

# Двухкубитовые вентили на основе радиочастотных резонансов Фёрстера в ридберговских атомах рубидия

И.И.Бетеров, Г.Н.Хамзина, Е.А.Якшина,  
Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, И.И.Рябцев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет  
Новосибирский государственный технический университет

# План доклада

**Резонанс Фёрстера и квантовые вентили**

Адиабатическое прохождение резонансов Фёрстера

Двухкубитовые вентили на основе радиочастотных резонансов

# Критерии ди Винченцо

## Пять критериев для создания квантового компьютера

1. Квантовый регистр должен состоять из множества кубитов – квантовых систем
2. Перед началом вычислений квантовый регистр должен быть инициализирован
3. Время разрушения когерентных квантовых состояний (декогерентизации) кубитов должно быть большим
4. Должны выполняться обратимые квантовые логические операции над парами кубитов
5. Конечное состояние регистра должно быть надежно измерено

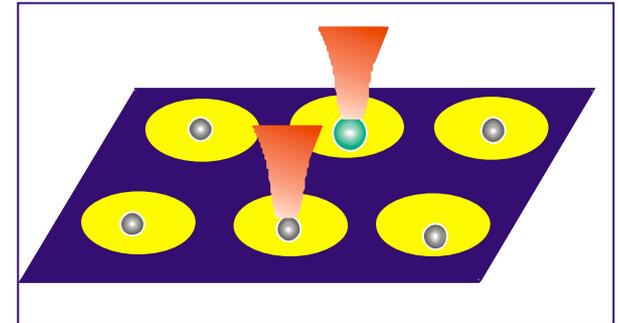
D.P. DiVincenzo "Quantum computation", Science. 1995. V. 270. P. 255.

D.P. DiVincenzo "The Physical Implementation of Quantum Computation", Fortschr.Phys. 2000. V. 48. P. 771.

# Квантовый компьютер с нейтральными атомами

## Схема 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)

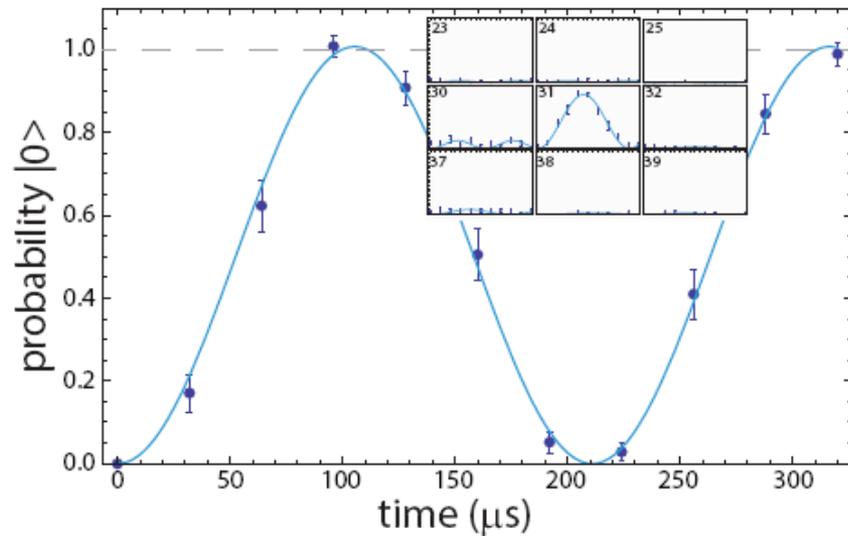
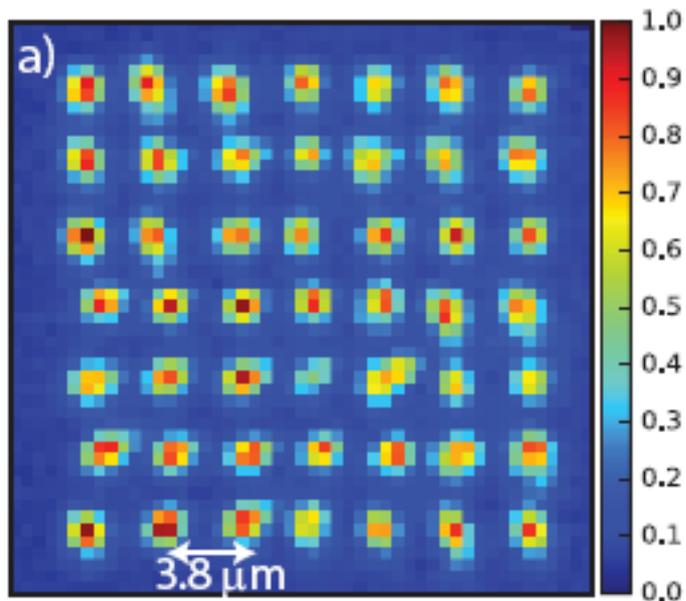
## Двухкубитовые операции:

Ридберговская блокада L. Isehnow et al., PRL 104, 010503 (2010)

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

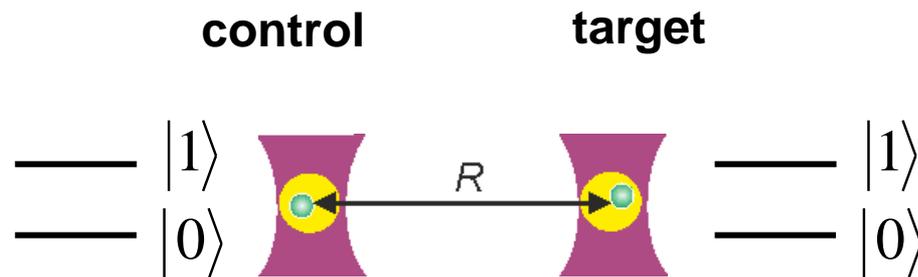
# Квантовый регистр с нейтральными атомами

Квантовый регистр – 49 кубитов



Университет Висконсин-Мадисон, США

# Двухкубитовый вентиль



**CZ**

$|00\rangle \rightarrow |00\rangle$   
 $|01\rangle \rightarrow |01\rangle$   
 $|10\rangle \rightarrow |10\rangle$   
 $|11\rangle \rightarrow -|11\rangle$

$$CZ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

**CNOT**

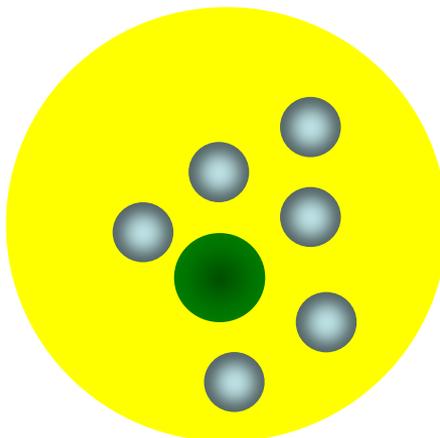
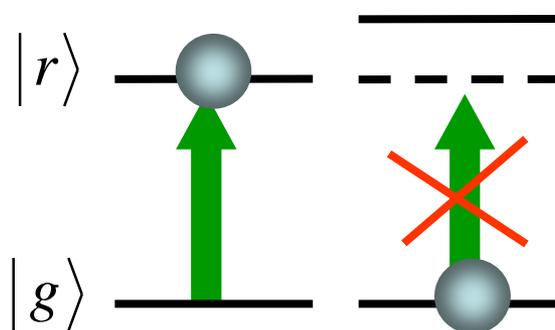
$|00\rangle \rightarrow |00\rangle$   
 $|01\rangle \rightarrow |01\rangle$   
 $|10\rangle \rightarrow |11\rangle$   
 $|11\rangle \rightarrow |10\rangle$

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

# Ридберговская блокада

Ридберговская блокада [M.D.Lukin et al., PRL 87, 037901 (2001)]

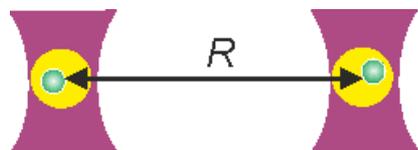
Excitation of interacting atoms



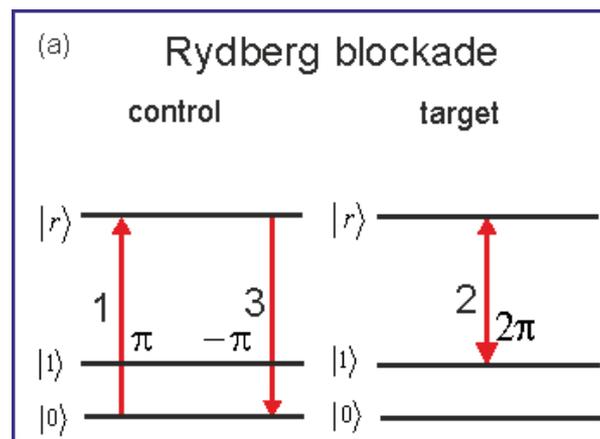
Радиус блокады:

$$R_B = \left( \frac{C_6}{\hbar\Omega} \right)^{1/6}$$

Двухкубитовые вентили



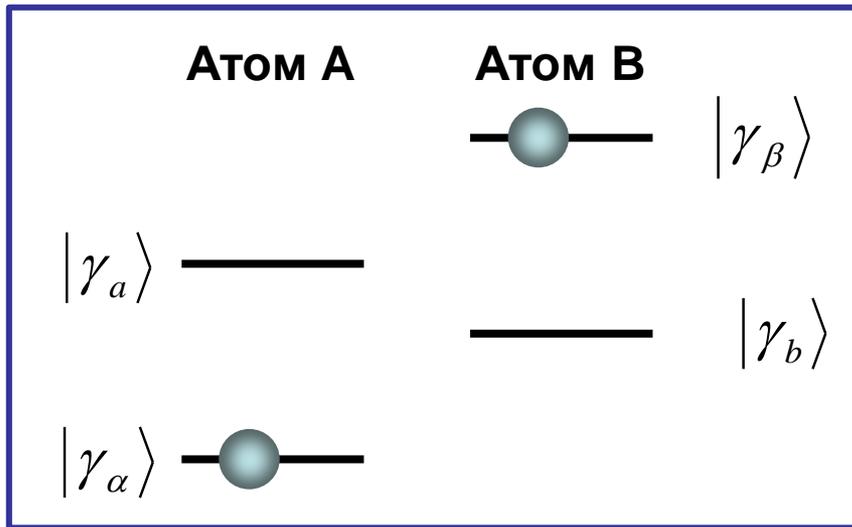
Достигнутая точность 0.73



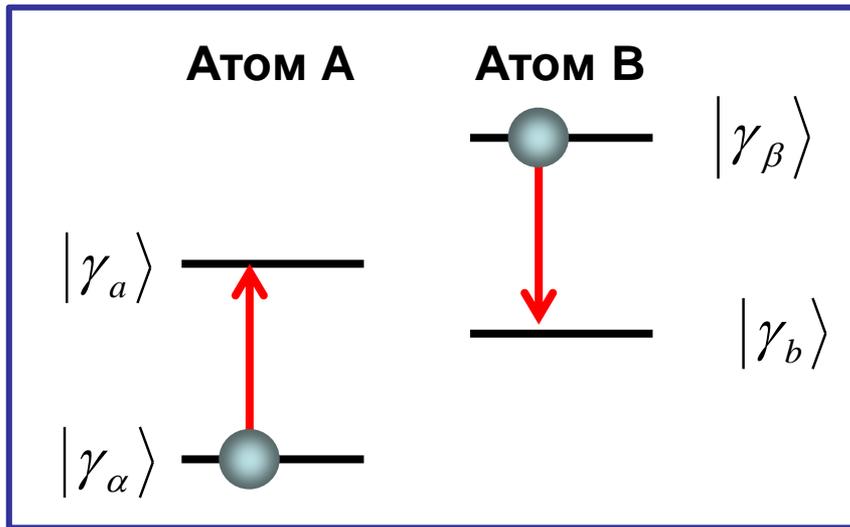
# Проблема

Нейтральные атомы позволяют неограниченное масштабирование, но точность двухкубитовых операций существенно ниже того, что предсказывает теория

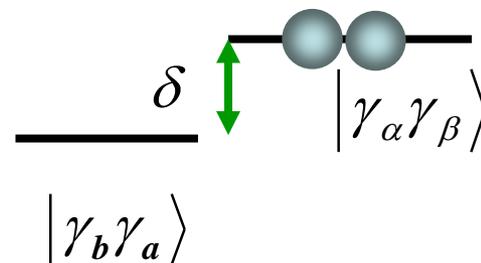
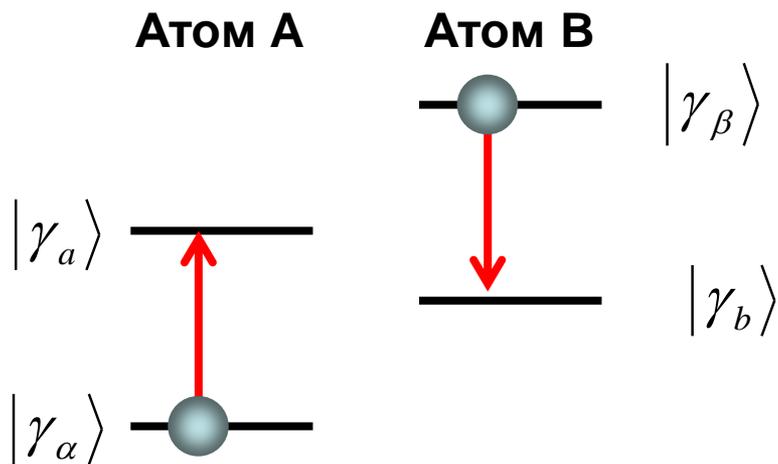
# Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах



# Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах

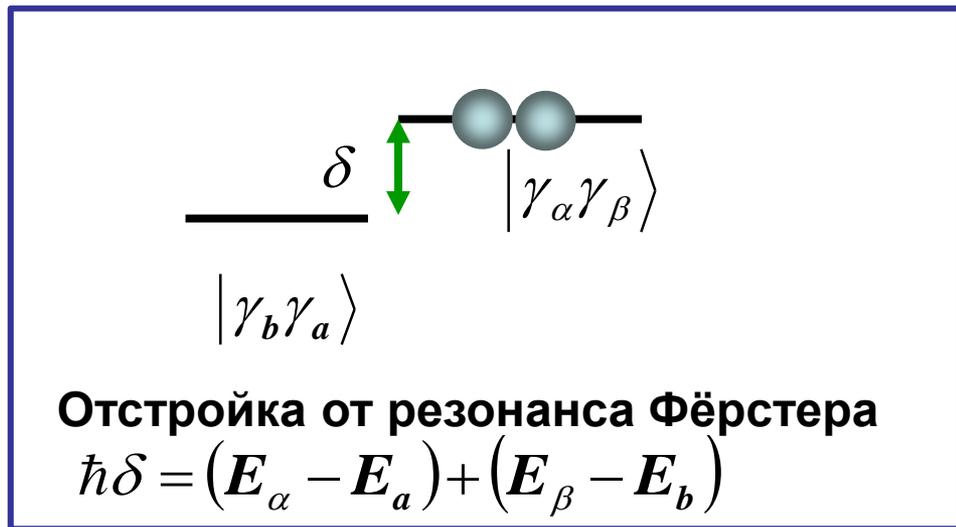
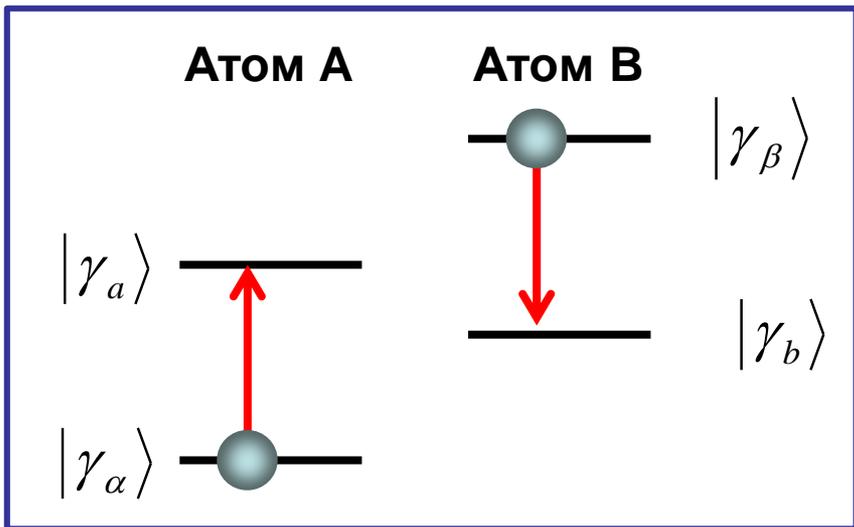


# Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах

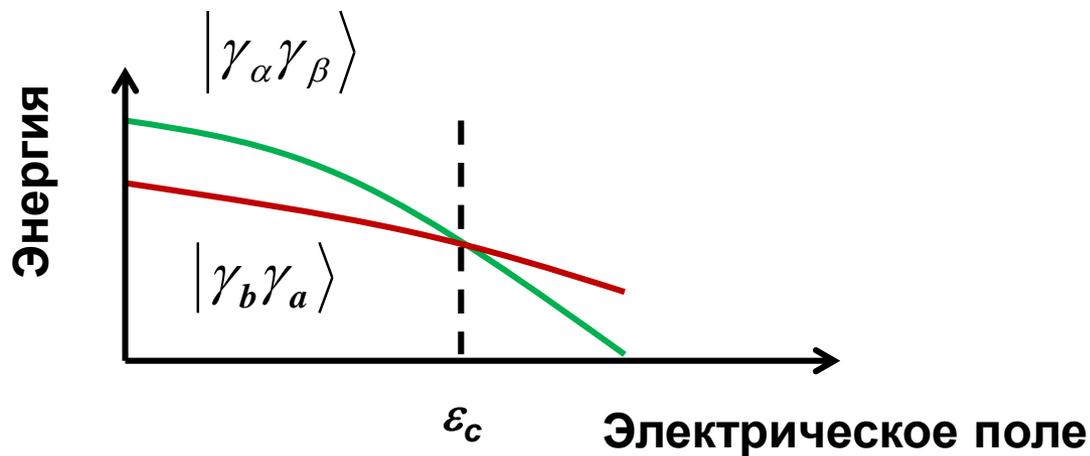


**Отстройка от резонанса Фёрстера**  
 $\hbar\delta = (E_\alpha - E_a) + (E_\beta - E_b)$

# Резонанс Фёрстера в ридберговских атомах

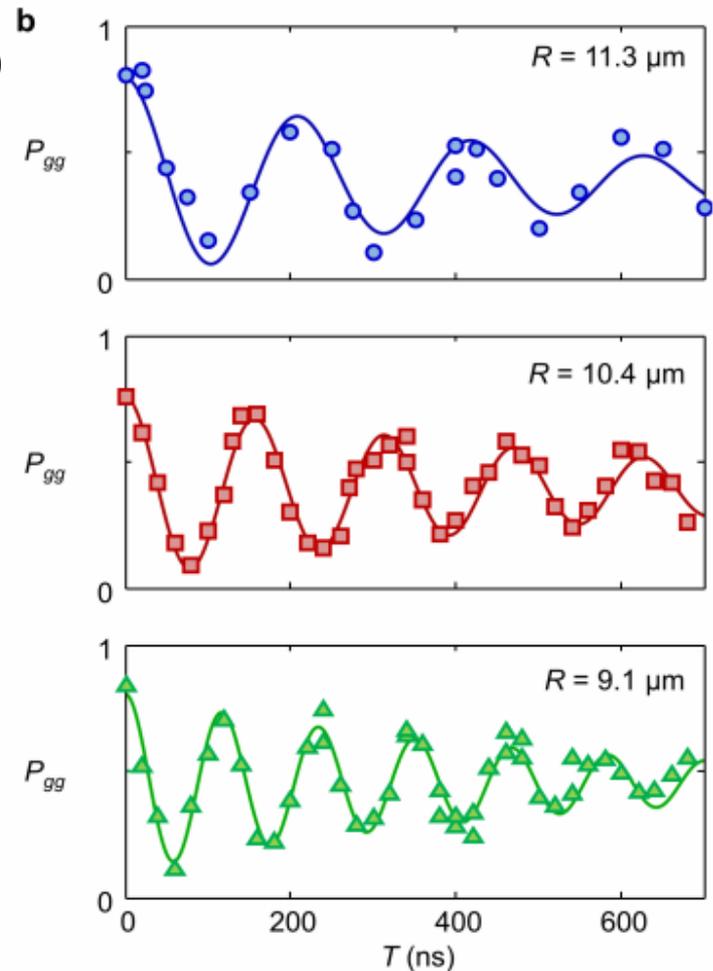
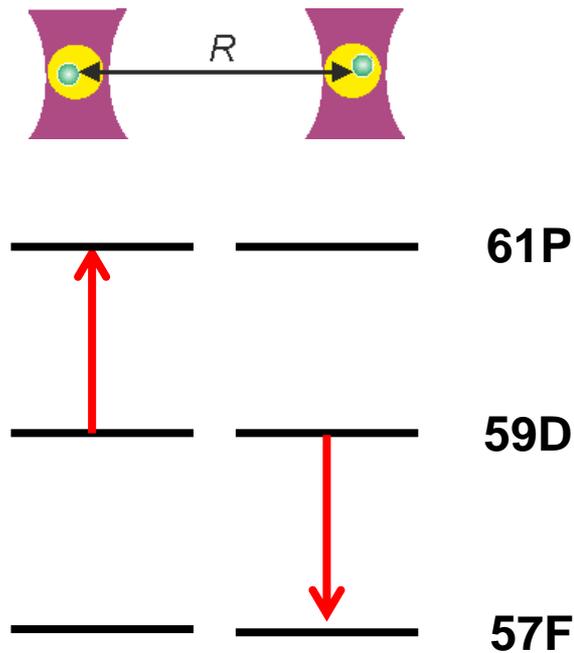


## Штарковская подстройка резонанса Фёрстера



# Когерентное прохождение резонанса Фёрстера

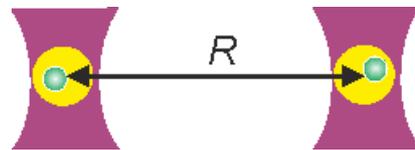
S. Ravets et al., Nature Physics 10, 914 (2014)



**Проблема:** чувствительность к флуктуациям межатомного расстояния

**Решение:** адиабатическое прохождение

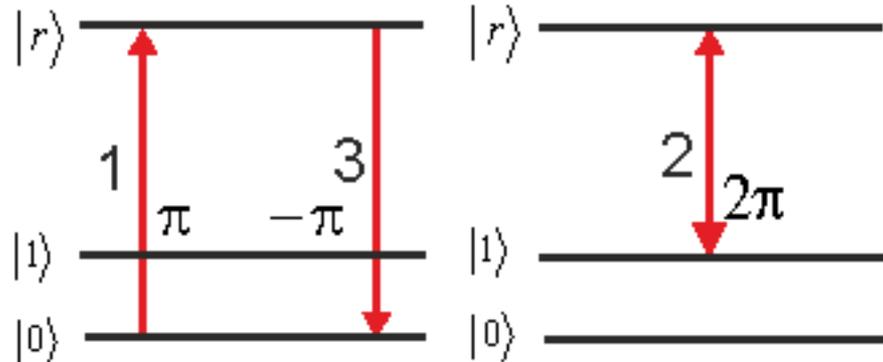
# Вентиль CZ



(a) Rydberg blockade

control

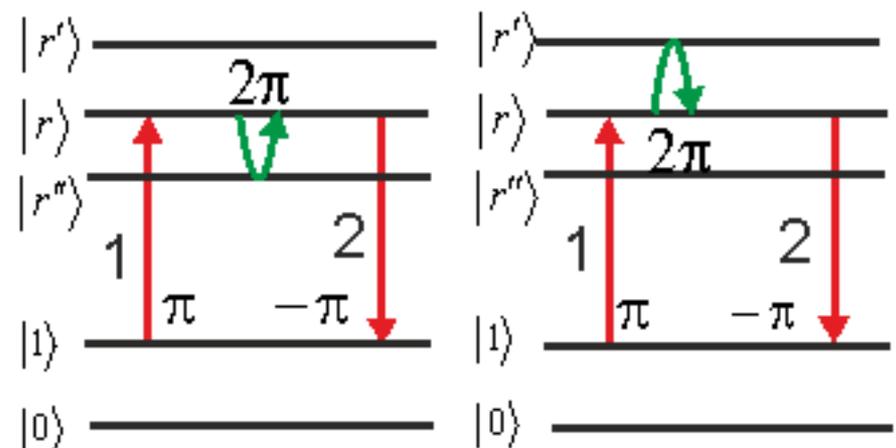
target



(b) Interaction gate

control

target



# Проблема

**Резонансное диполь-дипольное взаимодействие чувствительно к экспериментальным условиям, важна структура атомных уровней энергии**

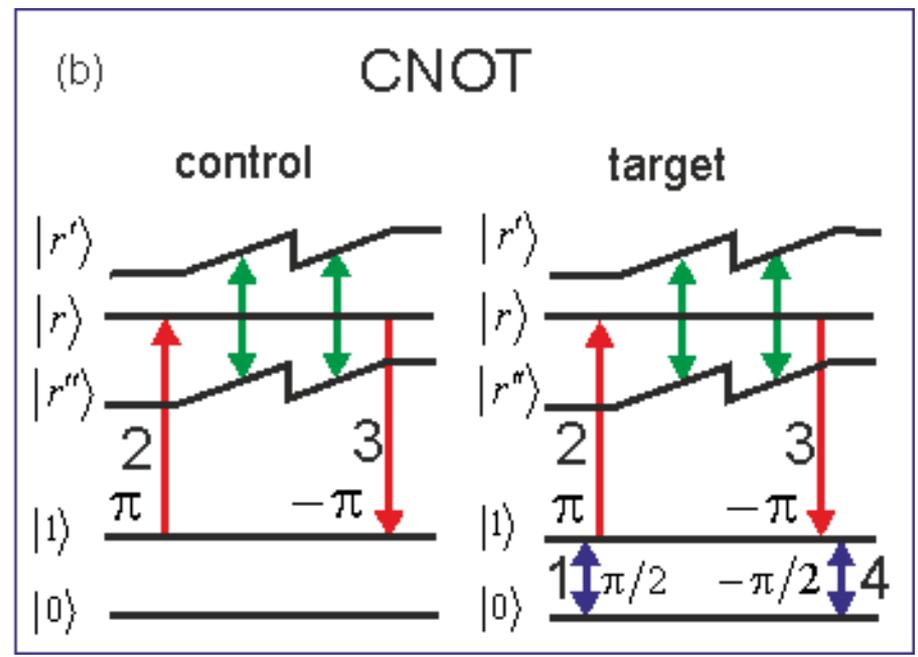
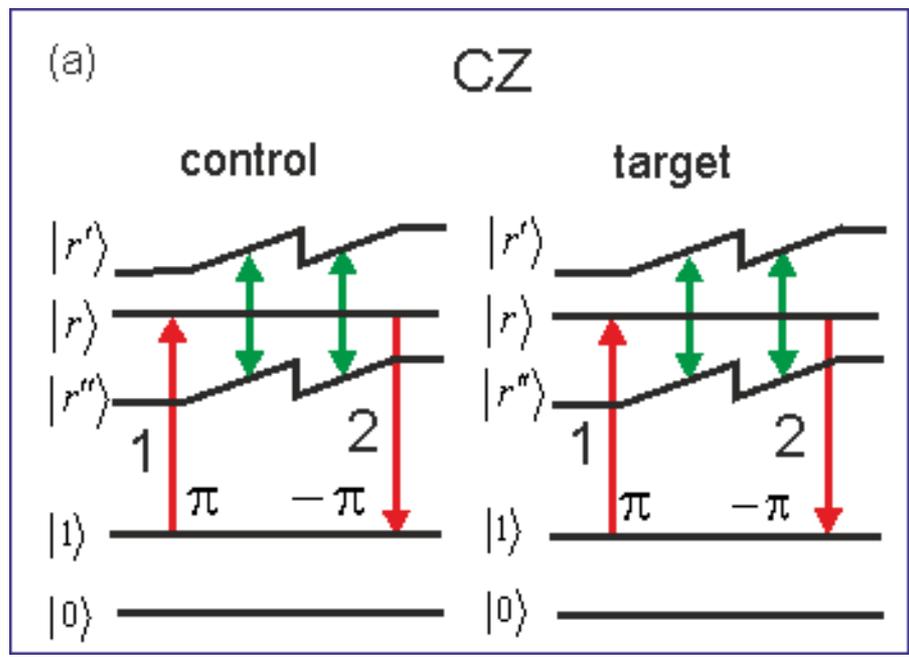
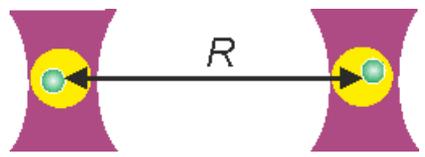
# План доклада

Резонанс Фёрстера и квантовые вентили

**Адиабатическое прохождение резонансов Фёрстера**

Двухкубитовые вентили на основе радиочастотных резонансов

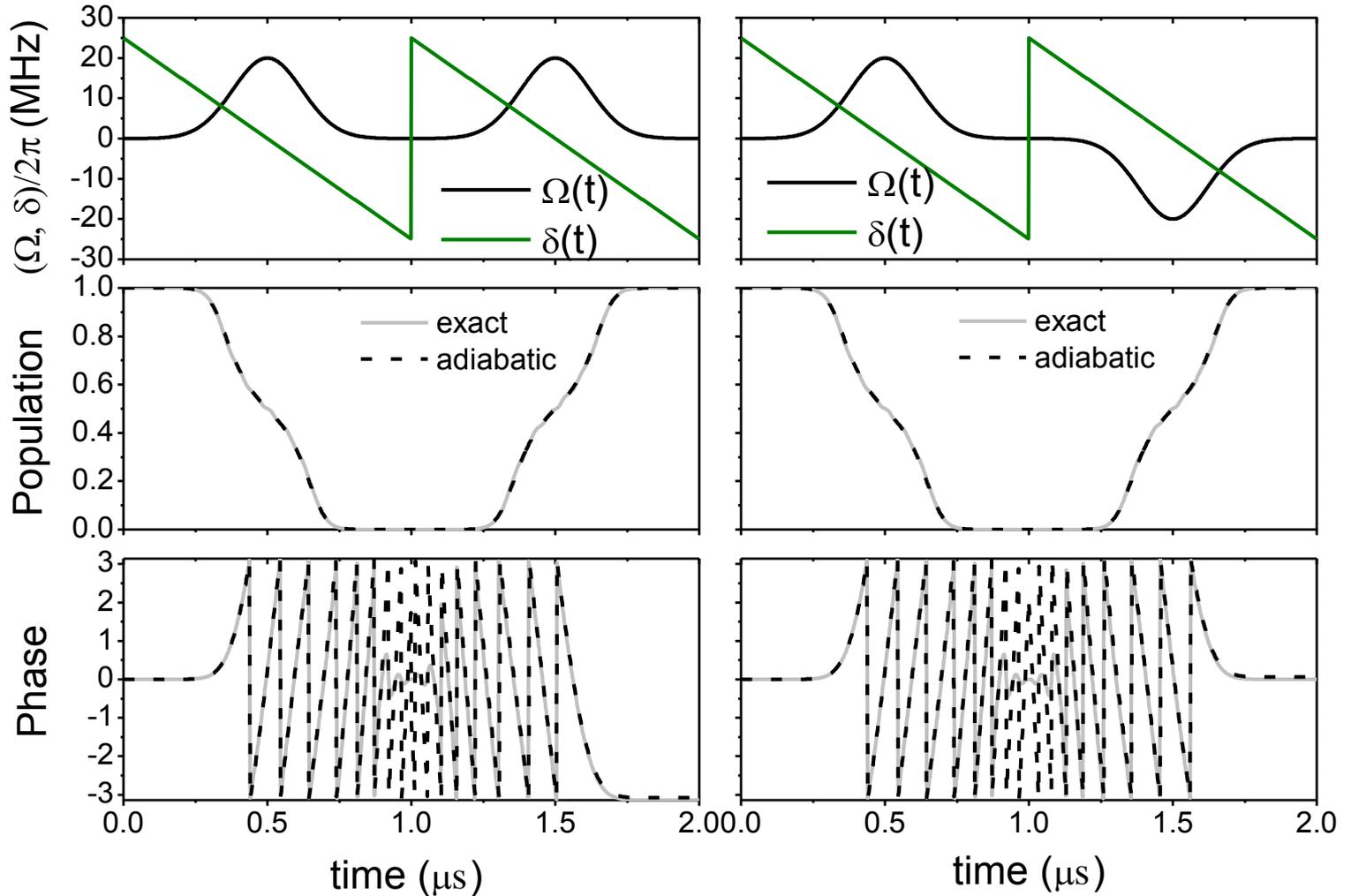
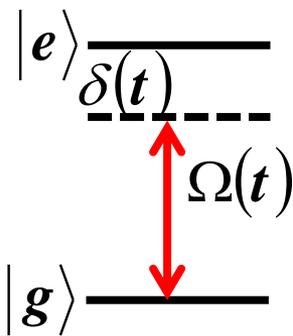
# Адиабатическое прохождение резонанса Фёрстера



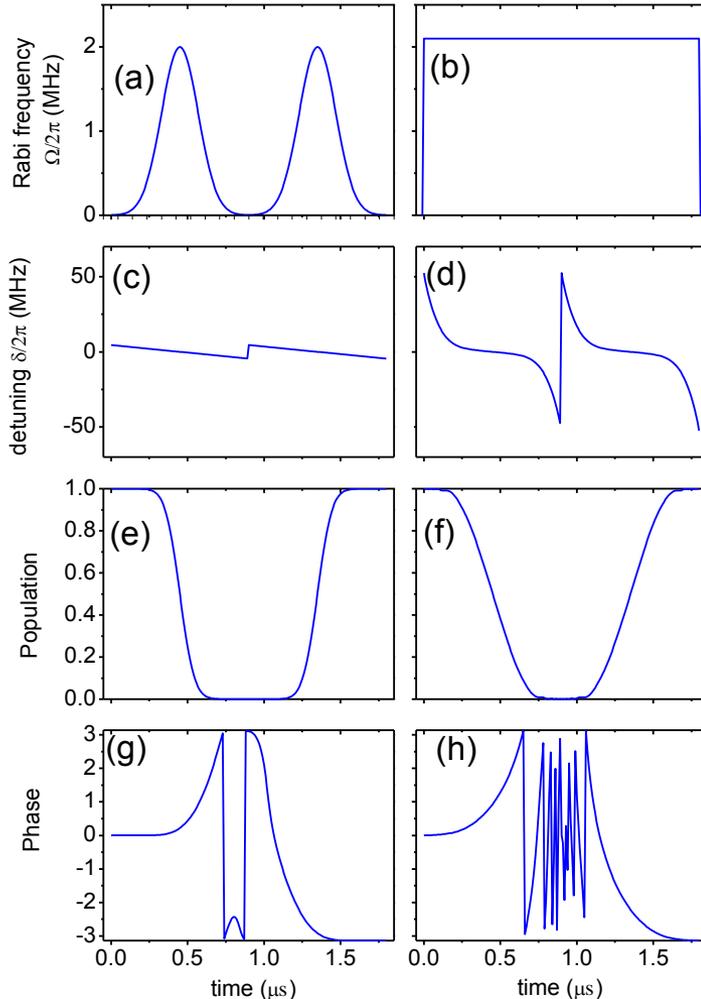
**Проблема: Что происходит с фазой, как управлять энергией взаимодействия**

# Двойное адиабатическое прохождение

## Аккумуляция динамической фазы



# 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:

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

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

# Проблема

**Перестраиваемые электрическим полем резонансы  
Фёрстера не всегда можно найти**

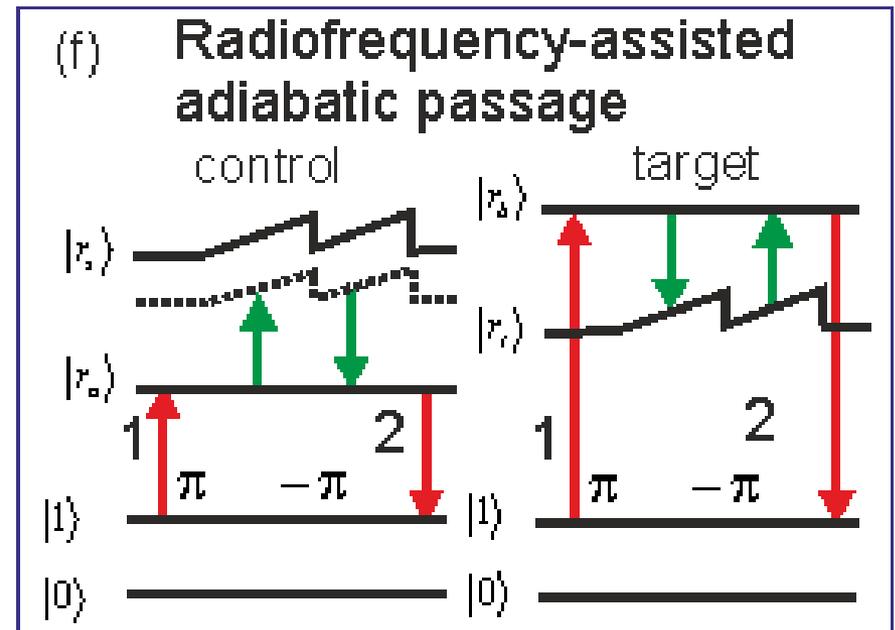
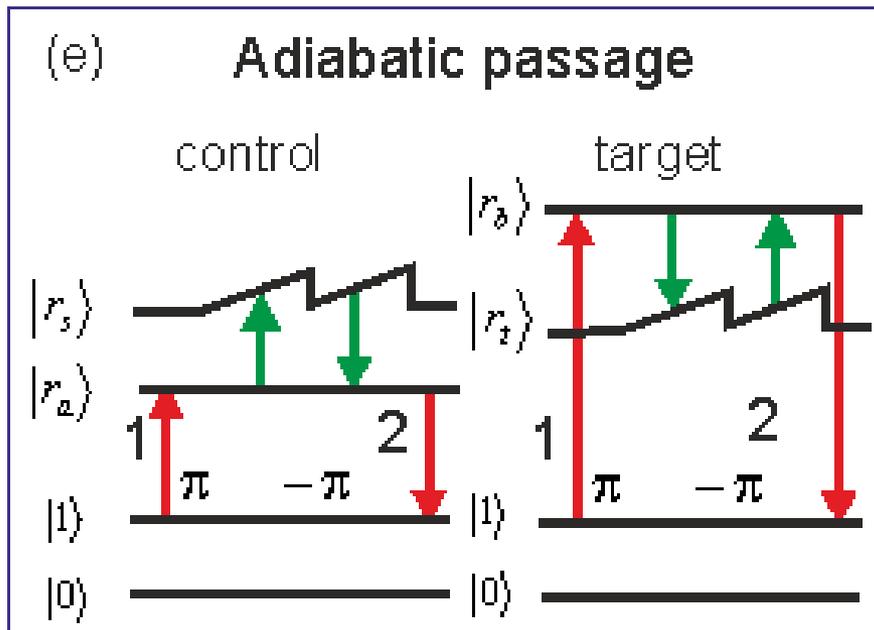
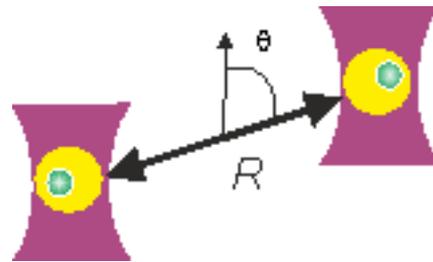
# План доклада

Резонанс Фёрстера и квантовые вентили

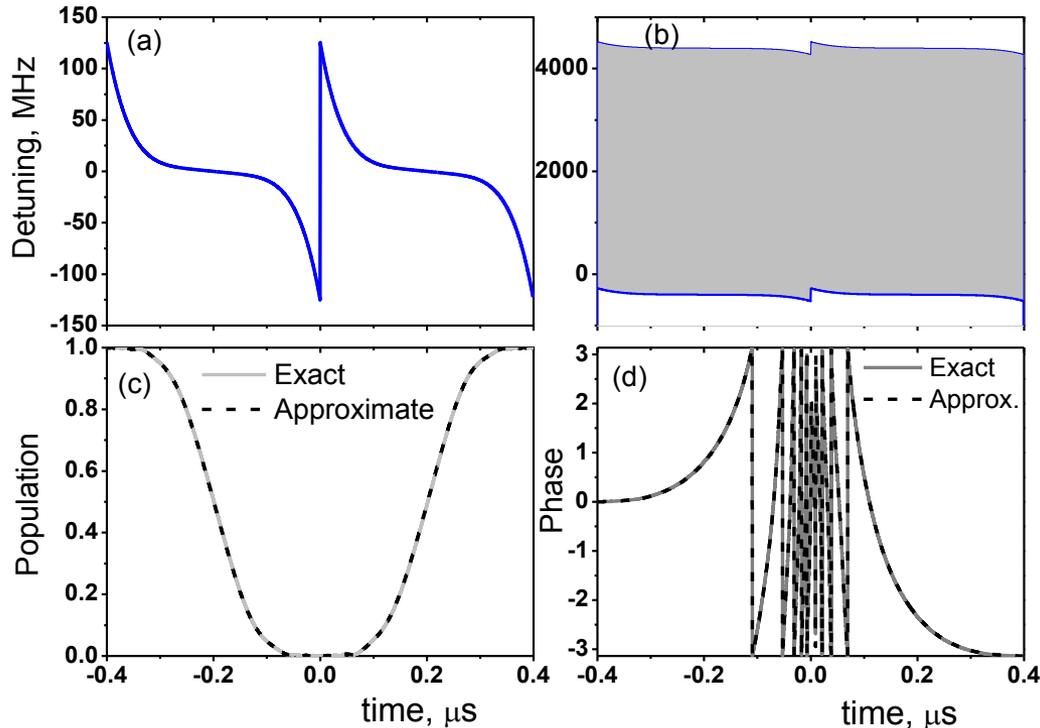
Адиабатическое прохождение резонансов Фёрстера

**Двухкубитовые вентили на основе радиочастотных резонансов**

# Радиочастотные резонансы Фёрстера



# ARP в радиочастотном поле



**Точное:**

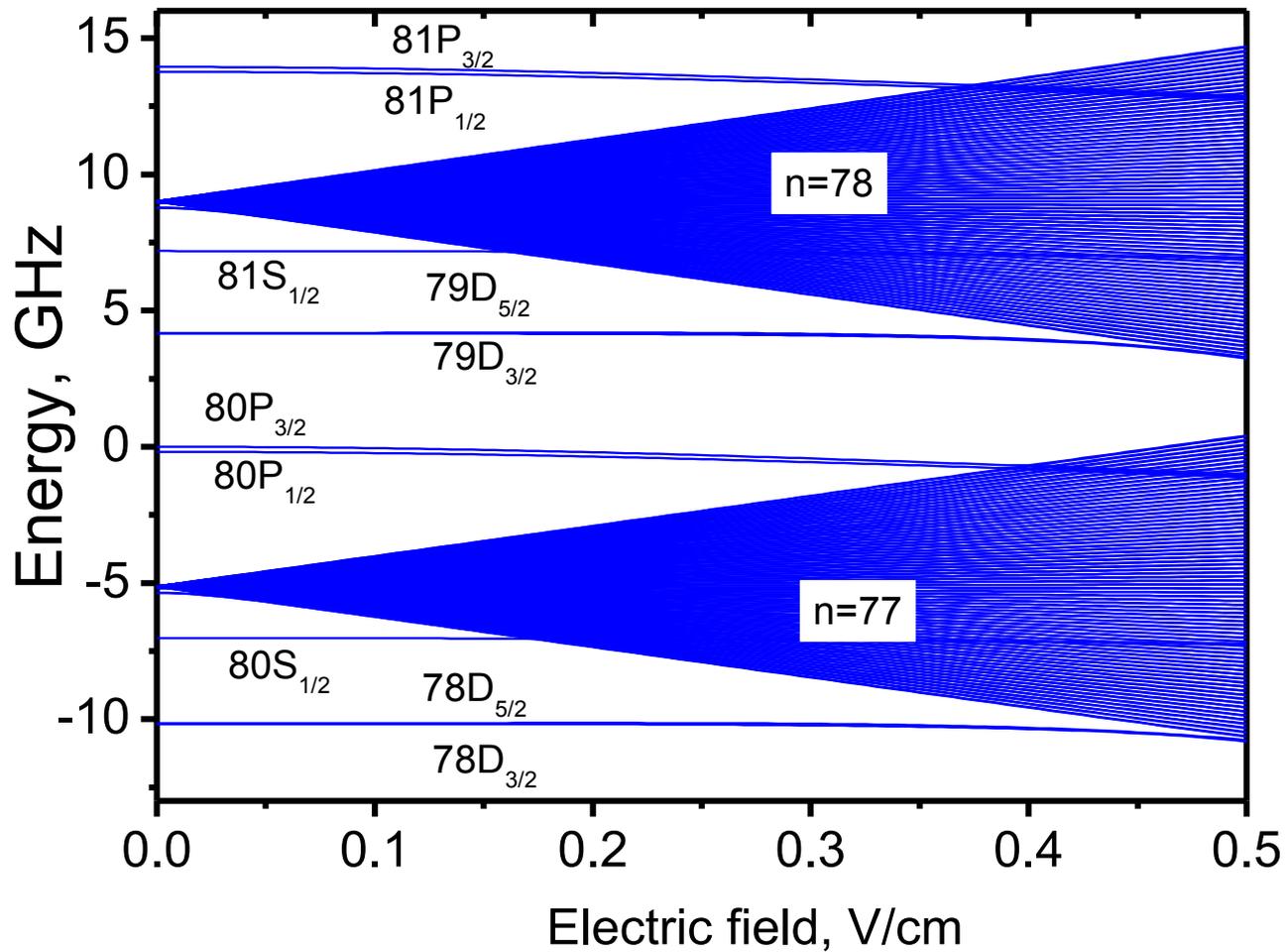
$$\begin{cases} i\dot{c}_1 = Vc_2 \\ i\dot{c}_2 = \delta(t)c_2 + Vc_1 \end{cases}$$

$$\delta(t) = \delta'(t) + \delta_0 + A \cos(\omega_{rf} t)$$

**Приближенное:**

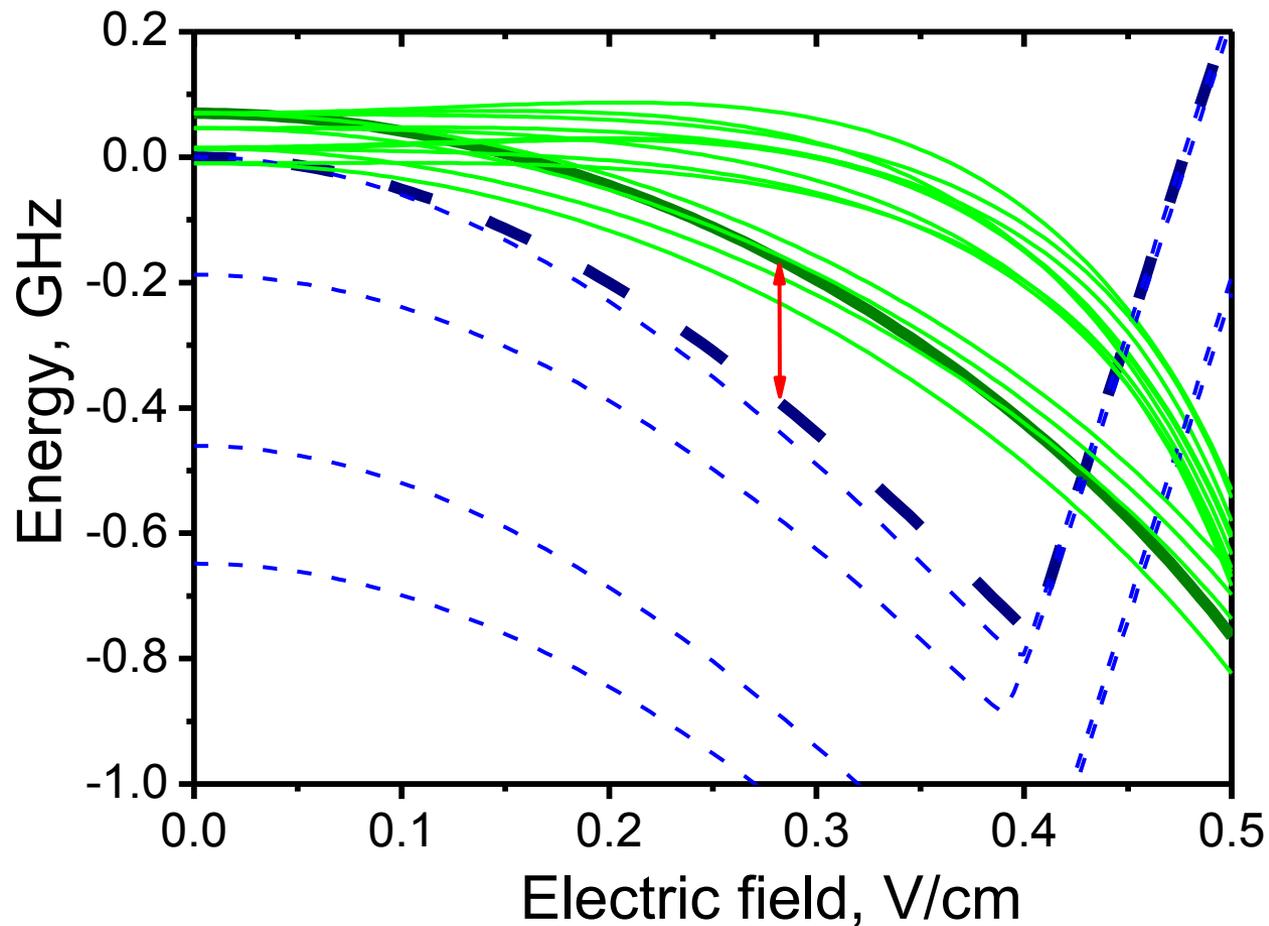
$$\begin{cases} i\dot{c}_1 = VJ_{-1} \left( \frac{A}{\omega_{rf}} \right) c'_2 \\ i\dot{\tilde{c}}_2 = [\delta'(t) + \delta_0 - \omega_{rf}] \tilde{c}_2 + VJ_{-1} \left( \frac{A}{\omega_{rf}} \right) c_1 \end{cases}$$

# Штарковские диаграммы для Rb

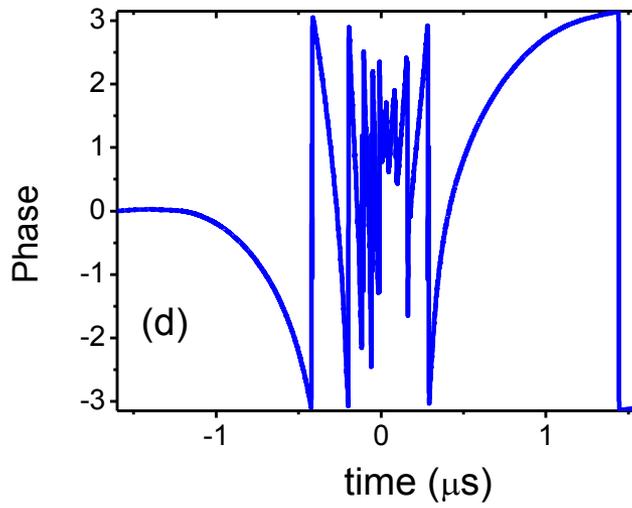
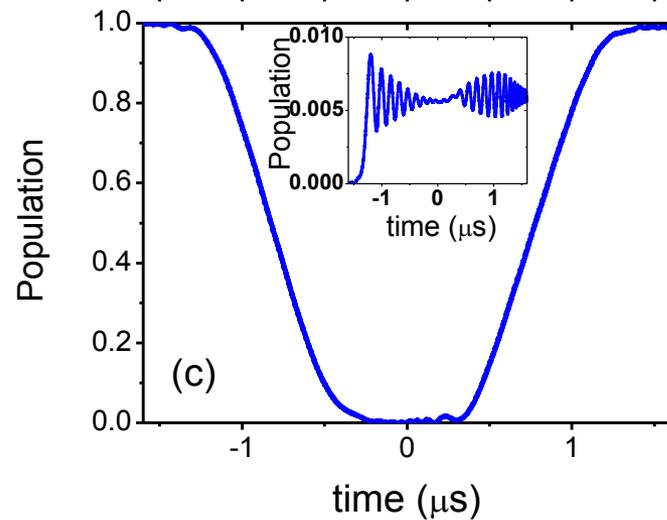
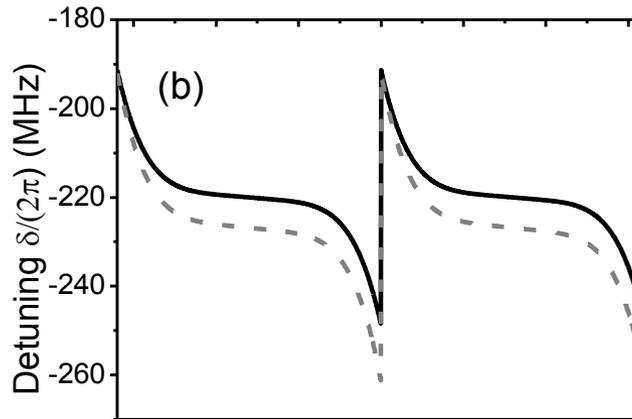
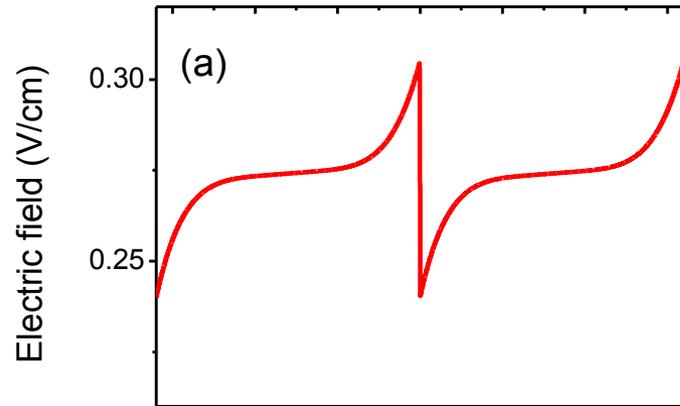


# Штарковские диаграммы

$$|60P_{3/2}, 80P_{3/2}\rangle \leftrightarrow |59D_{5/2}, 78D_{5/2}\rangle$$

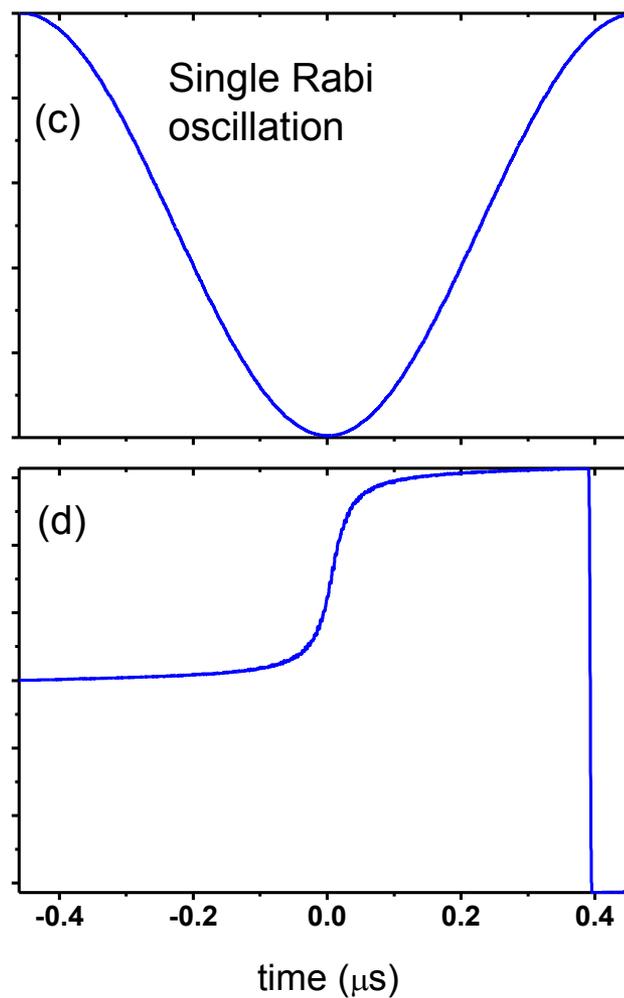
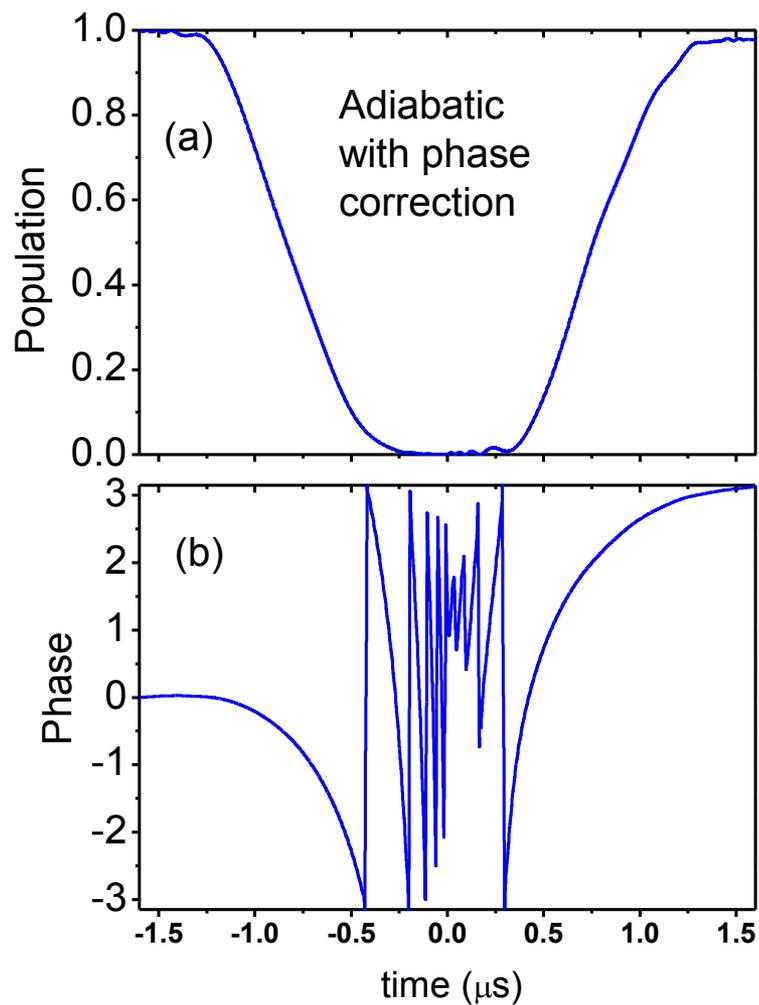


# Адиабатическое прохождение

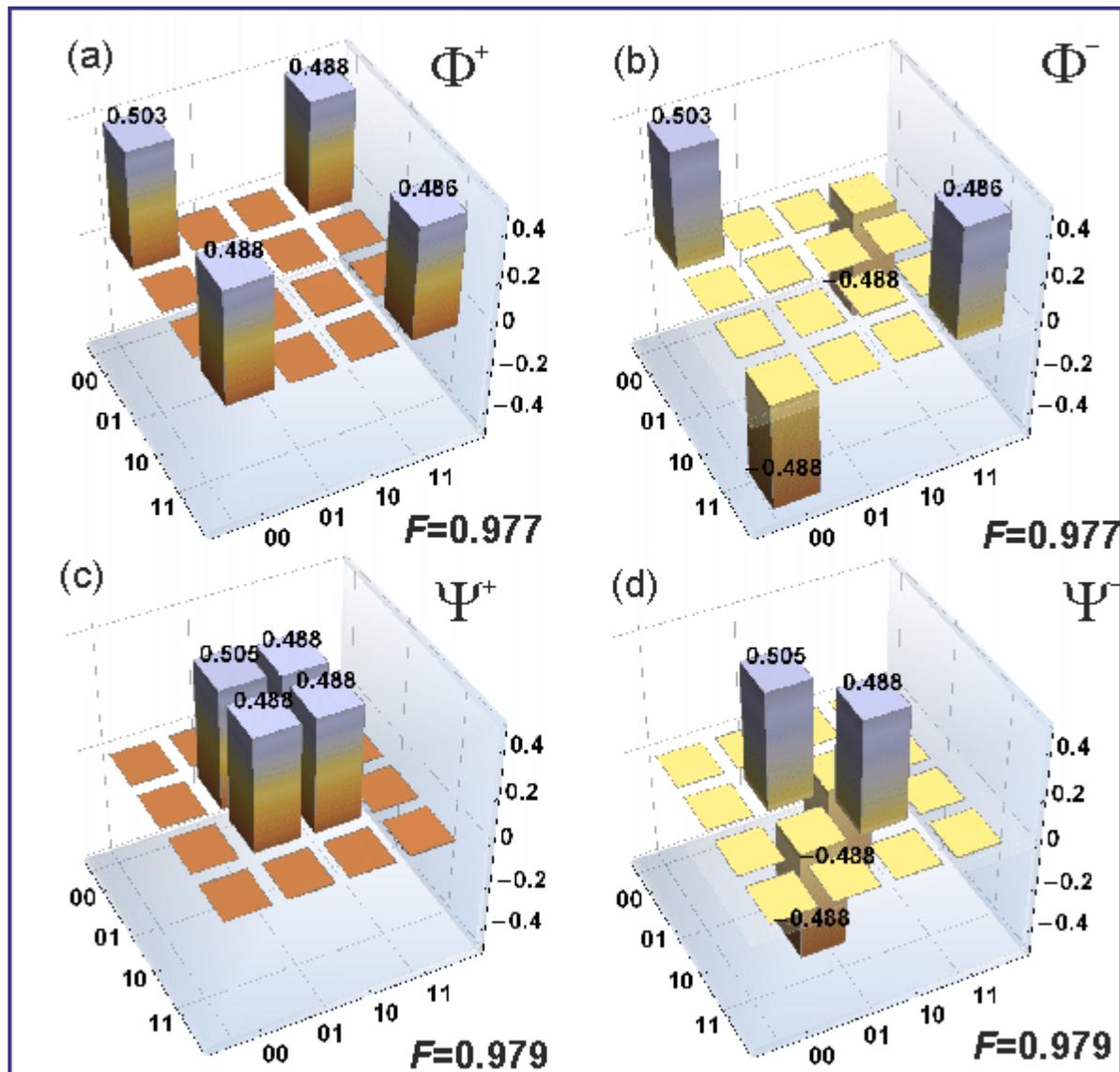


$R = 16.5 \mu\text{m}$   
 $(\omega/2\pi) = 220 \text{ MHz}$   
 $E_V = 0.1 \text{ V/cm}$

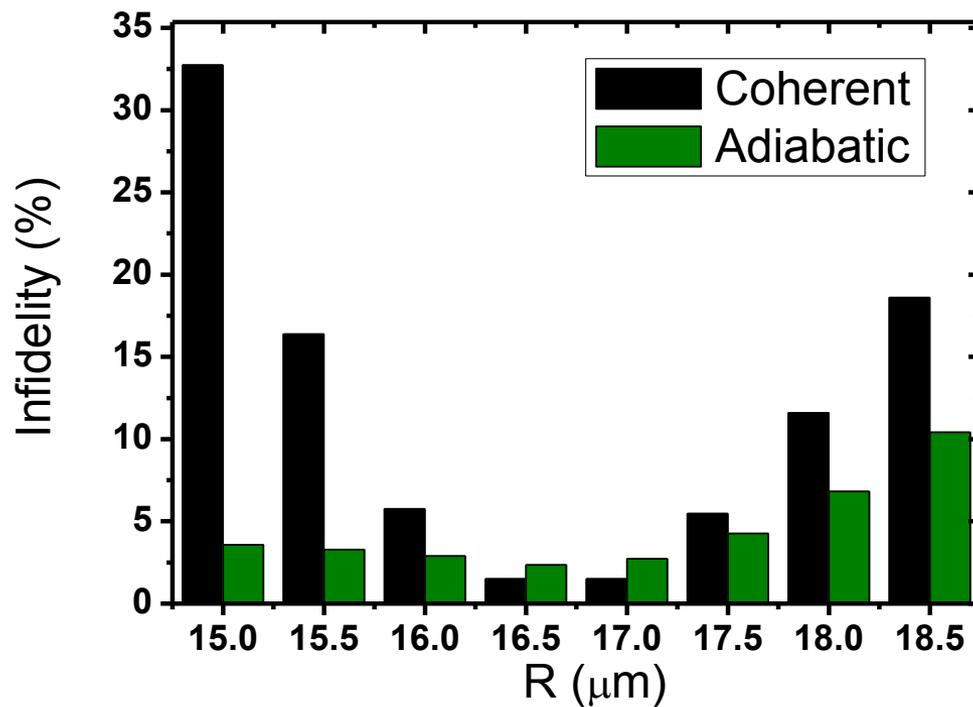
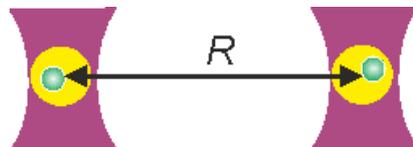
# Динамика населенностей и фаз



# Состояния Белла



# Точность состояний Белла



# Выводы

1. Адиабатическое прохождение резонансов Фёрстера может быть использовано для снижения чувствительности точности двухкубитовых вентилей к флуктуациям межатомного расстояния
2. Радиочастотные резонансы Фёрстера могут быть использованы для реализации двухкубитовых вентилей

# Публикации

1. I.I.Beterov, M.Saffman, E.A.Yakshina, D.B.Tretyakov, V.M.Entin, S.Bergamini, E.A.Kuznetsova, and I.I.Ryabtsev, "**Two-qubit gates using adiabatic passage of the Stark-tuned Förster resonances in Rydberg atoms**", **Phys. Rev. A**, 2016 v.94, p.062307;
2. I.I. Beterov, G.N. Hamzina, E.A. Yakshina, D.B. Tretyakov, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev "**Adiabatic passage of radiofrequency-assisted Forster resonances in Rydberg atoms for two-qubit gates and generation of Bell states**", **arXiv:1710.04384**