

Квантовые операции на основе адиабатического прохождения резонансов Фёрстера

И.И.Бетеров
ИФП СО РАН
НГУ

Пионеры квантовых вычислений

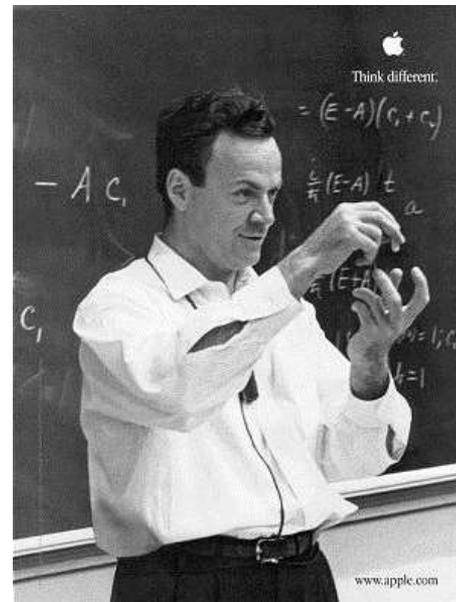
Юрий Манин



“Вычислимое и невычислимое”,
1980

Для моделирования репликации молекулы ДНК нужен квантовый автомат!

Ричард Фейнман



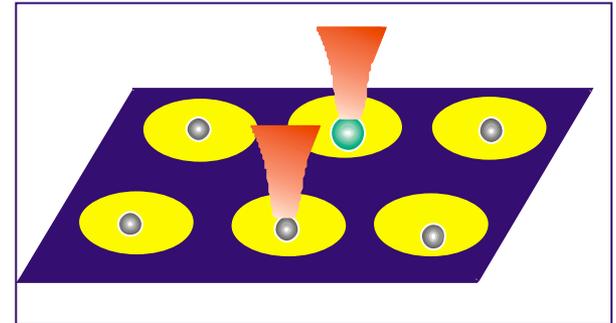
“Моделирование физики на
компьютерах»

“Квантовомеханический компьютер»

Мотивация: квантовый регистр с нейтральными атомами

Возможная реализация квантового регистра:

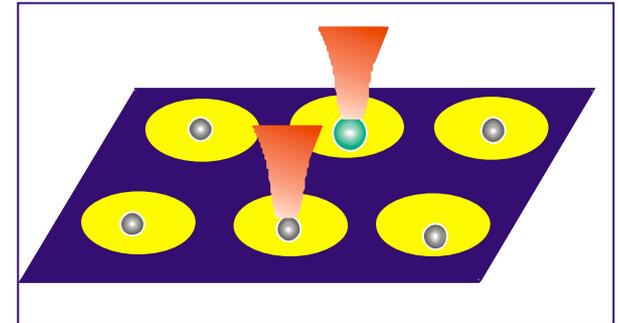
Массив оптических дипольных ловушек с индивидуальной адресацией (Мадисон, Палезо)



Мотивация: квантовый регистр с нейтральными атомами

Возможная реализация квантового регистра:

Массив оптических дипольных ловушек с индивидуальной адресацией (Мадисон, Палезо)



Однокубитовые операции:

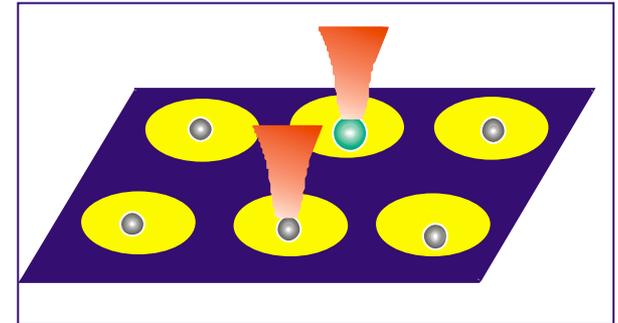
Рамановские импульсы D. Yavuz et al., PRL 96, 063001 (2006)

Микроволновые переходы T. Xia et al. PRL 114, 100503 (2015)

Мотивация: квантовый регистр с нейтральными атомами

Возможная реализация квантового регистра:

Массив оптических дипольных ловушек с индивидуальной адресацией (Мадисон, Палезо)



Однокубитовые операции:

Рамановские импульсы D. Yavuz et al., PRL 96, 063001 (2006)

Микроволновые переходы T. Xia et al. PRL 114, 100503 (2015)

Двухкубитовые операции:

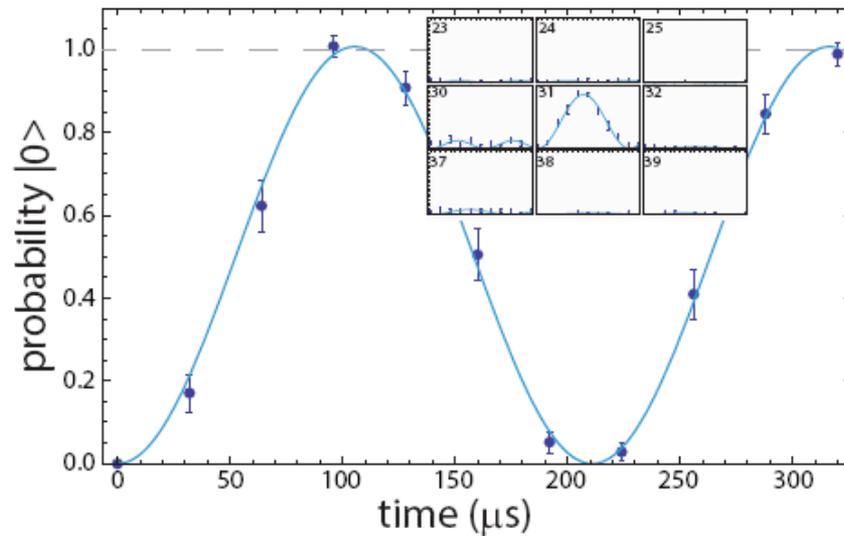
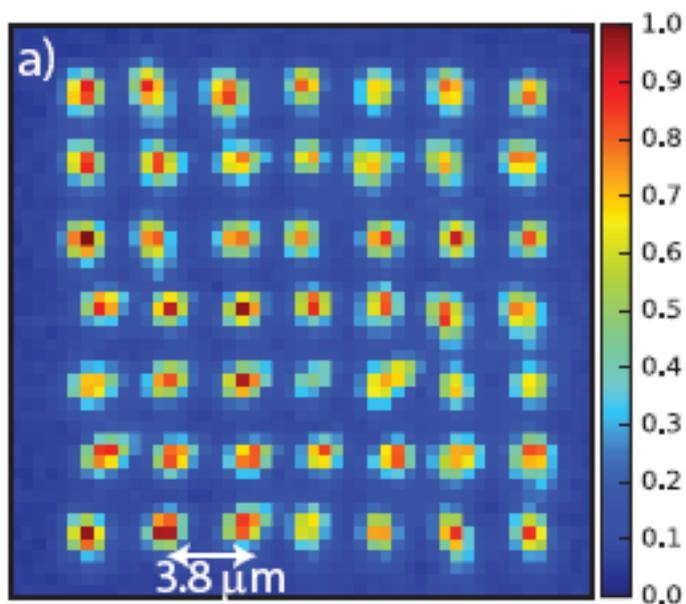
Дипольная блокада L. Isehhower et al., PRL 104, 010503 (2010)

Резонансы Фёрстера (когерентное диполь-дипольное взаимодействие)

I.I. Ryabtsev et al. PRL 104, 073003 (2010), S. Ravets et al., Nature Physics 10, 914 (2014)

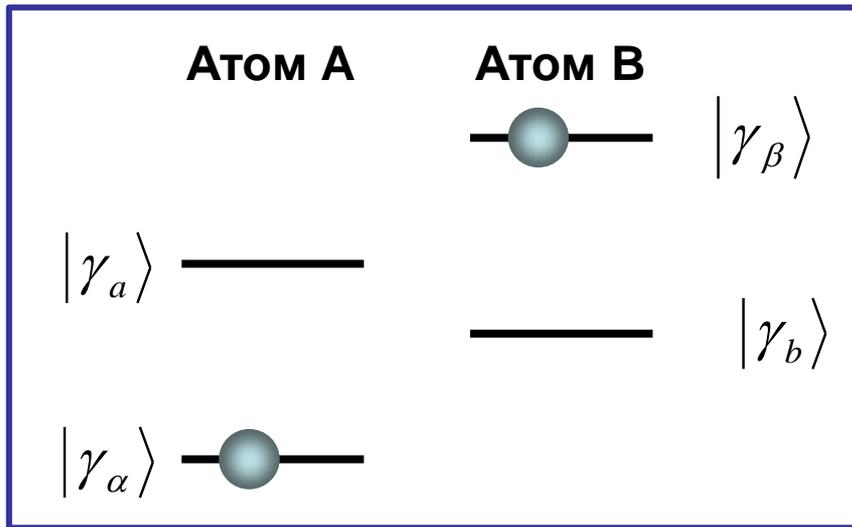
Квантовый регистр

Квантовый регистр – 49 кубитов

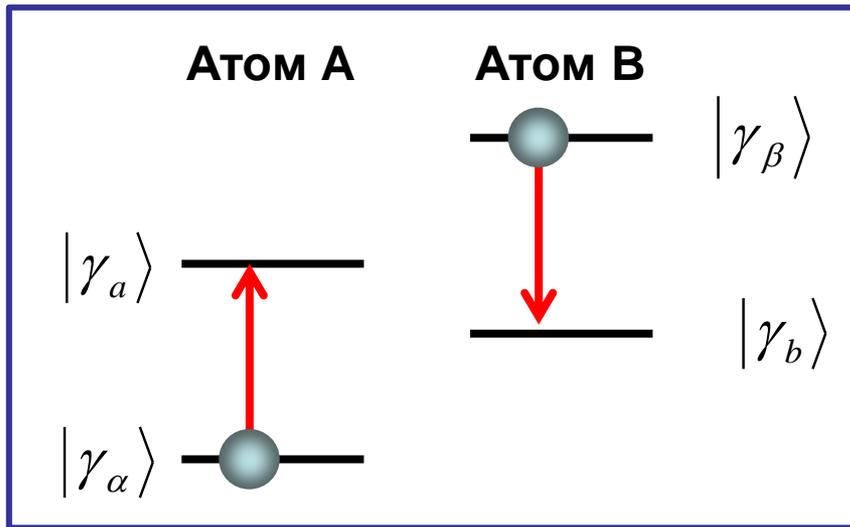


Университет Висконсин-Мадисон, США

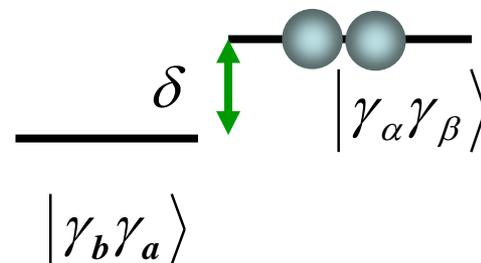
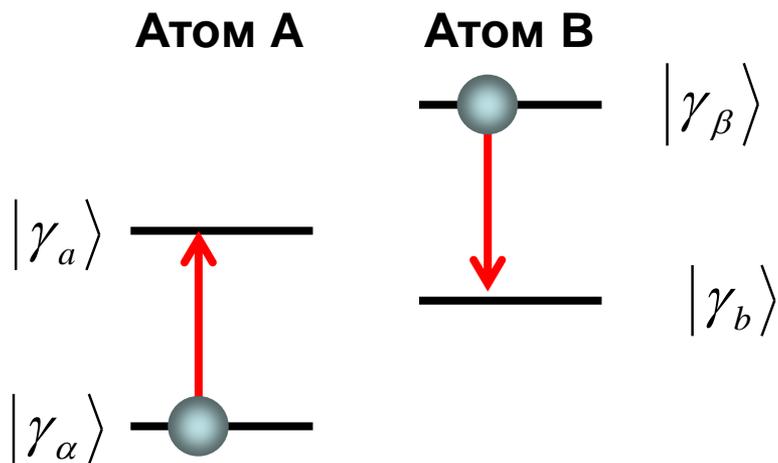
Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах



Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах



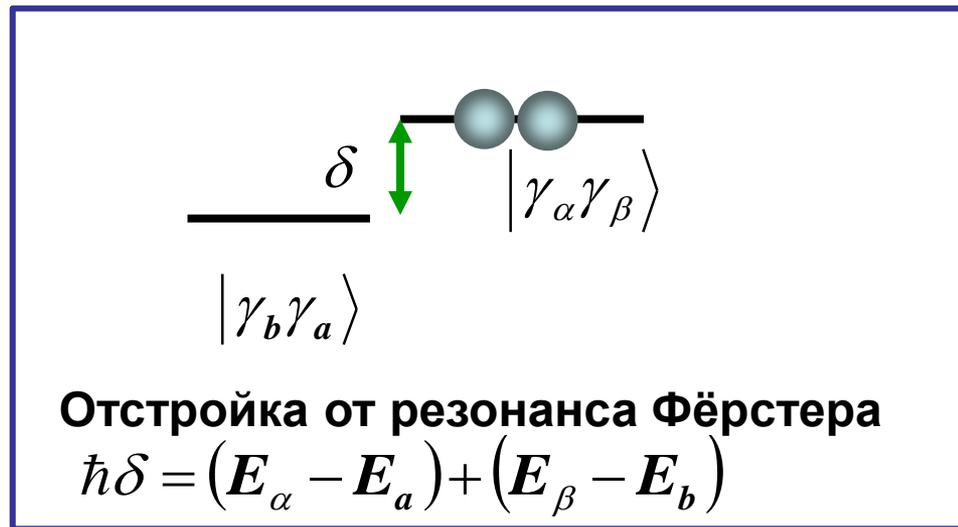
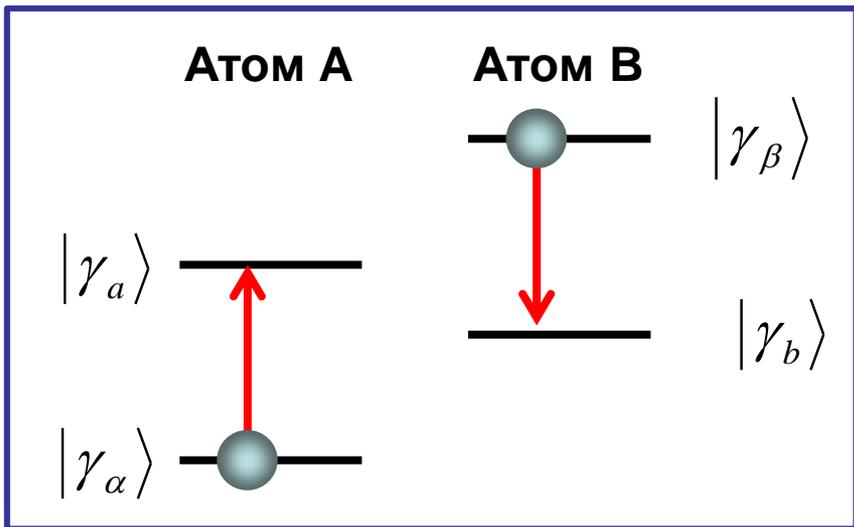
Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах



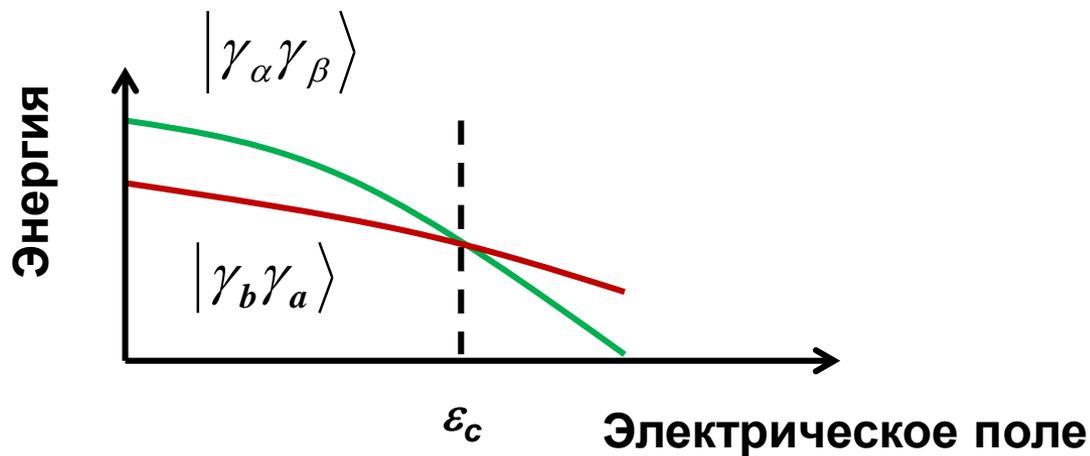
Отстройка от резонанса Фёрстера

$$\hbar\delta = (E_\alpha - E_a) + (E_\beta - E_b)$$

Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах

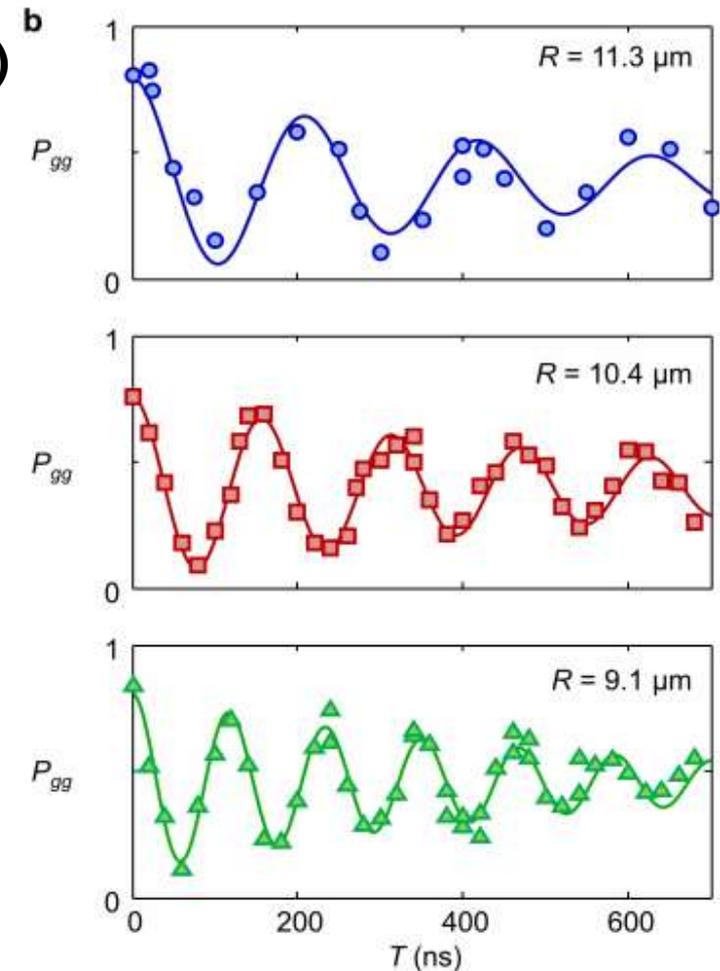
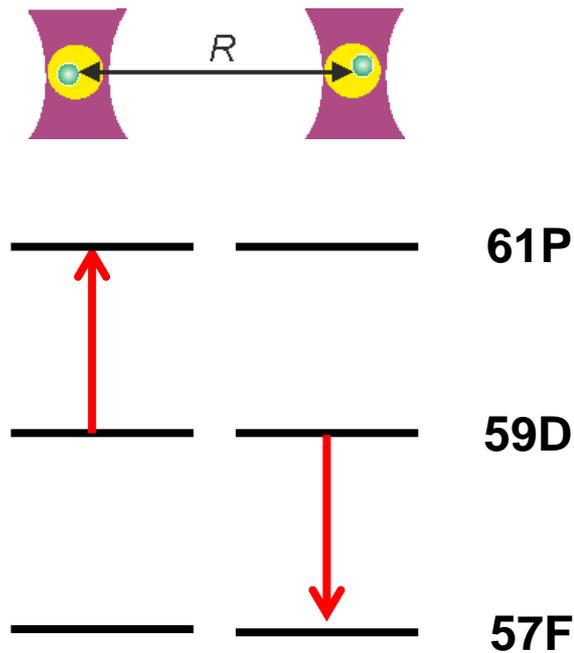


Штарковская подстройка резонанса Фёрстера



Когерентное прохождение резонанса Фёрстера

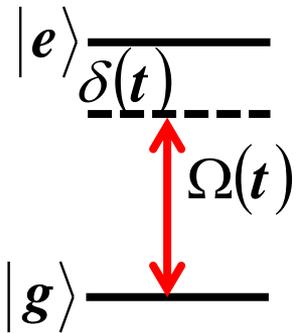
S. Ravets et al., Nature Physics 10, 914 (2014)



Проблема: чувствительность к флуктуациям межатомного расстояния

Решение: адиабатическое прохождение

Адиабатическое прохождение



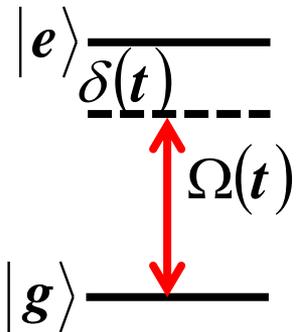
Гамильтониан:

$$\hat{\mathbf{H}}(t) = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_0(t) \\ \Omega_0(t) & 2\delta(t) \end{pmatrix}$$

Уравнение Шрёдингера:

$$i\hbar \dot{\mathbf{c}} = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{c}$$

Адиабатическое прохождение



Гамильтониан:

$$\hat{\mathbf{H}}(t) = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_0(t) \\ \Omega_0(t) & 2\delta(t) \end{pmatrix}$$

Диагонализация:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Угол смешивания: $\tan 2\theta = \Omega_0(t)/\delta(t)$

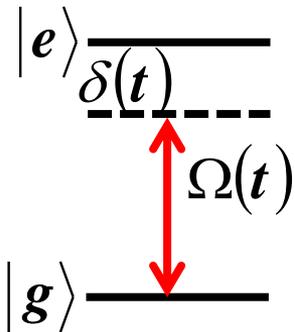
Уравнение Шрёдингера:

$$i\hbar \dot{\mathbf{c}} = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{c}$$

$$\hat{\mathbf{H}}_d(t) = \mathbf{T}\hat{\mathbf{H}}\mathbf{T}^+ = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \Omega_-(t) & 0 \\ 0 & \Omega_+(t) \end{pmatrix}$$

$$\Omega_{\pm}(t) = \delta(t) \pm \sqrt{\Omega_0^2(t) + \delta^2(t)}$$

Адиабатическое прохождение



Гамильтониан:

$$\hat{\mathbf{H}}(t) = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_0(t) \\ \Omega_0(t) & 2\delta(t) \end{pmatrix}$$

Диагонализация:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Угол смешивания: $\tan 2\theta = \Omega_0(t)/\delta(t)$

Состояния, одетые полем: $\tilde{\mathbf{c}} = \mathbf{T}\mathbf{c}$

$$|I\rangle = \cos \theta |1\rangle - \sin \theta |2\rangle \quad |II\rangle = \sin \theta |1\rangle + \cos \theta |2\rangle$$

Уравнение Шрёдингера:

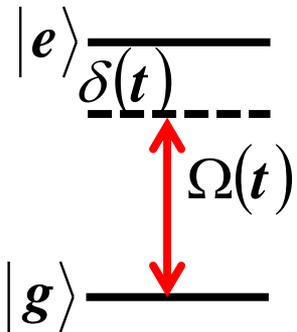
$$i\hbar\dot{\mathbf{c}} = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{c}$$

$$\hat{\mathbf{H}}_d(t) = \mathbf{T}\hat{\mathbf{H}}\mathbf{T}^+ = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \Omega_-(t) & 0 \\ 0 & \Omega_+(t) \end{pmatrix}$$

$$\Omega_{\pm}(t) = \delta(t) \pm \sqrt{\Omega_0^2(t) + \delta^2(t)}$$

$$i\hbar\dot{\tilde{\mathbf{c}}} = \mathbf{T}\hat{\mathbf{H}}\mathbf{T}^+\tilde{\mathbf{c}} - i\hbar\mathbf{T}\dot{\mathbf{T}}^+\tilde{\mathbf{c}}$$

Адиабатическое прохождение



Гамильтониан:

$$\hat{\mathbf{H}}(t) = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_0(t) \\ \Omega_0(t) & 2\delta(t) \end{pmatrix}$$

Уравнение Шрёдингера:

$$i\hbar\dot{\mathbf{c}} = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{c}$$

Диагонализация:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$\hat{\mathbf{H}}_d(t) = \mathbf{T}\hat{\mathbf{H}}\mathbf{T}^+ = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \Omega_-(t) & 0 \\ 0 & \Omega_+(t) \end{pmatrix}$$

Угол смешивания: $\tan 2\theta = \Omega_0(t)/\delta(t)$

$$\Omega_{\pm}(t) = \delta(t) \pm \sqrt{\Omega_0^2(t) + \delta^2(t)}$$

Состояния, одетые полем: $\tilde{\mathbf{c}} = \mathbf{T}\mathbf{c}$

$$|I\rangle = \cos \theta |1\rangle - \sin \theta |2\rangle \quad |II\rangle = \sin \theta |1\rangle + \cos \theta |2\rangle$$

$$i\hbar\dot{\tilde{\mathbf{c}}} = \mathbf{T}\hat{\mathbf{H}}\mathbf{T}^+\tilde{\mathbf{c}} - i\hbar\mathbf{T}\dot{\mathbf{T}}^+\tilde{\mathbf{c}}$$

Адиабатическое приближение: $i\hbar\dot{\tilde{\mathbf{c}}} = \hat{\mathbf{H}}_d\tilde{\mathbf{c}}$

$$\tilde{c}_1(t) = \tilde{c}_1(0) \exp\left[-\frac{i}{2} \int_0^t \Omega_-(t) dt\right]$$

$$\tilde{c}_2(t) = \tilde{c}_2(0) \exp\left[-\frac{i}{2} \int_0^t \Omega_+(t) dt\right]$$

Двойное адиабатическое прохождение

Угол смешивания:

$$\tan 2\theta = \frac{\Omega_0(t)}{\delta(t)}$$

Состояния,

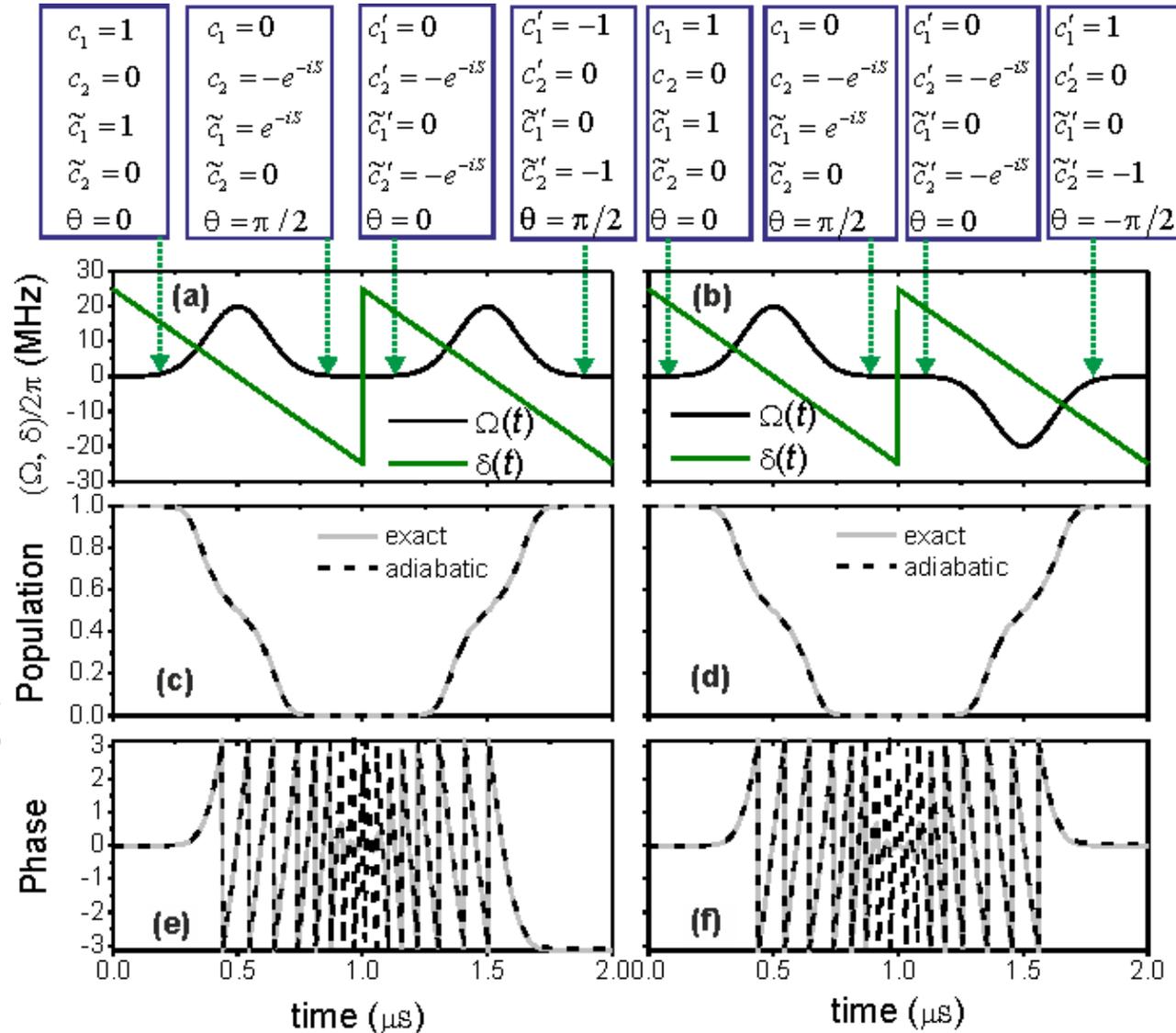
одетые полем:

$$|I\rangle = \cos \theta |1\rangle - \sin \theta |2\rangle$$

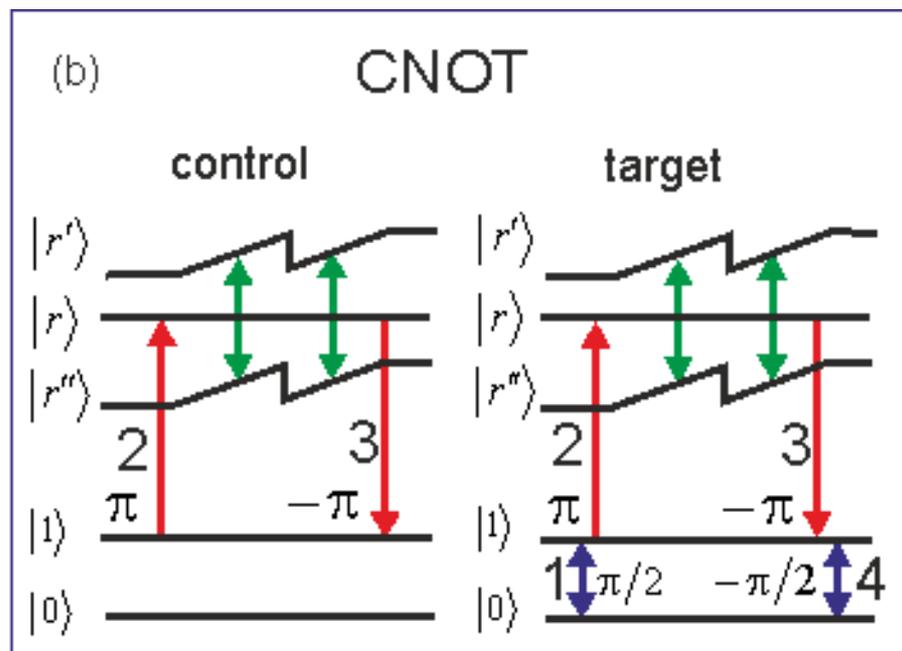
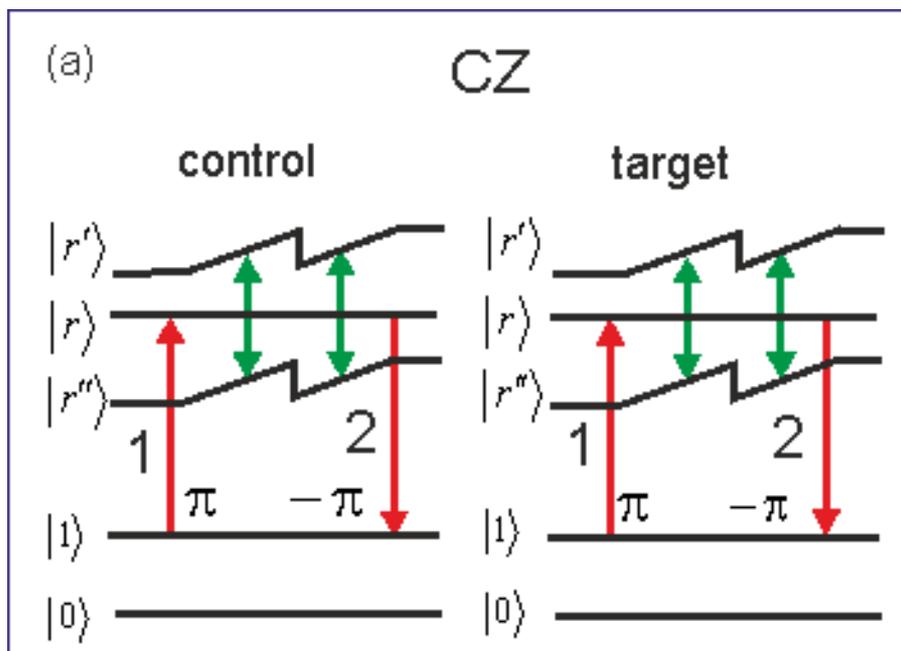
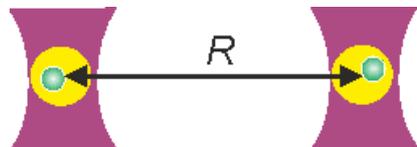
$$|II\rangle = \sin \theta |1\rangle + \cos \theta |2\rangle$$

$$\Omega_{\pm}(t) = \delta(t) \pm \sqrt{\Omega_0^2(t) + \delta^2(t)}$$

$$S = \frac{i}{2} \int_0^T \Omega_{-}(t) dt$$



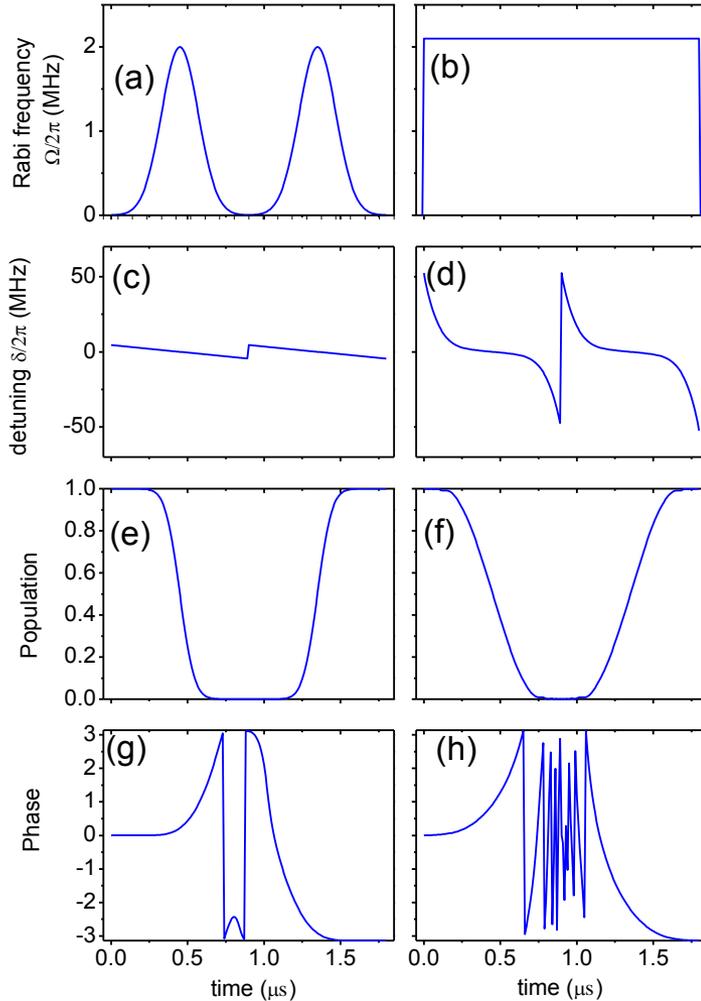
Адиабатическое прохождение резонанса Фёрстера



Проблема: невозможно управлять энергией взаимодействия

Решение: нелинейная отстройка от резонанса

Возбуждение с нелинейной отстройкой



Гамильтониан:

$$\hat{\mathbf{H}}(t) = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega(t) \\ \Omega(t) & 2\delta(t) \end{pmatrix}$$

Гауссовы импульсы, линейный чирп:

$$\Omega_j(t) = \Omega_0 \exp\left[-(t-t_j)^2/2w^2\right]$$

$$\delta_j(t) = s_1(t-t_j)$$

Прямоугольный импульс, нелинейный чирп:

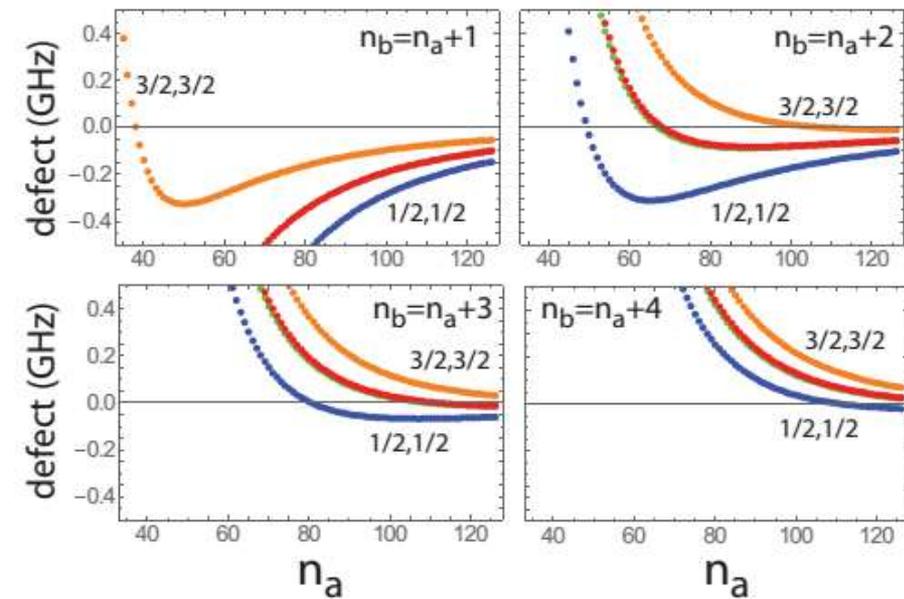
$$\Omega_j(t) = \Omega_0$$

$$\delta_j(t) = s_1(t-t_j) + s_2(t-t_j)^5$$

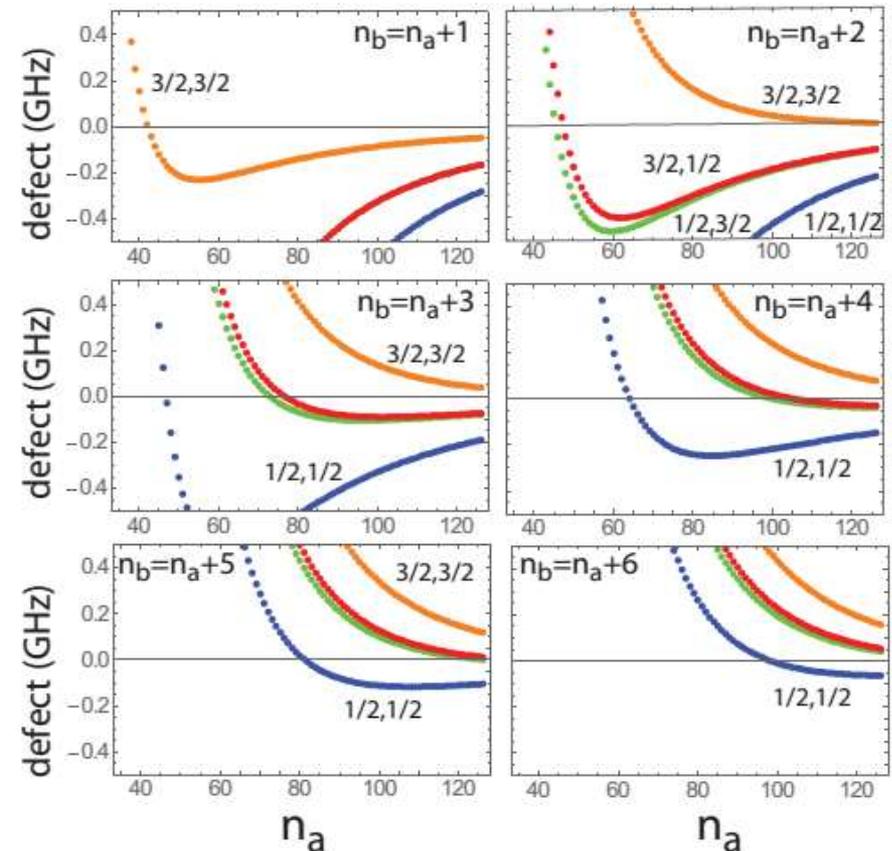
Резонанс Фёрстера для различных атомов

$$|nS, n'S\rangle \rightarrow |nP, (n'-1)P\rangle$$

Рубидий:



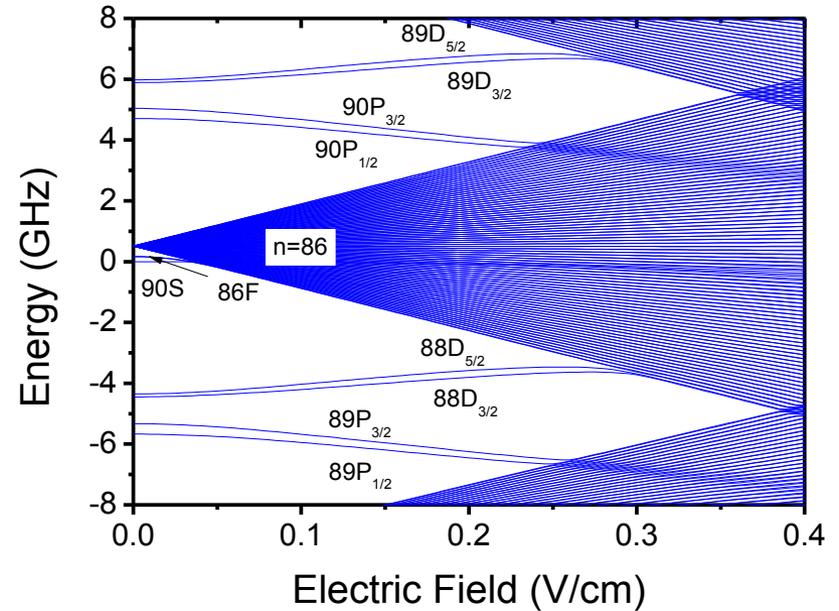
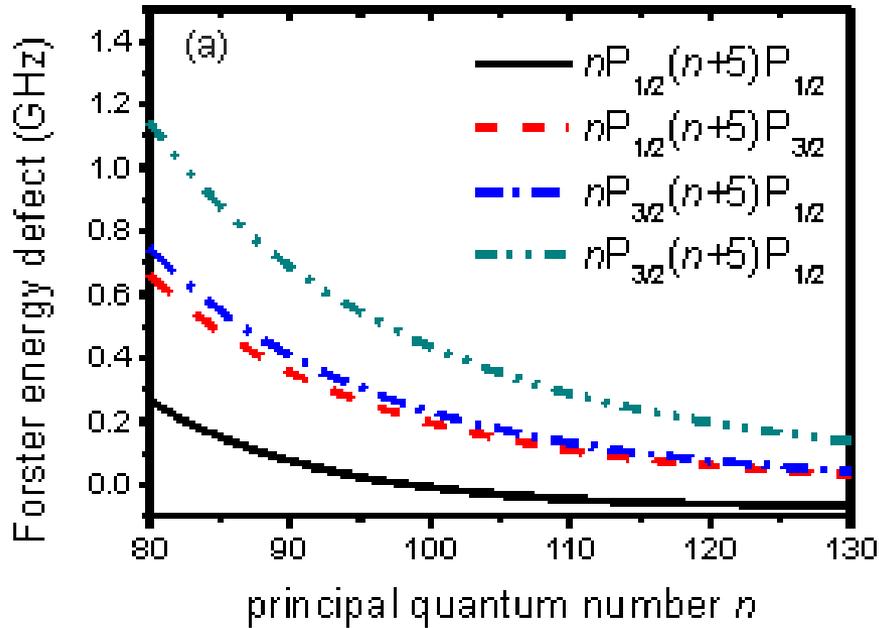
Цезий:



I.I. Beterov and M.Saffman, PRA 92
042710 (2015)

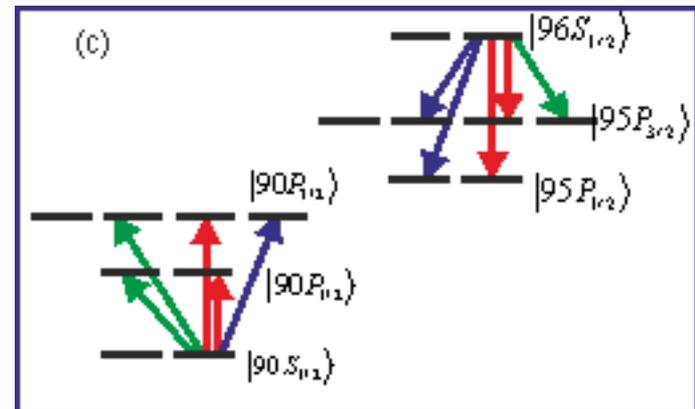
Пример: резонанс Фёрстера в цезии

90S+96S - 90P+95P

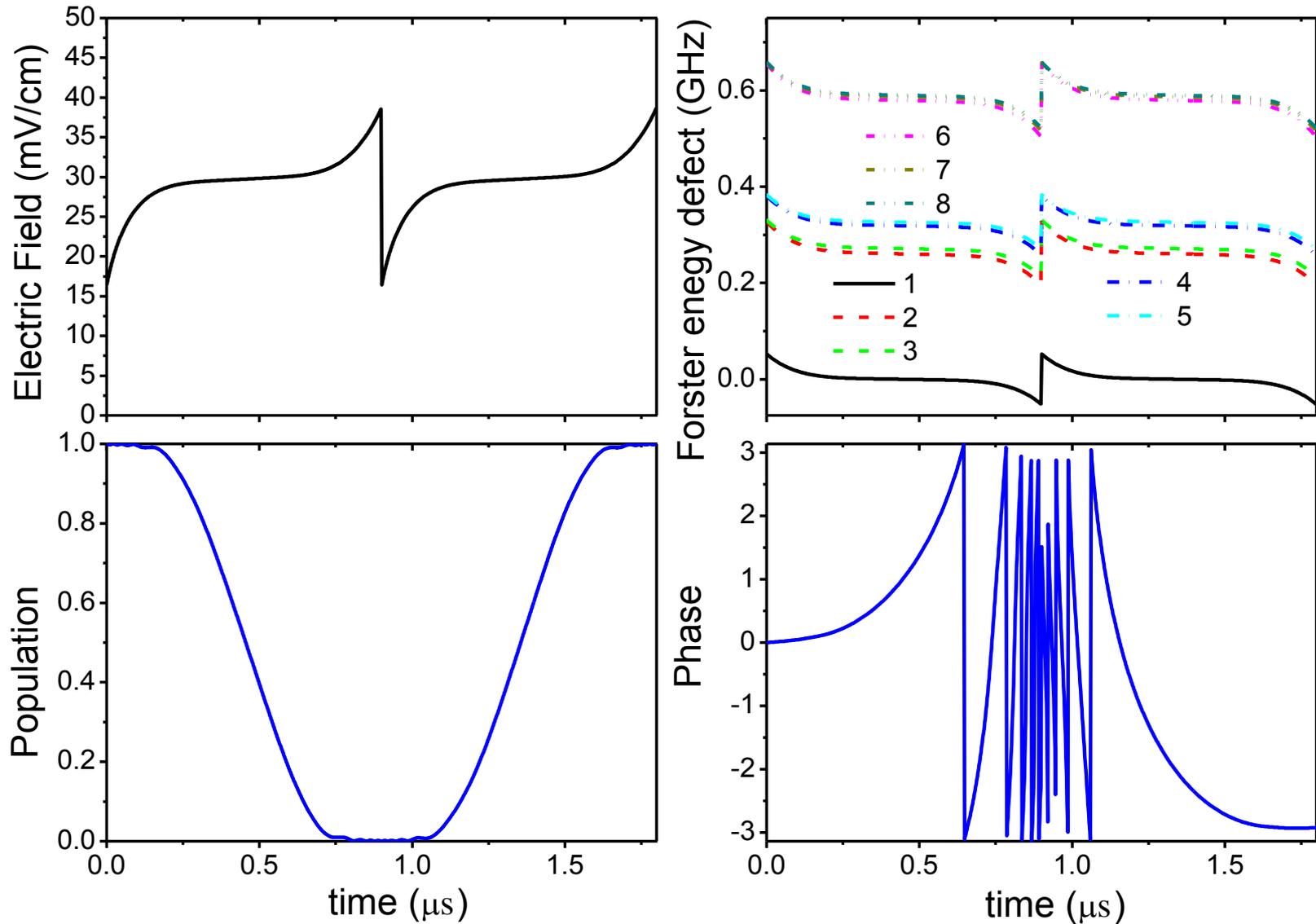


Проблема: множество каналов

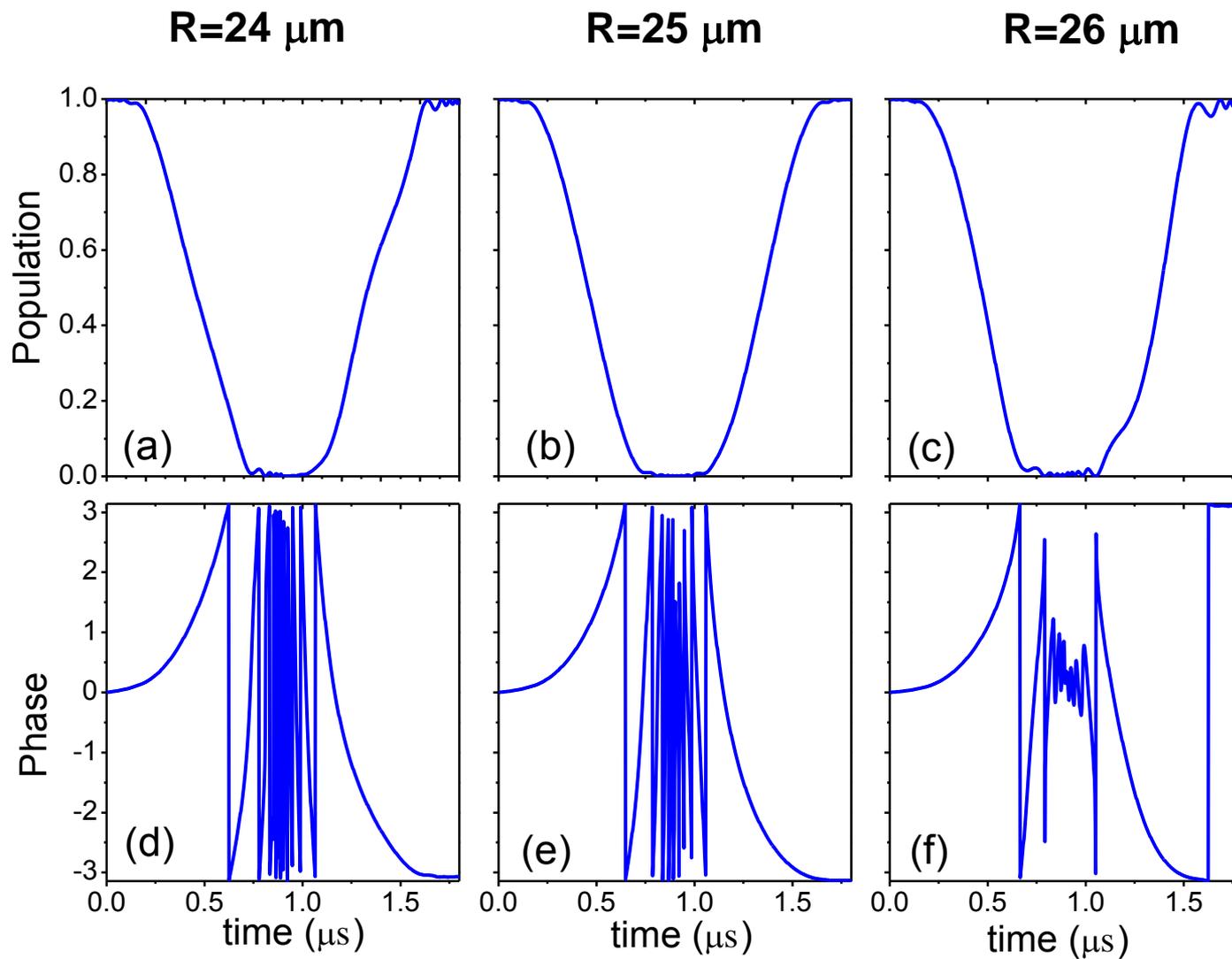
Решение: подстройка формы импульса



Пример: резонанс Фёрстера в цезии



Зависимость от расстояния

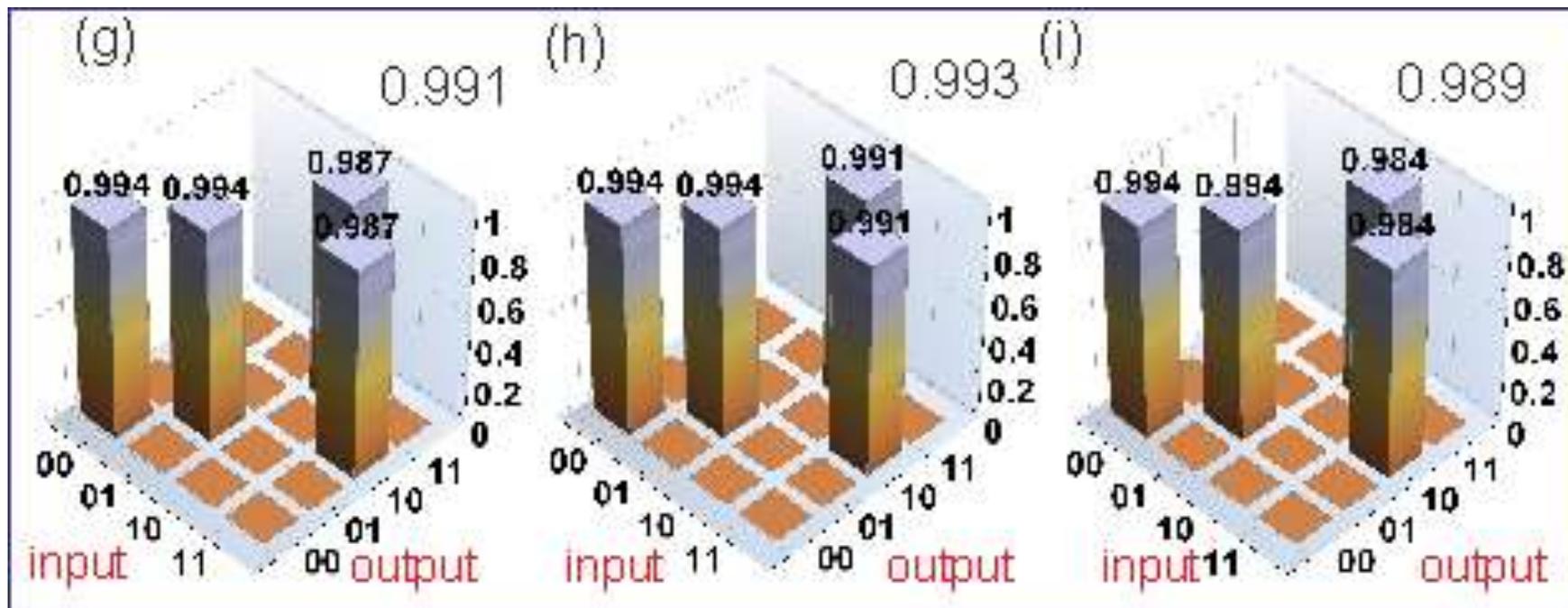


Операция CNOT

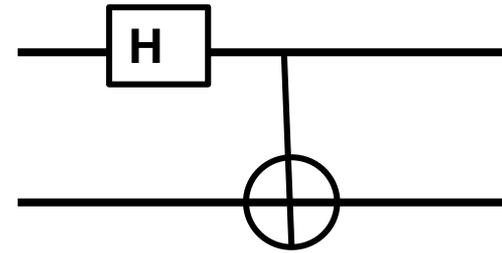
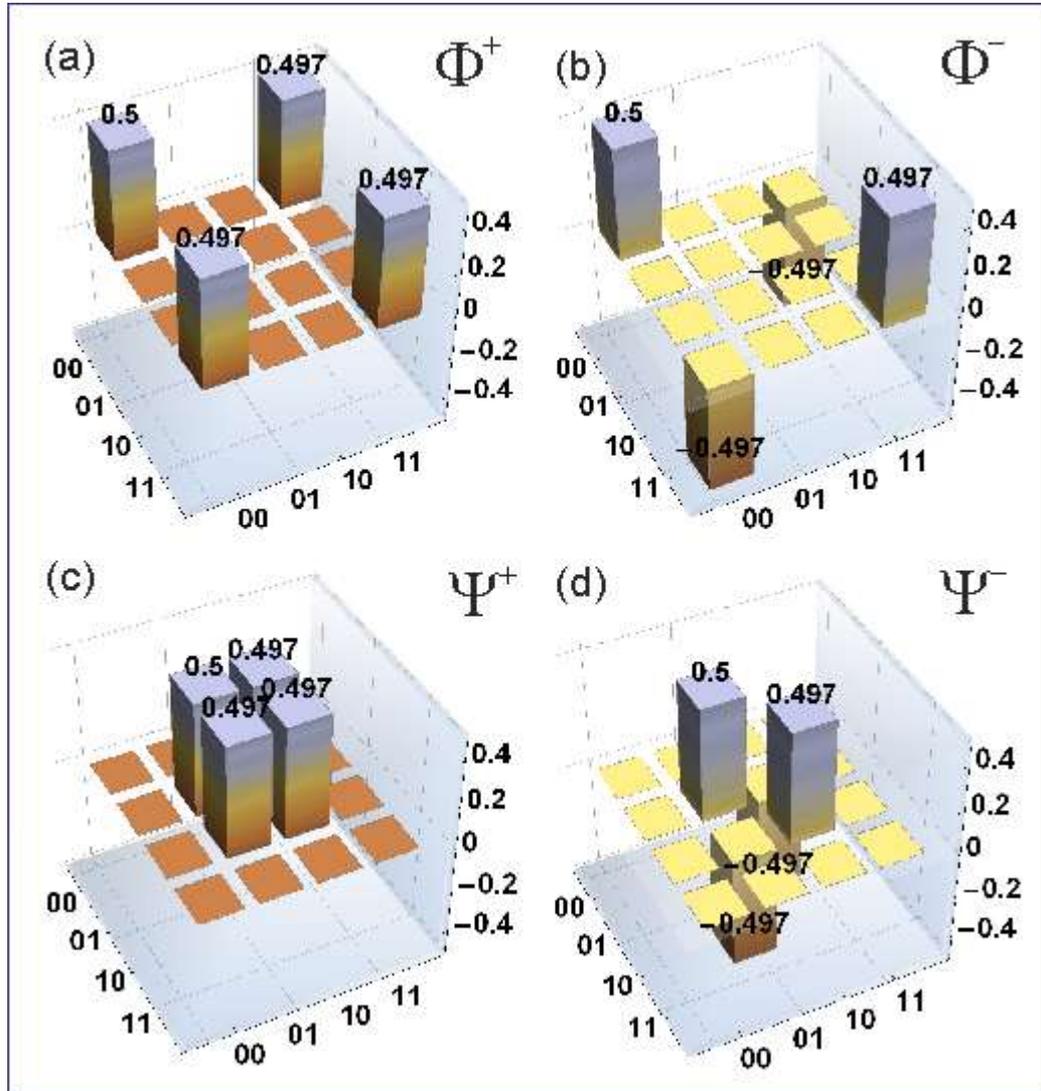
R=24 μm

R=25 μm

R=26 μm



Состояния Белла



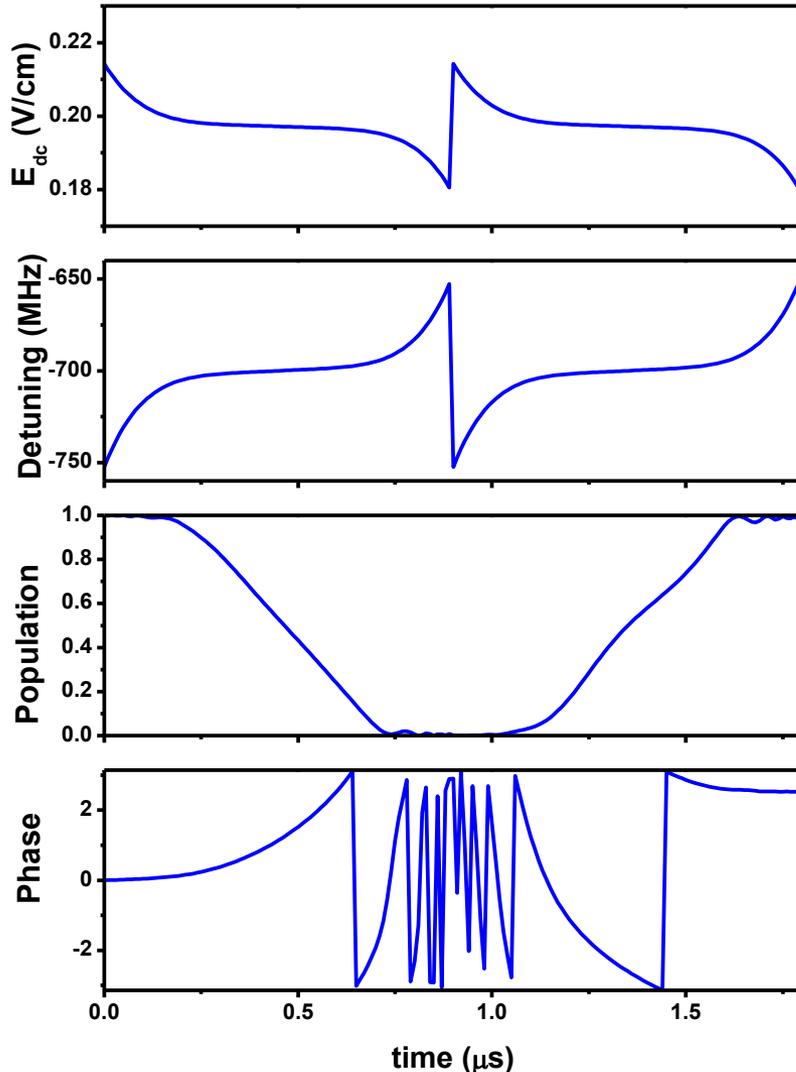
$$\Phi^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle)$$

$$\Phi^- = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle)$$

$$\Psi^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle)$$

$$\Psi^- = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle)$$

Радиочастотный резонанс



Рубидий: 80P+81P – 80S+82S

$$\omega = 700 \text{ MHz}$$

$$\delta_0 = -259 \text{ MHz}$$

Электрическое поле:

$$E = E_{dc}(t) + E_V \cos \omega t$$

Средняя отстройка:

$$\delta = \delta_0 - \frac{\alpha E_{dc}^2(t)}{2} - \frac{\alpha E_V^2(t)}{4}$$

Выводы:

1. Двойное адиабатическое прохождение позволяет управлять фазовым сдвигом состояния двухуровневой системы
2. Двойное адиабатическое прохождение резонансов Фёрстера позволяет реализовать двухкубитовые операции, нечувствительные к флуктуациям межатомного расстояния

I.I. Beterov et al., PRA 94, 062307 (2016)