

Магическая длина волны для часового перехода 1.14 мкм в атомах тулия

Е.С.Калганова, А.А.Головизин, Д.О.Трегубов, Г.А.Вишнякова, Д.Д.Сукачев,
И.Ю. Толстихина, К.Ю.Хабарова, В.Н.Сорокин, Н.Н.Колачевский



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический
ИНСТИТУТ
имени



П.Н.Лебедева

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Ф И А Н

Тулий

$^{169}_{69}\text{Tm}$

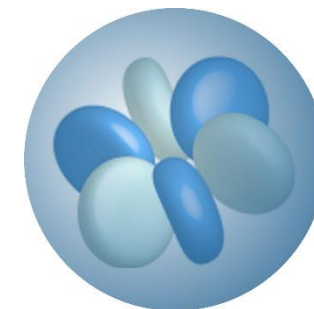
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

$4f^{13}$ $6s^2$

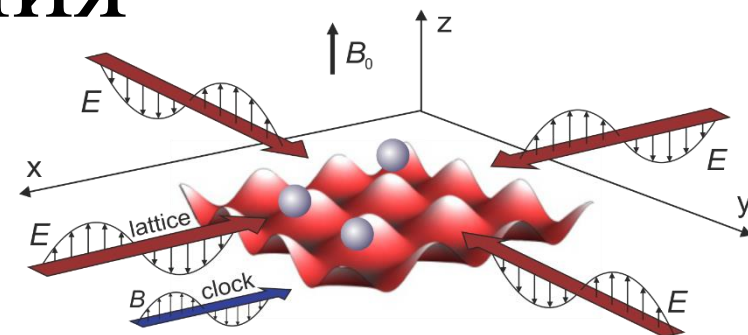


Часовой переход:

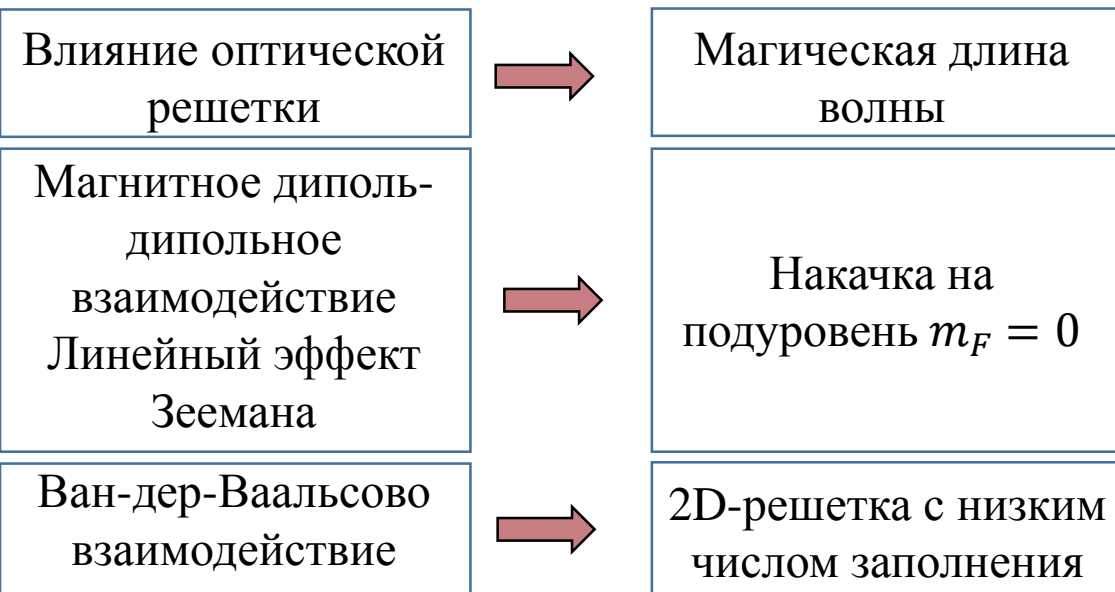
- Тонкое расщепление основного состояния
- Магнито-дипольный
- $\lambda = 1.14$ мкм
- $\gamma = 1.2$ Гц
- Экранировка внешними $5s^2$ и $6s^2$ оболочками



Оптические часы на атомах тулия



Вклад	Сдвиг частоты, мГц	Неточность после учета поправки, мГц	Неточность в относительных единицах, 10^{-18}
BBR ($T = 300 \pm 3$ K)	20	0.8	3
Эффект Зеемана ($B = 10 \pm 0.1$ mG)	-26	0.5	2
Тензорная поляризуемость	0.5	0.5	2
Гиперполяризуемость ($dI/I = 10^{-3}$)	0	0.5	2
Ван-дер-Ваальсово и квадруполь-квадрупольное взаимодействия	0.1	0.1	0.4
Итог	-6	1.2	< 5



Предполагаемая неточность $< 5 \times 10^{-18}$

[1] D. Sukachev *et al.*, Phys Rev A **94**, 022512 (2016)

План

- Расчет поляризуемостей уровней часового перехода
- Экспериментальный поиск магической длины волны
 - Охлаждение и захват атомов
 - Усиливающий резонатор
 - Оптическая накачка
 - Результаты
- Статическая поляризуемость
- Квадратичный эффект Зеемана

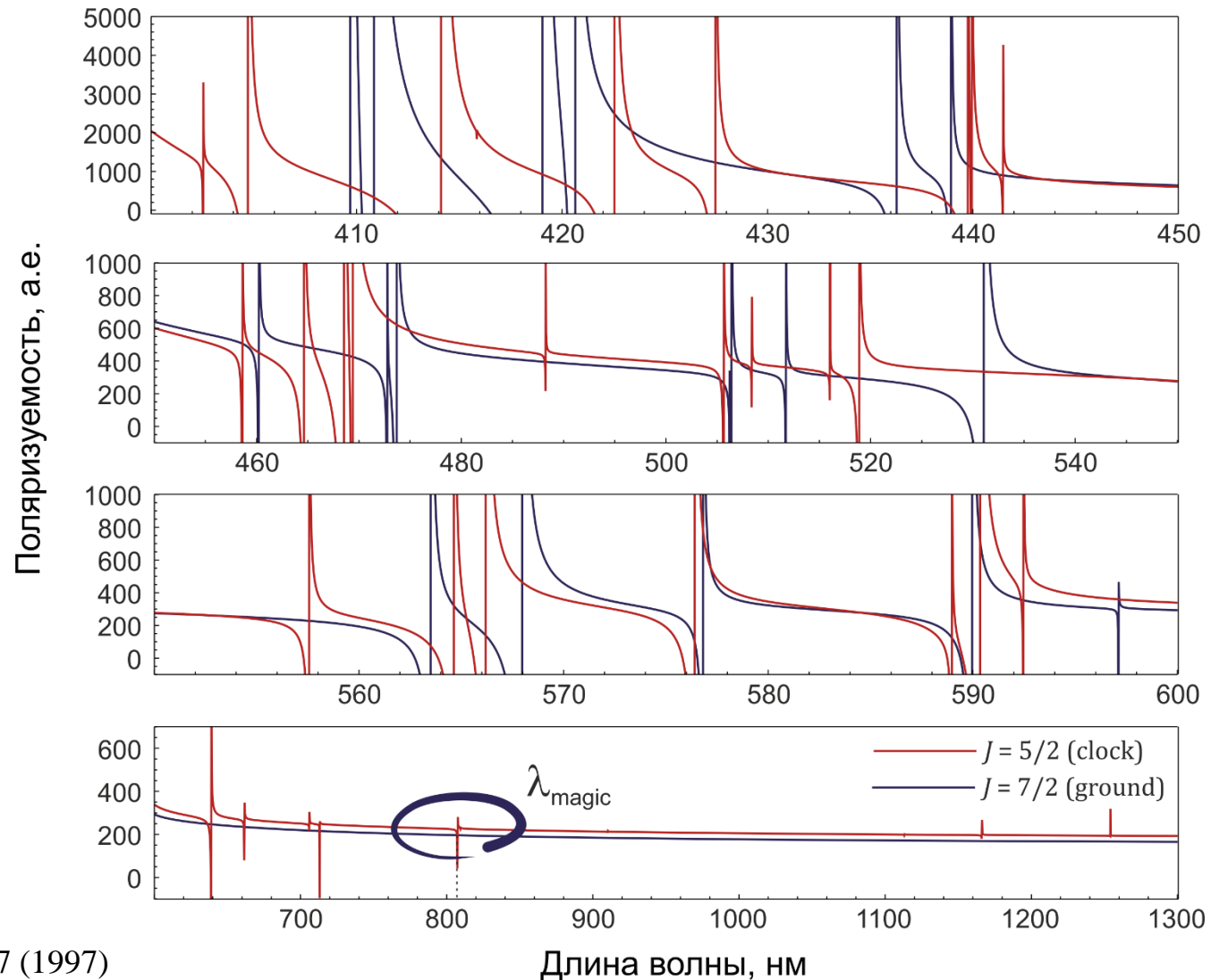
План

- Расчет поляризуемостей уровней часового перехода
- Экспериментальный поиск магической длины волны
 - Охлаждение и захват атомов
 - Усиливающий резонатор
 - Оптическая накачка
 - Результаты
- Статическая поляризуемость
- Квадратичный эффект Зеемана

Вычисление поляризуемостей

$$\alpha_{Fm}(\omega) = \frac{3}{2} \frac{c^3 \hbar^4}{a_0^3} \sum_{F'} \frac{2F_u + 1}{(E_{F'} - E_F)^2} \begin{pmatrix} F_u & 1 & F_d \\ -m & 0 & m \end{pmatrix}^2 \times \frac{A_{F_u \rightarrow F_d}}{(E_{F'} - E_F)^2 - (\hbar\omega)^2},$$

- Использованы экспериментальные данные о спектре Tm [1] и результаты расчетов в COWAN
- Учен вклад непрерывного и дискретного спектров

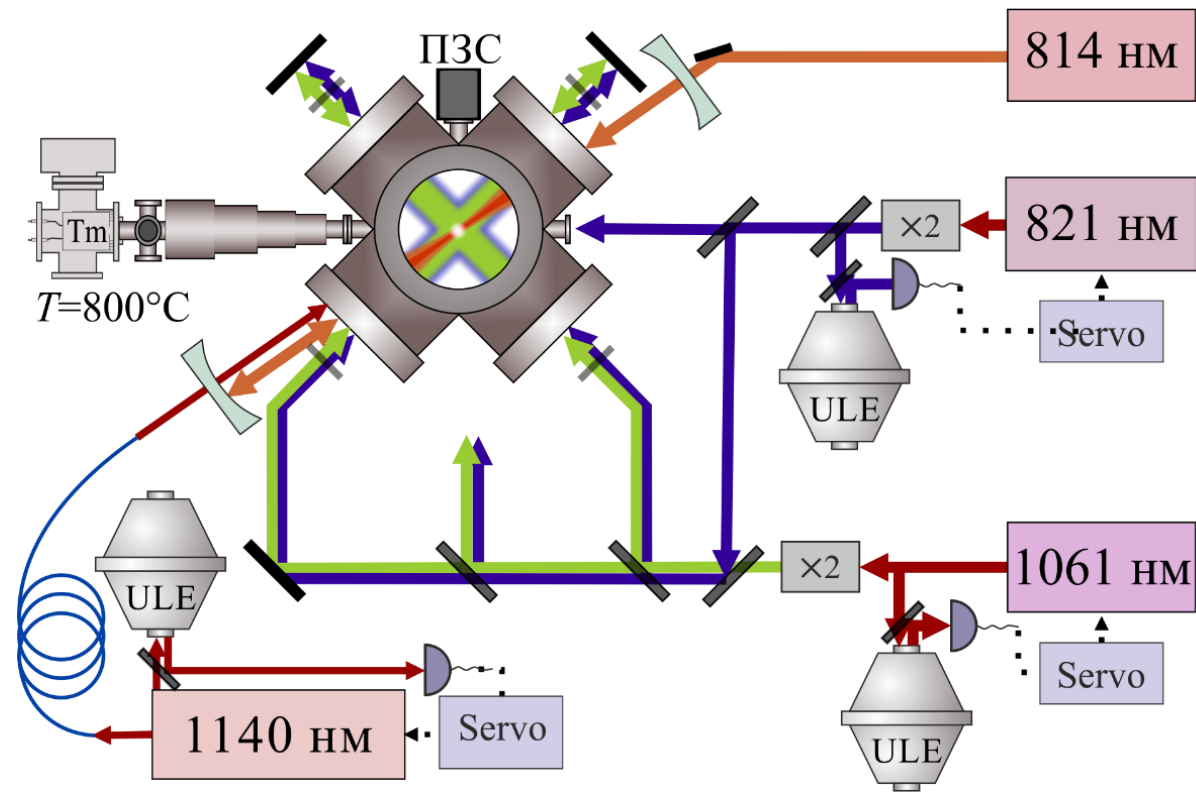
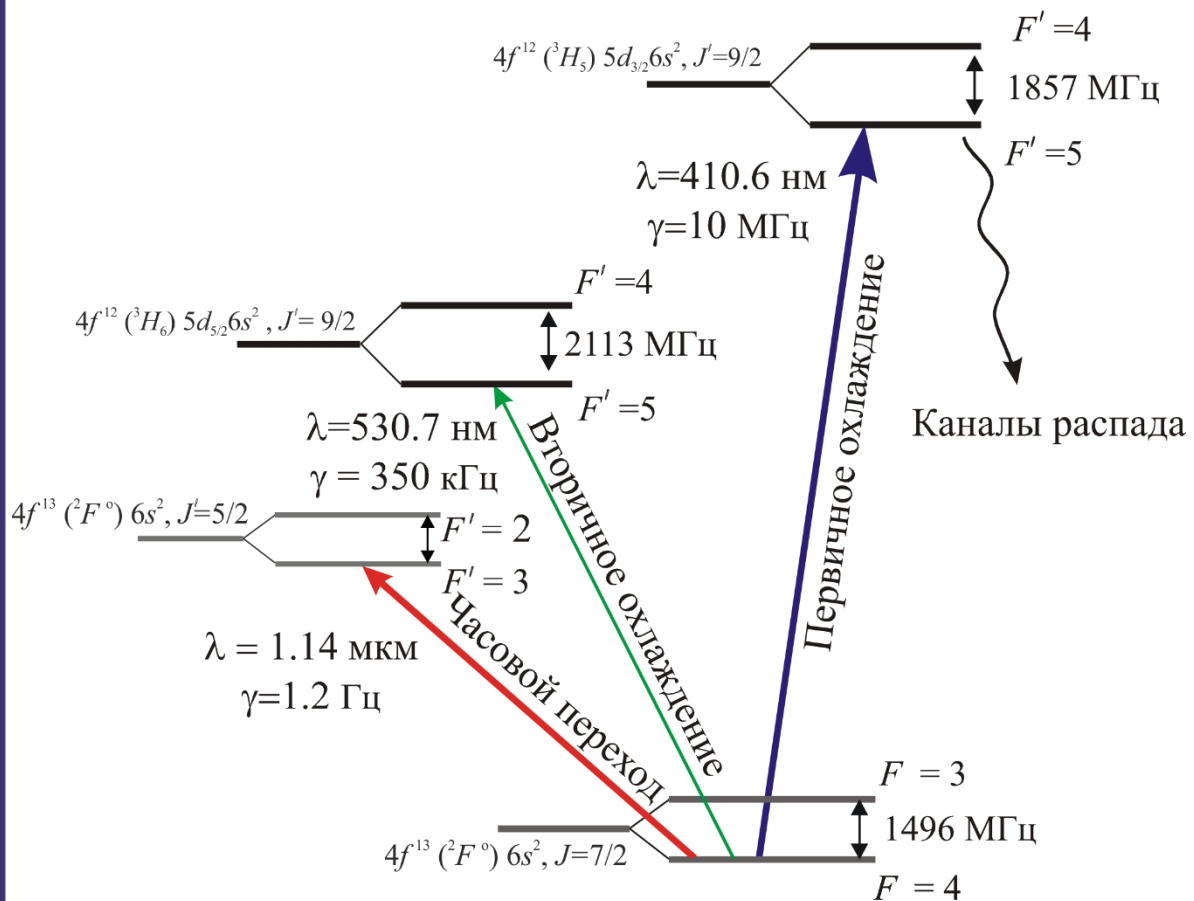


[1] M. E. Wickliffe and J. E. Lawler, J. Opt. Soc. Am. B, 14 (4), 737 (1997)

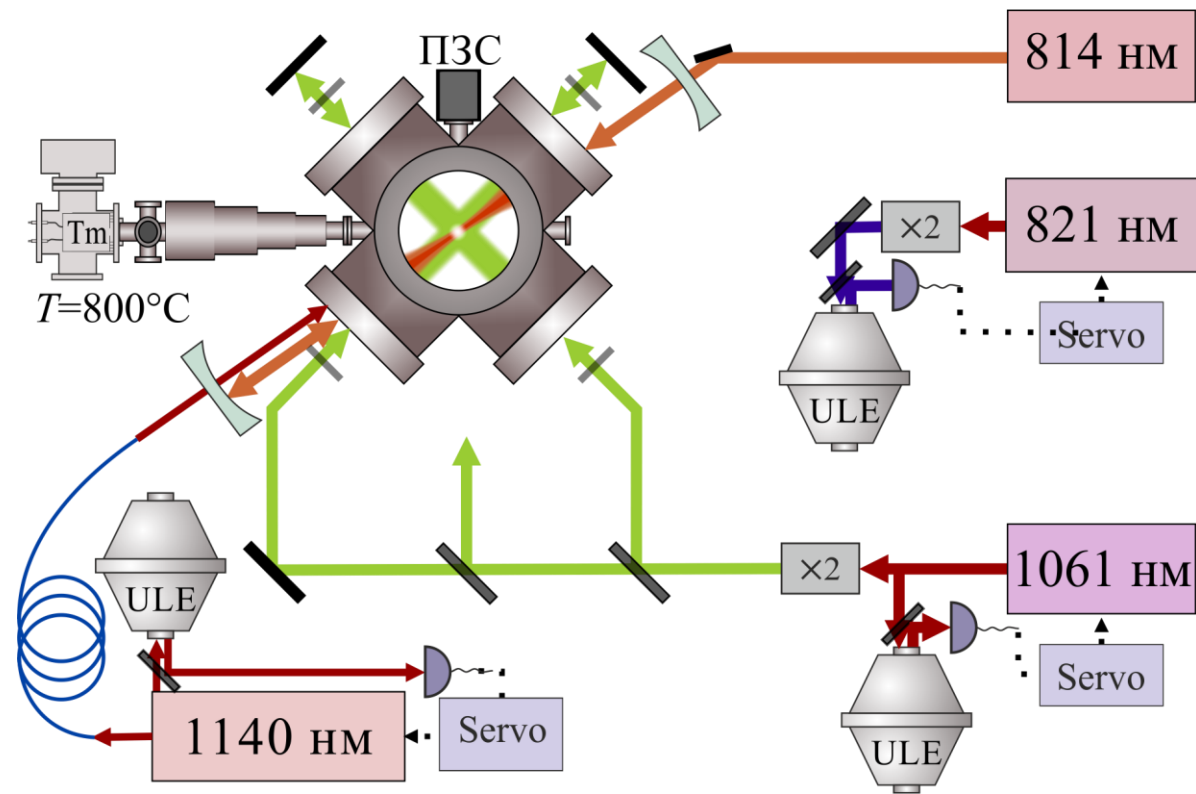
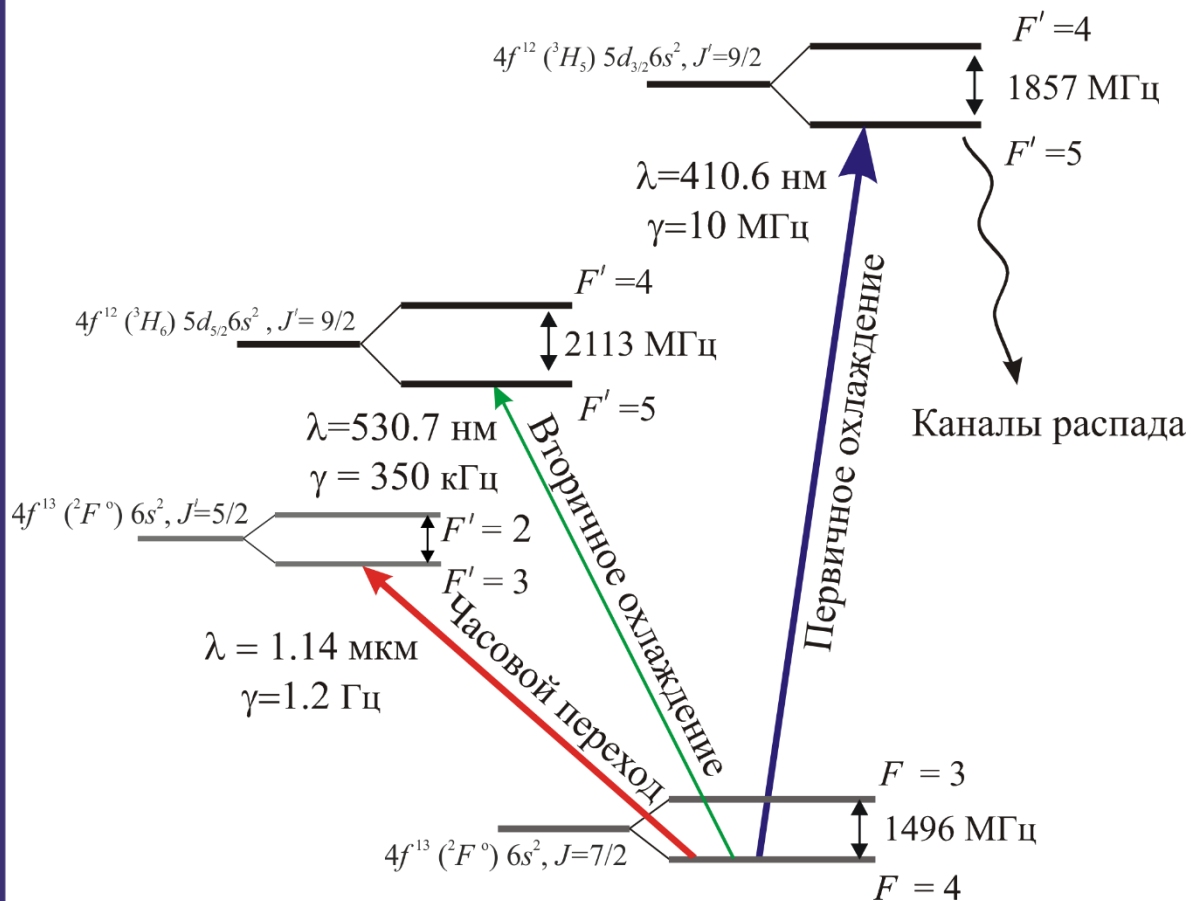
План

- Расчет поляризуемостей уровней часового перехода
- Экспериментальный поиск магической длины волны
 - Охлаждение и захват атомов
 - Усиливающий резонатор
 - Оптическая накачка
 - Результаты
- Статическая поляризуемость
- Квадратичный эффект Зеемана

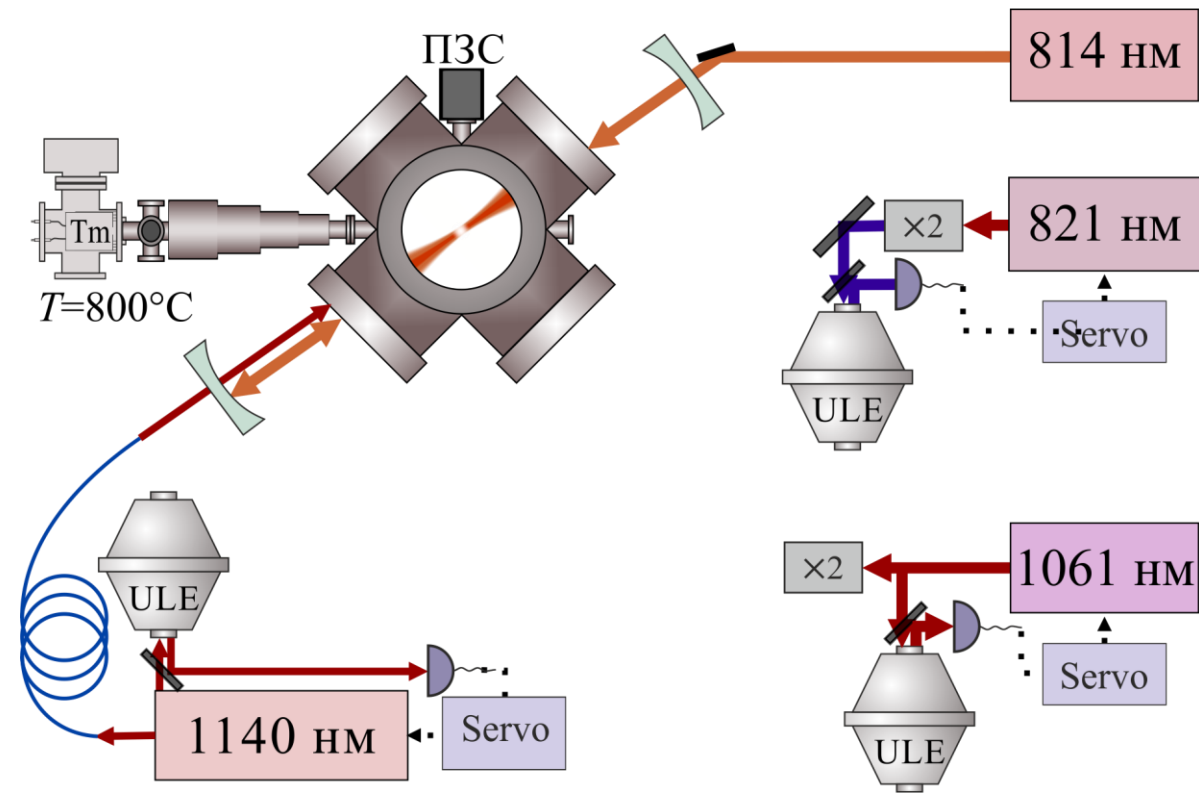
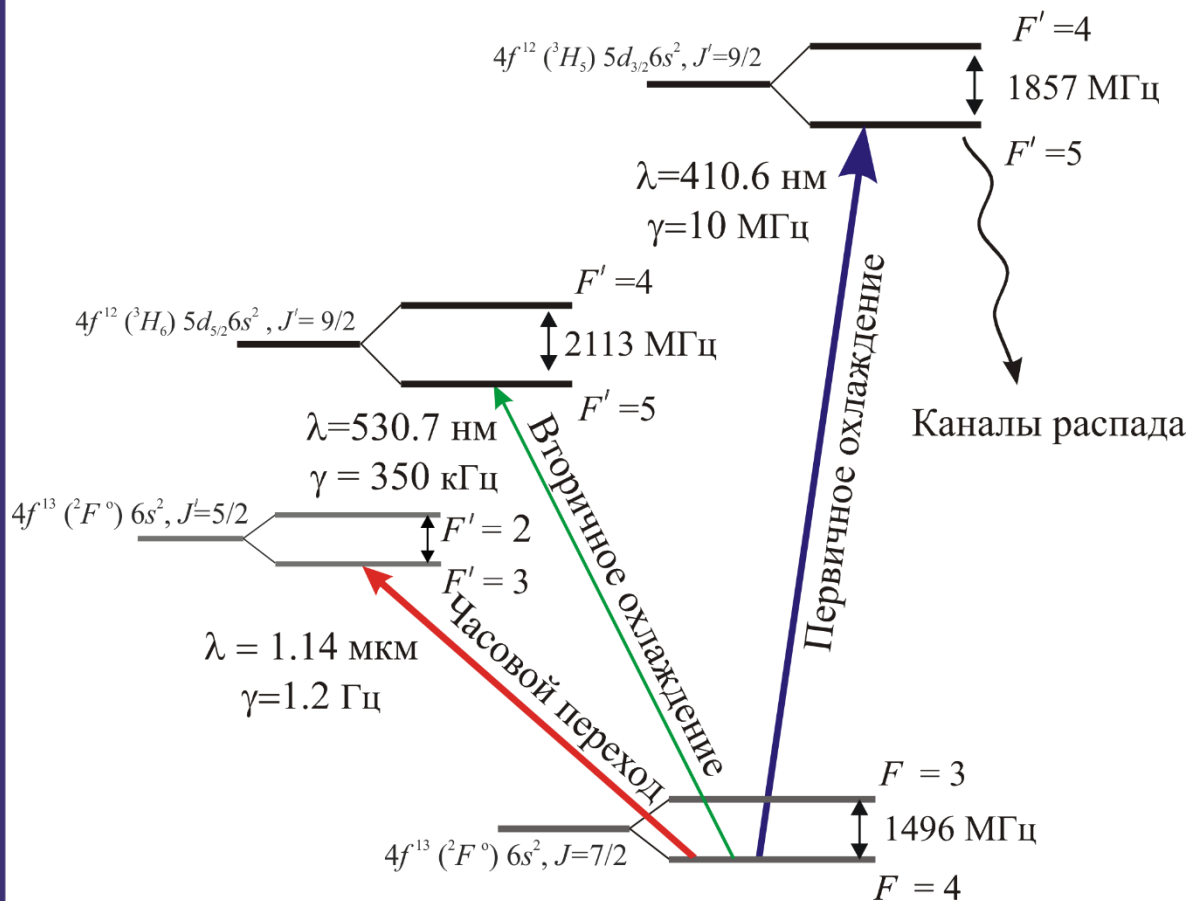
Охлаждение и захват атомов



Охлаждение и захват атомов

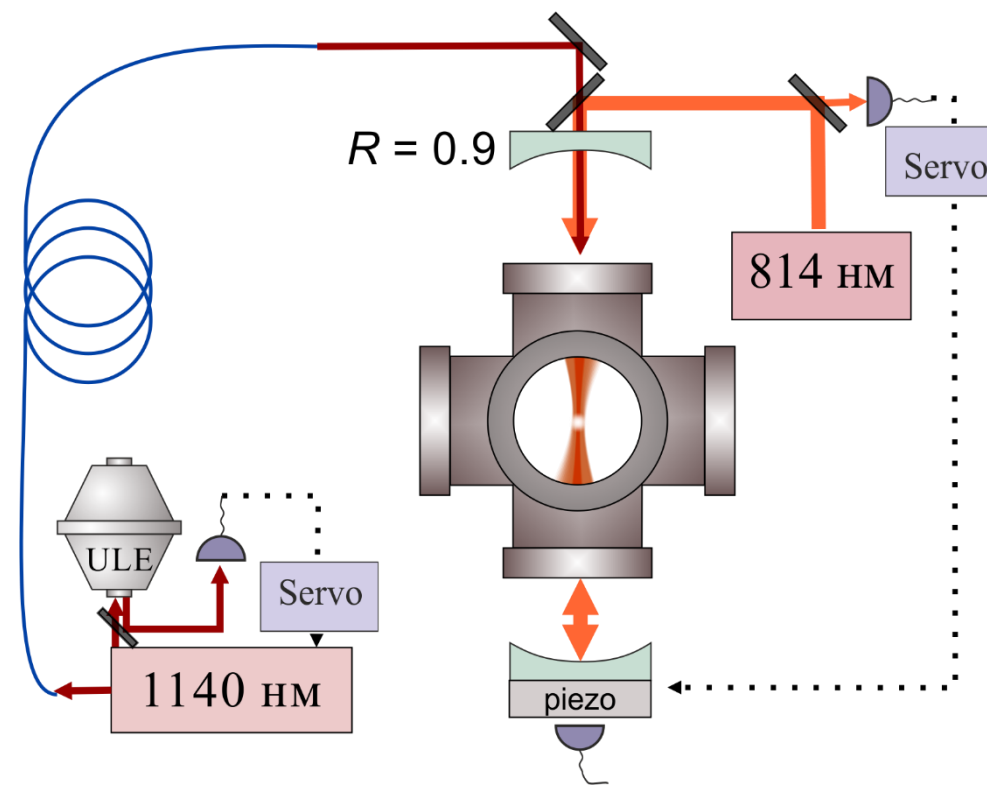


Охлаждение и захват атомов



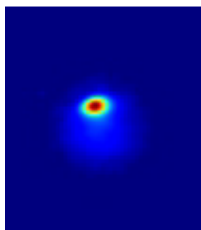
Усиливающий резонатор

- Увеличение интенсивности в 10 раз
- Контроль размера перетяжки
- Стабилизация интенсивности

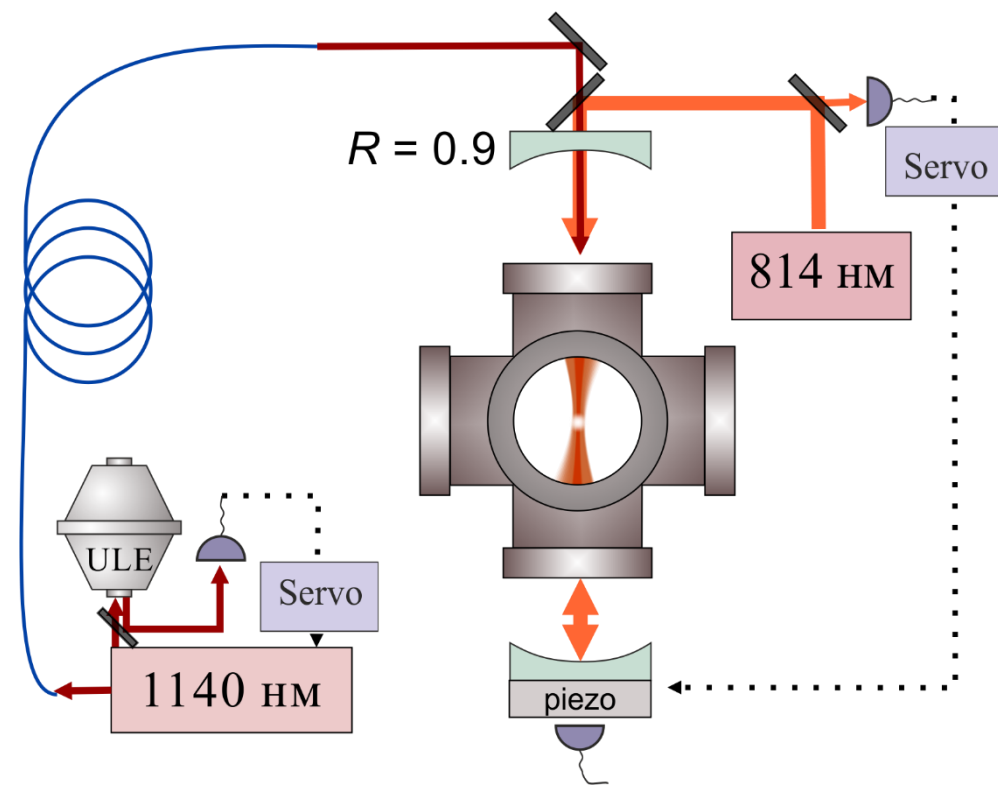


Усиливающий резонатор

- Увеличение интенсивности в 10 раз
- Контроль размера перетяжки
- Стабилизация интенсивности

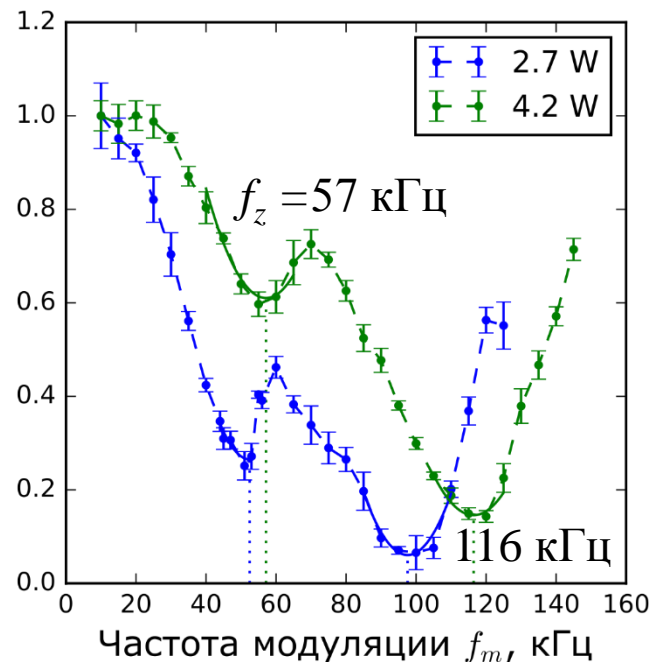
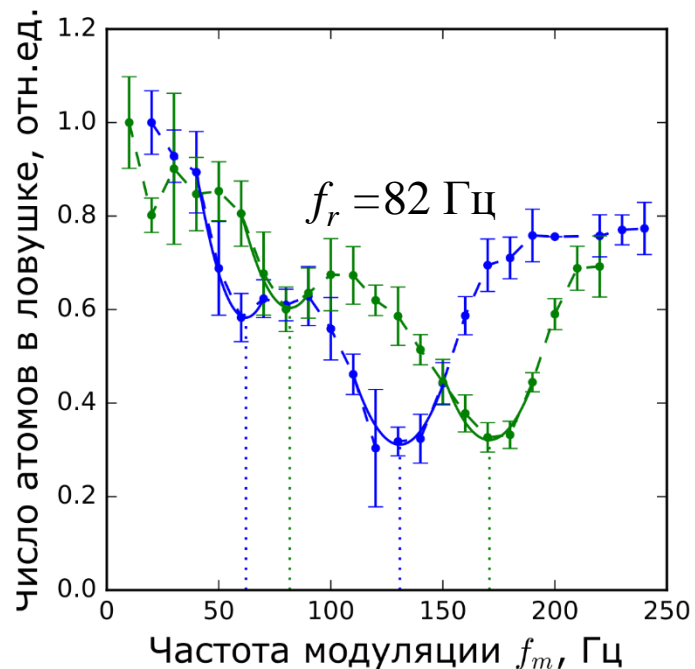


Эффективность
перезахвата 30%

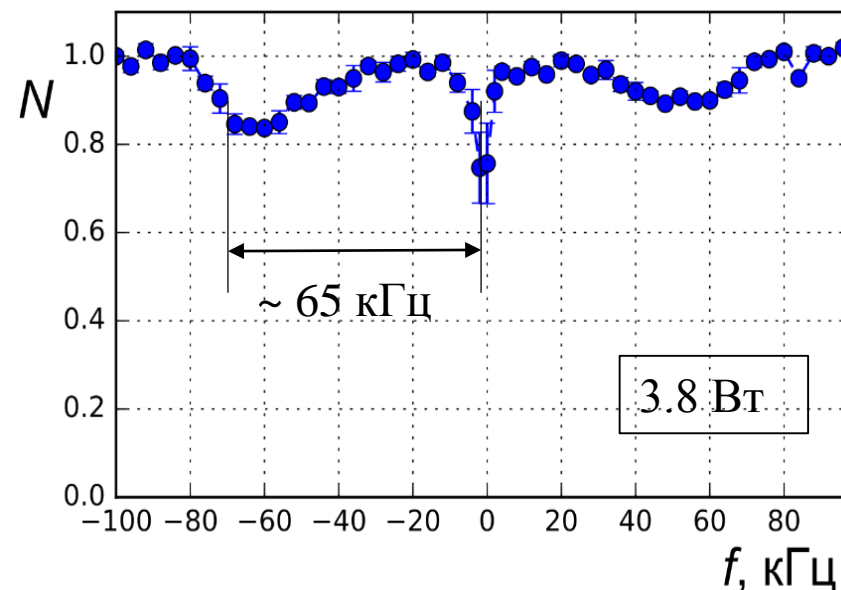


Усиливающий резонатор

Параметрические резонансы



Колебательные сайд-бенды



$$f_z = \frac{\sqrt{2}\pi w_0}{\lambda} \times f_r$$

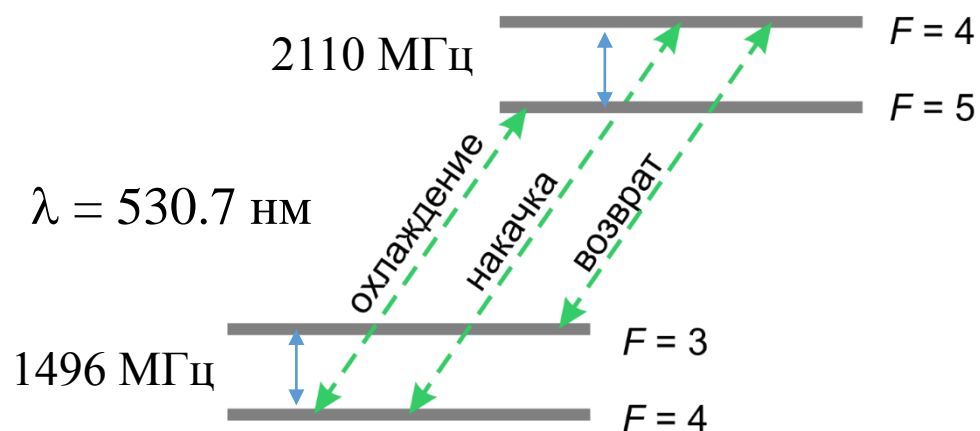
$$f_r = \frac{2}{\pi w_0^2} \sqrt{\frac{a_0^3 \alpha_s P}{cm}}$$

Размер перетяжки 125 ± 10 мкм , расчетный 112 мкм

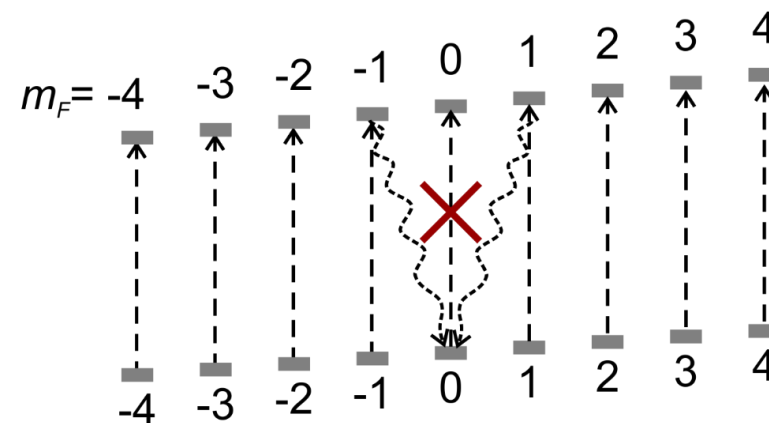
$\alpha = 144 \pm 40$, расчетное значение $\alpha = 195$

Оптическая накачка

- Линейный эффект Зеемана
- Диполь-дипольное взаимодействие

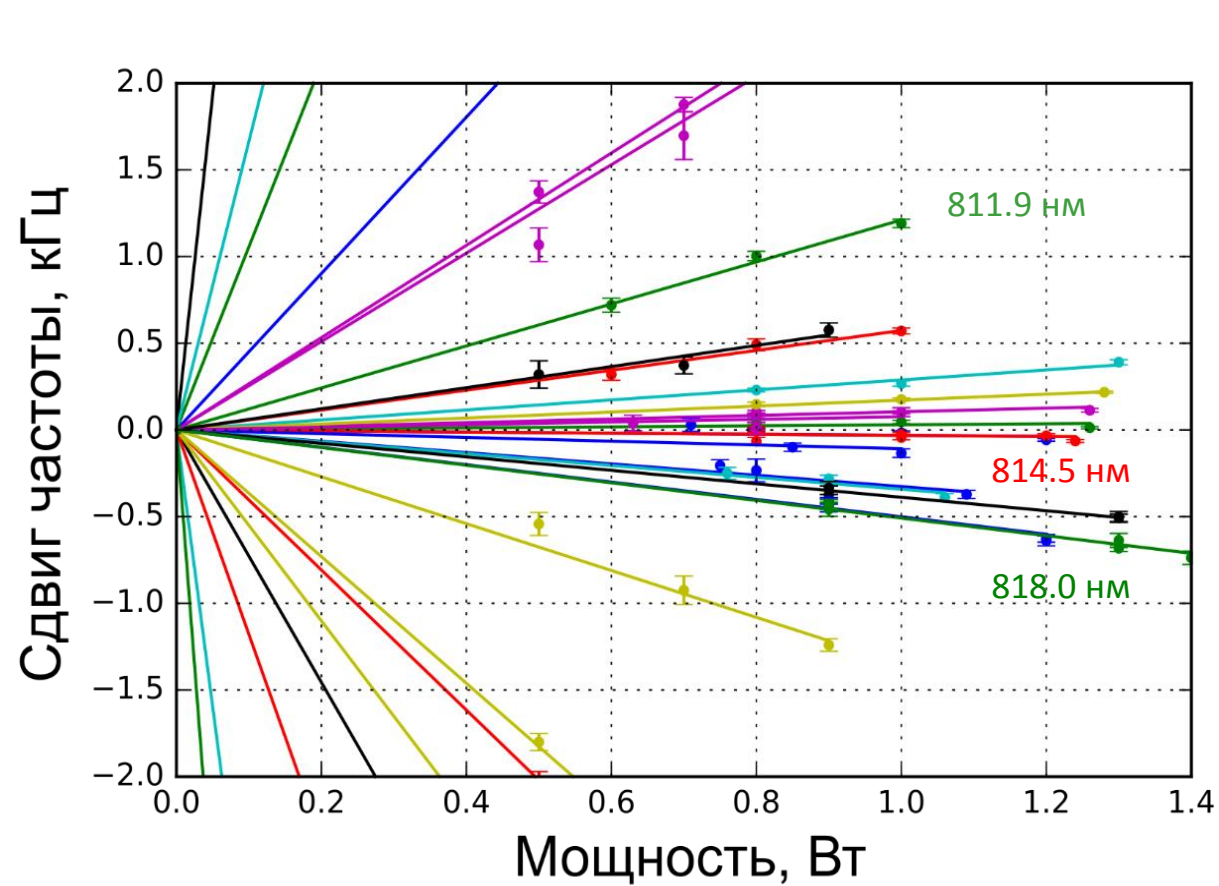
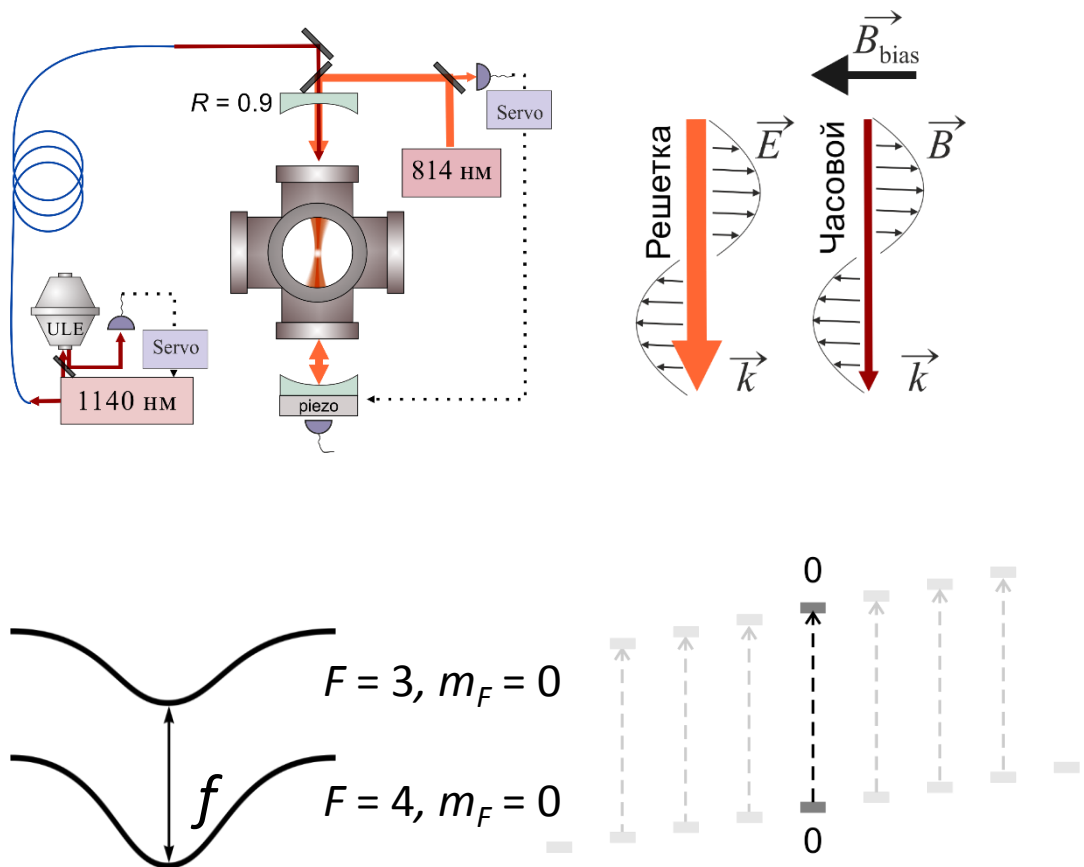


$$\Delta f = 0 \text{ для } m_F = 0$$

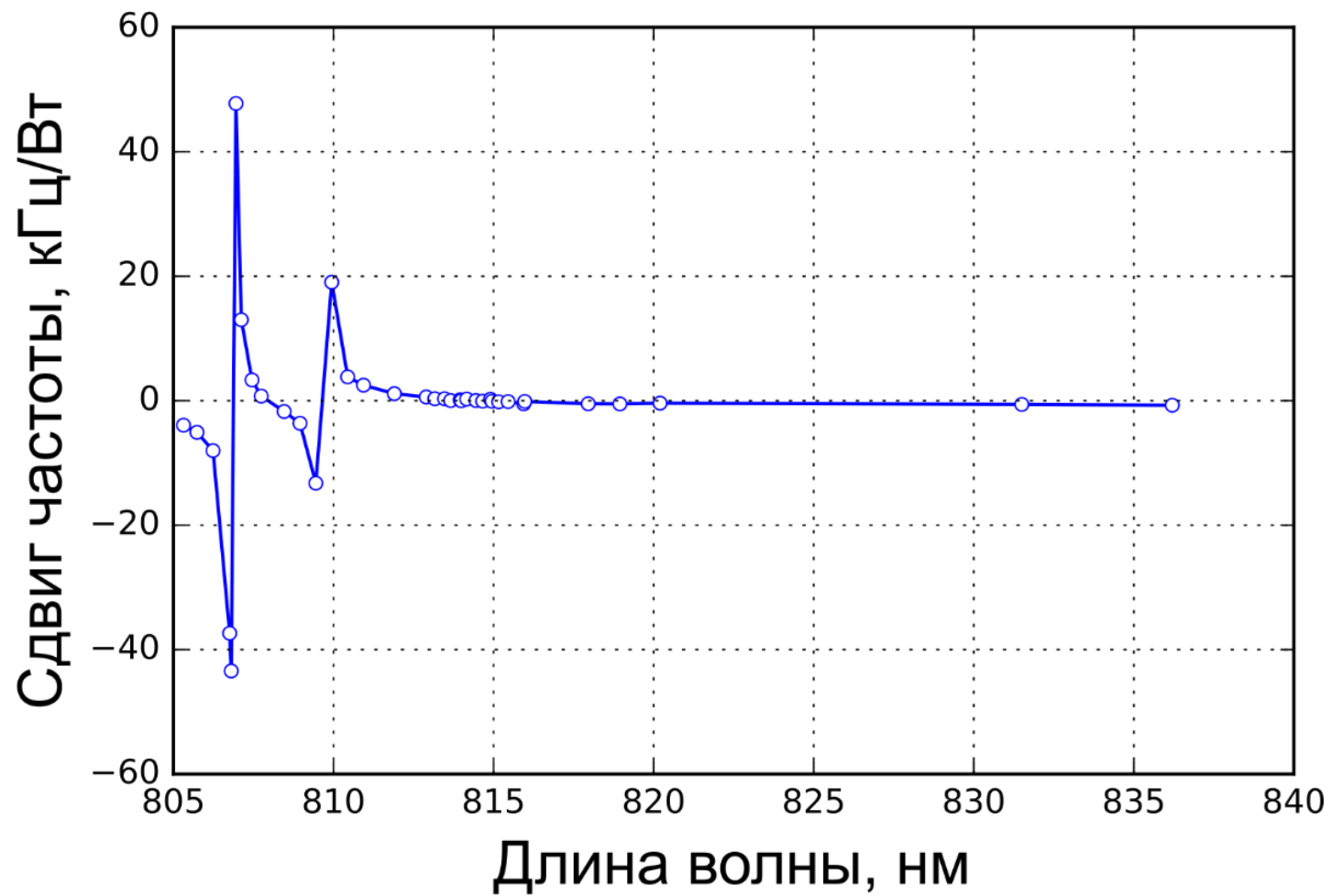


Доля атомов в $m_F = 0 \sim 60\%$

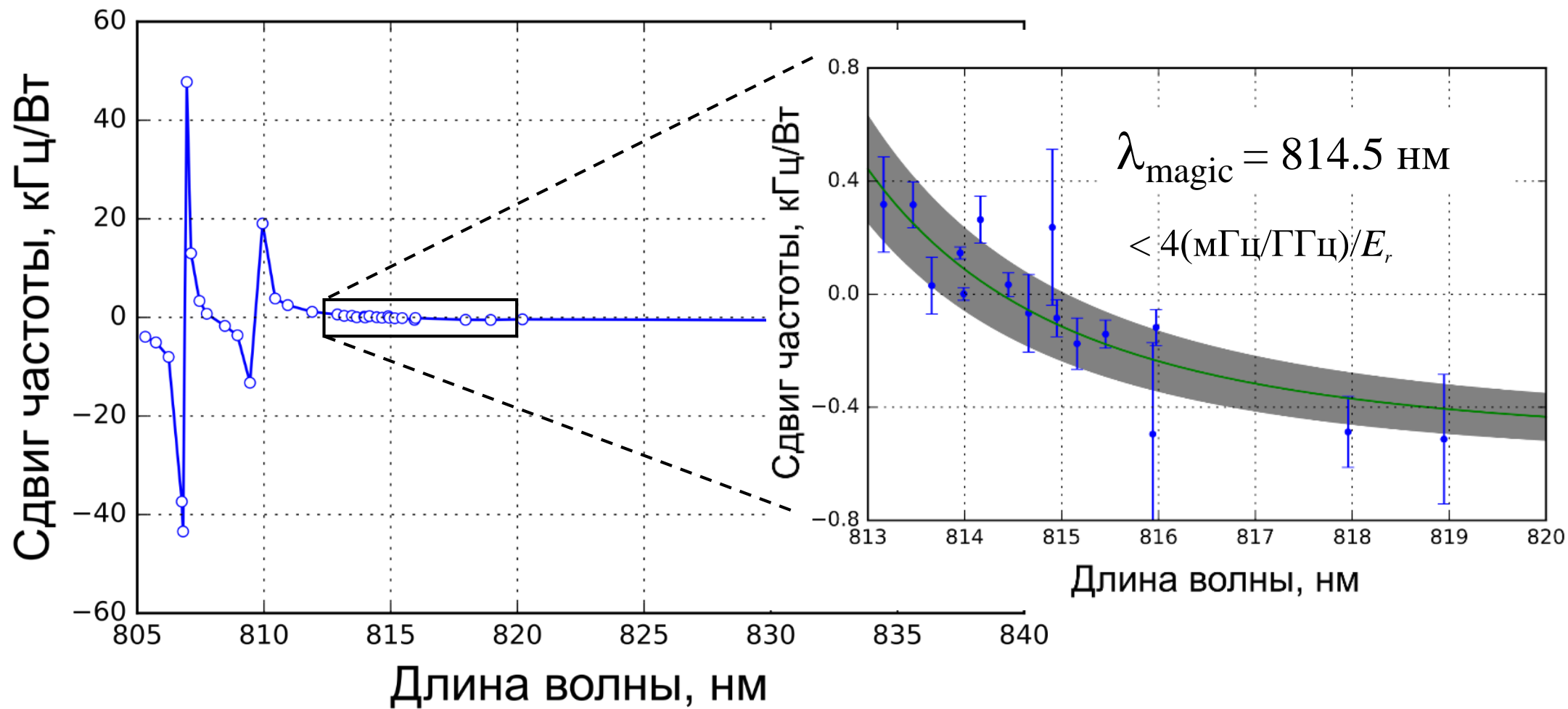
Магическая длина волны



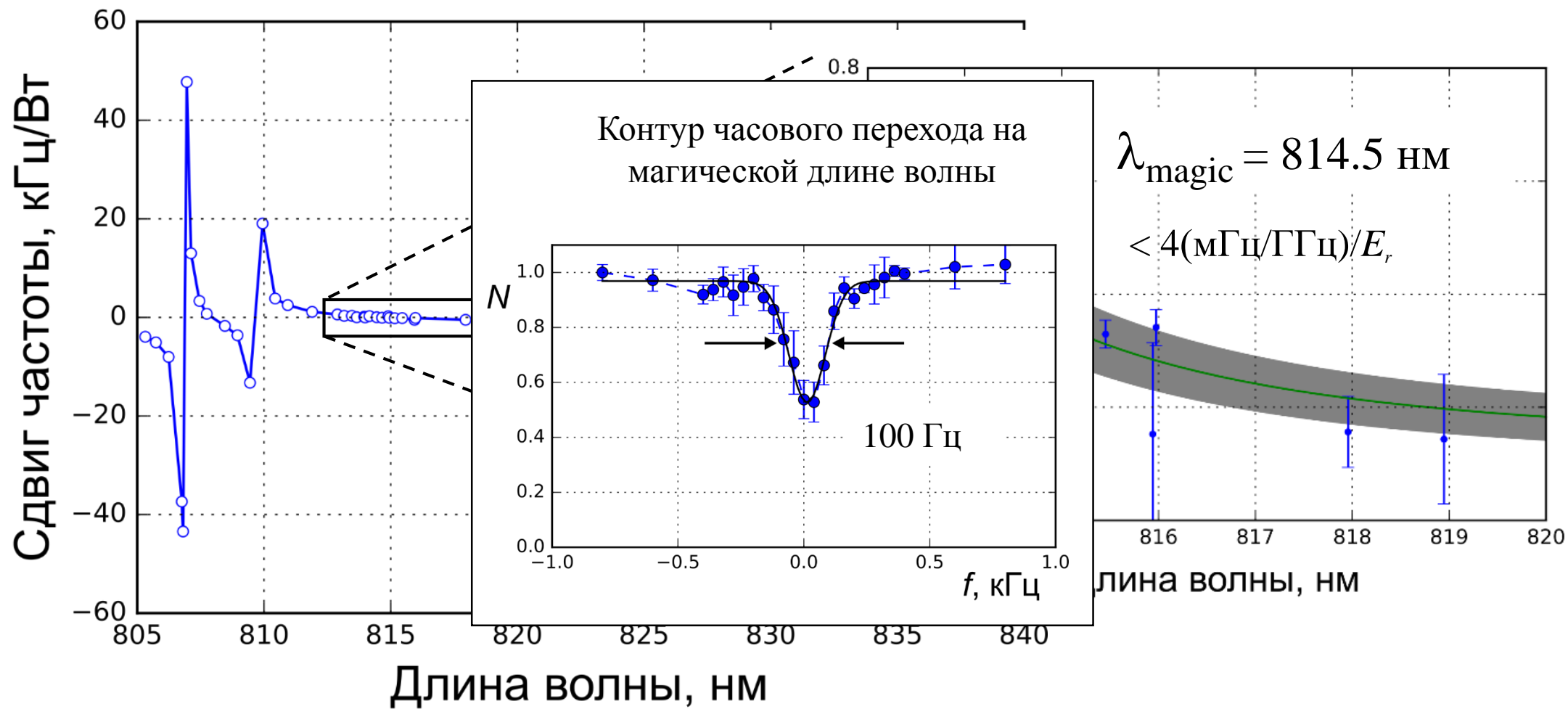
Магическая длина волны



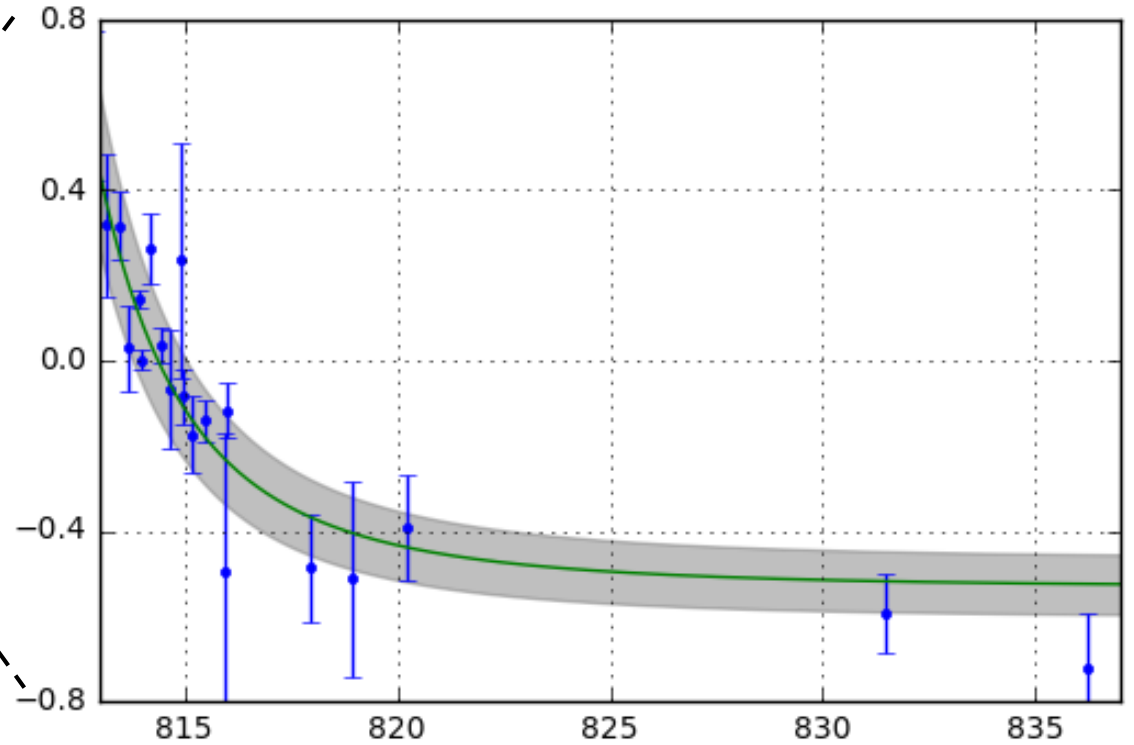
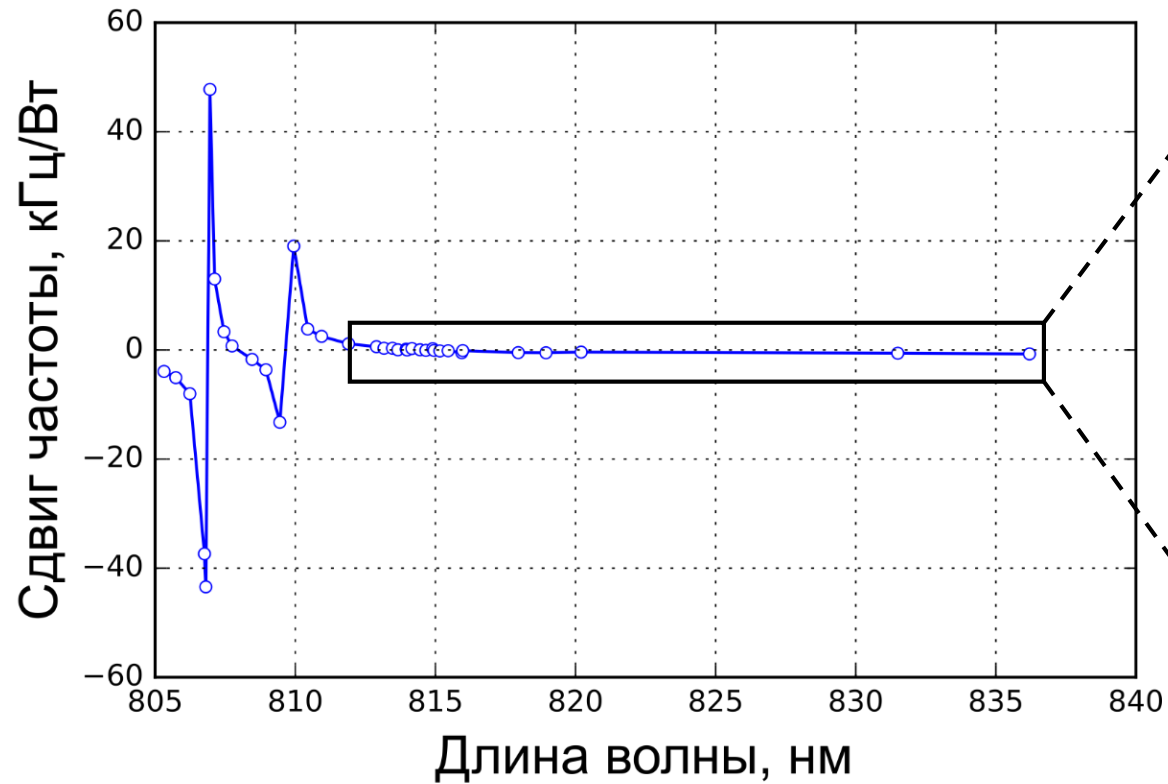
Магическая длина волны



Магическая длина волны



Магическая длина волны

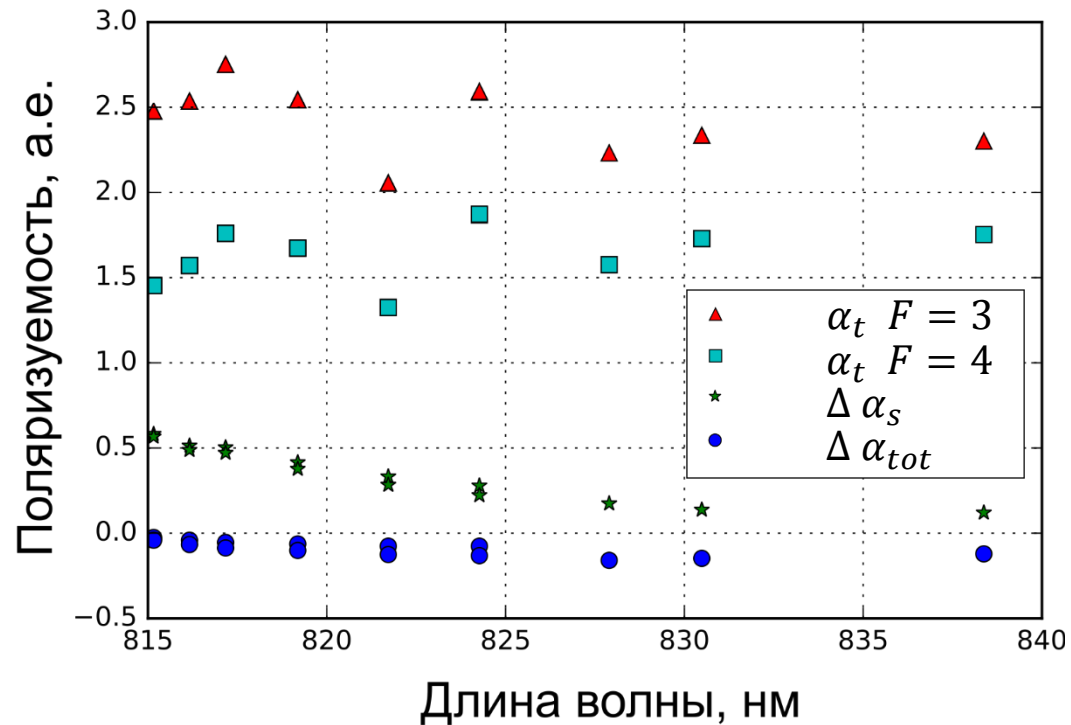
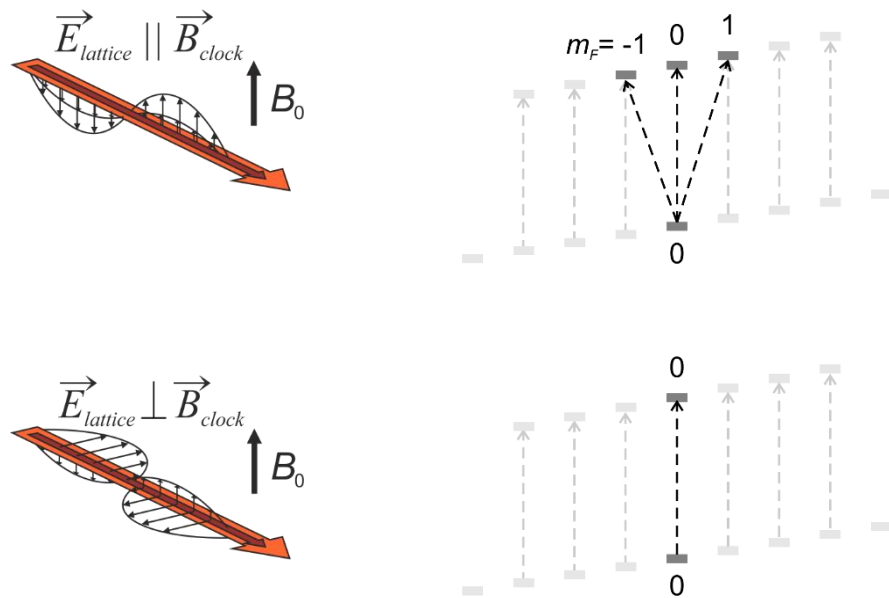


Маленькая поляризуемость в длинноволновом пределе

План

- Расчет поляризуемостей уровней часового перехода
- Экспериментальный поиск магической длины волны
 - Охлаждение и захват атомов
 - Усиливающий резонатор
 - Оптическая накачка
 - Результаты
- Статическая поляризуемость
 - Квадратичный эффект Зеемана

Статическая поляризуемость



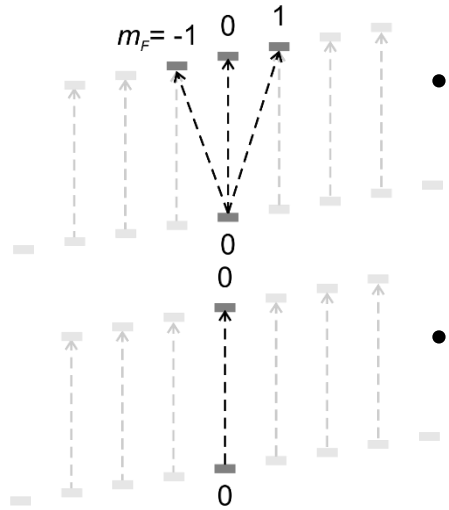
$$\Delta f_{BBR} = -\Delta\alpha_0^S \frac{a_0^3 \pi^2 k_B^4}{15c^3 \hbar^4} T^4 = -1.17 \times 10^{-12} \Delta\alpha_0^S [a. e.] T^4 [K]$$

$$\Delta f_{BBR} < 10 \text{ мГц @ 300 К}$$

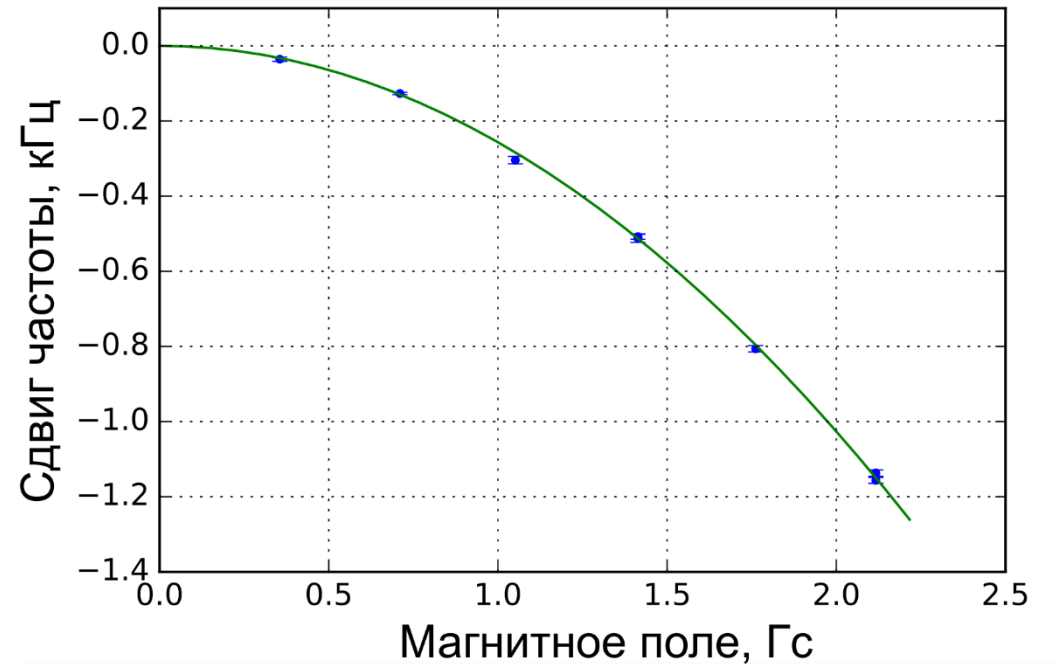
План

- Расчет поляризуемостей уровней часового перехода
- Экспериментальный поиск магической длины волны
 - Охлаждение и захват атомов
 - Усиливающий резонатор
 - Оптическая накачка
 - Результаты
- Статическая поляризуемость
 - Квадратичный эффект Зеемана

Квадратичный эффект Зеемана



- Калибровка магнитного поля по сдвигу частот $m_F = 0 \rightarrow m_F = \pm 1$
- Квадратичный эффект Зеемана по сдвигу частот $m_F = 0 \rightarrow m_F = 0$



$$E_{F=J \pm \frac{1}{2}}(m_F, B) = E_F^0 + g_F \mu_B^2 B_0^2 m_F \pm \frac{(g_J - g_I)^2 \mu_B^2 B_0^2}{4E_{hf}} \left(1 - \frac{m_F^2}{(2J + 1)^2} \right)$$

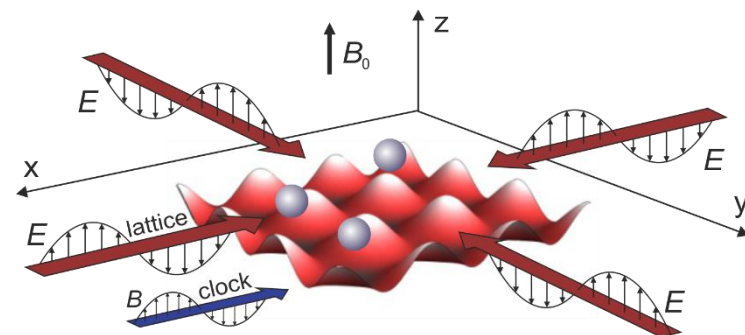
$$\Delta f_{theory} = -257.2 B_0^2 \text{ Гц/Гс}^2$$

$$\Delta f_{experiment} = -257 \pm 4 B_0^2 \text{ Гц/Гс}^2$$

Заключение

Вклад	Сдвиг частоты, мГц	Неточность после учета поправки, мГц	Неточность в относительных единицах, 10^{-18}	
BBR ($T = 300 \pm 3$ К)	20	0.8	3	✓
Эффект Зеемана ($B = 10 \pm 0.1$ мГ)	-26	0.5	2	✓
Тензорная поляризуемость	0.5	0.5	2	✓
Гиперполяризуемость ($dI/I = 10^{-3}$)	0	0.5	2	
Ван-дер-Ваальсово и квадруполь-квадрупольное взаимодействия	0.1	0.1	0.4	
Итого	-6	1.2	< 5	

Предполагаемая неточность $< 5 \times 10^{-18}$



Влияние оптической решетки

Магнитное диполь-дипольное взаимодействие
Линейный эффект Зеемана

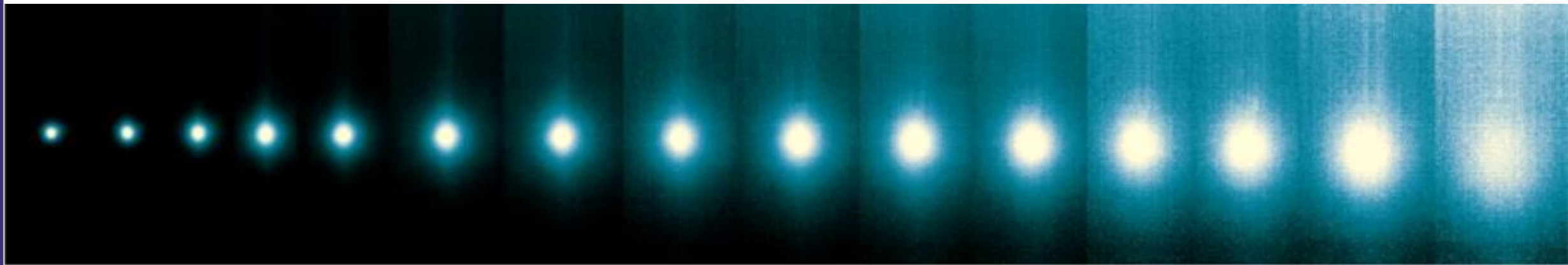
Ван-дер-Ваальсово взаимодействие

Магическая длина волны ✓
 $\lambda_{\text{magic}} = 814.5$ нм
 $< 4(\text{мГц}/\text{ГГц})/E_r$

Накачка на подуровень $m_F = 0$ ✓

2D-решетка с низким числом заполнения

Спасибо за внимание!



	$\Delta f_{BBR}, \text{Гц}$	Квадратичный эффект Зеемана, $\text{МГц}/\text{Г}^2$	Чувствительность к параметрам решетки на мдв, $(\text{мГц}/\text{ГГц})/E_r$
Tm	-0.01	-25.7	4
Sr	-1.34	-23.3	14
Yb	-2.35	-7	22
Al+	-0.008		