



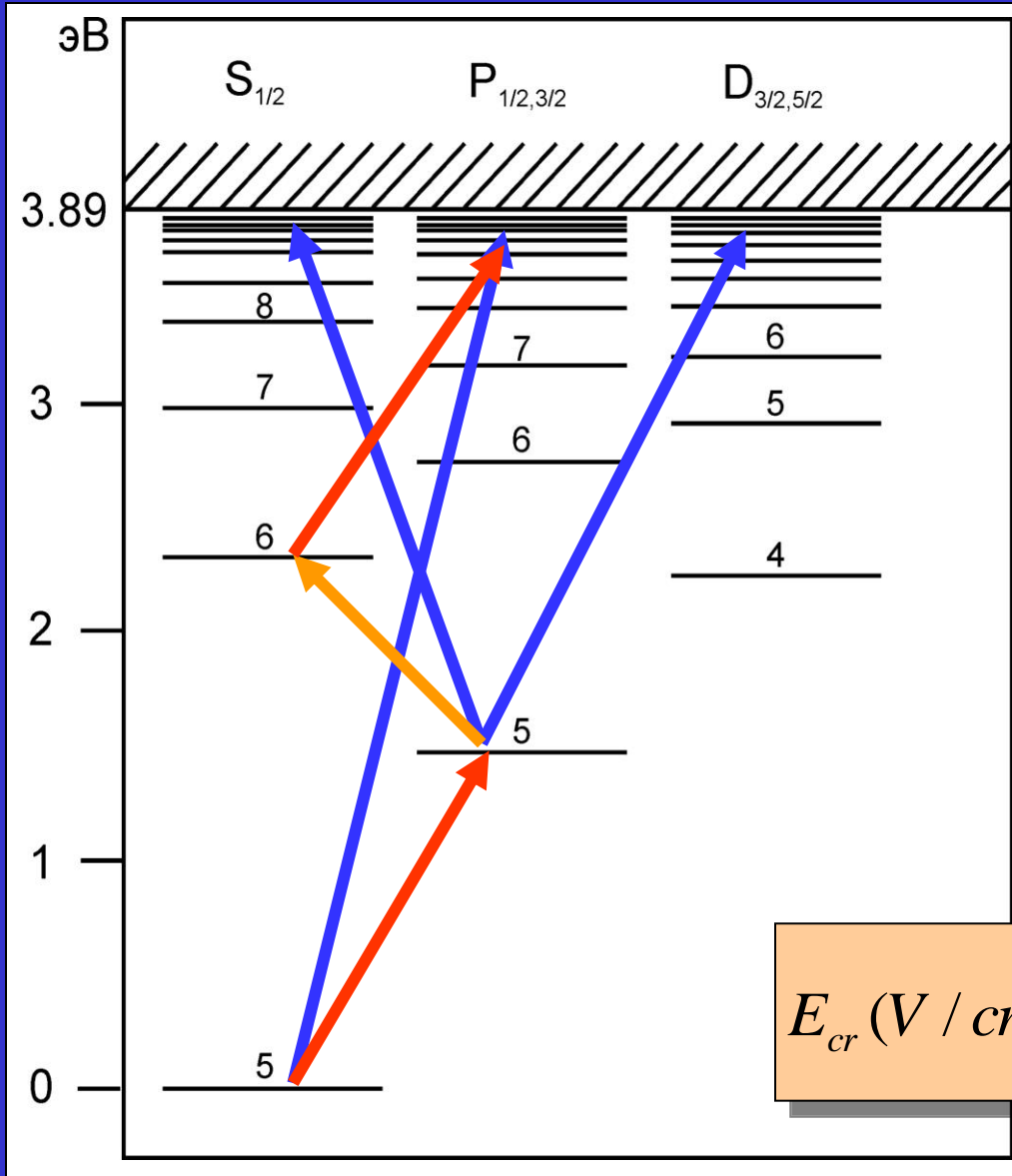
Институт физики полупроводников СО РАН
Новосибирский государственный университет

*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



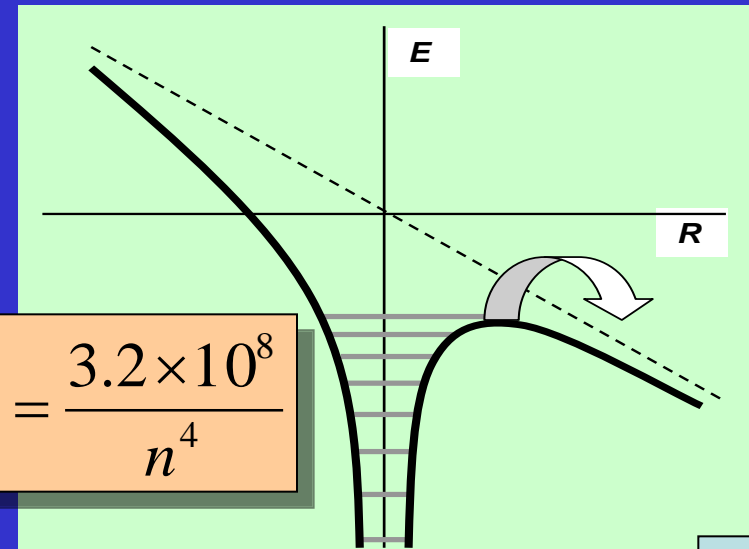
$$E_n = -\frac{Ry}{(n - \delta_L)^2}$$

$$r_n \sim n^2$$

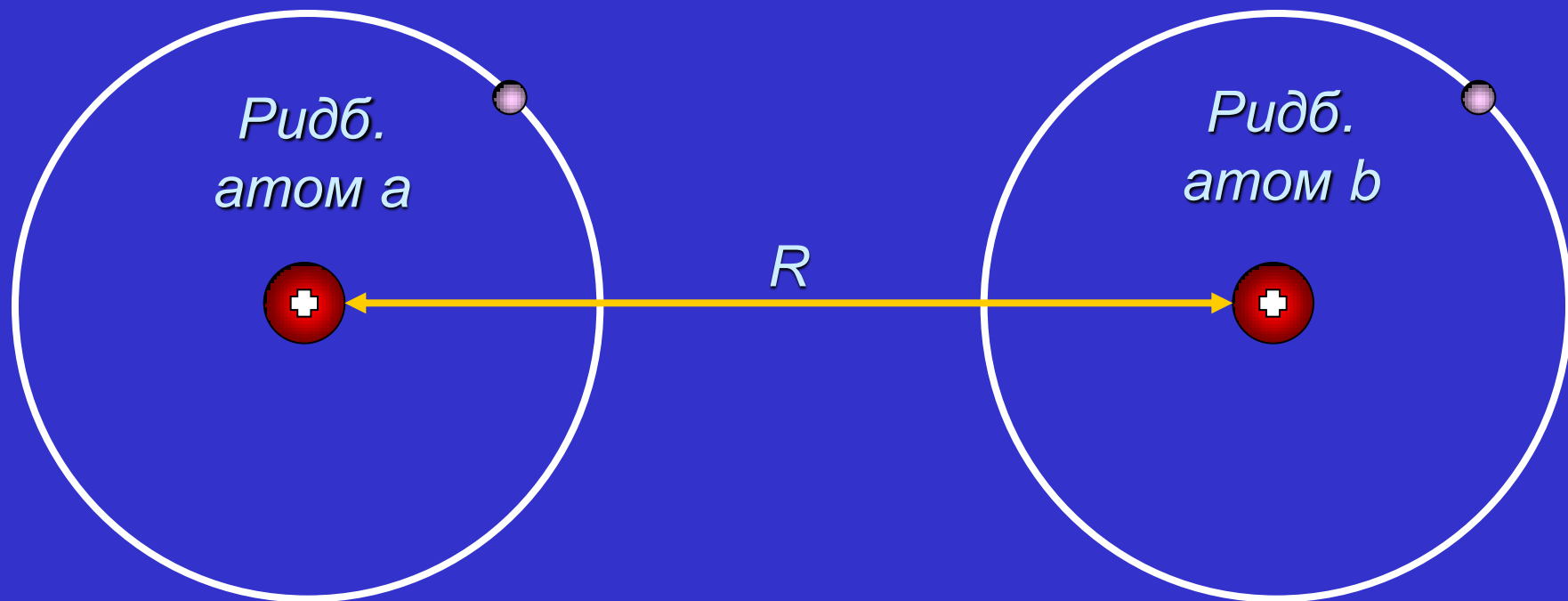
$$\tau_n \sim n^3 - n^5$$

$$\alpha_n \sim n^7$$

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



Взаимодействие двух ридберговских атомов



Дипольные моменты

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

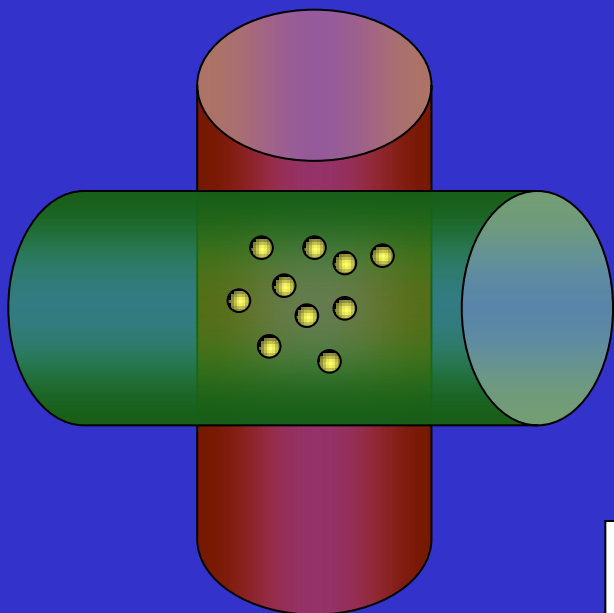
Энергия взаимодействия

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

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

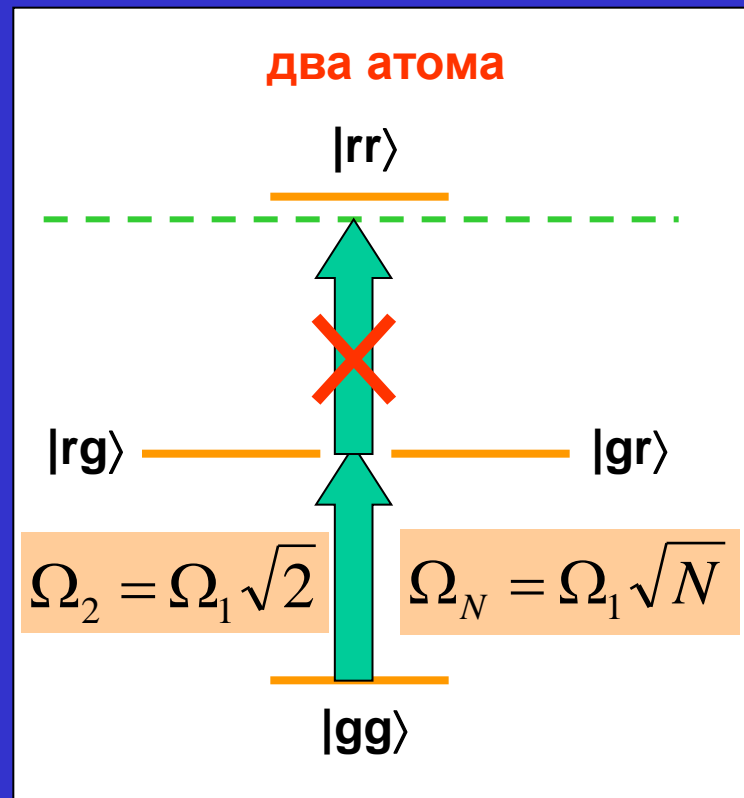
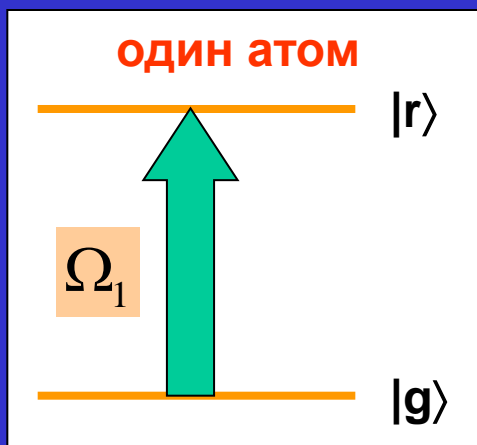
Дипольная блокада в мезоскопических ансамблях

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)

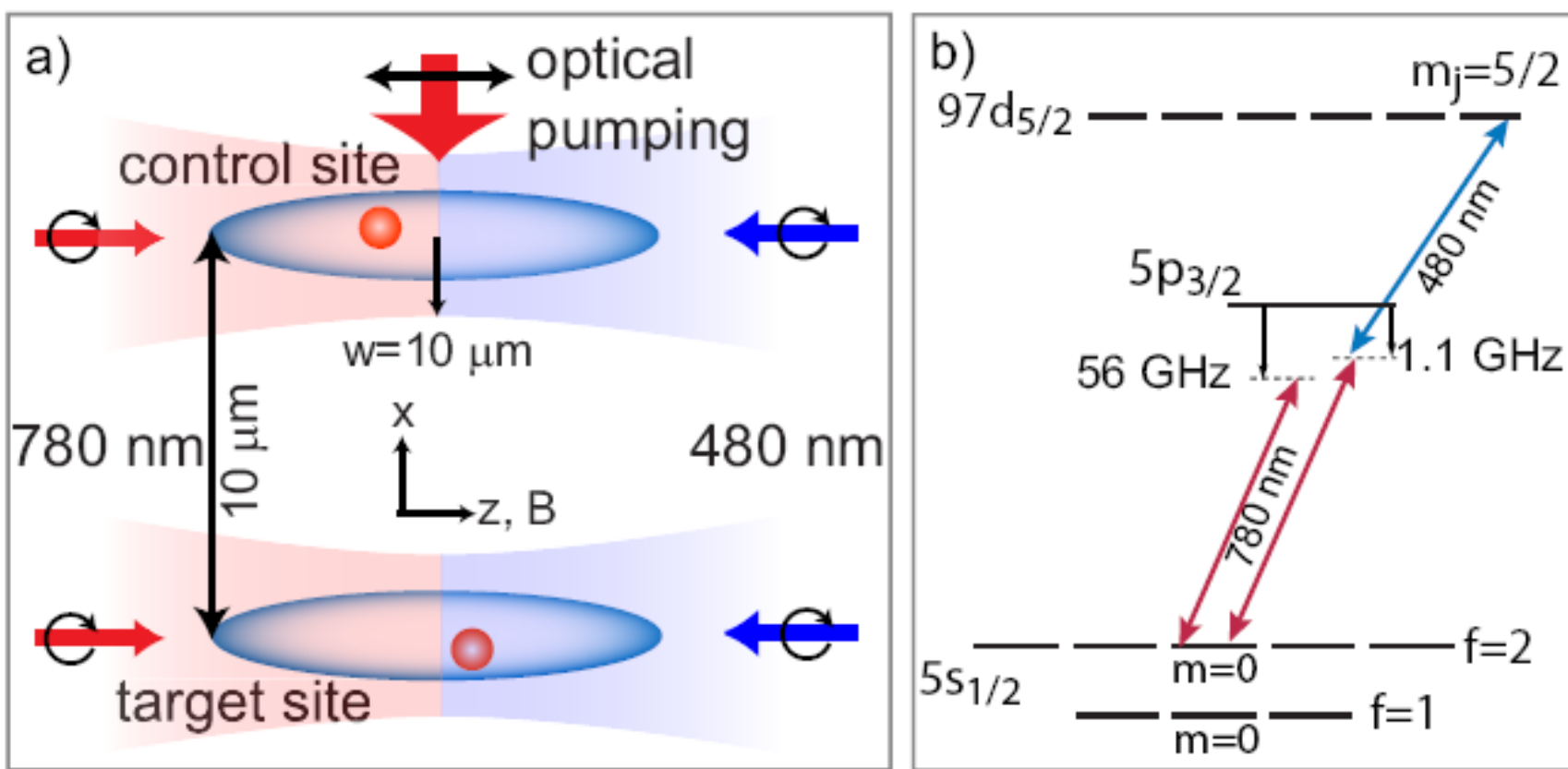


Demonstration of a Neutral Atom Controlled-NOT Quantum Gate

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

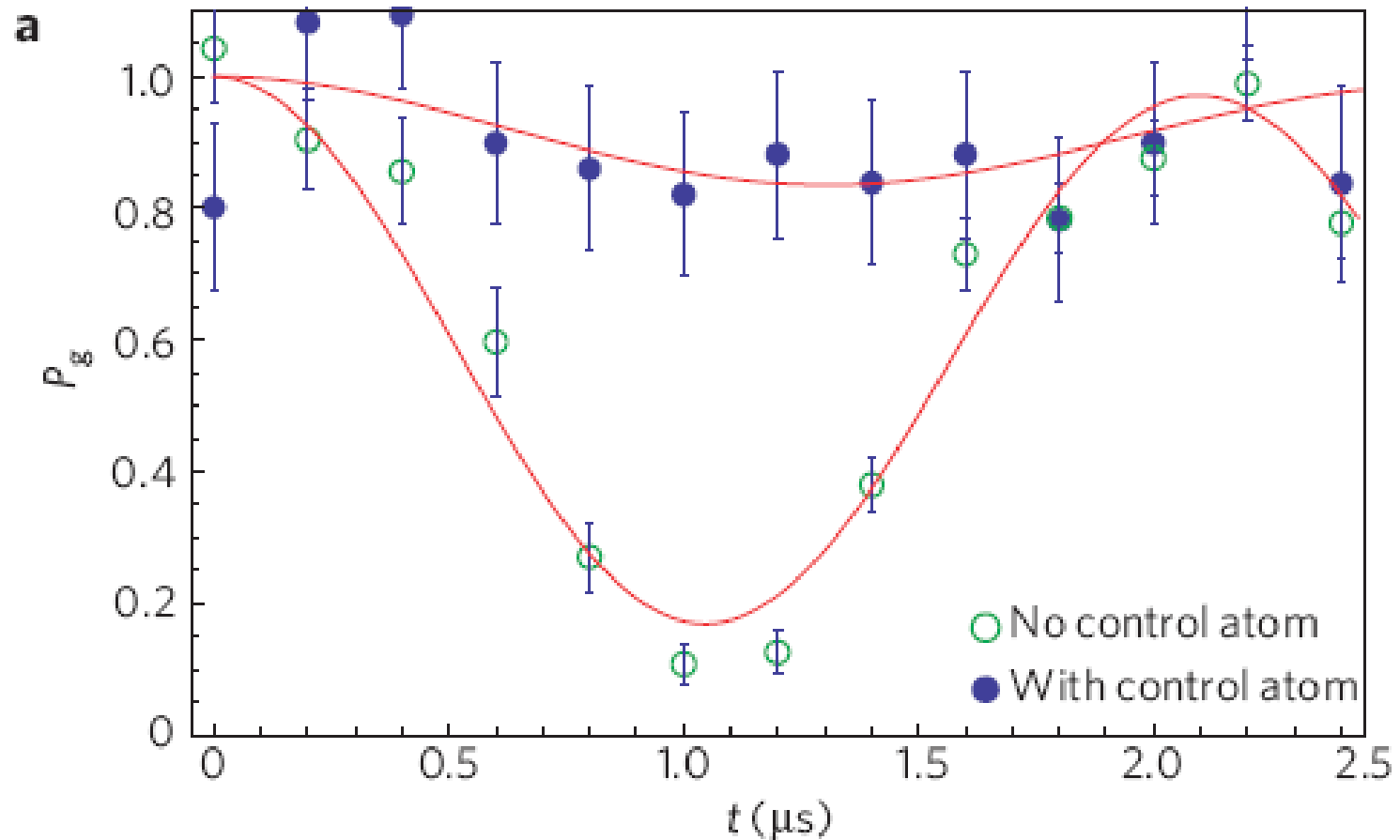
(Received 5 August 2009; published 8 January 2010)



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

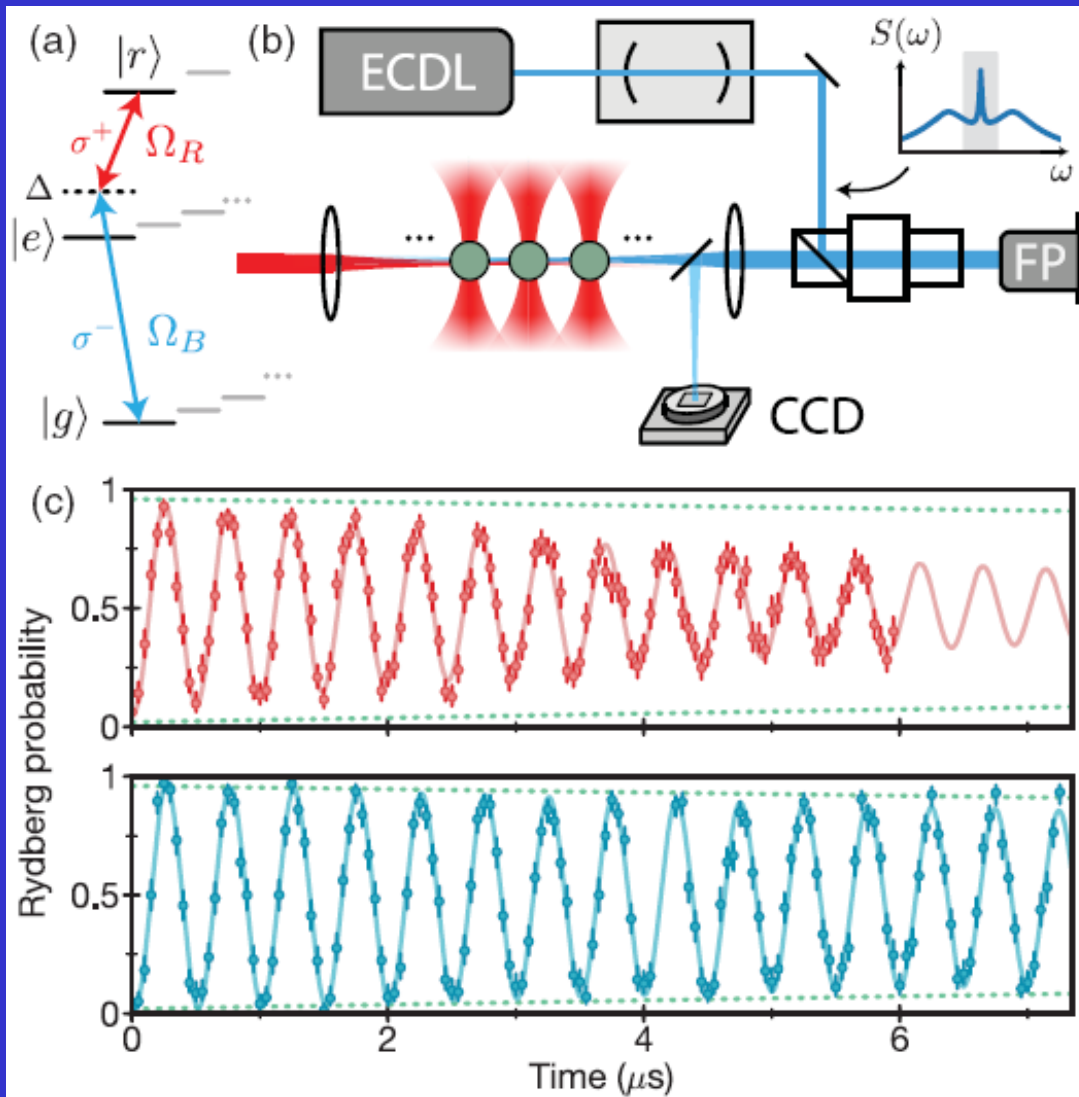
Observation of Rydberg blockade between two atoms

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,^{1*} Alexander Keesling,¹ Ahmed Omran,¹ Hannes Bernien,¹ Sylvain Schwartz,² Alexander S. Zibrov,¹ Manuel Endres,³ Markus Greiner,¹ Vladan Vuletić,⁴ and Mikhail D. Lukin¹



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

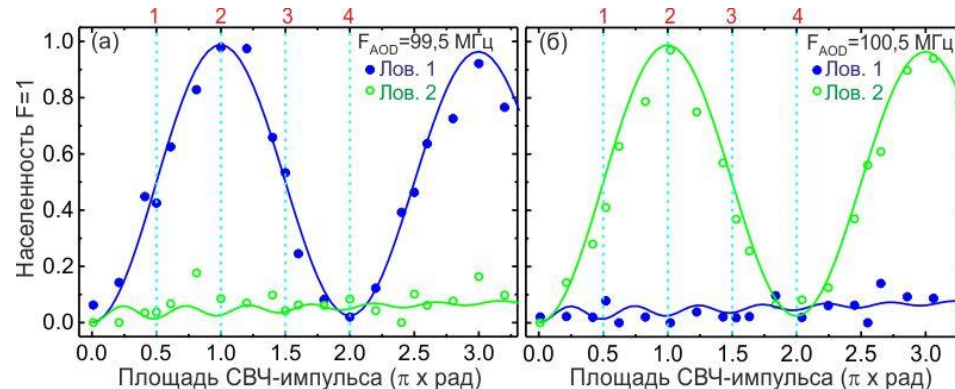
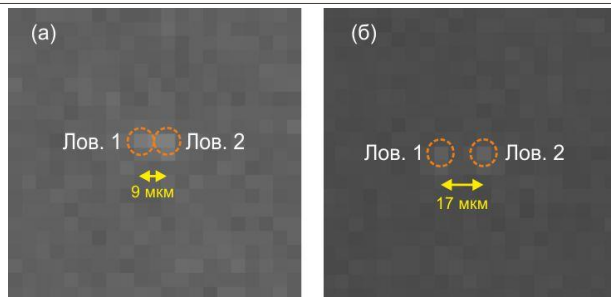
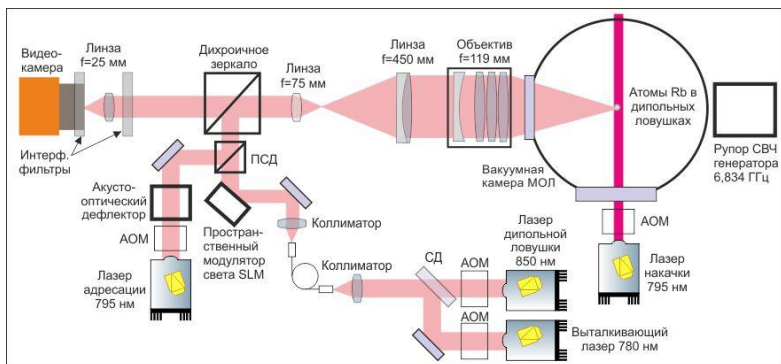
На основе этого в 2019 году была достигнута точность двухкубитовых операций для соседних кубитов $F=97-98\%$

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



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

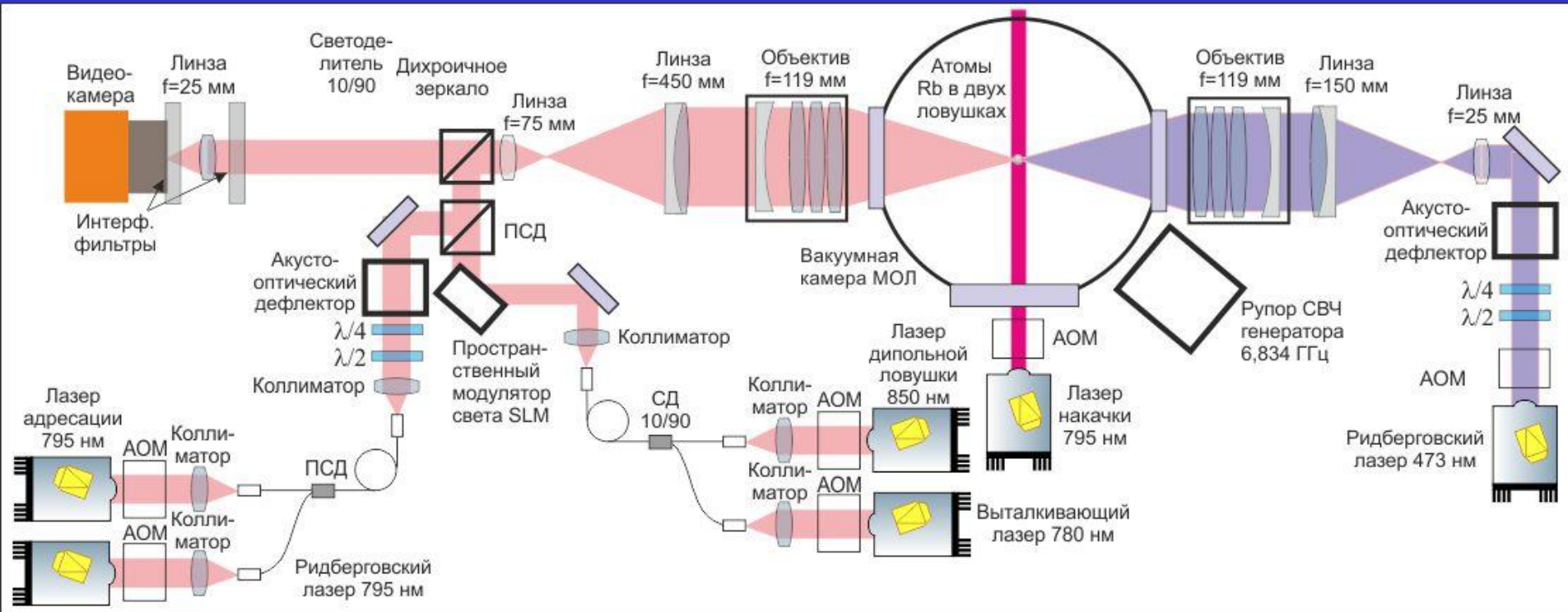
И.И.Бетеров, Е.А.Якшина, В.М.Энтин, Д.Б.Третьяков, К.Ю.Митянин, Н.В.Альянова, И.И.Рябцев



Экспериментальные записи осцилляций Раби, приведенных к масштабу площади СВЧ-импульса. Вертикальные линии задают точки 1-4 для пересечения площадей $\pi/2$, π , $3\pi/2$, 2π 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}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 $97 \pm 3\%$.

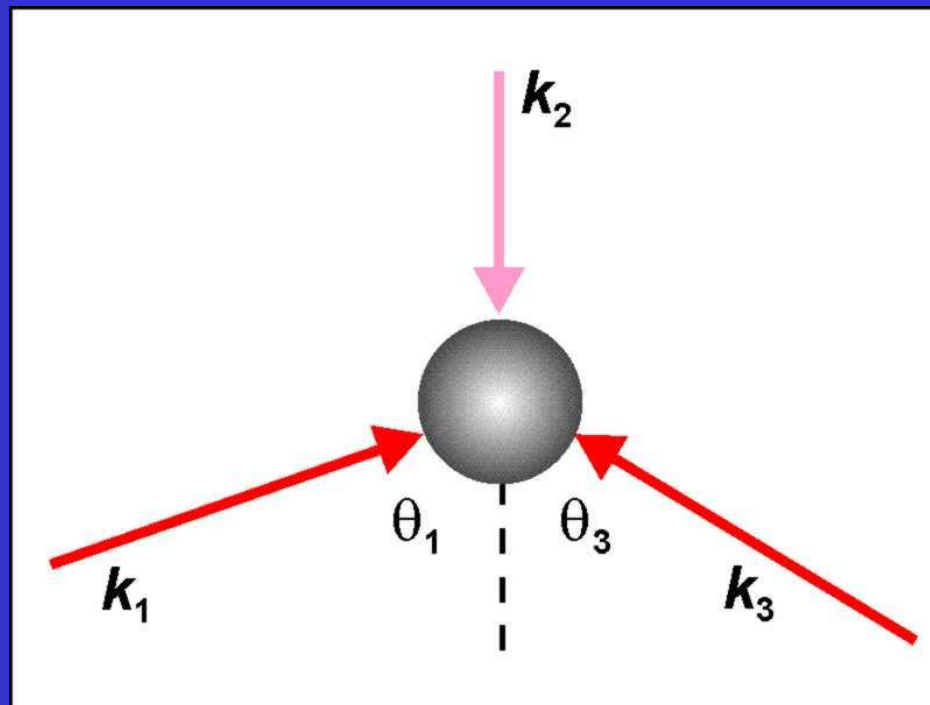
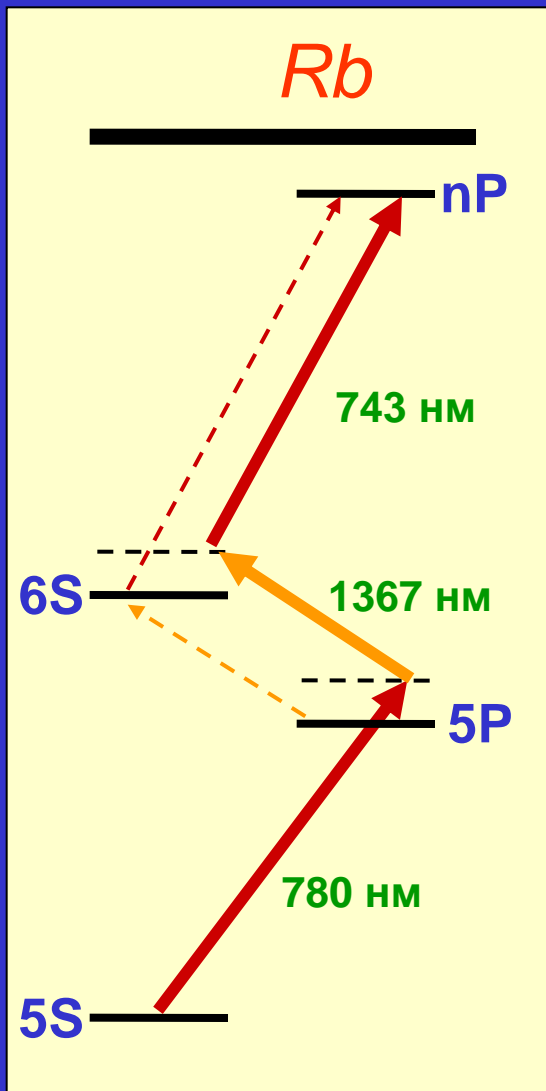
Планируются эксперименты по реализации двухкубитовых квантовых операций на основе возбуждения ридберговских состояний



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

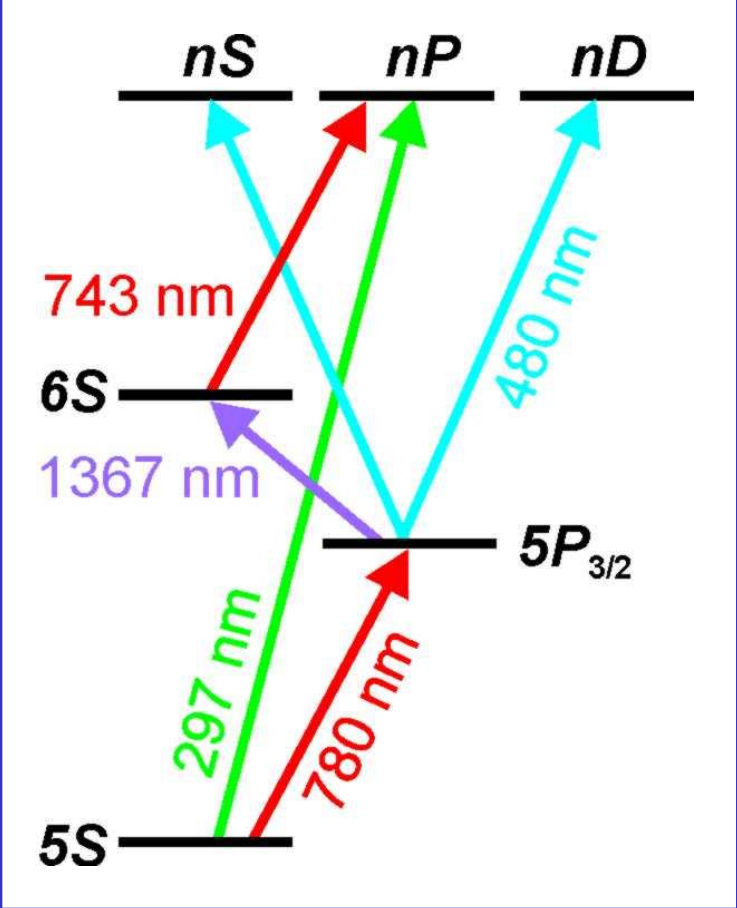
Лазерное возбуждение ридберговских состояний без эффекта отдачи и эффекта Доплера (теория)



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

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

Вероятность возбуждения лазерным π - импульсом



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

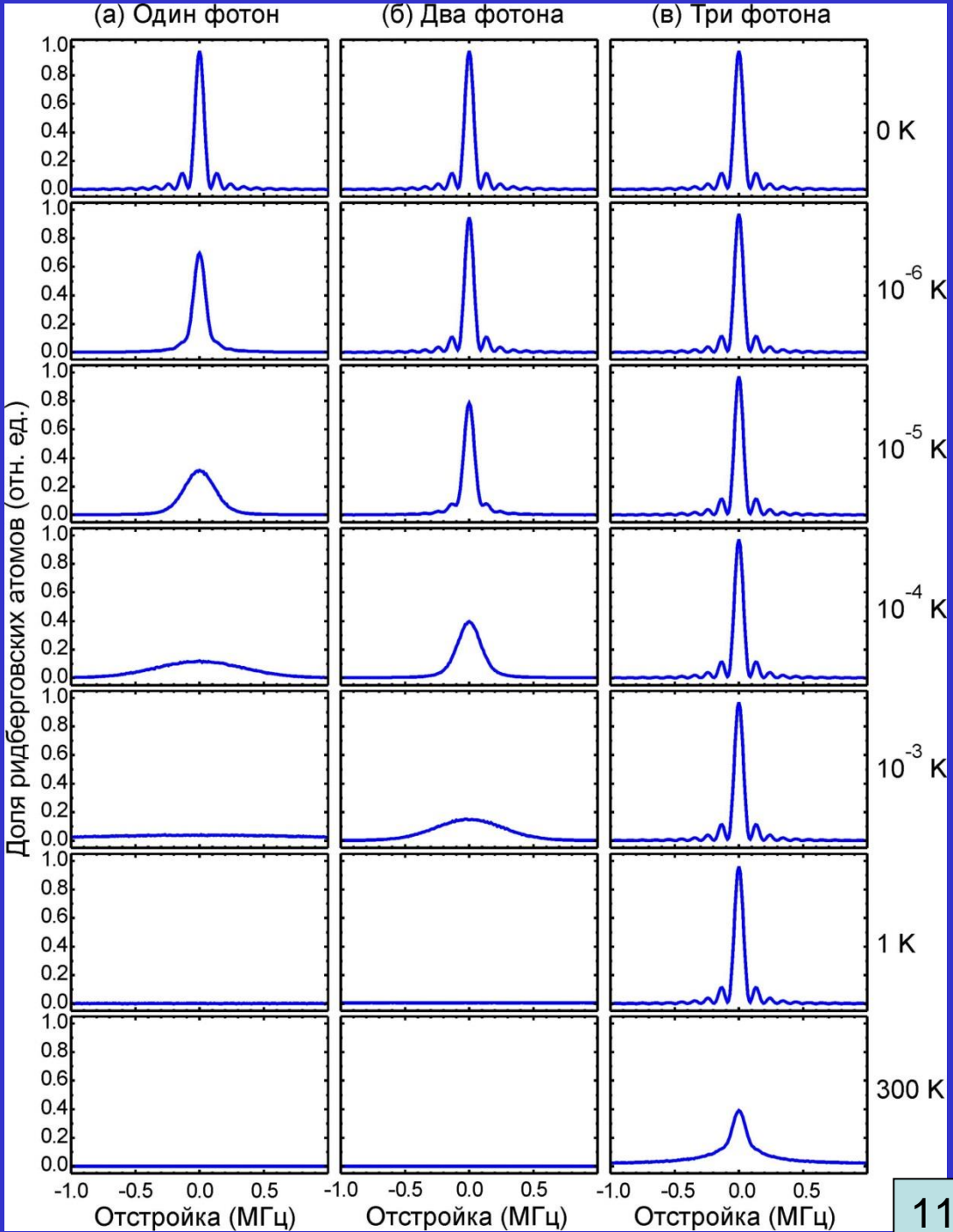
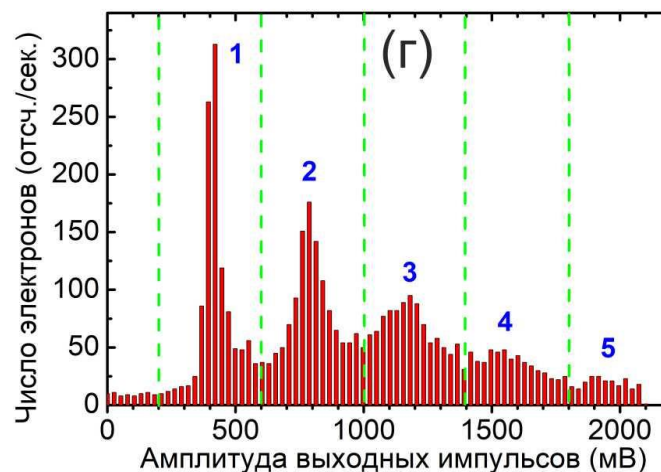
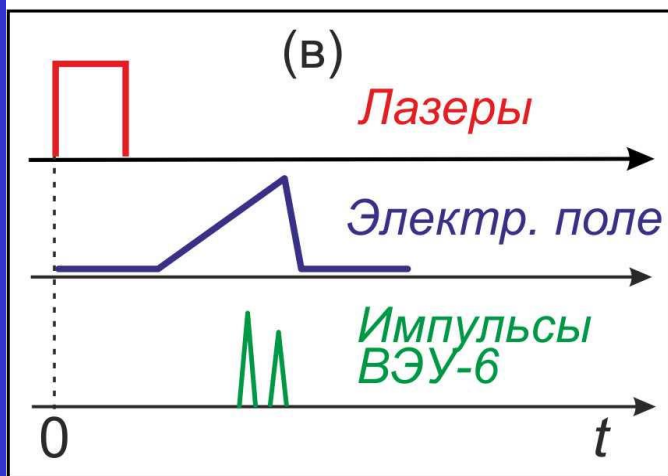
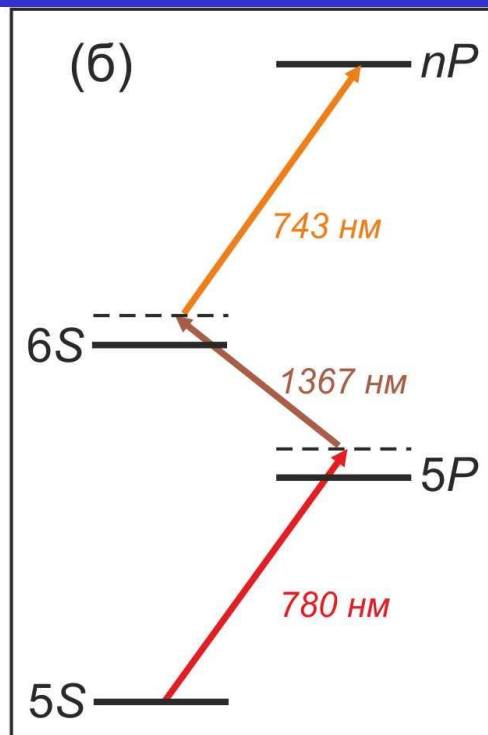
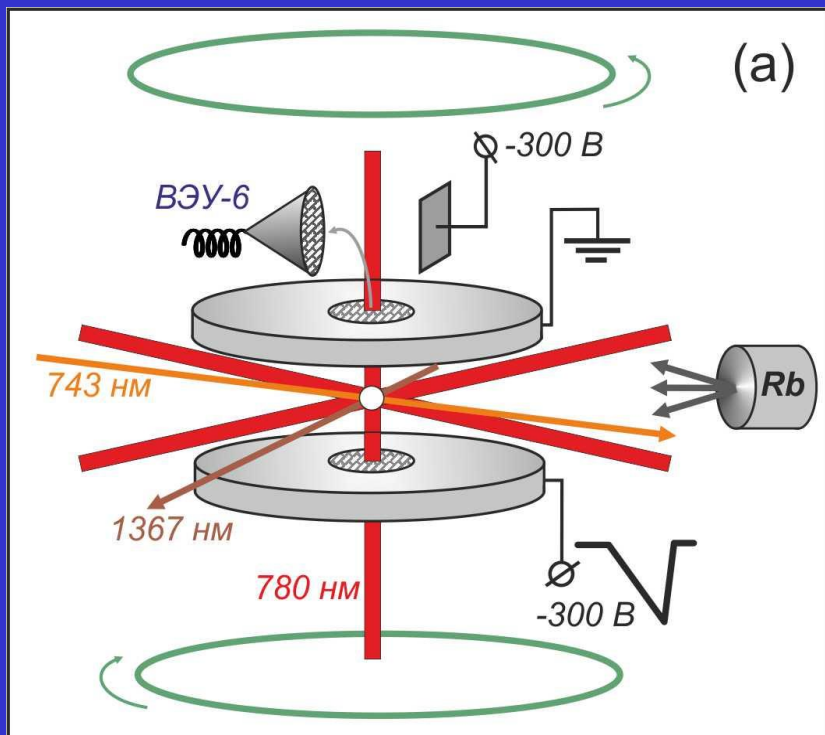


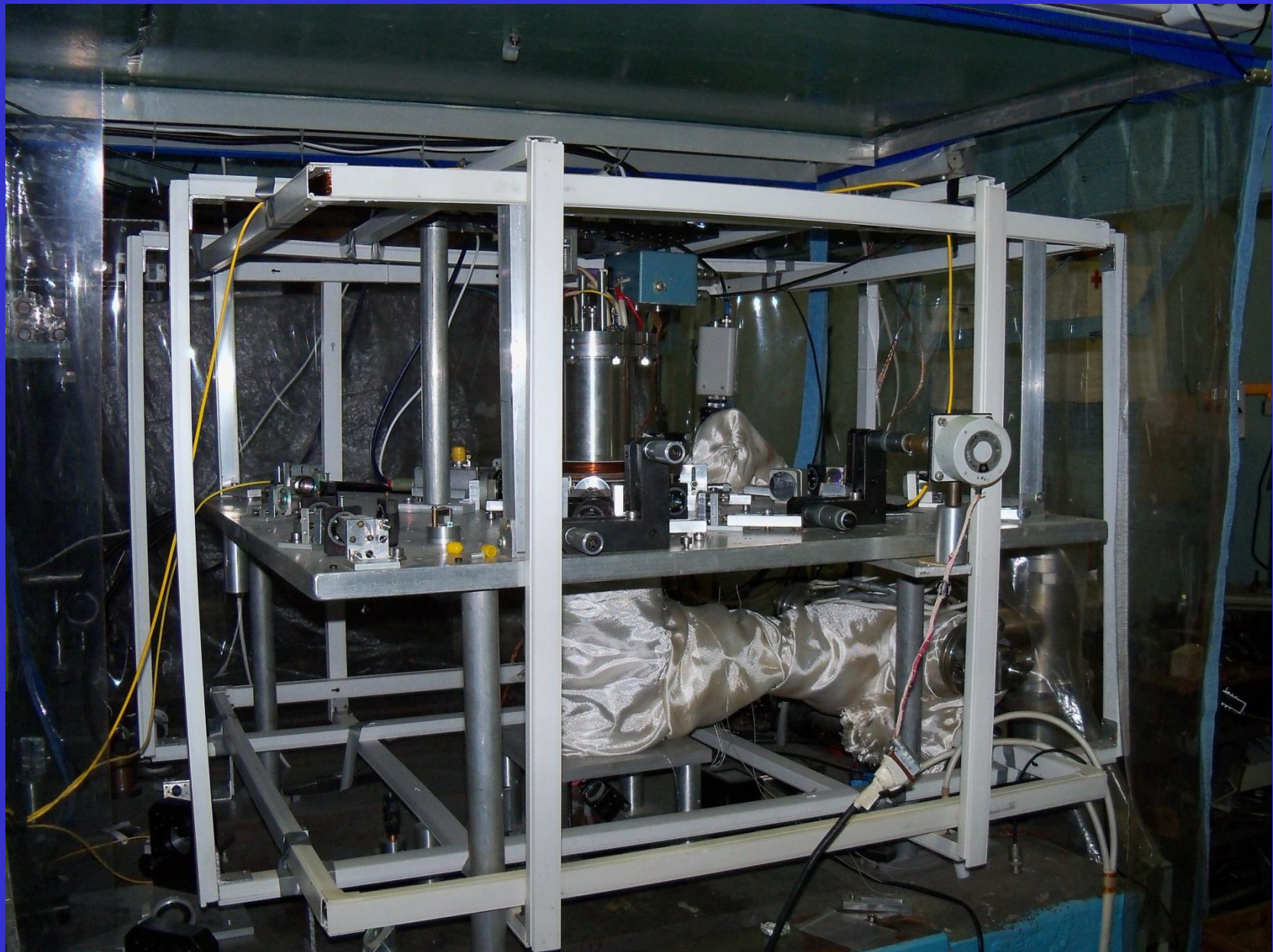
Схема экспериментальной установки для изучения холодных ридберговских атомов Rb в магнитооптической ловушке



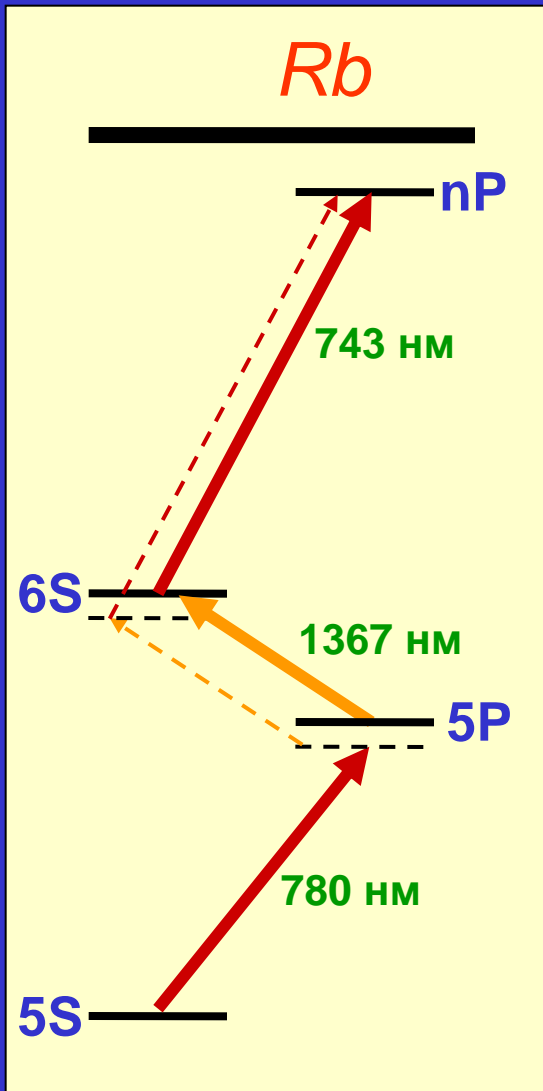
Объем лазерного возбуждения размером ~ 20 мкм.

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

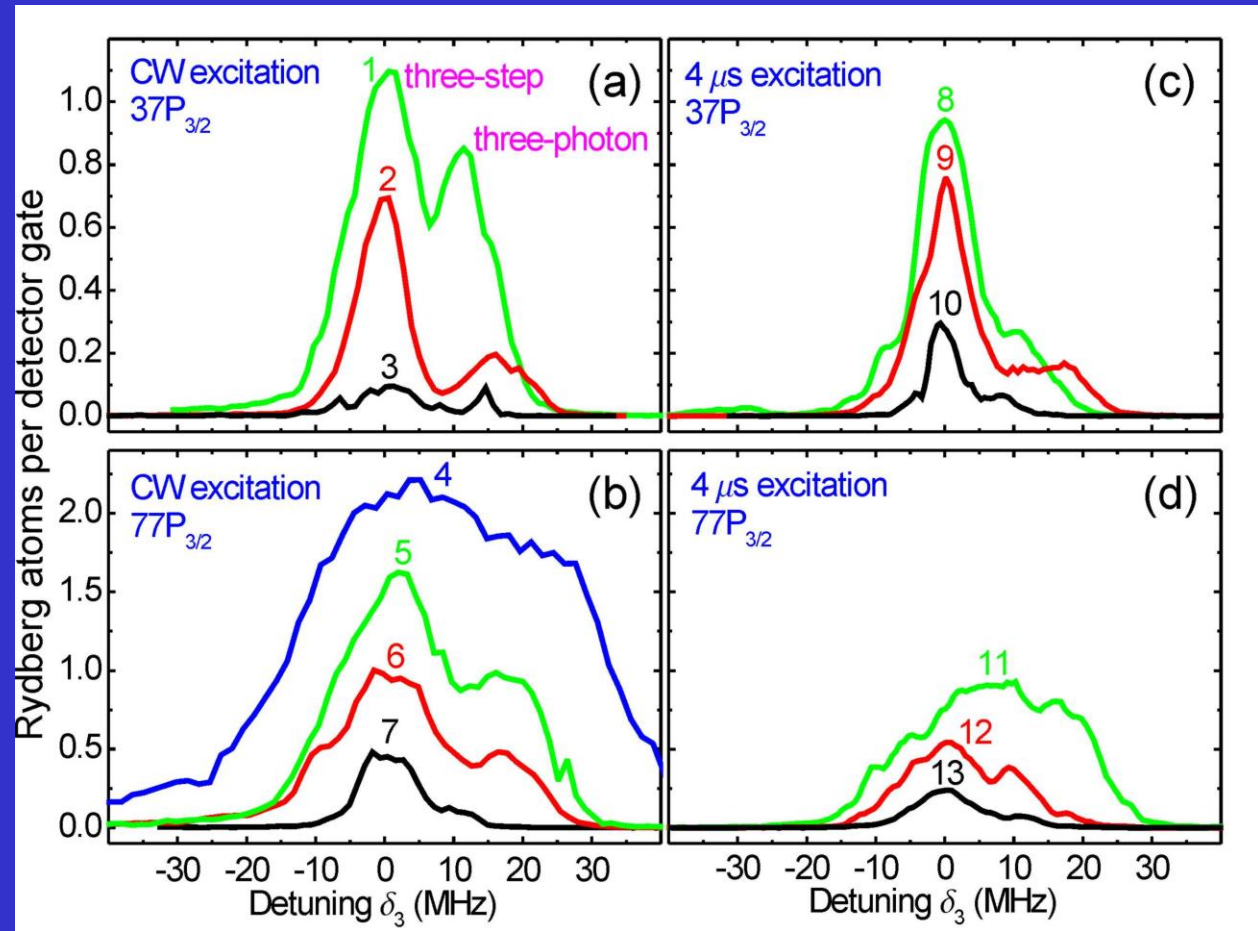
Магнитооптическая ловушка



Спектры трехфотонного возбуждения в работающей МОЛ

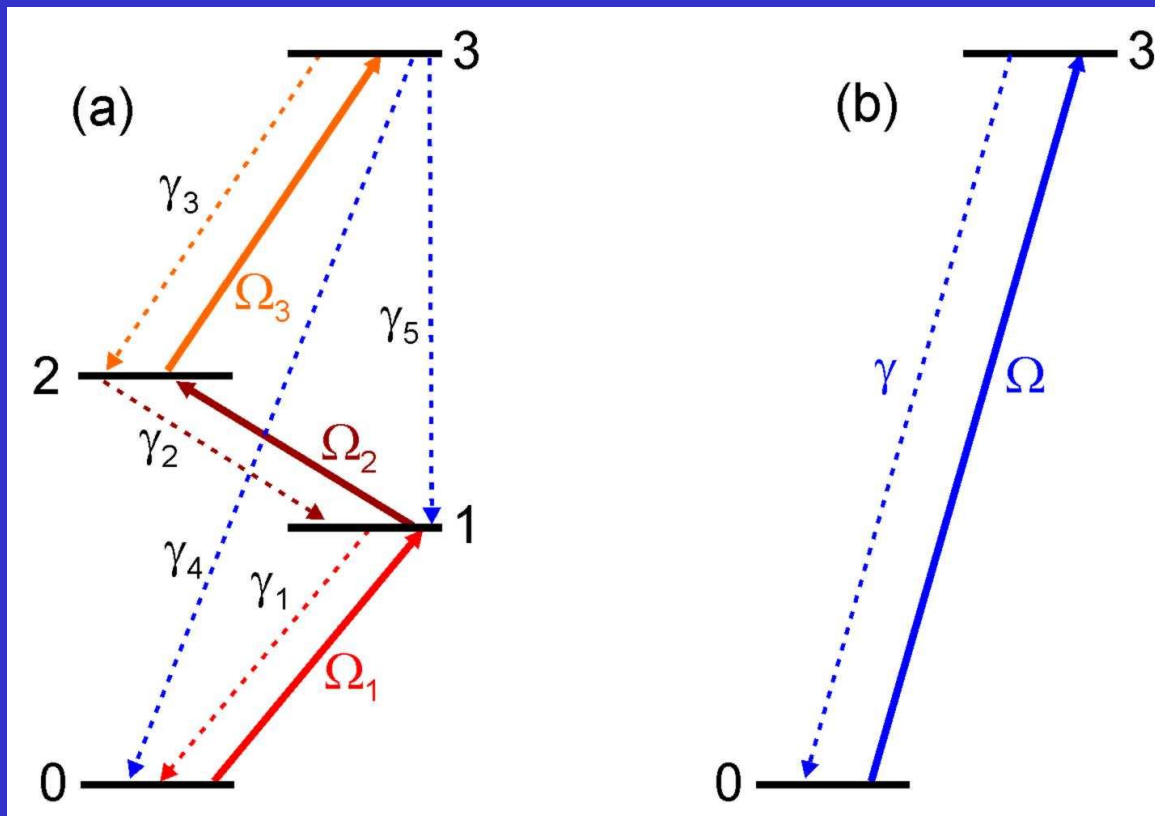


Варьируются частоты Раби и отстройка δ_1



В.М.Энтин и др., ЖЭТФ 143, 831 (2013)

Теория трехфотонного лазерного возбуждения



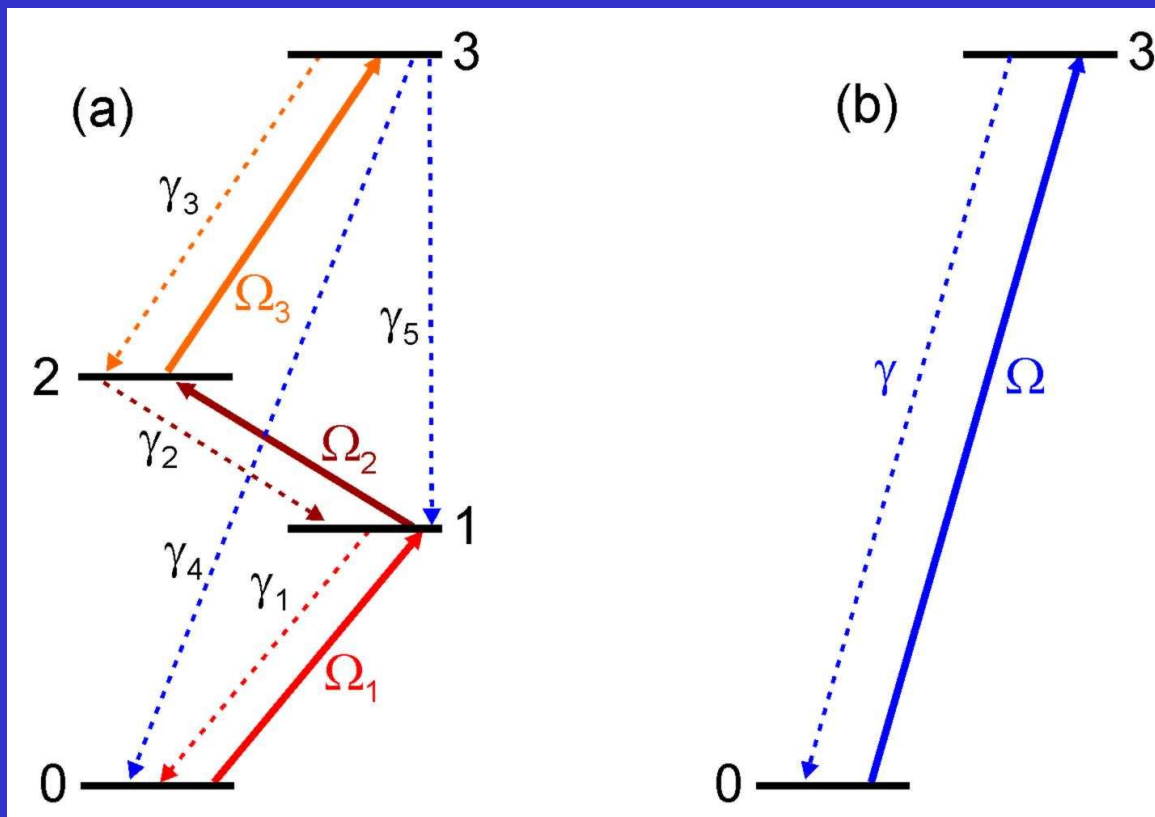
$$\rho_{33}^{weak} \approx \frac{\Omega^2}{2\Omega^2 + \gamma^2 + 4\delta^2} \left[1 + e^{-\gamma t} - 2e^{-\gamma t/2} \cos\left(t\sqrt{\Omega^2 + \delta^2}\right) \right]$$

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

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

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

Теория трехфотонного лазерного возбуждения



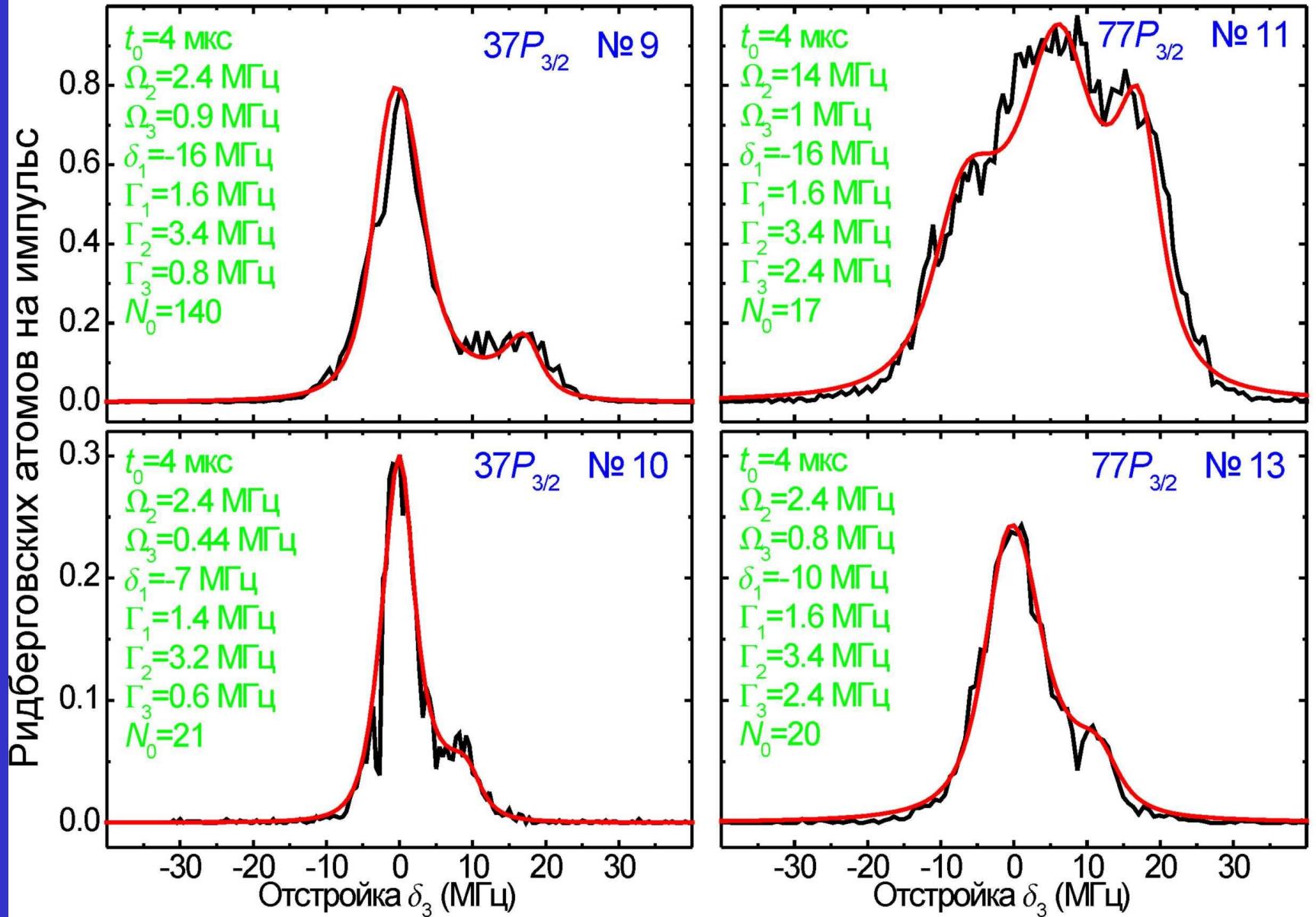
$$\rho_{33}^{strong} \approx \frac{\Omega^2}{2\Omega^2 + \gamma^2 + 4\delta^2} \left[1 - e^{-\frac{2\Omega^2 + \delta^2}{4\Omega^2 + \delta^2} \gamma t} \right] + \frac{\Omega^2 / 2}{\Omega^2 + \delta^2} \left[e^{-\frac{2\Omega^2 + \delta^2}{4\Omega^2 + \delta^2} \gamma t} - e^{-\frac{6\Omega^2 + \delta^2}{4\Omega^2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

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

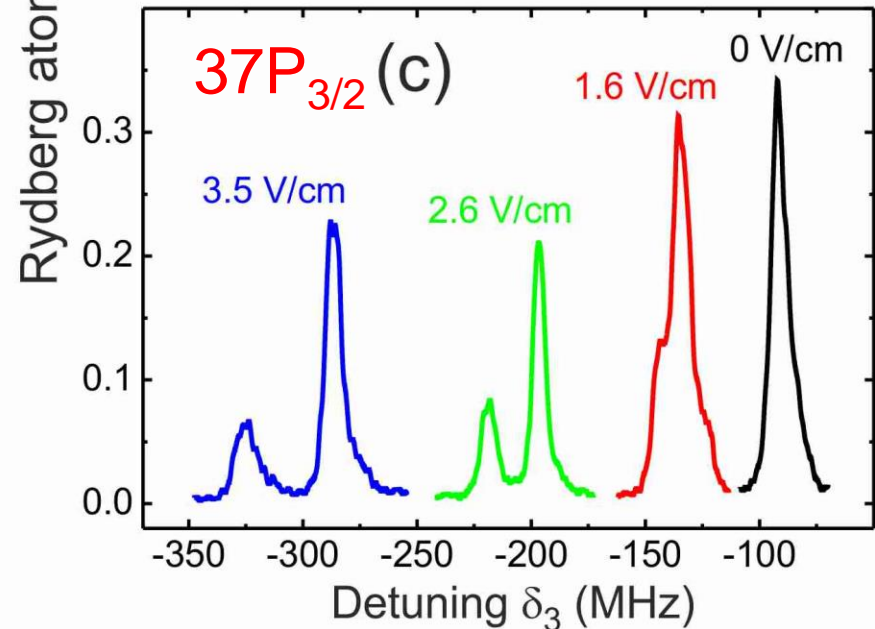
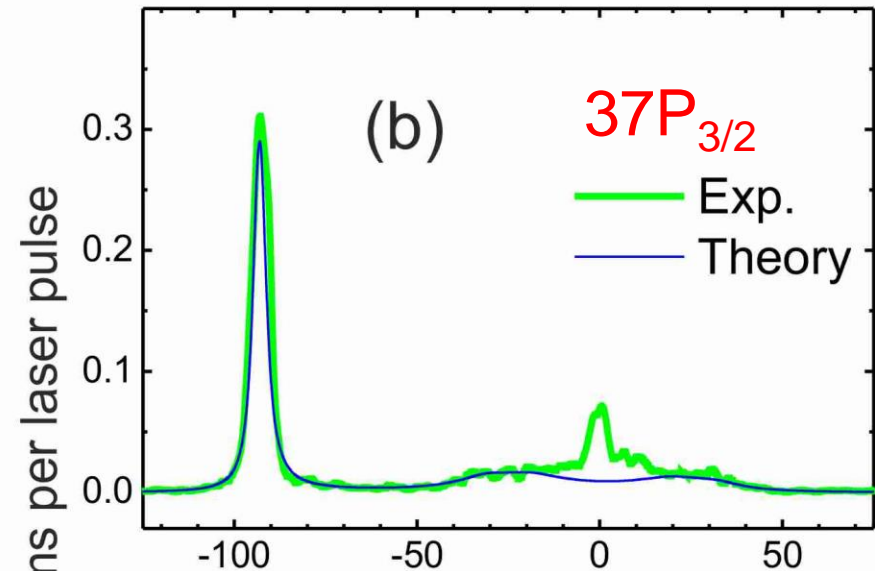
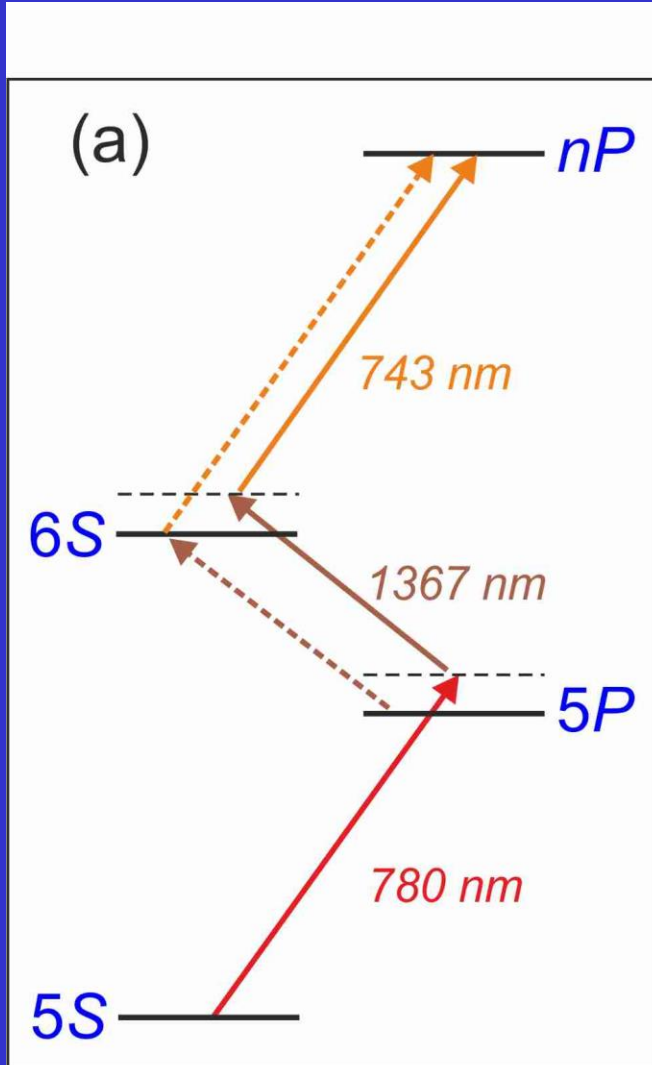
$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \frac{\Omega_1^2}{4\delta_1} + \frac{\Omega_3^2}{4\delta_3}$$

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

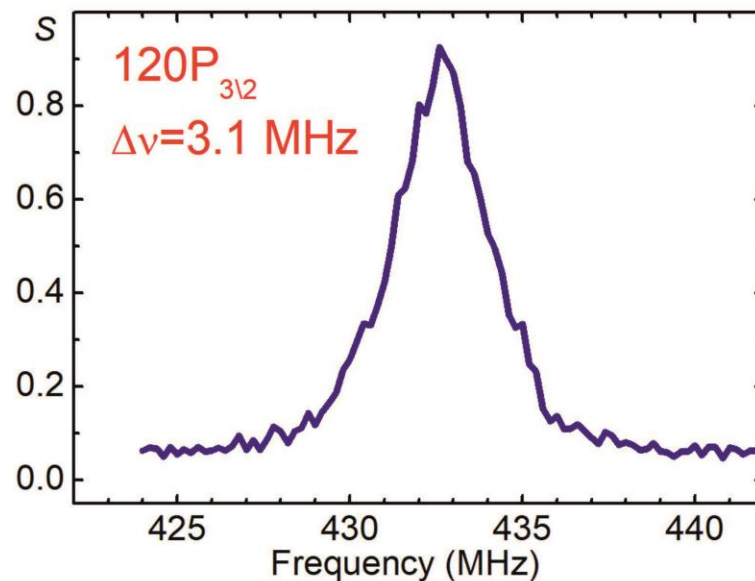
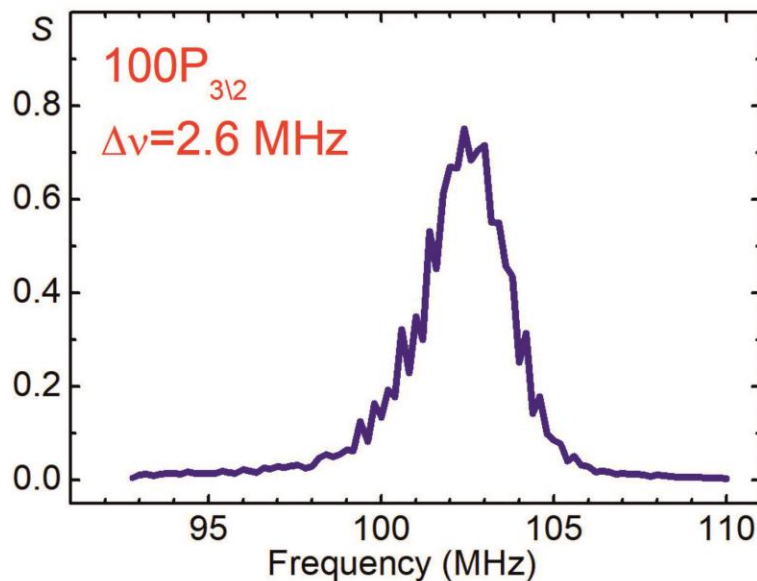
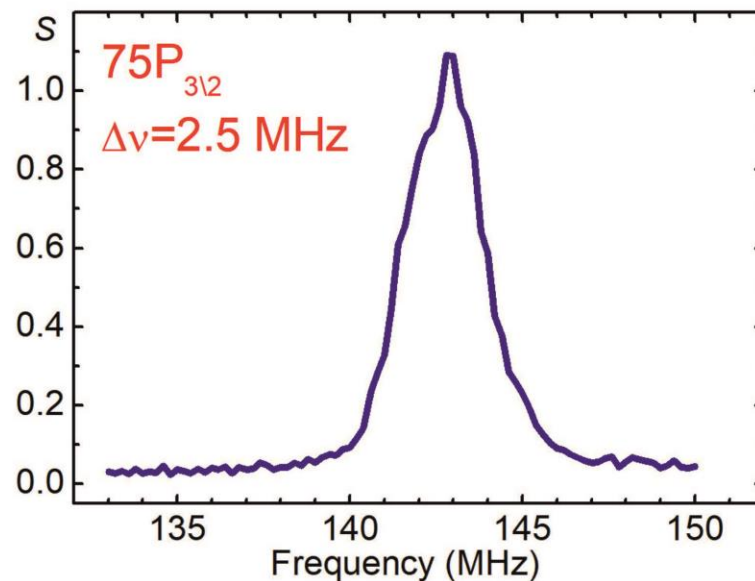
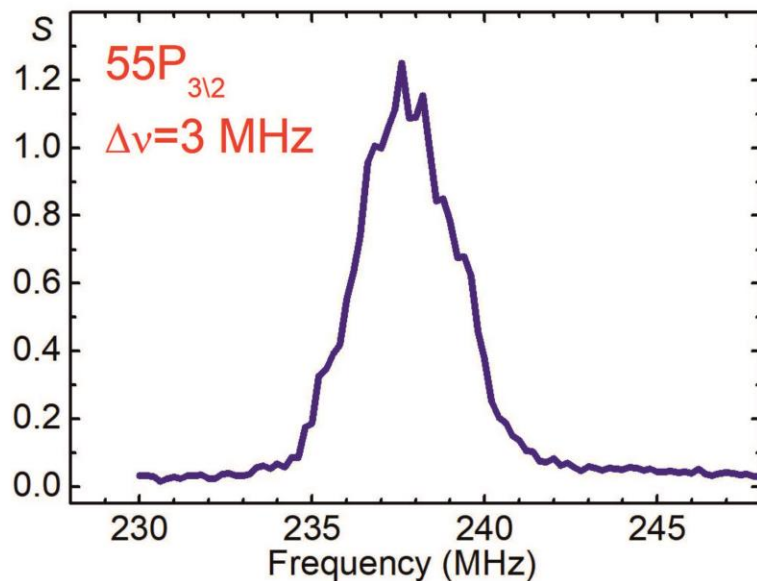
Сравнение теории и эксперимента

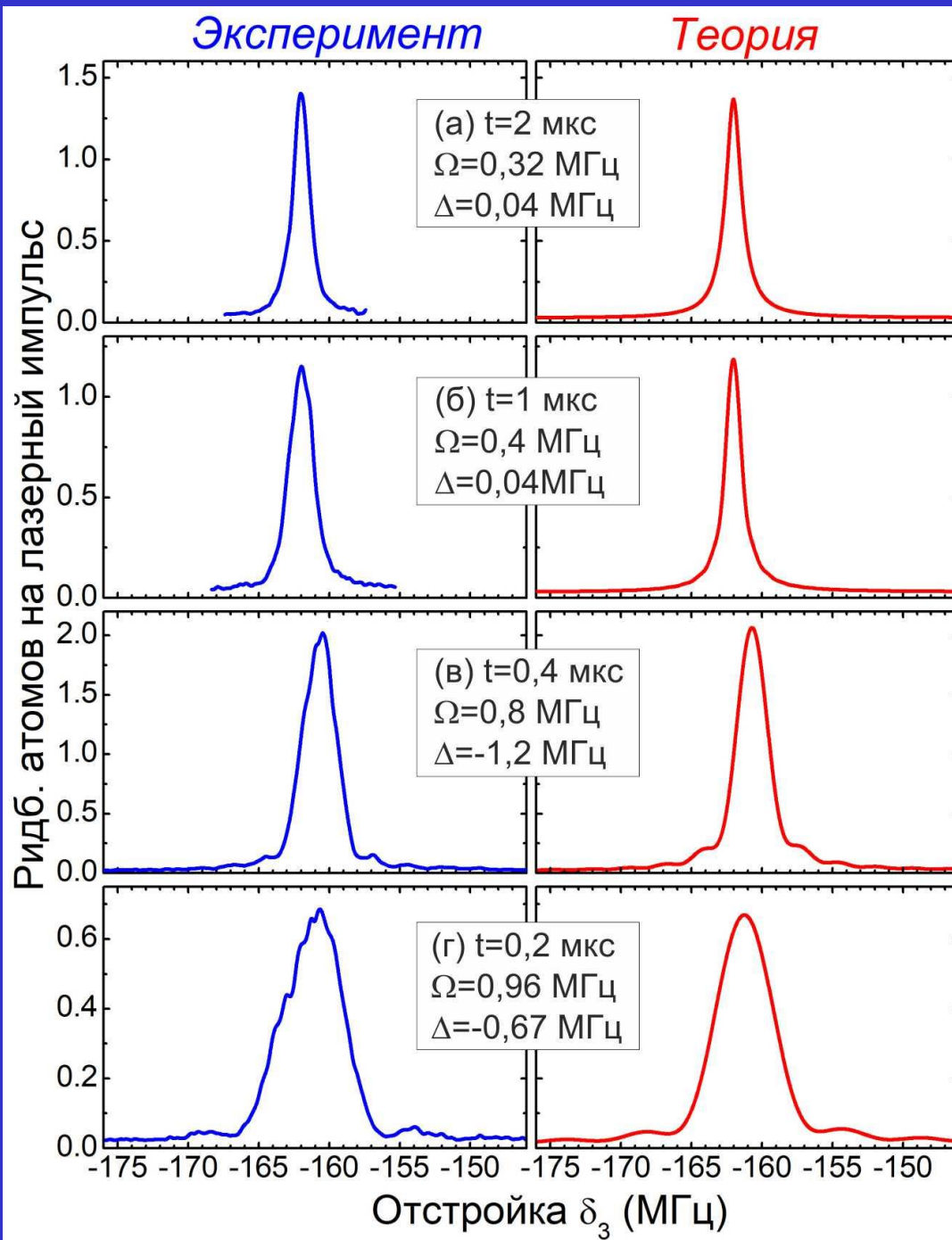


Трехфотонное возбуждение с увеличенной отстройкой



Спектры трехфотонного лазерного возбуждения высоких ридберговских nP состояний атомов Rb

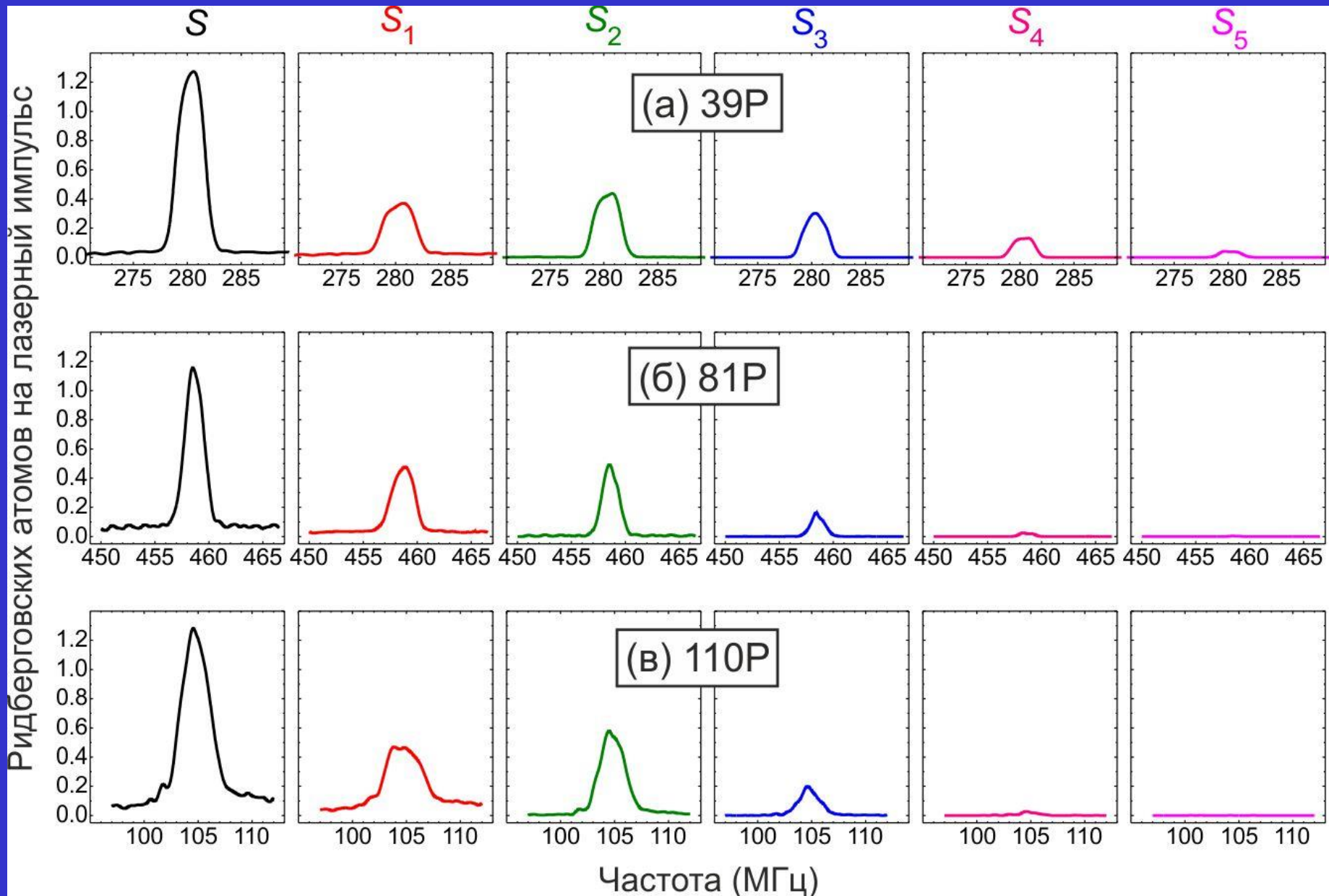




Трехфотонное
 лазерное возбуждение
 ридберговского
 состояния $37P$
 с высоким
 разрешением и
 осцилляциями Раби на
 крыльях резонанса

*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.

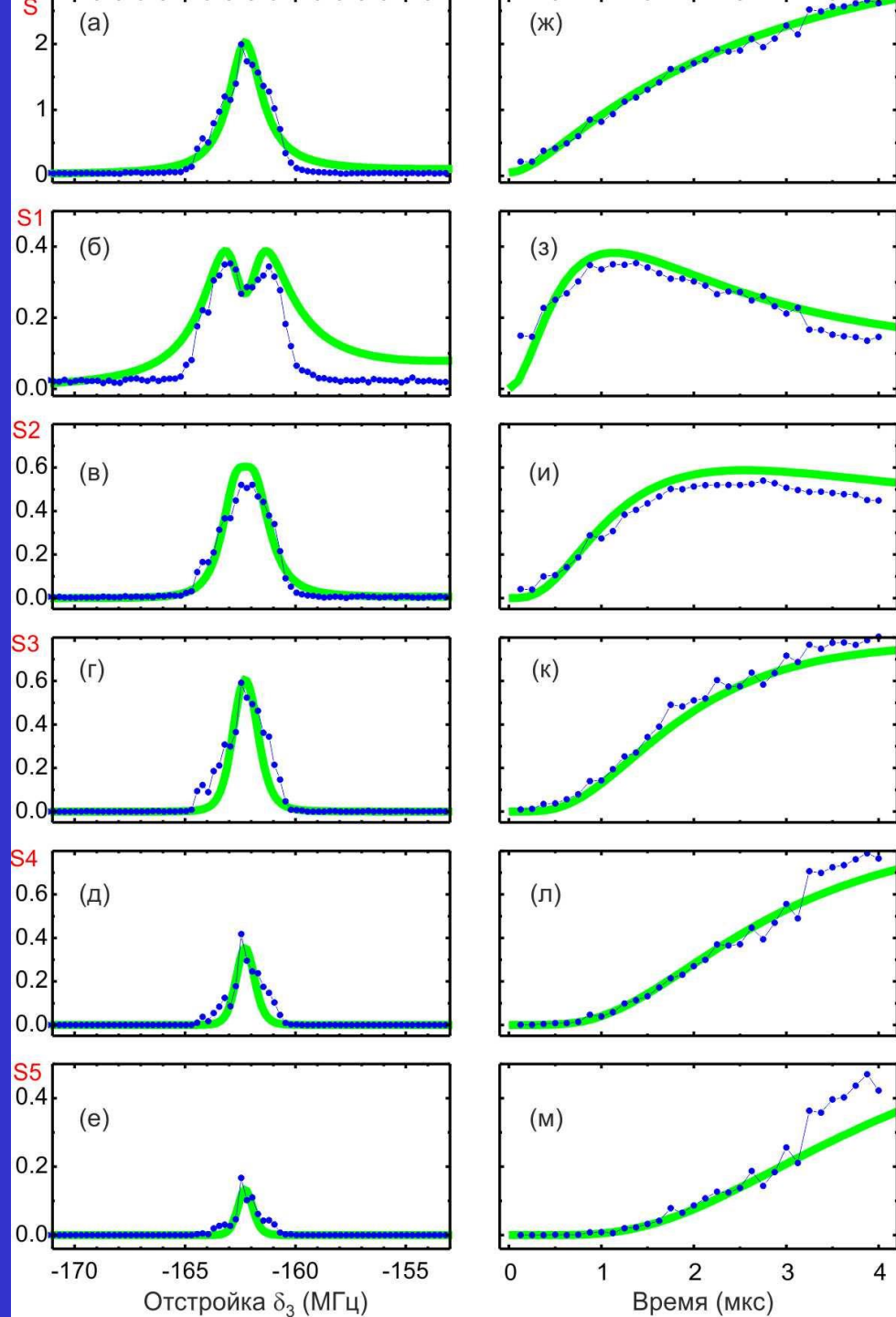
В эксперименте $S \sim 1 \ll N_0 \sim 10$, формула нечувствительна к точному значению N_0

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

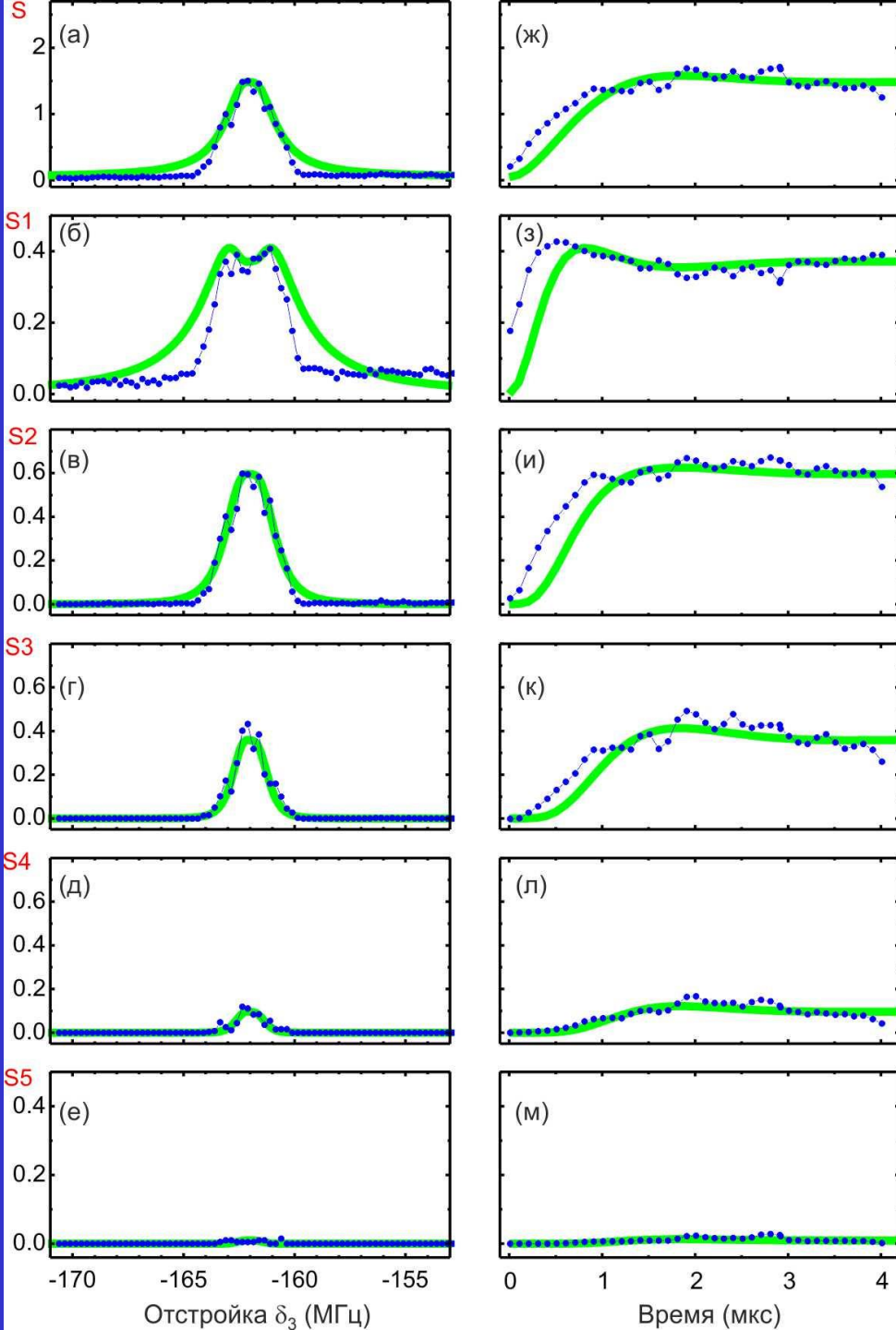


Многоатомные спектры и динамика трехфотонного лазерного возбуждения состояния $39P$ в атомах Rb

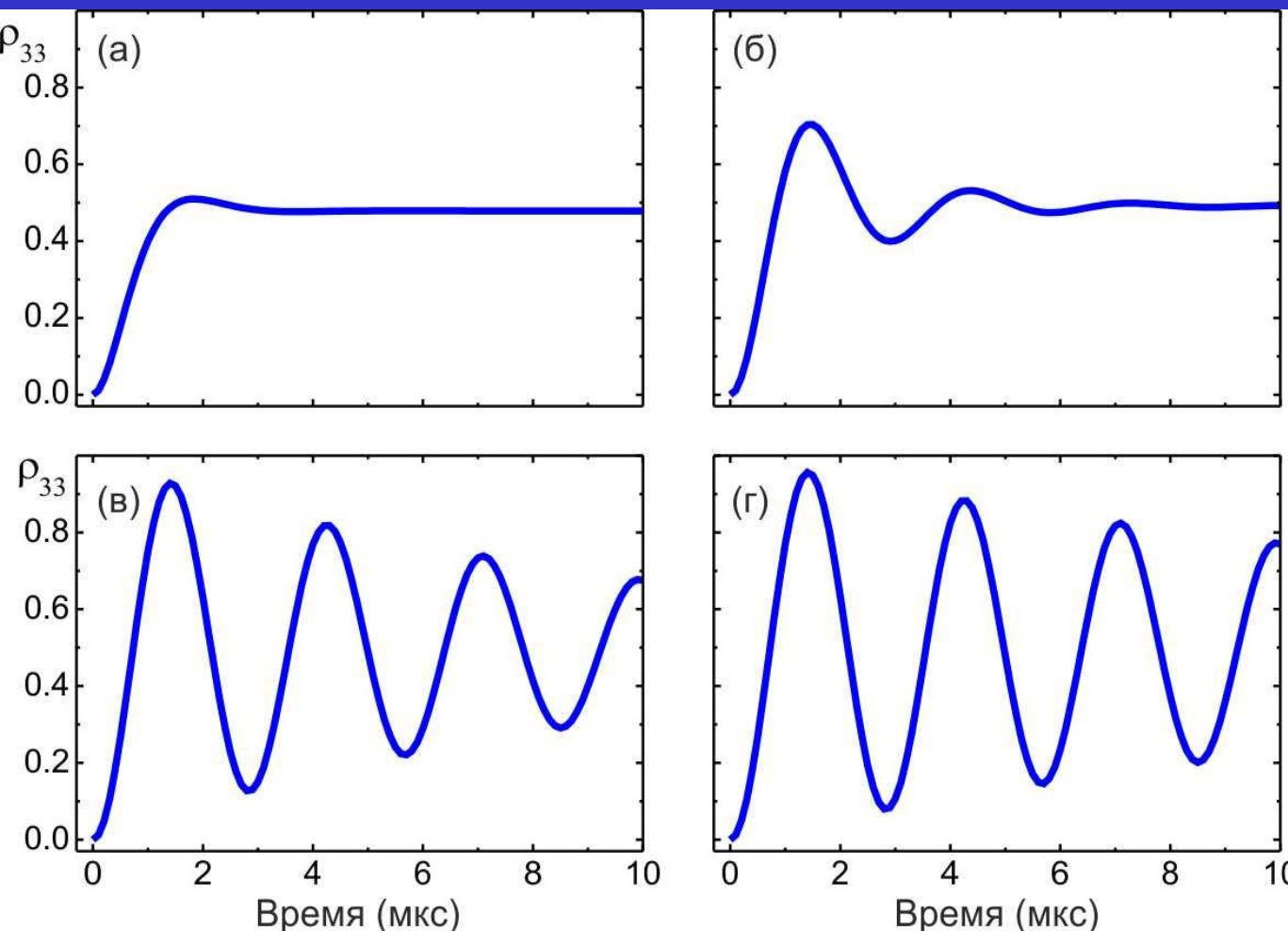
(а)-(е) Запись S - сигнал, соответствующий среднему числу ридберговских атомов, регистрируемых на лазерный импульс. Записи S_1 - S_5 - спектры возбуждения мезоскопических ансамблей с определенным числом ридберговских атомов $N=1-5$ при $t = 4$ мкс. Их сумма дает полный измеряемый сигнал S . Сплошные 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?

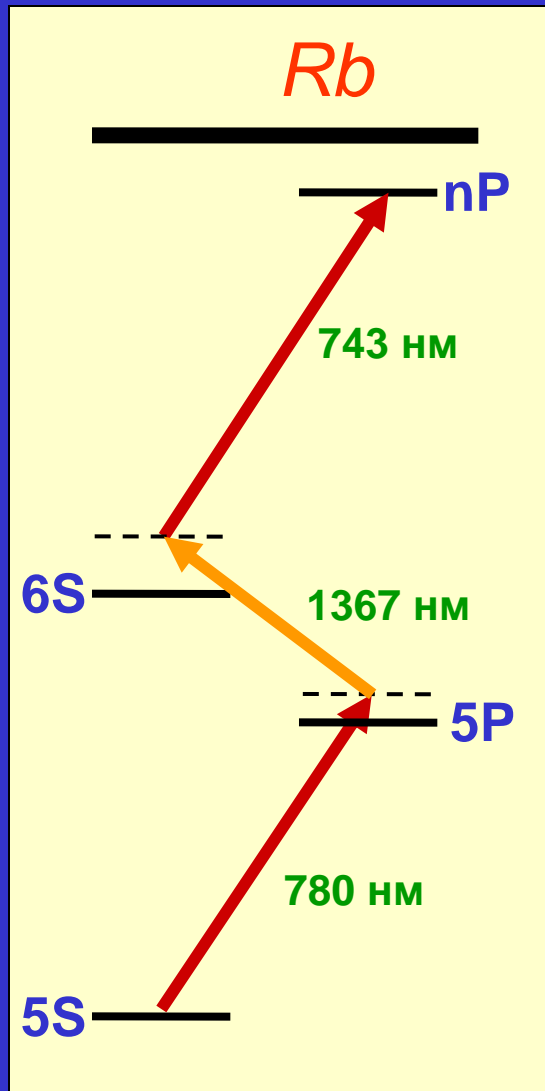


Результаты численного расчета осцилляций Раби для вероятности трехфотонного лазерного возбуждения атома Rb в ридберговское состояние $39P$ при трехфотонной частоте Раби $\Omega = 360$ кГц и различных параметрах паразитных уширений:

- (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 ~ 1 ГГц.

Заселение промежуточных состояний трехфотонного перехода



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

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

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

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

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

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

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

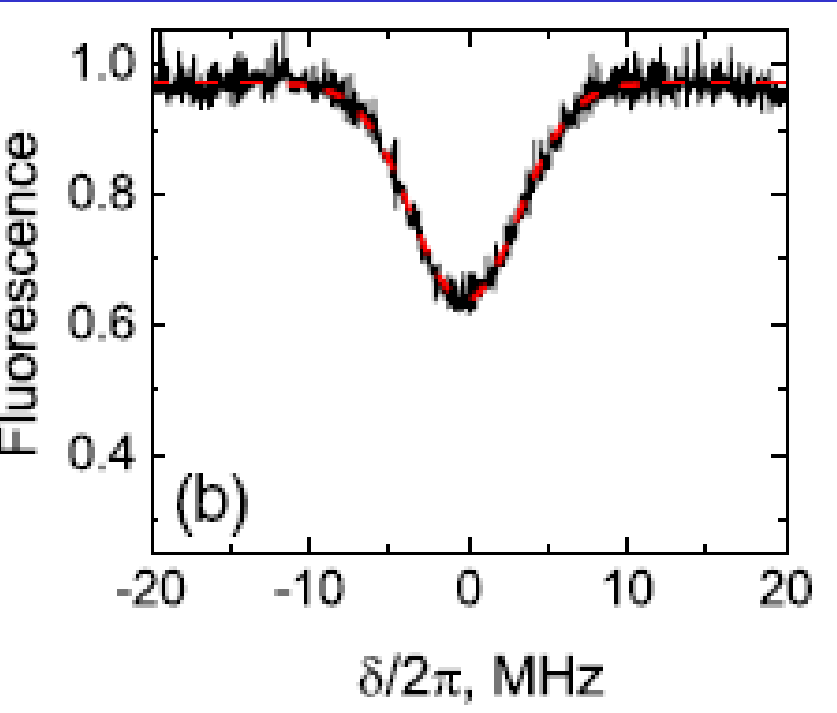
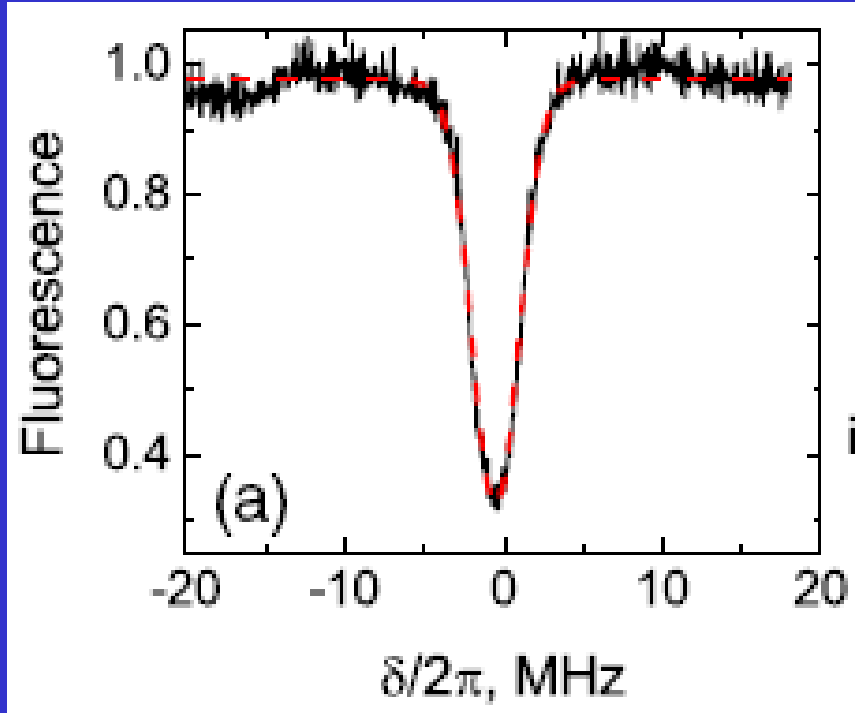
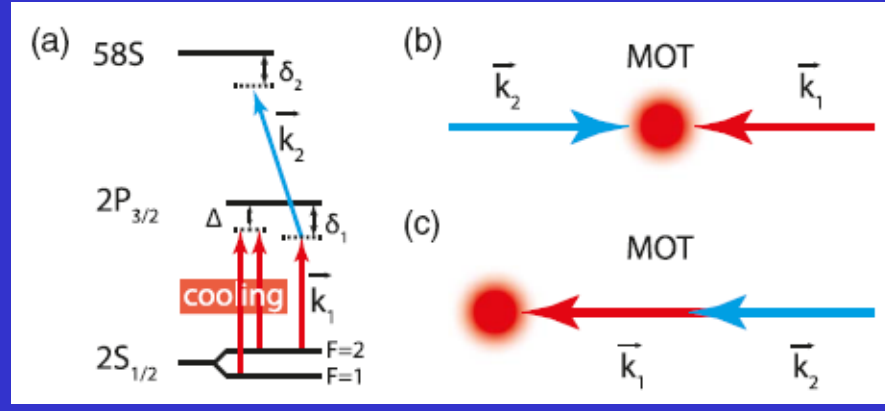
Эксперименты ОИВТ с ридбергскими атомами Li в МОЛ

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

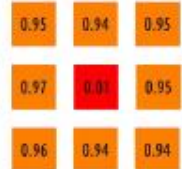
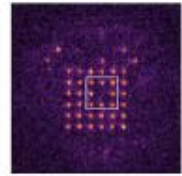
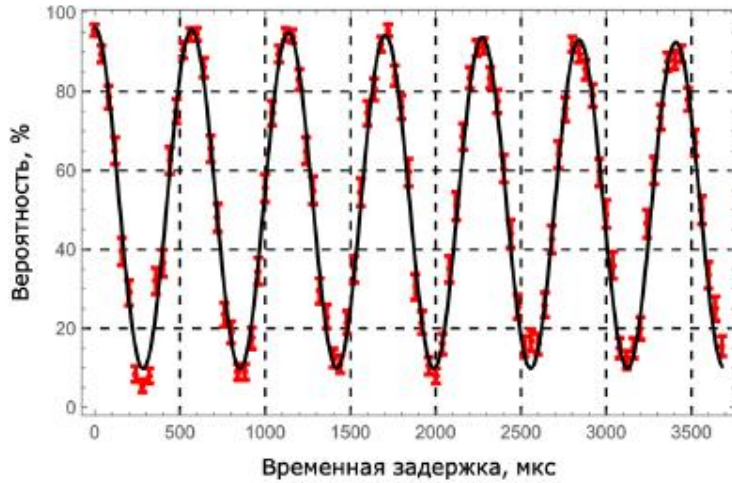
Journal of the **Optical Society of America** **B** OPTICAL PHYSICS

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

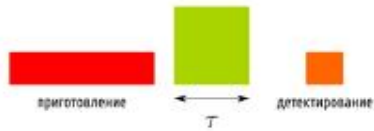
V. A. SAUTENKOV,* S. A. SAAKYAN, A. A. BOBROV, E. V. VILSHANSKAYA, B. B. ZELENER, AND B. V. ZELENER
 Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow 125412, Russia



Индивидуальная адресация

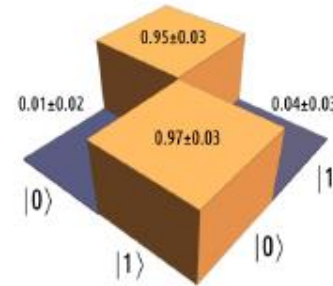


кросс-корреляции при π -импульсе в центральном узле

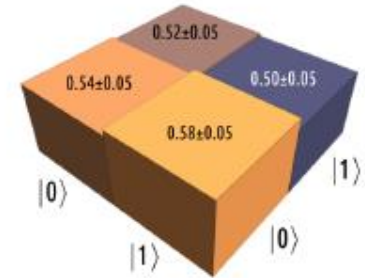


$$V \approx 90\%$$

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



операция NOT

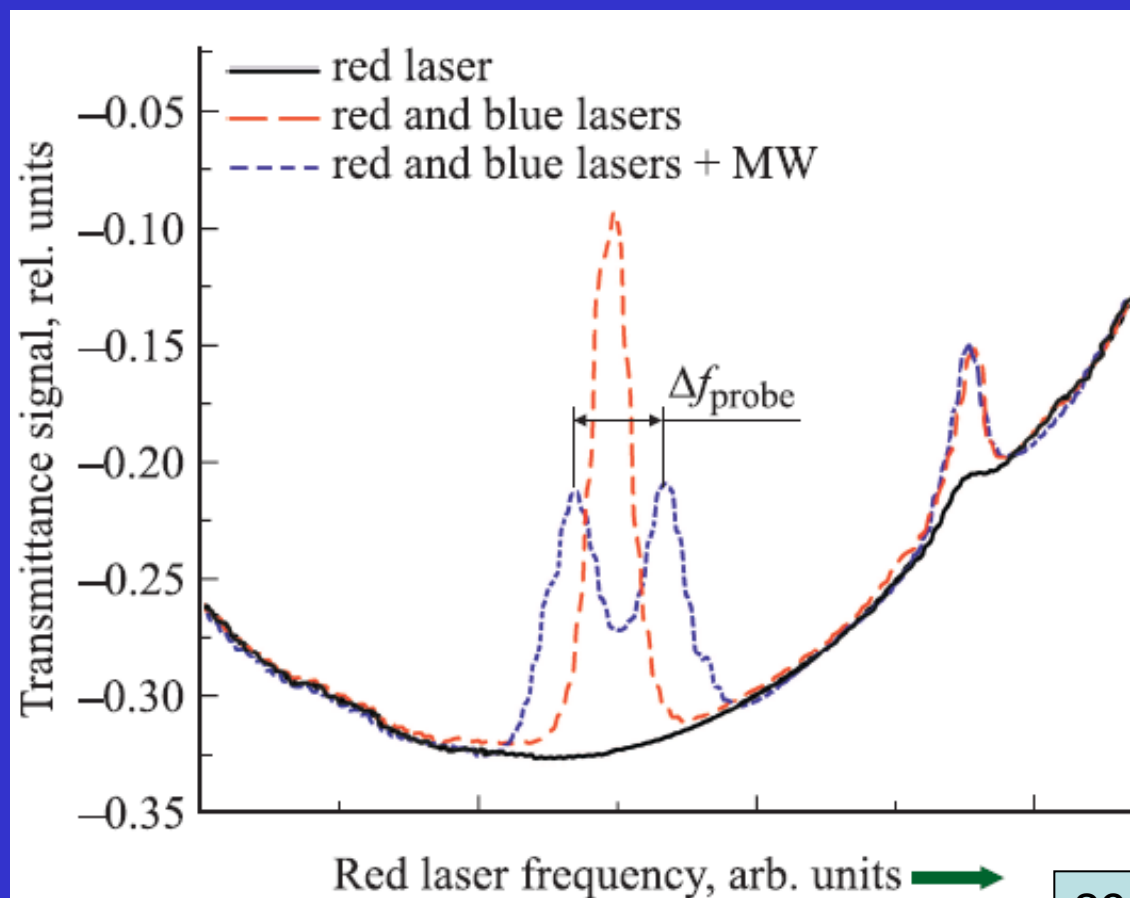
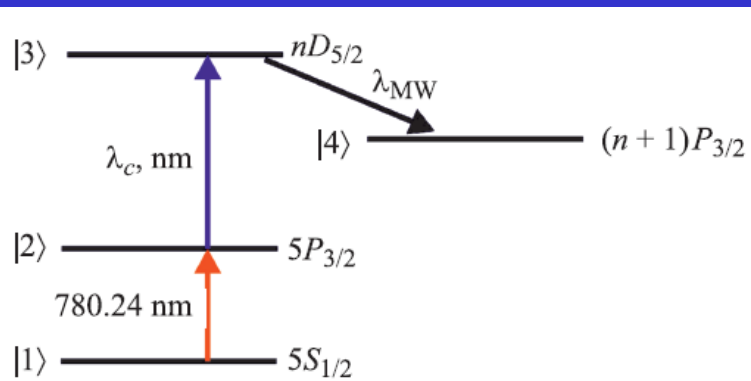


преобразование Адамара

Эксперименты ВНИИФТРИ с атомами Rb в ячейке

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

© Е.Ф. Стельмашенко¹, О.А. Клезович¹, В.Н. Барышев¹, В.А. Тищенко¹, И.Ю. Блинов¹, В.Г. Пальчиков^{1,2}, В.Д. Овсянников^{1,3}



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 ~ 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 ~ 1 ГГц.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



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

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