RQC Russian Quantum Center

Центр Квантовых Технологий

# Атомные и оптические квантовые вычисления (первый отчётный этап)

**Станислав Страупе**

Центр квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

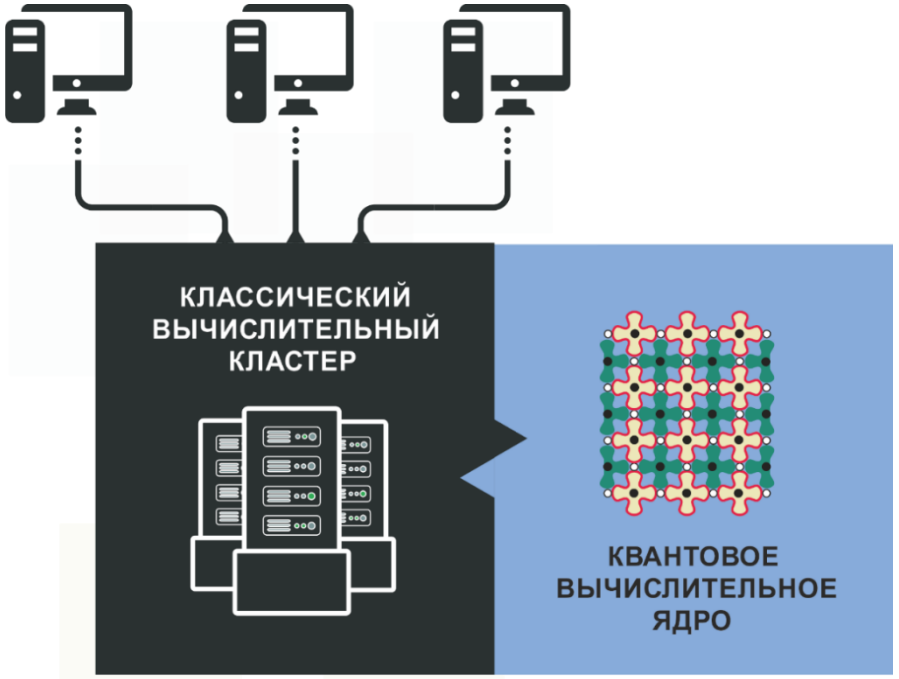
Российский Квантовый Центр

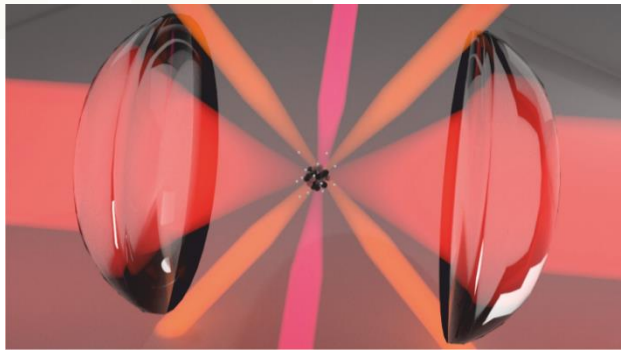
# Квантовая вычислительная система на одиночных нейтральных атомах

Центр Квантовых Технологий

**Задачи первого этапа работ по ДК:**

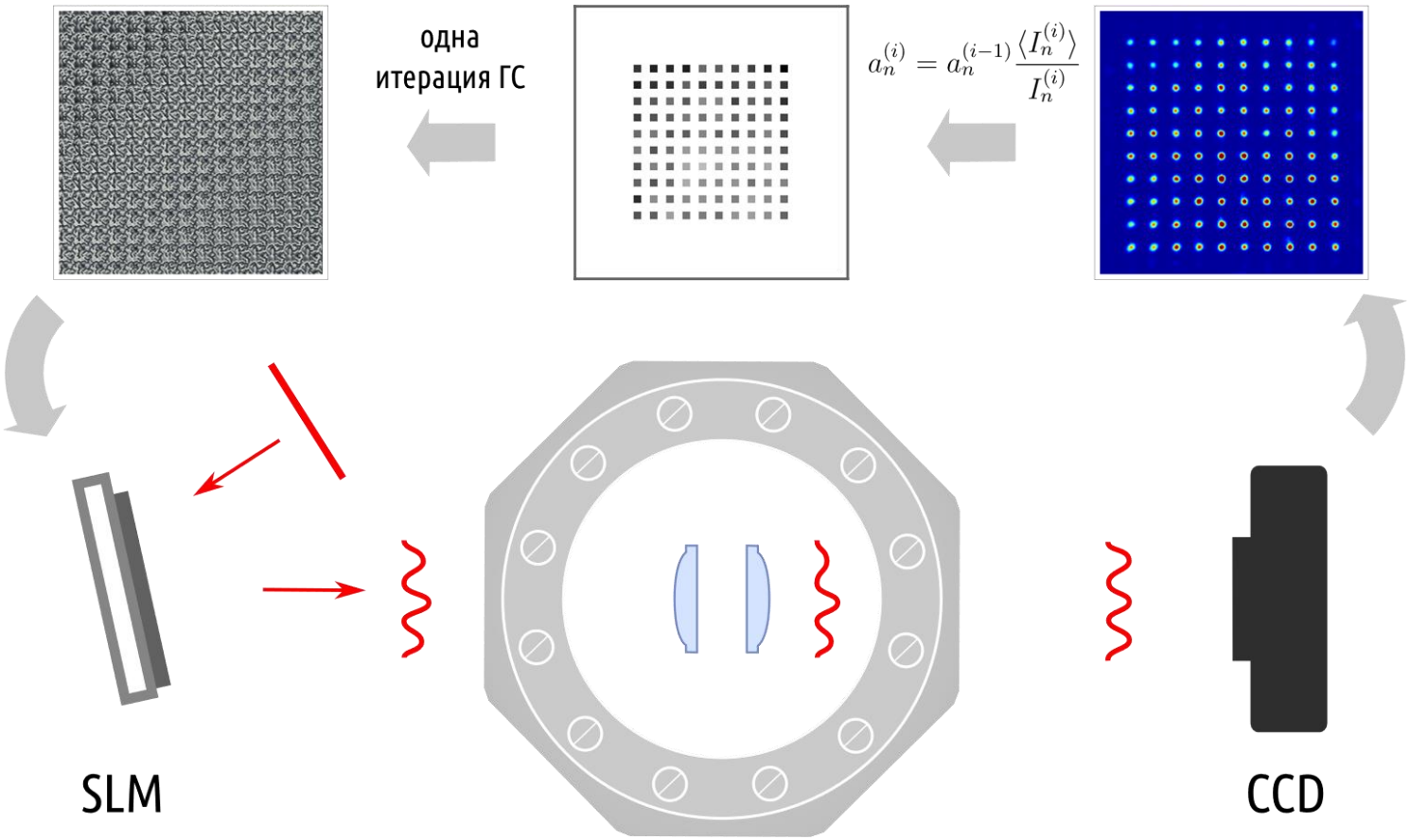
- Разработка теоретической модели ошибок в атомном квантовом регистре
- Реализация классического симулятора гейтовых схем с настраиваемой моделью ошибок
- Настройка реалистичной модели ошибок в симуляторе



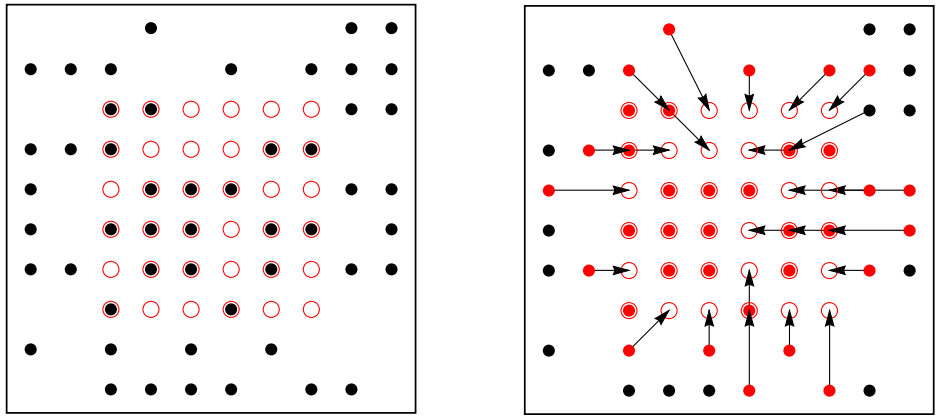



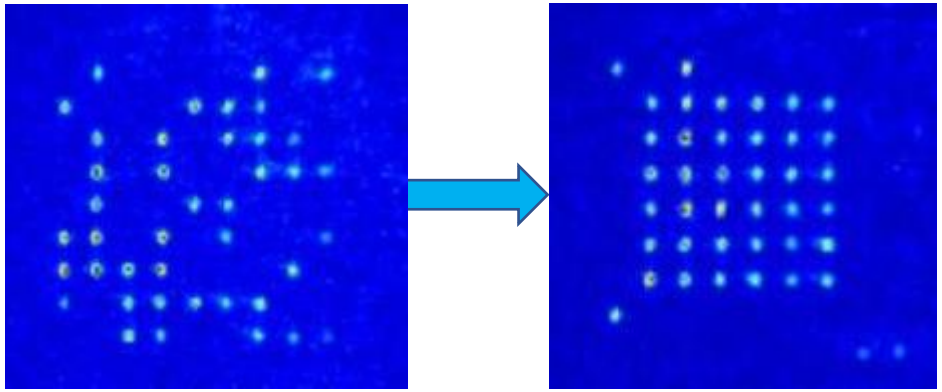
# Одиночные атомы в массивах микроловушек

Центр Квантовых Технологий



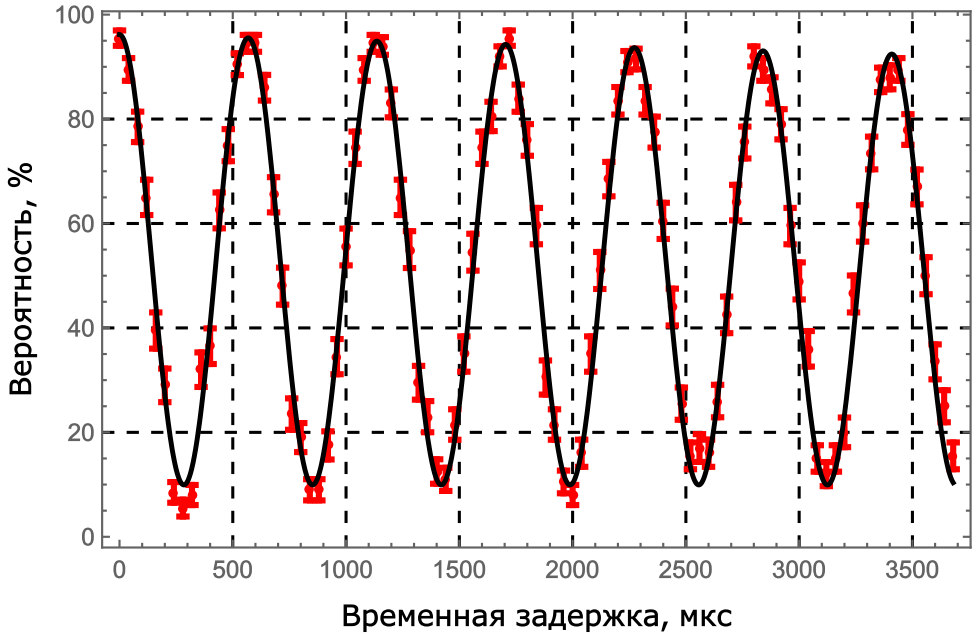

Квантовый регистр из 36 упорядоченных одиночных атомов





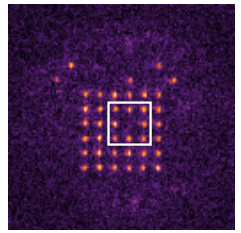
# Индивидуальная адресация кубитов в массиве

Центр Квантовых Технологий



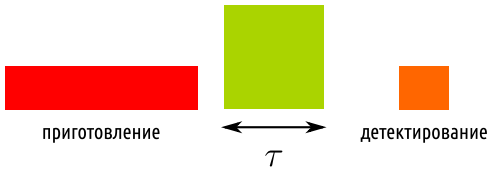




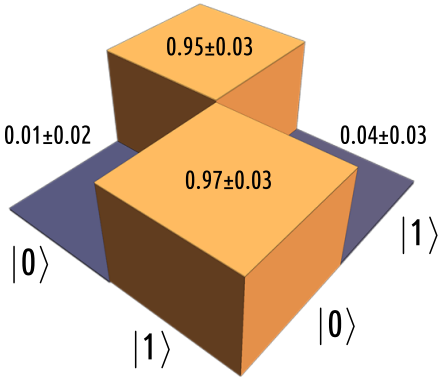


| | | |
|---|---|---|
| 0.95 | 0.94 | 0.95 |
| 0.97 | 0.01 | 0.95 |
| 0.96 | 0.94 | 0.94 |

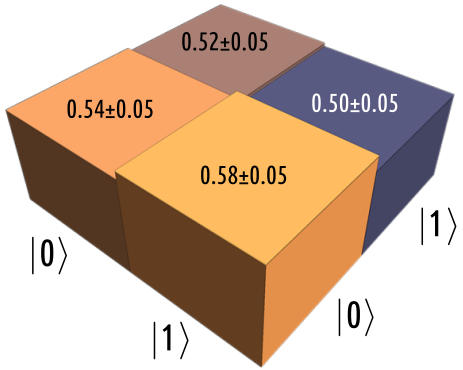
кросс-корреляции при π-импульсе в центральном узле




$$V \simeq 90\%$$
$$\tilde{V} = 96.0 \pm 1.6\%$$

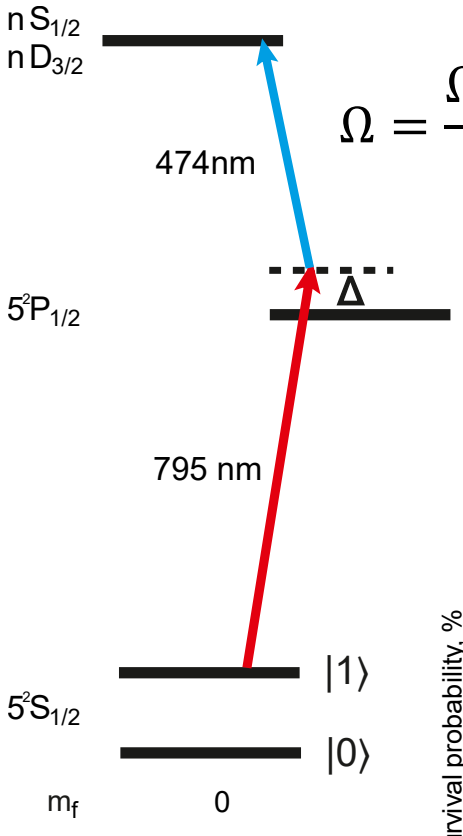



операция NOT




преобразование Адамара

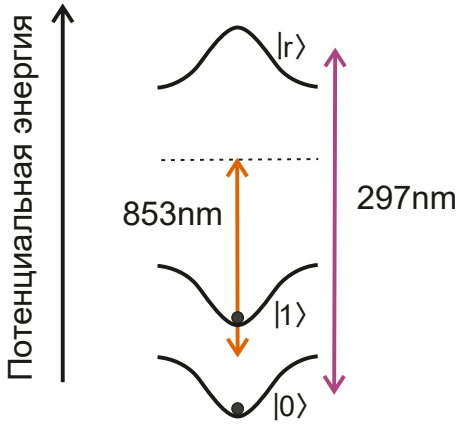
# Ридбергоские состояния одиночных атомов



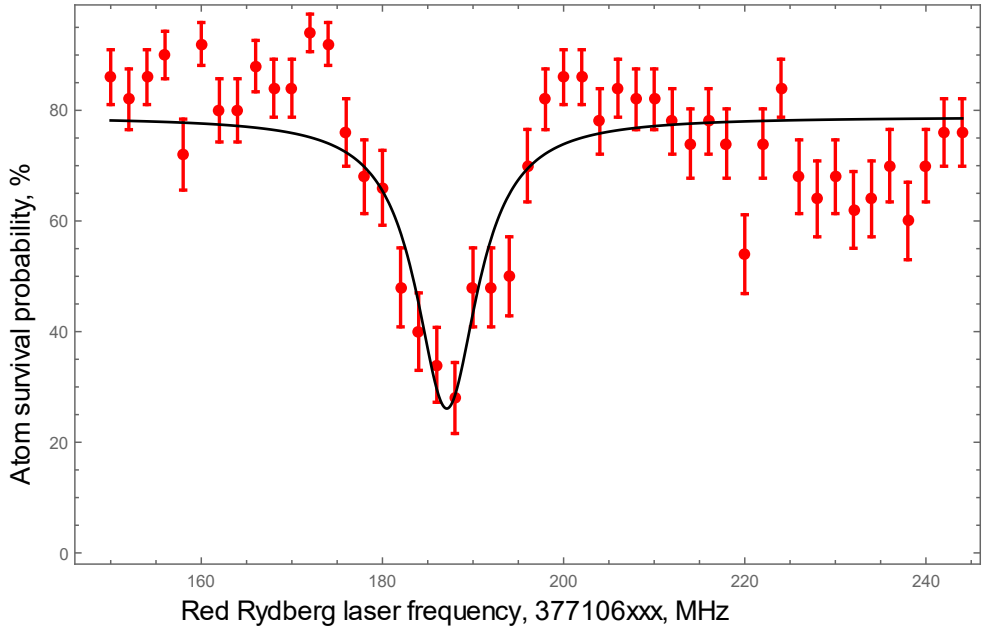

$$\Delta = 3\ \text{ГГц}$$

$$\Omega = \frac{\Omega_1 \Omega_2}{\Delta} = 0.1 \ldots 10\ \text{МГц}$$

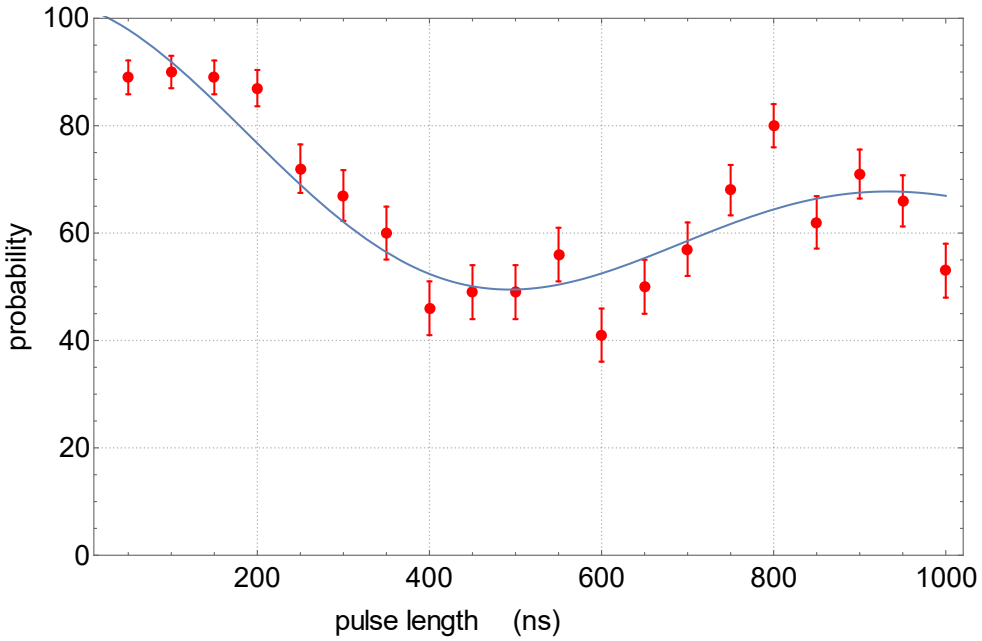
- Двухфотонное возбуждение ридберговских состояний
- Оптическое детектирование




Двухфотонный резонанс




Осцилляции Раби ground-Rydberg



# Учитываемые в модели ошибок процессы

Центр Квантовых Технологий

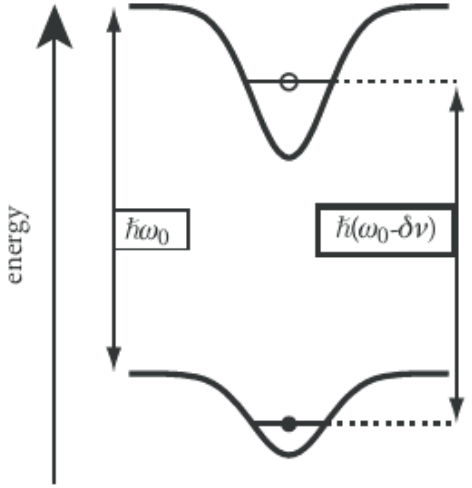
- **Потери атома из ловушки**
  Причины:
  - столкновения с молекулами остаточного газа (~ 10 - 100 с)
  - Параметрический нагрев (~100 с)

- **Продольная релаксация логических уровней кубита**
  Причина – спонтанное рамановское рассеяние фотонов ловушки
  Характерное время $T_1$~ 10 с для большой отстройки (~30 ТГц)

- **Необратимая дефазировка (однородная поперечная релаксация)**
  Причины:
  - флуктуации интенсивности лазера ловушки ($T_2$~ 1 с)
  - флуктуации положения ловушки ($T_2$~ 1 с)
  - нагрев из-за рассеяния фотонов ловушки ($T_2$~ 1 с)
  - флуктуации магнитного поля ($T_2$~ 1 с)

- **Обратимая дефазировка (неоднородная поперечная релаксация)**
  Причины:
  - дифференциальный световой сдвиг
    характерное время ~ $T_2^*$ ~ 10 мс
  - Может быть скомпенсирована с помощью спинового эха

Дифференциальный световой сдвиг

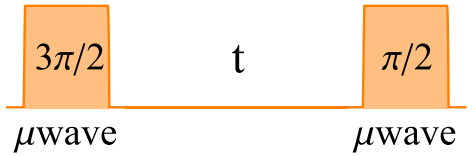


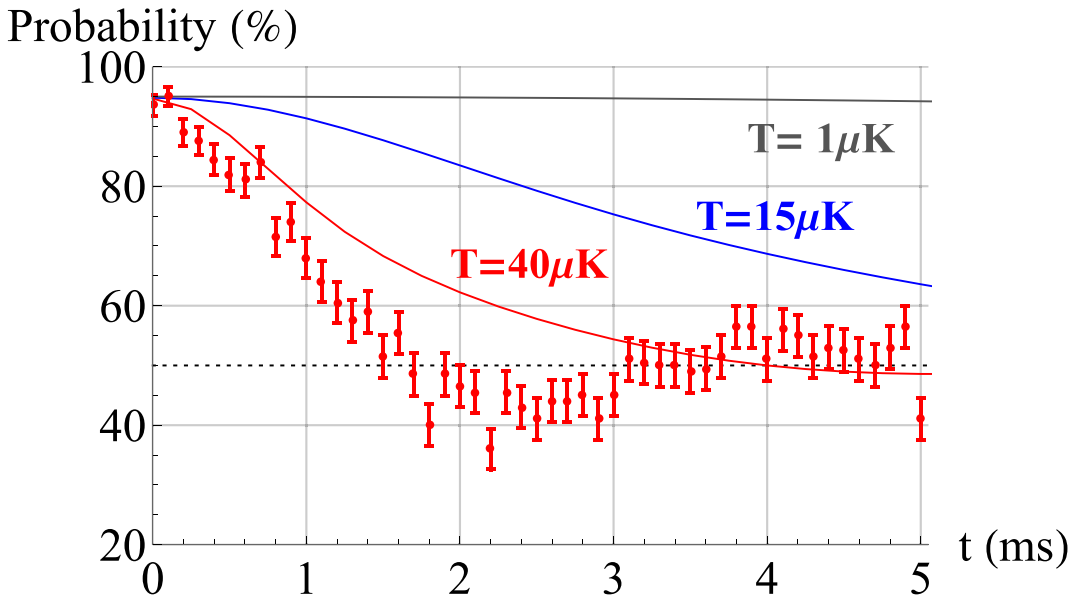
# Моделирование процессов декогеренции

- Численное решение мастер-уравнения без свободных параметров
- Полностью квантовое описание движения в ловушке

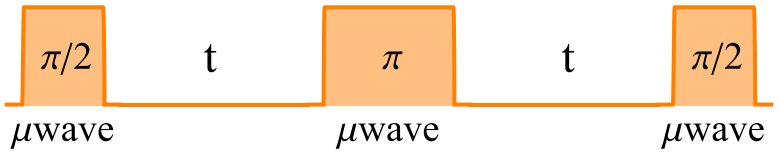
$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[\hat{H}_0,\ \hat{\rho}(t)] - \frac{i}{\hbar}[\hat{H}_{\mathrm{mw}}(t),\ \hat{\rho}(t)] + \left(\frac{\partial\hat{\rho}}{\partial t}\right)_{\mathrm{rel}}$$

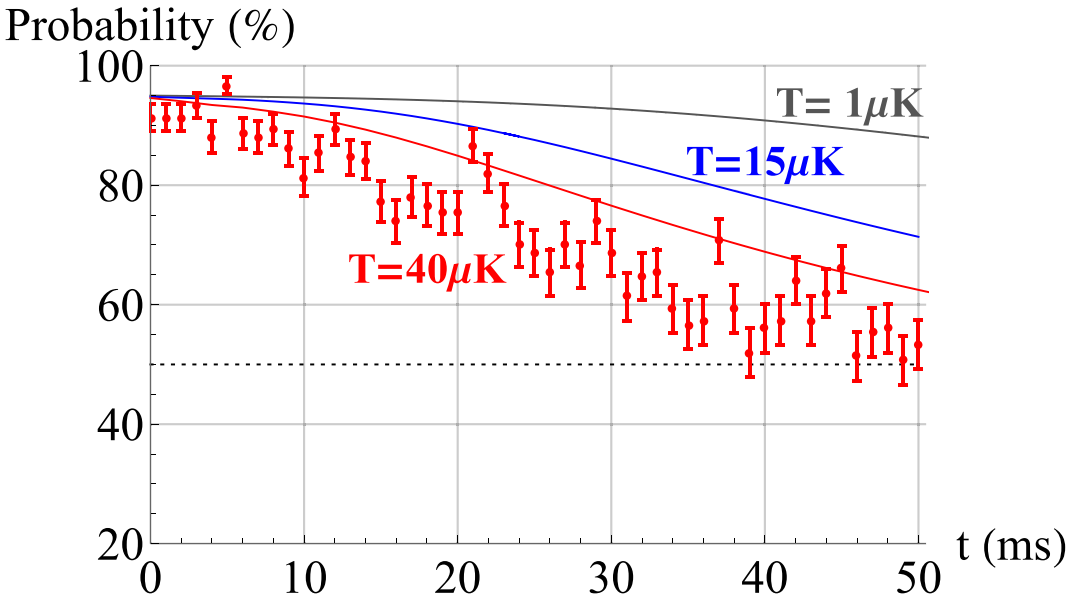
## Рамзи-интерференция




## Спиновое эхо



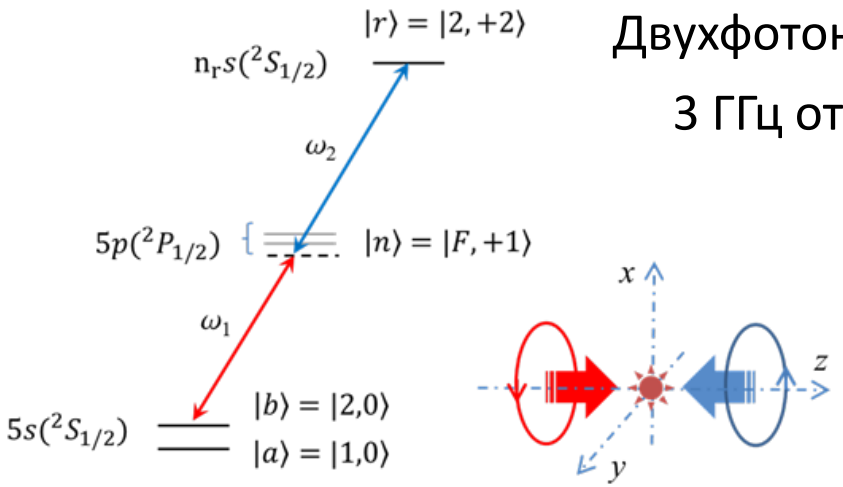



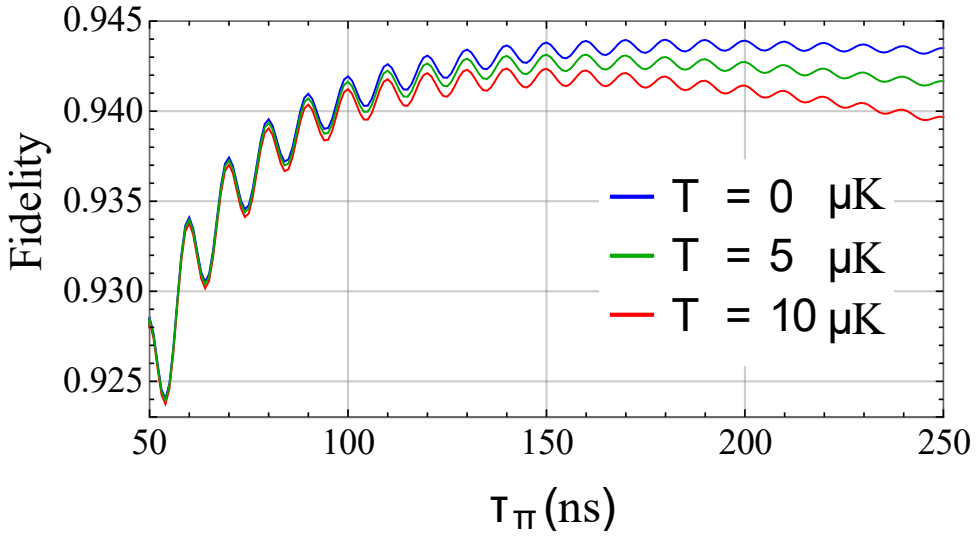

L.V.Gerasimov et al. PRA **103**, 062426 (2021)

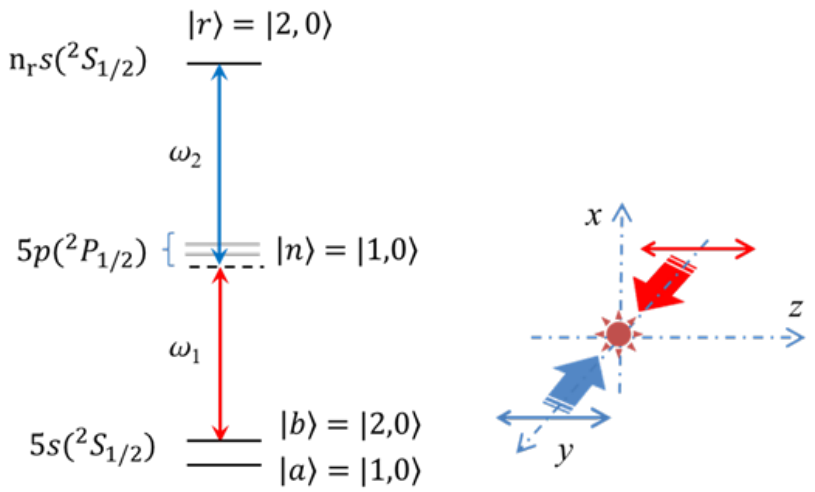
# Расчёт точности двухкубитных гейтов

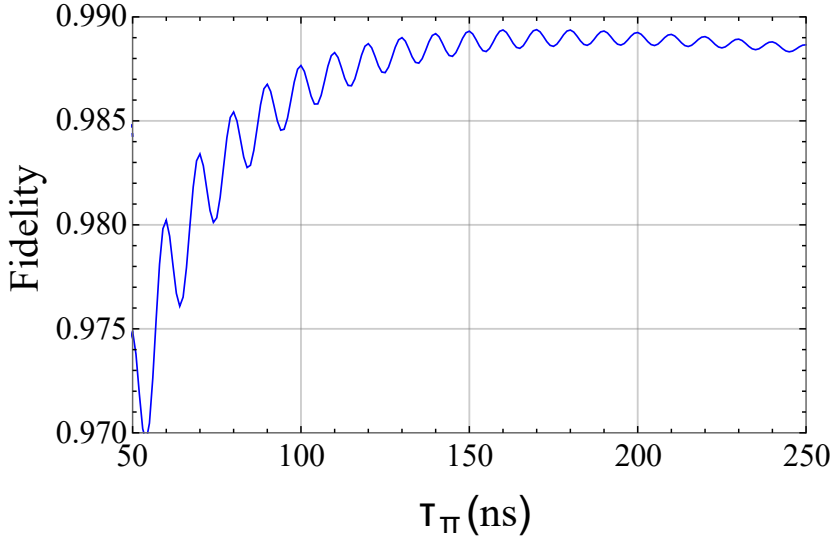
Двухфотонное возбуждение

3 ГГц отстройка от $5P_{1/2}$




L.V.Gerasimov et al. arXiv: 2205.03383 (2022)

# Моделирование томографии гейта с учётом ошибок

Центр Квантовых Технологий

В качестве примера моделирования гейтовой схемы была промоделирована полная томография квантового процесса, соответствующего CNOT гейту
(т.е. последовательности **приготовление-H-CZ-H-измерение**)

Действительная часть χ-матрицы процесса

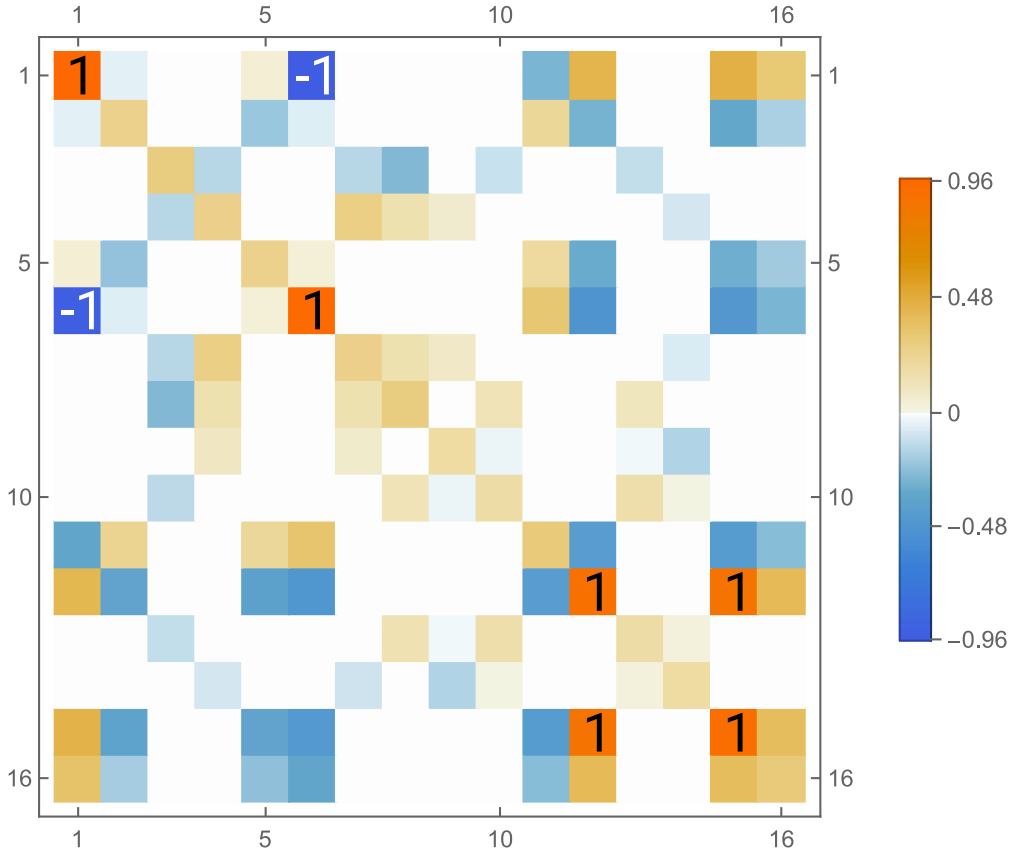
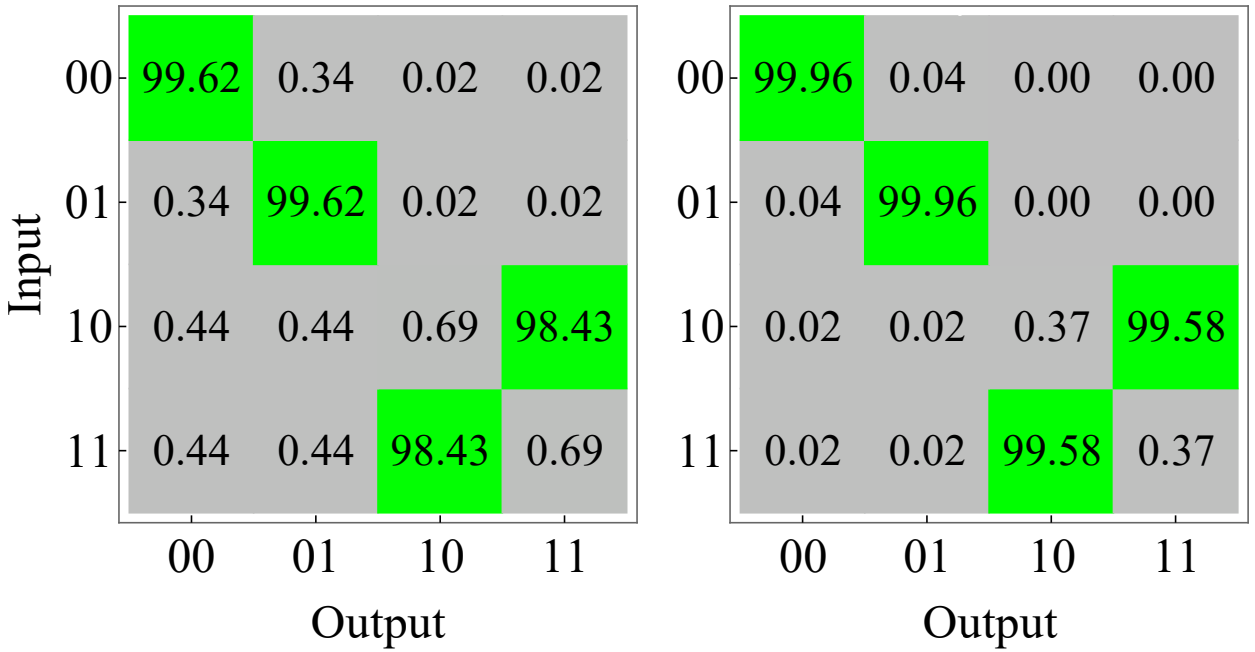



Таблица истинности CNOT гейта




L.V.Gerasimov et al. arXiv: 2205.03383 (2022)

# Основные результаты (атомы)

Центр Квантовых Технологий

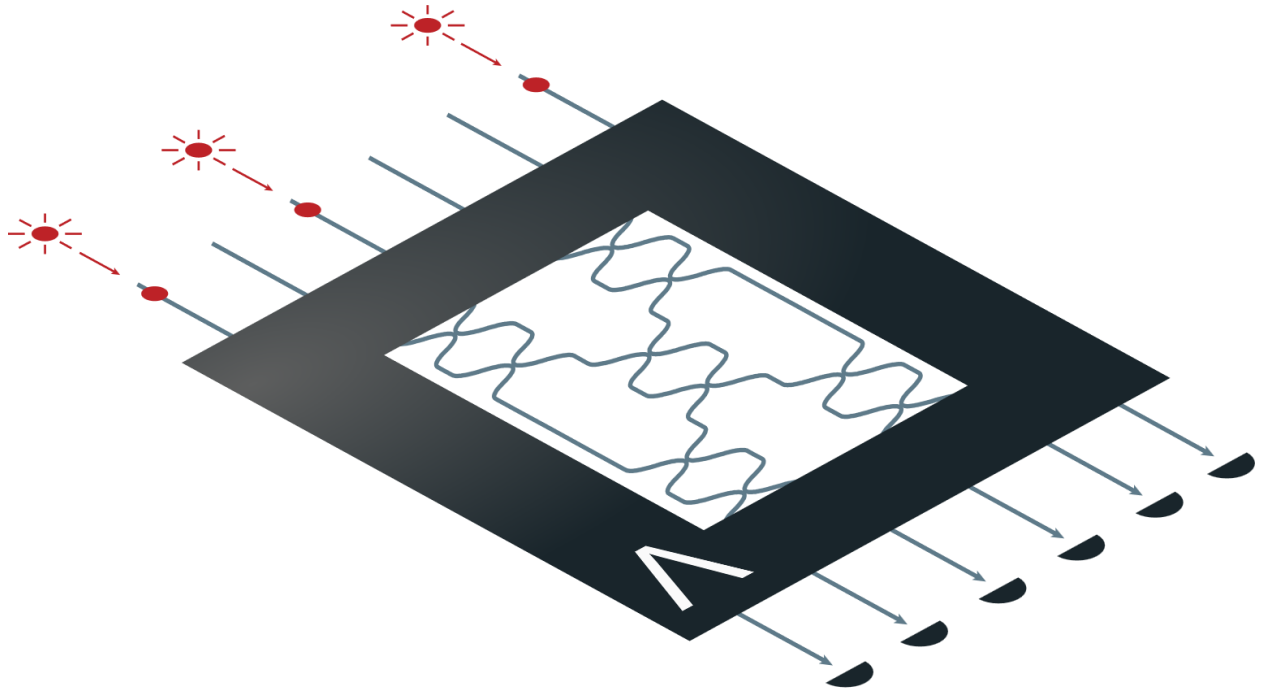
- Разработана численная модель квантового регистра на основе одиночных атомов в оптических ловушках
- Модель учитывает все основные механизмы декогеренции. Движение атома в ловушке рассматривается квантовомеханически, что делает модель применимой даже вблизи основного колебательного состояния
- Модель учитывает различные каналы ошибок в двухкубитных вентилях, в том числе некогерентное рассеяние из промежуточного состояния и эффекты отдачи
- Реализован программный симулятор гейтовых схем, имеющий настраиваемую модель ошибок, параметры которой взяты из модельных расчётов
- Показана применимость симулятора для моделирования реалистичных ситуаций, в частности – полной томографии двухкубитного гейта с ошибками

# Линейно-оптический квантовый вычислитель

Центр Квантовых Технологий

**Задачи первого этапа работ по ДК:**

- Разработка численной модели линейно-оптического квантового вычислителя
- Разработка модели масштабируемого квантового линейно-оптического квантового компьютера
- Разработка методов эпитаксиального роста микрорезонаторных структур с квантовыми точками
- Разработка и верификация численной модели интегрального сверхпроводящего детектора фотонов



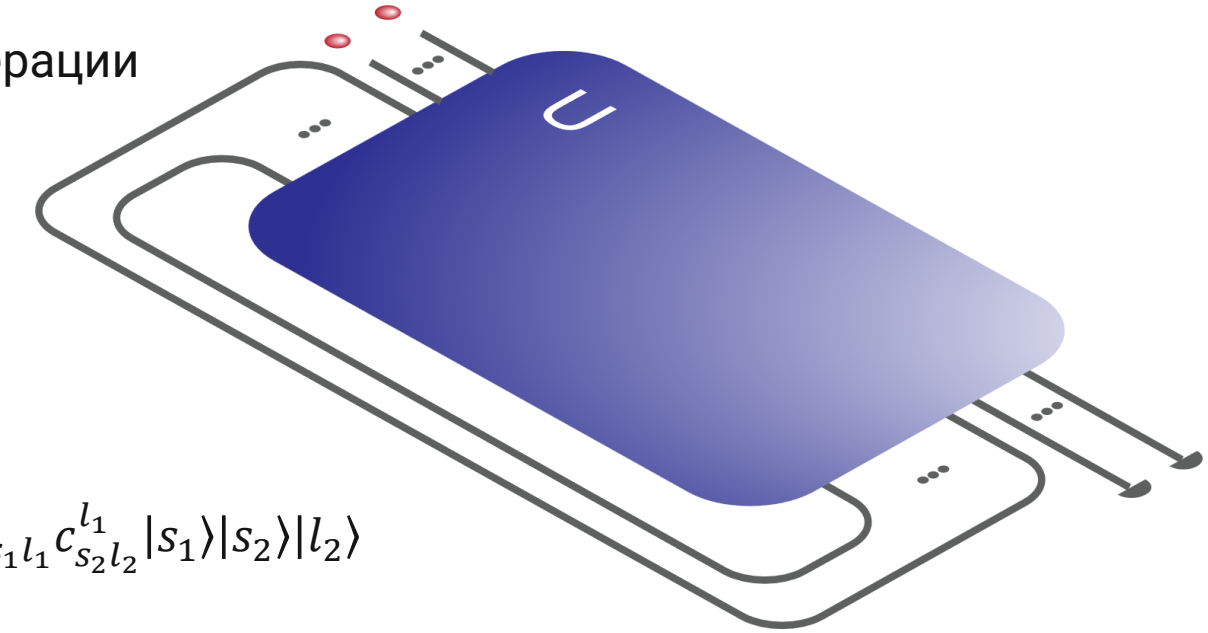
# Предлагаемый промежуточный вариант архитектуры

Центр Квантовых Технологий

$|l\rangle$ - Фоковские состояния в зацикленных модах

$|s\rangle$ - Фоковские состояния в логических модах

$|u\rangle$ - Фоковские состояния, добавляемые на каждой итерации




Итерация 1:

$$|\psi_{in}^{1}\rangle \rightarrow \sum_{s} \sum_{l \in K_s} c_{sl} |s\rangle |l\rangle$$

Итерация 2:

$$|\psi_{in}^{2}\rangle = \sum_{s} \sum_{l \in K_s} c_{sl} |s\rangle (|l\rangle |u\rangle) \rightarrow \sum_{s_1, s_2} \sum_{l_1 \in K_{s_1}} \sum_{l_2 \in K_{s_2}} c_{s_1 l_1} c_{s_2 l_2}^{l_1} |s_1\rangle |s_2\rangle |l_2\rangle$$

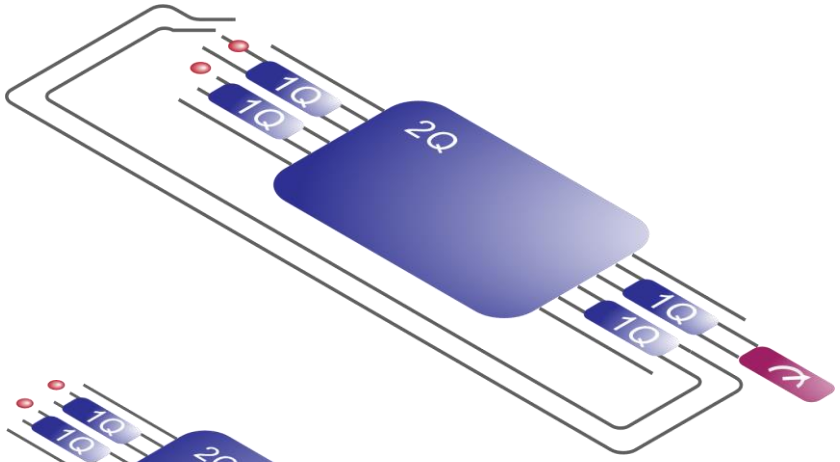
Итерация N:

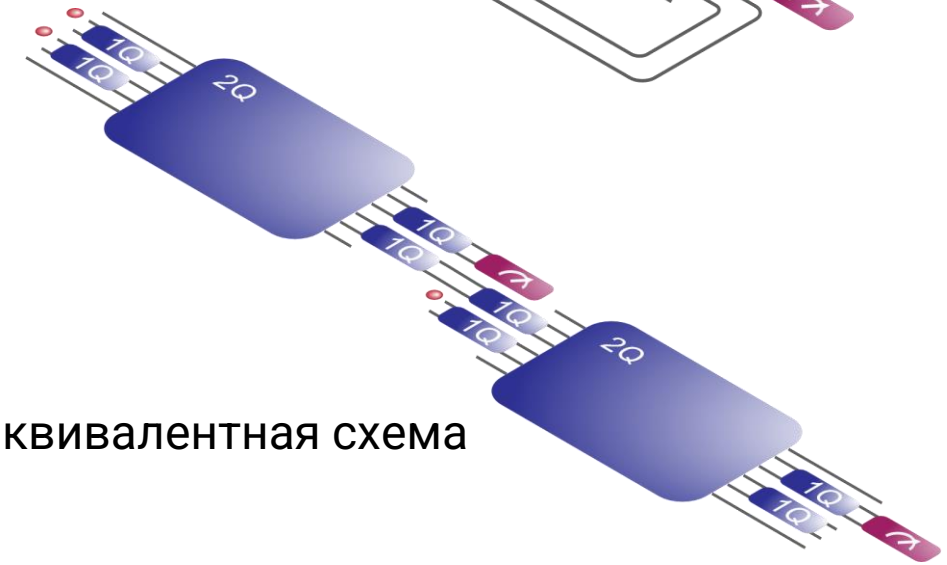
$$|\psi_{out}\rangle = \sum_{s_1, l_1 \in K_{s_1}} \dots \sum_{s_N, l_N \in K_{s_N}} c_{s_1 l_1} c_{s_2 l_2}^{l_1} \dots c_{s_N l_N}^{l_{N-1}} |s_1\rangle |s_2\rangle \dots |s_N\rangle |l_N\rangle$$

# Моделируемая конфигурация

Центр Квантовых Технологий

Циклическая двухкубитная схема



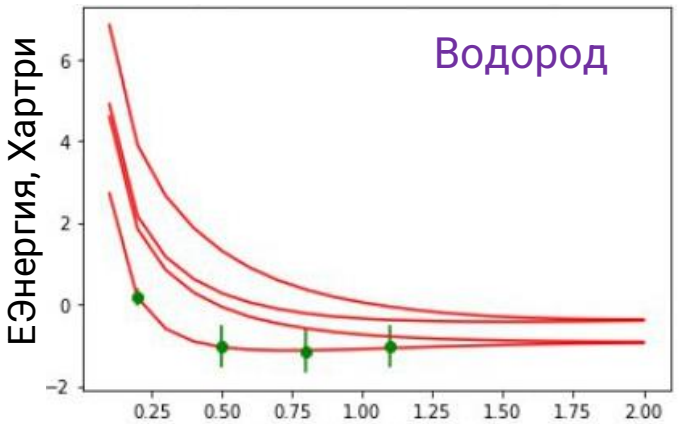

Эквивалентная схема

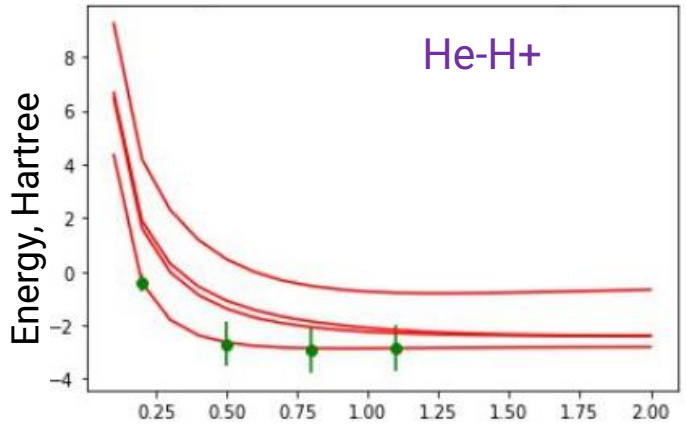
Параметры симулируемого процессора:

- Циклическая архитектура
- Пороговые детекторы с эффективностью 0.85
- Пропускание петли 0.7

Моделировались вариационные алгоритмы расчёта молекул:

- водорода $H_2$
- гидрида гелия $He - H^+$



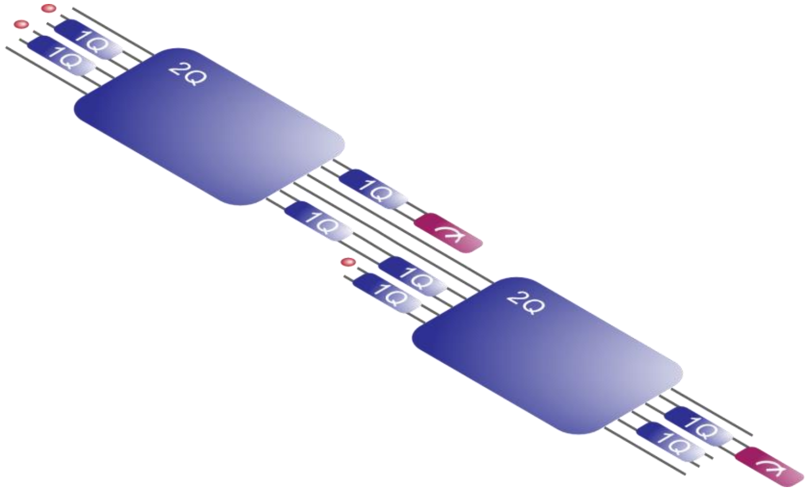



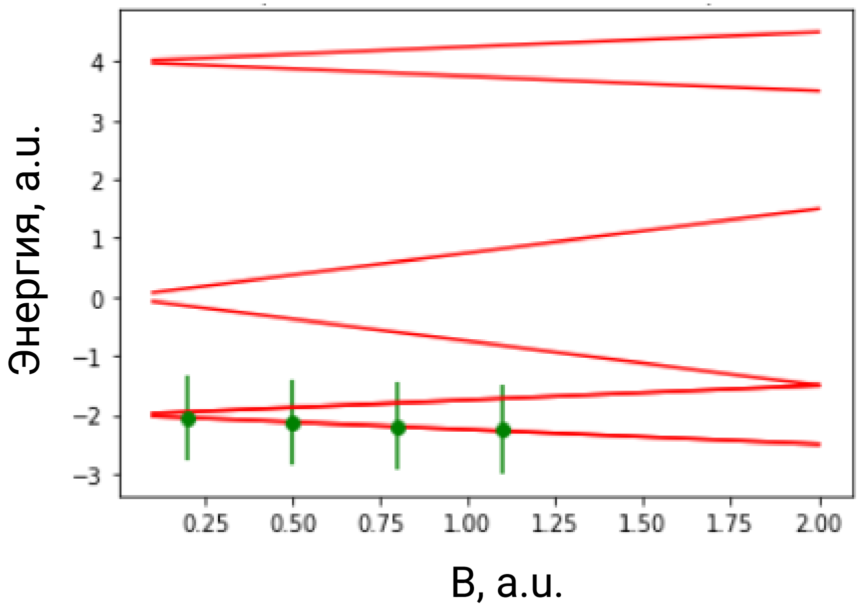
# Моделирование XY-модели

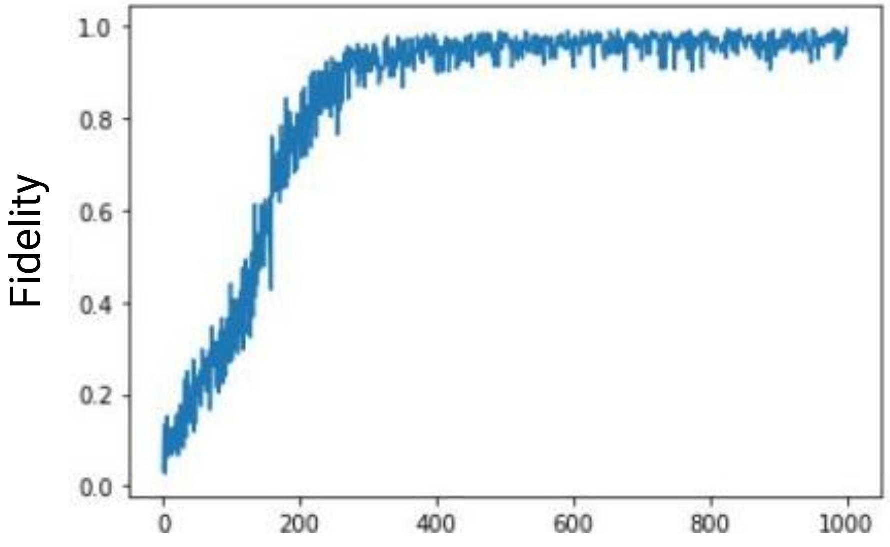
Трехкубитная XY модель:

$$H_{XY} = J\sum_i (X_i X_{i+1} + Y_i Y_{i+1}) + \frac{B}{4}\sum_i Z_i\,, \mathrm{i} = 1,2,3.$$

Основное состояние: $|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|100\rangle + |010\rangle + |001\rangle)$ , когда $B \sim J$.

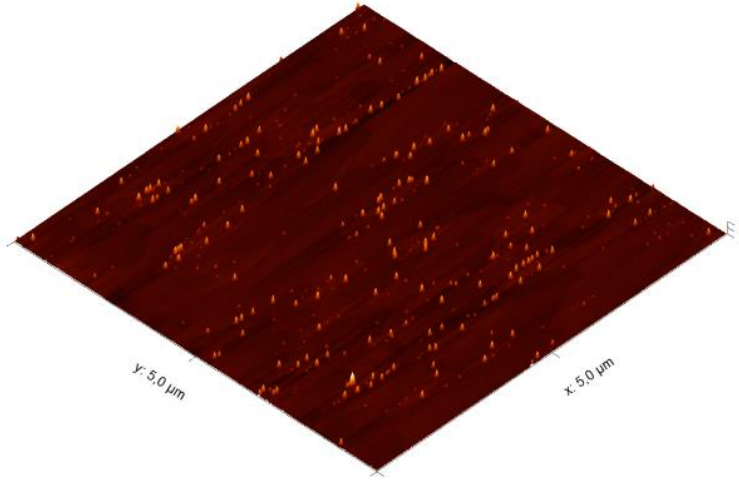


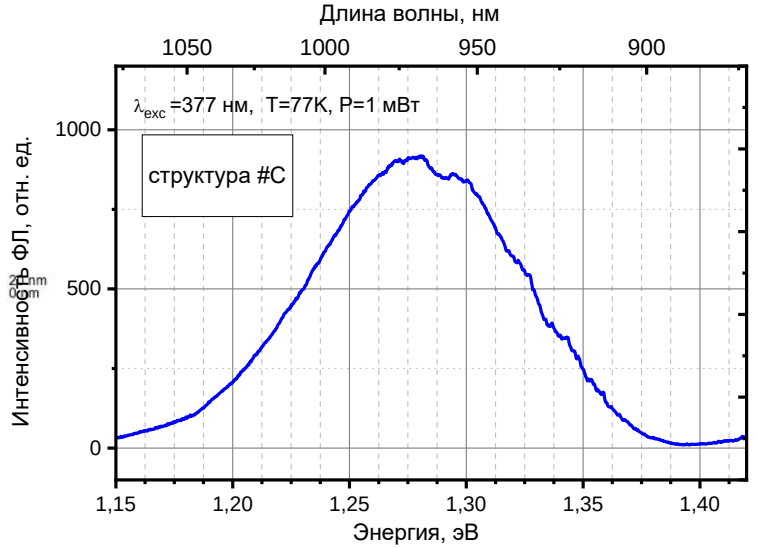



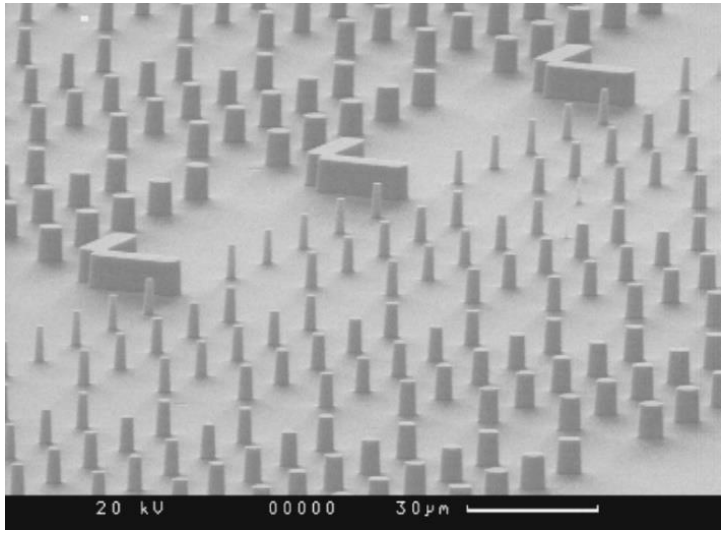
# Отработка методов роста и постростовой обработки полупроводниковых КТ

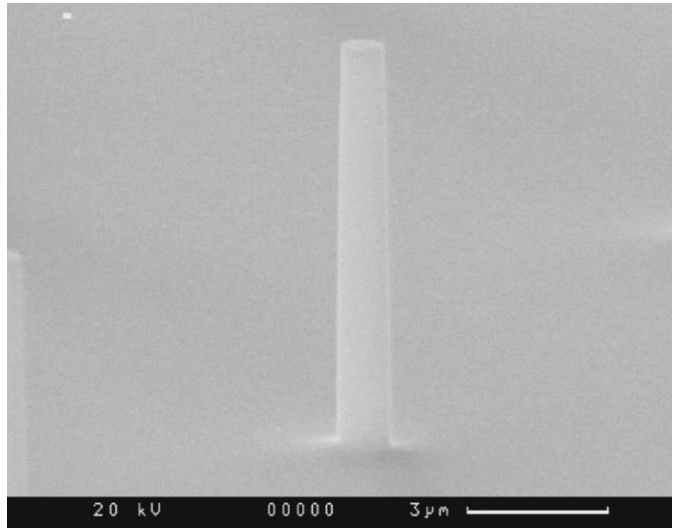
АСМ изображение поверхности 5х5 мкм2 и спектр флуоресценции структур с КТ InAs/GaAs




Изображение изготовленных тестовых полупроводниковых микрострук-тур в РЭМ



# Основные результаты (фотоны)

Центр Квантовых Технологий

- Разработана численная модель линейно-оптического квантового вычислительного устройства
- Предложена архитектура линейно-оптического процессора с зацикленными модами для реализации вариационных алгоритмов
- В численном моделировании показана принципиальная возможность использования такой архитектуры для моделирования молекулярных гамильтонианов и спиновых цепочек
- Разработаны методы эпитаксиального роста микрорезонаторных структур с квантовыми точками. Разработаны методы постростовой обработки гетероструктур, позволяющие реализовывать трехмерные микрорезонаторные структуры
- Реализована численная модель роста вычислительного кластера в баллистической модели линейно-оптических квантовых вычислений (не вошла в доклад)
- Разработана численная модель интегрального сверхпроводящего детектора фотонов (не вошла в доклад)