



Наблюдение трехчастичных резонансов Фёрстера для трех взаимодействующих ридберговских атомов

И.И.Рябцев^{1,2}, Д.Б.Третьяков^{1,2}, И.И.Бетеров^{1,2},
Е.А.Якшина^{1,2}, В.М.Энтин^{1,2}, P.Cheinet³, P.Pillet³

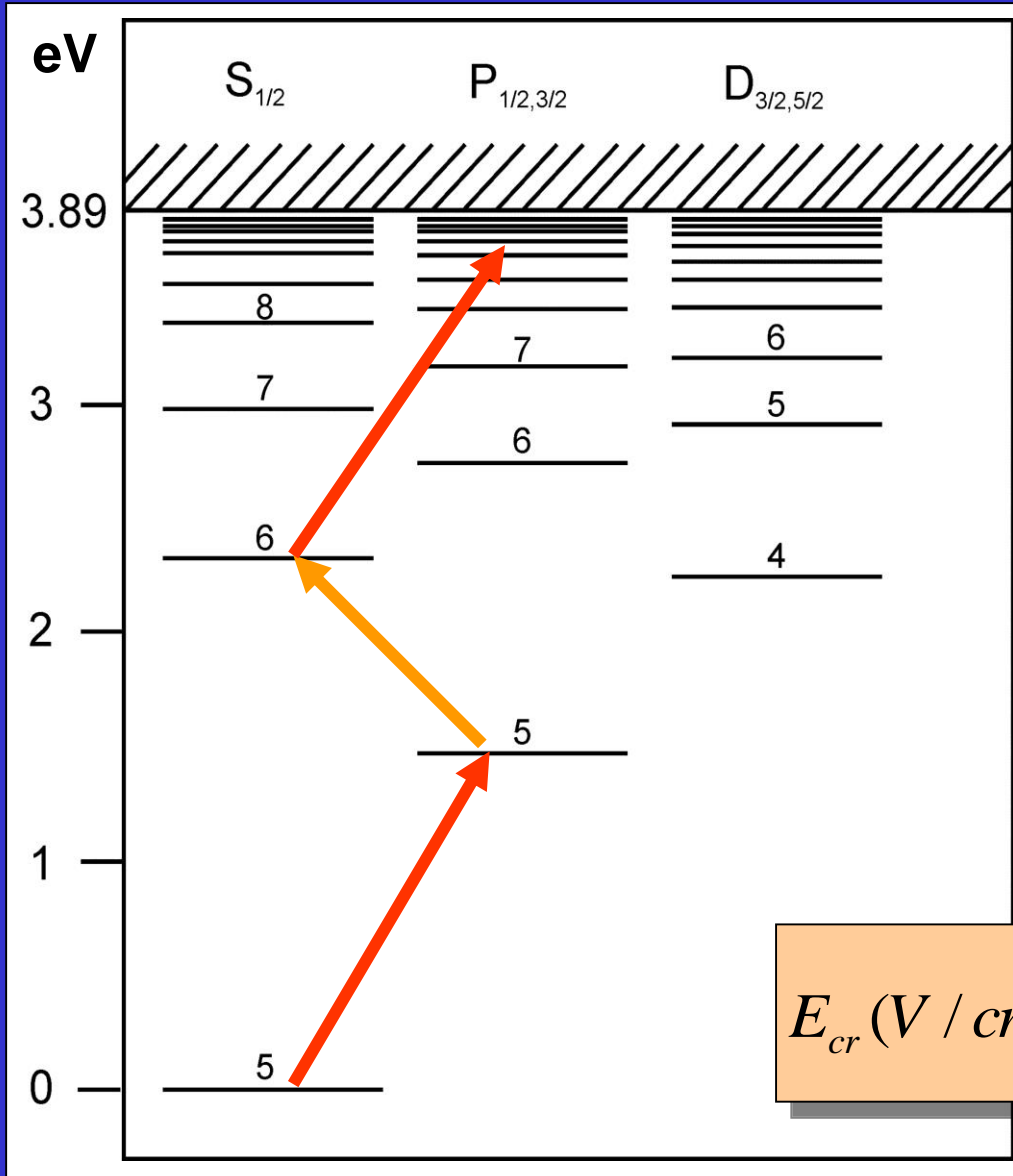
¹*Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Laboratoire Aime Cotton, CNRS, Univ. Paris-Sud, ENS Paris-Saclay, Orsay, France*

Ридберговские атомы

Уровни энергии в атомах Rb



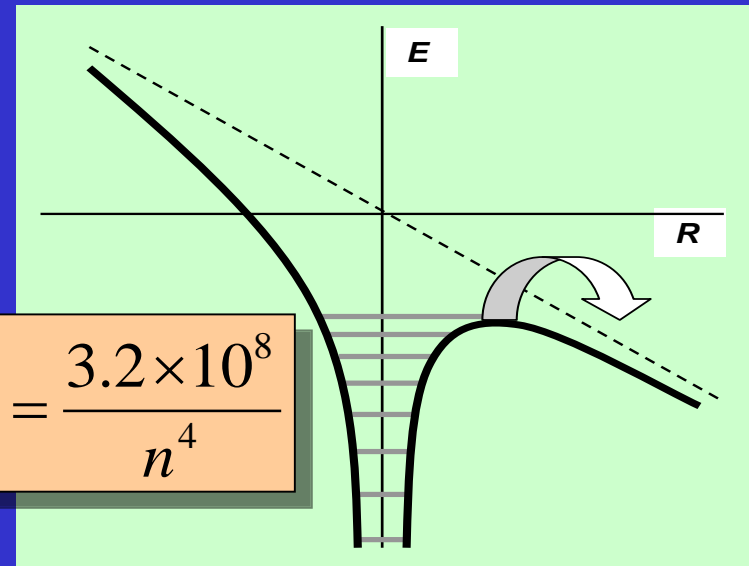
$$E_n = -\frac{Ry}{(n - \delta_L)^2}$$

$$r_n \sim n^2$$

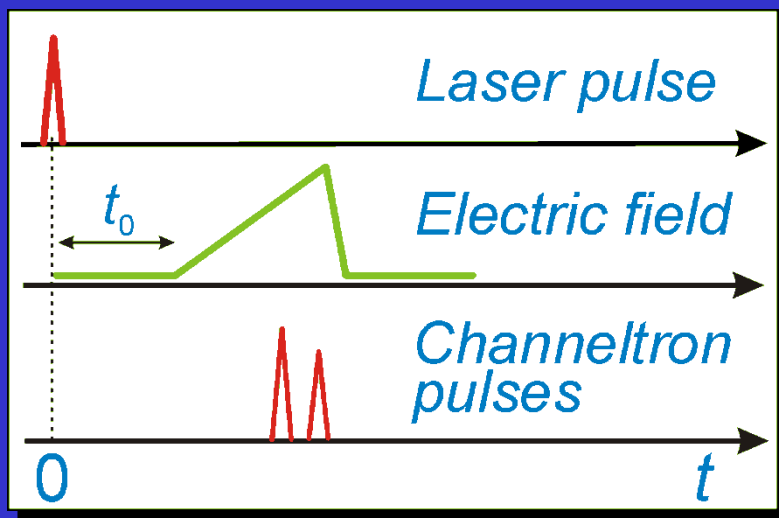
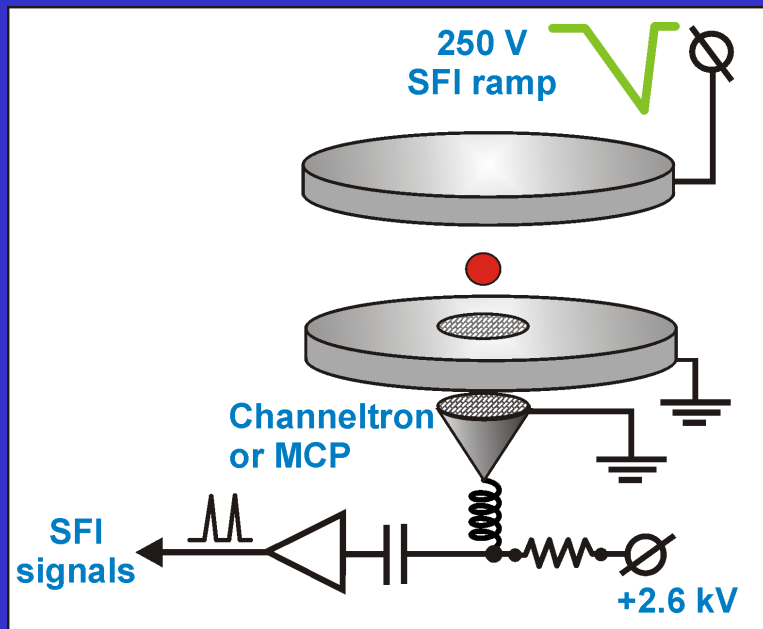
$$\tau_n \sim n^3 - n^5$$

$$\alpha_n \sim n^7$$

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

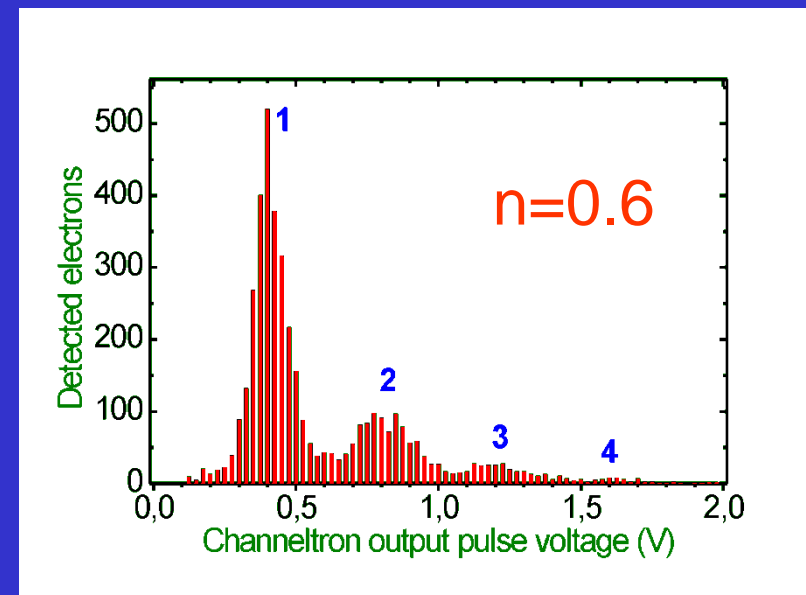
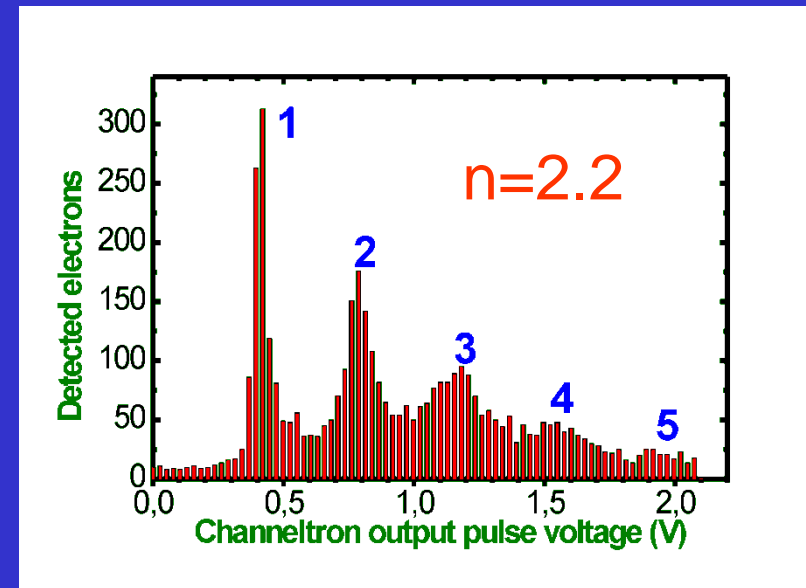


Детектор с селективной полевой ионизацией



Счет атомов с ВЭУ-6

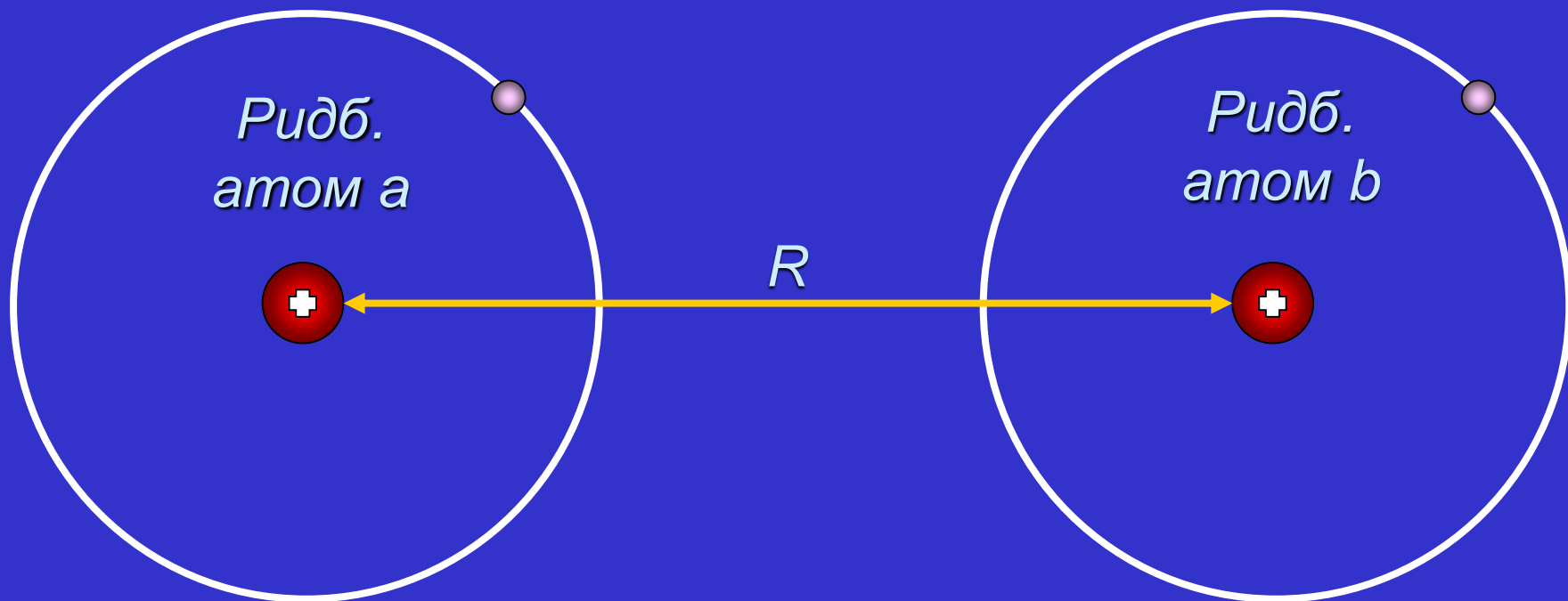
Ryabtsev et al., PRA 76 (2007) 012722



Зачем исследовать холодные ридберговские атомы?

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

Взаимодействие двух ридберговских атомов



Дипольные моменты

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

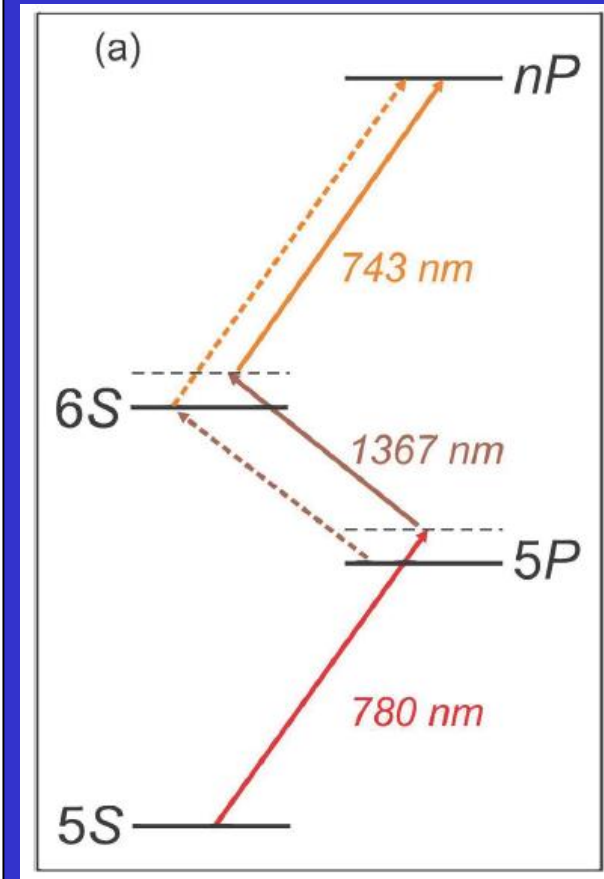
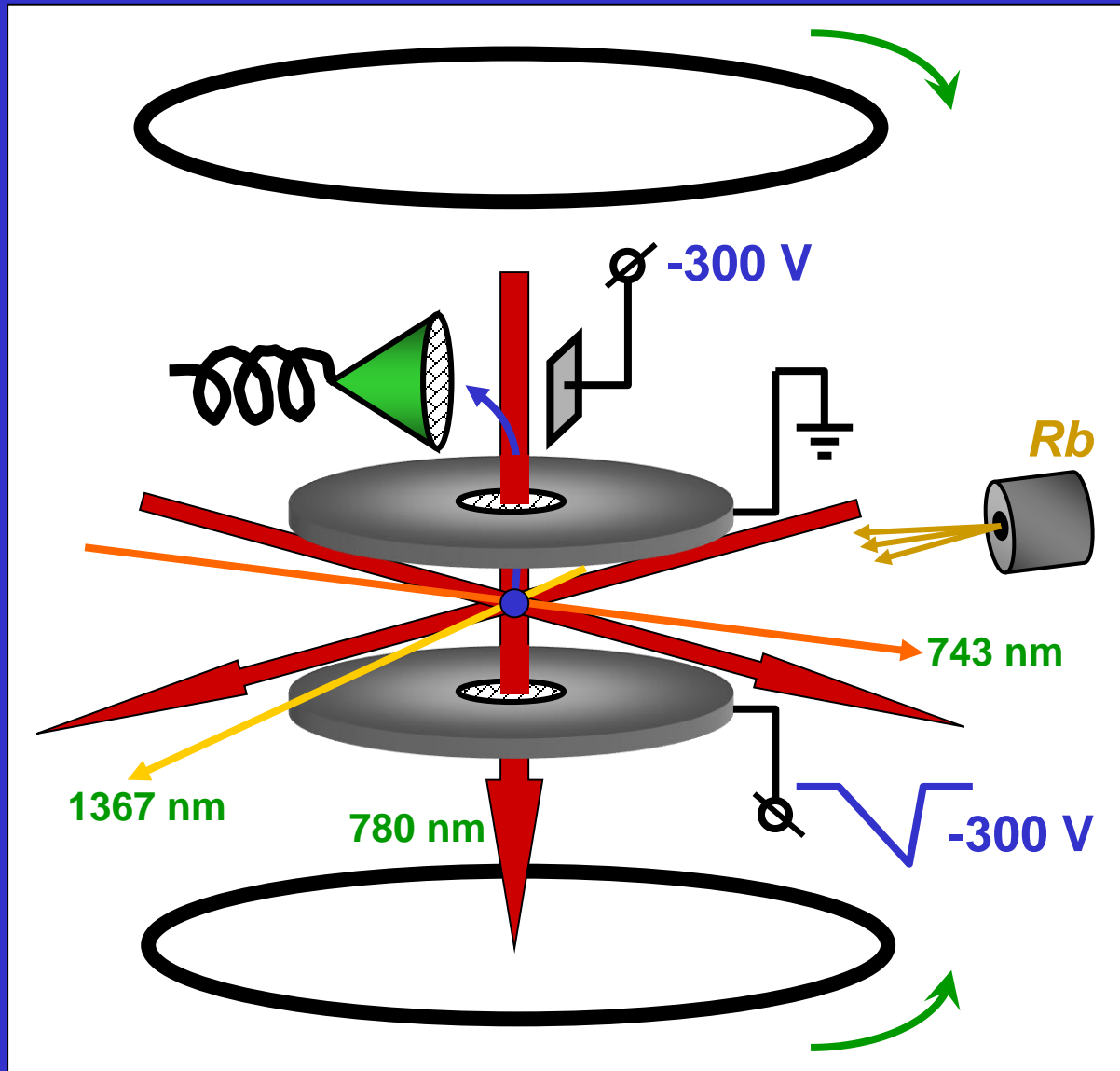
$$d \sim e a_0 n^2$$

Энергия взаимодействия

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

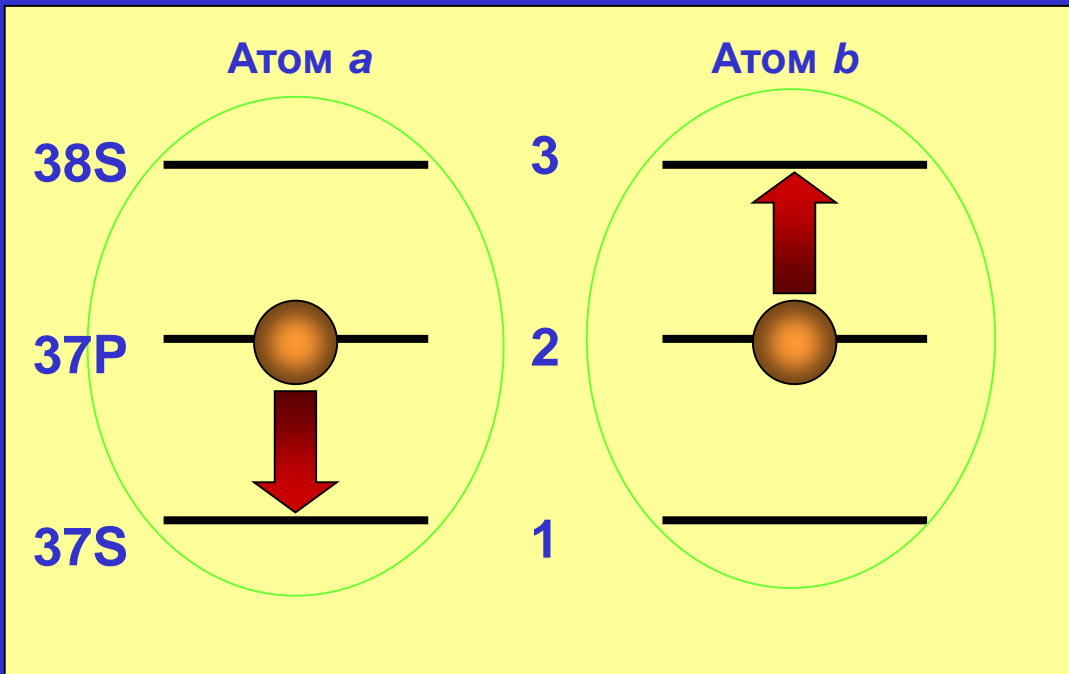
$V \sim 10$ МГц при $n = 50$, $R \approx 5$ мкм

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



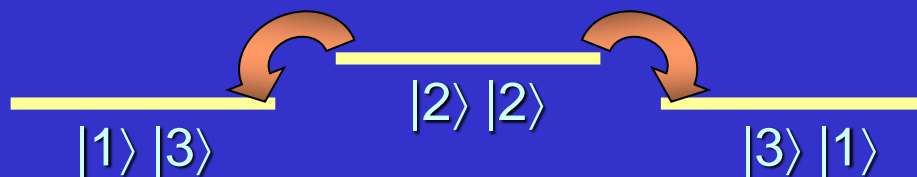
$$\hat{V}_{ab} \sim \frac{\hat{d}_a \hat{d}_b}{R^3}$$

$n = 37, R \approx 10$ 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:

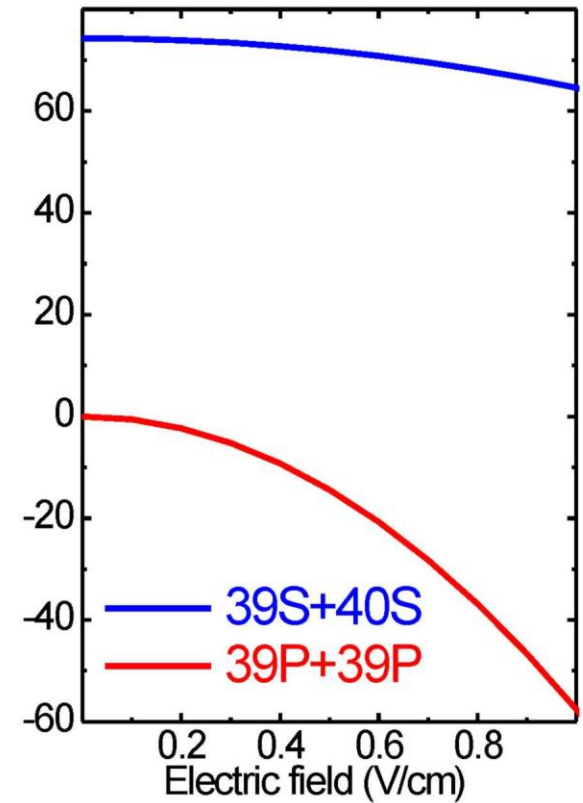
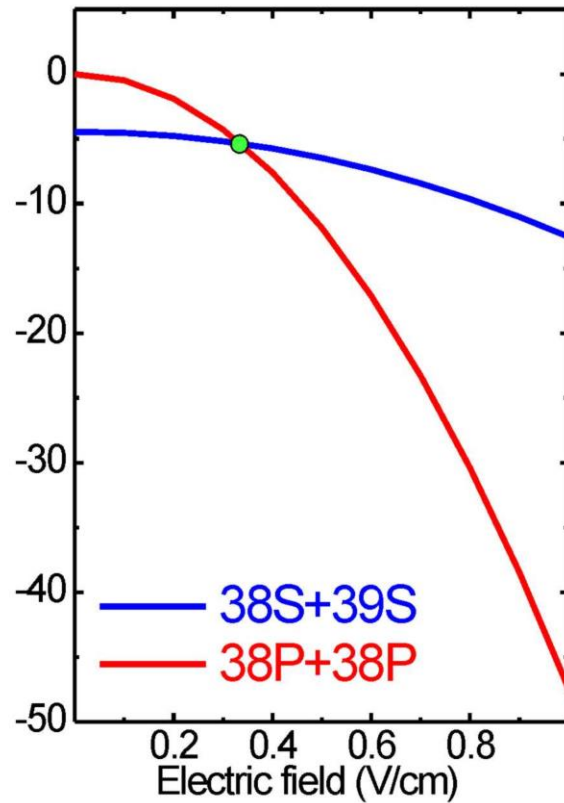
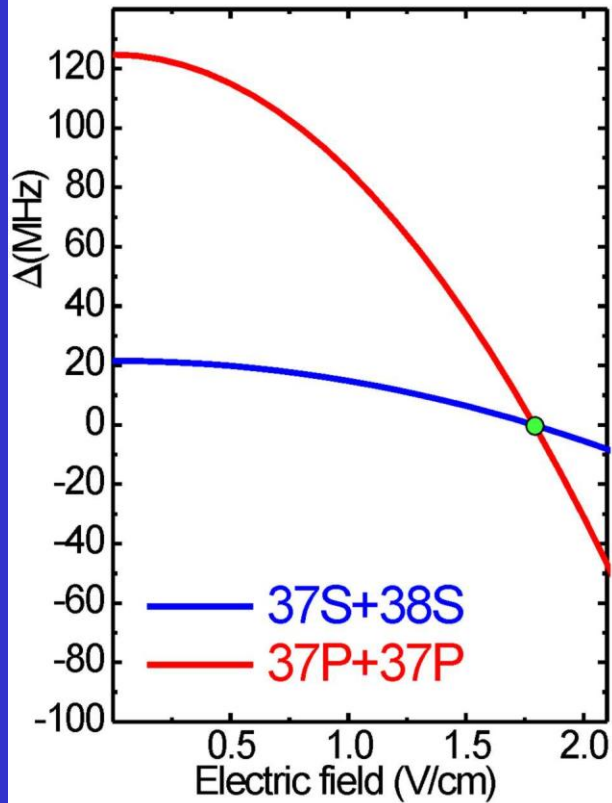


Эволюция населенностей:

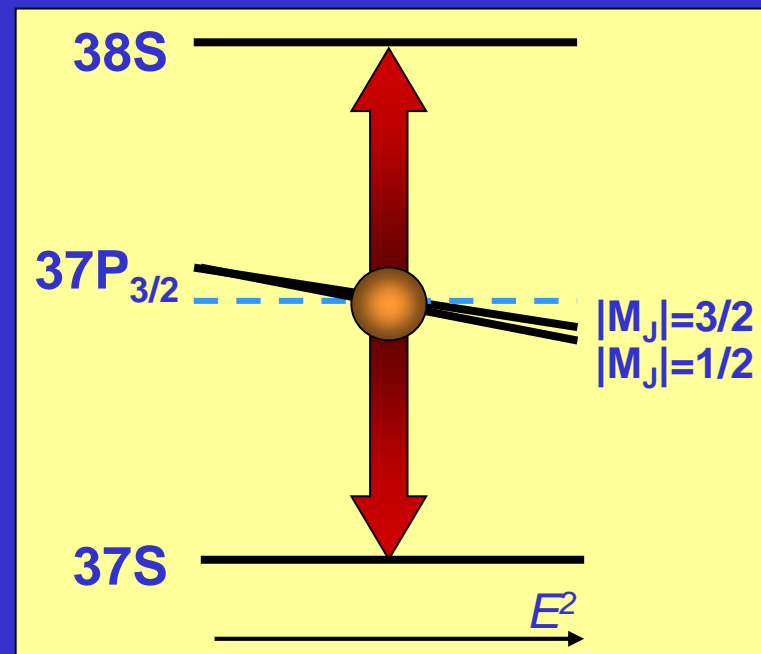
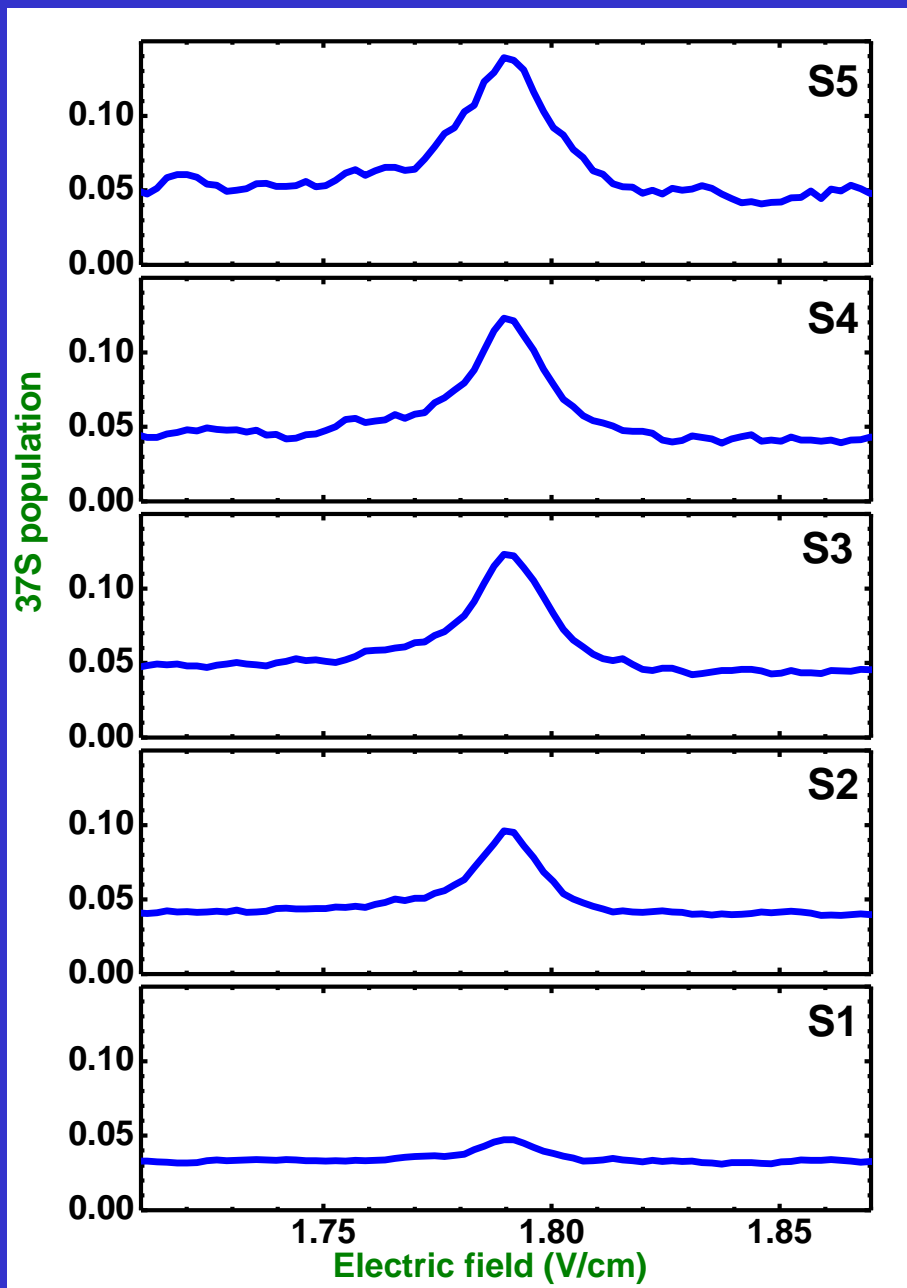
$$\rho_2(t) = \frac{\Omega_{ab}^2}{2\Omega_{ab}^2 + \Delta^2/4} \sin^2\left(t \sqrt{2\Omega_{ab}^2 + \Delta^2/4}\right)$$

Двухчастичные резонансы Фёрстера

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



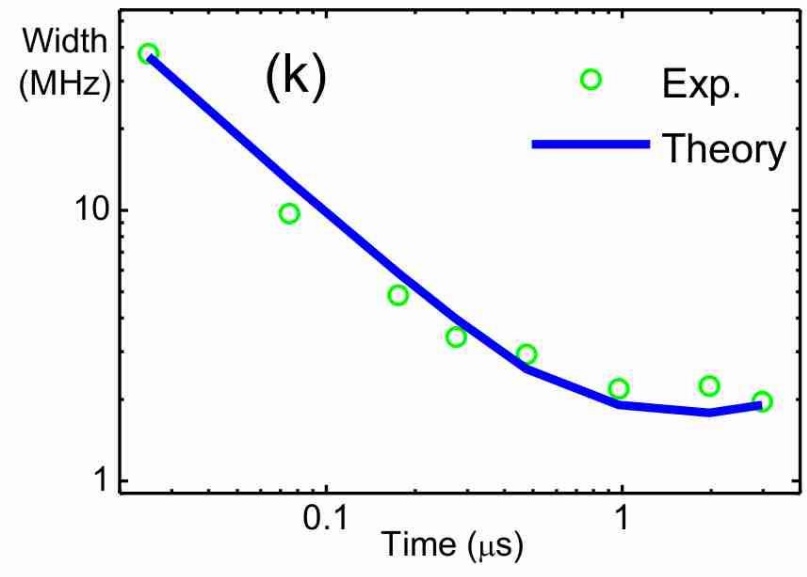
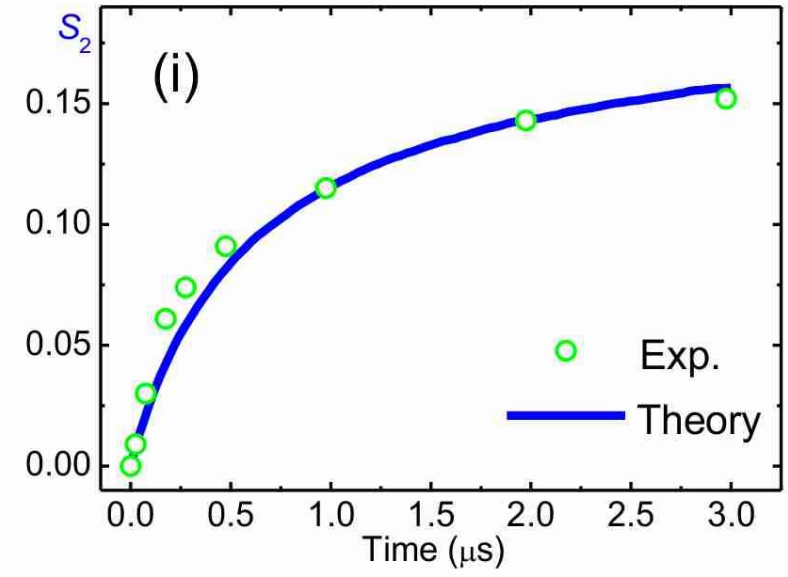
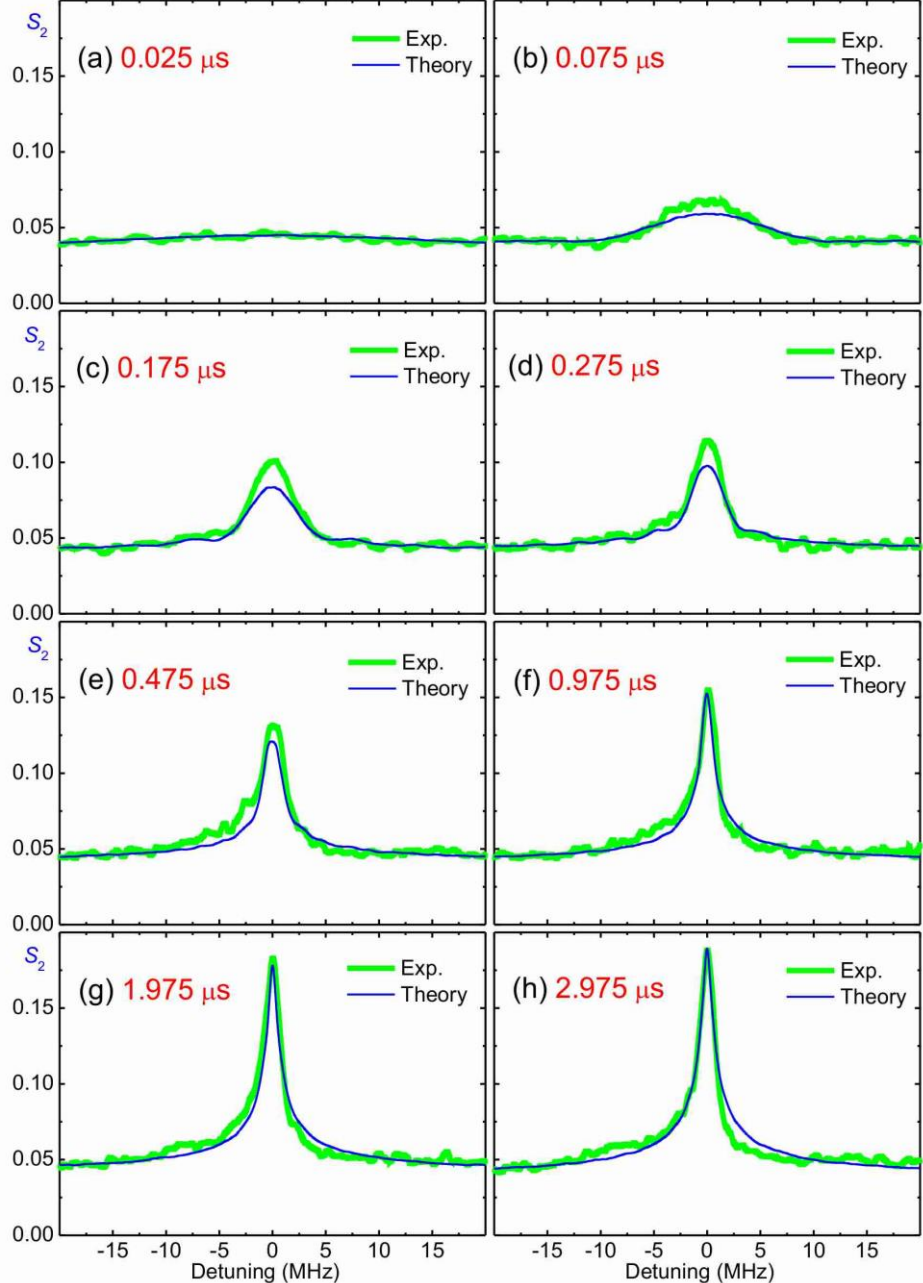
Резонанс Фёрстера $\text{Rb}(37P_{3/2}) + \text{Rb}(37P_{3/2}) \leftrightarrow \text{Rb}(37S_{1/2}) + \text{Rb}(38S_{1/2})$



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

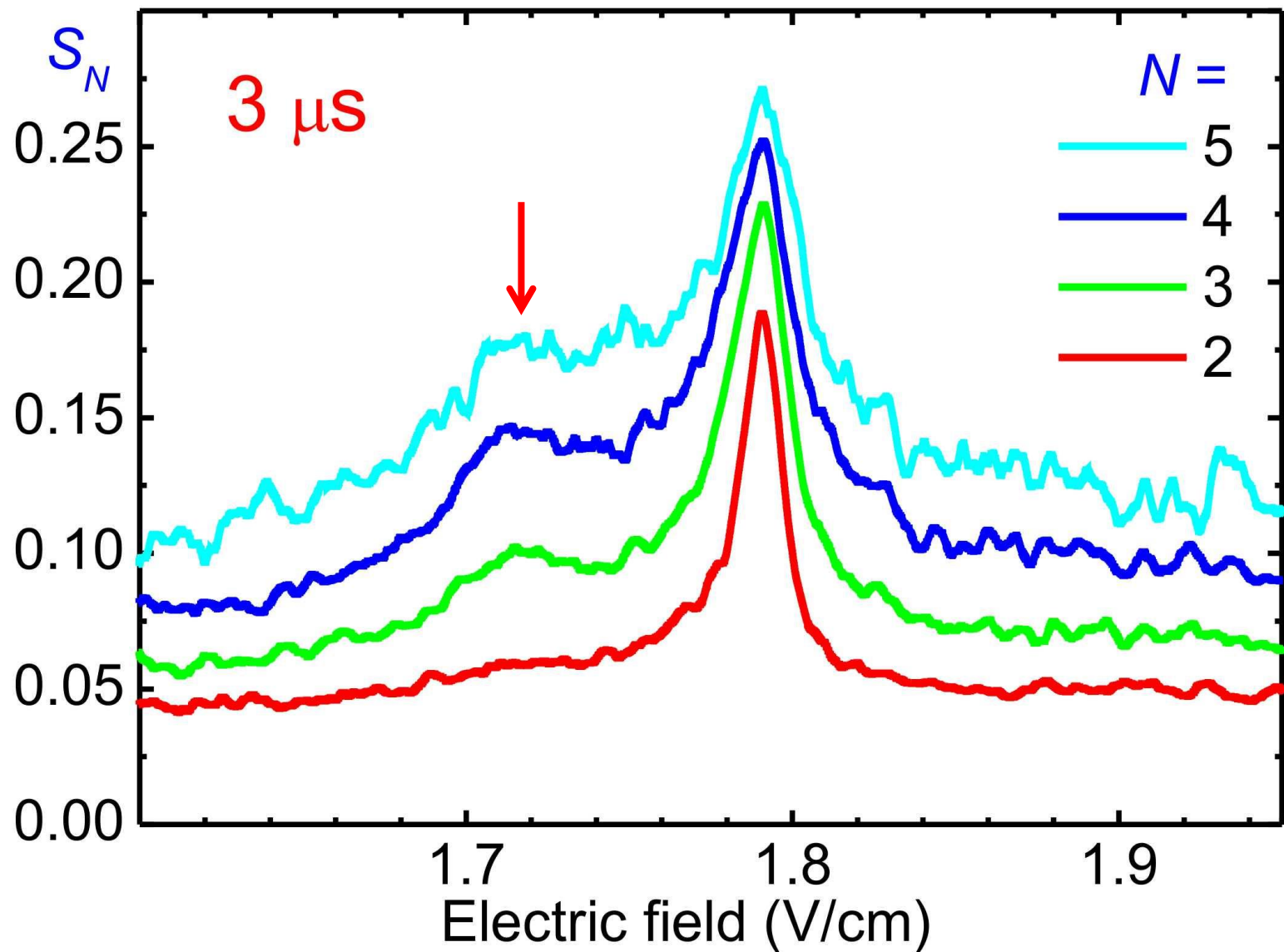
Ryabtsev et al., Phys. Rev. Lett.,
2010, v.104, p.073003

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



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

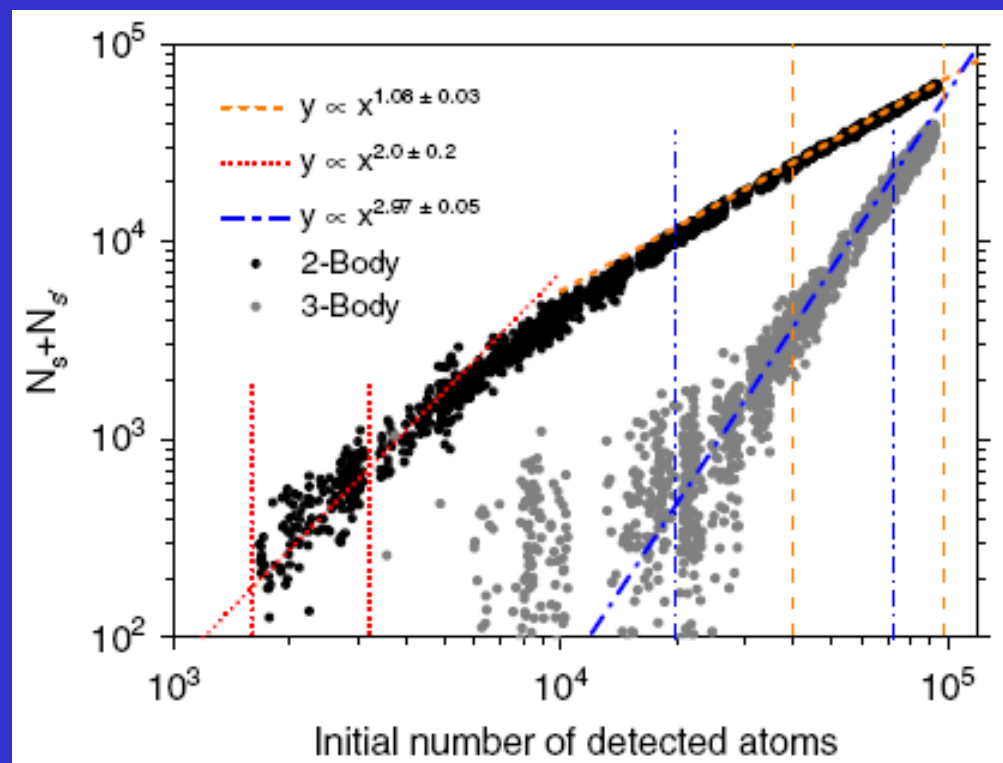
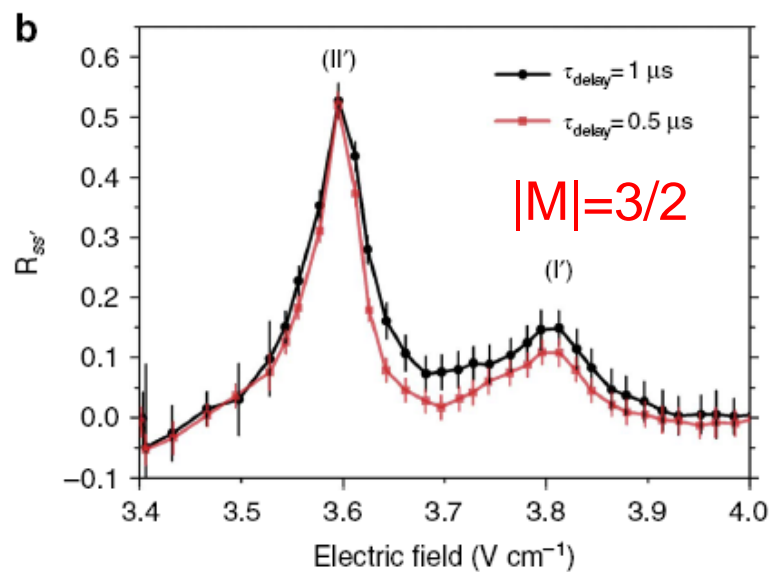
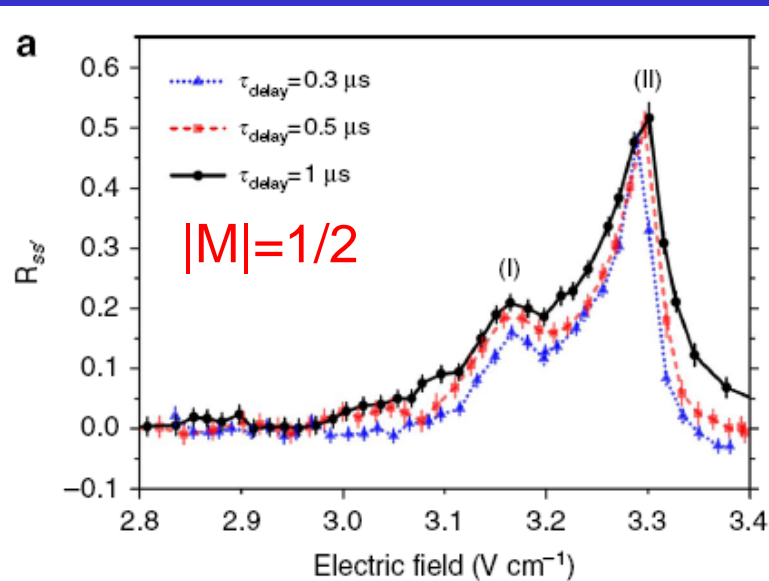
Трехчастичные резонансы Фёрстера ?



Borromean three-body FRET in frozen Rydberg gases

R. Faoro^{1,2}, B. Pelle¹, A. Zuliani¹, P. Cheinet¹, E. Arimondo^{2,3} & P. Pillet¹

~10⁵ атомов Cs(35P_{3/2}) в
объеме размером ~200 мкм

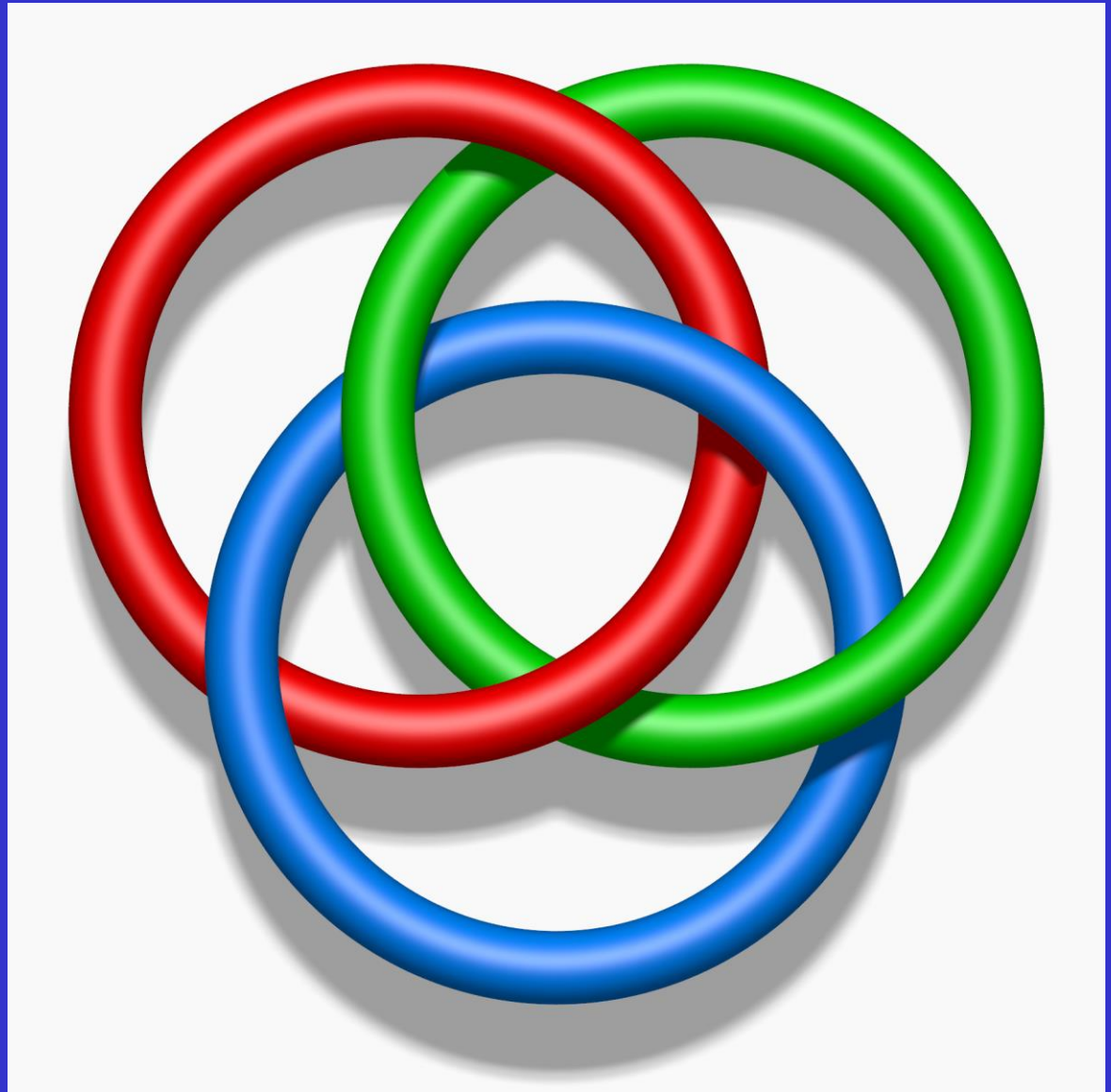


Боромеанское взаимодействие трех ридберговских атомов

Why Borromean?

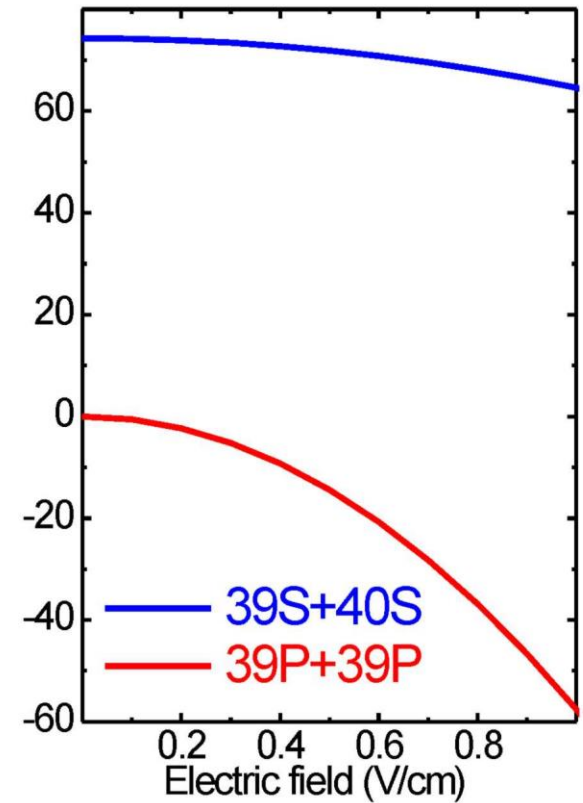
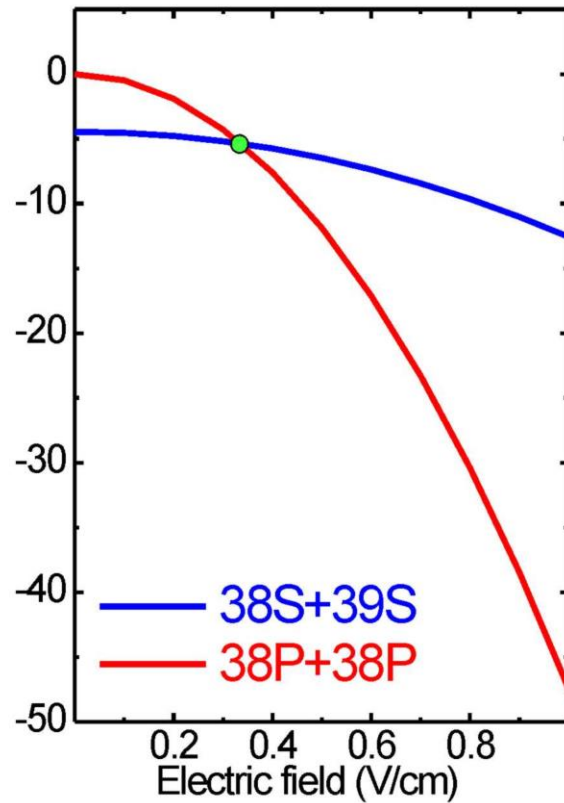
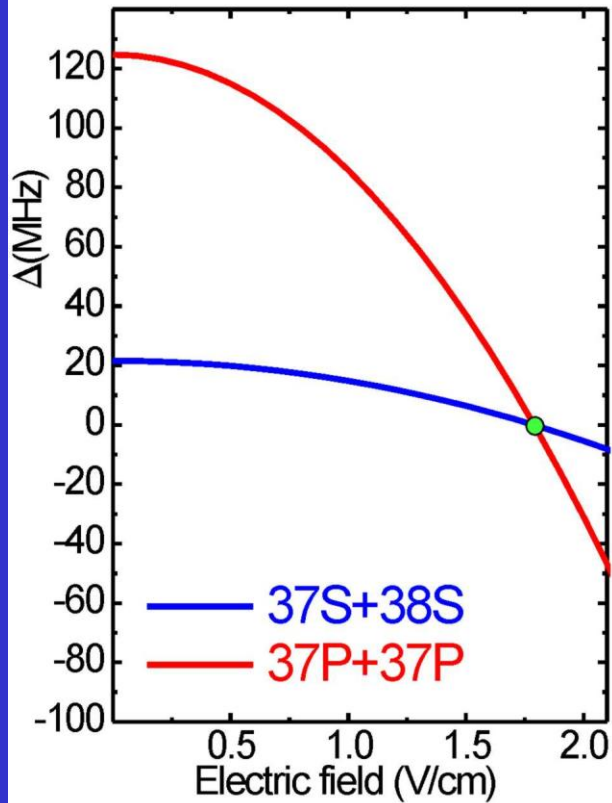
Borromean rings consist of three circles which are linked, but removing any ring results in two unlinked rings.

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

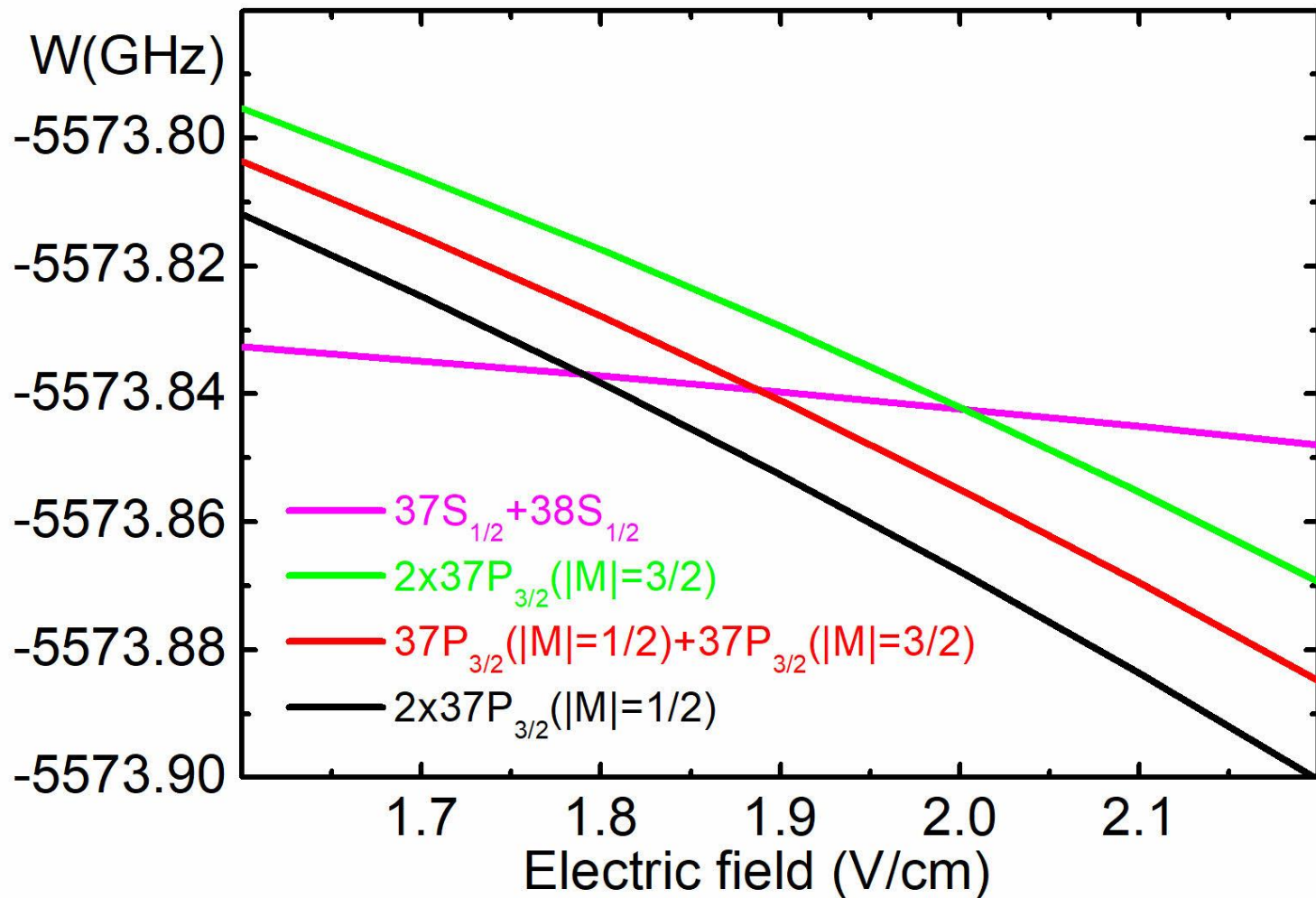


Двухчастичные резонансы Фёрстера

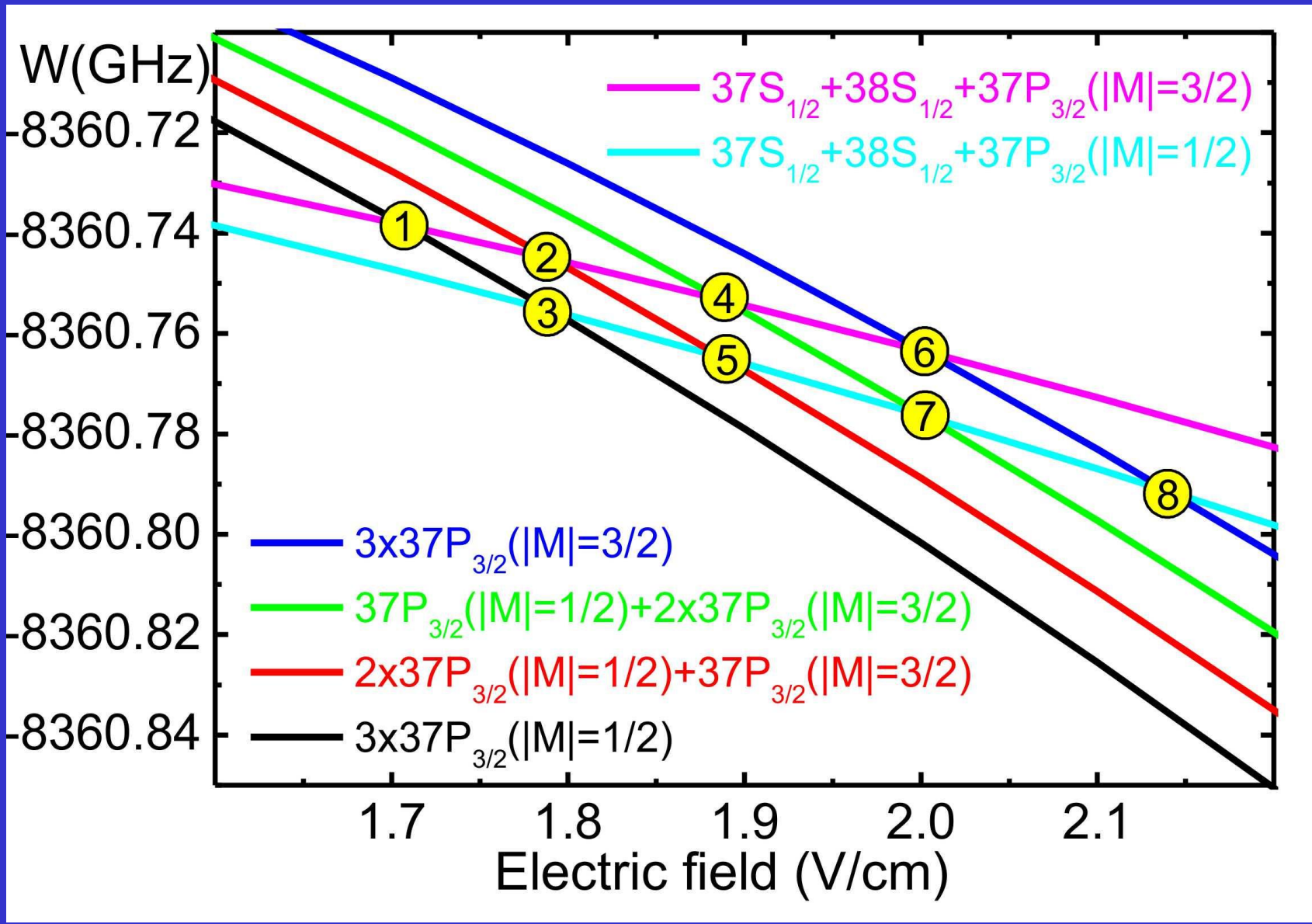
$\text{Rb}(nP_{3/2}) + \text{Rb}(nP_{3/2}) \rightarrow \text{Rb}(nS_{1/2}) + \text{Rb}([n+1]S_{1/2})$



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

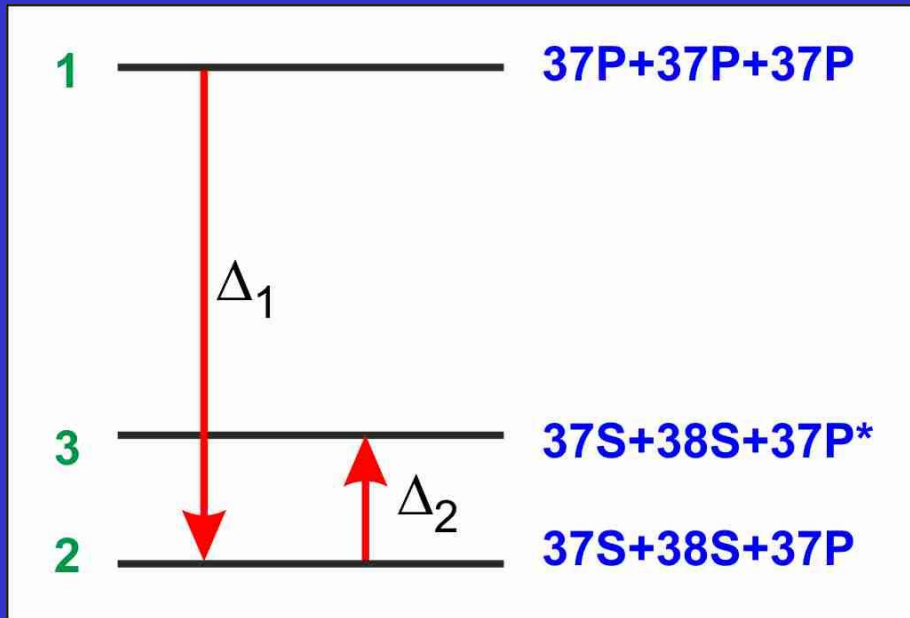


Трехчастичные резонансы Фёрстера для атомов Rb($37P_{3/2}$)



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



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

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

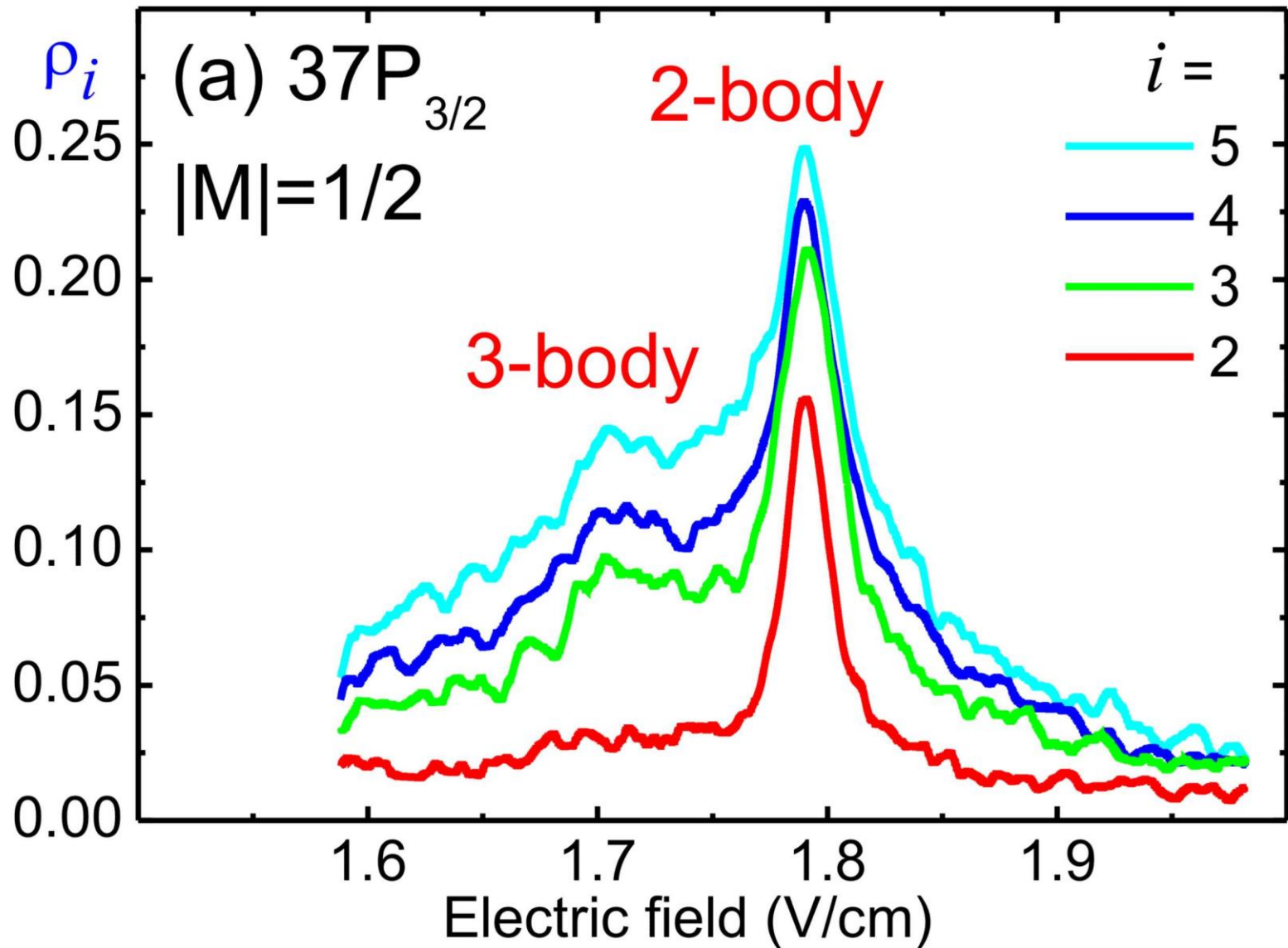
$$i\dot{a}_3 = 2\Omega^* a_2 e^{-i\Delta_2 t}$$

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

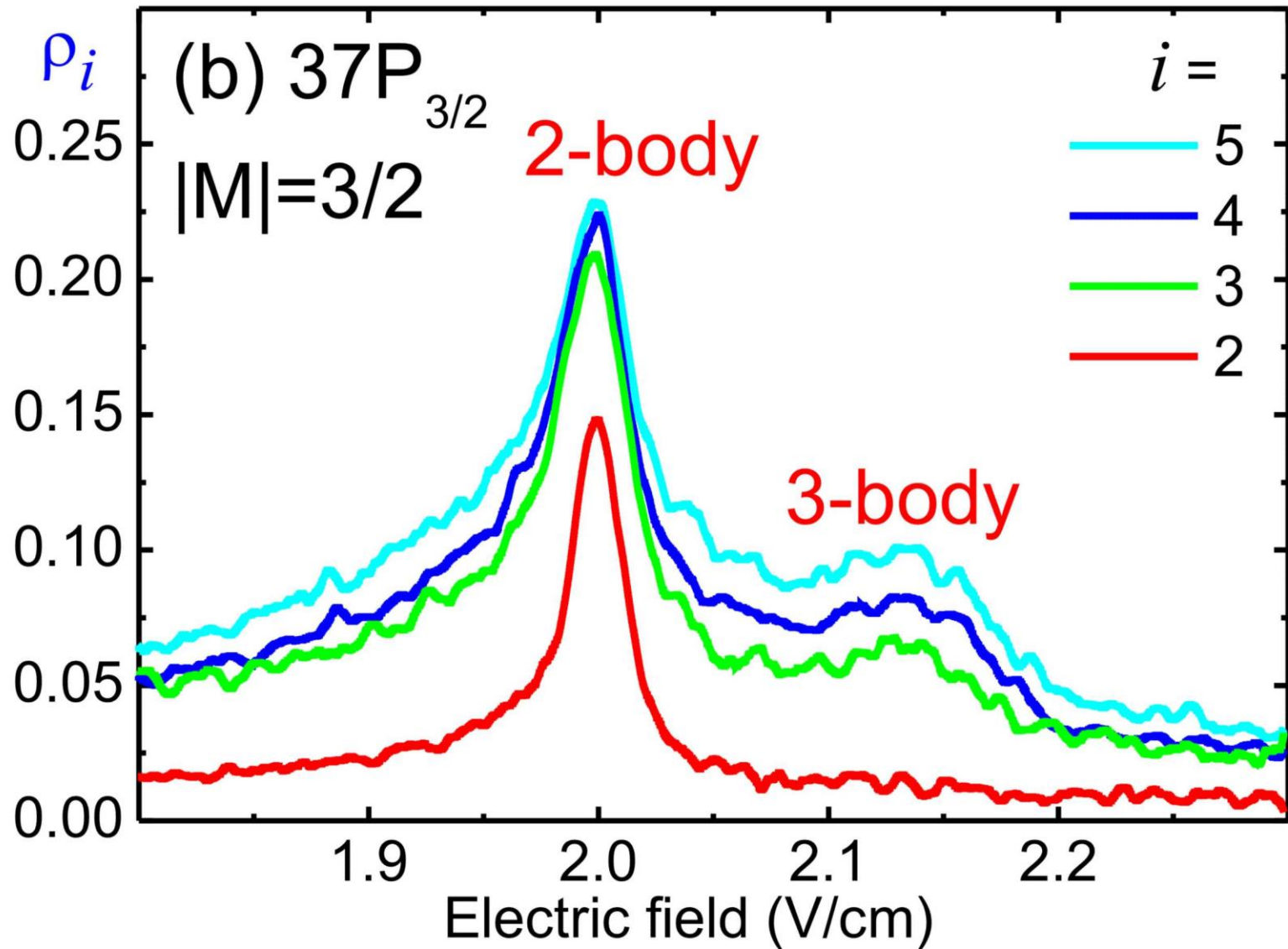
Теория возмущений для слабого взаимодействия: $a_1 \approx 1$, $a_2, a_3 \ll 1$

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

Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb

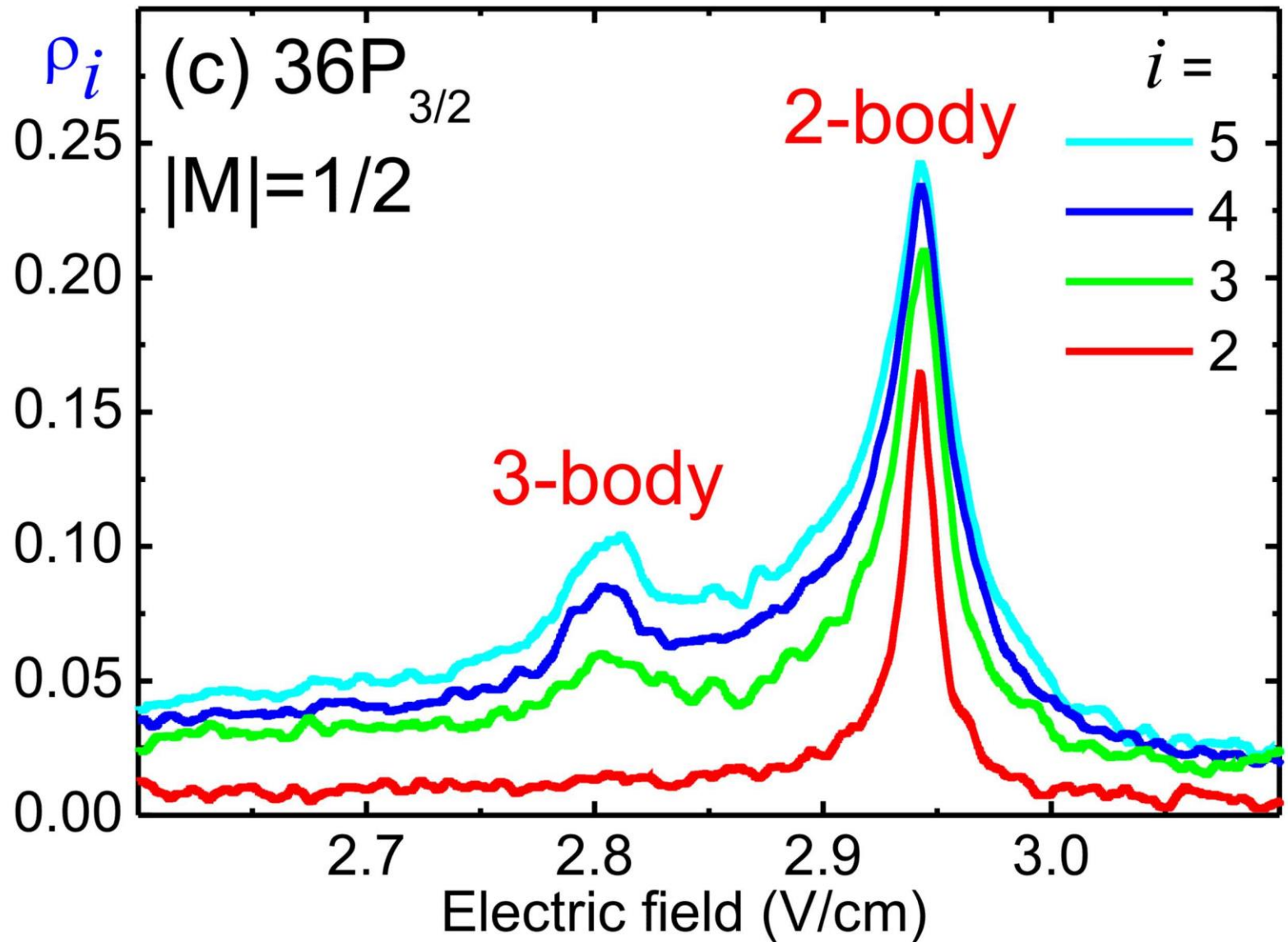


Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb



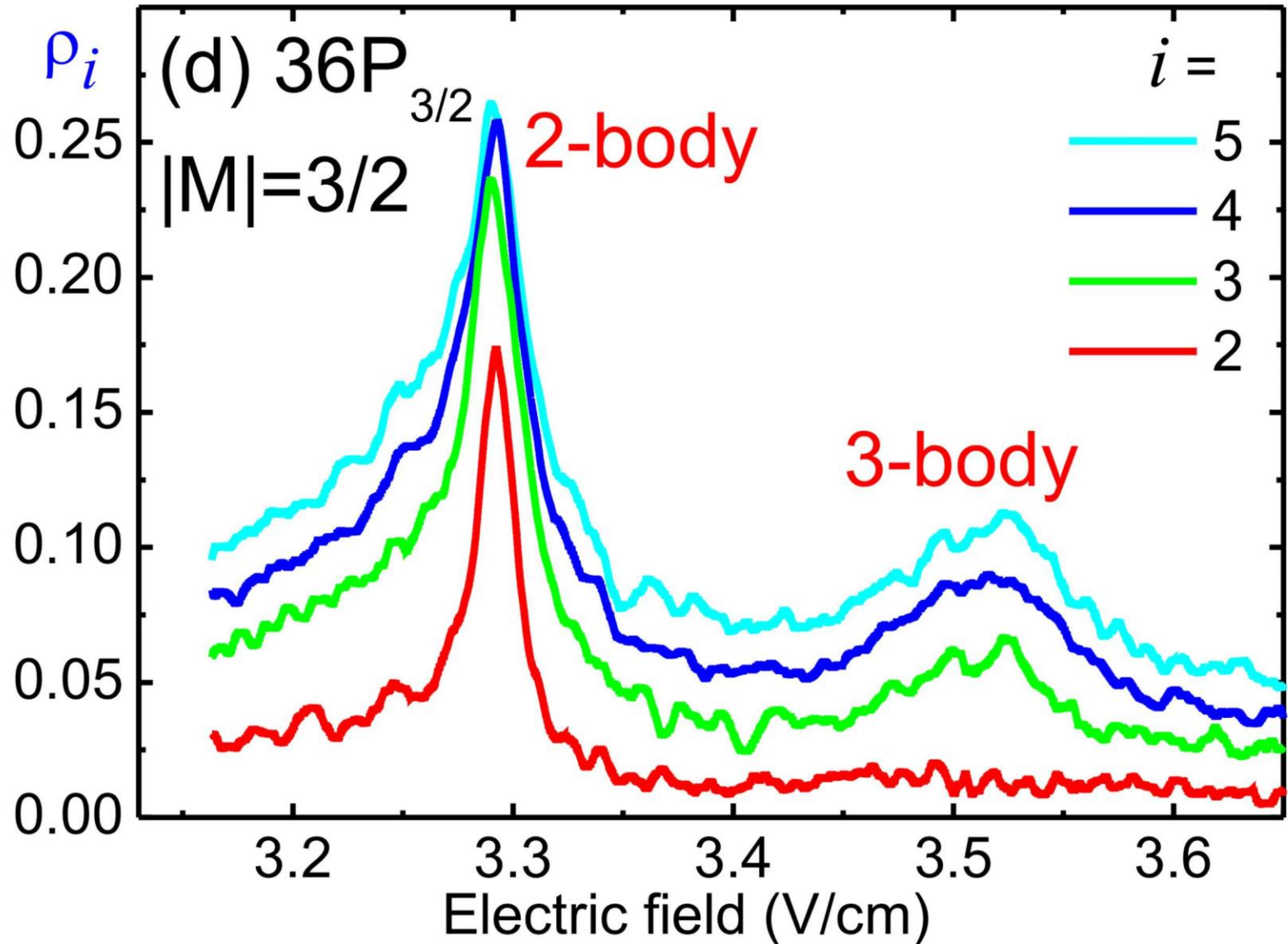
D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, E.A. Yakshina, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev, P. Cheinet, and P. Pillet, Phys. Rev. Lett. 119, 173402 (2017)

Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb



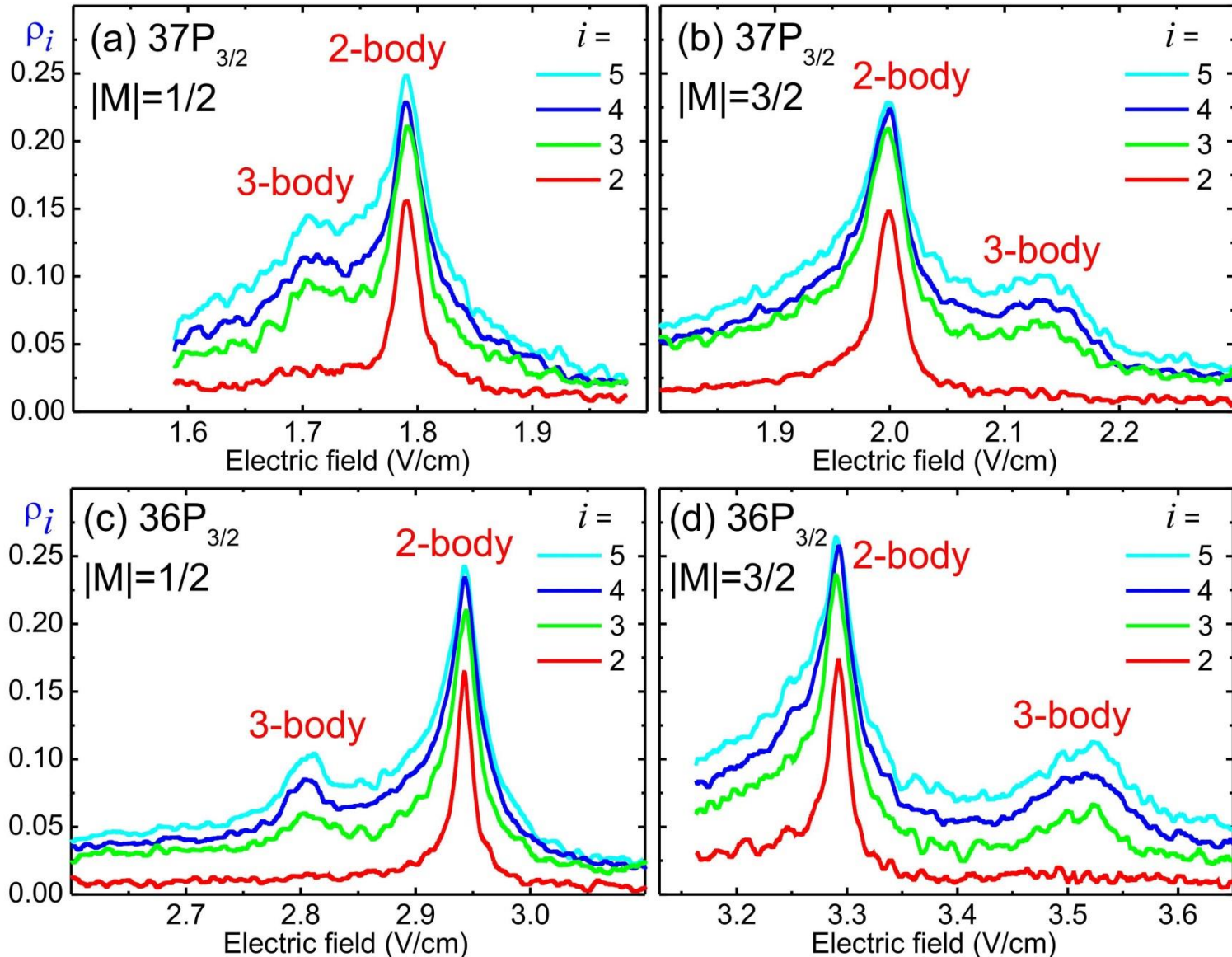
D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, E.A. Yakshina, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev, P. Cheinet, and P. Pillet, Phys. Rev. Lett. 119, 173402 (2017)

Трехчастичный резонанс Фёрстера в атомах Rb



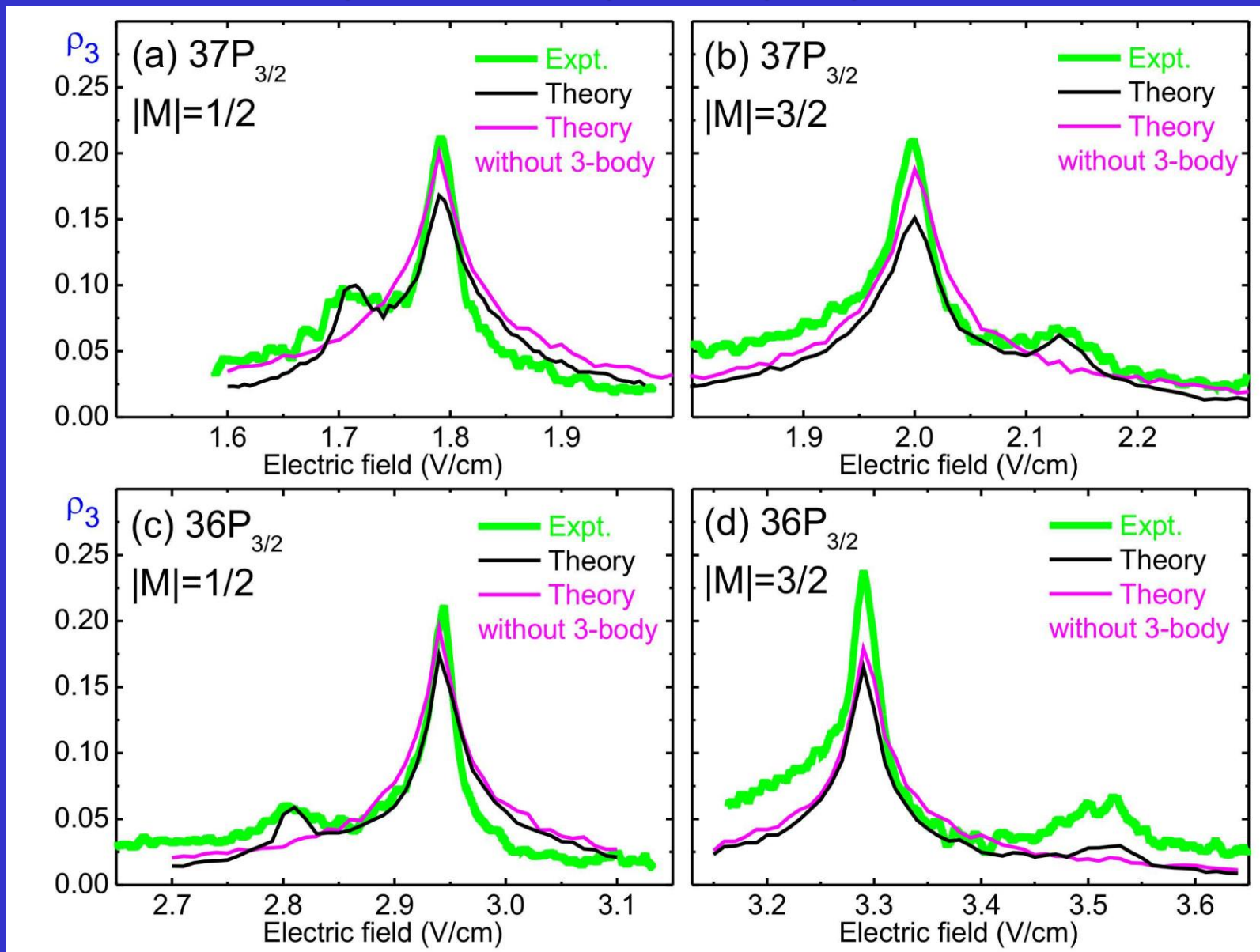
D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, E.A. Yakshina, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev, P. Cheinet, and P. Pillet, Phys. Rev. Lett. 119, 173402 (2017)

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)