



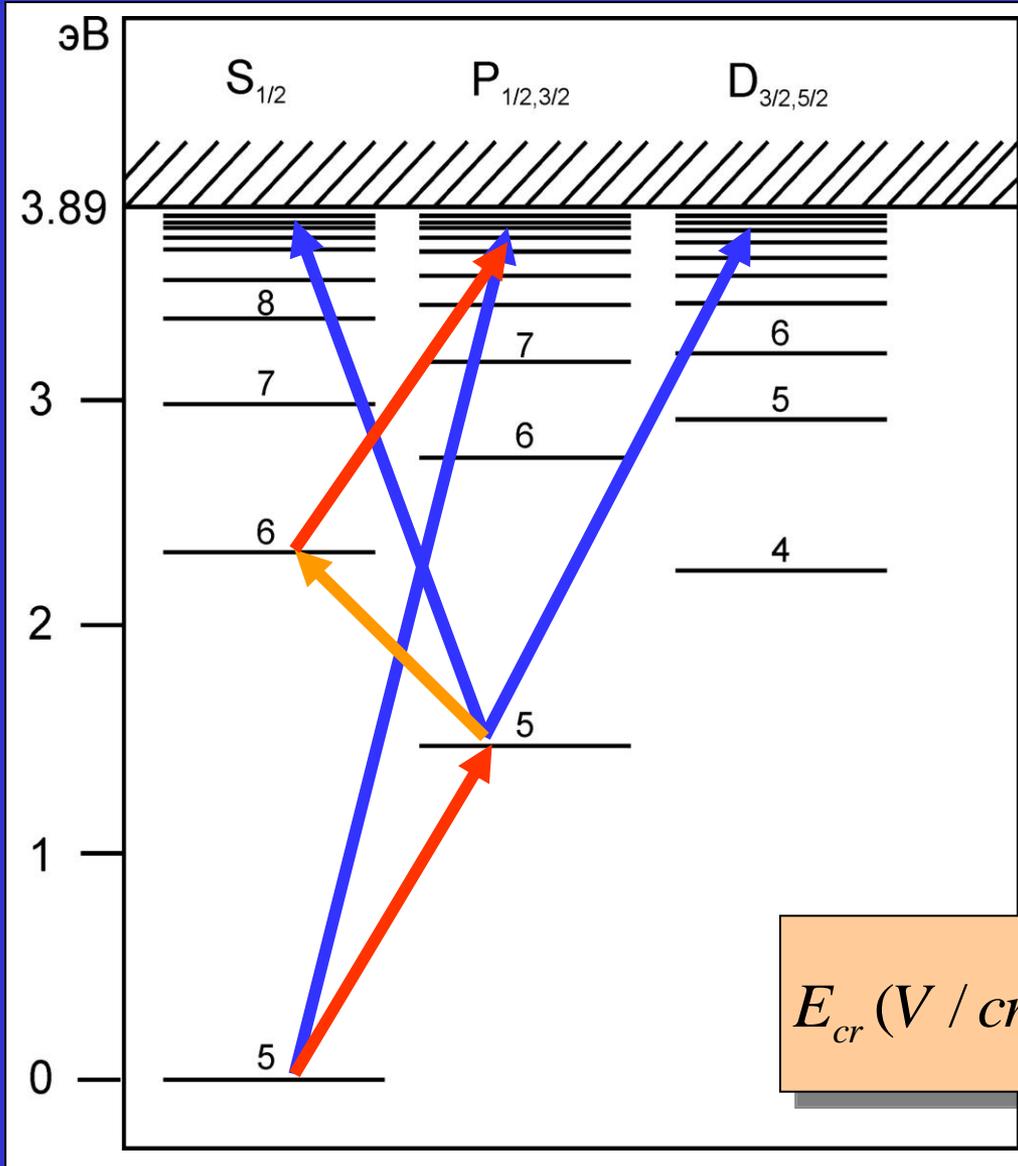
Институт физики полупроводников СО РАН  
Новосибирский государственный университет

*Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, Е.А.Якшина,  
И.И.Бетеров, И.И.Рябцев*

*Динамика трехфотонного лазерного  
возбуждения мезоскопических  
ансамблей холодных ридберговских  
атомов рубидия*

# Ридберговские атомы

Уровни энергии в атомах Rb



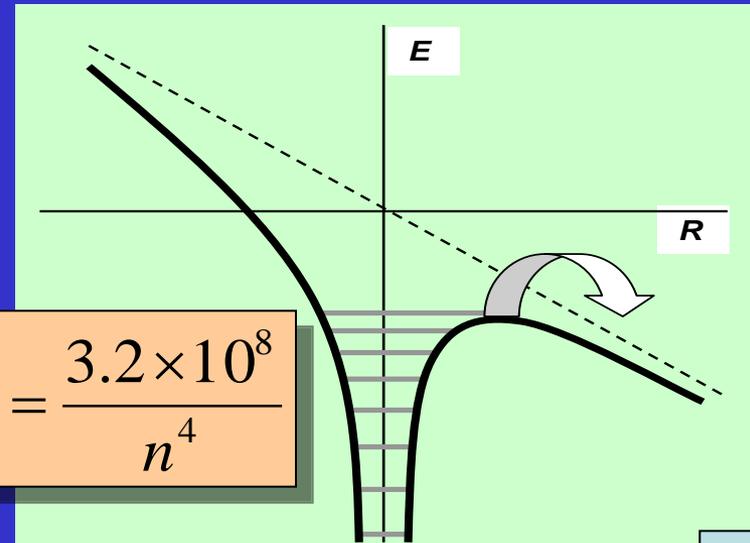
$$E_n = -\frac{Ry}{(n - \delta_L)^2}$$

$$r_n \sim n^2$$

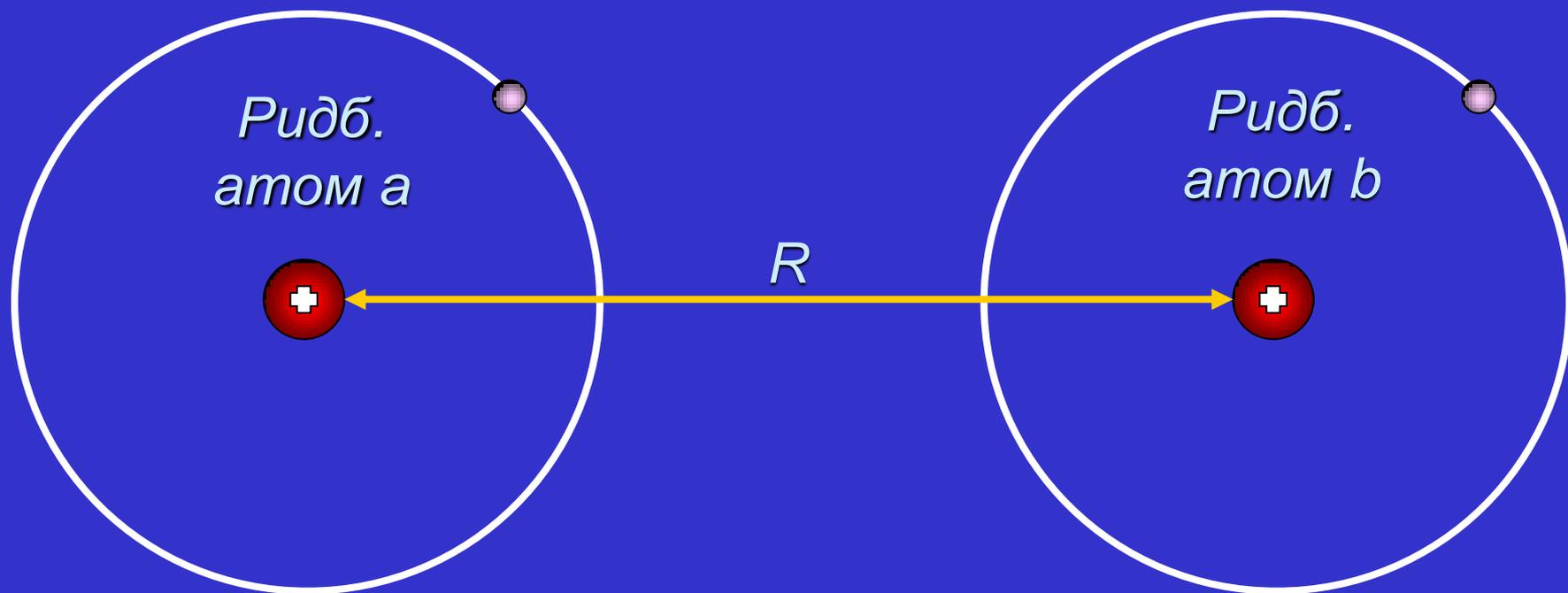
$$\tau_n \sim n^3 - n^5$$

$$\alpha_n \sim n^7$$

$$E_{cr} (V / cm) = \frac{3.2 \times 10^8}{n^4}$$



# Взаимодействие двух ридберговских атомов



*Дипольные моменты*

$$d \sim e a_0 n^2$$

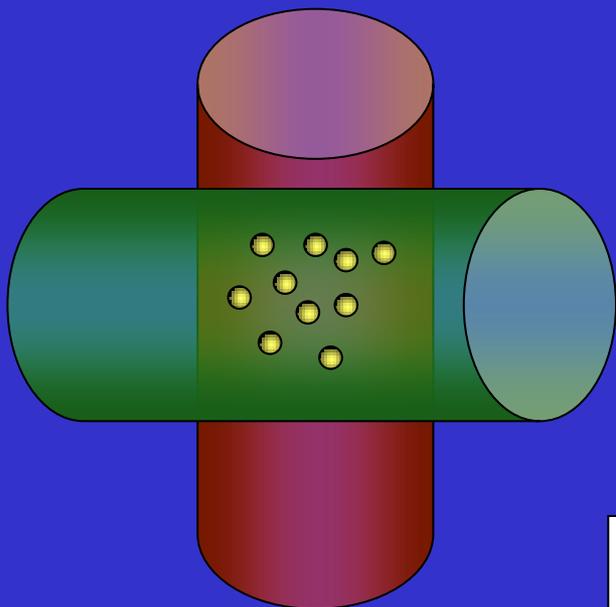
*Энергия взаимодействия*

$$V_{ab} \sim \frac{d_a d_b}{R_{ab}^3} \sim n^4$$

$V \sim 10$  МГц при  $n = 50, R \approx 5$  мкм

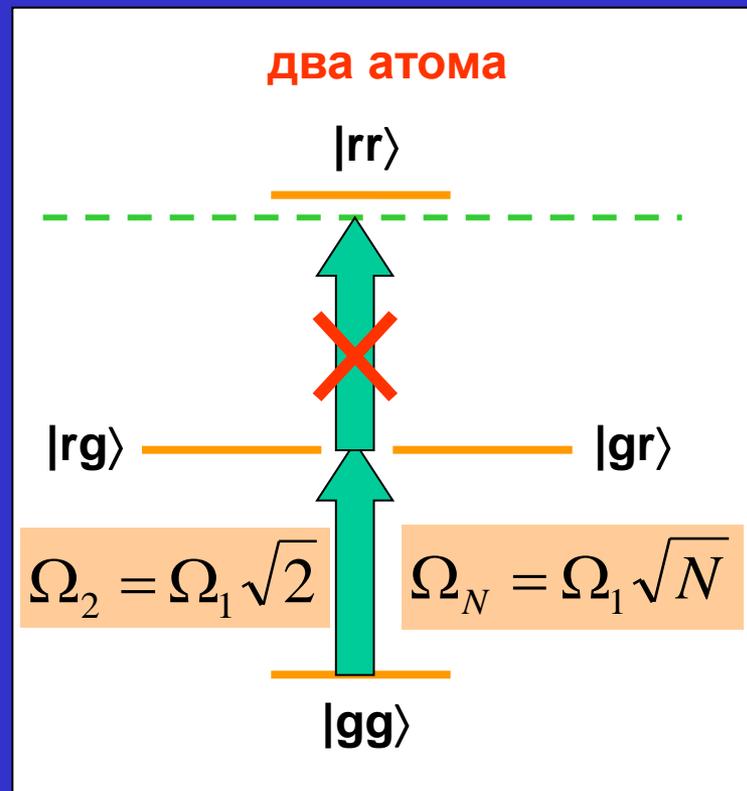
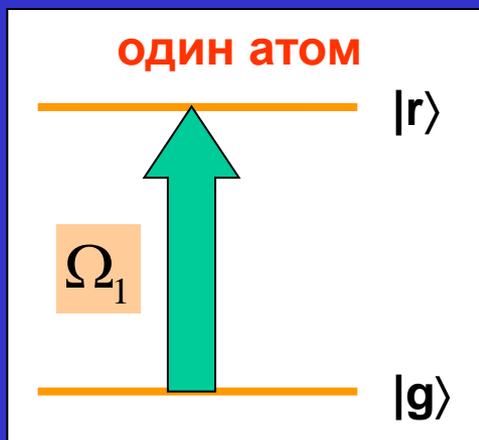
# Дипольная блокада в мезоскопических ансамблях

M. Lukin et al. PRL 87 (2001) 037901



$$\Psi = |rg\rangle + |gr\rangle$$

Условие наблюдения:  
 $\delta E_{rr} \gg \Delta\nu$  - ширины  
спектра лазерного  
возбуждения



M.Saffman et al., Rev. Mod. Phys. **82**, 2313 (2010)

D.Comparat et al., J. Opt. Soc. Am. B **27**, A208 (2010)

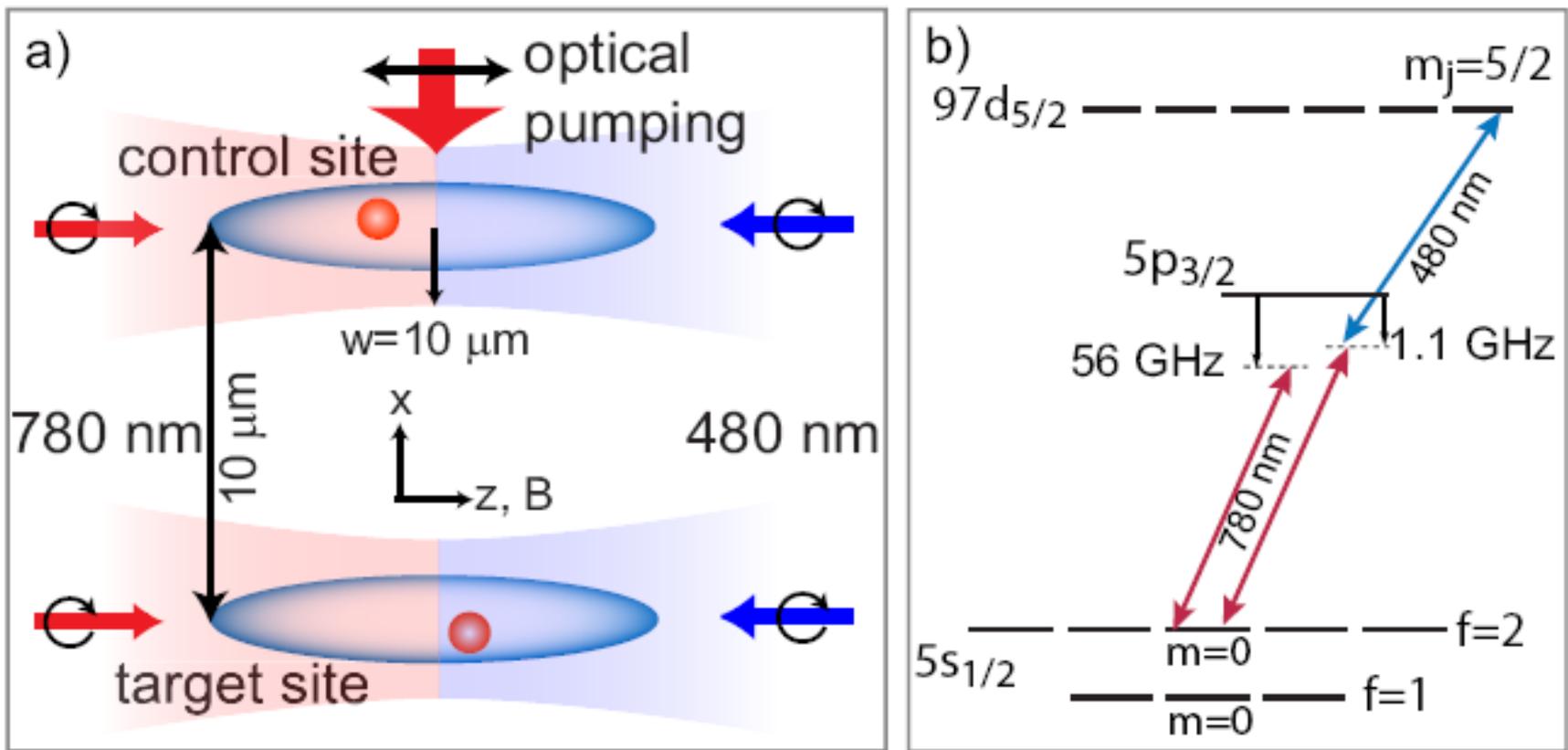


## Demonstration of a Neutral Atom Controlled-NOT Quantum Gate

L. Isenhower, E. Urban, X.L. Zhang, A.T. Gill, T. Henage, T.A. Johnson,\* T.G. Walker, and M. Saffman

*Department of Physics, University of Wisconsin, 1150 University Avenue, Madison, Wisconsin 53706 USA*

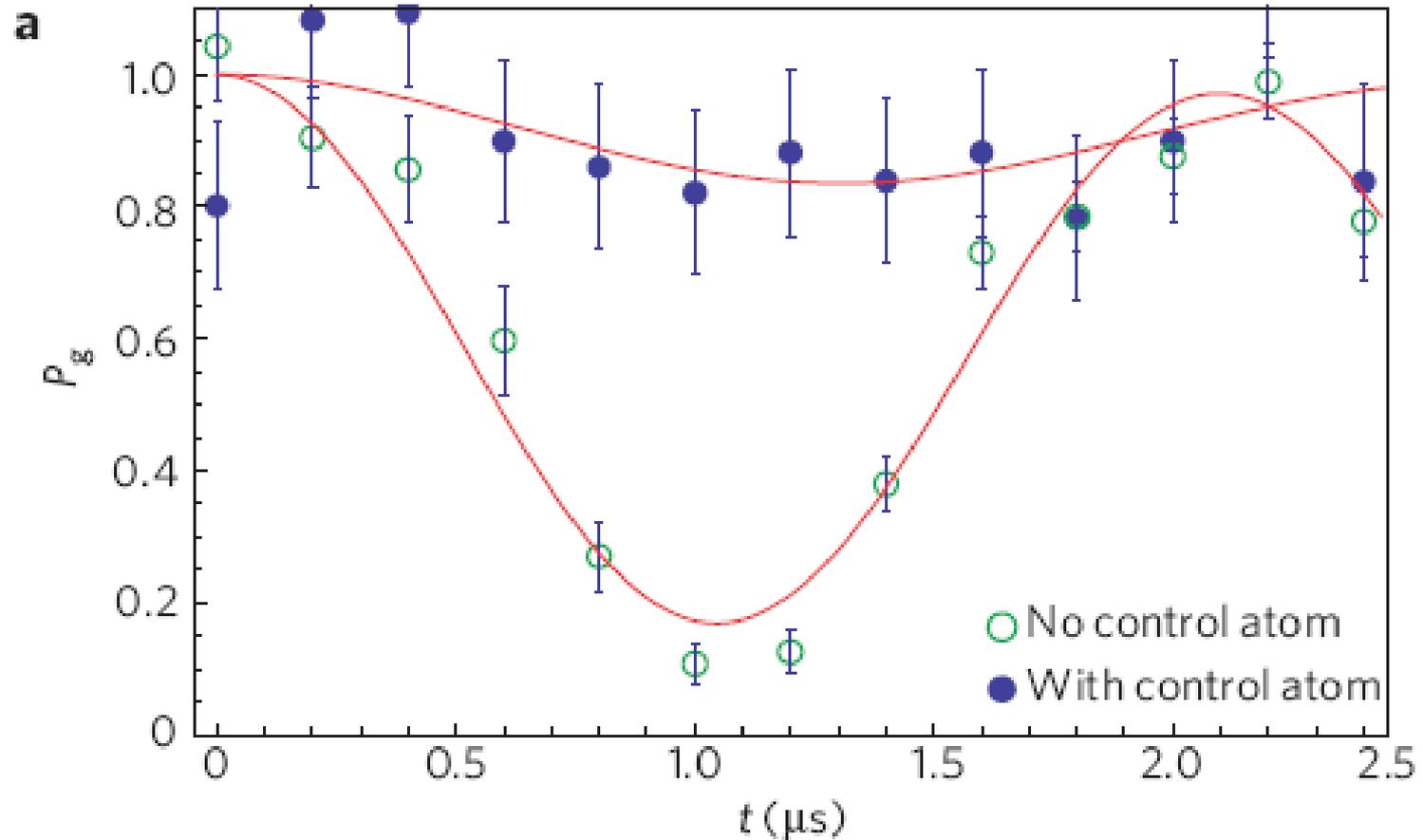
(Received 5 August 2009; published 8 January 2010)



Fidelity of two-qubit gates  $F \sim 80\%$ .

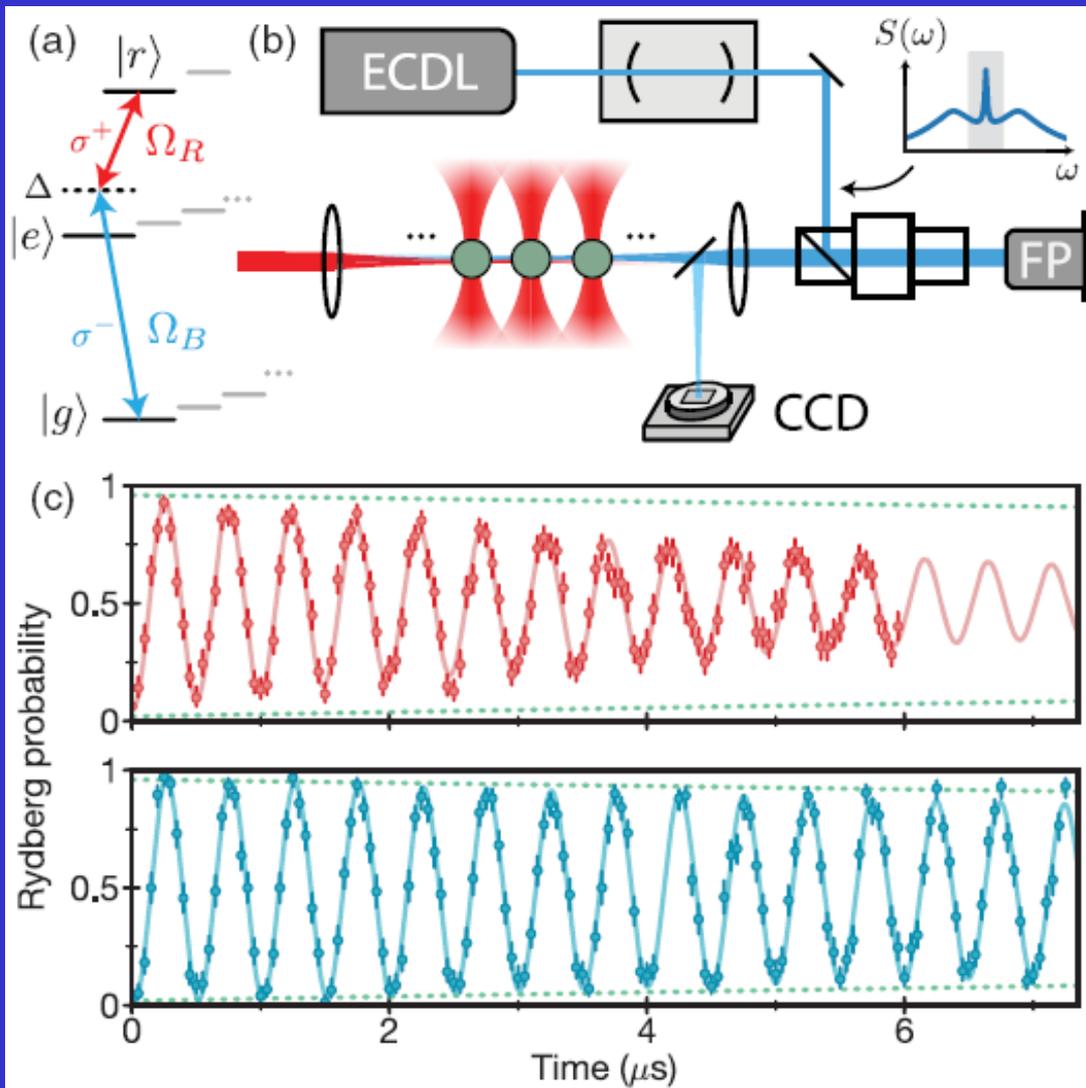
# Observation of Rydberg blockade between two atoms

E. Urban, T. A. Johnson, T. Henage, L. Isenhower, D. D. Yavuz, T. G. Walker and M. Saffman\*



## High-Fidelity Control and Entanglement of Rydberg-Atom Qubits

Harry Levine,<sup>1\*</sup> Alexander Keesling,<sup>1</sup> Ahmed Omran,<sup>1</sup> Hannes Bernien,<sup>1</sup> Sylvain Schwartz,<sup>2</sup> Alexander S. Zibrov,<sup>1</sup> Manuel Endres,<sup>3</sup> Markus Greiner,<sup>1</sup> Vladan Vuletić,<sup>4</sup> and Mikhail D. Lukin<sup>1</sup>



Уменьшены фазовые шумы ридберговских лазеров. Получено  $\Omega_R=2$  МГц,  $T_2=27$  мкс.

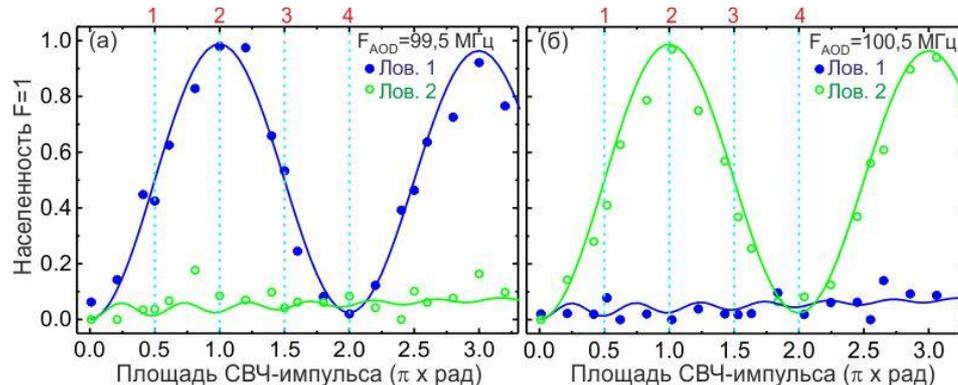
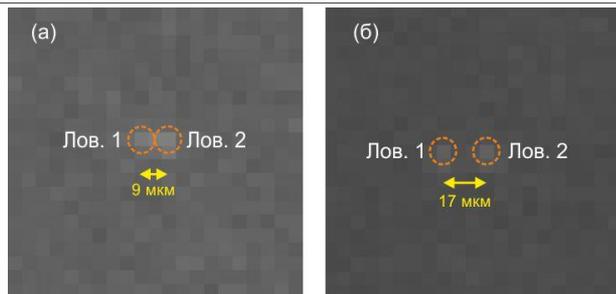
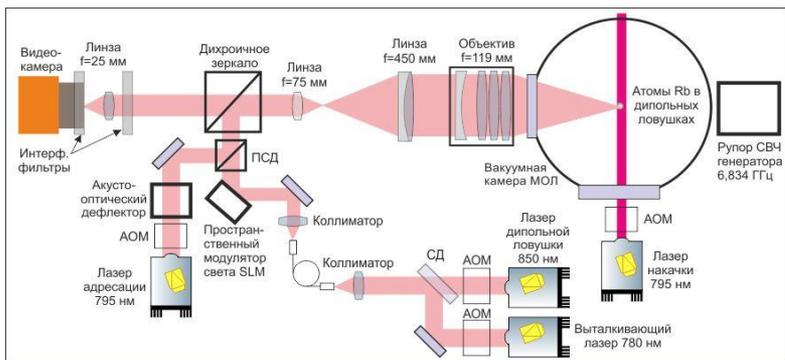
На основе этого в 2019 году была достигнута точность двухкубитовых операций для соседних кубитов  $F=97-98\%$

# Экспериментальная установка ИФТ СО РАН для реализации квантовых вычислений с одиночными атомами $^{87}\text{Rb}$ в массивах оптических дипольных ловушек



## Однокубитовые квантовые операции на СВЧ-переходе в двух одиночных атомах Rb в двух оптических дипольных ловушках

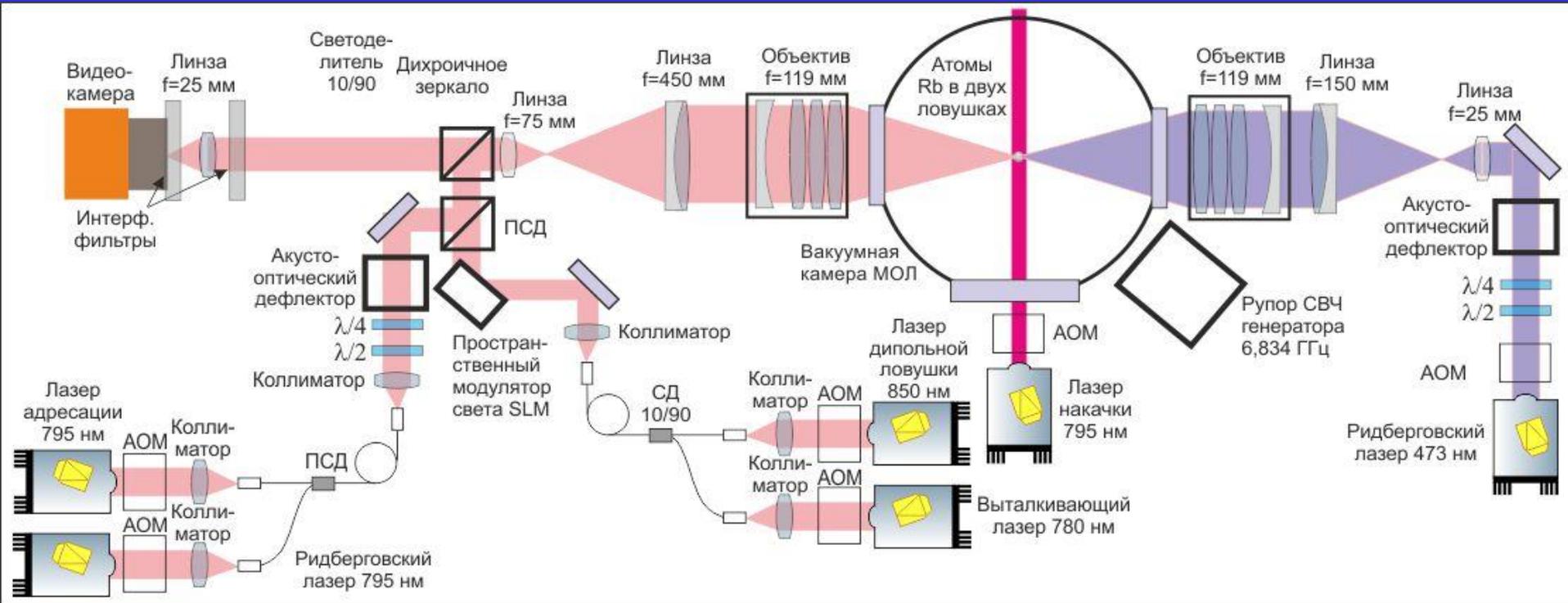
И.И.Бетеров, Е.А.Якшина, В.М.Энтин, Д.Б.Третьяков, К.Ю.Митянин, Н.В.Альянова, И.И.Рябцев



Экспериментальные записи осцилляций Раби, приведенных к масштабу площади СВЧ-импульса. Вертикальные линии задают точки 1-4 для пересечения площадей  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$ ,  $2\pi$  с экспериментальными осцилляциями для определения точности выполнения однокубитовых операций. (а) Осцилляции Раби в ловушке 1 и перекрестная помеха в ловушке 2 при настройке луча лазера адресации на ловушку 2 ( $F_{AOD}=99,5$  МГц). (б) Осцилляции Раби в ловушке 2 и перекрестная помеха в ловушке 1 при настройке луча лазера адресации на ловушку 1 ( $F_{AOD}=100,5$  МГц). Лазер адресации выводит атом из резонанса с СВЧ.

- ❖ Реализован захват и удержание двух атомов  $^{87}\text{Rb}$  в двух оптических дипольных ловушках.
- ❖ Получены осцилляции населенностей Раби на "часовом" СВЧ-переходе  $5S_{1/2}(F=2, M_F=0) \rightarrow 5S_{1/2}(F=1, M_F=0)$  в каждом атоме с индивидуальной адресацией.
- ❖ Осцилляции Раби соответствуют реализации операций Адамара и НЕ со средней точностью  $97 \pm 3\%$ .

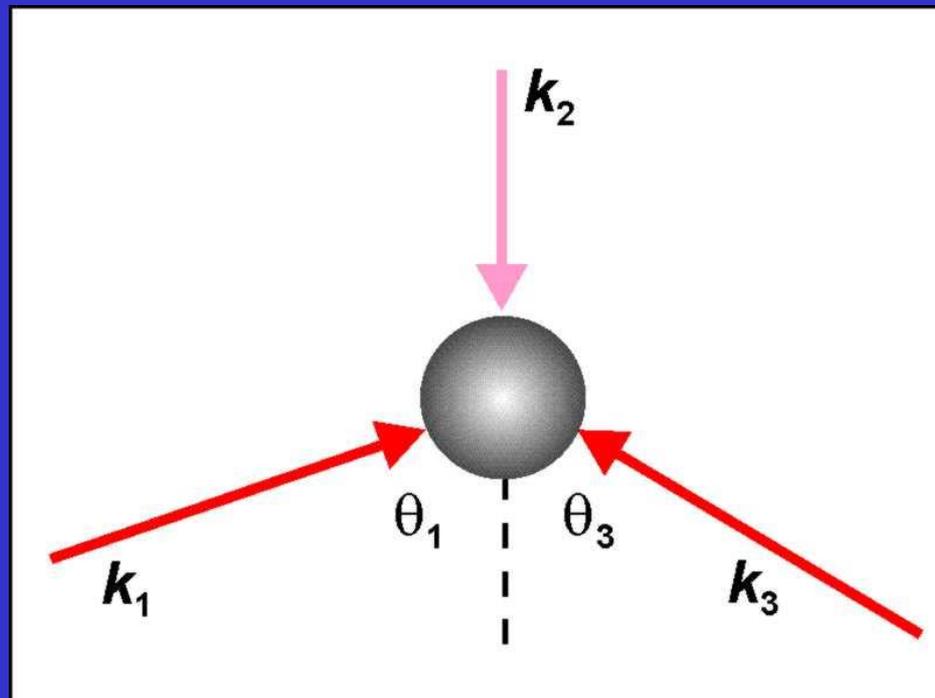
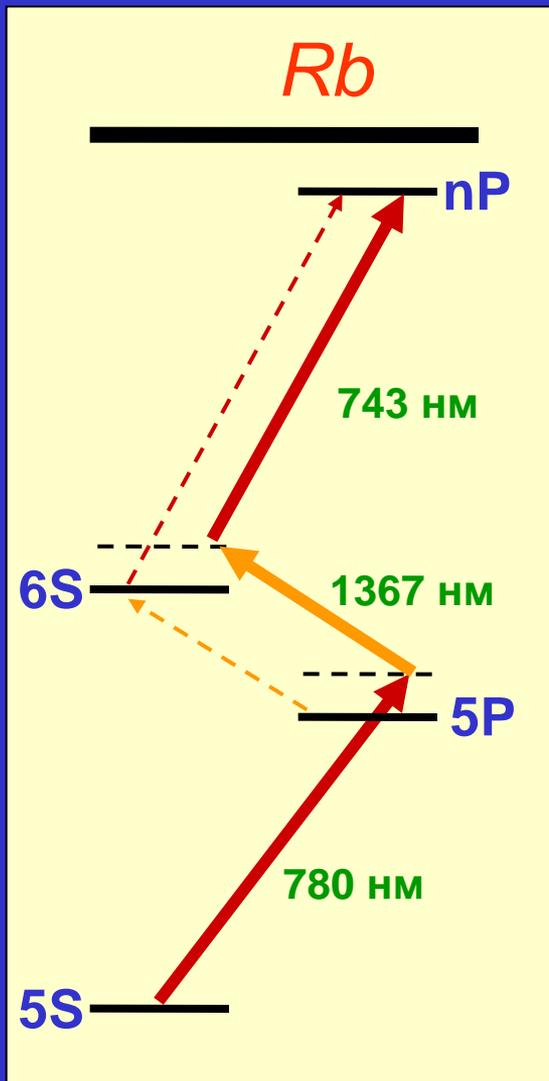
# Планируются эксперименты по реализации двухкубитовых квантовых операций на основе возбуждения ридберговских состояний



Добавлены лазеры первой (795 нм) и второй (473 нм) ступеней возбуждения ридберговских состояний, а также оптическая система фокусировки лазера второй ступени.

Реализованы массивы с 3 и 4 одиночными атомами

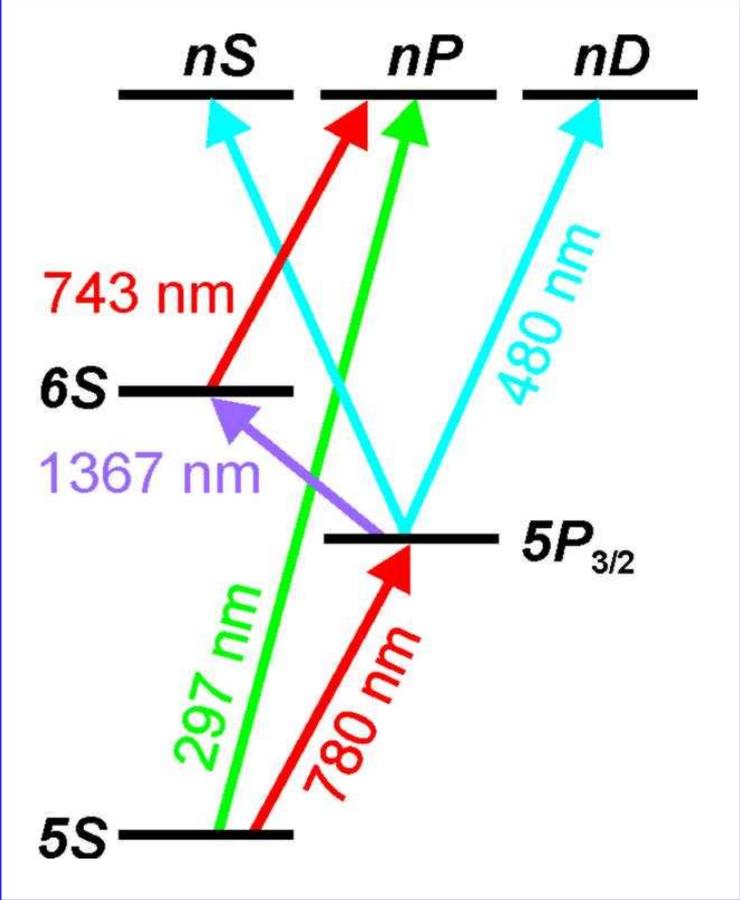
# Лазерное возбуждение ридберговских состояний без эффекта отдачи и эффекта Доплера (теория)



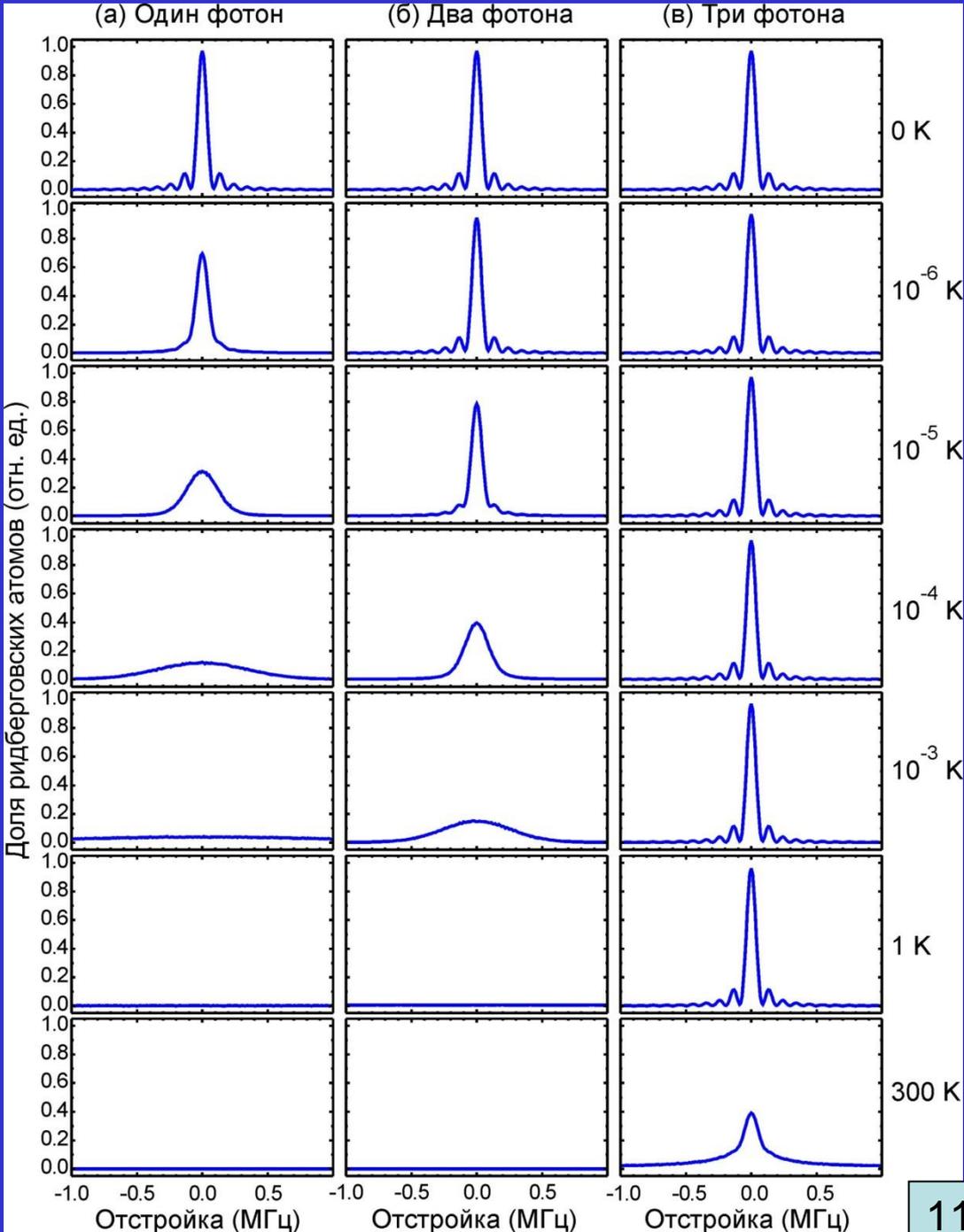
$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{k}_3 \equiv 0$$

*I.I.Ryabtsev et al., Phys. Rev. A, 2011, v.84, p.053409*

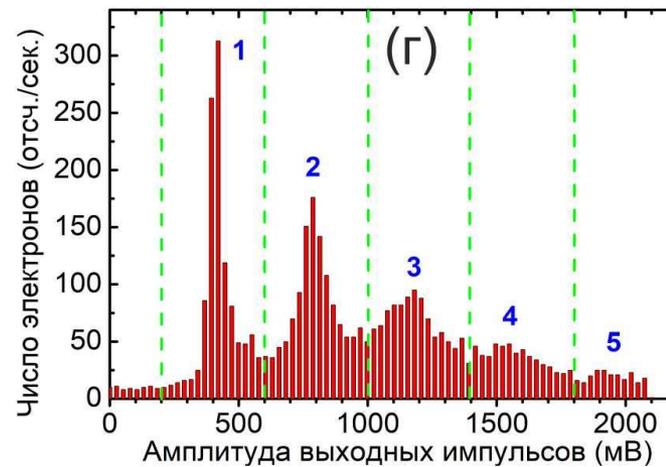
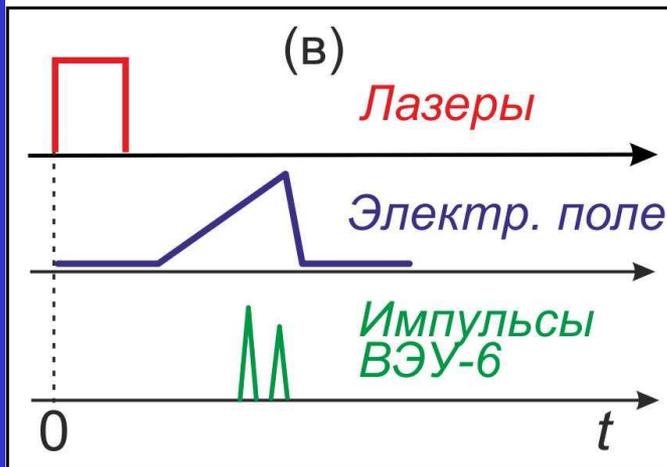
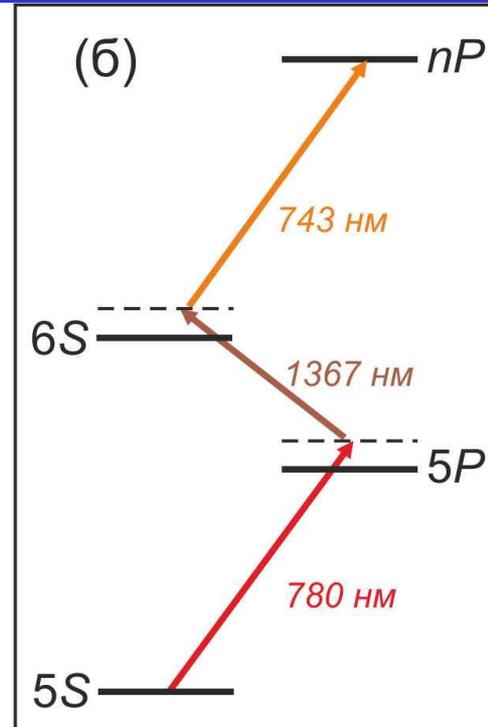
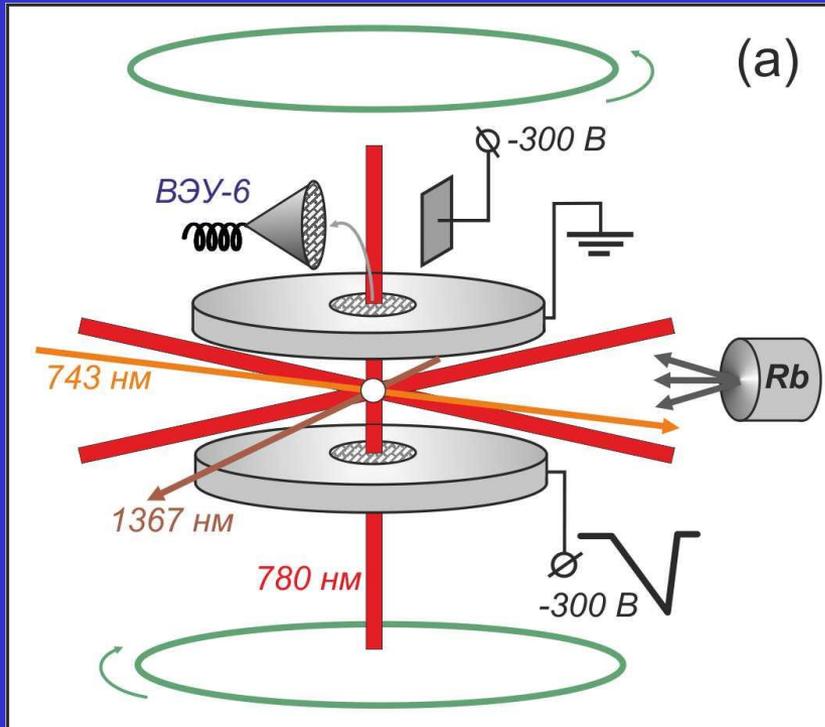
# Вероятность возбуждения лазерным $\pi$ - импульсом



*I.I.Ryabtsev et al., Phys. Rev. A, 2011, v.84, p.053409*



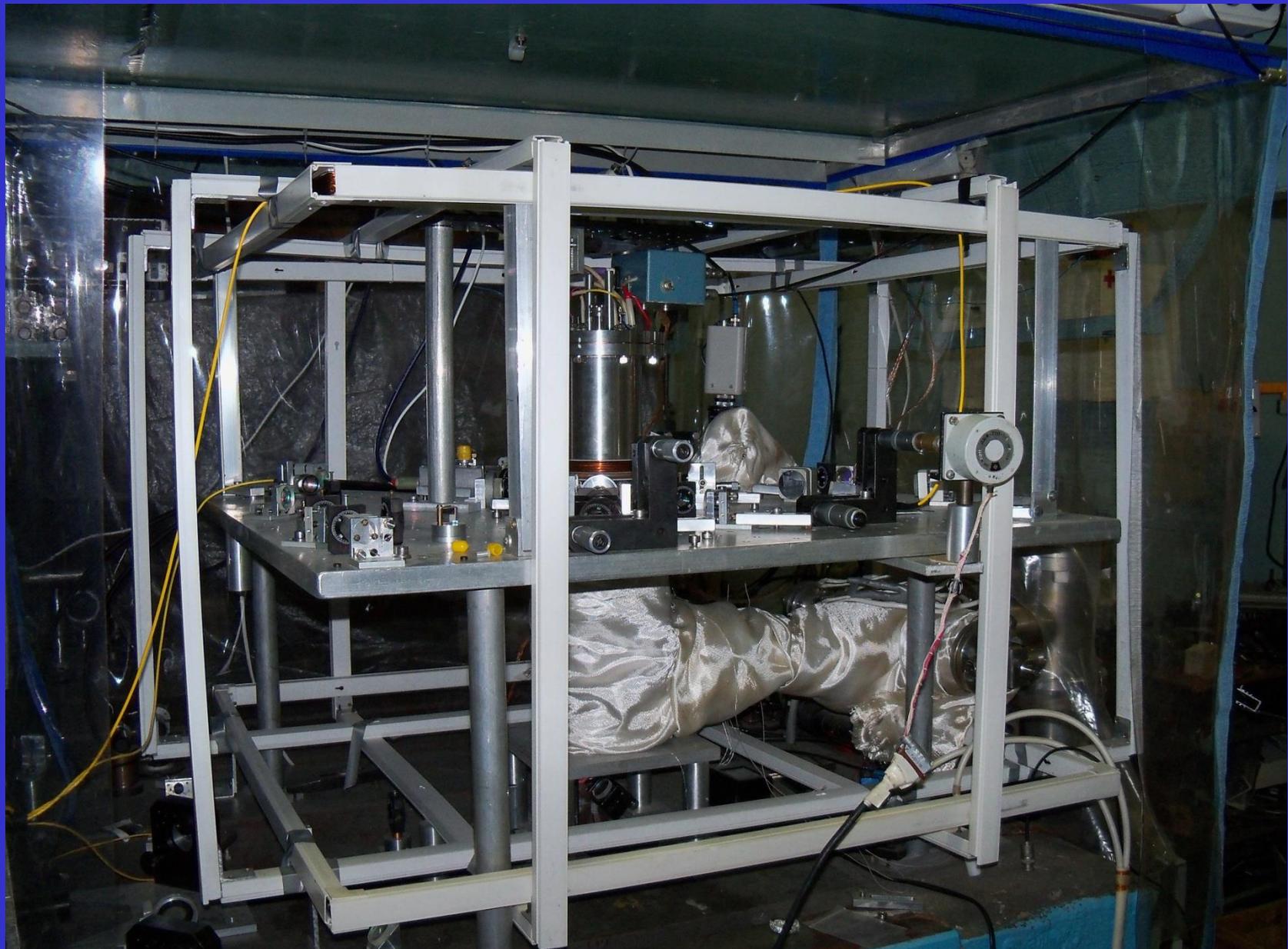
# Схема экспериментальной установки для изучения холодных ридберговских атомов Rb в магнитооптической ловушке



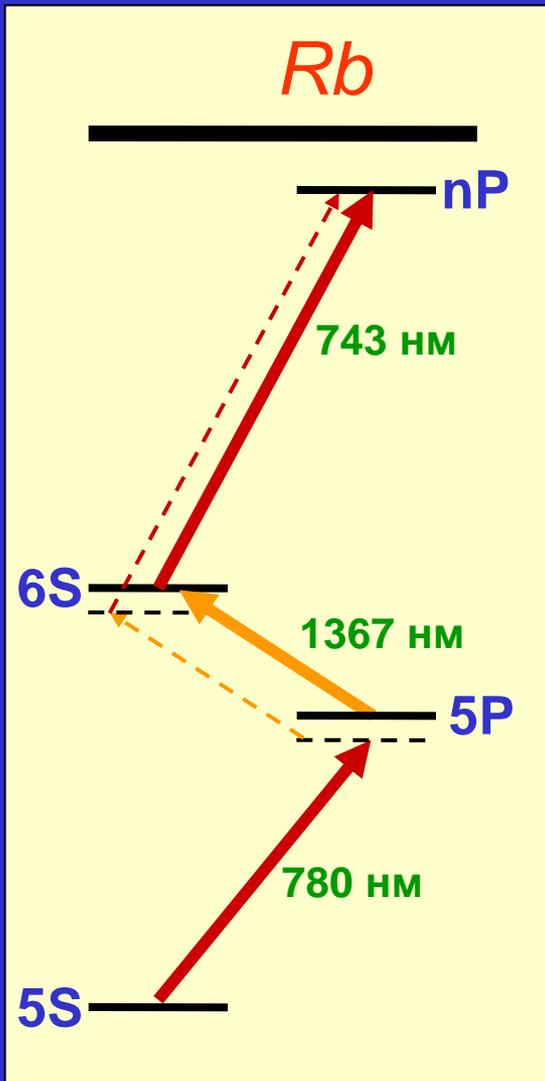
Объем лазерного возбуждения размером ~20 мкм.

Среднее расстояние между атомами  $R \sim 10$  мкм.

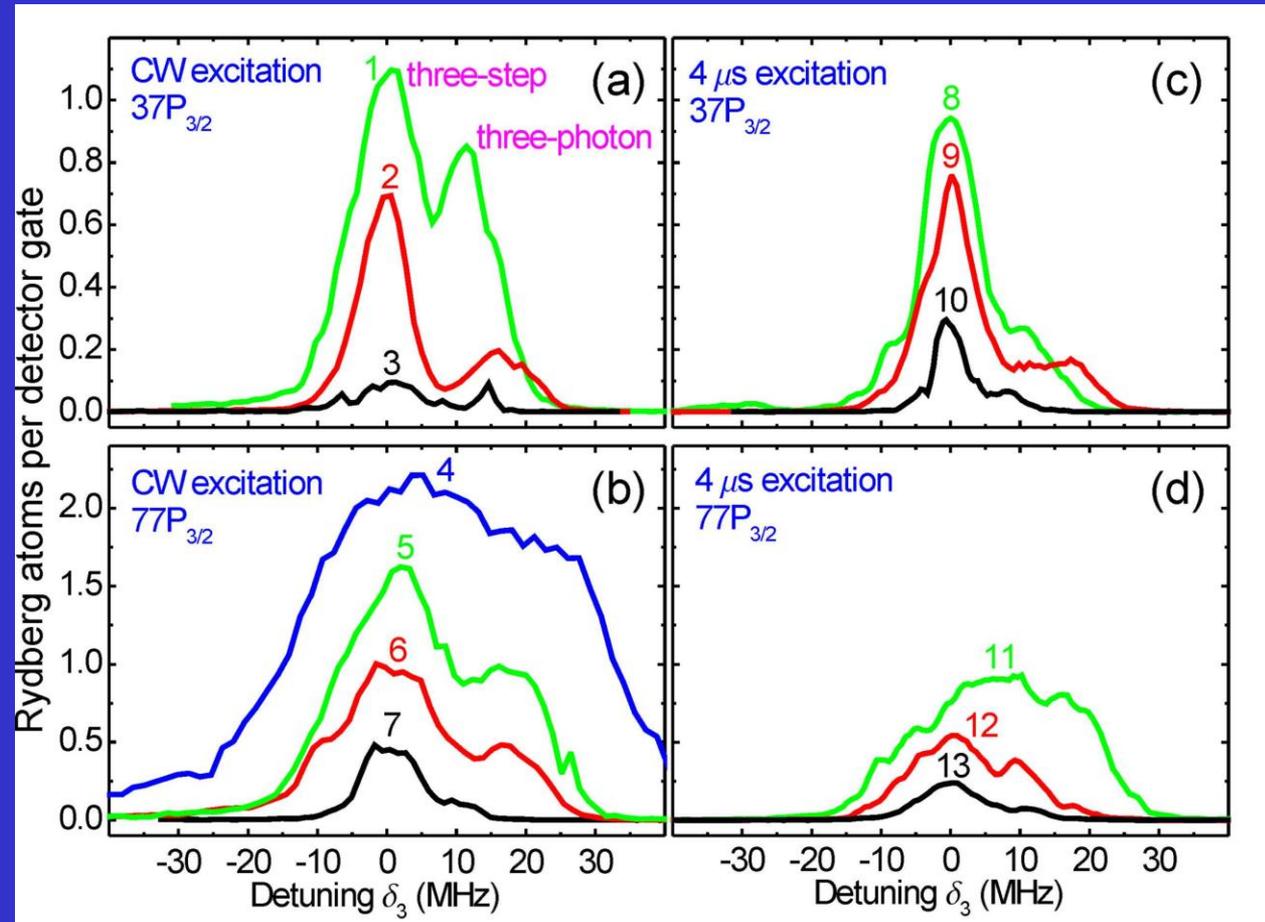
# Магнитооптическая ловушка



# Спектры трехфотонного возбуждения в работающей МОЛ

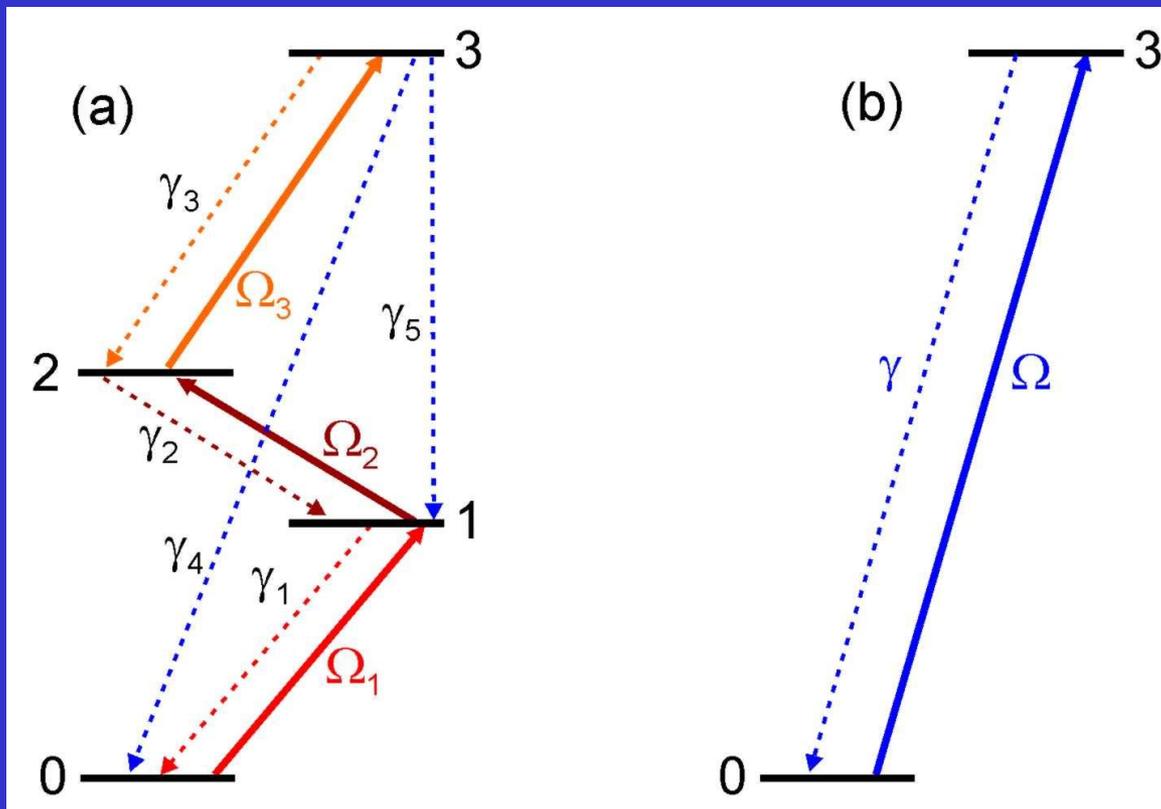


Варьируются частоты Раби и отстройка  $\delta_1$



В.М.Энтин и др., ЖЭТФ 143, 831 (2013)

# Теория трехфотонного лазерного возбуждения



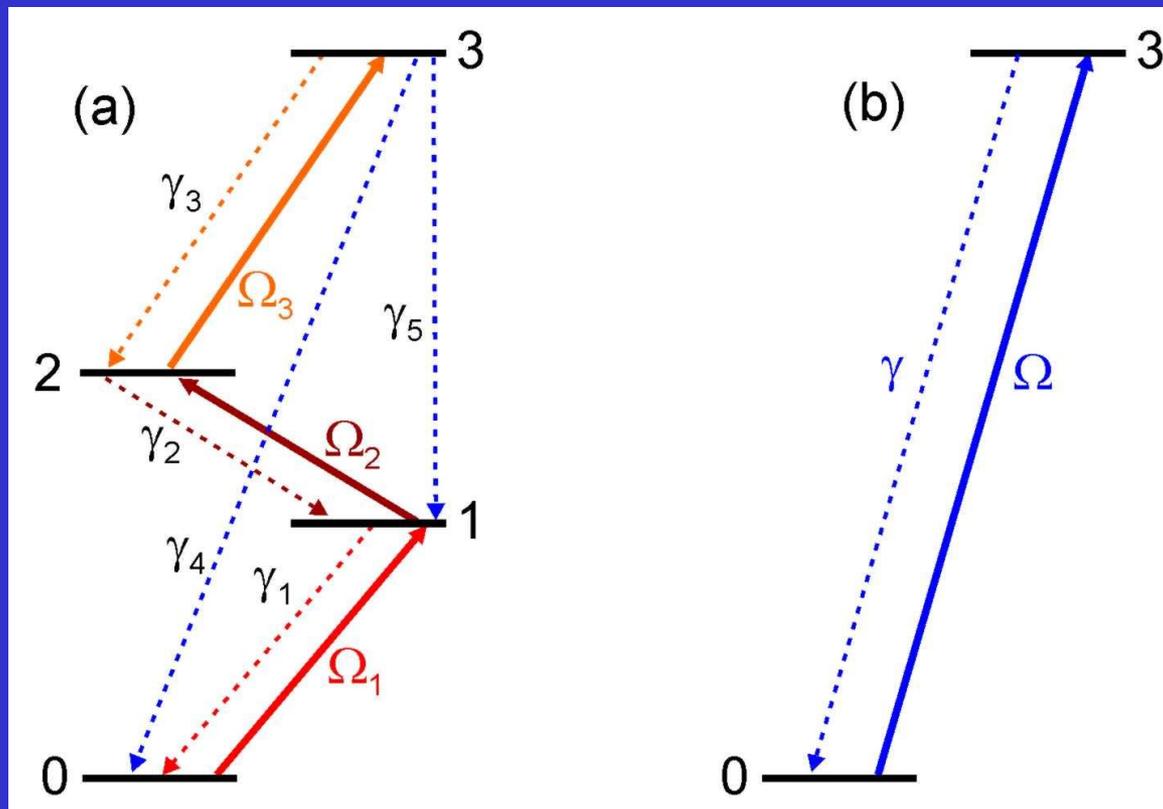
$$\rho_{33}^{weak} \approx \frac{\Omega^2}{2\Omega^2 + \gamma^2 + 4\delta^2} \left[ 1 + e^{-\gamma t} - 2e^{-\gamma t/2} \cos\left(t\sqrt{\Omega^2 + \delta^2}\right) \right]$$

$$\Omega = \frac{\Omega_1 \Omega_2 \Omega_3}{4\delta_1 \delta_3}$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \frac{\Omega_1^2}{4\delta_1} + \frac{\Omega_3^2}{4\delta_3}$$

$$\gamma = \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5$$

# Теория трехфотонного лазерного возбуждения



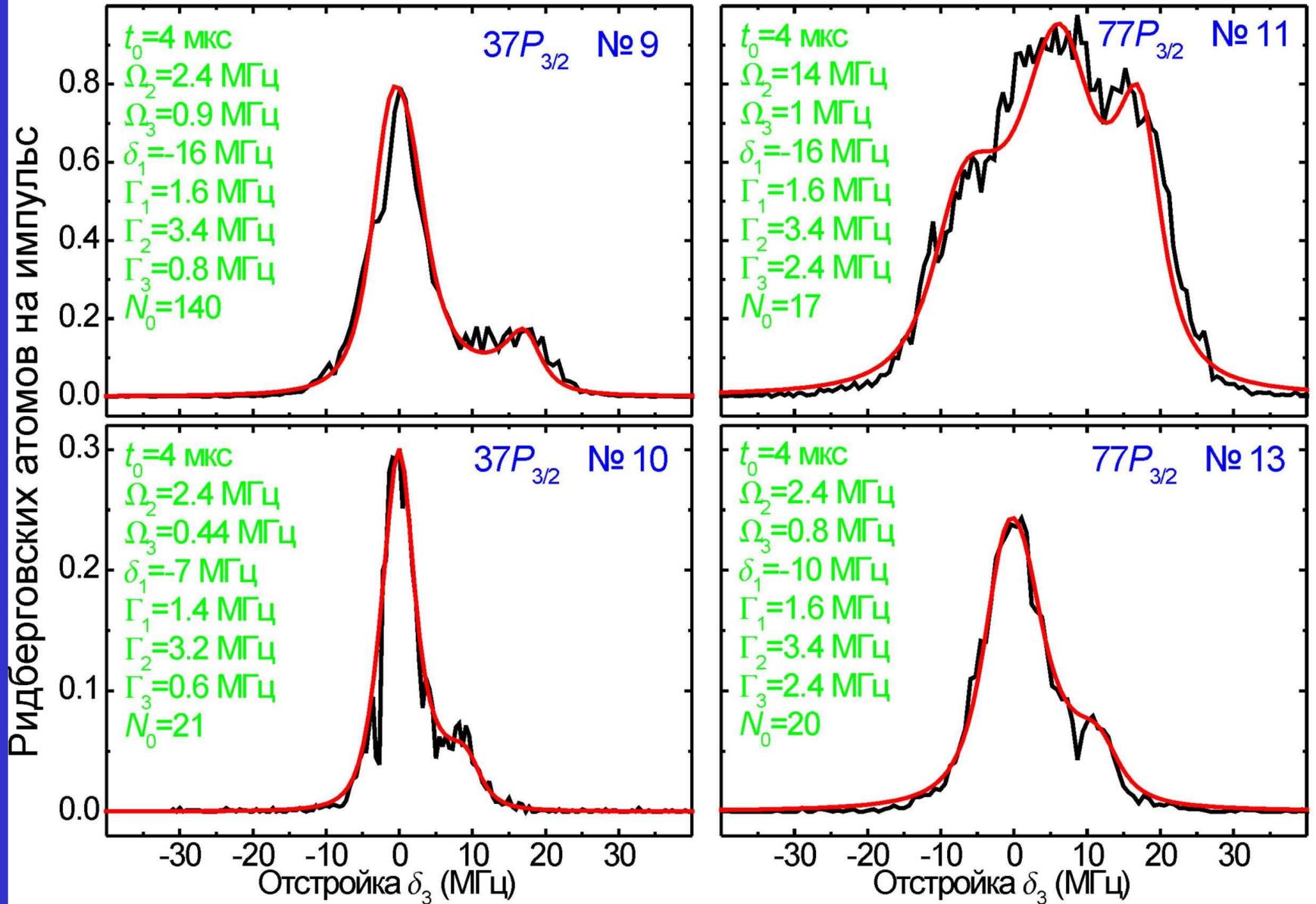
$$\rho_{33}^{strong} \approx \frac{\Omega^2}{2\Omega^2 + \gamma^2 + 4\delta^2} \left[ 1 - e^{-\frac{2\Omega^2 + \delta^2}{4\Omega^2 + \delta^2} \gamma t} \right] + \frac{\Omega^2 / 2}{\Omega^2 + \delta^2} \left[ e^{-\frac{2\Omega^2 + \delta^2}{4\Omega^2 + \delta^2} \gamma t} - e^{-\frac{6\Omega^2 + \delta^2}{4\Omega^2 + \delta^2} \gamma t / 2} \cos\left(t \sqrt{\Omega^2 + \delta^2}\right) \right]$$

$$\Omega = \frac{\Omega_1 \Omega_2 \Omega_3}{4\delta_1 \delta_3}$$

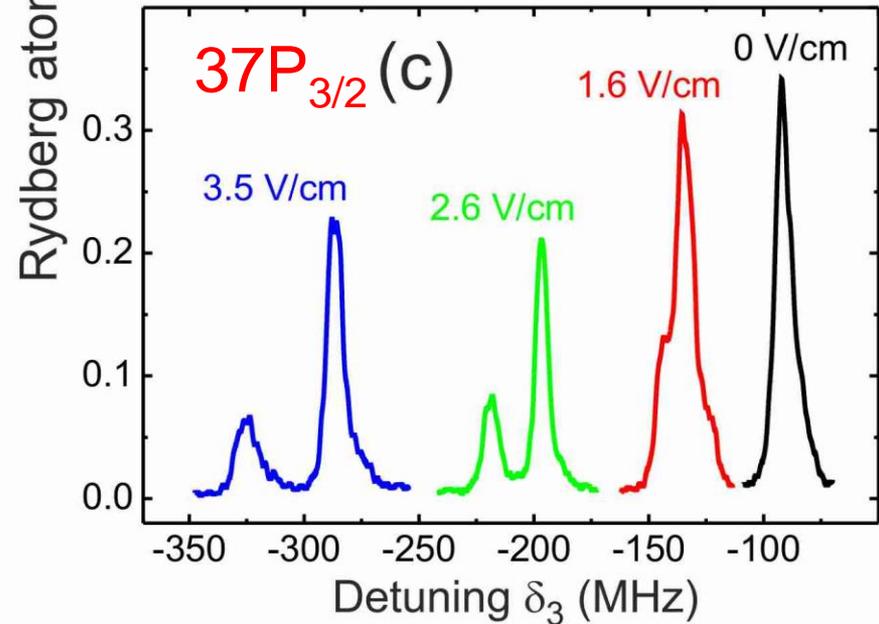
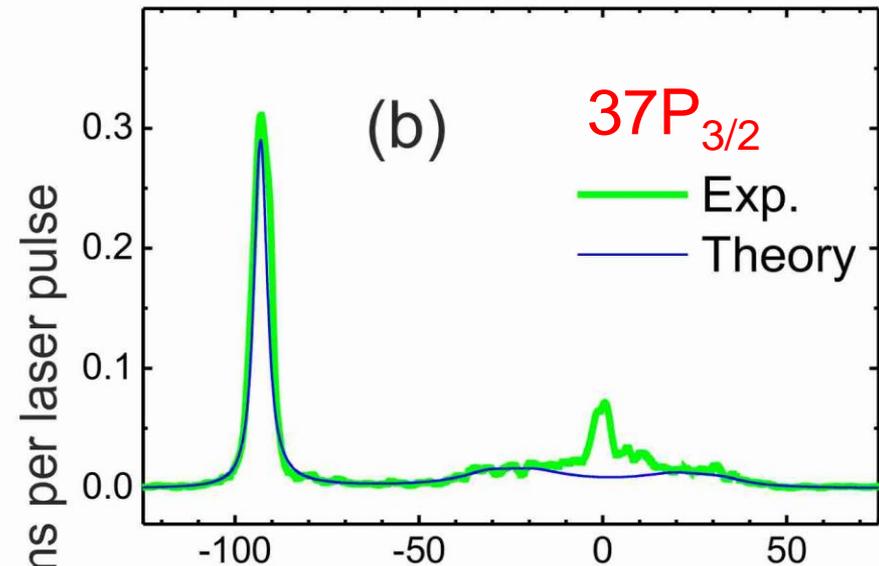
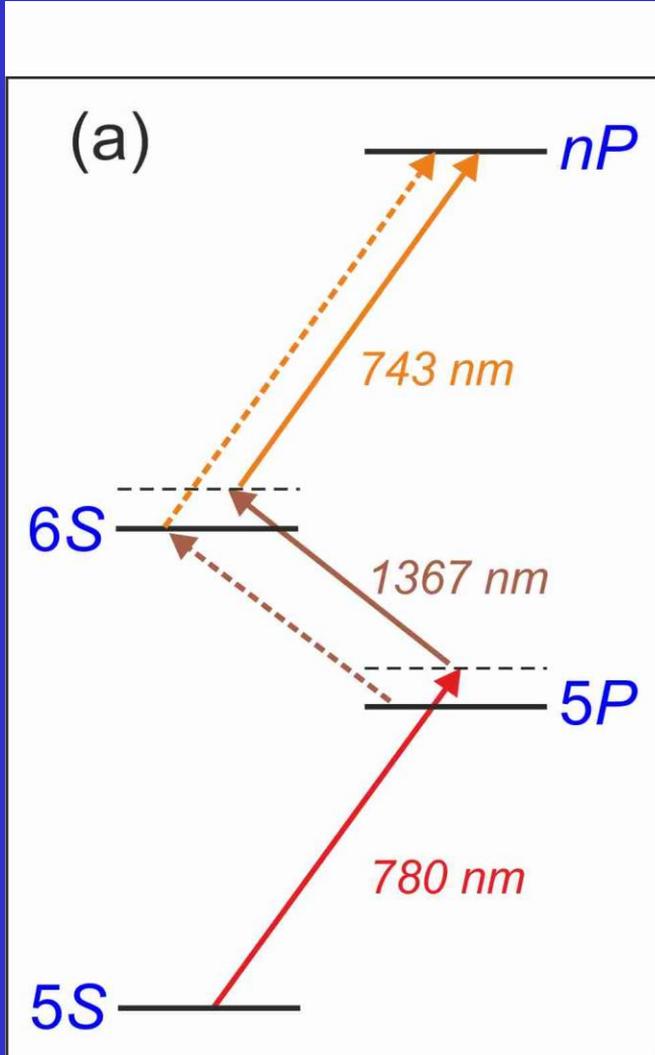
$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \frac{\Omega_1^2}{4\delta_1} + \frac{\Omega_3^2}{4\delta_3}$$

$$\gamma = \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5$$

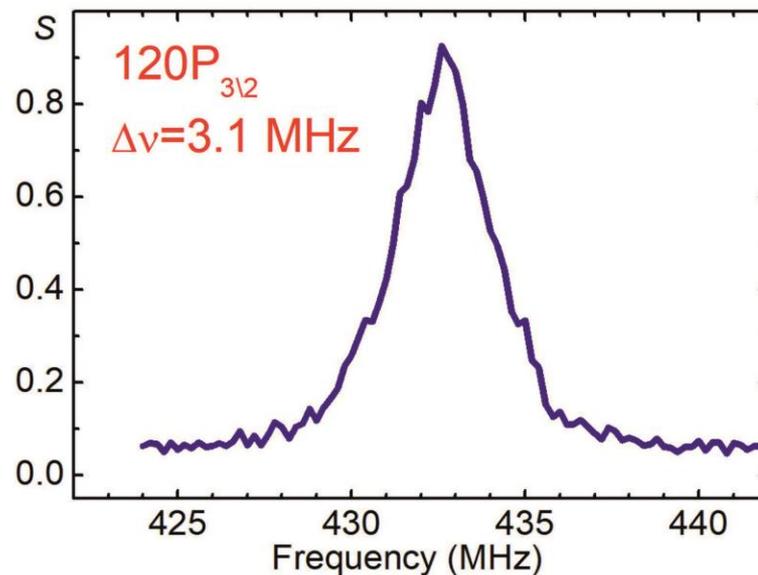
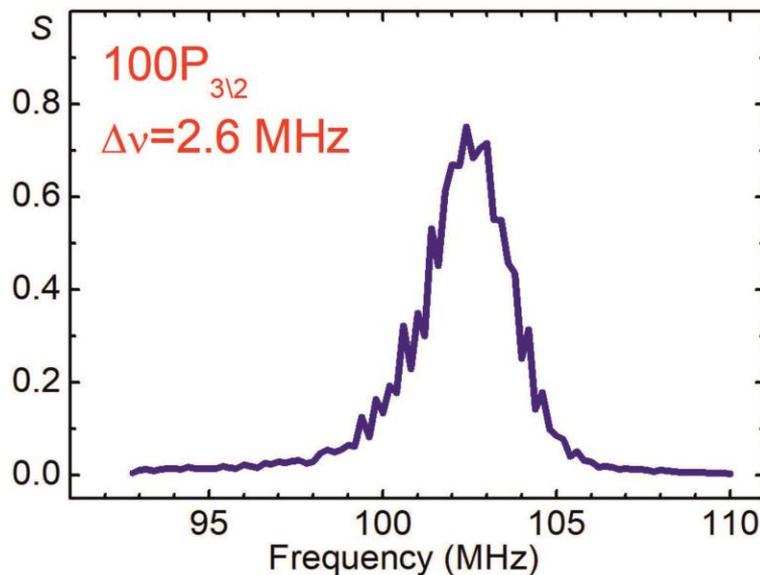
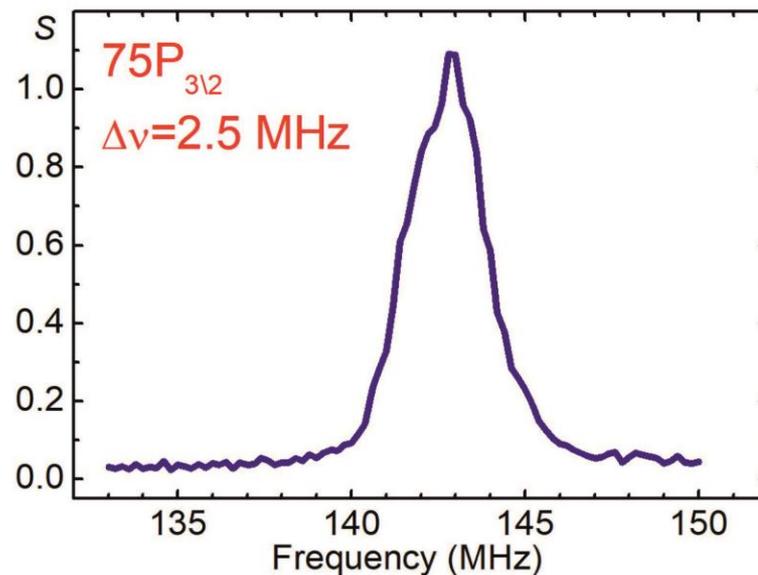
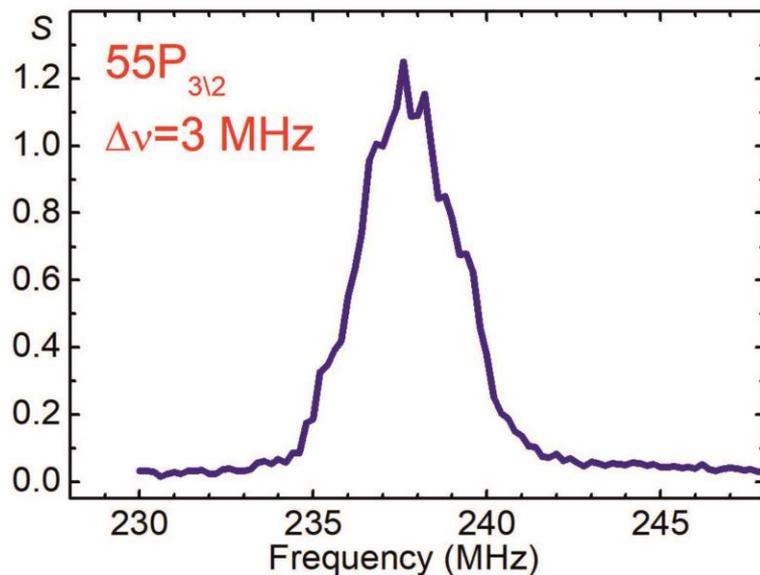
# Сравнение теории и эксперимента

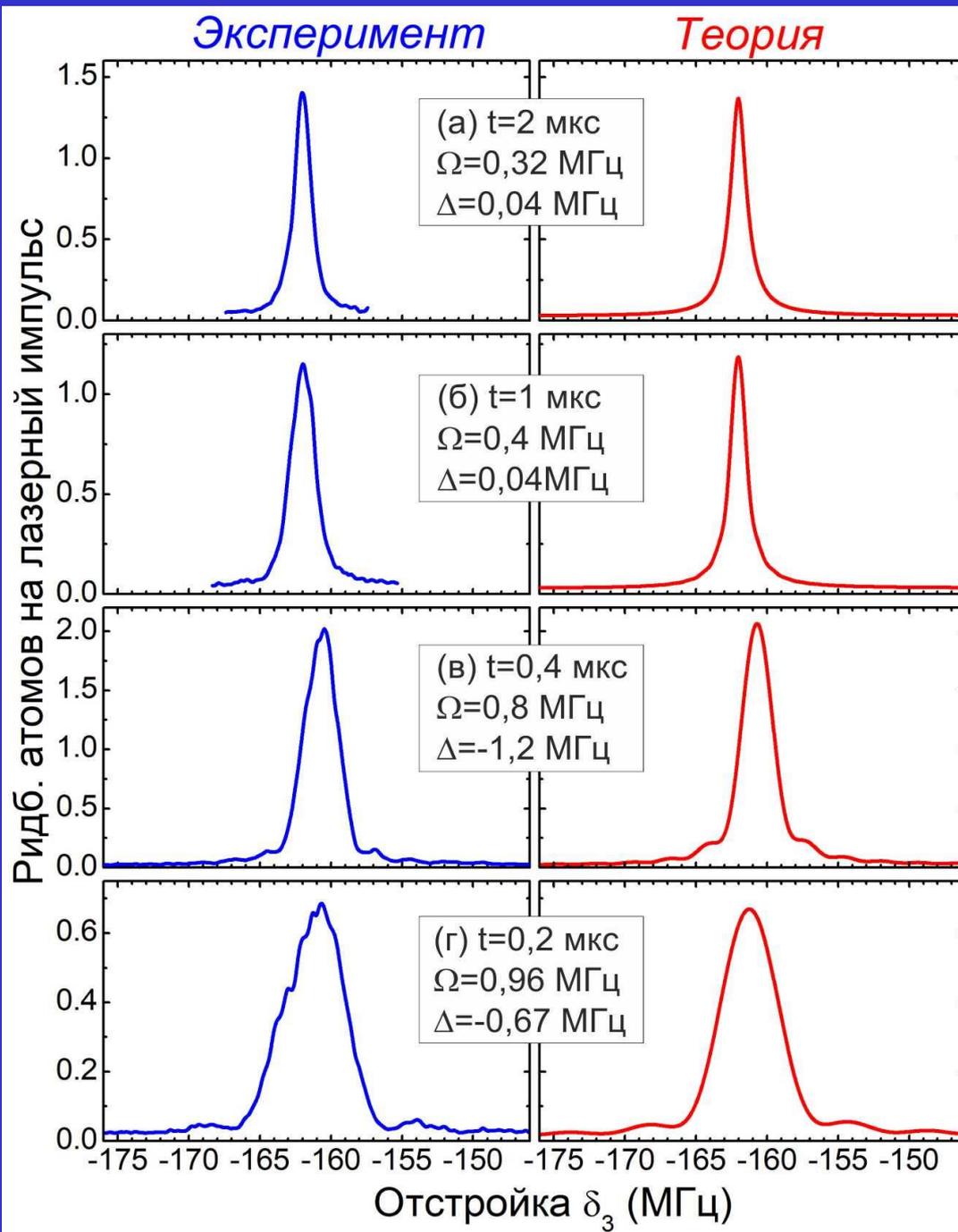


# Трехфотонное возбуждение с увеличенной отстройкой



# Спектры трехфотонного лазерного возбуждения высоких ридберговских $nP$ состояний атомов Rb

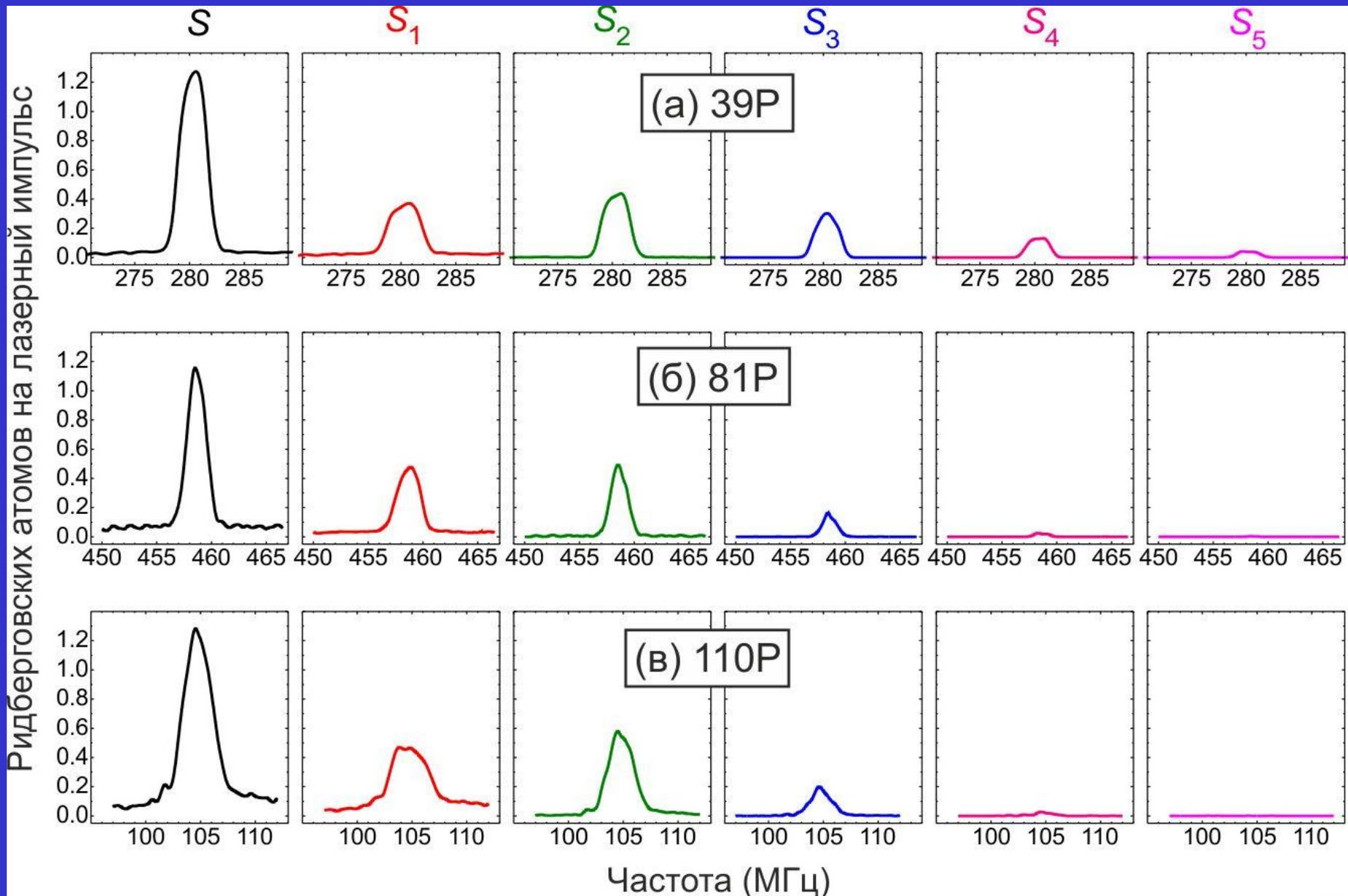




Трехфотонное лазерное возбуждение ридберговского состояния  $37P$  с высоким разрешением и осцилляциями Раби на крыльях резонанса

*Е.А.Якшина и др.,  
Квантовая электроника  
48(10), 886 (2018)*

# Многоатомные спектры трехфотонного лазерного возбуждения



# Статистика многоатомного лазерного возбуждения

$$\bar{n} = pN_0 = \rho_{33}N_0$$

*Среднее число атомов, возбуждаемых за лазерный импульс из ансамбля  $N_0$  атомов*

$$P_N^{strong} = p^N (1-p)^{N_0-N} \frac{N_0!}{N!(N_0-N)!}$$

*Вероятность возбудить  $N$  атомов из ансамбля  $N_0$  атомов*

$$P_N = (pT)^N (1-pT)^{N_0-N} \frac{N_0!}{N!(N_0-N)!}$$

*Вероятность возбудить  $\geq N$  атомов и детектировать  $N$  атомов детектором с эффективностью  $T$*

$$S = pN_0T = \sum_{N=1}^{N_0} N P_N = \sum_{N=1}^{N_0} S_N$$

*Полный измеряемый сигнал*

$$S_N = N \left( \frac{S}{N_0} \right)^N \left( 1 - \frac{S}{N_0} \right)^{N_0-N} \frac{N_0!}{N!(N_0-N)!}$$

*Измеряемые многоатомные сигналы для невзаимодействующих атомов.*

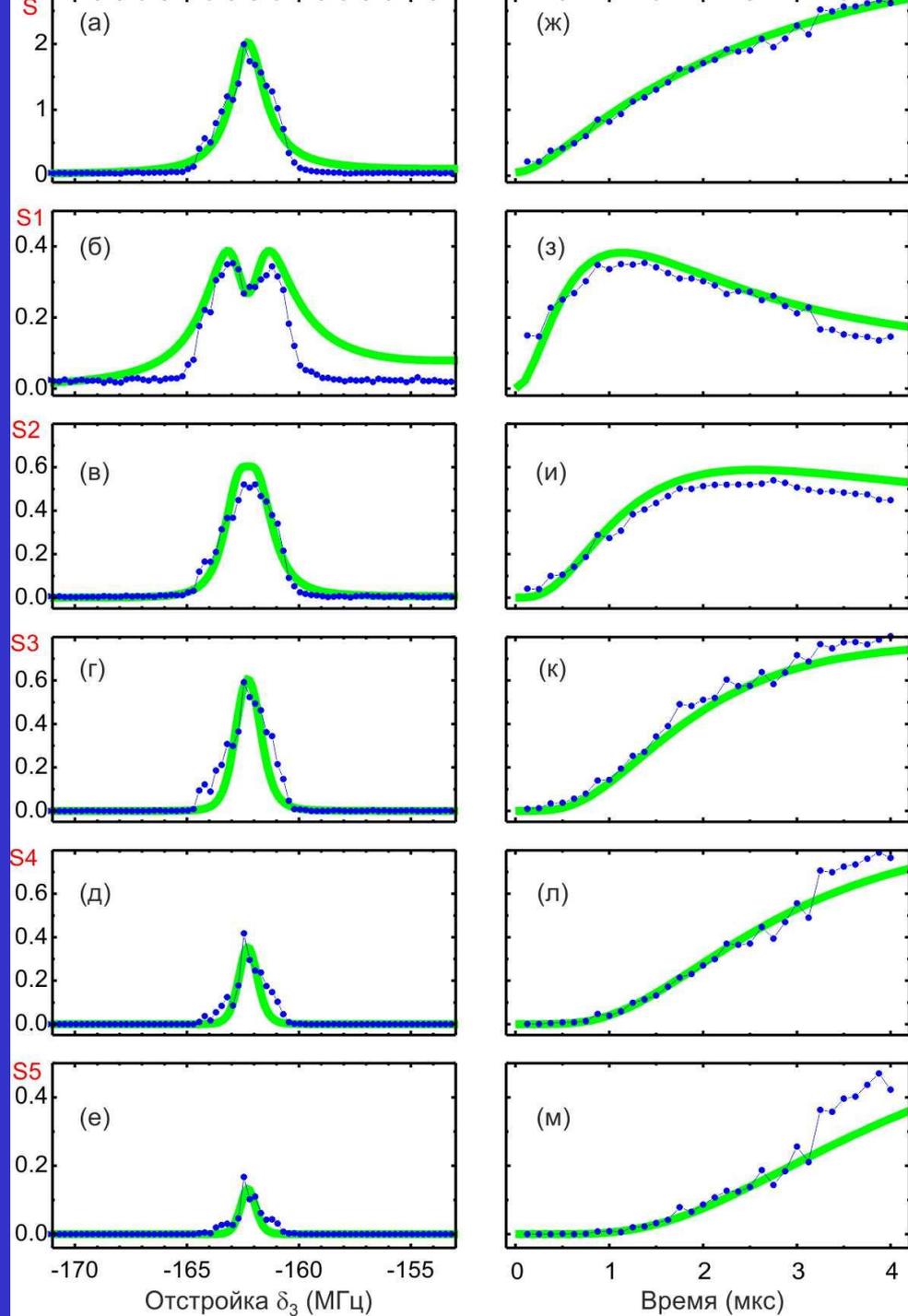
*В эксперименте  $S \sim 1 \ll N_0 \sim 10$ , формула нечувствительна к точному значению  $N_0$*

# Многоатомные спектры и динамика трехфотонного лазерного возбуждения состояния $39P$ в атомах Rb

(а)-(е) Запись  $S$  - сигнал, соответствующий среднему числу ридберговских атомов, регистрируемых на лазерный импульс. Записи  $S_1$ - $S_5$  - спектры возбуждения мезоскопических ансамблей с определенным числом ридберговских атомов  $N=1-5$  при  $t = 4$  мкс. Их сумма дает полный измеряемый сигнал  $S$ . Сплошные кривые – результат численного моделирования при трехфотонной частоте Раби  $\Omega/(2\pi) = 0,2$  МГц, среднем числе атомов  $N_0=10$  и вероятности их регистрации  $T=0,6$ . (ж)-(м) То же самое для амплитуды резонансов в центре линии перехода в зависимости от времени возбуждения при  $N_0=13$ .

$\Omega_1=6$  МГц     $\Omega_2=200$  МГц     $\Omega_3=2$  МГц  
 $\Gamma_1=0,3$  МГц     $\Gamma_2=0,3$  МГц     $\Gamma_3=10$  кГц  
 $\delta_1=+80$  МГц     $\delta_2=+82$  МГц     $\delta_3=-162$  МГц

Д.Б.Третьяков и др., Квантовая электроника, 2022, т.52, в.6, с.513

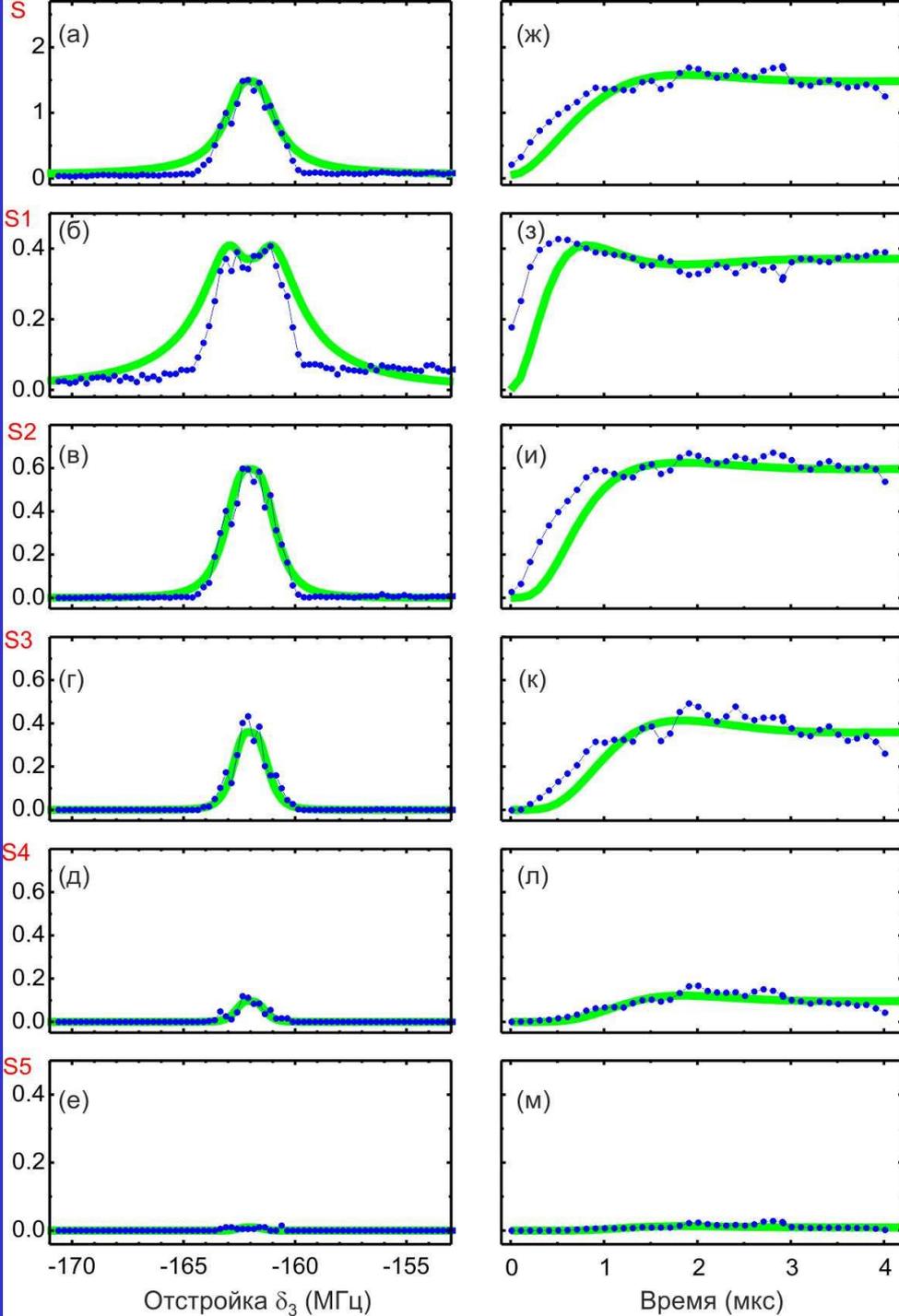


# Многоатомные спектры и динамика трехфотонного лазерного возбуждения состояния $39P$ в атомах Rb

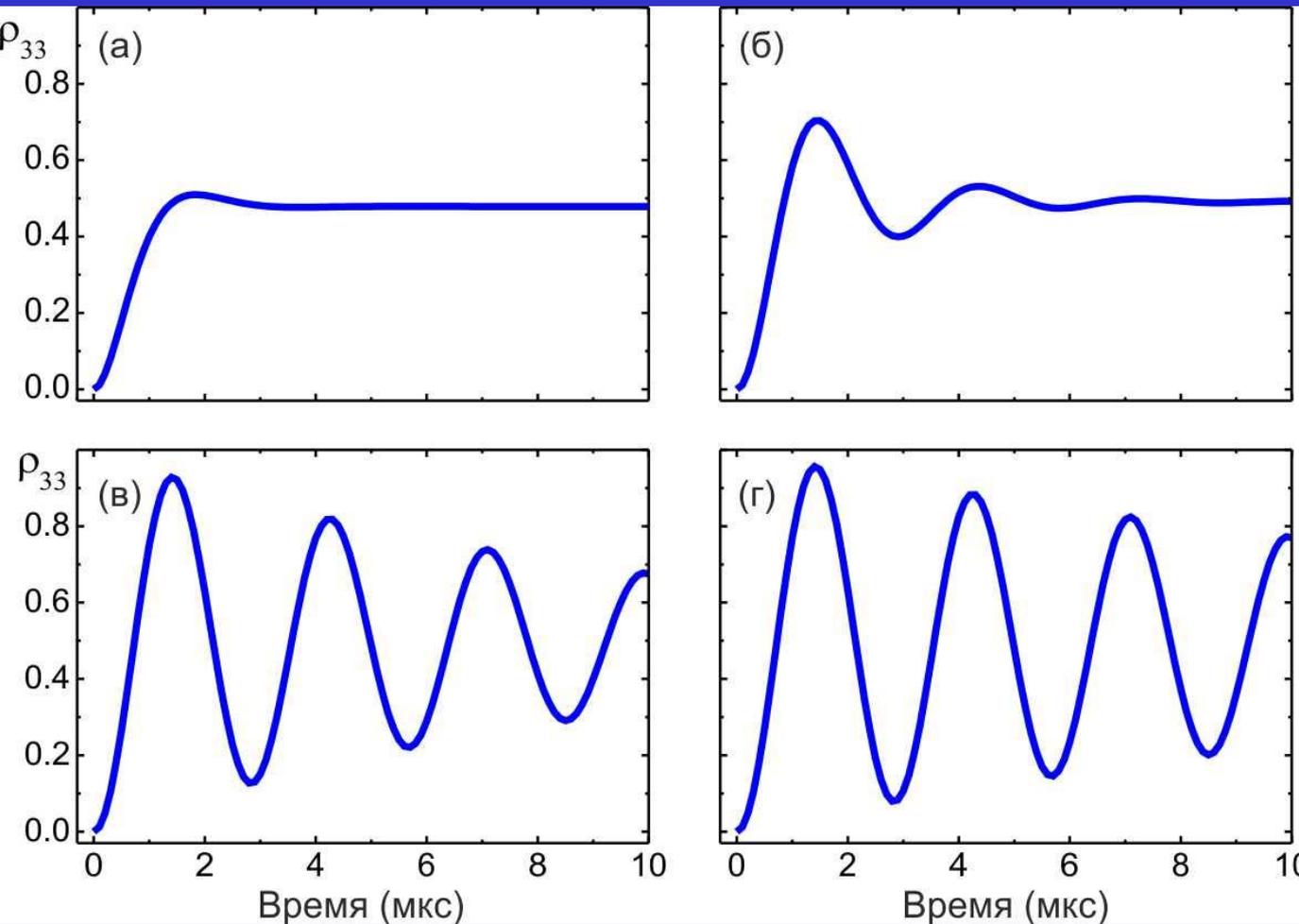
(а)-(е) Запись  $S$  - сигнал, соответствующий среднему числу ридберговских атомов, регистрируемых на лазерный импульс. Записи  $S_1$ - $S_5$  - спектры возбуждения мезоскопических ансамблей с определенным числом ридберговских атомов  $N=1-5$  при  $t = 4$  мкс. Их сумма дает полный измеряемый сигнал  $S$ . Сплошные кривые – результат численного моделирования при трехфотонной частоте Раби  $\Omega/(2\pi) = 0,36$  МГц, среднем числе атомов  $N_0=5$  и вероятности их регистрации  $T=0,6$ . (ж)-(м) То же самое для амплитуды резонансов в центре линии перехода в зависимости от времени возбуждения при  $N_0=13$ .

$\Omega_1=10$  МГц     $\Omega_2=500$  МГц     $\Omega_3=14$  МГц  
 $\Gamma_1=0,3$  МГц     $\Gamma_2=0,3$  МГц     $\Gamma_3=10$  кГц  
 $\delta_1=+80$  МГц     $\delta_2=+82$  МГц     $\delta_3=-162$  МГц

Д.Б.Третьяков и др., Квантовая электроника, 2022, т.52, в.6, с.513



# Как достичь осцилляций Раби с большим контрастом и временем когерентности?

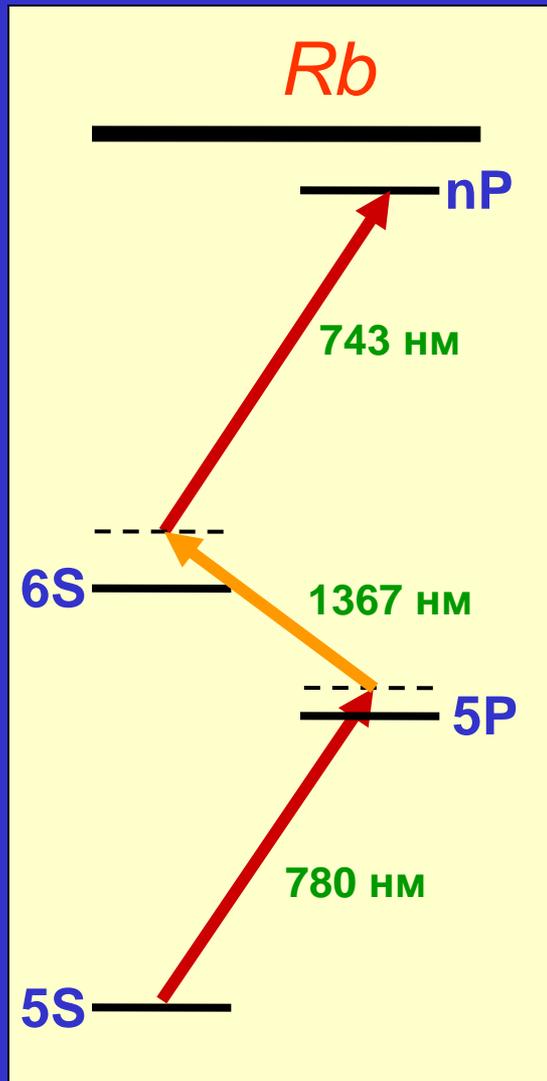


Результаты численного расчета осцилляций Раби для вероятности трехфотонного лазерного возбуждения атома Rb в ридберговское состояние  $39P$  при трехфотонной частоте Раби  $\Omega = 360$  кГц и различных параметрах паразитных уширений:

- (а)  $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 300$  кГц,  $\Gamma_3 = 10$  кГц,  $\Gamma_Z = 100$  кГц;
- (б)  $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 10$  кГц,  $\Gamma_Z = 100$  кГц;
- (в)  $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 10$  кГц,  $\Gamma_Z = 0$ ;
- (г)  $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 1$  кГц,  $\Gamma_Z = 0$ .

Для дальнейшего увеличения контраста и времени когерентности необходимо выключать квадрупольное магнитное поле, сужать ширины линий лазеров до  $< 1$  кГц и увеличивать отстройки от промежуточных резонансов до  $\sim 1$  ГГц.

# Заселение промежуточных состояний трехфотонного перехода



$$\rho_{nP}(\delta = 0) \approx \frac{\Omega^2}{2\Omega^2 + \gamma^2} \left[ 1 - e^{-\frac{1}{2}\gamma t} \right] + \frac{1}{2} \left[ e^{-\frac{1}{2}\gamma t} - e^{-\frac{3}{4}\gamma t} \cos\left(t\sqrt{\Omega^2 + \delta^2}\right) \right]$$

$$\rho_{5P} \approx \frac{\Omega_1^2}{4\delta_1^2}$$

$$\rho_{6S} \approx \frac{\Omega_1^2}{4\delta_1^2} \frac{\Omega_2^2}{4\delta_2^2}$$

$$\gamma_{\text{eff}} \approx \frac{1}{\tau_{nP}} + \frac{\Omega_1^2}{4\delta_1^2} \frac{1}{\tau_{5P}}$$

$$\tau_{nP} \sim 100 - 500 \text{ нс}; \gamma_{nP} \sim 0,5 - 2 \text{ кГц}$$

$$\tau_{5P} \sim 30 \text{ нс}; \gamma_{5P} = 6 \text{ МГц}$$

$$\Omega_1 = 10 \text{ МГц}; \delta_1 = 100 \text{ МГц} \rightarrow \gamma_{\text{eff}} \sim 15 \text{ кГц}$$

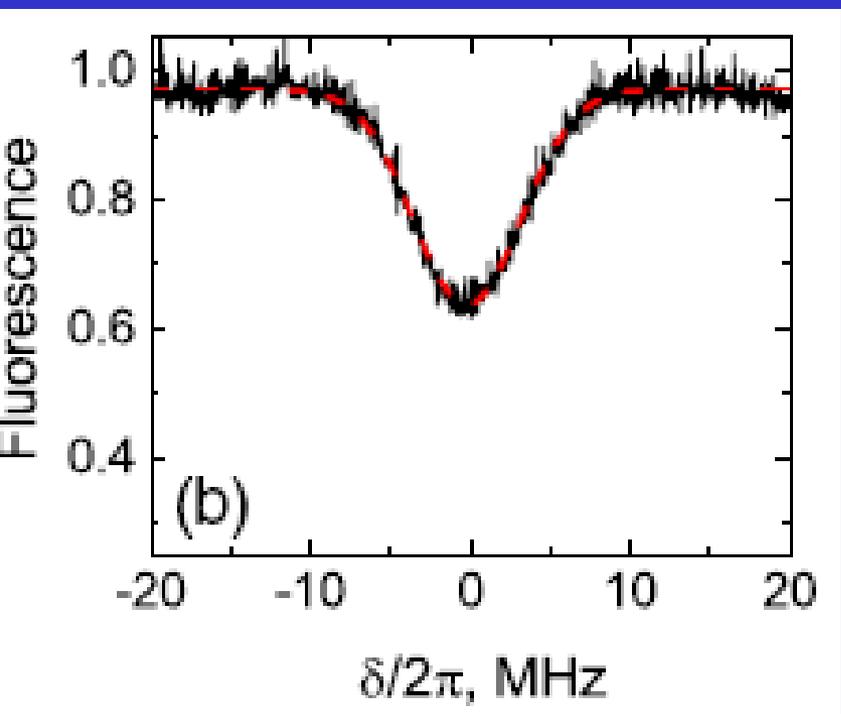
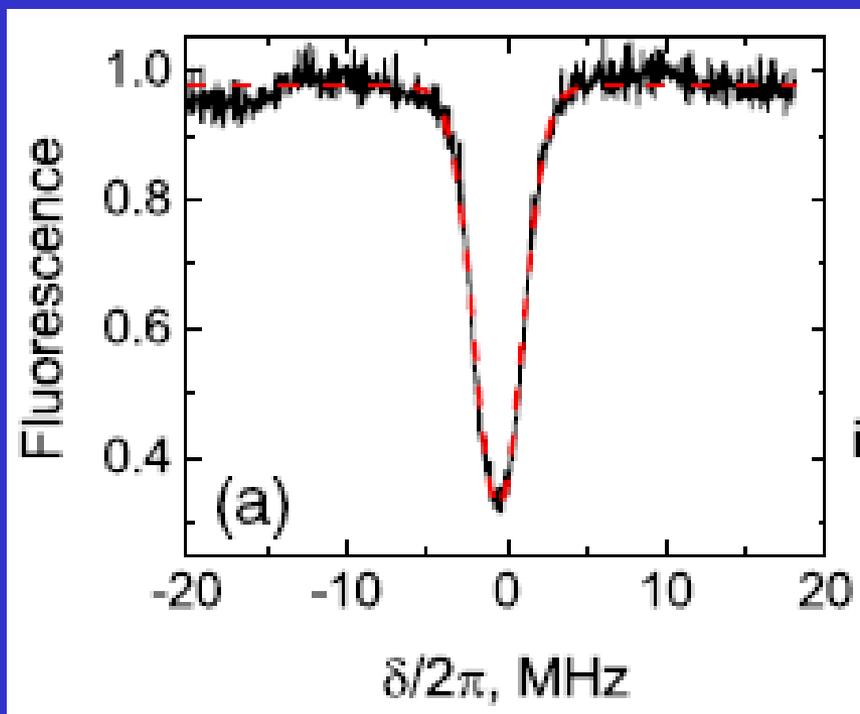
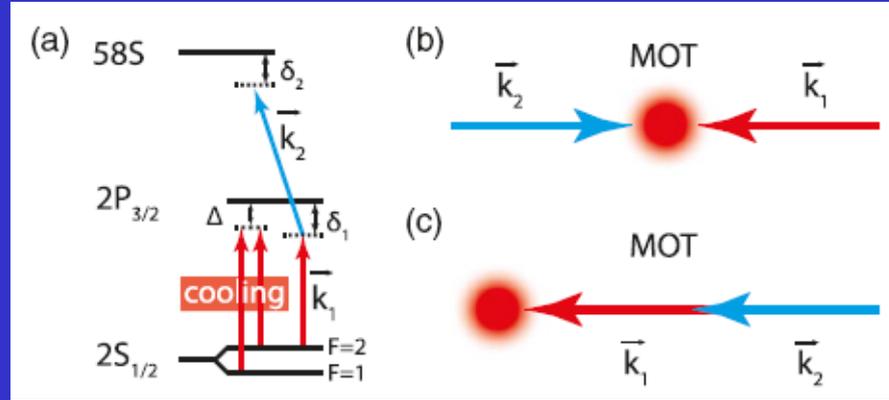
# Эксперименты ОИВТ с ридбергскими атомами Li в МОЛ

1546 Vol. 35, No. 7 / July 2018 / Journal of the Optical Society of America B Research Article

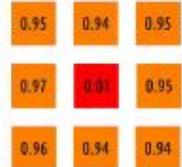
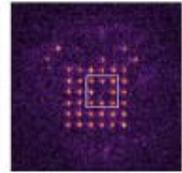
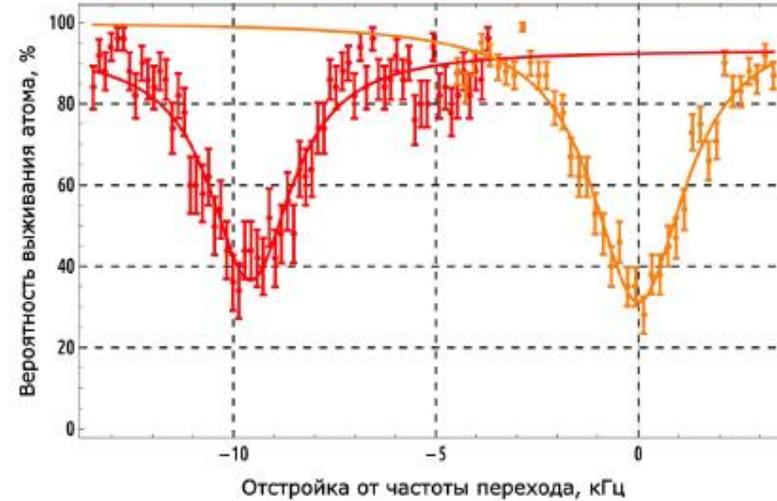
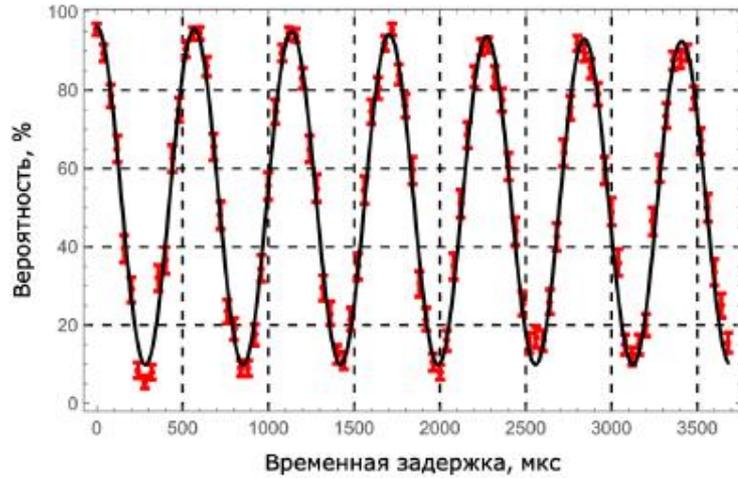
Journal of the Optical Society of America **B** OPTICAL PHYSICS

**Differential two-photon spectroscopy for nondestructive temperature measurements of cold light atoms in a magneto-optical trap**

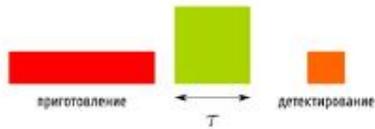
V. A. SAUTENKOV,\* S. A. SAAKYAN, A. A. BOBROV, E. V. VILSHANSKAYA, B. B. ZELENER, AND B. V. ZELENER  
 Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow 125412, Russia



## Индивидуальная адресация

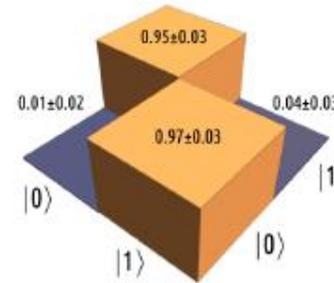


кросс-корреляции при  $\pi$ -импульсе в центральном узле

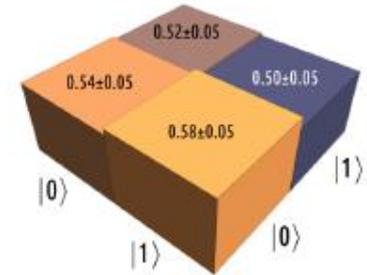


$$V \simeq 90\%$$

$$\tilde{V} = 96.0 \pm 1.6\%$$



операция NOT

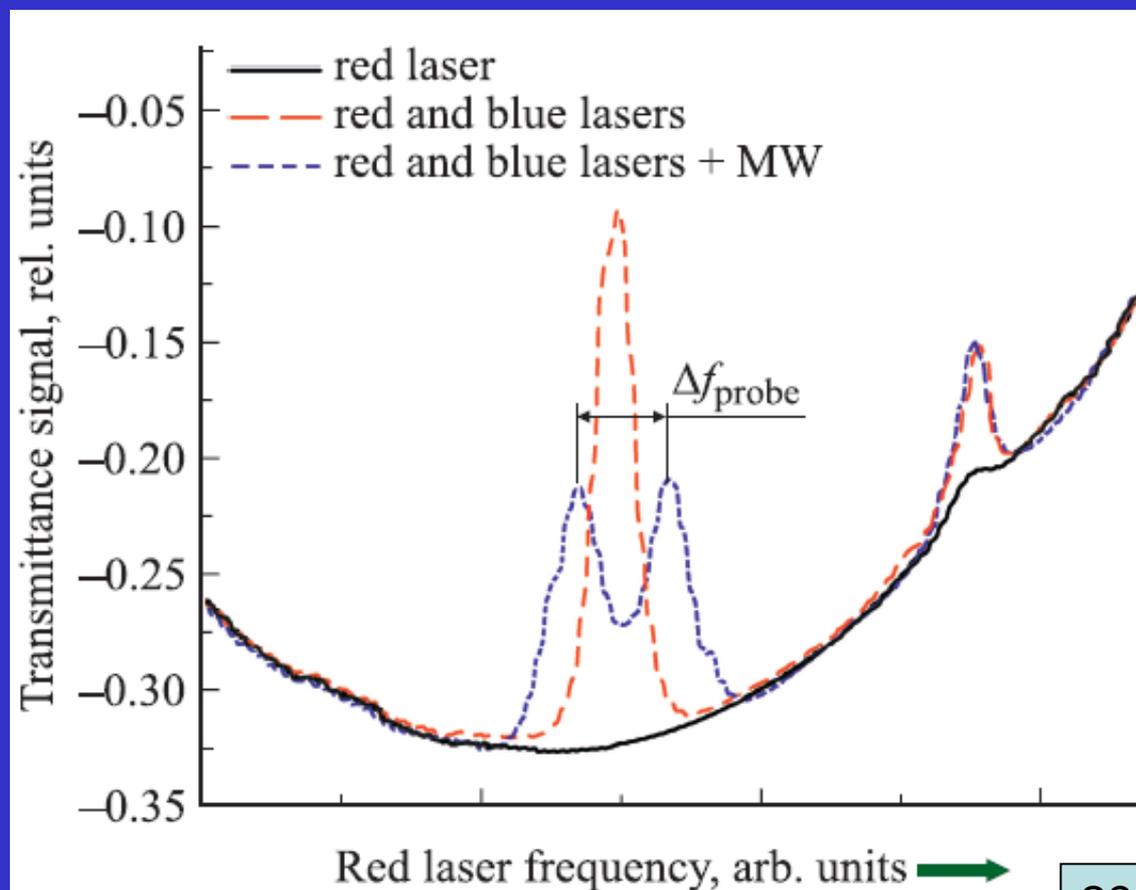
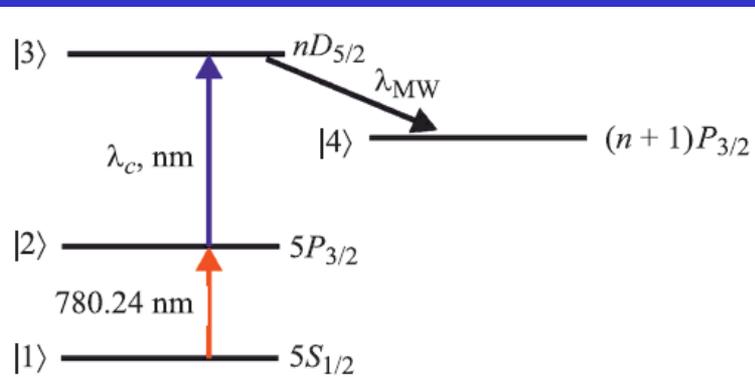


преобразование Адамара

# Эксперименты ВНИИФТРИ с атомами Rb в ячейке

**Измерение напряженности электрического поля СВЧ излучения на частоте радиационного перехода между ридберговскими состояниями атомов  $^{85}\text{Rb}$**

© Е.Ф. Стельмашенко<sup>1</sup>, О.А. Клезович<sup>1</sup>, В.Н. Барышев<sup>1</sup>, В.А. Тищенко<sup>1</sup>, И.Ю. Блинов<sup>1</sup>, В.Г. Пальчиков<sup>1,2</sup>, В.Д. Овсянников<sup>1,3</sup>



Оптика и  
спектроскопия,  
2020, том 128, вып. 8,  
1063

# ВЫВОДЫ

- Впервые исследована динамика трехфотонного лазерного возбуждения для мезоскопических ансамблей из  $N=1-5$  холодных ридберговских атомов Rb, локализованных в малом объеме возбуждения (размером  $\sim 20$  мкм) при их регистрации методом СИЭП.
- Для ридберговского состояния  $39P$  при малых временах взаимодействия наблюдался линейный рост вероятностей, а при больших временах вероятности выходили на насыщение, при этом для каждого числа атомов имелись свои особенности.
- Проведено сравнение экспериментальных зависимостей с результатами численных расчетов в рамках четырехуровневой модели и получено их хорошее согласие.
- Сделан вывод, что для дальнейшего увеличения контраста и времени когерентности необходимо выключать квадрупольное магнитное поле, сужать ширины линий лазеров до  $< 1$  кГц и увеличивать отстройки от промежуточных резонансов до  $\sim 1$  ГГц.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



*Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия*

<http://www.isp.nsc.ru>