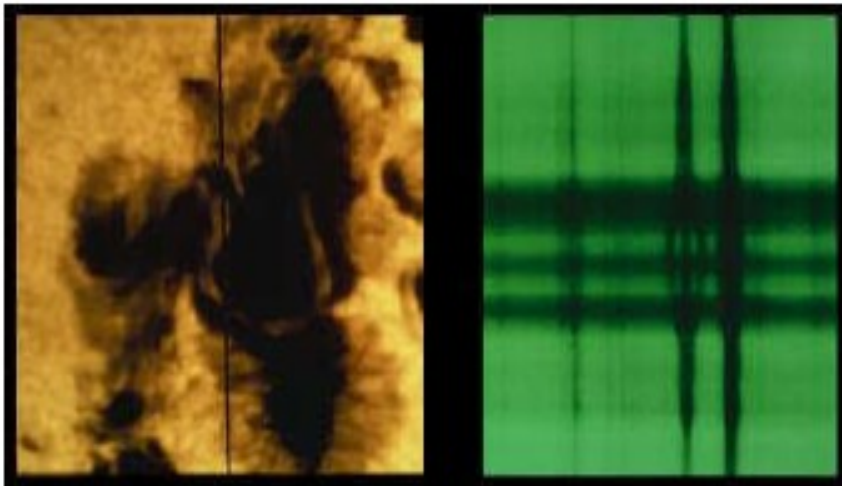
$^2S$		
$L_z$	$S_z$	$L_z + 2S_z$
0	0,5	1
0	-0,5	-1

всегда 3 компоненты,  
простой эффект  
Зеемана

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

## Как измерить магнитное поле на Солнце

### Sunspot with spectrum

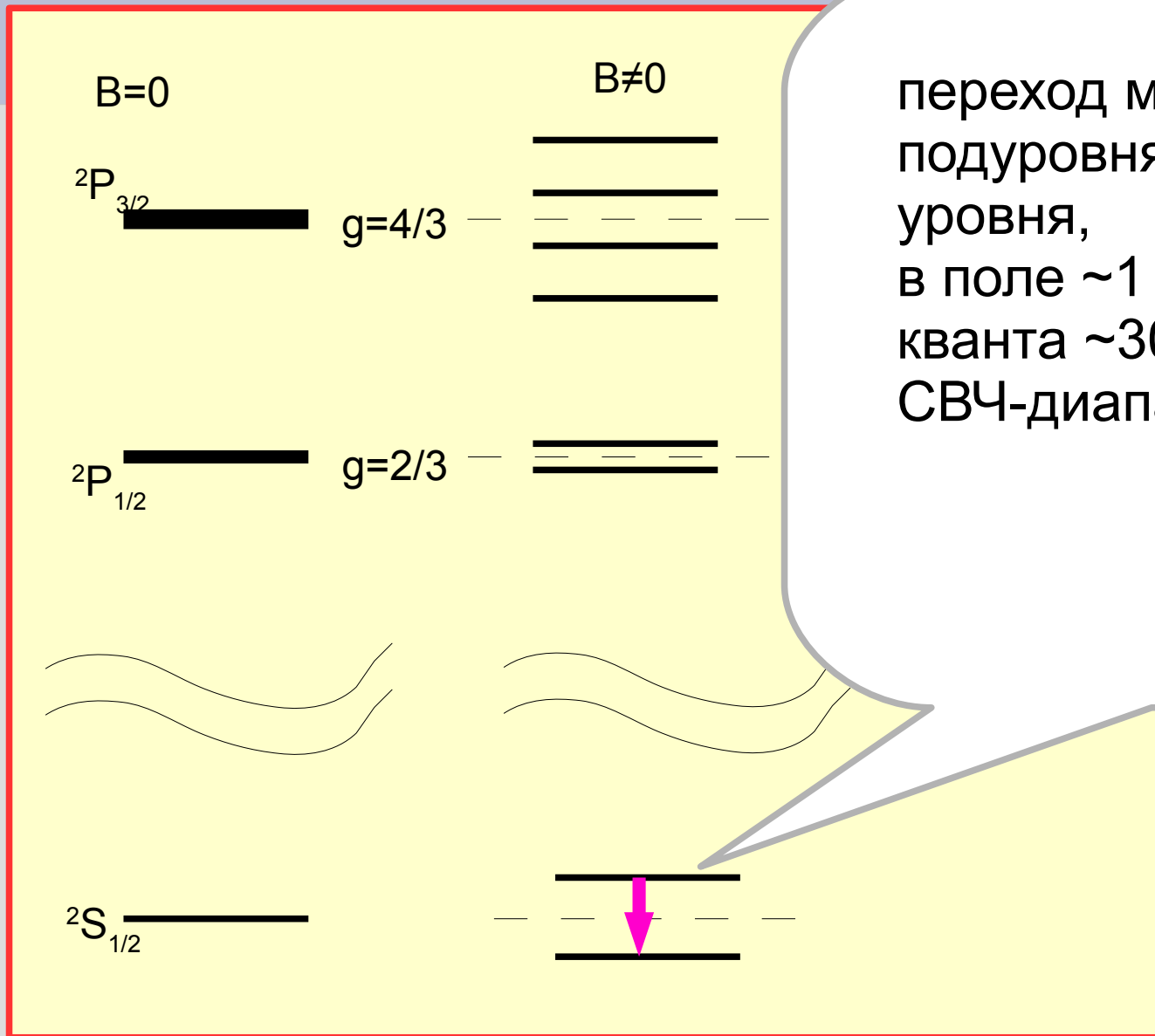


#### About this image

A complex sunspot picture, taken at 15:30 hours UT on 4th July 1974. The vertical black line on the white light image (left) indicates the location of the slit for the spectrograph which took the spectrum, shown on the right. The division of one spectral line into three parts is a clear demonstration of the Zeeman effect. In fact, the Zeeman splitting of this line, at 5250.2 Angstroms and coming from the element iron, indicates a record field strength of 4130 Gauss. The white light photo

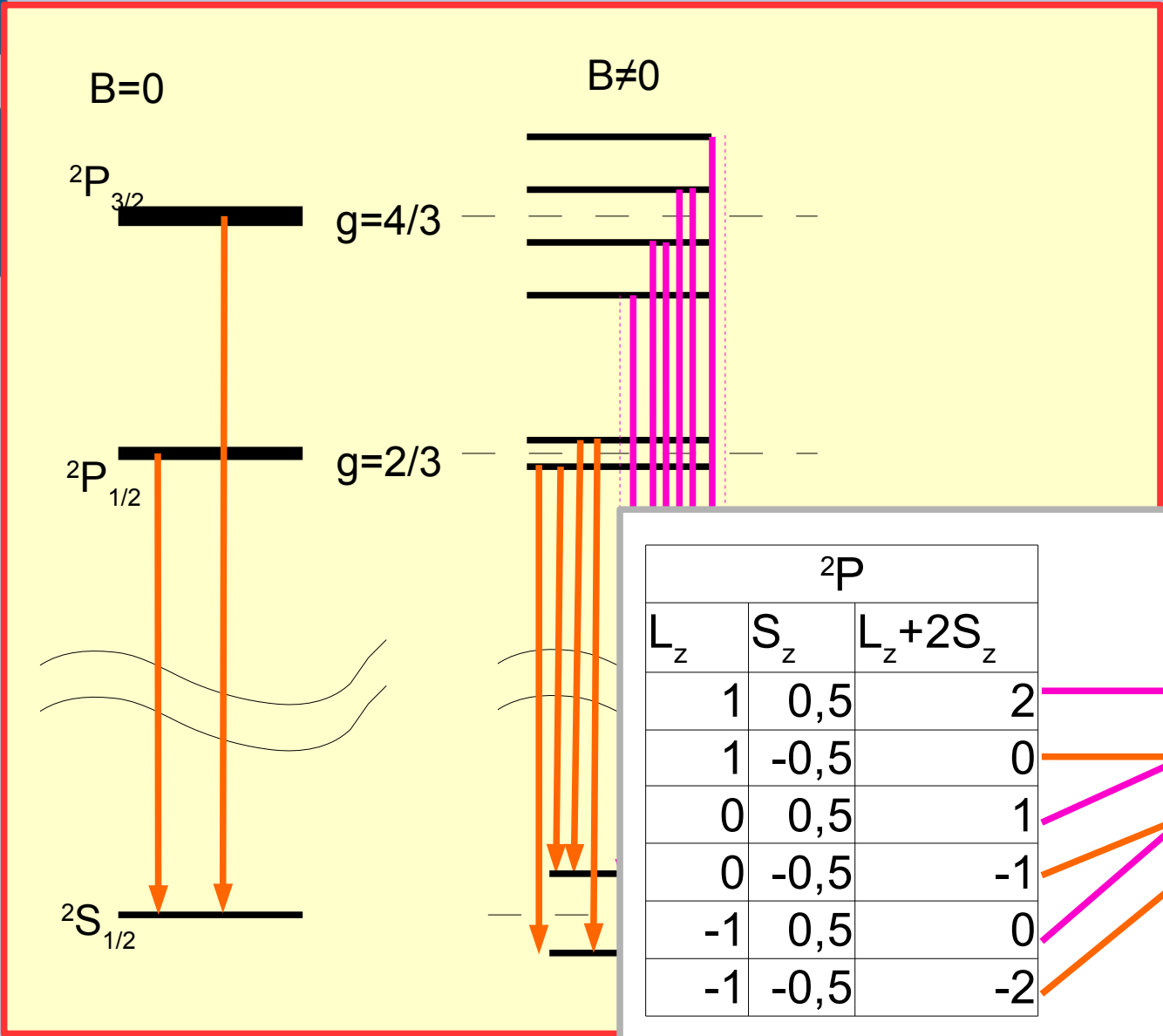
shows a sinuous light bridge which divides the spot's umbra into different magnetic polarities. Twenty minutes before this picture was taken, a major 2B white light flare occurred. This picture was taken at the McMath-Pierce Solar Facility on Kitt Peak.

# ЭПР



переход между подуровнями одного уровня, в поле  $\sim 1$  Тл частота кванта  $\sim 30$  ГГц (1 см, СВЧ-диапазон)

# Правила отбора. Эмпирические правила для оптических переходов.



- $\Delta J = 1, 0, -1$
- $\Delta L = 1, 0, -1$
- $\Delta J_z, \Delta L_z = 0, \pm 1$
- $\Delta S = 0$
- ....

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

## Какие бывают фотоны?

Излучение и поглощение = взаимодействие с  
**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ** полем

$$\varphi(\vec{R}) = \frac{q}{R} + \frac{\vec{d} \cdot \vec{n}}{R^2} + \frac{\vec{n} \hat{D} \vec{n}}{2R^3} + \dots \quad (\text{мультипольное разложение})$$

колебания мультиполей разного порядка создаёт разные колебания поля, после квантования — **ФОТОНЫ РАЗНОЙ МУЛЬТИПОЛЬНОСТИ**

**E1** — электрический дипольный

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

**M1** — магнитный дипольный

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



## Какие бывают фотоны?

Чётность фотона (к инверсии):

- Ис:
- для  $E_j$  фотонов  $(-1)^j$
  - для  $M_j$  фотонов  $(-1)^{j+1}$

$$\varphi(\vec{R}) = \frac{q}{R}$$

колебания м  
колебания п  
МУЛЬТИПОЛ

**E1** — электр  
**E2** — электр

**M1** — магни  
**M2** — магни

Вероятность испускания/поглощения:

- для одного  $j$  взаимодействие с электрический фотоном более вероятно, чем с магнитным
- для одного типа фотонов взаимодействие с фотоном меньшей мультипольности более вероятно

**если законы сохранения не запрещают более вероятные варианты...**

## Связь с правилами отбора

Оптические переходы: изменение электронной конфигурации, взаимодействие с электрическим полем! E1 фотон имеет отрицательную чётность, оптические переходы между состояниями с  $L$  отличающимися на 1,  $\Delta S=0$ .

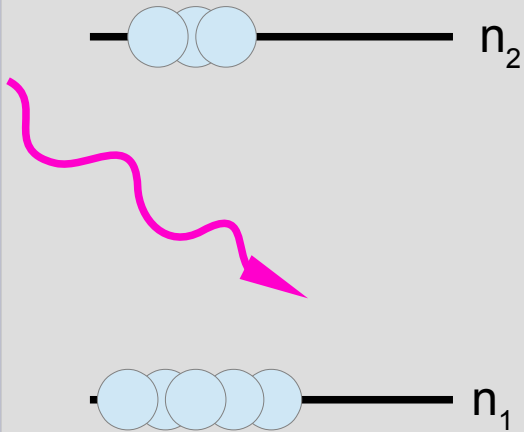
ЭПР: M1 фотоны,  $\Delta S=1$ .

Фотоны с высокой мультипольностью встречаются в ядерной физике.

# Спонтанные и индуцированные переходы

# Заселенность уровней при поглощении

Модель:  
двухуровневая  
система



Каждый фотон может взаимодействовать с электроном на верхнем или на нижнем уровне, вероятность индуцированного перехода (на фотон! в единицу времени!)  $w_{инд}$ .

“Избыточные” электроны на верхнем уровне спонтанно (иногда неизлучательным образом!) переходят на нижний уровень с вероятностью  $w_{сп}$ .

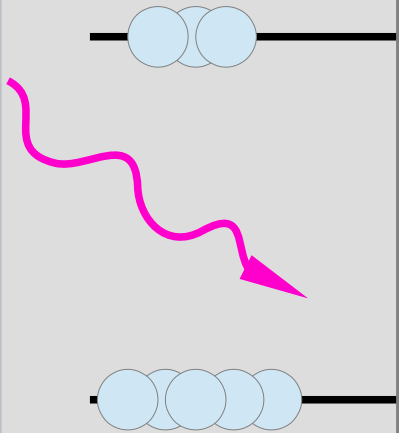
Баланс ( $N$  фотонов в резонаторе с системой):

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

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

# Заселенность уровней при возбуждении

Модель:  
двухуровневая  
система



стационарный режим

$$n_1 + n_2 = n_0$$

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

$$n_2 = \frac{1}{2} \left[ n_0 - \frac{w_{\text{сп}}}{N w_{\text{инд}}} \left( n_2 - n_0 \frac{e^{-\hbar\omega/T}}{1 + e^{-\hbar\omega/T}} \right) \right]$$

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

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

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

# Заселенность стационарный р

при  $N=0$  получим тепловое равновесное распределение

при  $N \gg 1$  заселённости уровней выравниваются

для оптических переходов  $\hbar \omega \gg T$

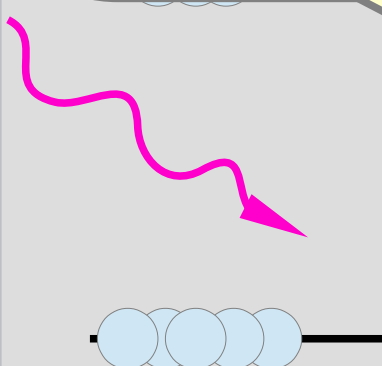
полная вероятность индуцированного перехода в единицу времени

$$\left( n_1 - n_2 \right) \frac{1}{2} \left[ n_0 - \frac{w_{sp}}{N w_{ind}} \left( n_2 - n_0 \frac{e^{-\hbar \omega / T}}{1 + e^{-\hbar \omega / T}} \right) \right]$$

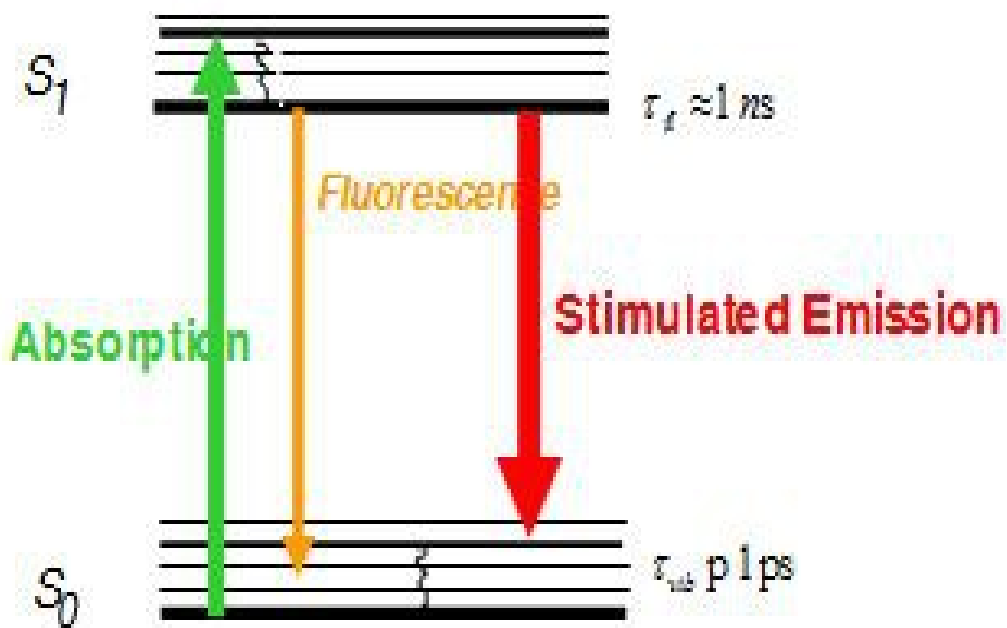
$$n_2 = n_0 \frac{N w_{ind} + \frac{e^{-\hbar \omega / T}}{1 + e^{-\hbar \omega / T}} w_{sp}}{2 N w_{ind} + w_{sp}} < \frac{n_0}{2}$$

$$\frac{d n_2}{d t} = n_1 N w_{ind} - n_2 N w_{ind} - (n_2 - n_2^{(0)}) w_{sp}$$

$$\frac{d n_2}{d t} = n_1 N w_{ind} - n_2 N w_{ind} - (n_2 - n_2^{(0)}) w_{sp}$$

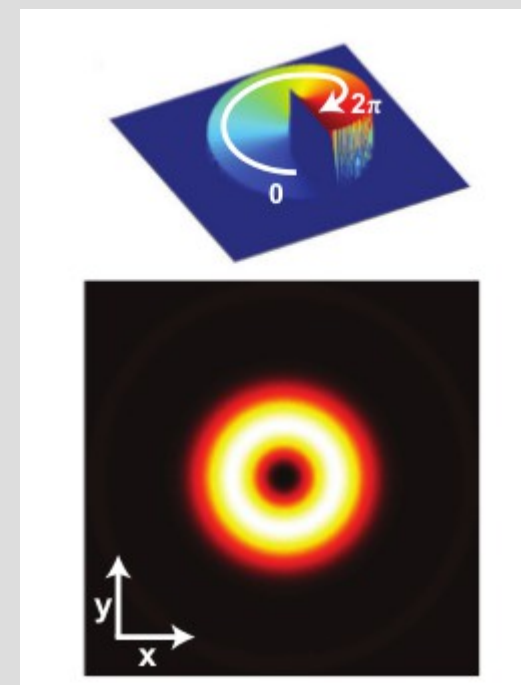


# STED (Stimulated Emission Depletion Microscopy)

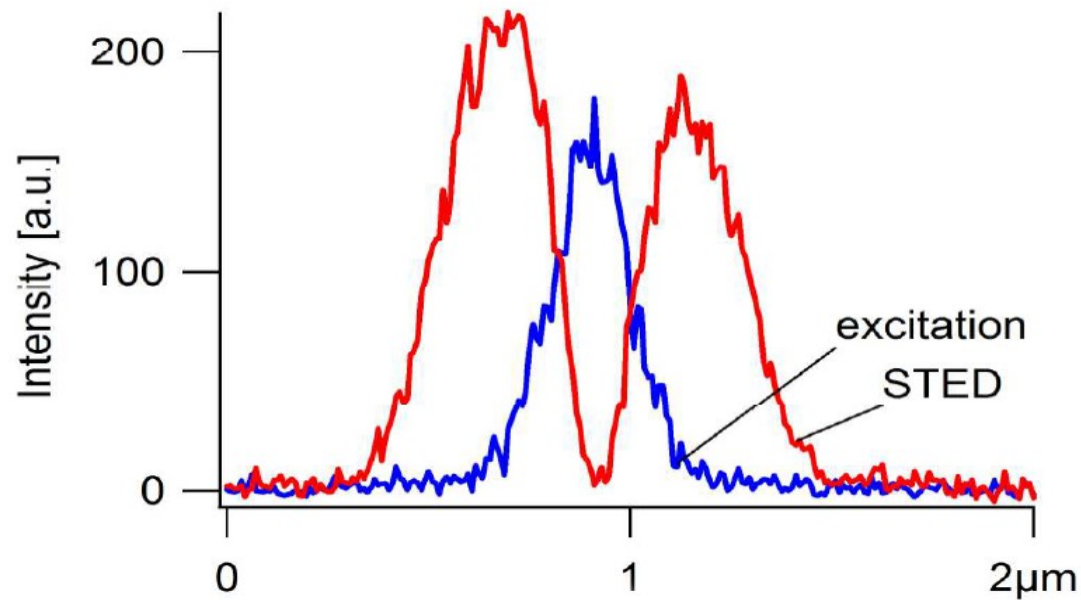


[https://en.wikipedia.org/wiki/STED\\_microscopy](https://en.wikipedia.org/wiki/STED_microscopy)

Бетциг, Хелл,  
Мёрлиг (2014,  
химия)

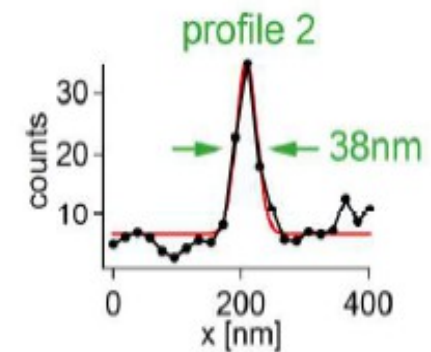
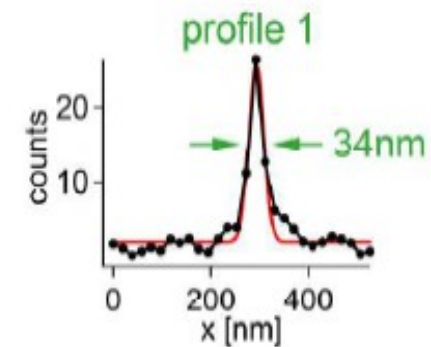
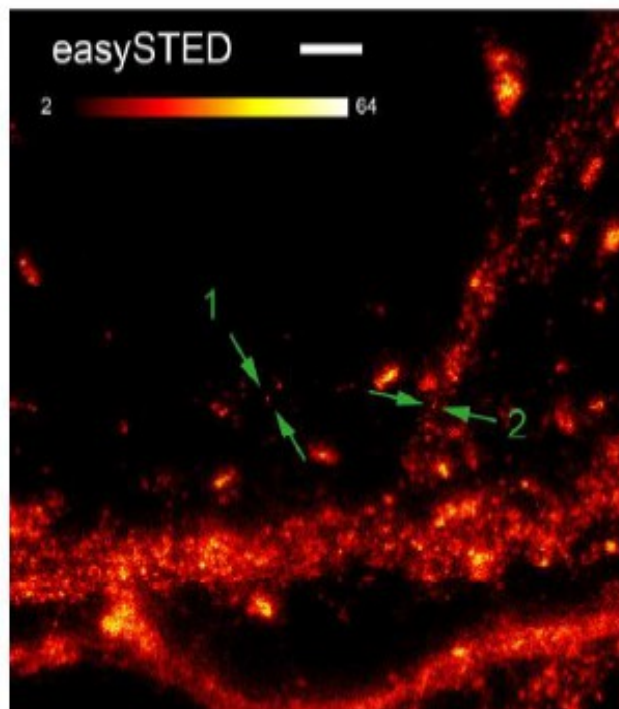
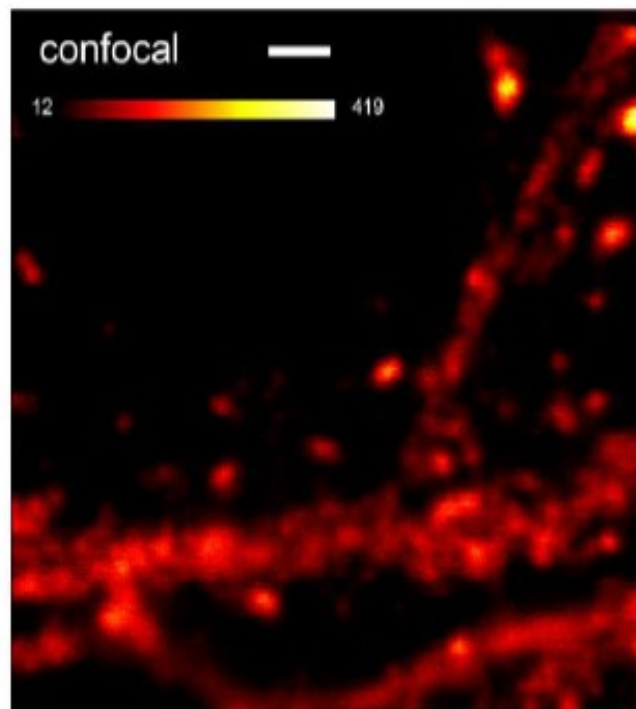


<https://svi.nl/STEDMicroscopy>



## STED

возбуждение 532 нм  
гашение 647 нм





# Основное на лекции

