



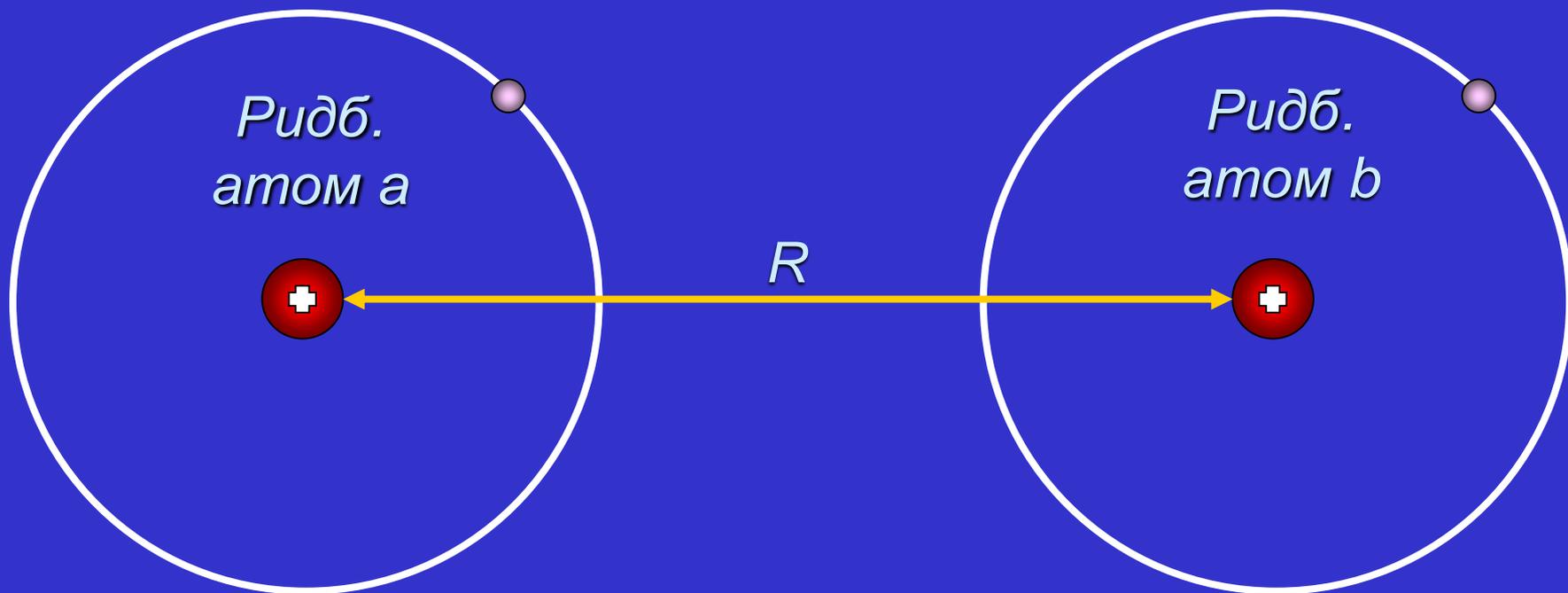
Форма линии и временная динамика резонансов Фёрстера для двух взаимодействующих ридберговских атомов

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

¹Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Взаимодействие двух ридберговских атомов



Дипольные моменты

Энергия взаимодействия

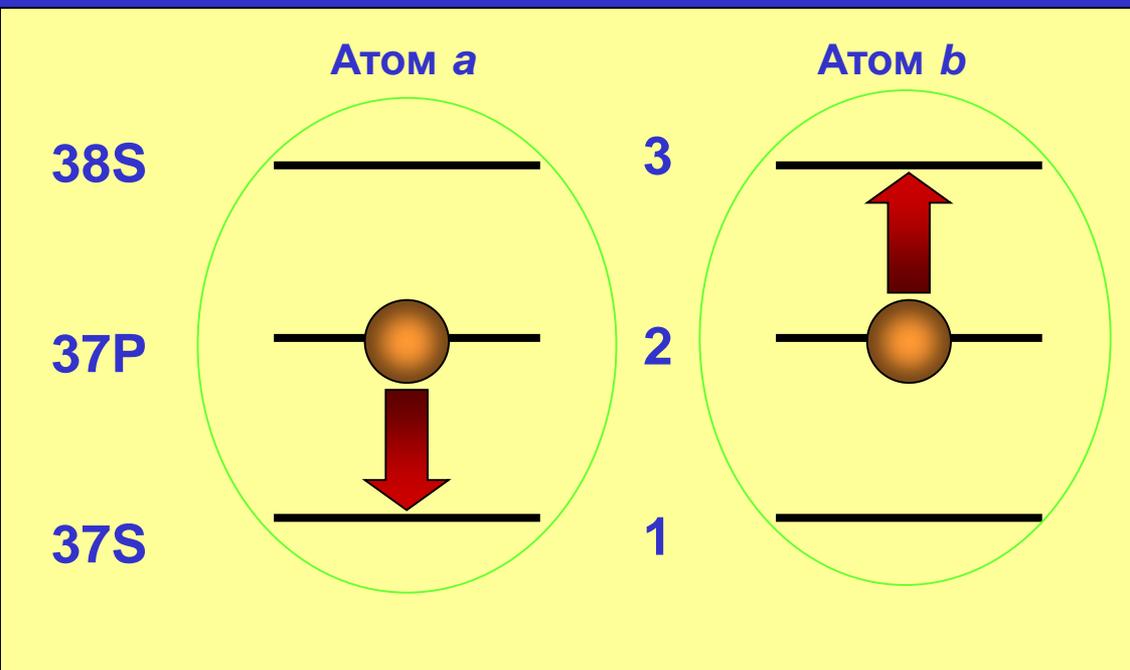
$$E_n = -\frac{Ry}{(n - \delta_L)^2}$$

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

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

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

Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах Rb



$$\hat{V}_{ab} \sim \frac{\hat{d}_a \hat{d}_b}{R^3}$$

Пример двух атомов:

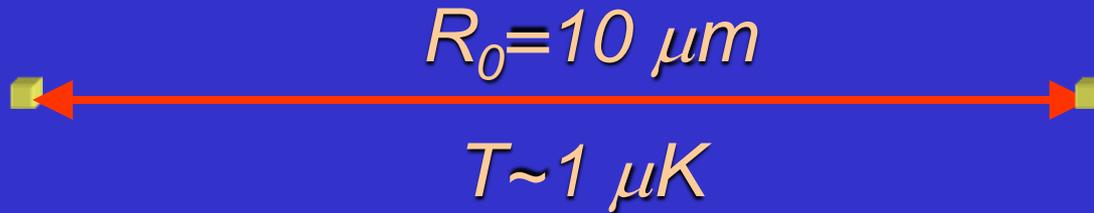


Эволюция населенностей:

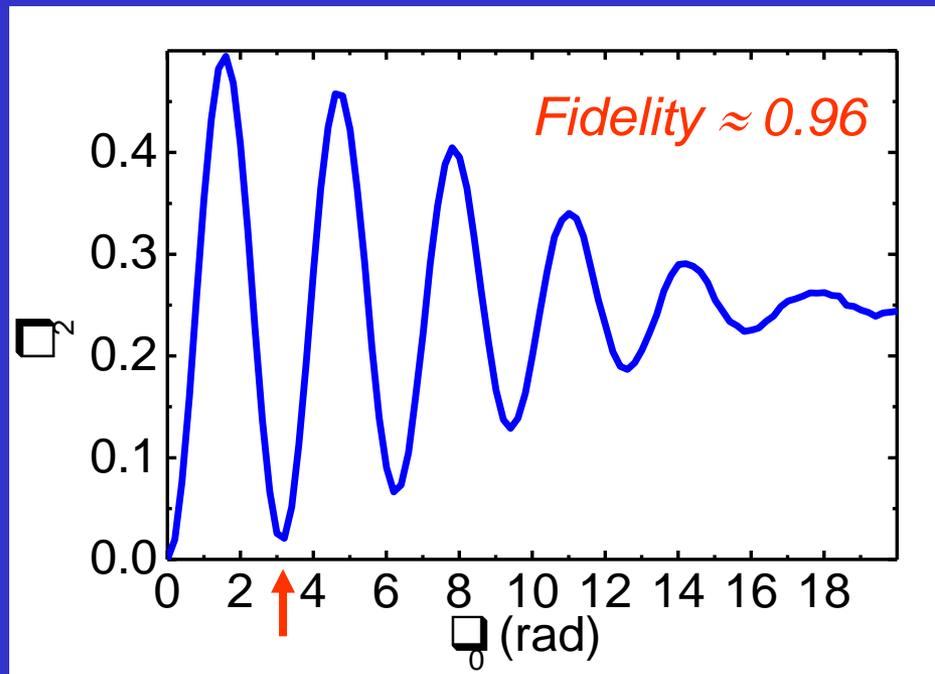
$$\rho_2(t) = \frac{\Omega_{ab}^2}{2\Omega_{ab}^2 + \Delta^2/4} \sin^2\left(t \sqrt{2\Omega_{ab}^2 + \Delta^2/4}\right)$$

Численное моделирование для Conditional Quantum Phase Gate

$$|ab\rangle \rightarrow \exp(i \pi \delta_{a1} \delta_{b1}) |ab\rangle$$

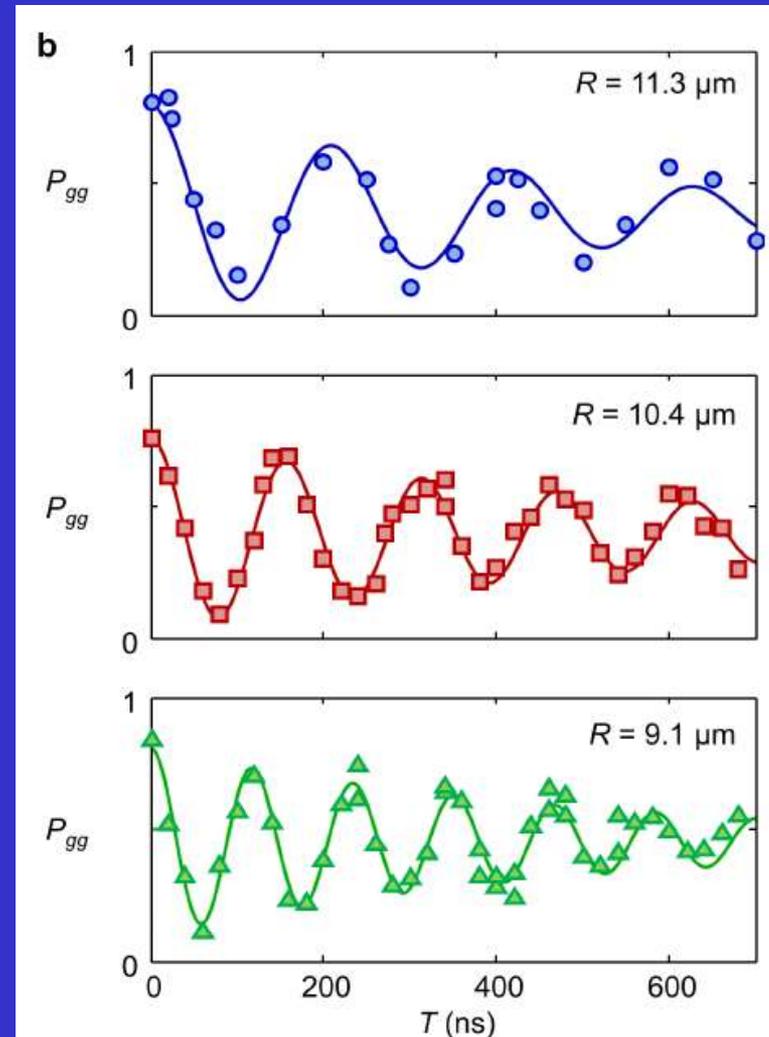
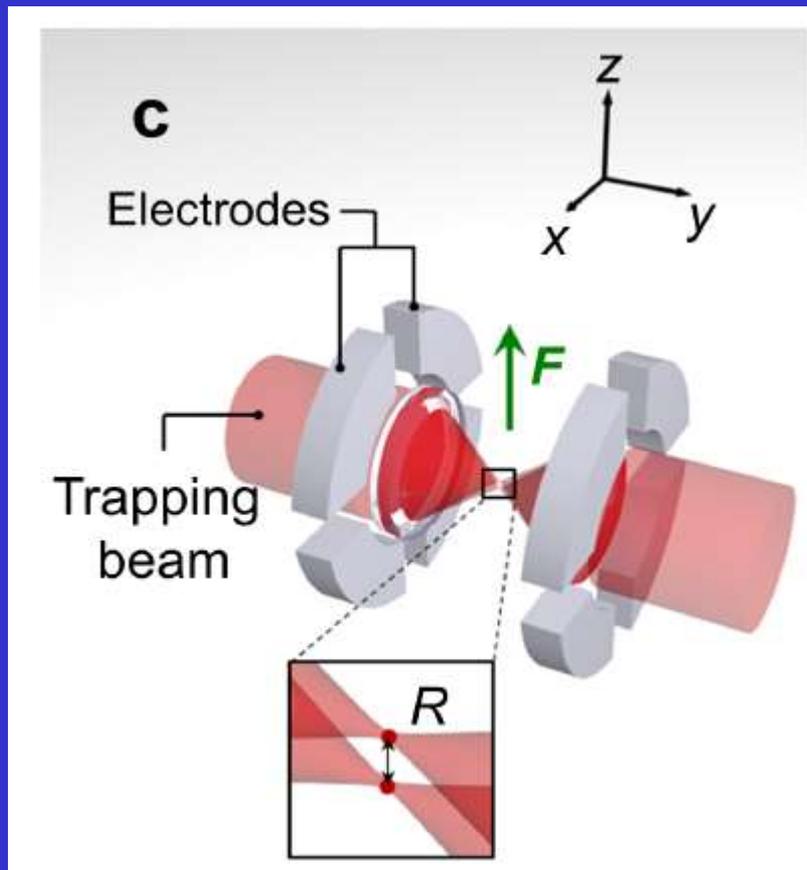


$$\theta_0 = \frac{2\sqrt{2}d_1d_2t_0}{4\pi\epsilon_0\hbar R_0^3}$$

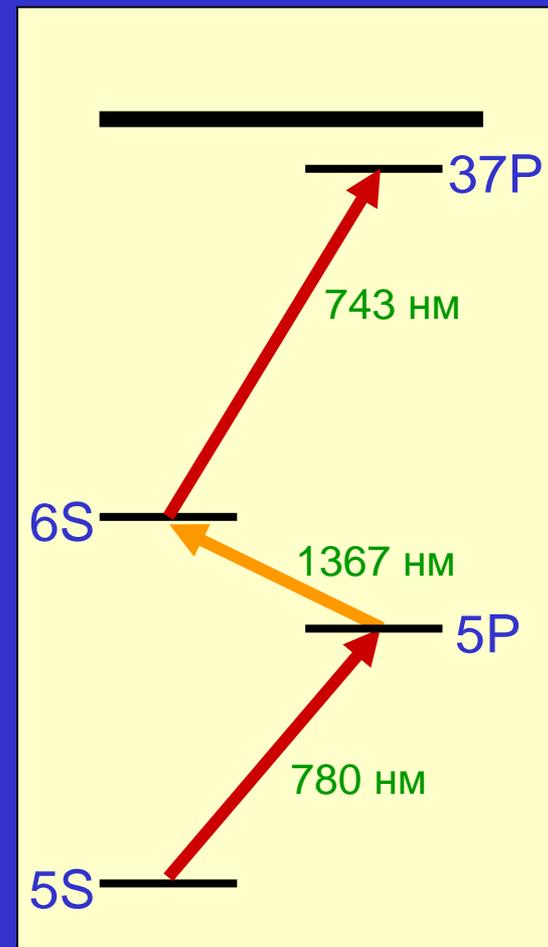
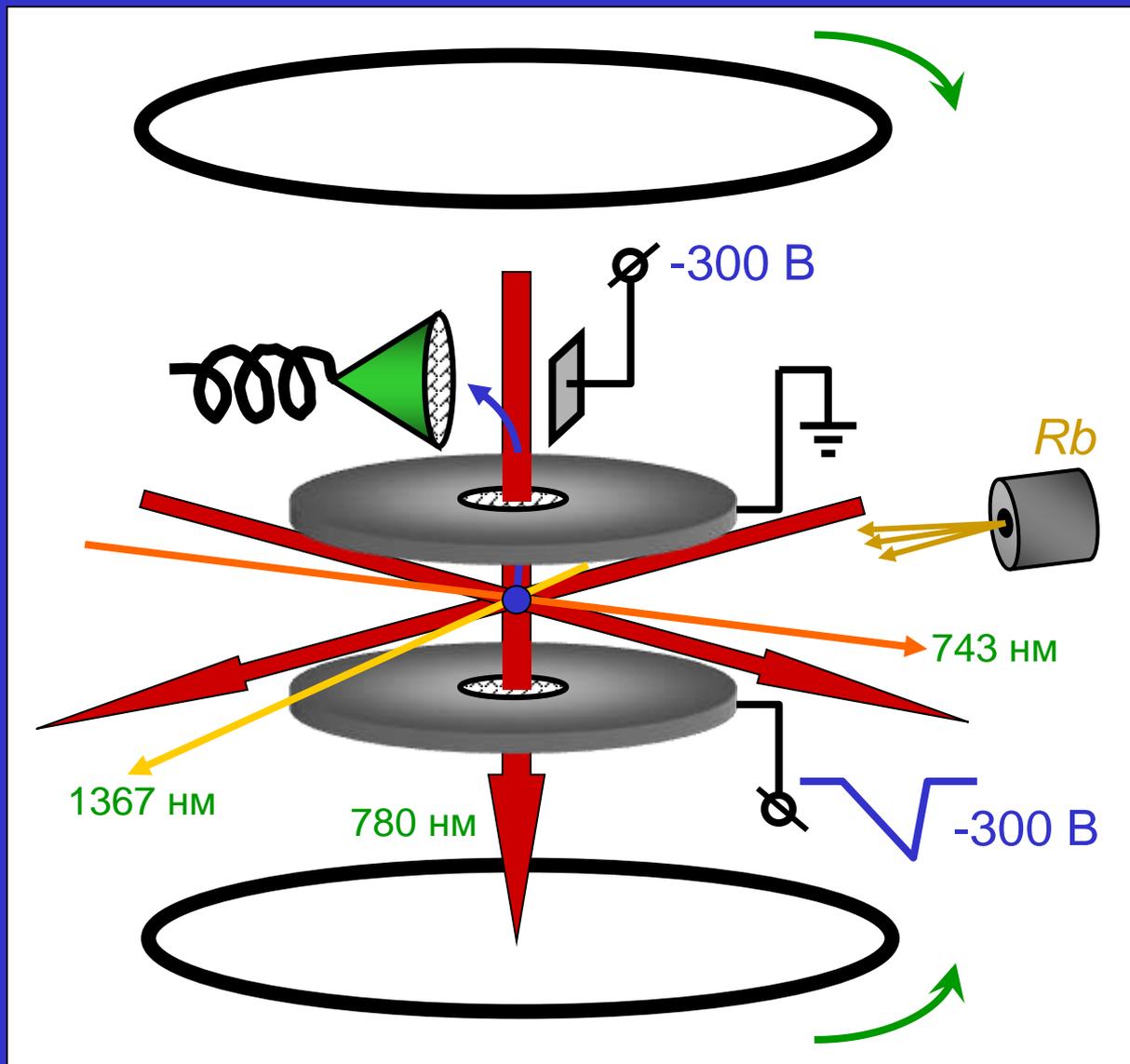


Coherent dipole-dipole coupling between two single atoms at a Förster resonance

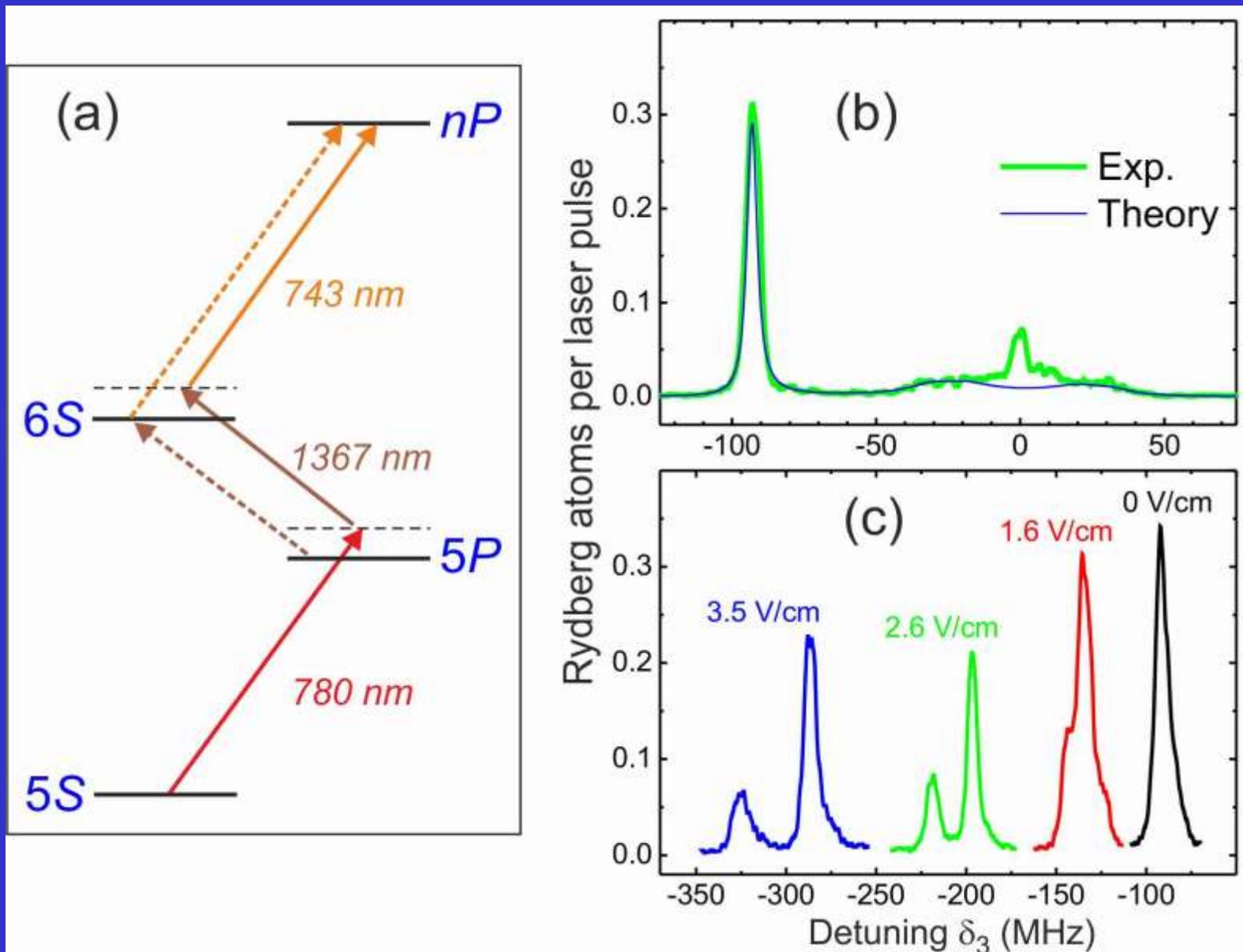
S. Ravets, H. Labuhn, D. Barredo, L. Béguin, T. Lahaye, and A. Browaeys
*Laboratoire Charles Fabry, UMR 8501, Institut d'Optique, CNRS, Univ Paris Sud 11,
2 avenue Augustin Fresnel, 91127 Palaiseau Cedex, France*



Магнитооптическая ловушка ИФП СО РАН с системой возбуждения и регистрации ридберговских атомов Rb

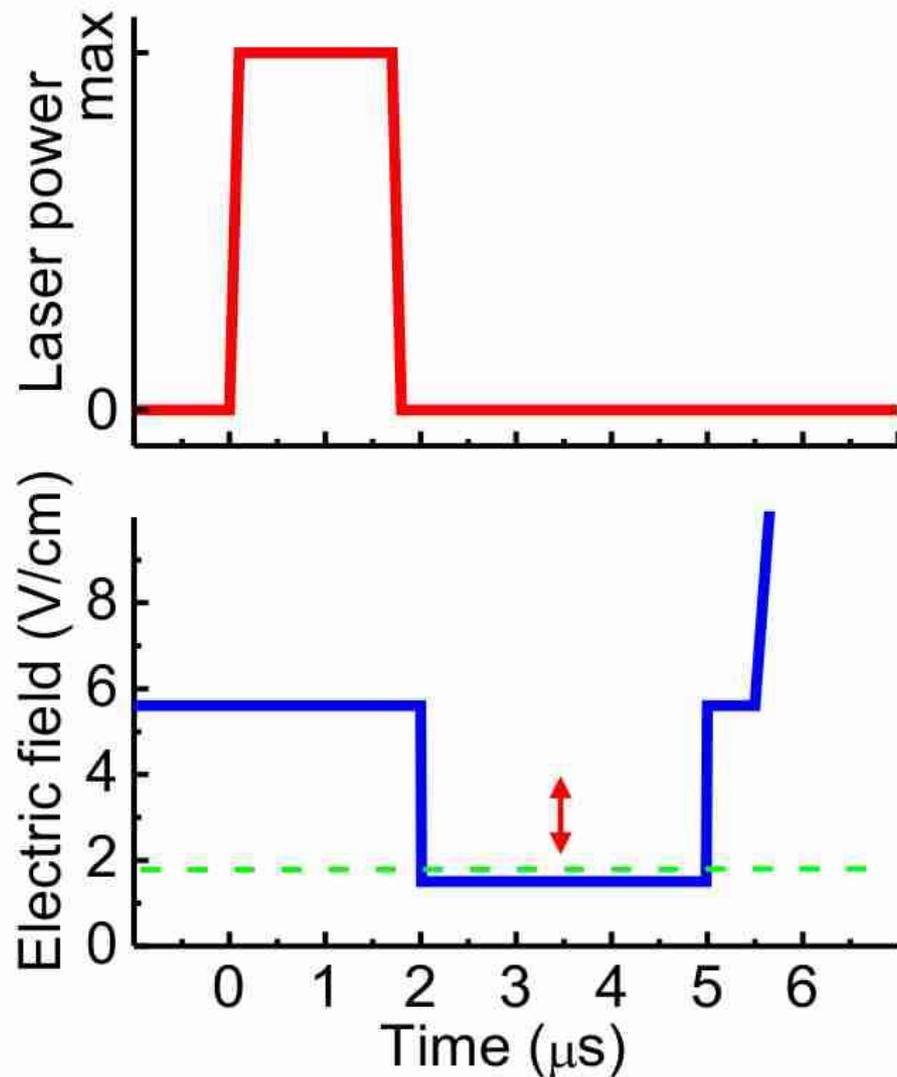


Трехфотонное возбуждение непрерывными лазерами

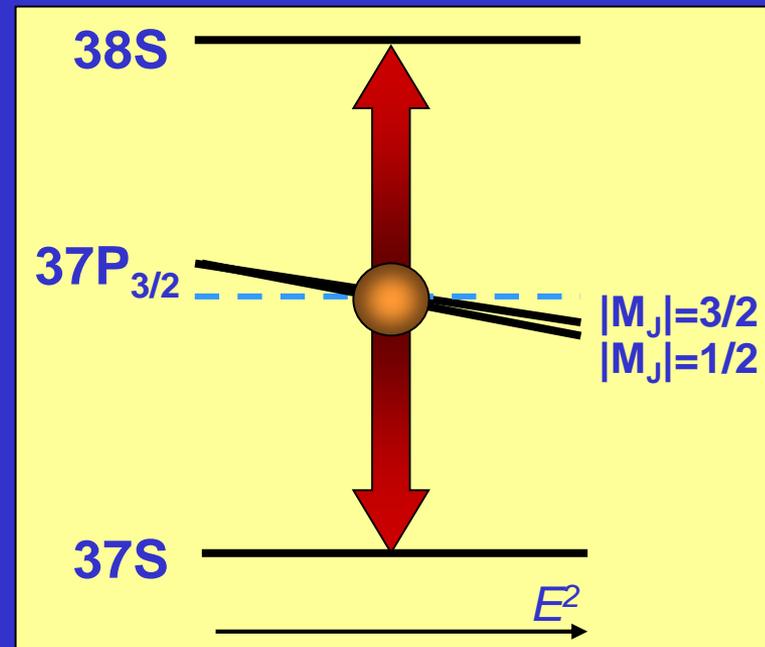
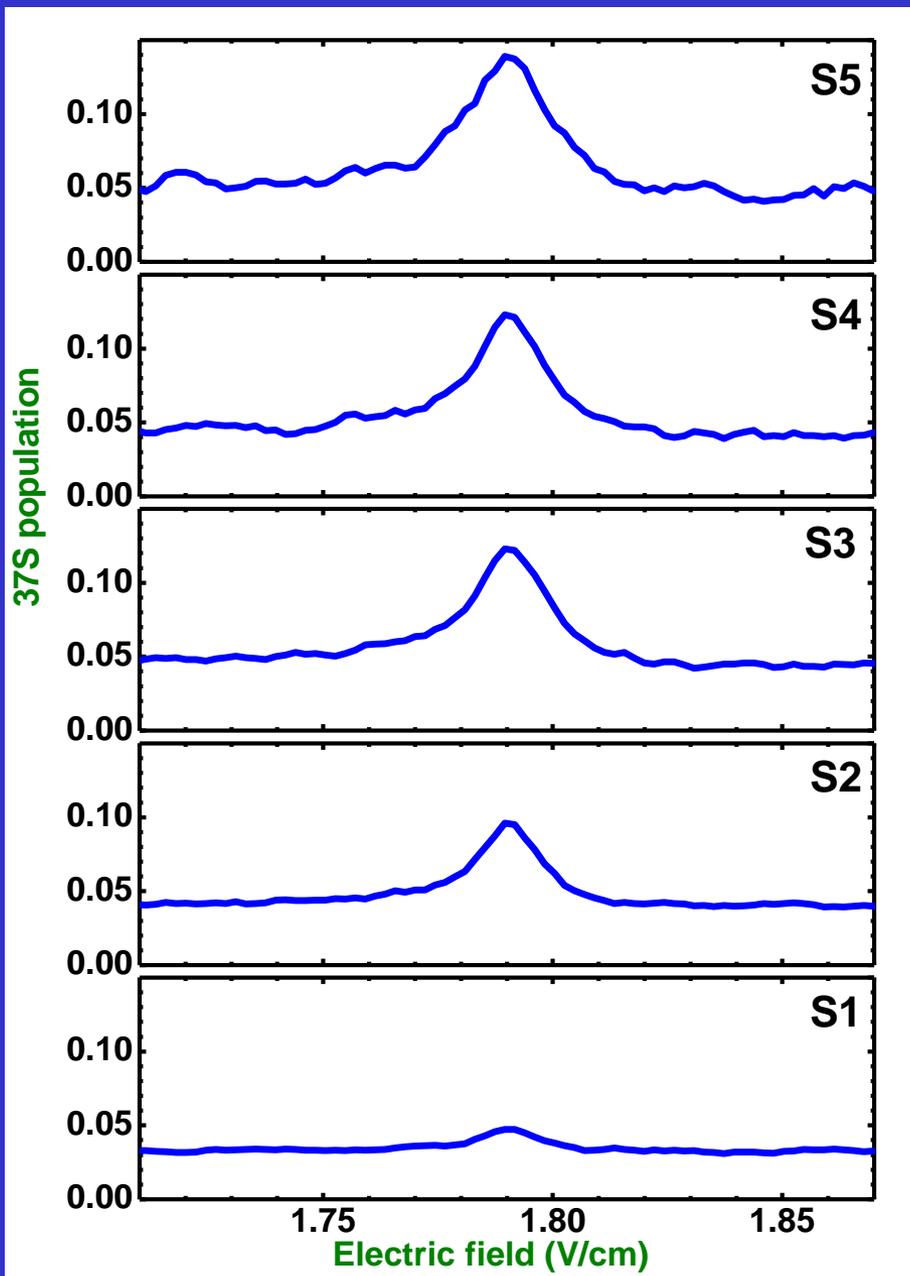


Штарковское
переключение для
исследования
резонансов
Фёрстера

*E.A. Yakshina et al.,
Phys. Rev. A **94**,
043417 (2016)*



Резонанс Фёрстера $\text{Rb}(37P_{3/2}) + \text{Rb}(37P_{3/2}) \leftrightarrow \text{Rb}(37S_{1/2}) + \text{Rb}(38S_{1/2})$

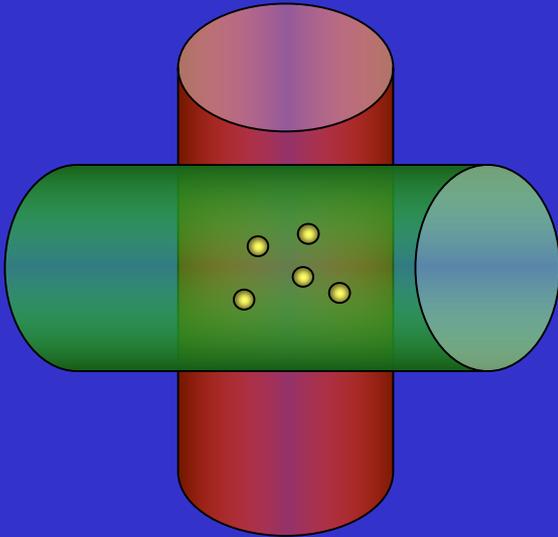


$$S_N = \frac{n_N(37S)}{n_N(37P) + n_N(37S) + n_N(38S)}$$

Ryabtsev et al., Phys. Rev. Lett.,
2010, v.104, p.073003

Численное моделирование методом Монте-Карло

I.I.Ryabtsev et al., Phys. Rev. A, 2010, v.82, p.053409



Гамильтониан:

$$\hat{H} = \sum_{k=1}^{N_0} \hat{H}_k + \sum_{n \neq m} \hat{V}_{nm}$$

Оператор ДД взаимодействия:

$$\hat{V}_{nm} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\hat{\mathbf{d}}_n \hat{\mathbf{d}}_m}{R_{nm}^3} - \frac{3(\hat{\mathbf{d}}_n \mathbf{R}_{nm})(\hat{\mathbf{d}}_m \mathbf{R}_{nm})}{R_{nm}^5} \right]$$

$$\Delta = (2E_{37P} - E_{37S} - E_{38S}) / \hbar$$

$$\Omega_{nm} : 37P + 37P \leftrightarrow 37S + 38S$$

$$\Omega'_{nj} : 37P + 37S \leftrightarrow 37S + 37P$$

$$\Omega''_{jm} : 37P + 38S \leftrightarrow 38S + 37P$$

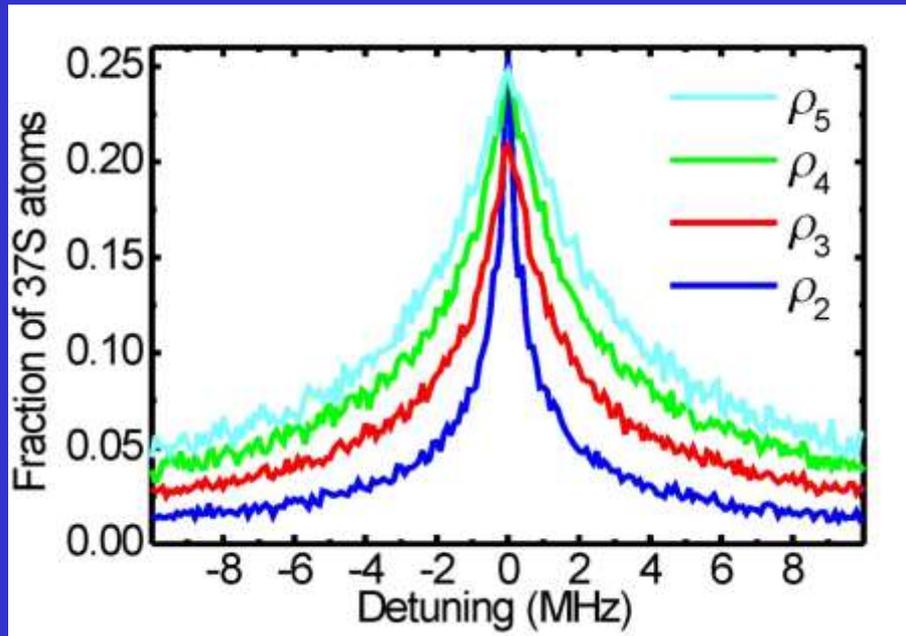
Отстройка

Резонансное взаимодействие

Обменное взаимодействие 1

Обменное взаимодействие 2

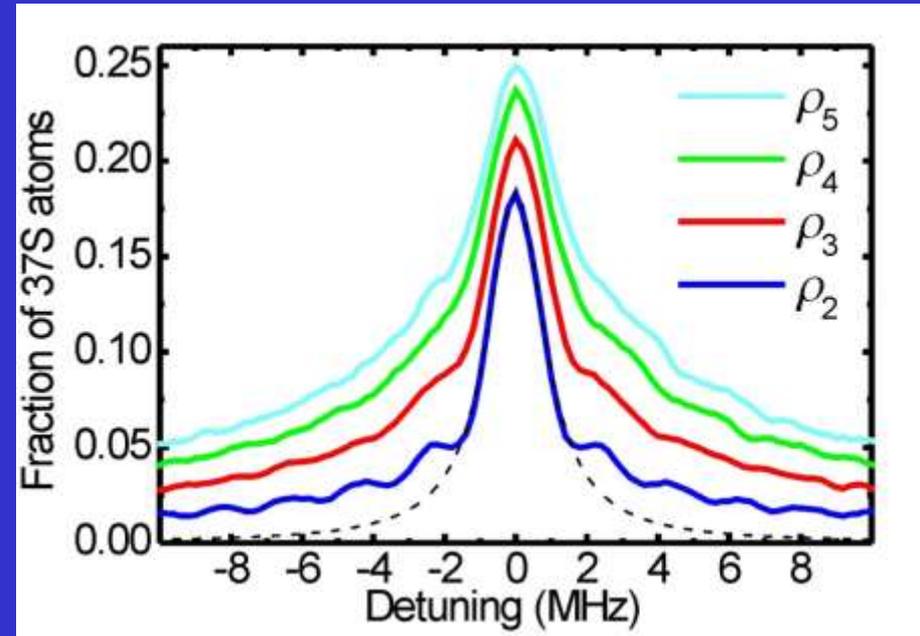
Теоретические спектры резонанса Фёрстера, рассчитанные с помощью уравнения Шрёдингера



$$V = 18 \times 18 \times 18 \text{ мкм}^3$$

$$t_0 = 3 \text{ мкс}$$

$$\rho_2: \Delta\nu \approx 0,9 \text{ МГц}$$

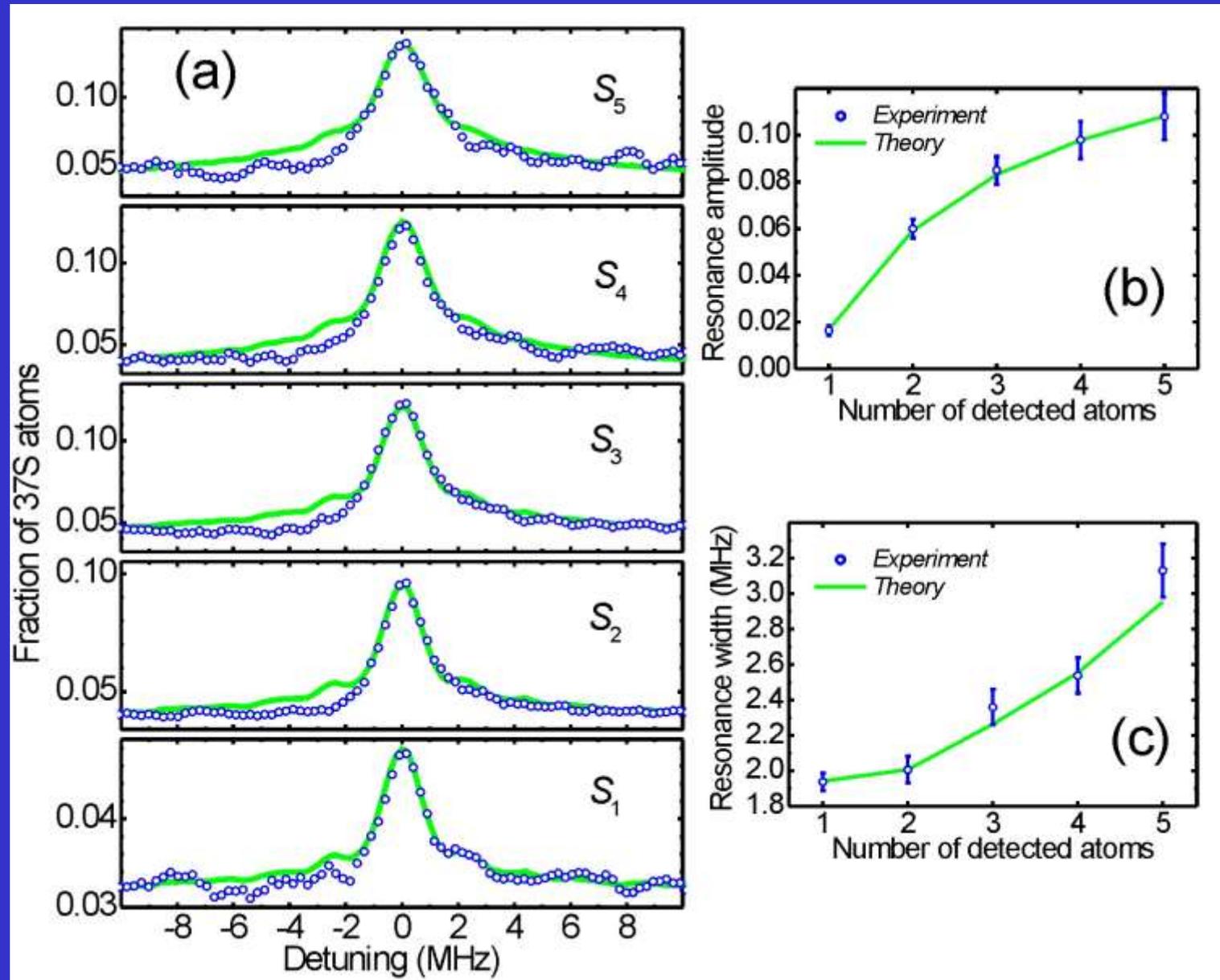


$$V = 18 \times 18 \times 18 \text{ мкм}^3$$

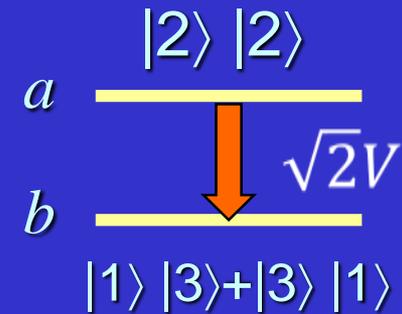
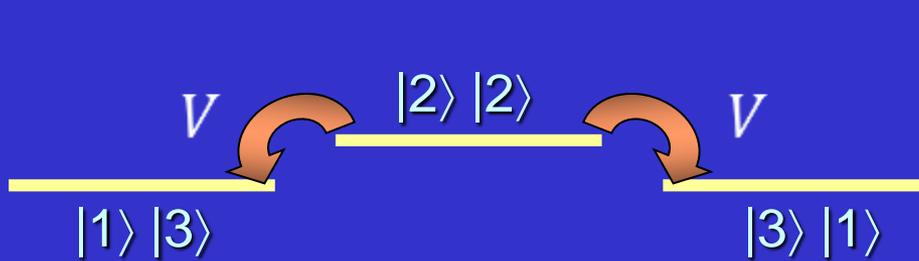
$$t_0 = 0,515 \text{ мкс}$$

$$\rho_2: \Delta\nu \approx 1,95 \text{ МГц}$$

Сравнение теории для $V=18 \times 18 \times 18$ мкм³ с экспериментом



Моделирование резонанса Фёрстера с матрицей плотности



Оптические уравнения
Блоха

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_{aa} &= i\sqrt{2}V(\rho_{ab} - \rho_{ba}) \\ \dot{\rho}_{bb} &= i\sqrt{2}V(\rho_{ba} - \rho_{ab}) \\ \dot{\rho}_{ab} &= -i\Delta\rho_{ab} + i\sqrt{2}V(\rho_{aa} - \rho_{bb}) \\ \dot{\rho}_{ba} &= i\Delta\rho_{ba} + i\sqrt{2}V(\rho_{bb} - \rho_{aa})\end{aligned}$$

Учет уширения Γ в модели
диффузии фазы

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_{aa} &= i\sqrt{2}V(\rho_{ab} - \rho_{ba}) \\ \dot{\rho}_{bb} &= i\sqrt{2}V(\rho_{ba} - \rho_{ab}) \\ \dot{\rho}_{ab} &= -(i\Delta + \Gamma/2)\rho_{ab} + i\sqrt{2}V(\rho_{aa} - \rho_{bb}) \\ \dot{\rho}_{ba} &= (i\Delta - \Gamma/2)\rho_{ba} + i\sqrt{2}V(\rho_{bb} - \rho_{aa})\end{aligned}$$

E.A. Yakshina et al., Phys. Rev. A **94**, 043417 (2016)

I.I. Ryabtsev et al., J. Phys.: Conf. Series, 2017 (in press)

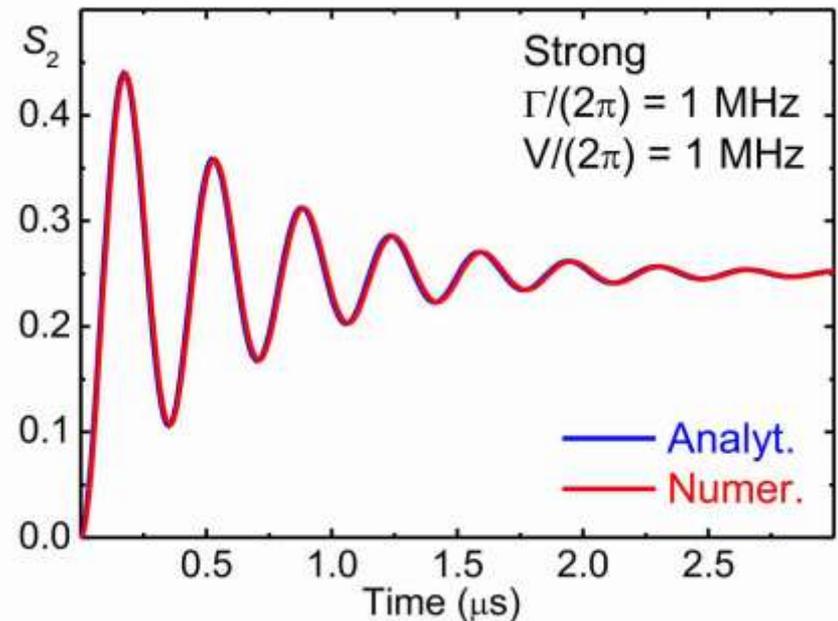
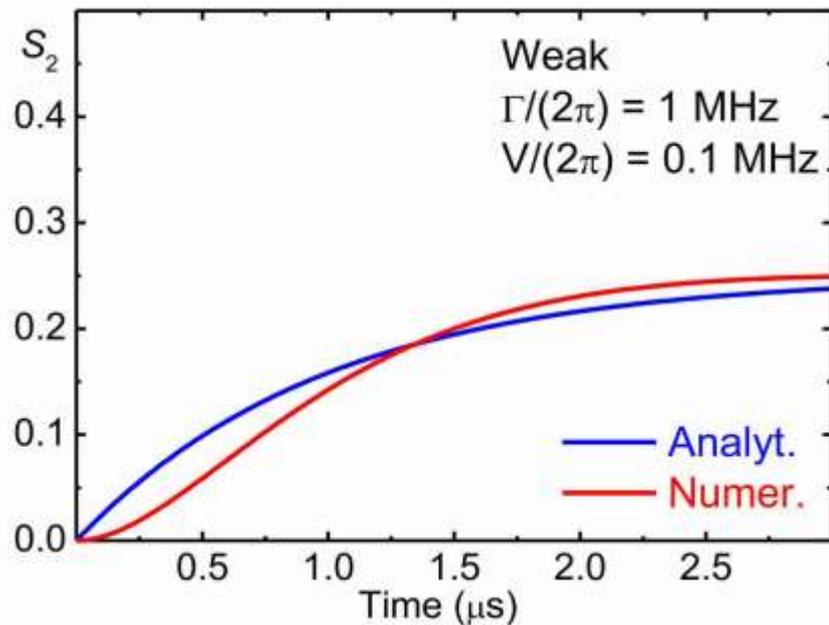
Аналитические расчеты с матрицей плотности

Амплитуда резонанса Фёрстера для двух неподвижных атомов

$$S_2(\Delta = 0) = \frac{1}{4} - \frac{1}{4} e^{-\Gamma t/4} \left[\operatorname{ch}\left(\sqrt{\Gamma^2/16 - 8V^2} t\right) + \frac{\Gamma/4}{\sqrt{\Gamma^2/16 - 8V^2}} \operatorname{sh}\left(\sqrt{\Gamma^2/16 - 8V^2} t\right) \right]$$

$$S_2^{weak}(\Delta = 0) \approx \frac{1}{4} \left[1 - e^{-16V^2 t/\Gamma} \right]$$

$$S_2^{strong}(\Delta = 0) \approx \frac{1}{4} \left[1 - e^{-\Gamma t/4} \cos(2\sqrt{2} Vt) \right]$$



E.A. Yakshina et al., Phys. Rev. A **94**, 043417 (2016)

I.I. Ryabtsev et al., J. Phys.: Conf. Series, 2017 (in press)

Аналитические расчеты с матрицей плотности

Амплитуда резонанса Фёрстера для двух неупорядоченных атомов

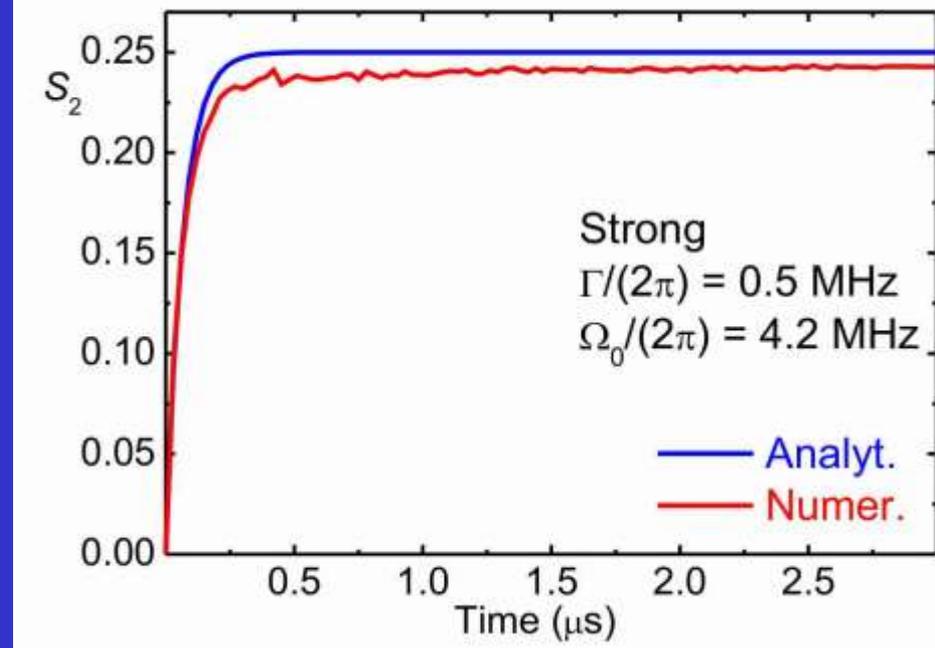
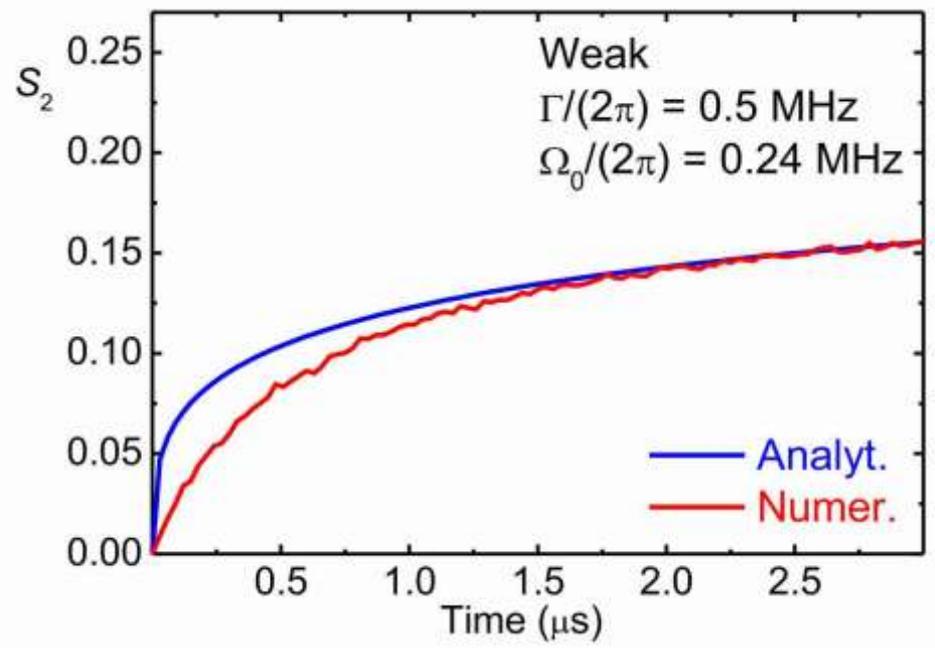
$$P(R) = e^{-R^3/R_0^3} 3R^2/R_0^3$$

$$R_0 \approx [3/(4\pi n_0)]^{1/3}$$

$$V_0 = \frac{\sqrt{2}d_1d_2}{4\pi\epsilon_0\hbar R_0^3}$$

$$\langle S_2^{weak}(\Delta=0) \rangle \approx \frac{1}{4} \left(1 - e^{-[0.44V_0^2 t/\Gamma]^{1/3}} \right)$$

$$\langle S_2^{strong}(\Delta=0) \rangle \approx \frac{1}{4} \left(1 - e^{-0.55V_0 t - \Gamma t/4} \right)$$



E.A. Yakshina et al., Phys. Rev. A **94**, 043417 (2016)

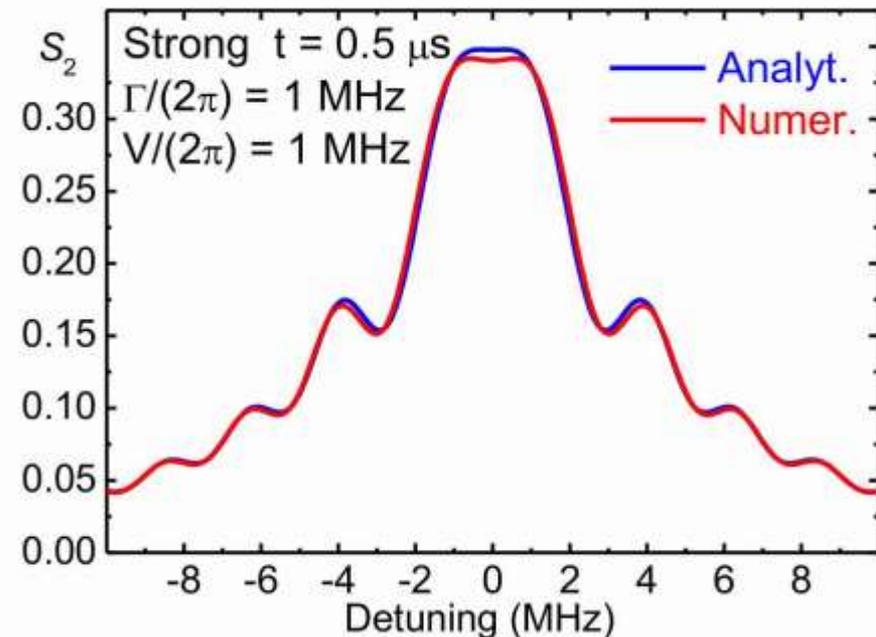
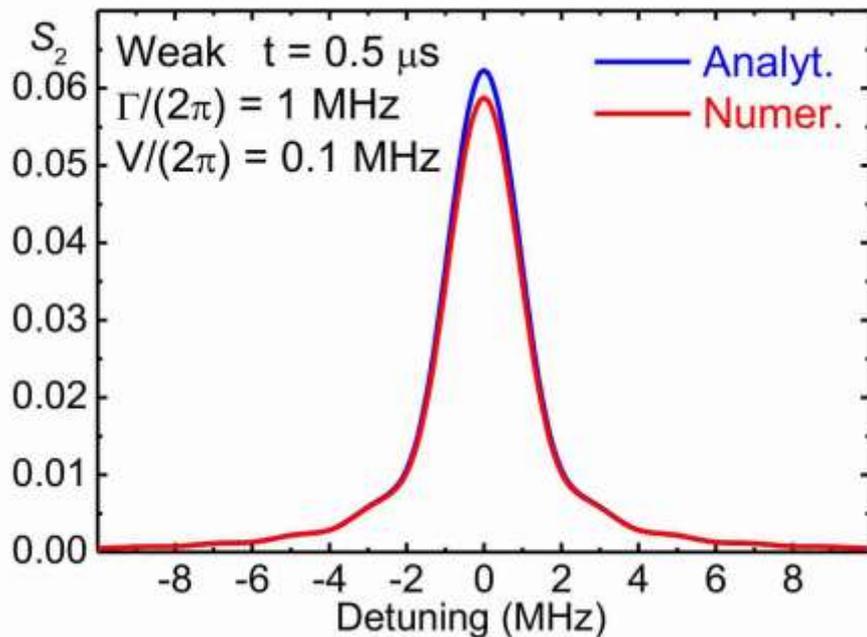
I.I. Ryabtsev et al., J. Phys.: Conf. Series, 2017 (in press)

Аналитические расчеты с матрицей плотности

Форма линии резонанса Фёрстера для двух неподвижных атомов

$$S_2^{weak} \approx \frac{2V^2}{\Delta^2 + \Gamma^2/4} \left(\frac{\Gamma t}{2} + \frac{\Delta^2 - \Gamma^2/4}{\Delta^2 + \Gamma^2/4} \left[1 - e^{-\Gamma t/2} \cos(\Delta t) \right] - \frac{\Delta \Gamma}{\Delta^2 + \Gamma^2/4} e^{-\Gamma t/2} \sin(\Delta t) \right)$$

$$S_2^{strong} \approx \frac{1}{4} - \frac{\Delta^2/4}{8V^2 + \Delta^2} e^{-\frac{4V^2}{8V^2 + \Delta^2} \Gamma t} - \frac{2V^2}{8V^2 + \Delta^2} e^{-\frac{4V^2 + \Delta^2}{8V^2 + \Delta^2} \Gamma t/2} \cos\left(\sqrt{8V^2 + \Delta^2} t\right)$$



E.A. Yakshina et al., Phys. Rev. A **94**, 043417 (2016)

I.I. Ryabtsev et al., J. Phys.: Conf. Series, 2017 (in press)

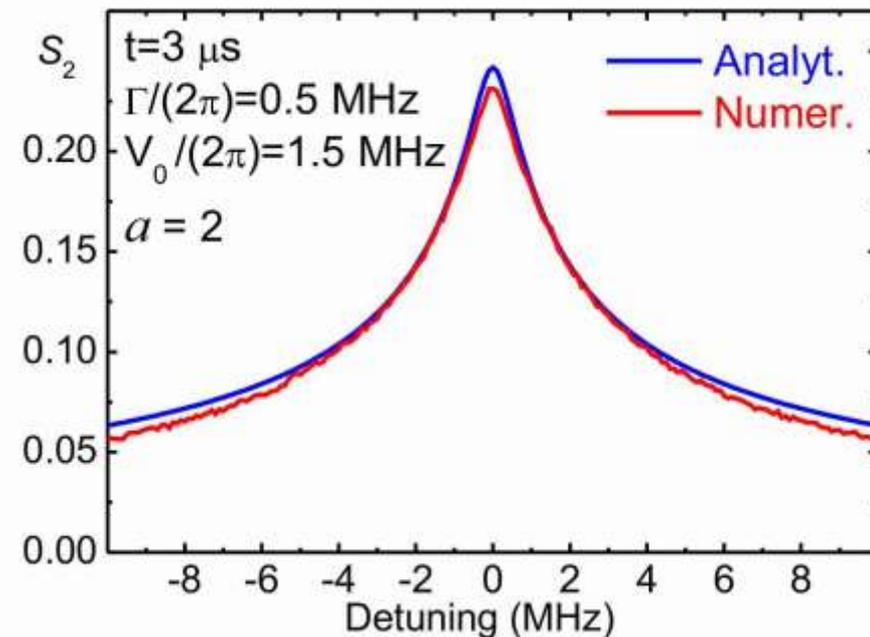
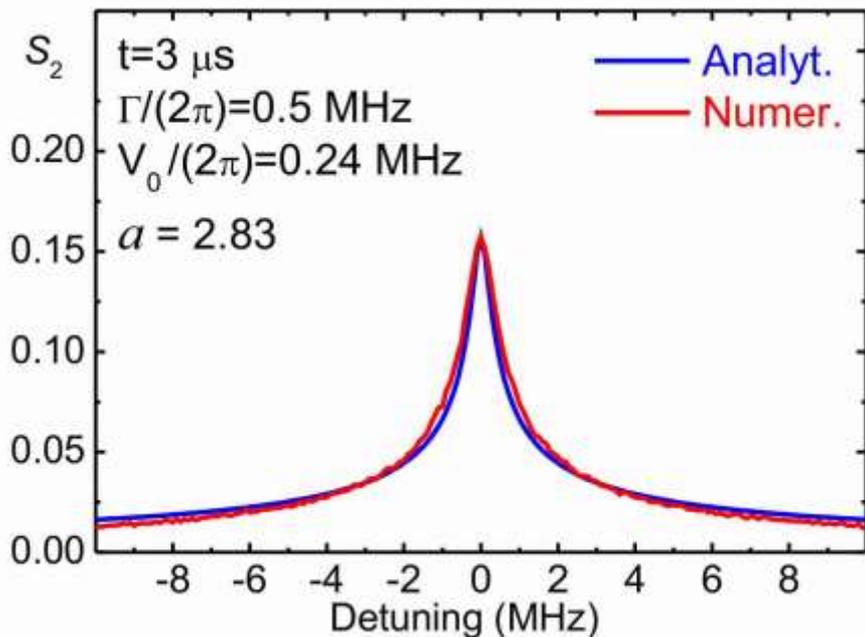
Аналитические расчеты с матрицей плотности

Форма линии резонанса Фёрстера для двух неупорядоченных атомов

$$\langle S_2^{strong} \rangle \approx \frac{1}{4} \left[1 - \exp \left(- \left\{ \frac{0.44 V_0^2 \Gamma t}{a^2 \Delta^2 + \Gamma^2} \right\}^{1/3} \right) \right]$$

$$FWHM^{weak} \approx 5.3 \Gamma / a$$

$$FWHM^{strong} \approx V_0 \sqrt{5.3 \Gamma t} / a$$

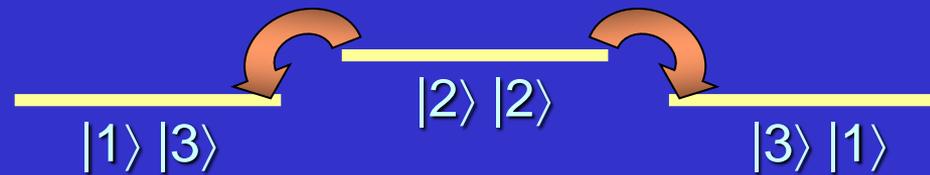


E.A. Yakshina et al., Phys. Rev. A **94**, 043417 (2016)

I.I. Ryabtsev et al., J. Phys.: Conf. Series, 2017 (in press)

Диполь-дипольное и Ван-дер-Ваальсовское взаимодействие

Коллективные
состояния:



Сдвиг энергии
 $37P+37P$ состояния:

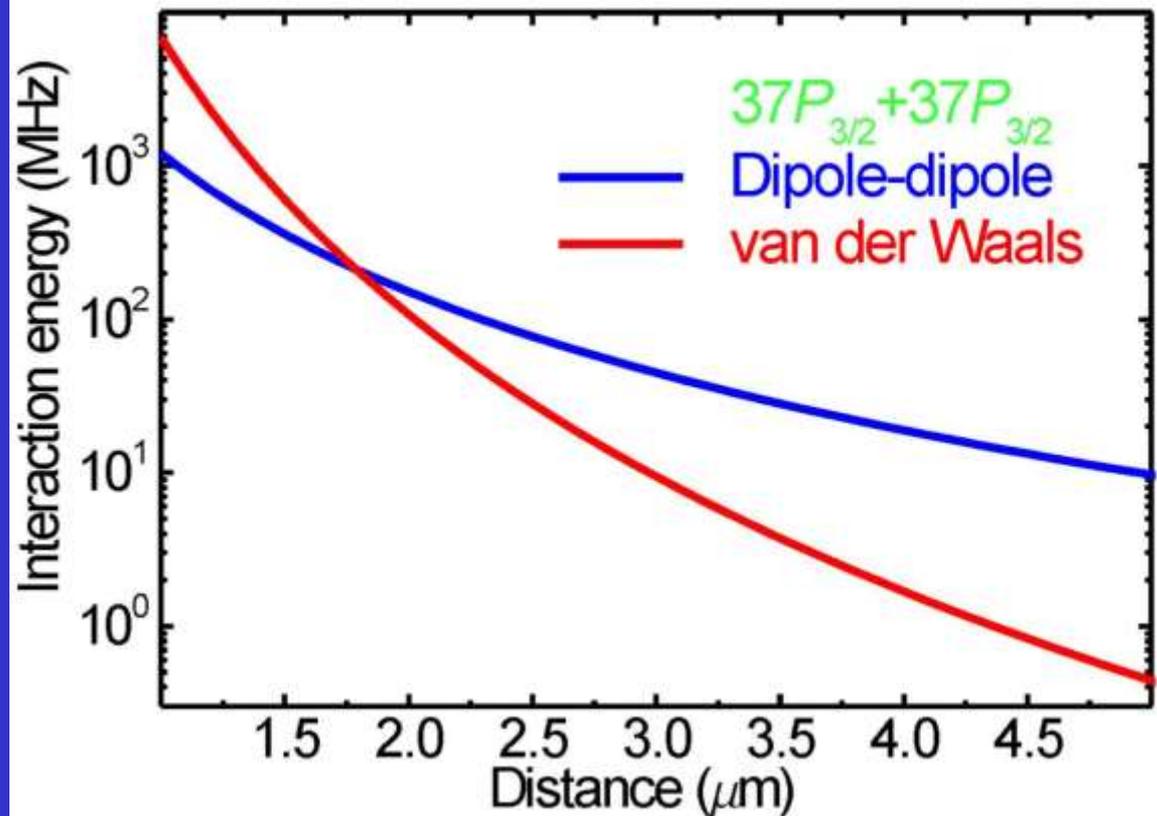
$$\delta E_{PP} = \pm \left(\sqrt{\frac{\Delta^2}{4} + 2V_{ab}^2} - \frac{|\Delta|}{2} \right)$$

$$\Delta = 0$$

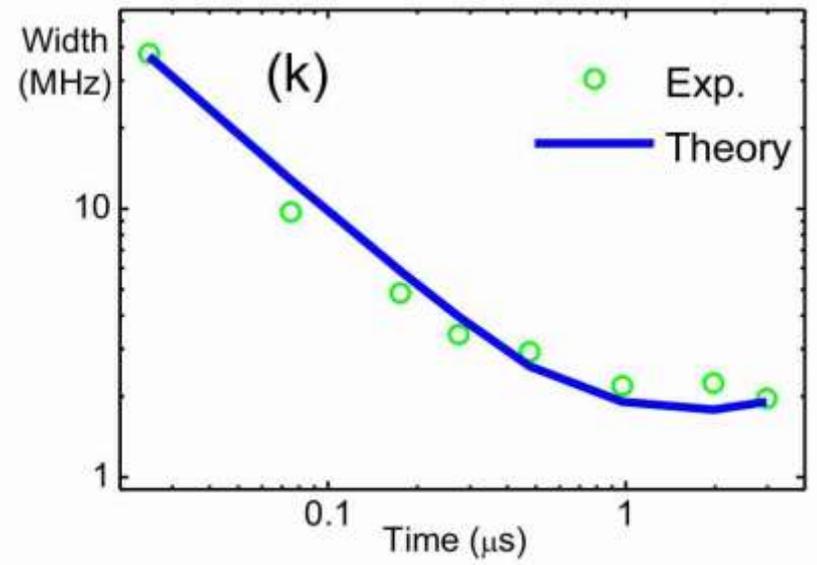
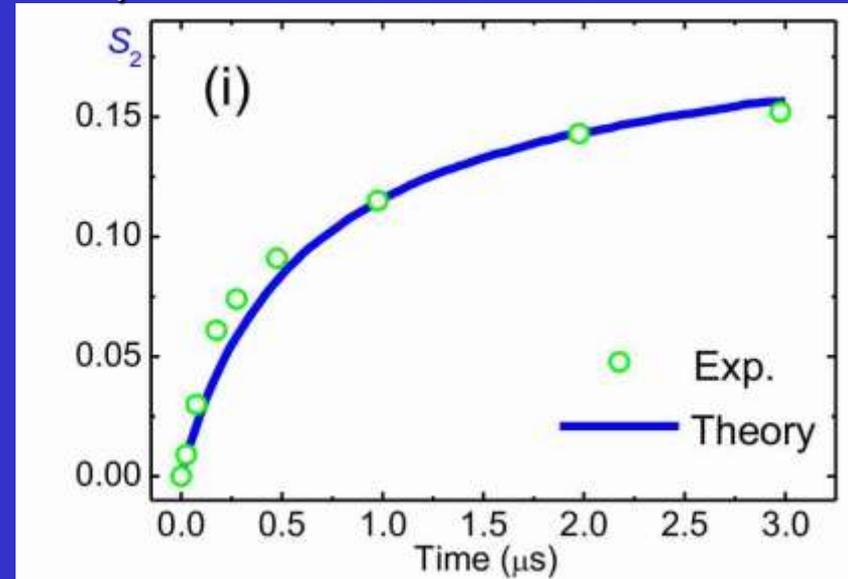
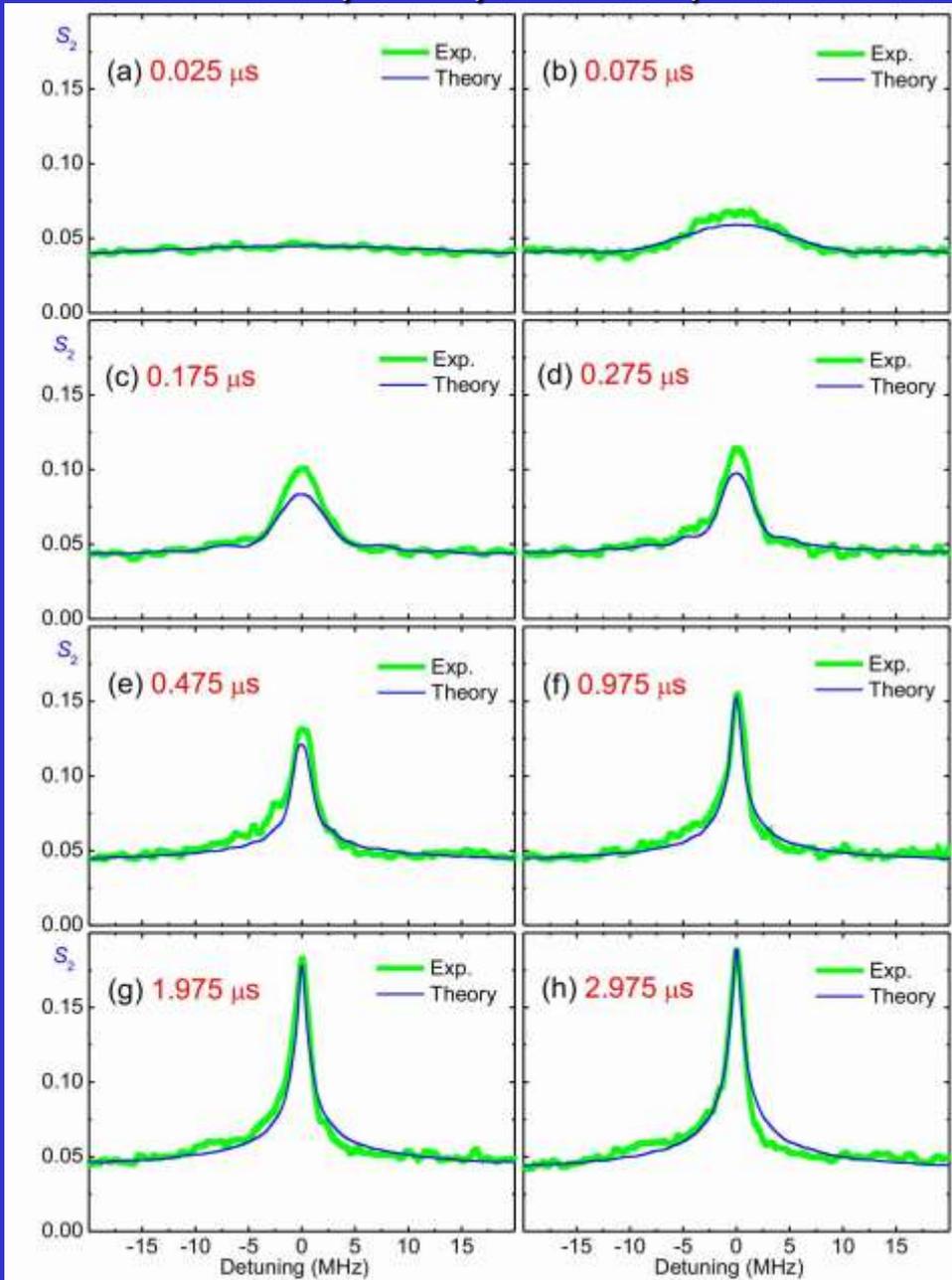
$$\delta E_{PP} = \pm \sqrt{2} V_{ab}^2 = C_3 / R^3$$

$$\Delta^2 / 4 \gg 2V_{ab}^2$$

$$\delta E_{PP} = \pm 2V_{ab}^2 / \Delta = C_6 / R^6$$

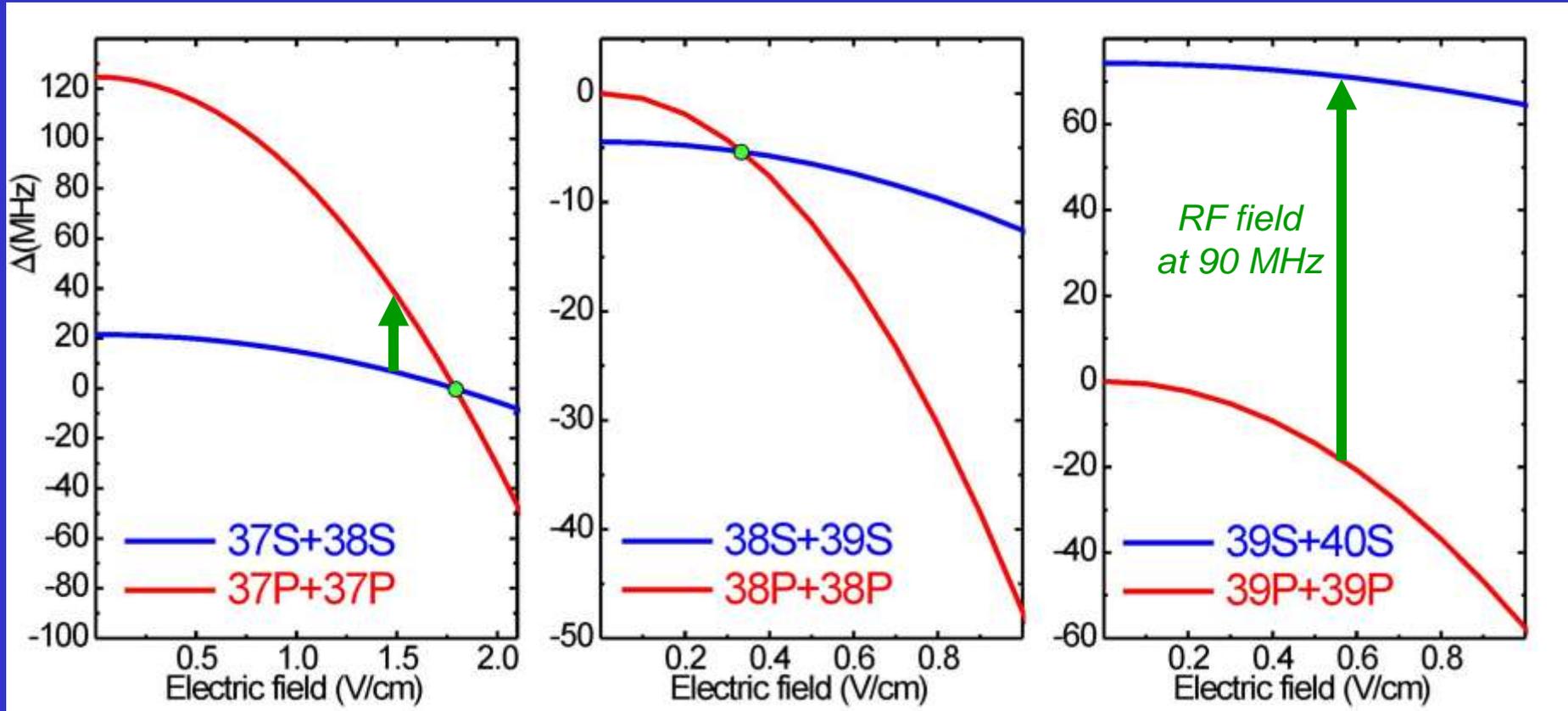


Резонанс Фёрстера для различного времени взаимодействия

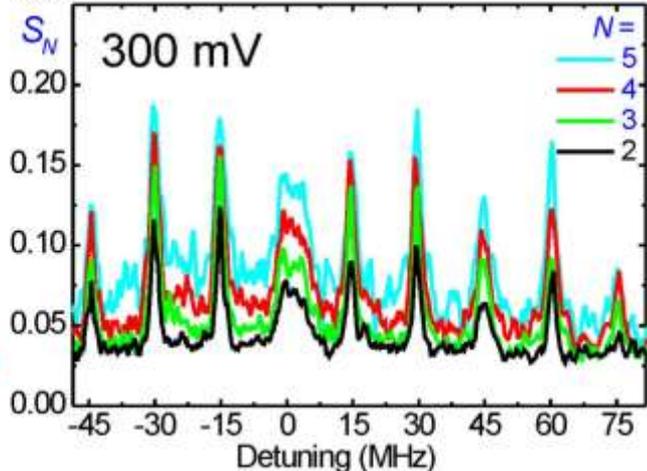
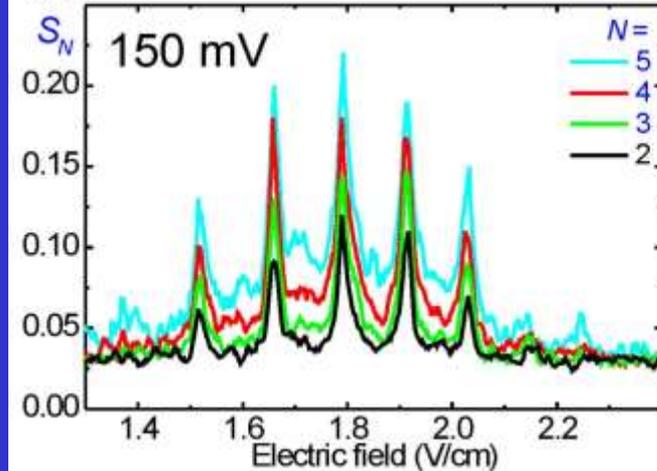
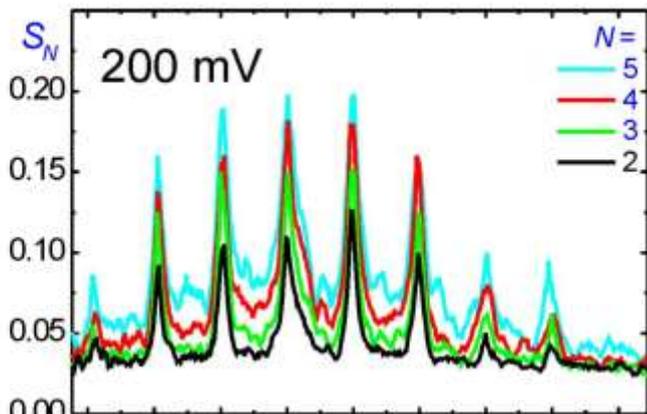
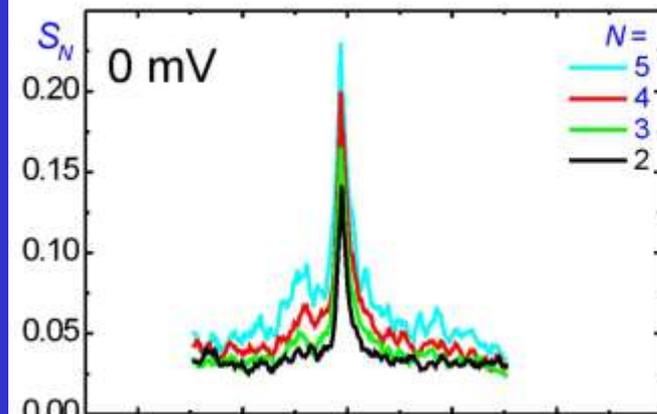
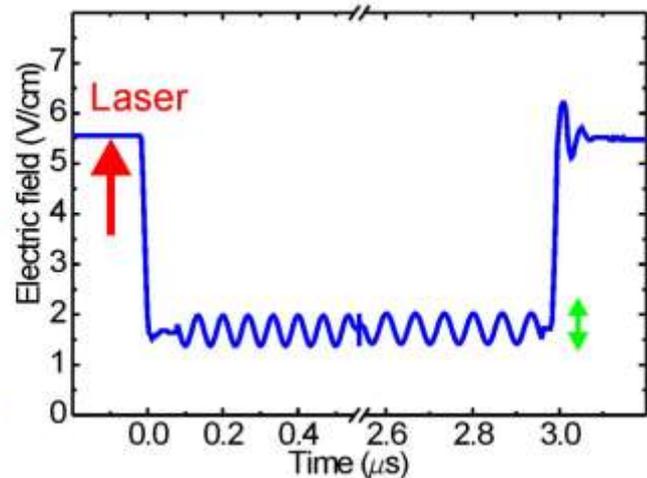
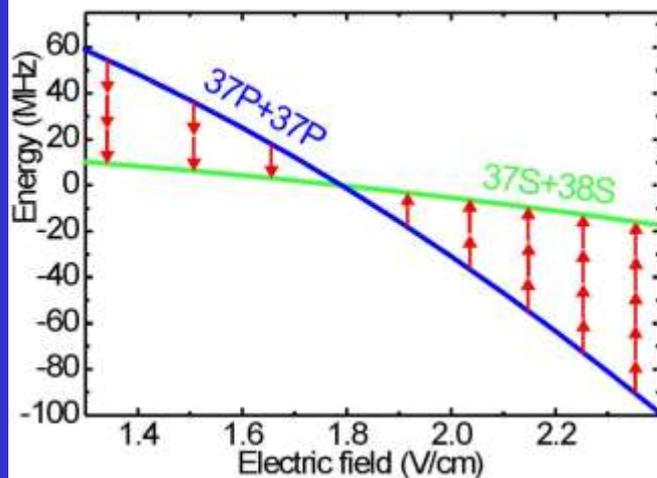


*E.A. Yakshina et al.,
Phys. Rev. A 94, 043417 (2016)*

Резонанс Фёрстера для атомов Rb($nP_{3/2}$)



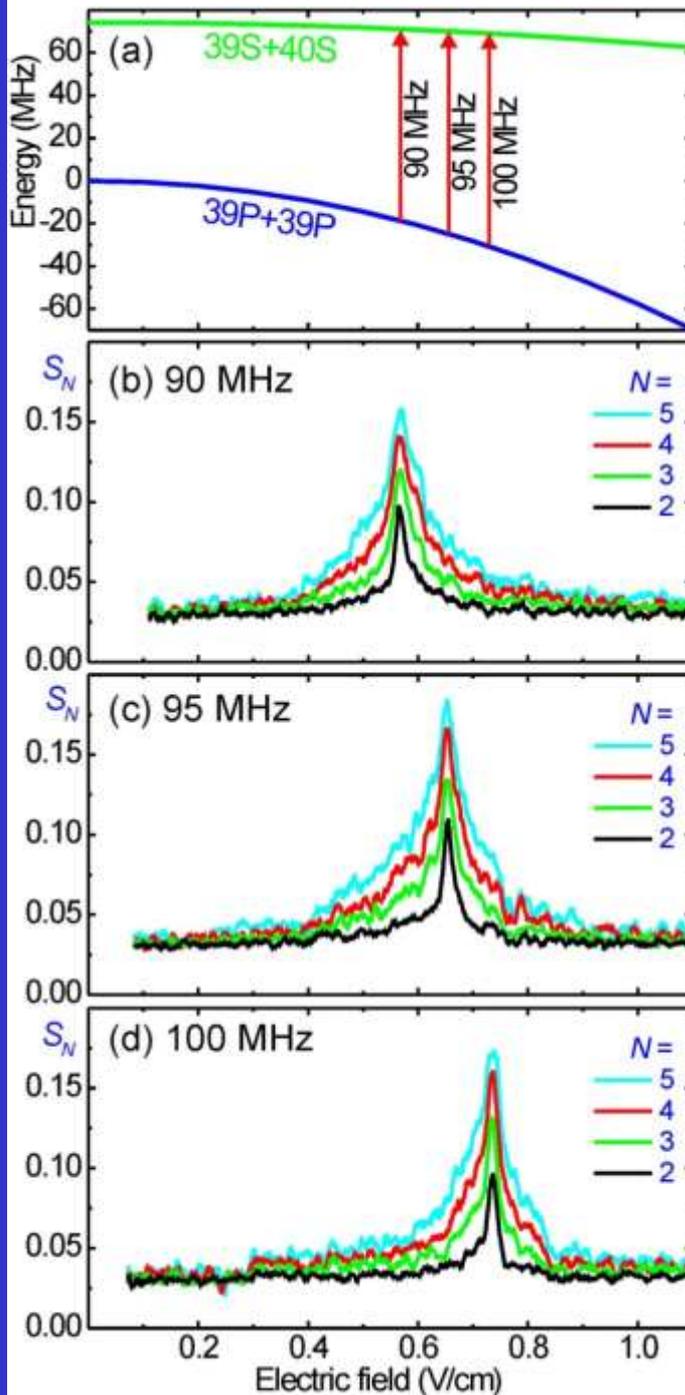
РЧ резонансы Фёрстера для атомов Rb(37P) при 15 МГц



*D.B. Tretyakov et al.,
Phys. Rev. A 90,
041403(R) (2014)*

РЧ резонансы
Фёрстера для
атомов
Rb(39P) при
90-100 МГц

*D.B. Tretyakov et al.,
Phys. Rev. A 90,
041403(R) (2014)*



Эксперимент и теория для двух атомов Rb(37P) при 15 МГц

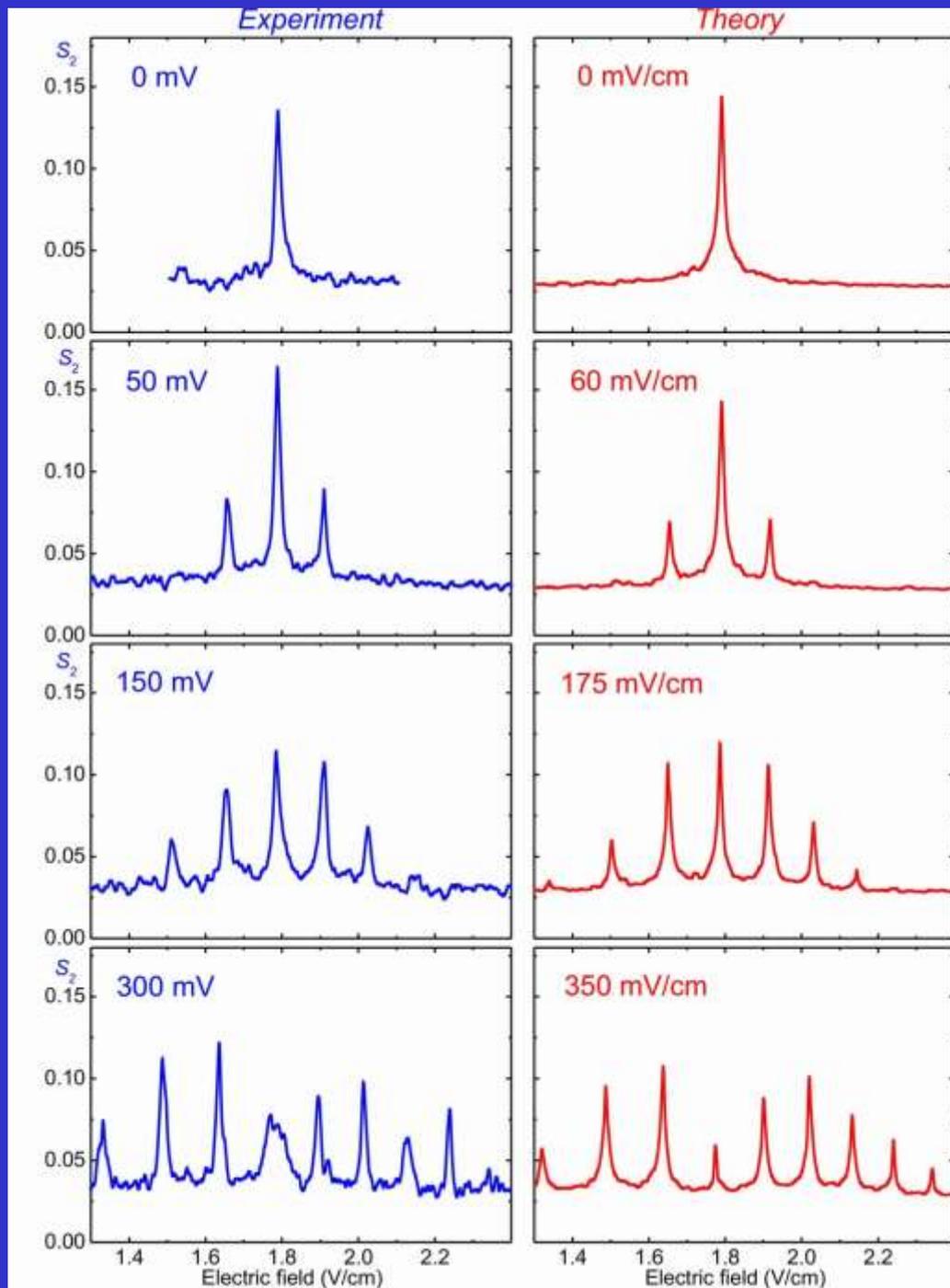
$$\Delta(t) = \Delta_0 + (\alpha_{nP} - \frac{1}{2}\alpha_{nS} - \frac{1}{2}\alpha_{[n+1]S}) \times [F_{dc} + F_{rf} \cos(\omega t)]^2$$

Теория

$$\Gamma/(2\pi) = 0,5 \text{ МГц}$$

Кубический объем
30×30×30 мкм³

*E.A. Yakshina et al.,
Phys. Rev. A 94, 043417 (2016)*



Эксперимент и теория для двух атомов Rb(39P) при 95 МГц

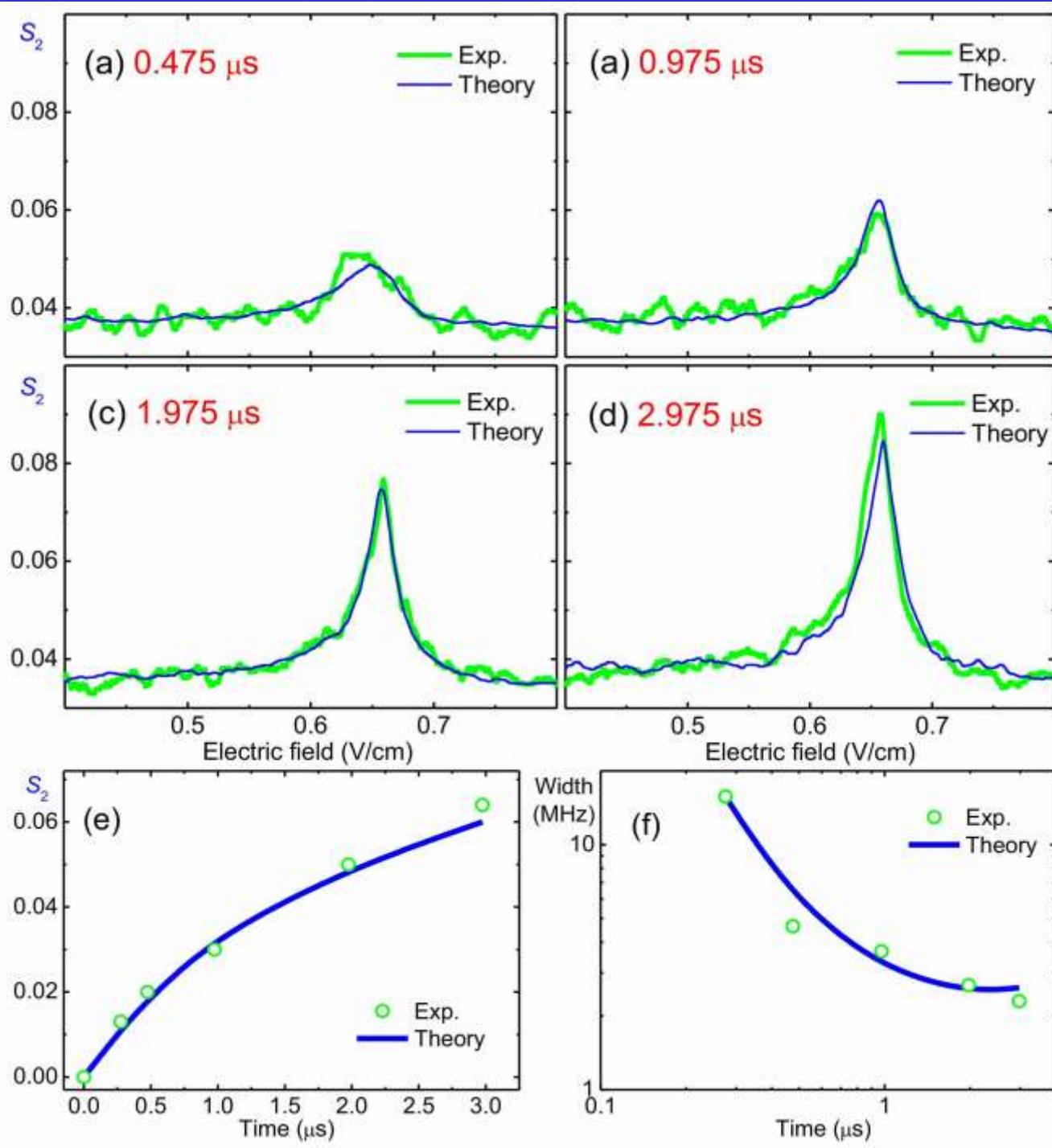
Теория

$$\Gamma/(2\pi) = 1 \text{ МГц}$$

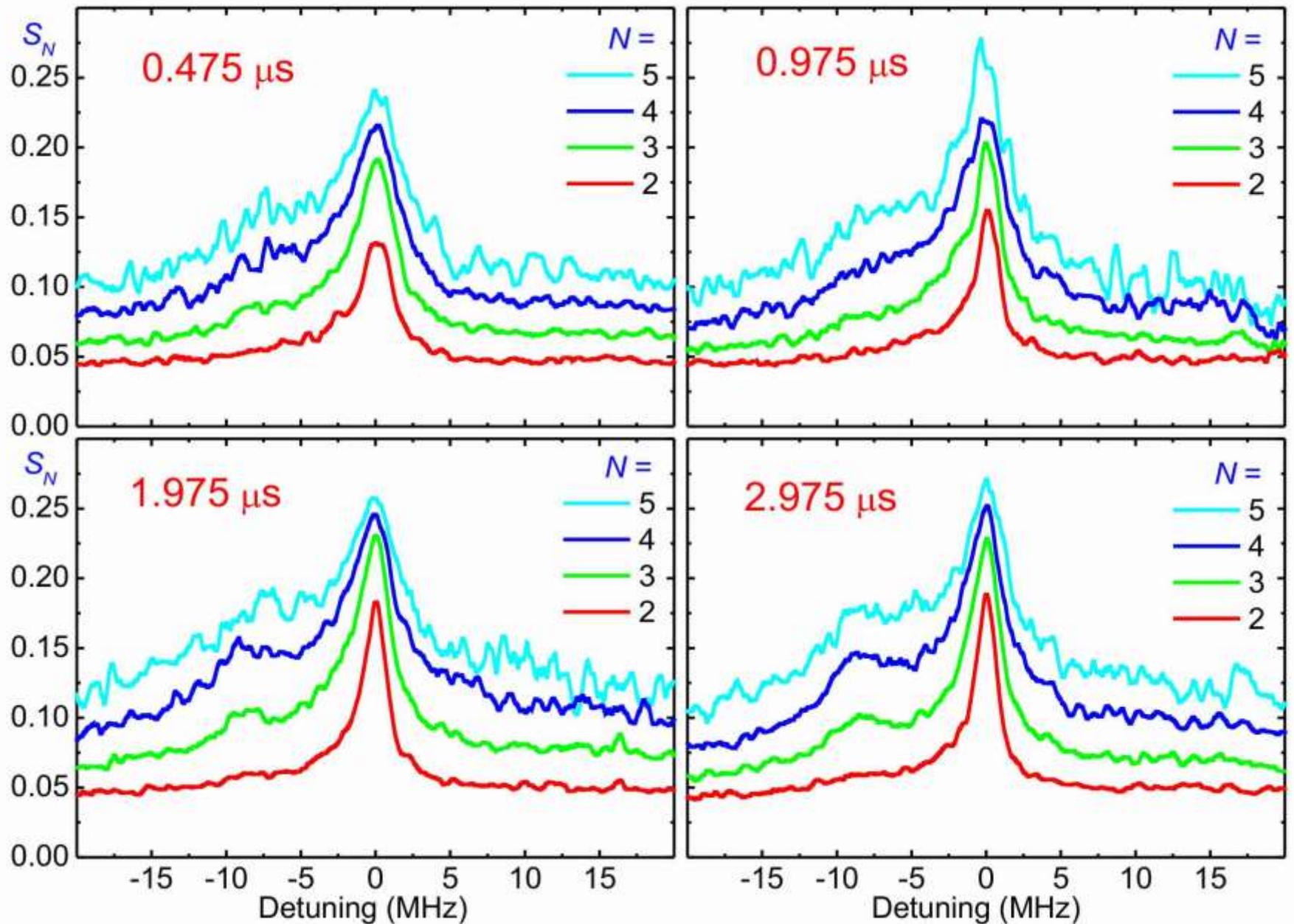
Кубический
объем

$$16 \times 16 \times 16 \text{ } \mu\text{m}^3$$

*E.A. Yakshina et al.,
Phys. Rev. A 94,
043417 (2016)*



Многочастичные резонансы Фёрстера ?



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Резонансы Фёрстера с электрической настройкой обеспечивают точное управление взаимодействием ридберговских атомов
- В экспериментальных записях резонансов Фёрстера наблюдается дополнительное паразитное уширение, которое не описывается теоретической моделью с уравнением Шрёдингера
- Паразитные уширения и динамика резонансов Фёрстера для двух атомов хорошо описываются матрицей плотности в модели диффузии фазы
- Усреднение по положению двух атомов в объеме взаимодействия приводит к формированию заостренного резонанса
- Получены аналитические формулы для амплитуды и формы линии резонанса Фёрстера как для двух неподвижных, так для двух неупорядоченных атомов
- Резонансы Фёрстера для большего числа атомов могут демонстрировать особенности многочастичных взаимодействий

И.И.Рябцев и др., УФН 186, 206 (2016)

E.A. Yakshina et al., Phys. Rev. A 94, 043417 (2016)

I.I. Ryabtsev et al., J. Phys.: Conf. Series, 2017 (in press)