



# Наблюдение трехчастичных резонансов Фёрстера для трех взаимодействующих ридберговских атомов

И.И.Рябцев<sup>1,2</sup>, Д.Б.Третьяков<sup>1,2</sup>, И.И.Бетеров<sup>1,2</sup>,  
Е.А.Якшина<sup>1,2</sup>, В.М.Энтин<sup>1,2</sup>, Р.Cheinet<sup>3</sup>, Р.Pillet<sup>3</sup>

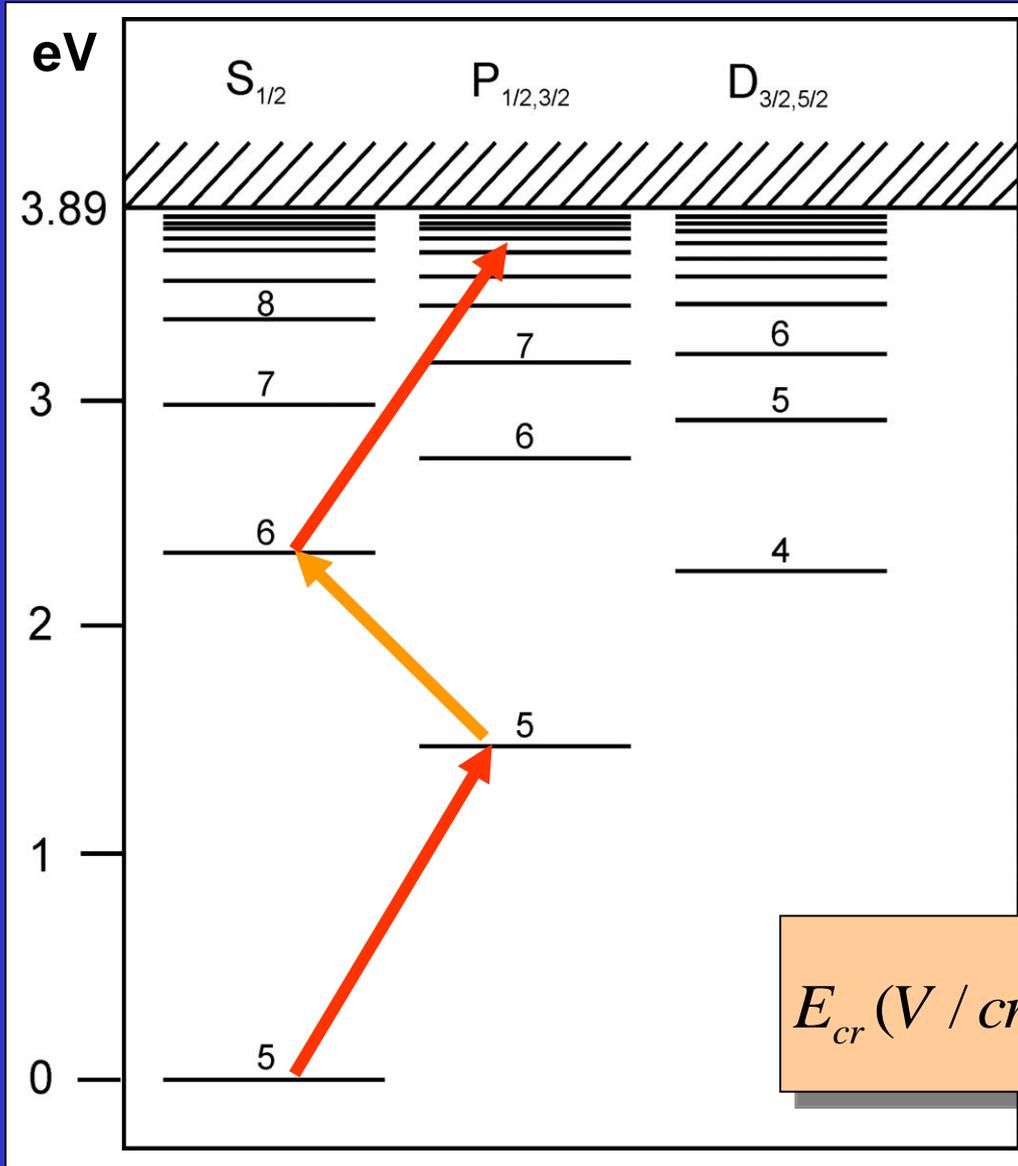
<sup>1</sup>Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>3</sup>Laboratoire Aime Cotton, CNRS, Univ. Paris-Sud, ENS Paris-Saclay, Orsay, France

# Ридберговские атомы

Уровни энергии в атомах Rb



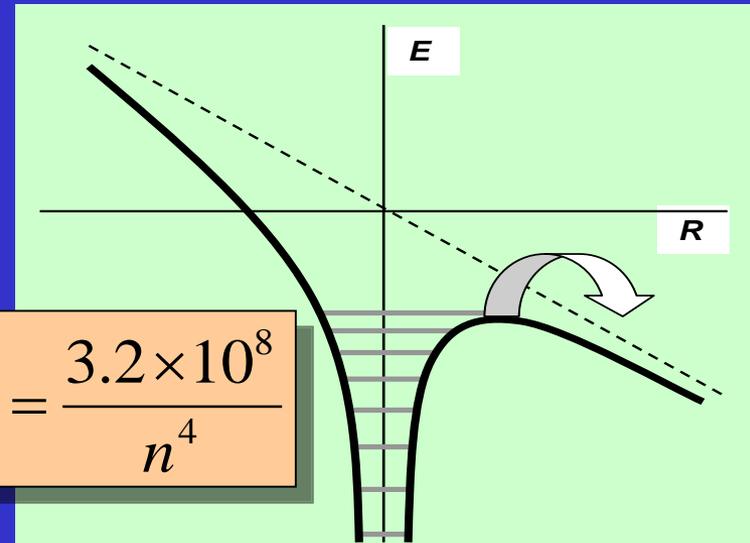
$$E_n = -\frac{Ry}{(n - \delta_L)^2}$$

$$r_n \sim n^2$$

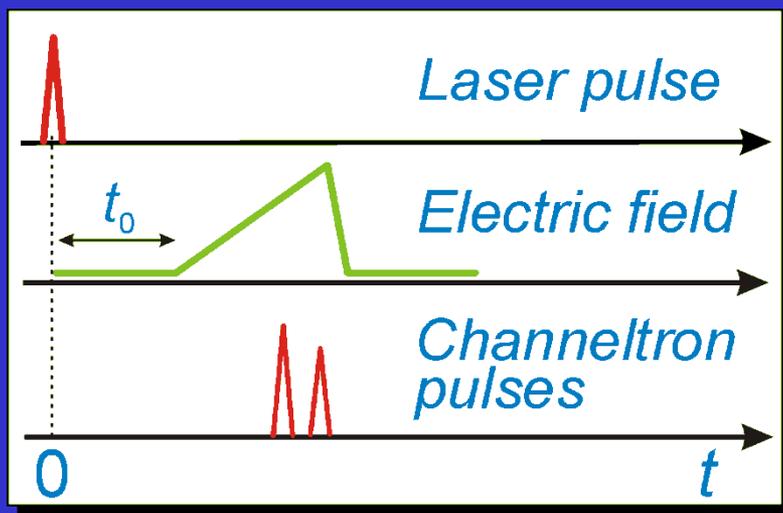
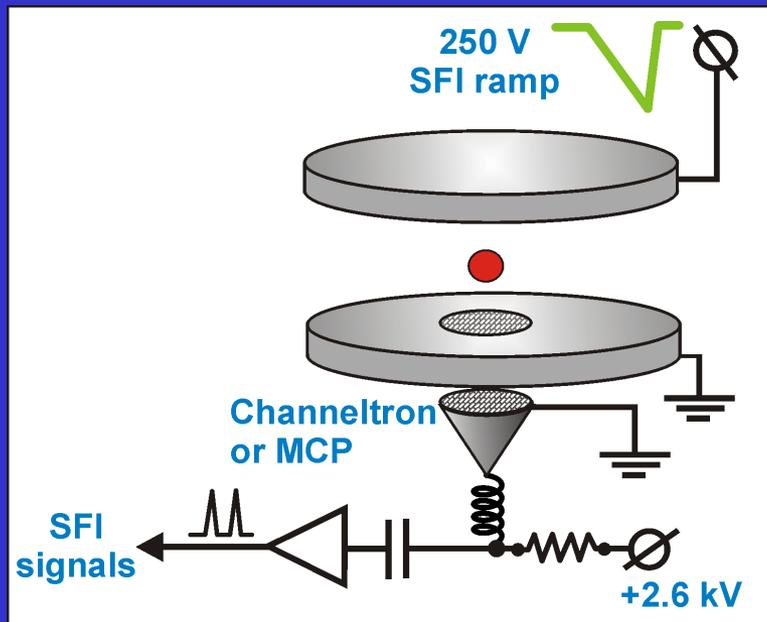
$$\tau_n \sim n^3 - n^5$$

$$\alpha_n \sim n^7$$

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

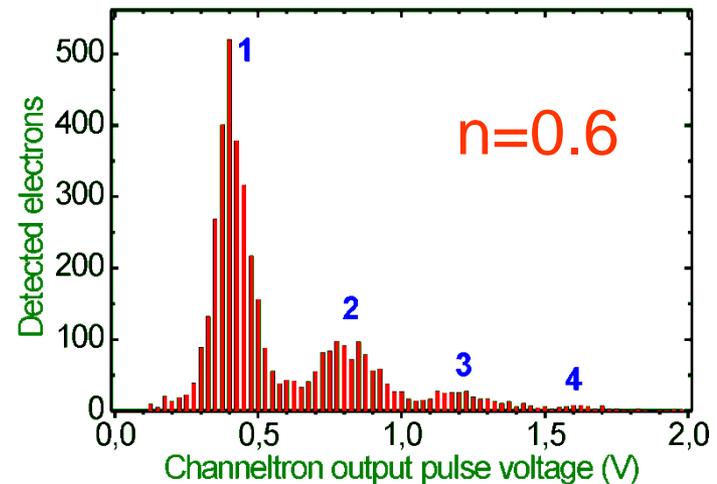
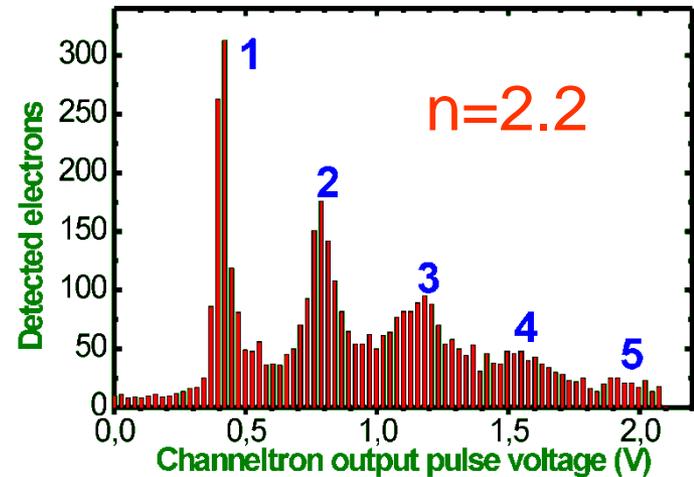


# Детектор с селективной полевой ионизацией



# Счет атомов с ВЭУ-6

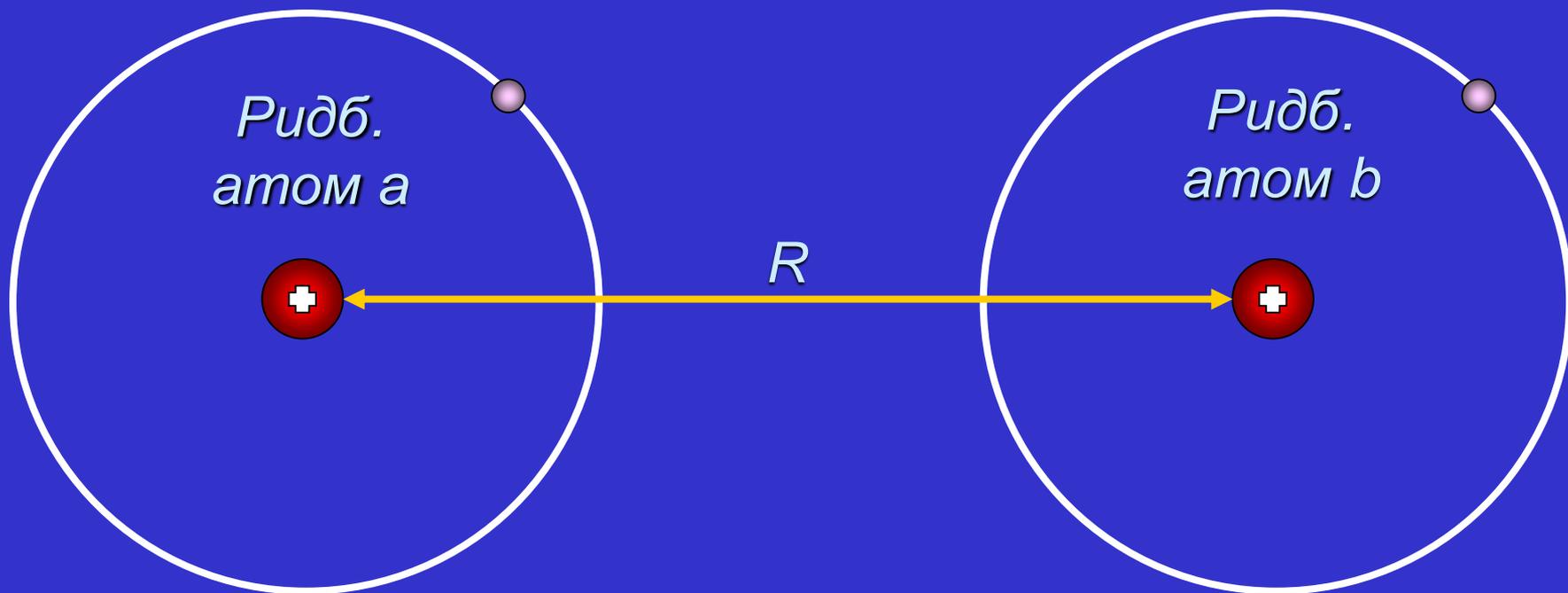
Ryabtsev et al., PRA 76 (2007) 012722



# Зачем исследовать холодные ридберговские атомы?

- Прецизионная спектроскопия
- Ультрахолодная плазма
- Коллективные взаимодействия
- Квантовая информатика

# Взаимодействие двух ридберговских атомов



*Дипольные моменты*

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

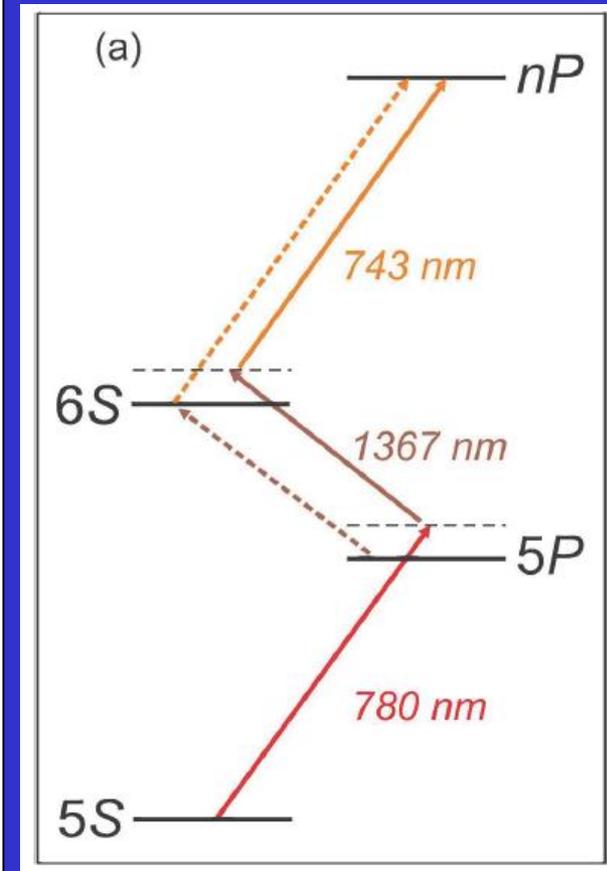
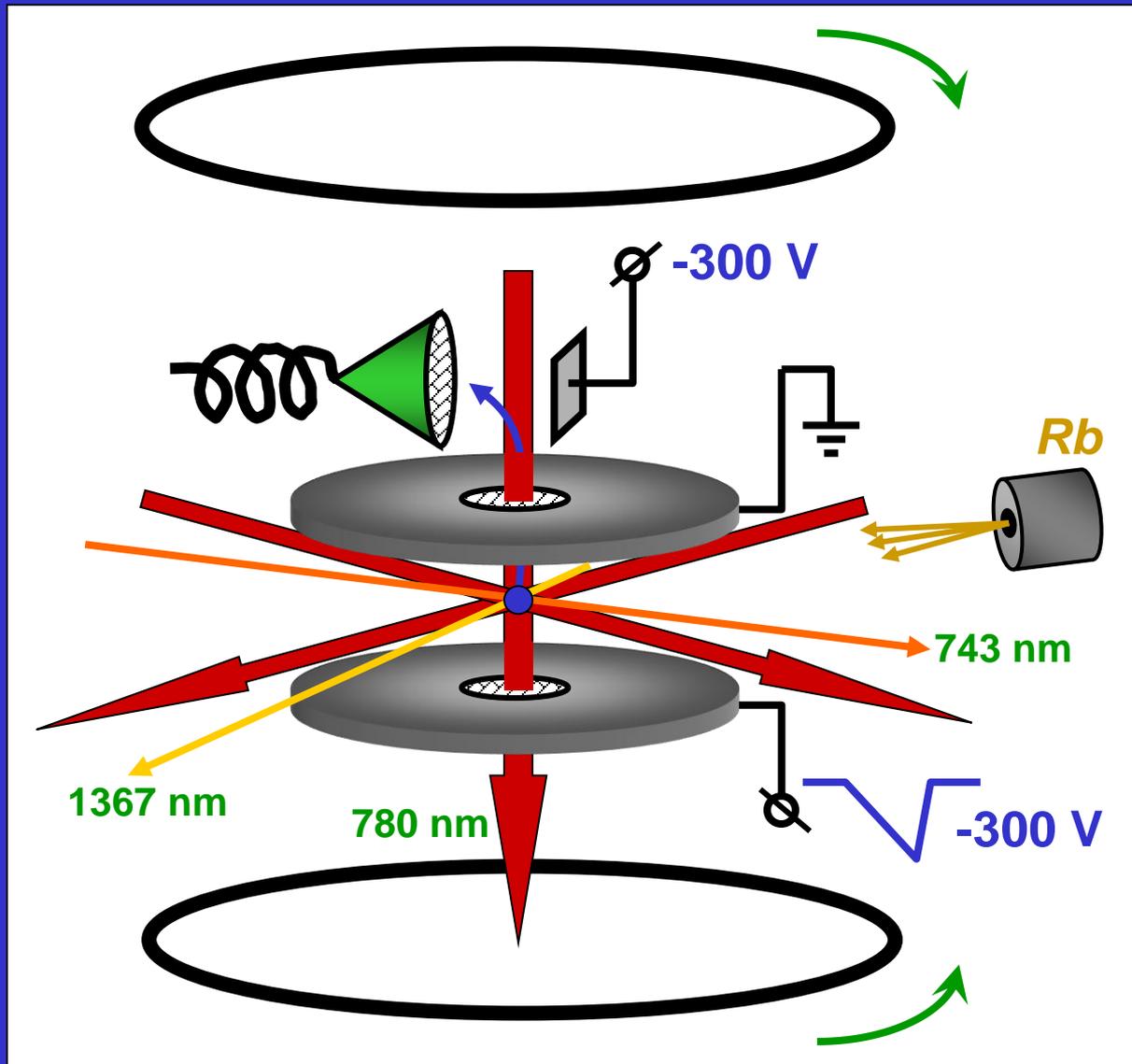
$$d \sim e a_0 n^2$$

*Энергия взаимодействия*

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

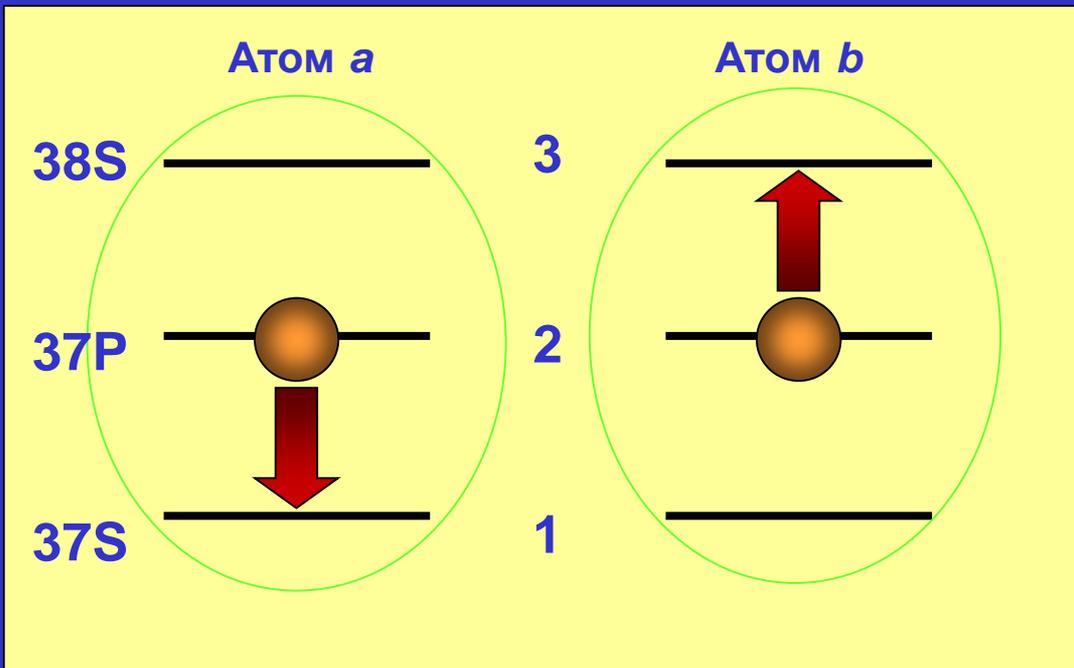
$V \sim 10$  МГц при  $n = 50$ ,  $R \approx 5$  мкм

# Магнитооптическая ловушка с системой возбуждения и регистрации ридберговских атомов Rb



И.И.Рябцев и др.,  
УФН 186, 206 (2016)

# Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах Rb



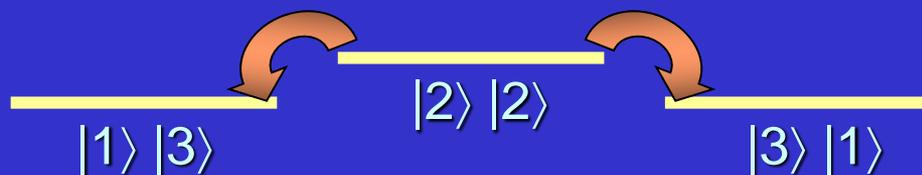
$$\hat{V}_{ab} \sim \frac{\hat{d}_a \hat{d}_b}{R^3}$$

$n = 37, R \approx 10$  мкм:  
 $V_{dd}/h \sim 400$  кГц

*Коллективные состояния*

$$\Psi = A |2\ 2\rangle + a_{13} |1\ 3\rangle + a_{31} |3\ 1\rangle$$

*Пример двух атомов:*

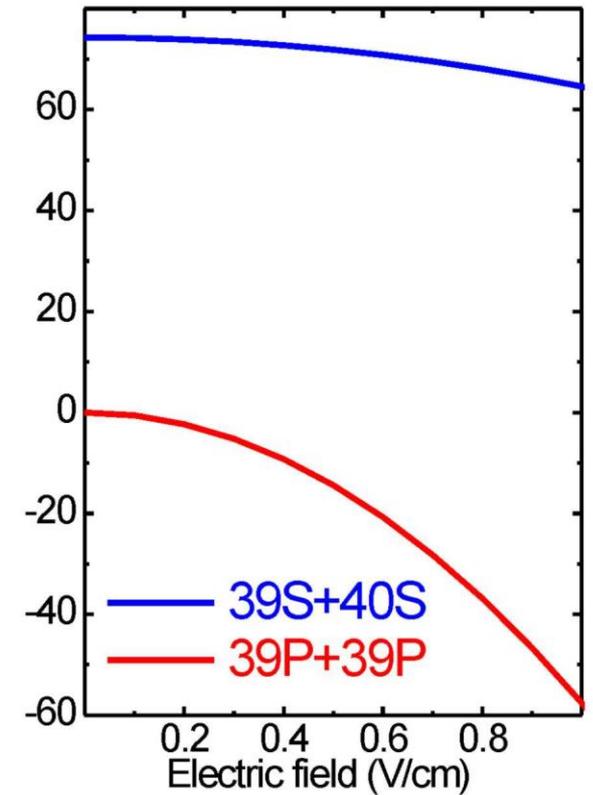
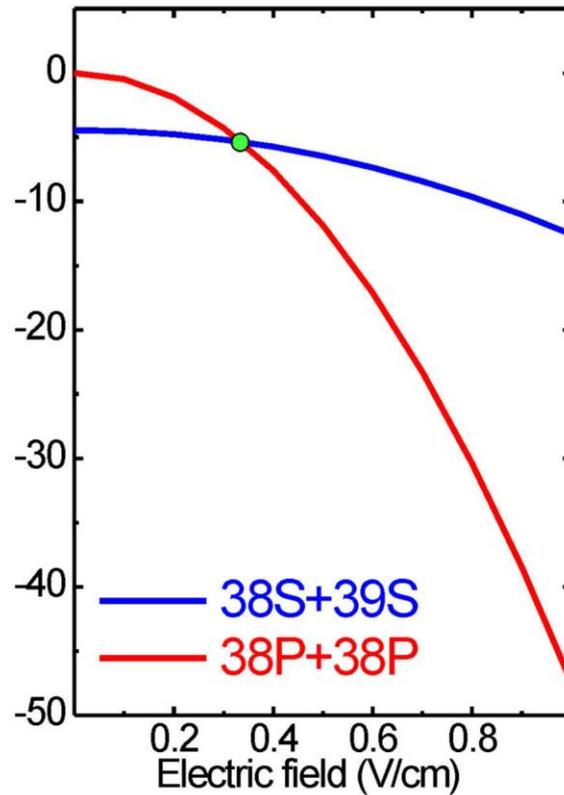
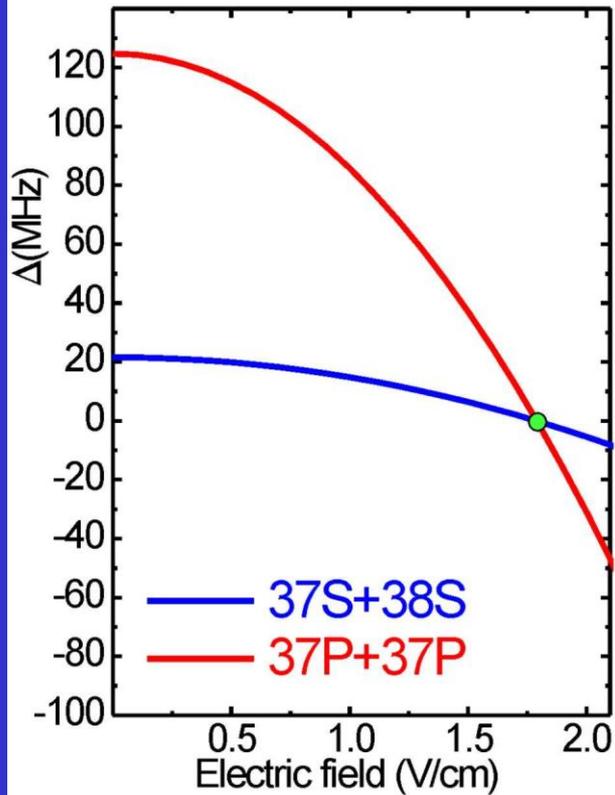


*Эволюция населенностей:*

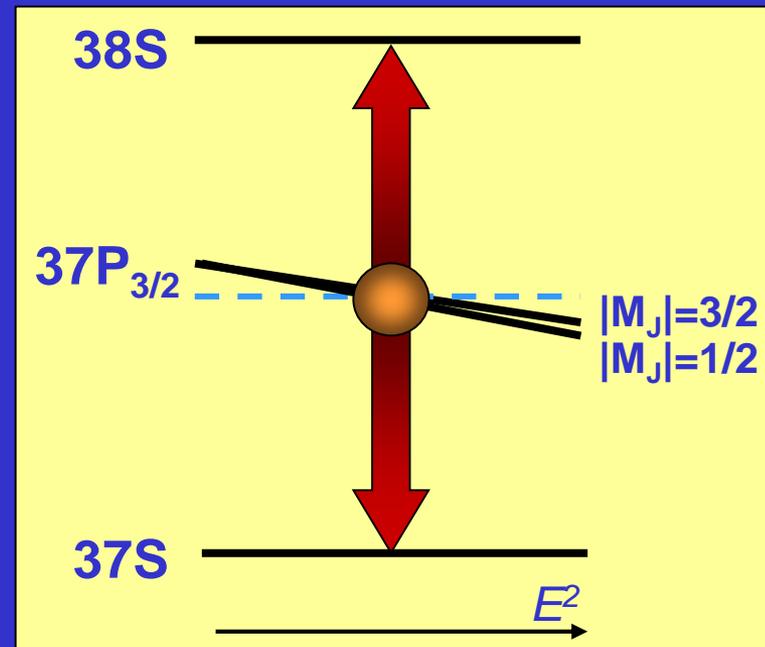
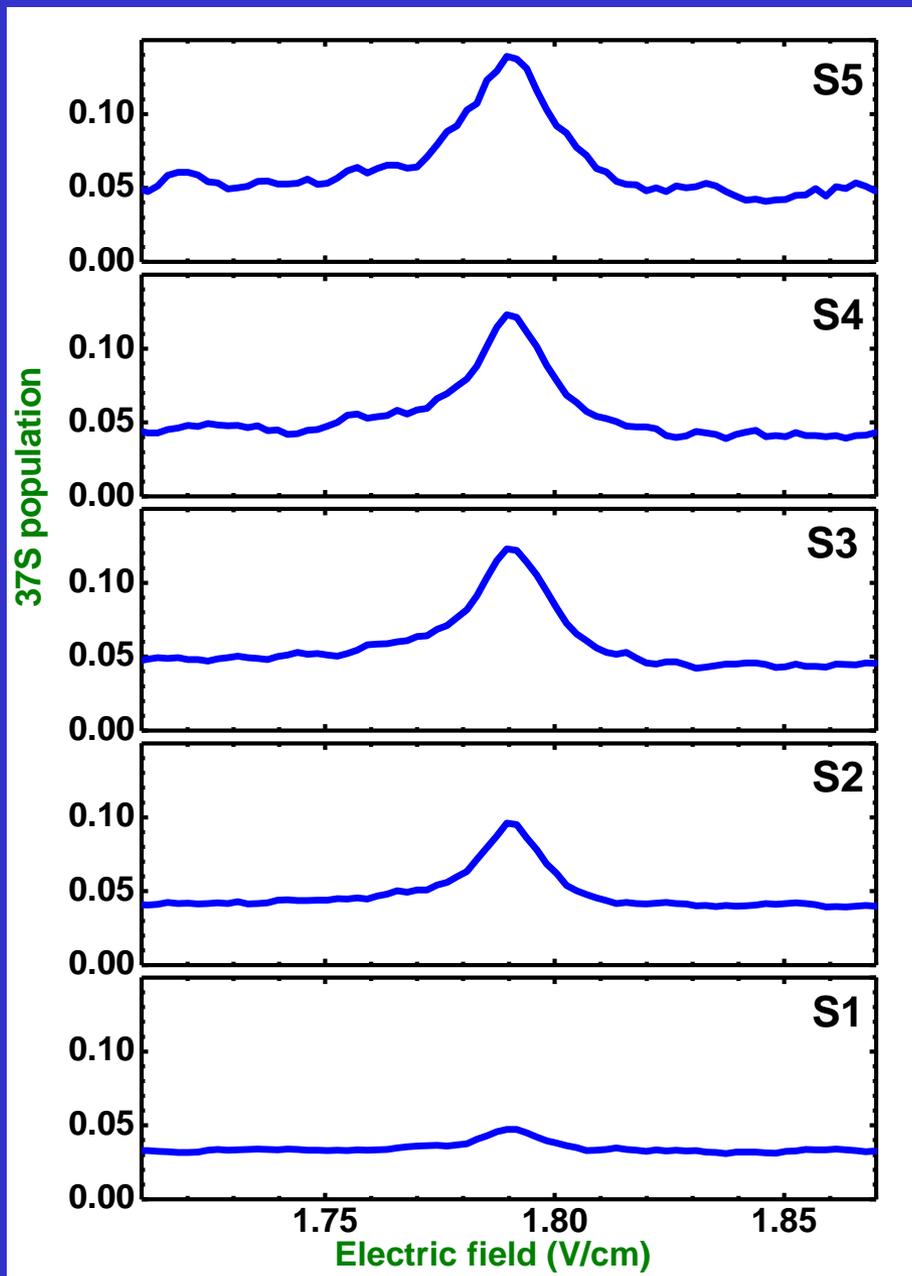
$$\rho_2(t) = \frac{\Omega_{ab}^2}{2\Omega_{ab}^2 + \Delta^2/4} \sin^2\left(t \sqrt{2\Omega_{ab}^2 + \Delta^2/4}\right)$$

# Двухчастичные резонансы Фёрстера

$\text{Rb}(nP_{3/2}) + \text{Rb}(nP_{3/2}) \rightarrow \text{Rb}(nS_{1/2}) + \text{Rb}([n+1]S_{1/2})$



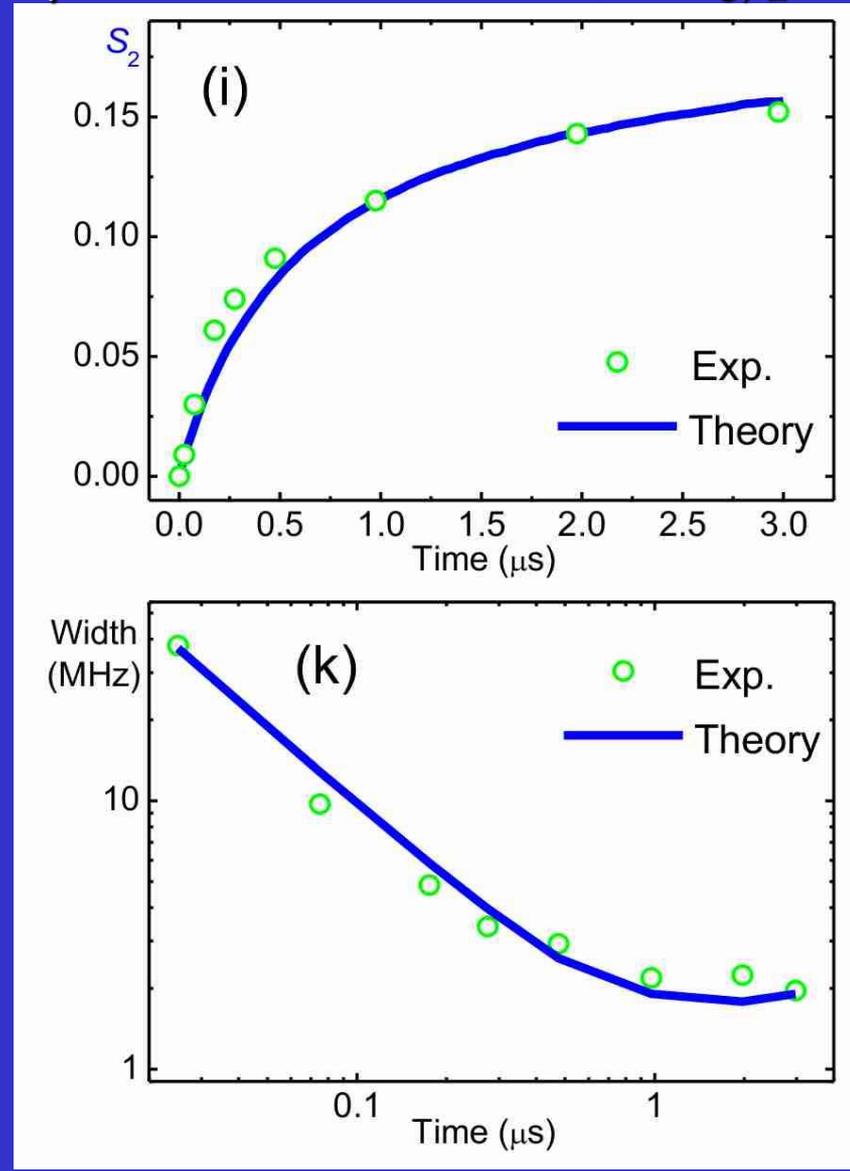
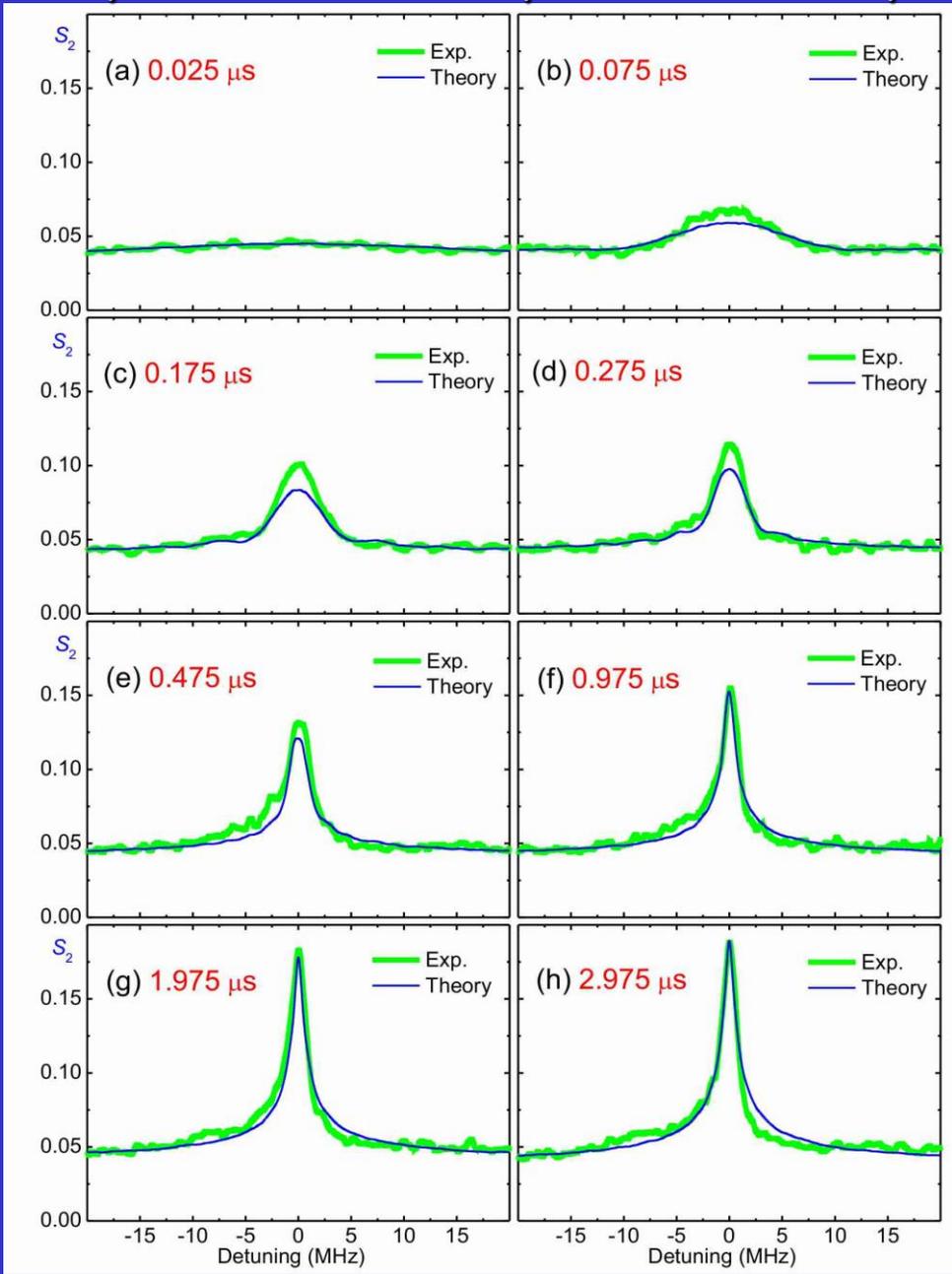
# Резонанс Фёрстера $\text{Rb}(37P_{3/2}) + \text{Rb}(37P_{3/2}) \leftrightarrow \text{Rb}(37S_{1/2}) + \text{Rb}(38S_{1/2})$



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

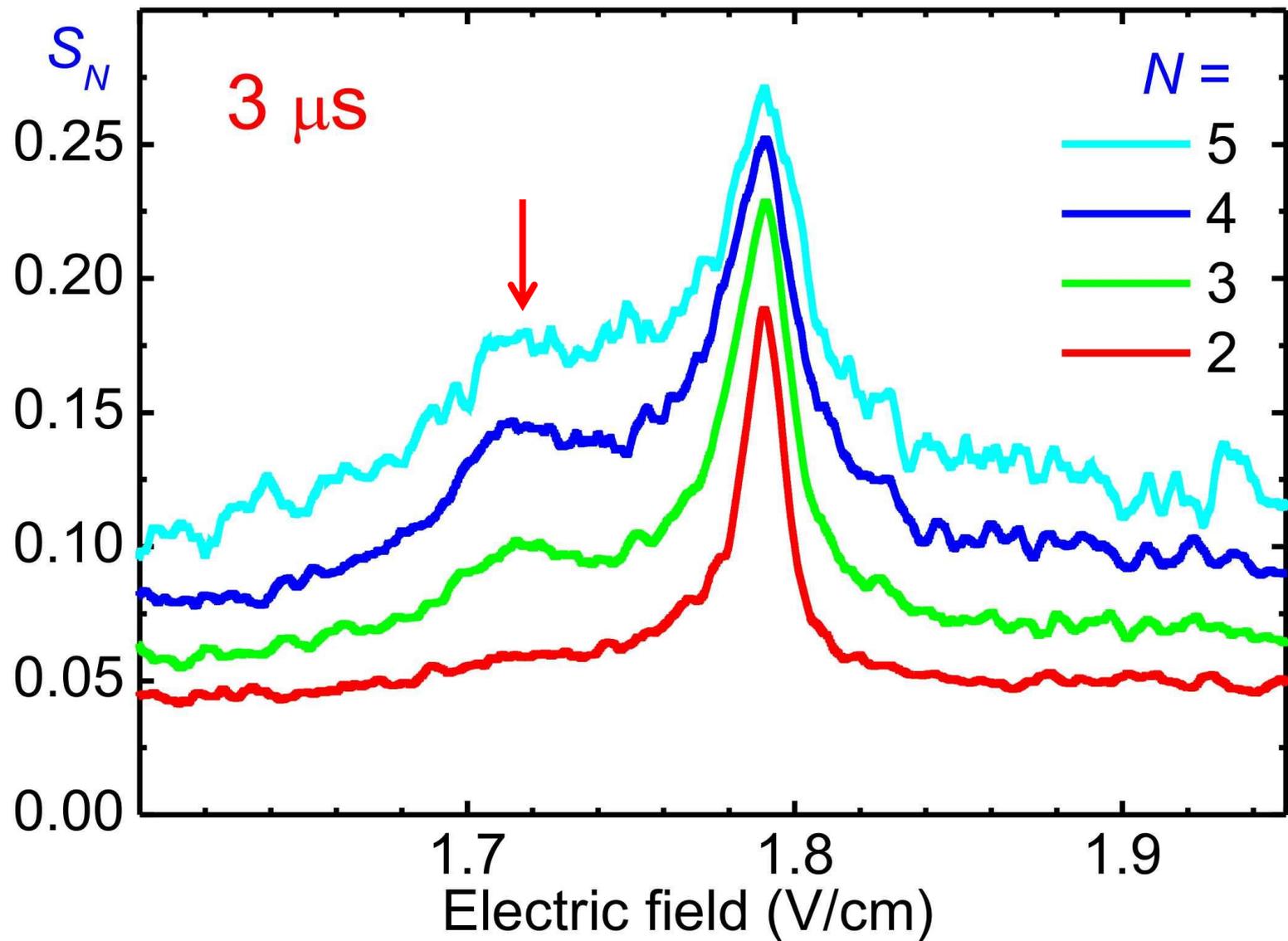
Ryabtsev et al., Phys. Rev. Lett.,  
2010, v.104, p.073003

# Двухчастичный резонанс Фёрстера для атомов Rb( $3P_{3/2}$ )



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

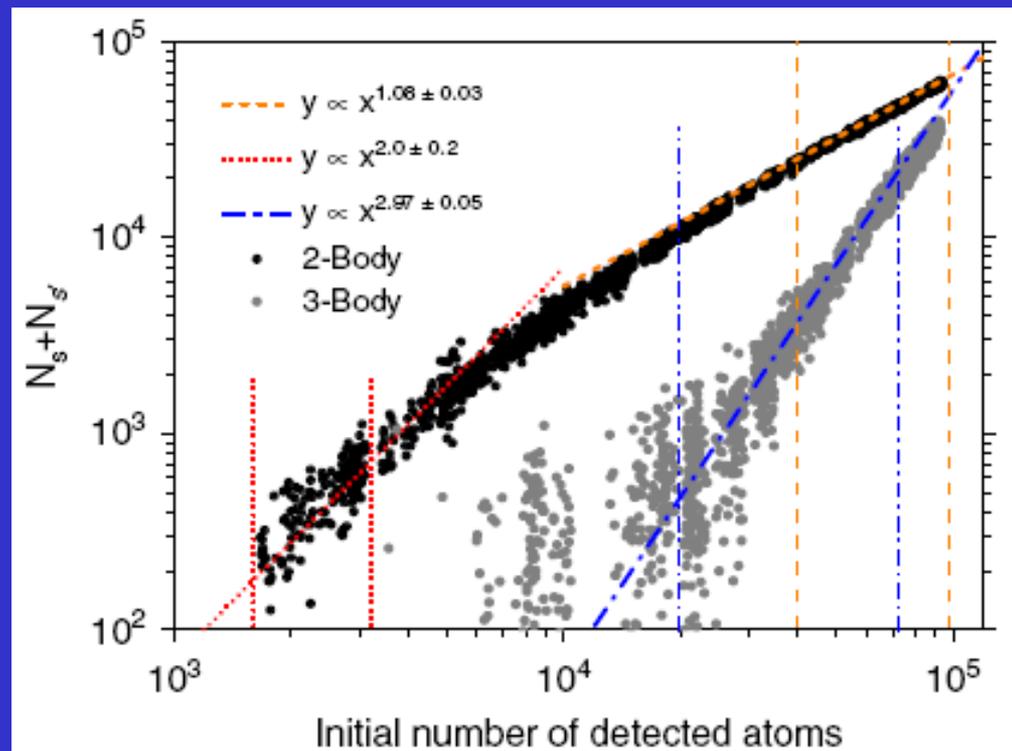
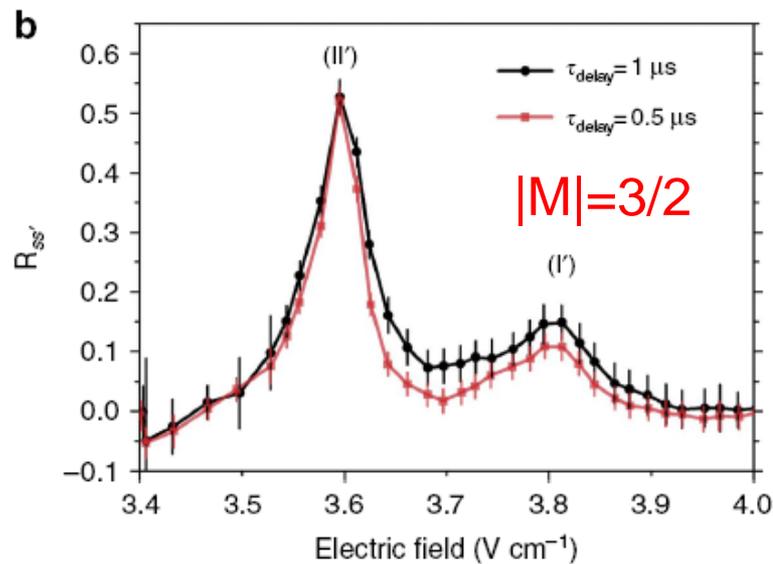
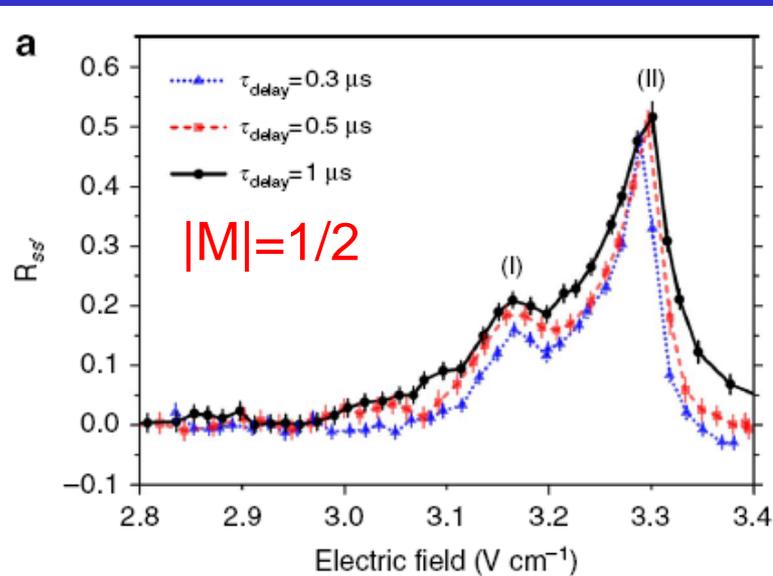
# Трехчастичные резонансы Фёрстера ?



# Borromean three-body FRET in frozen Rydberg gases

R. Faoro<sup>1,2</sup>, B. Pelle<sup>1</sup>, A. Zuliani<sup>1</sup>, P. Cheinet<sup>1</sup>, E. Arimondo<sup>2,3</sup> & P. Pillet<sup>1</sup>

~10<sup>5</sup> атомов Cs(35P<sub>3/2</sub>) в  
объеме размером ~200 мкм

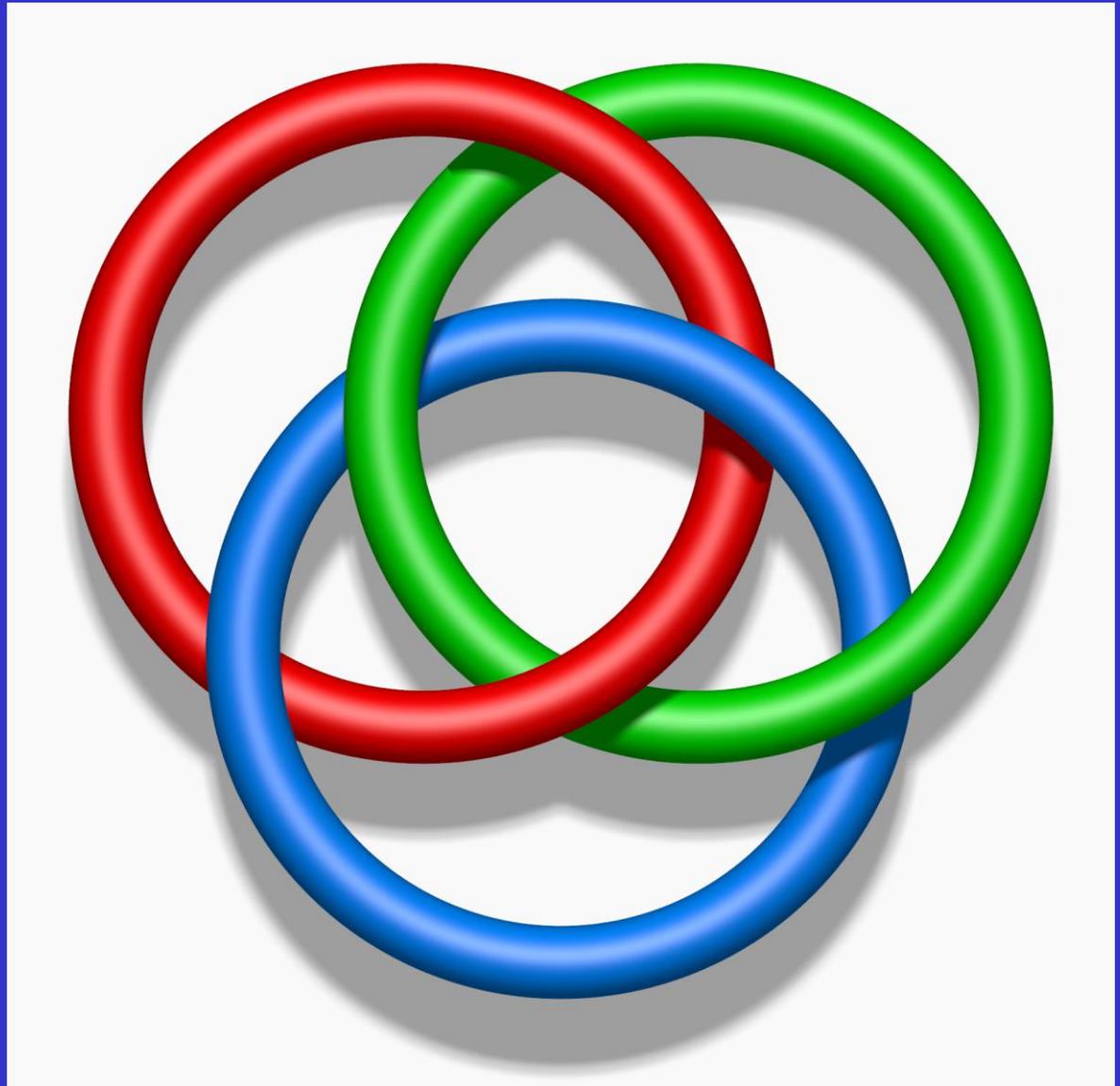


# Боромеанское взаимодействие трех ридберговских атомов

*Why Borromean?*

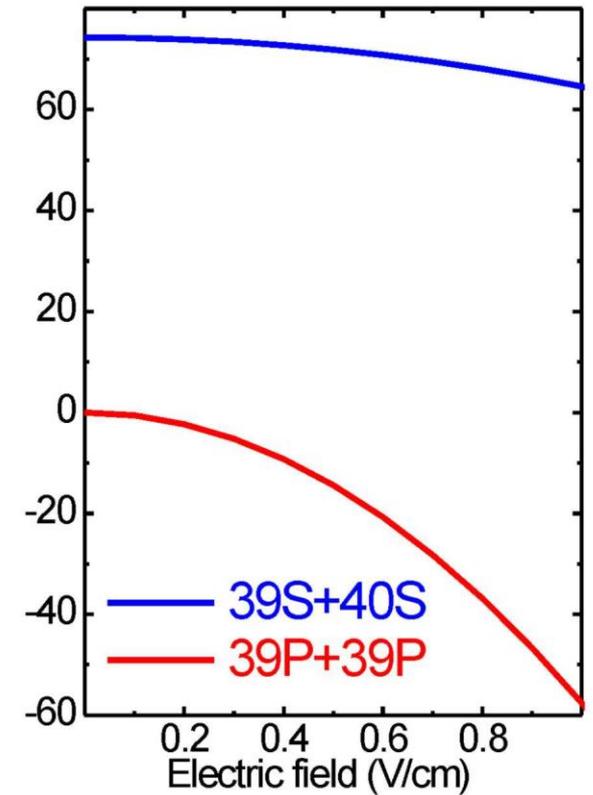
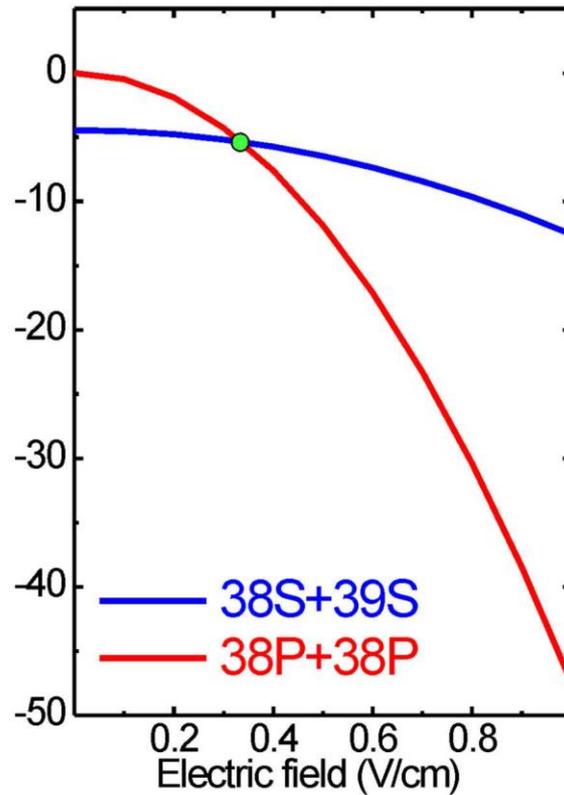
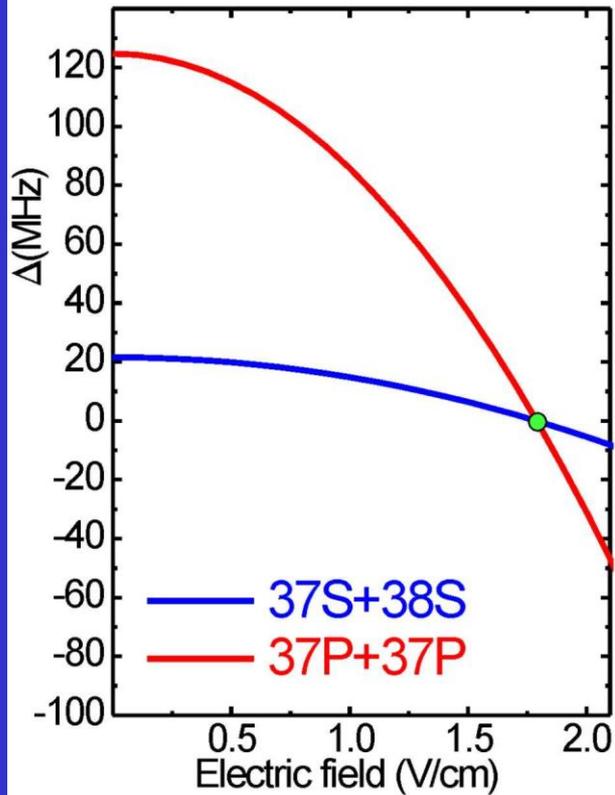
*Borromean rings consist of three circles which are linked, but removing any ring results in two unlinked rings.*

Borromean FRET is featured by the strong three-body population transfer with a negligible contribution of two-body transfer.

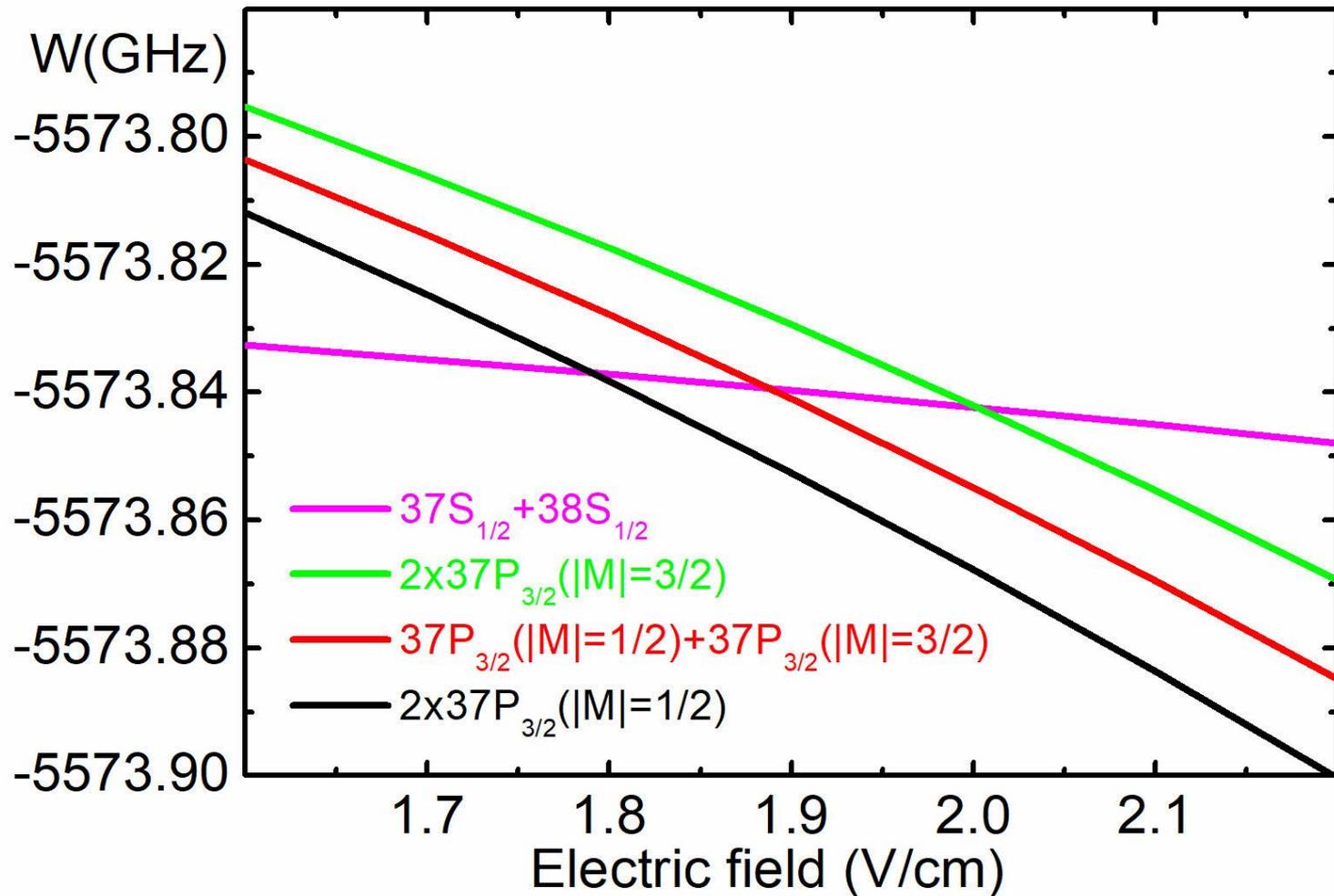


# Двухчастичные резонансы Фёрстера

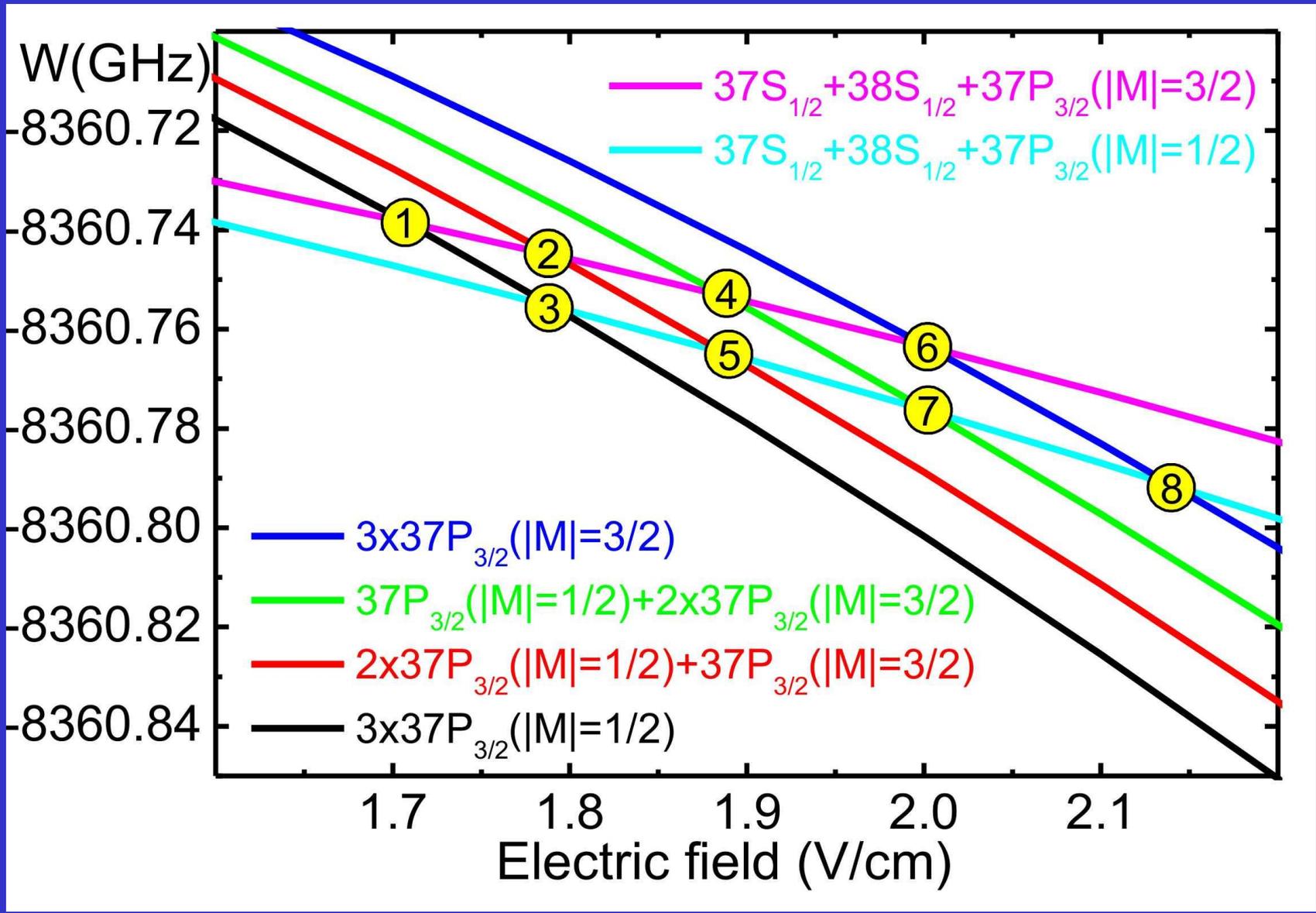
$\text{Rb}(nP_{3/2}) + \text{Rb}(nP_{3/2}) \rightarrow \text{Rb}(nS_{1/2}) + \text{Rb}([n+1]S_{1/2})$



# Двухчастичные резонансы Фёрстера для атомов Rb( $37P_{3/2}$ ) с учетом штарковской структуры

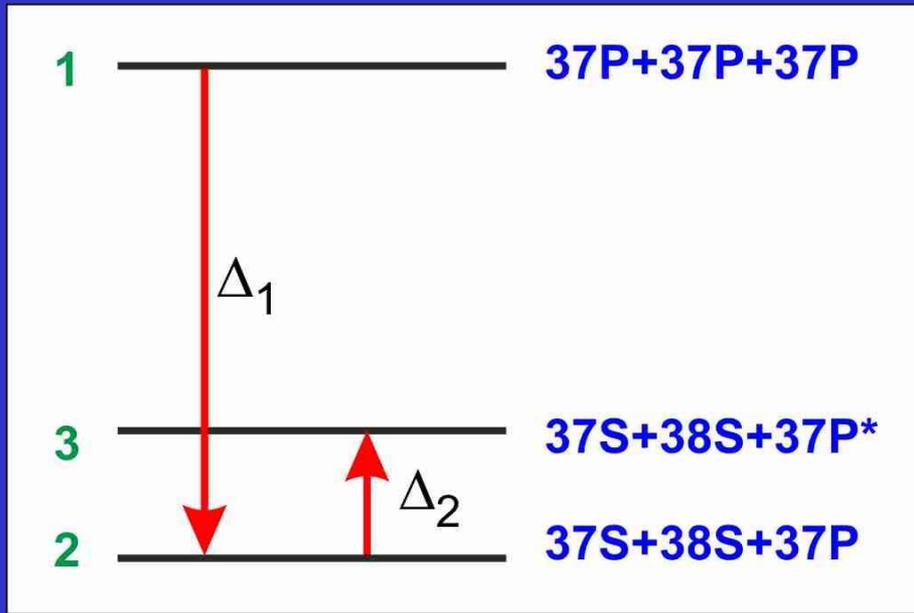


# Трехчастичные резонансы Фёрстера для атомов Rb( $37P_{3/2}$ )



D.B.Tretyakov, I.I.Beterov, E.A.Yakshina, V.M.Entin, I.I.Ryabtsev, P.Cheinet, and P.Pillet, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 173402 (2017)

# Простая модель в теории возмущений



$$i\dot{a}_1 = 6\Omega a_2 e^{-i\Delta_1 t}$$

$$i\dot{a}_2 = \Omega a_1 e^{i\Delta_1 t} + 2\Omega^* a_3 e^{i\Delta_2 t}$$

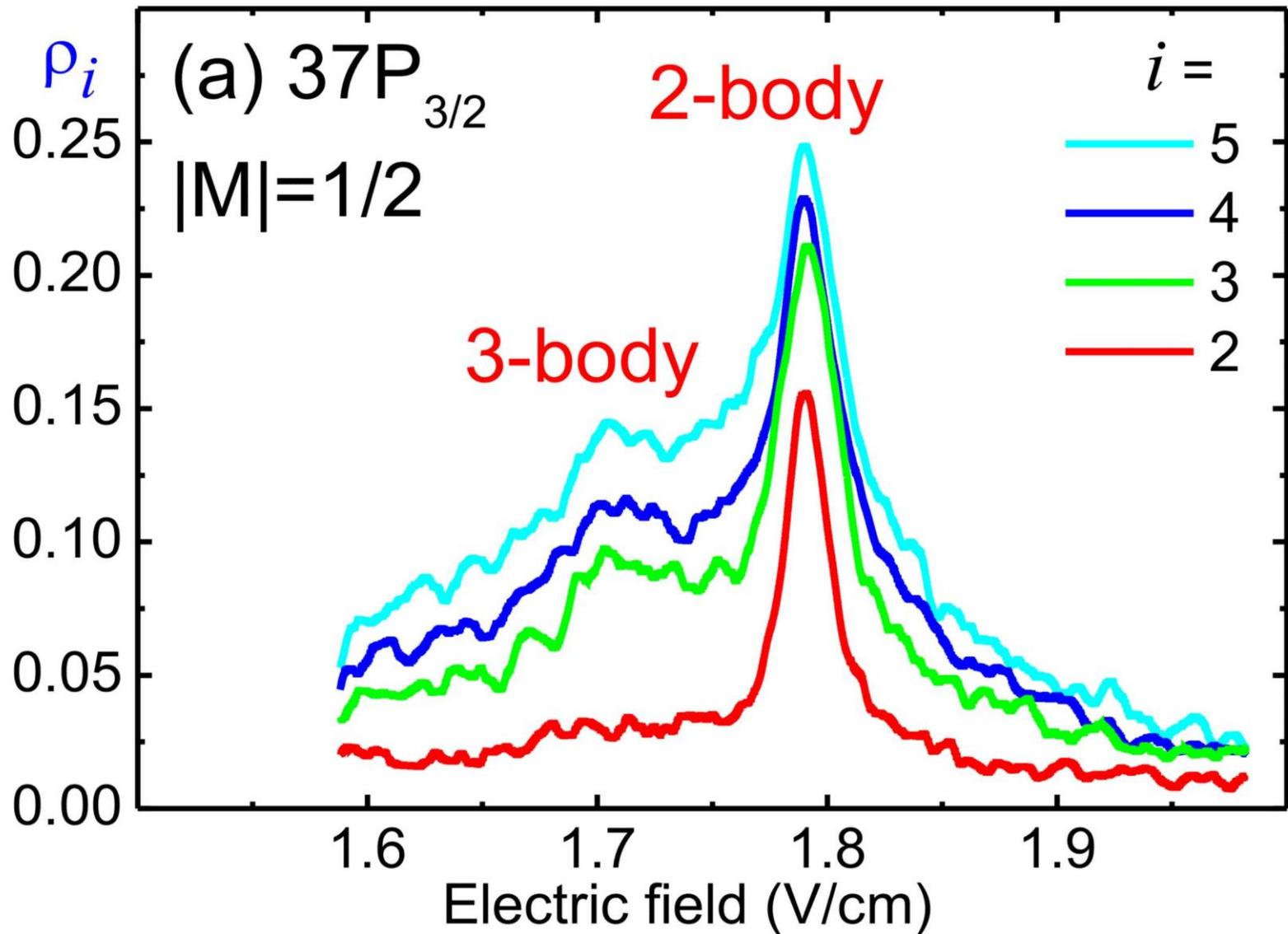
$$i\dot{a}_3 = 2\Omega^* a_2 e^{-i\Delta_2 t}$$

$$\rho_3 = (6 |a_2|^2 + 6 |a_3|^2) / 3$$

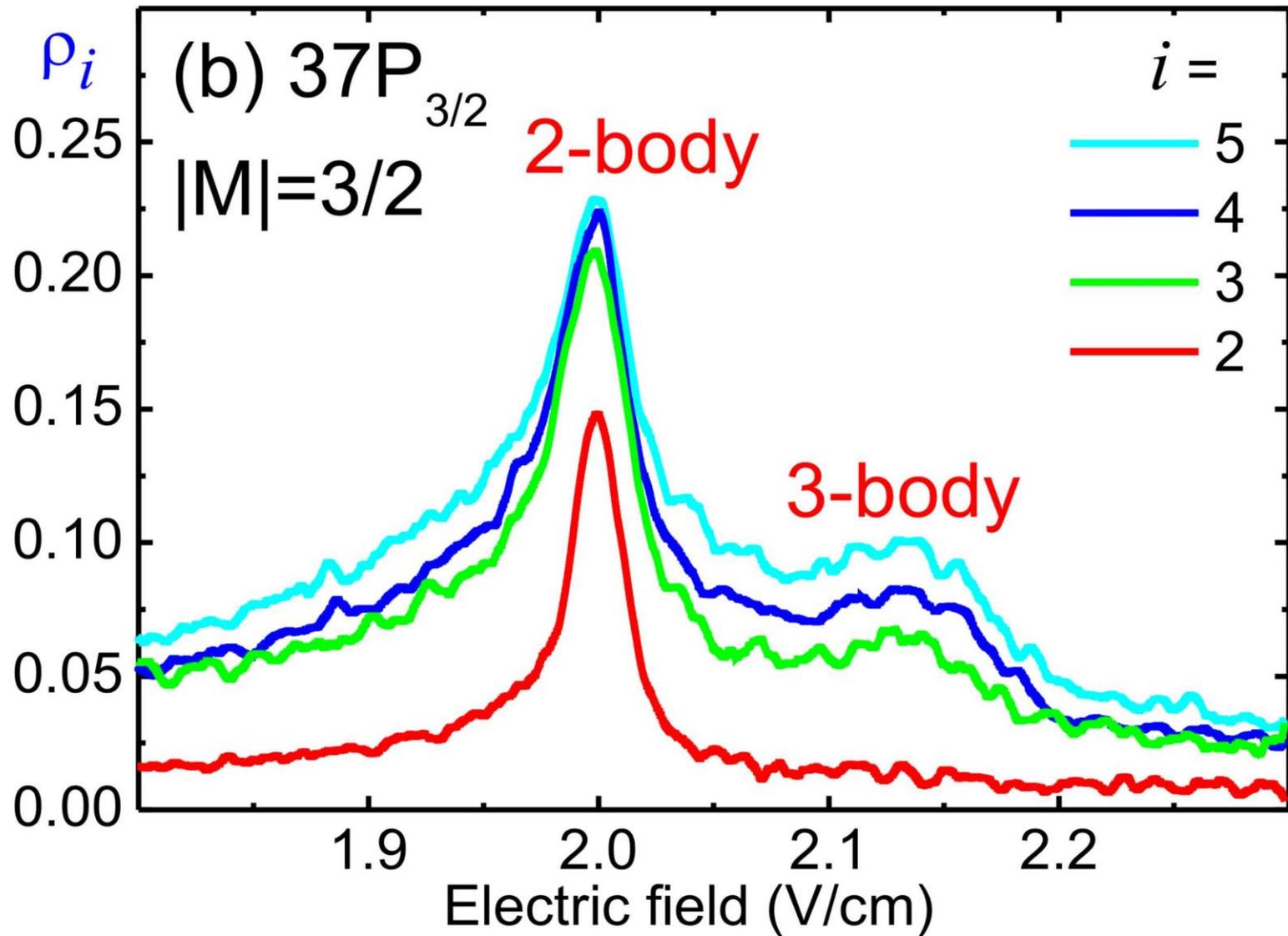
Теория возмущений для слабого взаимодействия:  $a_1 \approx 1$ ,  $a_2, a_3 \ll 1$

$$\rho_3 \approx \frac{8\Omega^2}{\Delta_1^2} \sin^2 \left[ \frac{\Delta_1 t}{2} \right] + 32\Omega^2 \Omega^{*2} \times \left\{ \frac{1}{\Delta_1 \Delta_2 (\Delta_1 - \Delta_2)^2} \sin^2 \left[ \frac{(\Delta_1 - \Delta_2)t}{2} \right] + \frac{1}{\Delta_1 \Delta_2^2 (\Delta_1 - \Delta_2)} \sin^2 \left[ \frac{\Delta_2 t}{2} \right] - \frac{1}{\Delta_1^2 \Delta_2 (\Delta_1 - \Delta_2)} \sin^2 \left[ \frac{\Delta_1 t}{2} \right] \right\}$$

# Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb

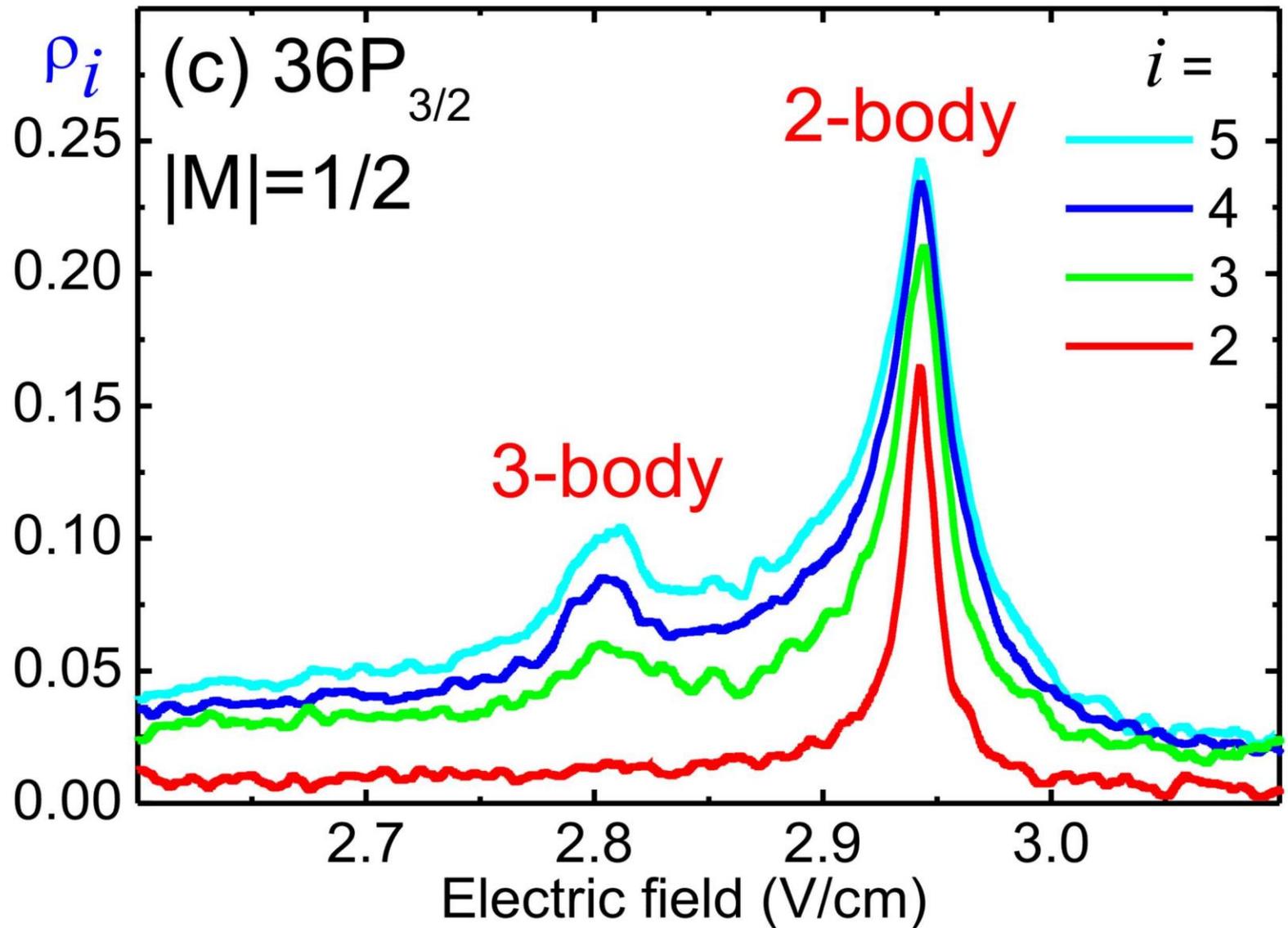


# Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb



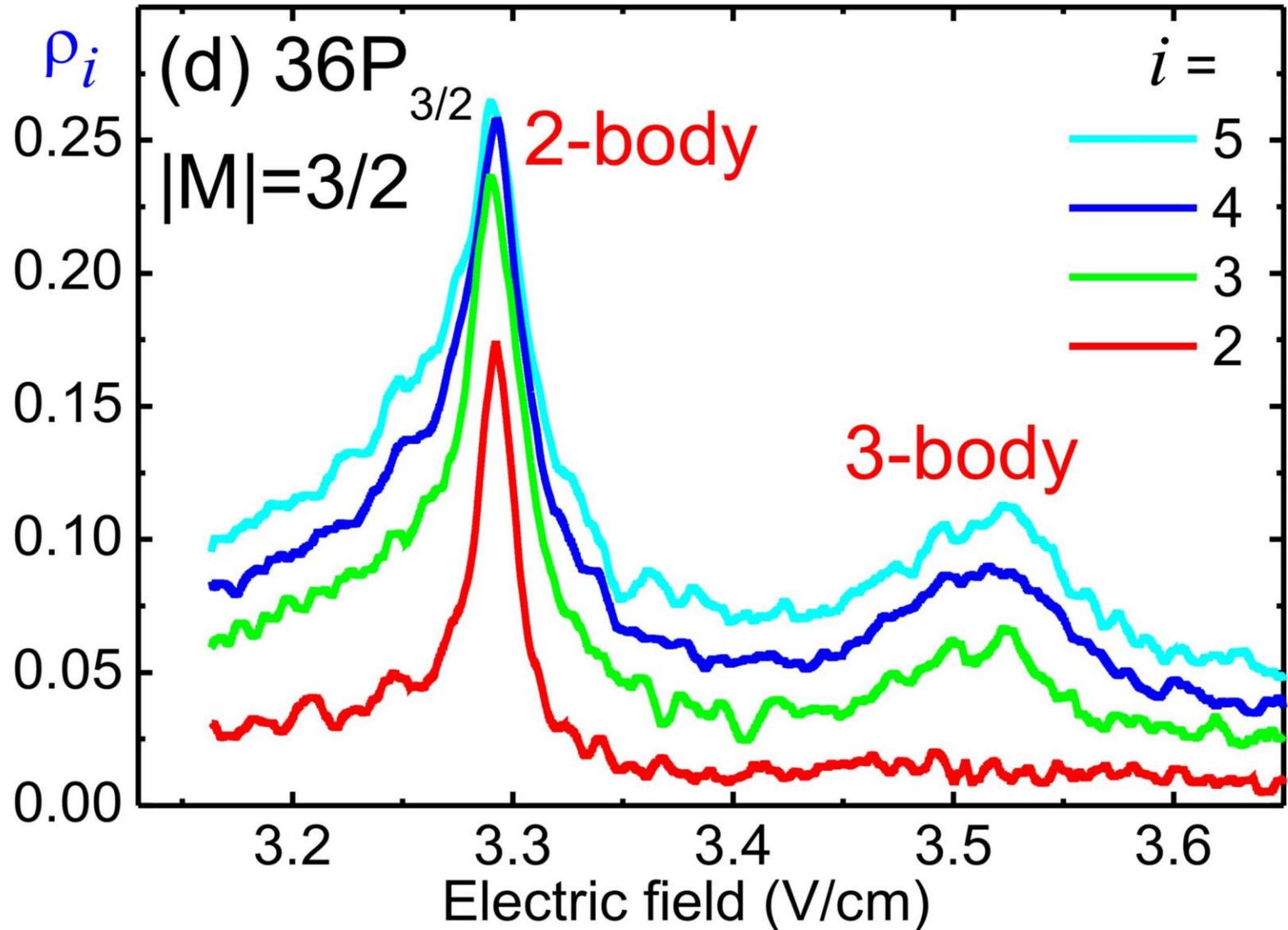
D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, E.A. Yakshina, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev, P. Cheinet, and P. Pillet, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 173402 (2017)

# Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb



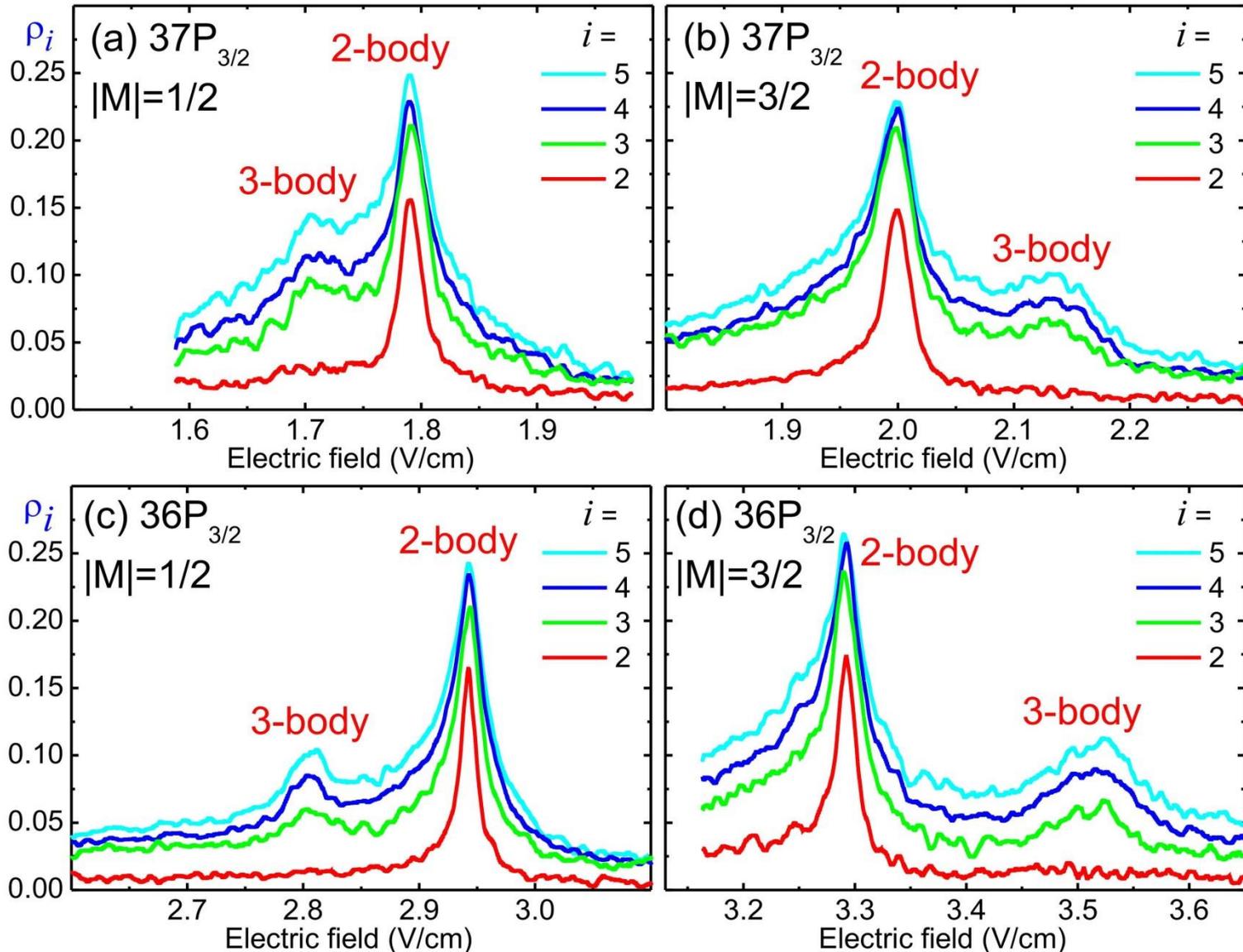
*D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, E.A. Yakshina, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev, P. Cheinet, and P. Pillet, Phys. Rev. Lett. 119, 173402 (2017)*

# Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb



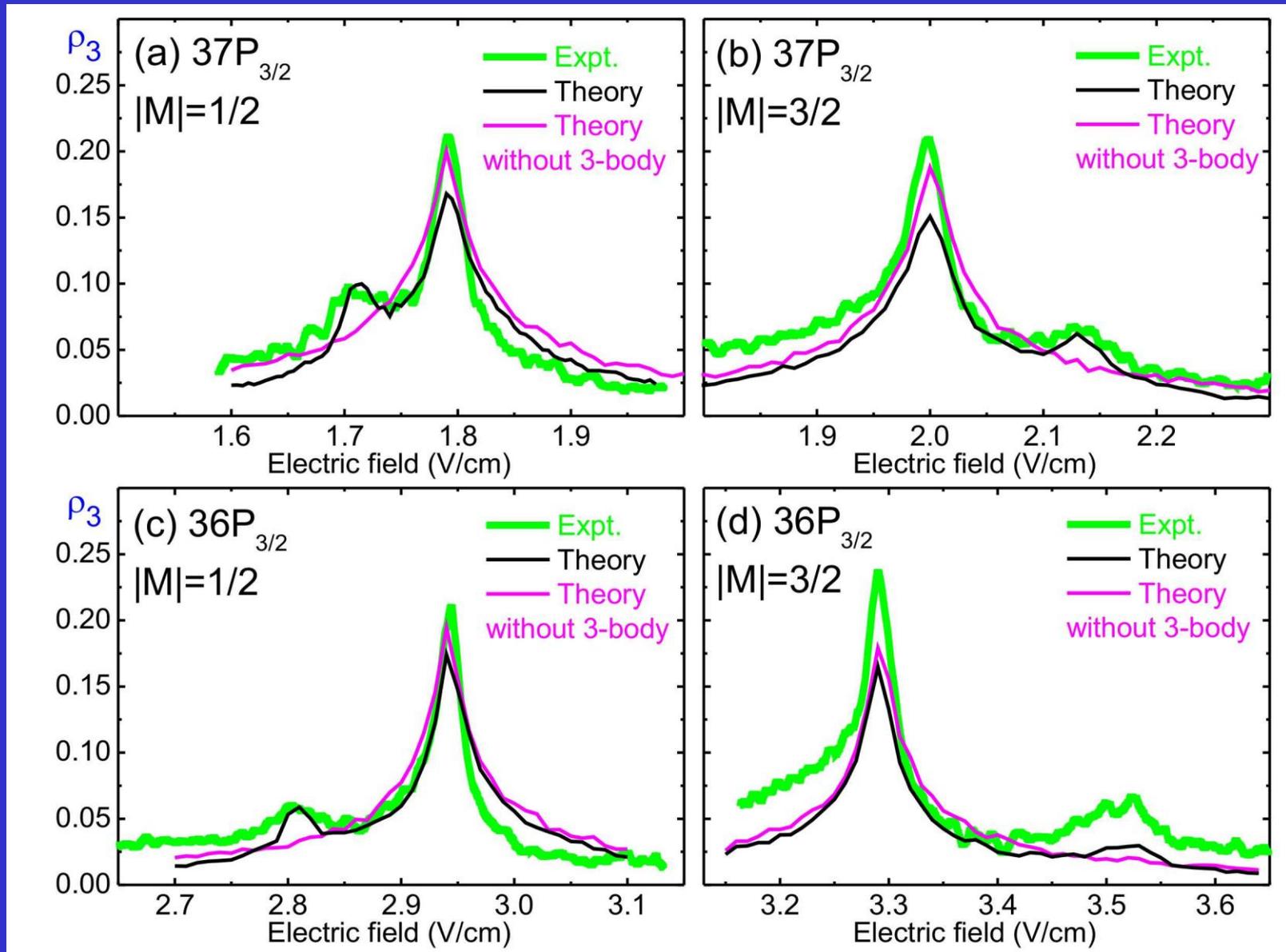
*D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, E.A. Yakshina, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev, P. Cheinet, and P. Pillet, Phys. Rev. Lett. 119, 173402 (2017)*

# Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb



*D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, E.A. Yakshina, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev, P. Cheinet, and P. Pillet, Phys. Rev. Lett. 119, 173402 (2017)*

# Сравнение с теорией для трех неупорядоченных атомов



*D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, E.A. Yakshina, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev, P. Cheinet, and P. Pillet, Phys. Rev. Lett. 119, 173402 (2017)*

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Эксперименты с несколькими ридберговскими атомами Rb в различных начальных состояниях однозначно подтвердили отсутствие трехчастичных резонансов Фёрстера для двух взаимодействующих атомов и их наличие для трех и более атомов
- Это наблюдение хорошо согласуется с теоретическими расчетами
- Трехчастичные резонансы соответствуют переходу, при котором три взаимодействующих атома изменяют свои состояния одновременно
- Поскольку трехчастичные резонансы возникают при значениях электрического поля, отличающихся от значений для двухчастичных, они соответствуют эффективному трехчастичному оператору, который может напрямую управлять взаимодействием трех атомов
- Это может применяться в квантовых симуляторах и квантовых операциях с нейтральными атомами в оптических решетках

*D.B.Tretyakov et al., Phys. Rev. Lett. 119, 173402 (2017)*

*I.I.Ryabtsev et al., J. Phys.: Conf. Series 793, 012024 (2017)*

*I.I.Ryabtsev et al., Physics – Uspekhi 59, 196 (2016)*

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

*R.Faoro et al., Nature Comm. 6, 8173 (2015)*