



Учреждение Российской
академии наук
Физический институт
им. П.Н. Лебедева РАН



RQC

Russian
Quantum
Center

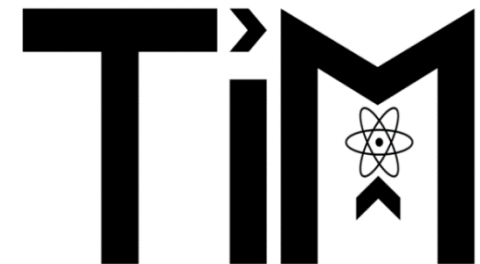
О разработке прототипа квантового процессора на основе ионов в ловушках

Н. Колачевский

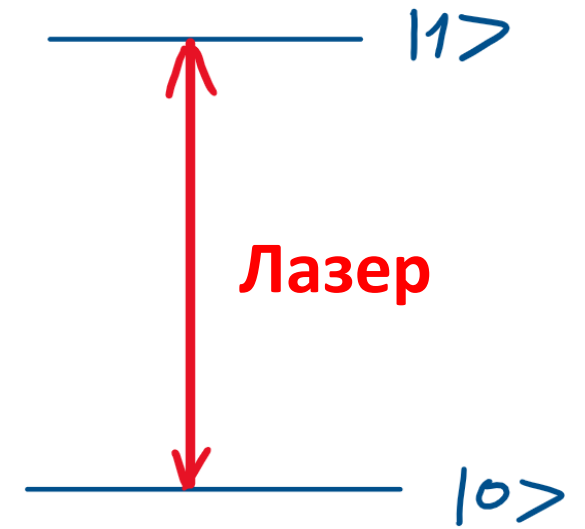
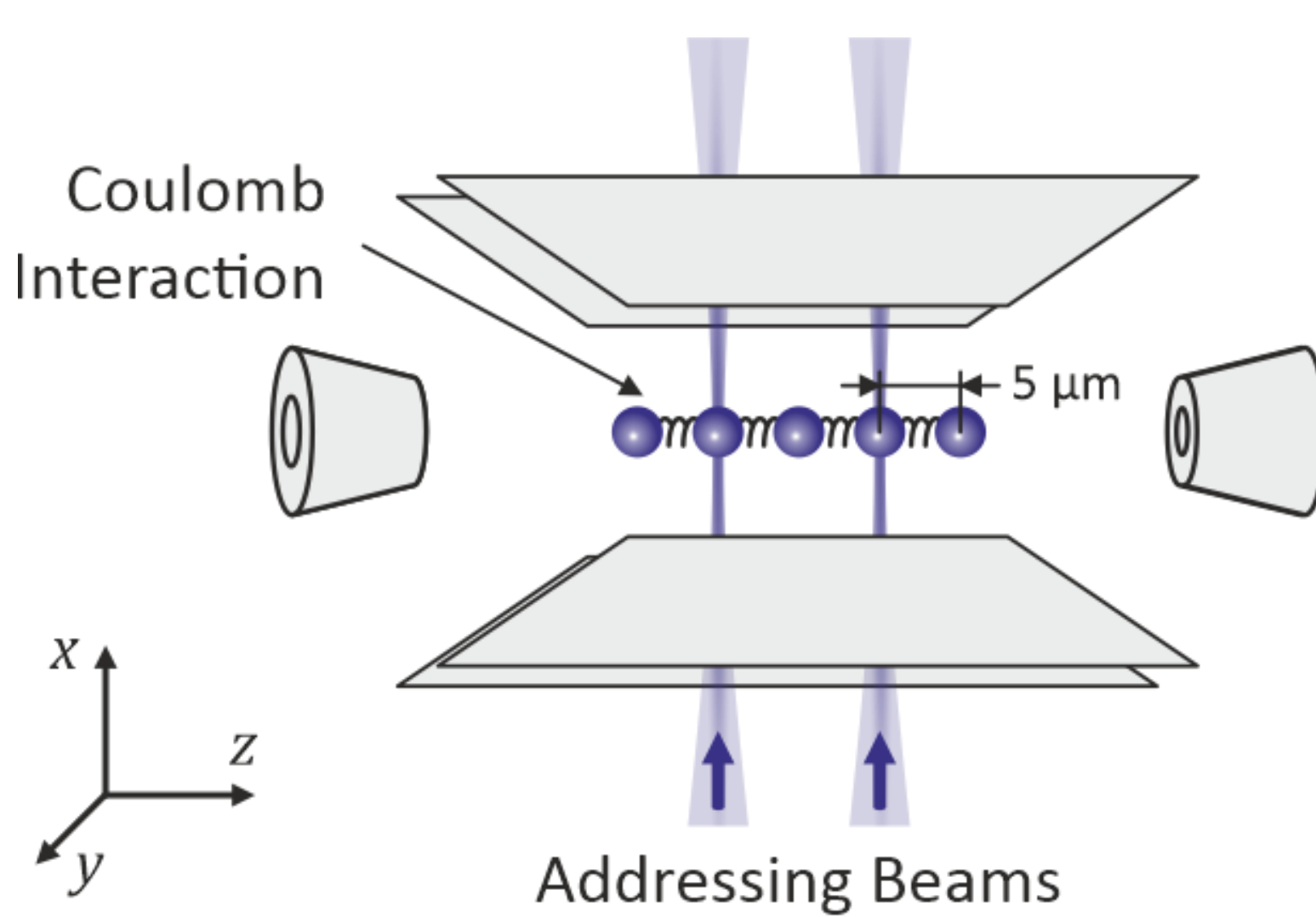


LEADING RESEARCH CENTER

QUANTUM
COMPUTING

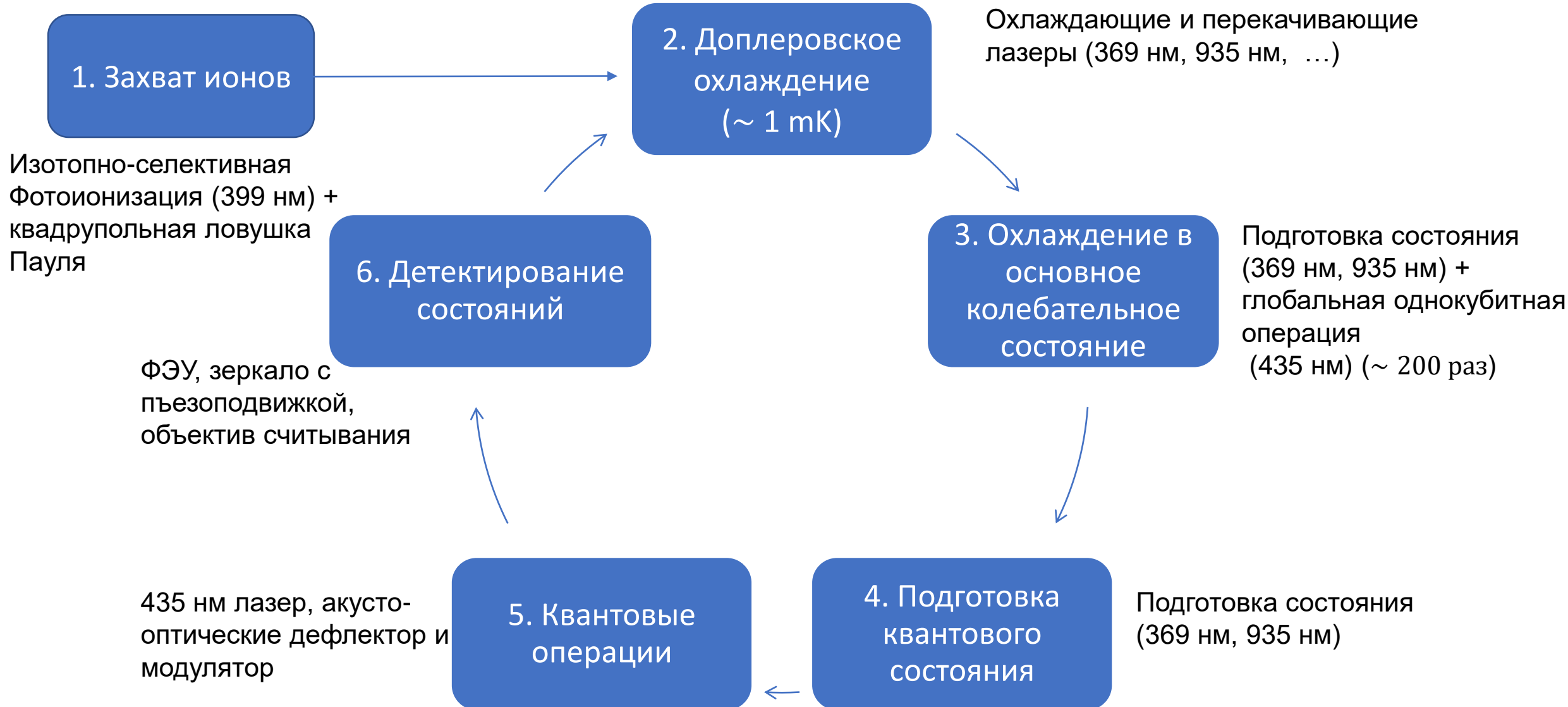


Ионная платформа

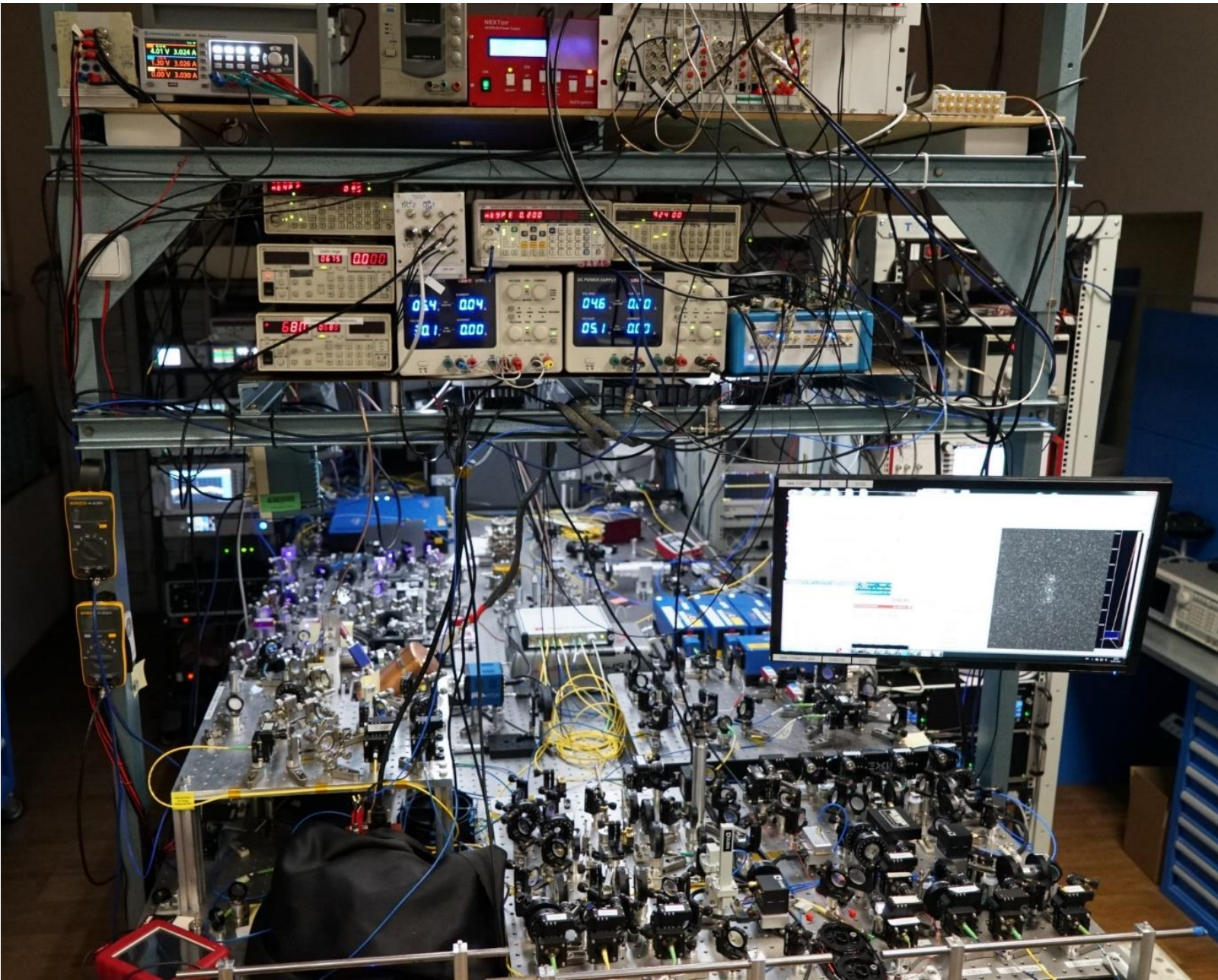


$$R_{\phi}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & ie^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} \\ ie^{-i\phi} \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix},$$

Алгоритм работы



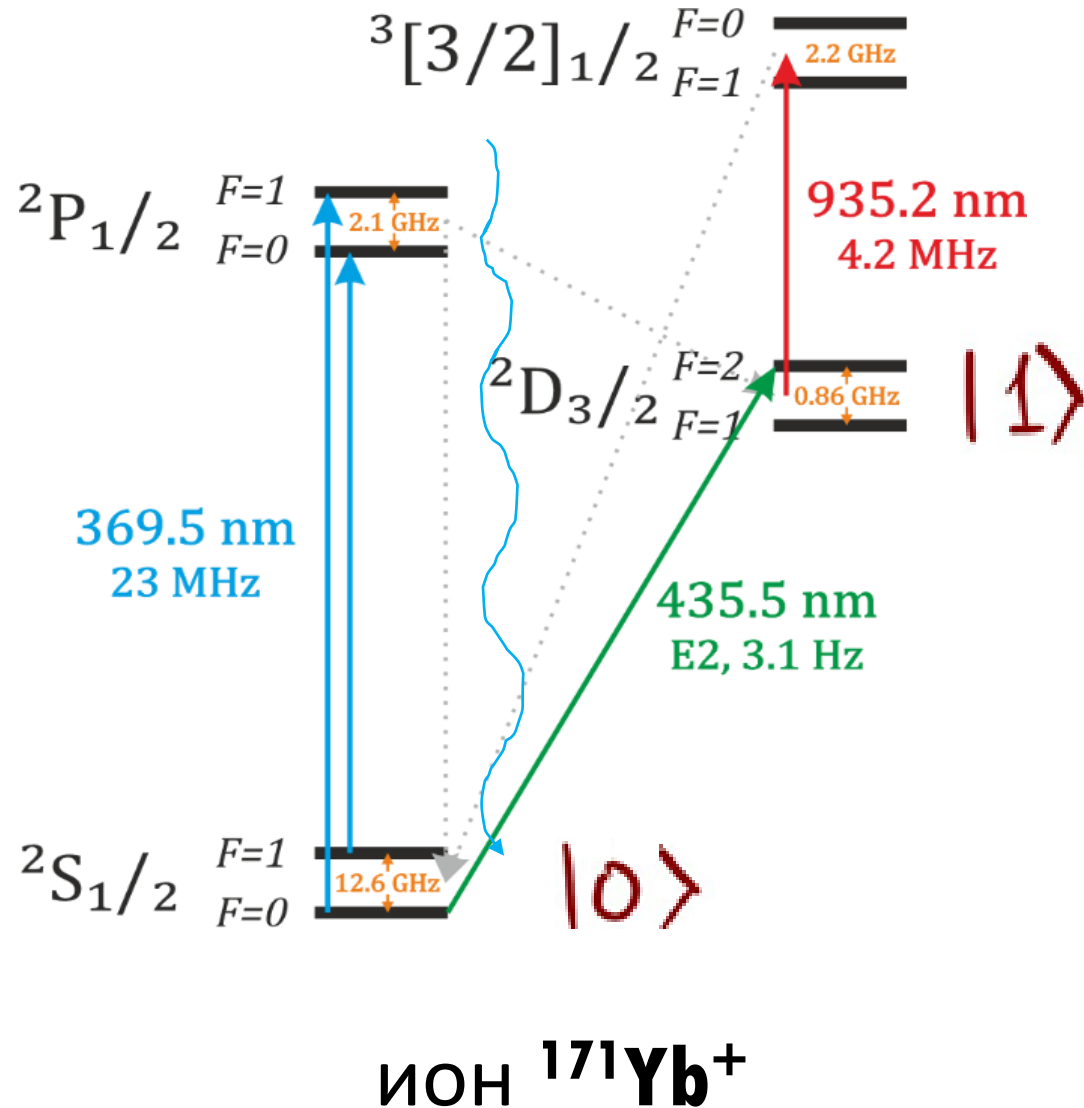
Прототип ионного компьютера ФИАН-РКЦ



В 2021 году

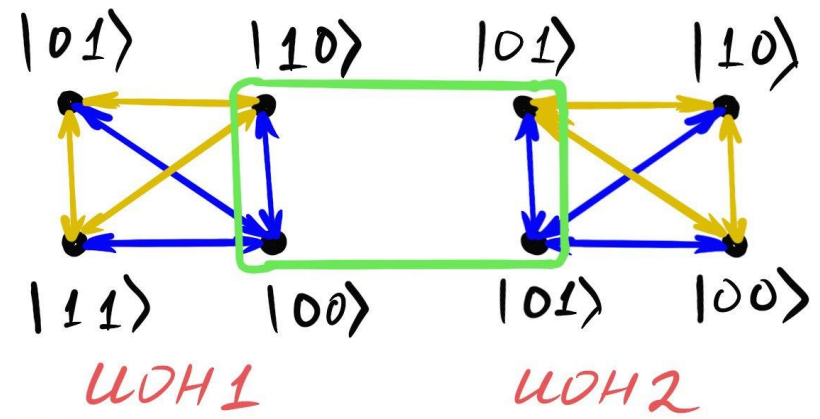
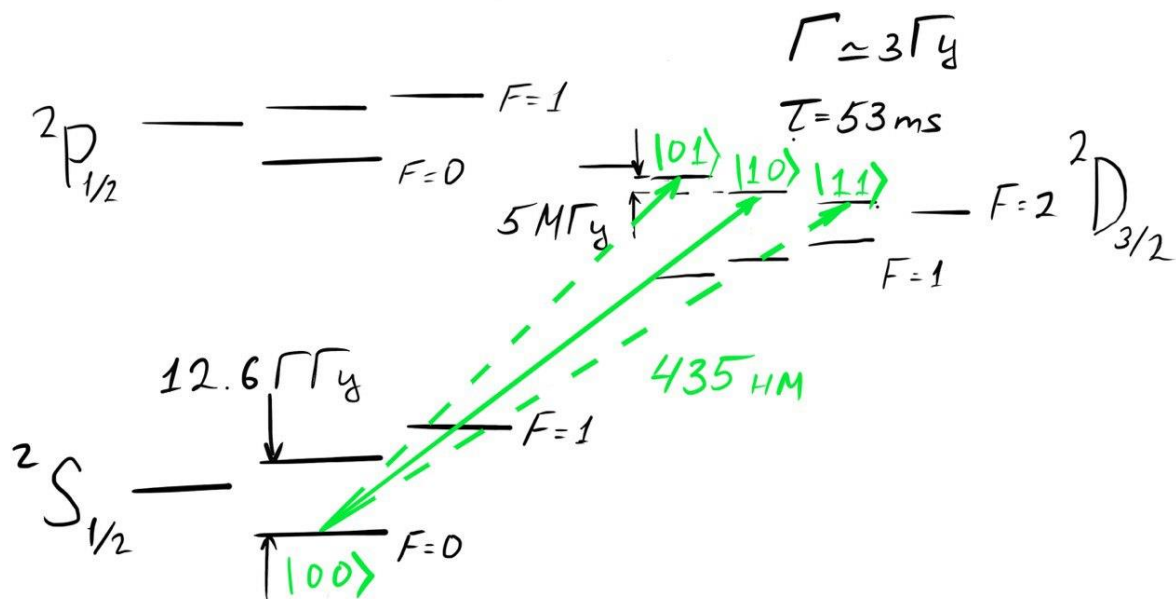
- Создан универсальный четырехкубитный квантовый компьютер на основе двух ионов $^{171}\text{Yb}^+$ с использованием кудитов
- Проведены двухкубитные операции типа Мельмера-Соренсона (**MS**)
- Проведен полный набор кудитных операций на паре ионов с индивидуальной адресацией
- Все результаты воспроизводимо подтверждены в **2**х контрольных экспериментах

Новизна



- Впервые использован оптический кубит **435.5 нм** в ионе иттербия-**171**
- Улучшенные возможности масштабирования при адресации
- Возможность реализации кубитов с использованием уровней зеемановской структуры

Кукварт на ионе $^{171}\text{Yb}^+$



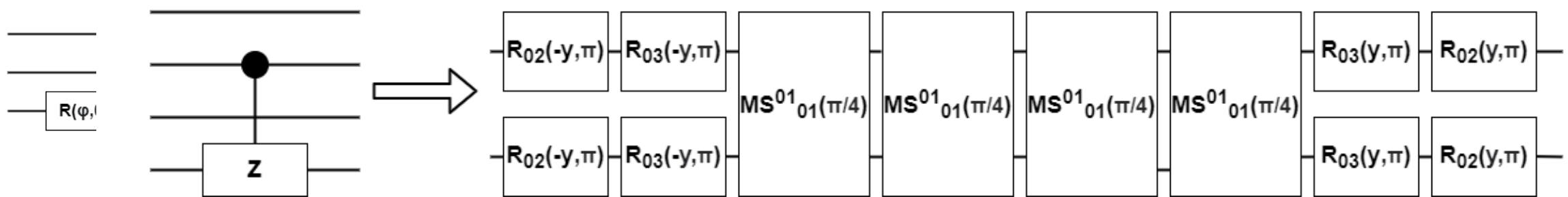
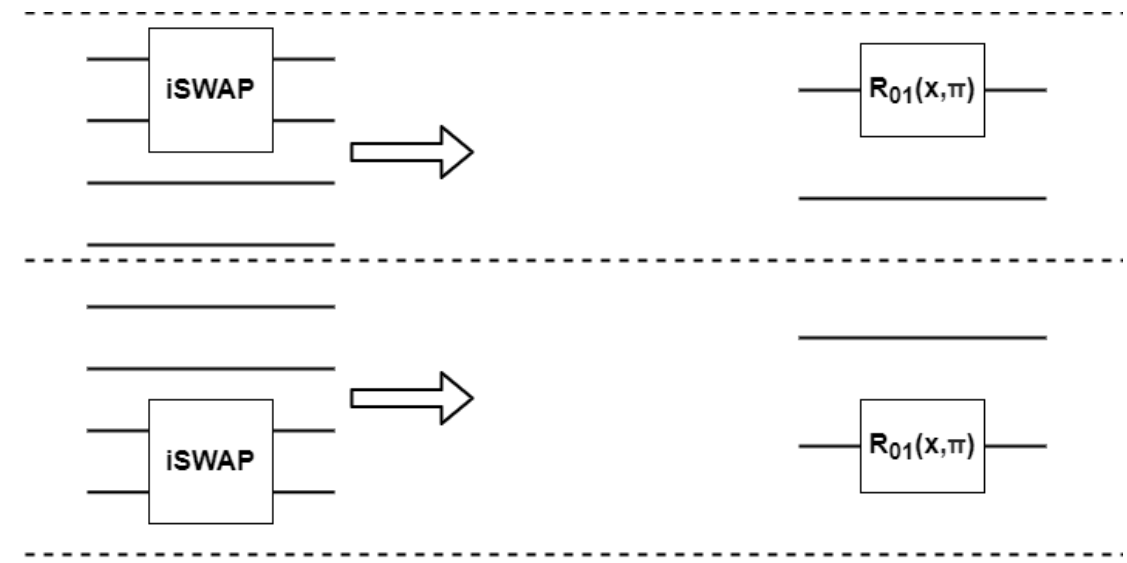
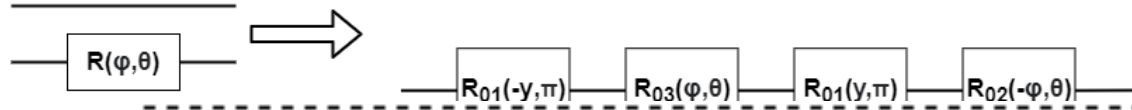
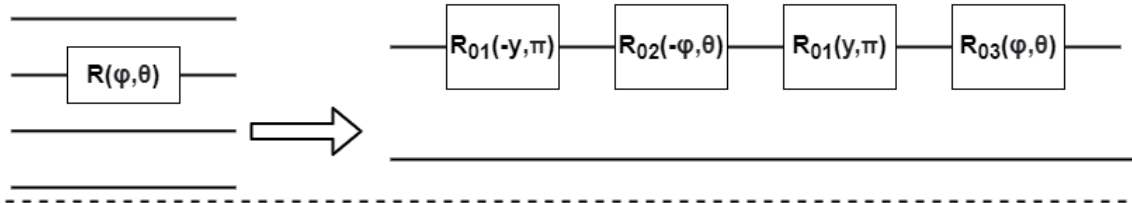
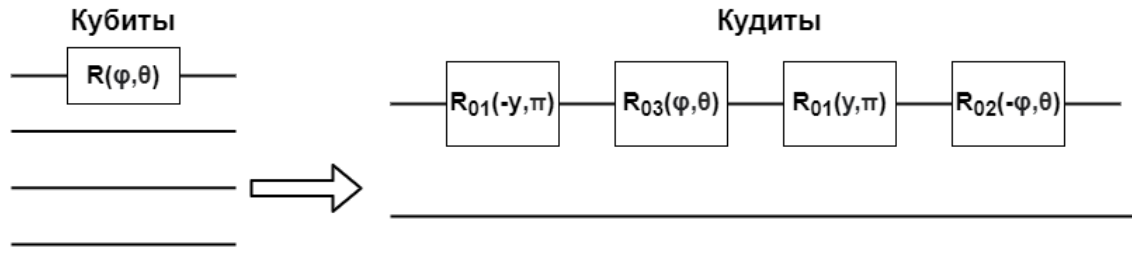
- Собственные однокудитные операции
- Композитные однокубитные операции
- Классическое двухчастичное перепутывание

- Кудиты на зеемановских подуровнях $B = 5 \text{ Гс}$
- Расщепление 5 МГц
- Ест. ширина линии $\Gamma = 3 \text{ Гц}$
- $I=1/2$

2 кукварта эквивалентны
4х-кубитному квантовому компьютеру

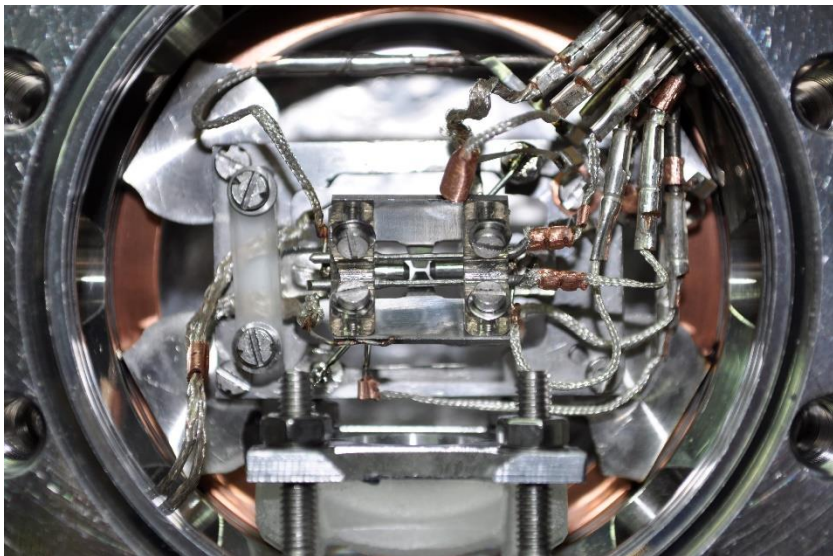
Эквивалентность 2 кукварта \Leftrightarrow 4 кубита

$$|0\rangle = |10\rangle, |1\rangle = |01\rangle, |2\rangle = |00\rangle, |3\rangle = |11\rangle$$

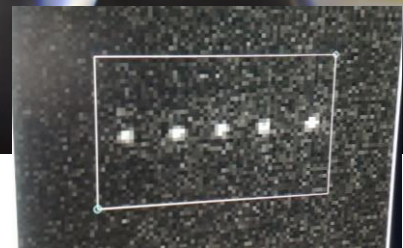
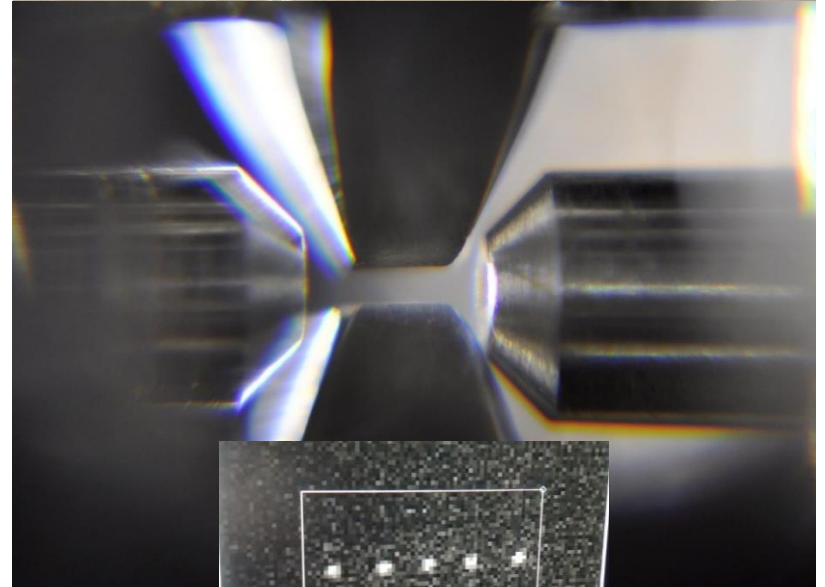
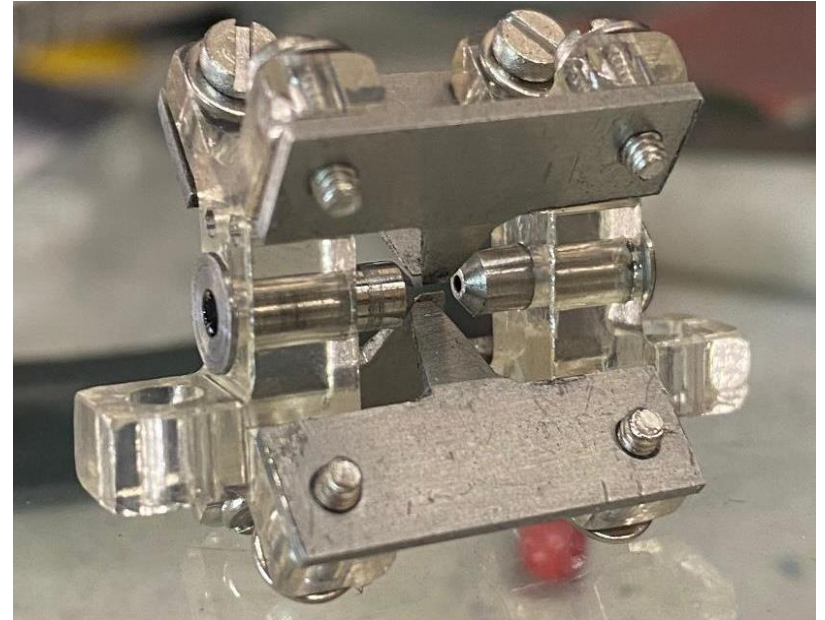


Ионная ловушка

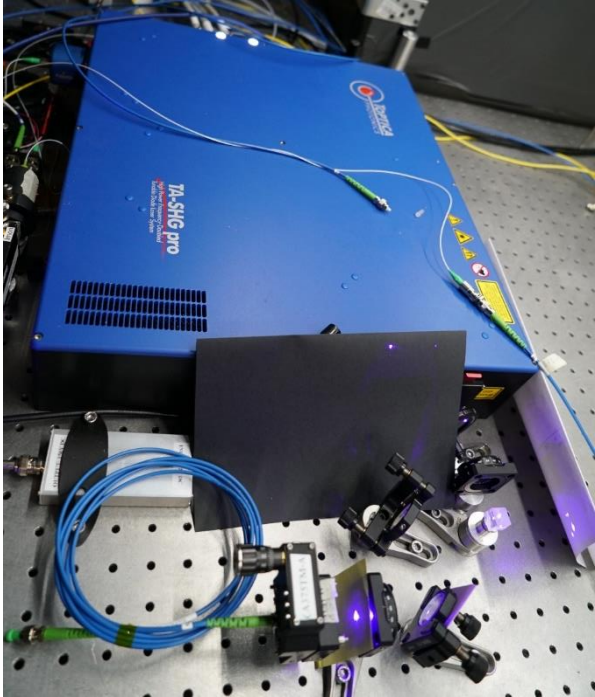
- линейная односекционная ловушка Пауля
- изготовлена в ФИАН
- $NA = 0,45 / 0,7$
- $(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = 2\pi \times (1500, 1480, 450) \text{ kHz}$
- Скорость нагрева 400 фононов/с
- Время жизни иона > 7 дней ($T=300 \text{ K}$)
- 5 ионов в линейной конфигурации @ $\Omega_z=300 \text{ kHz}$



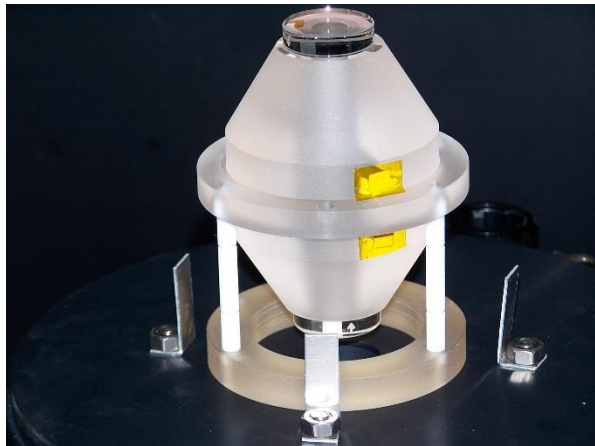
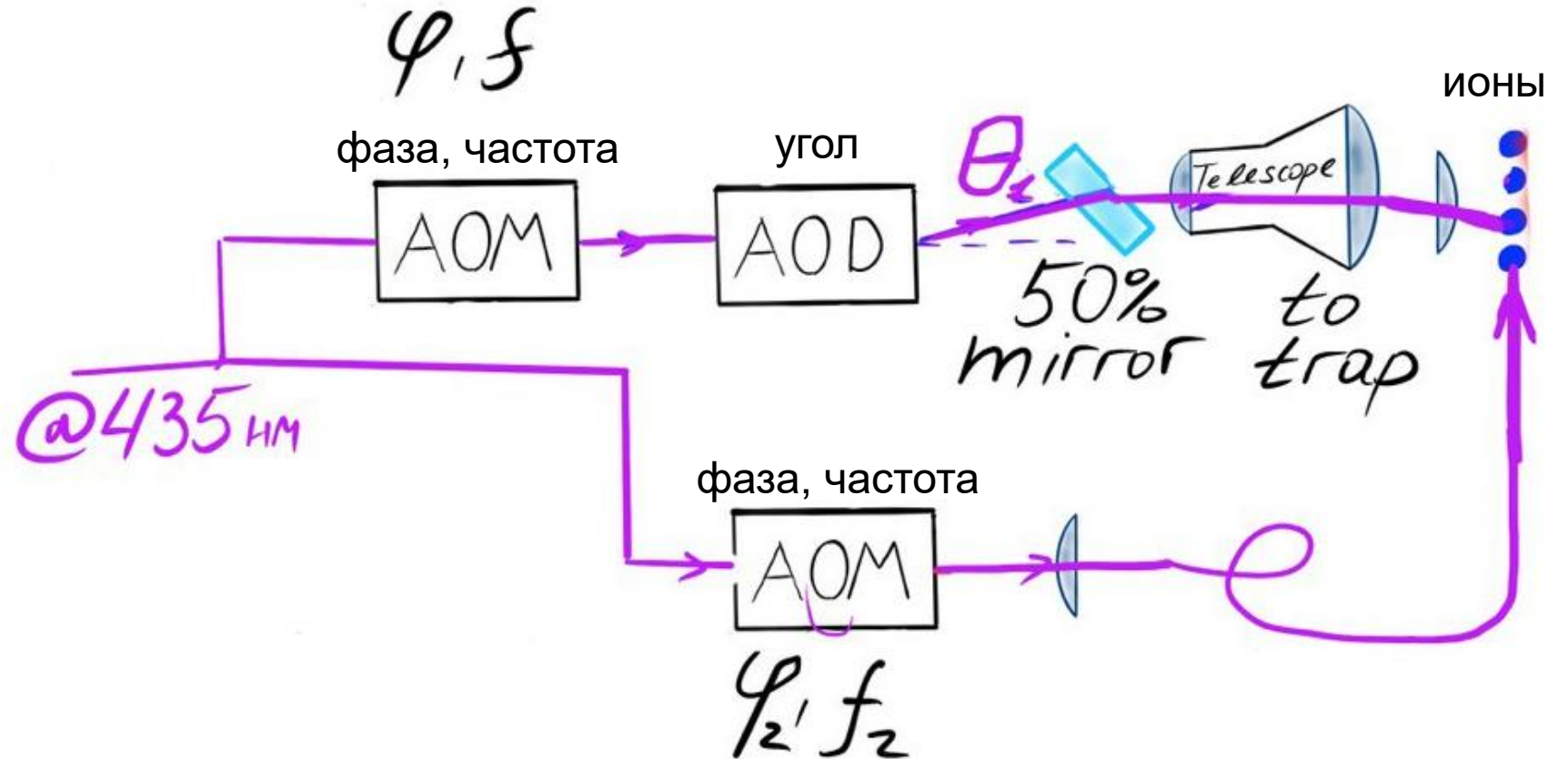
$P < 10^{-11}$ мбар



Лазерная система адресации 435 нм



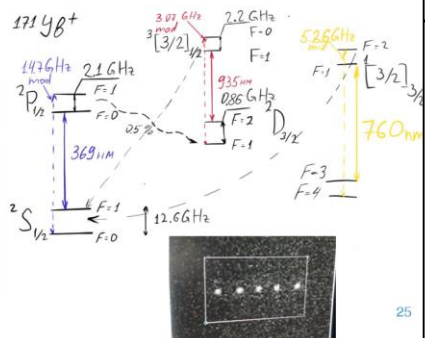
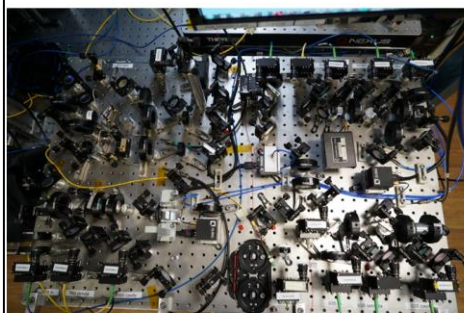
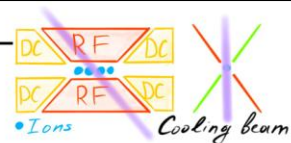
MOPA +SHG, стабилизирован по УЛЕ резонатору $\Delta\nu=10$ Hz



Фазовые шумы лазера ограничивают качество операций

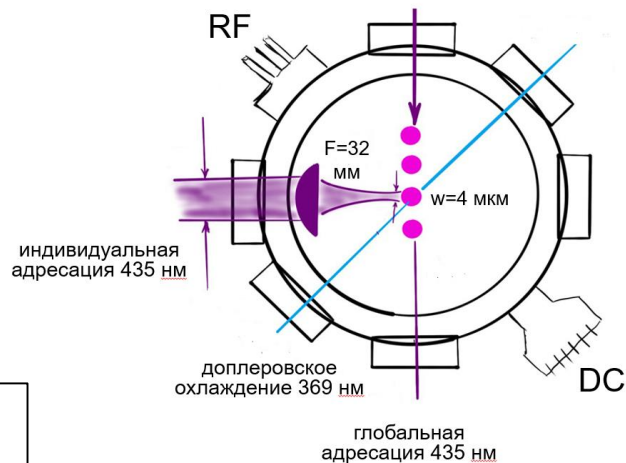
Доплеровское охлаждение

- Один охлаждающий пучок
- Измеренная температура $T = T_{Dop} \approx 1 \text{ mK}$
- Можно расцепить секулярные частоты (dc потенциал)
- $\langle n_{meas} \rangle \approx 30$ @ 480 kHz частота аксиальной моды

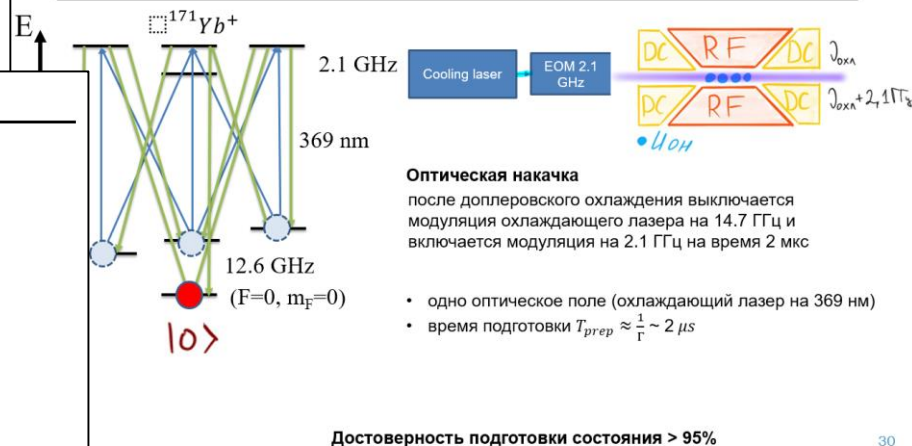


Примитивы

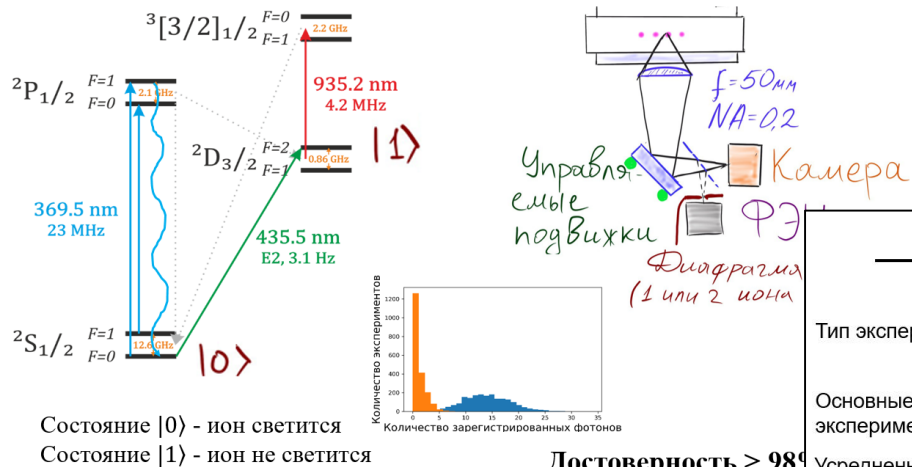
Схема адресации



Подготовка состояния $|0\rangle, |00\rangle, \dots$



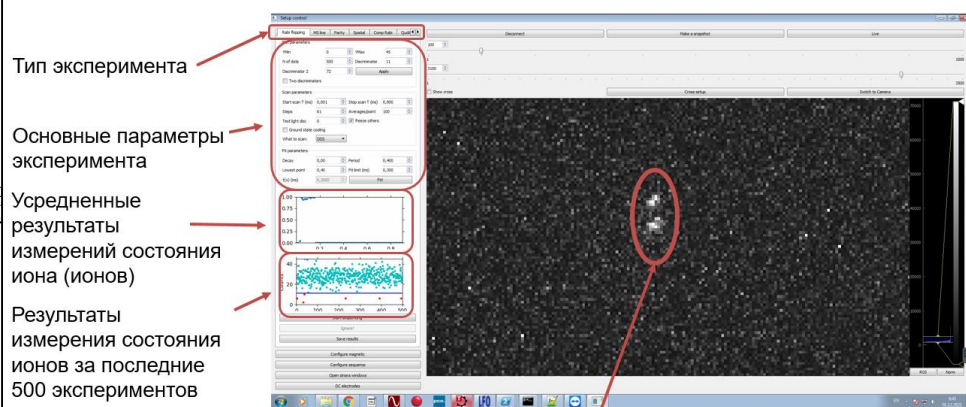
Система считывания состояния



Охлаждение в основное колебательное состояние



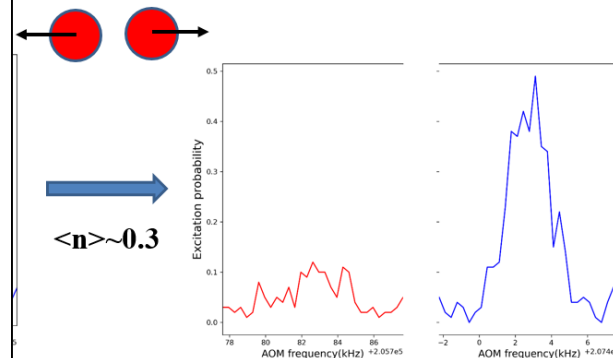
Интерфейс управления



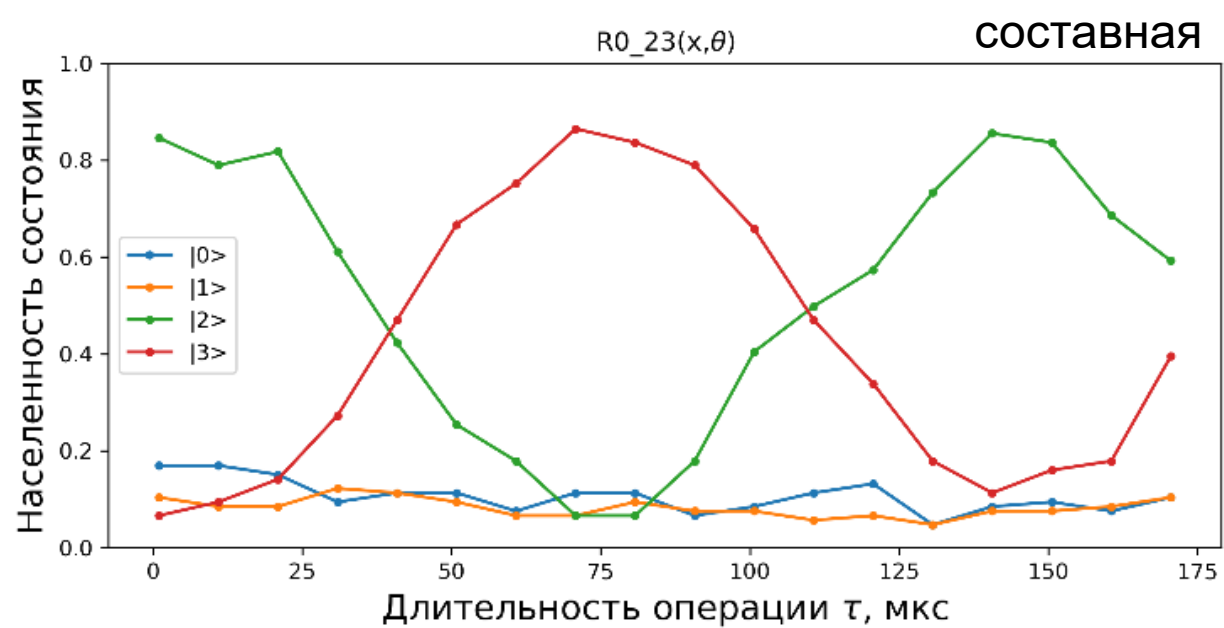
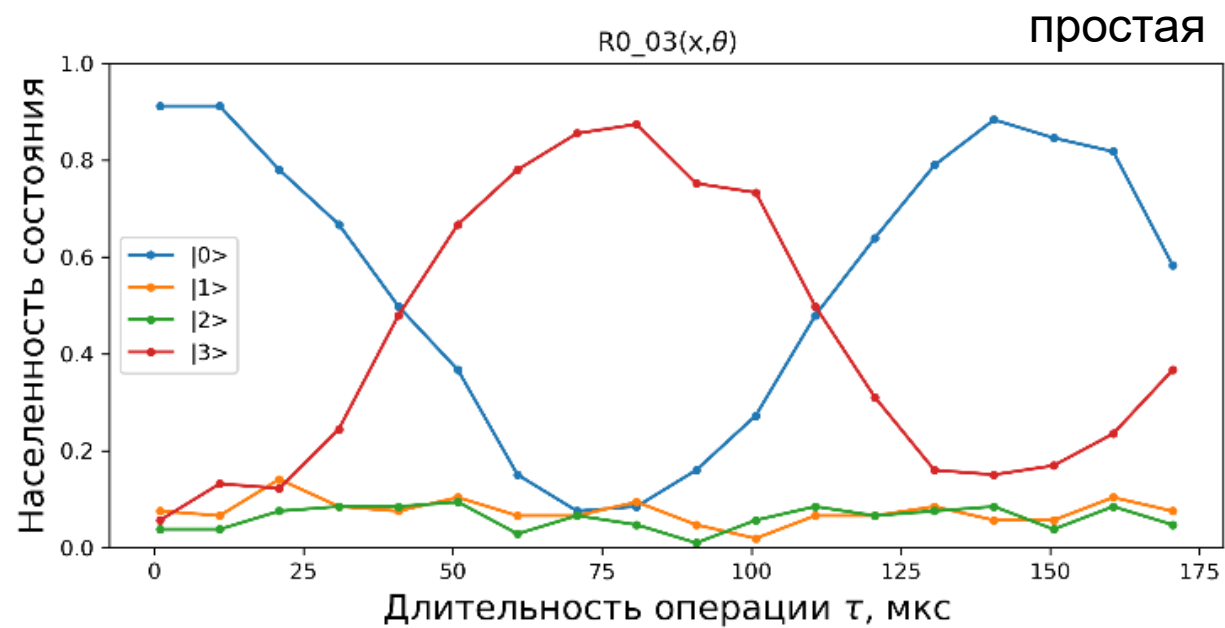
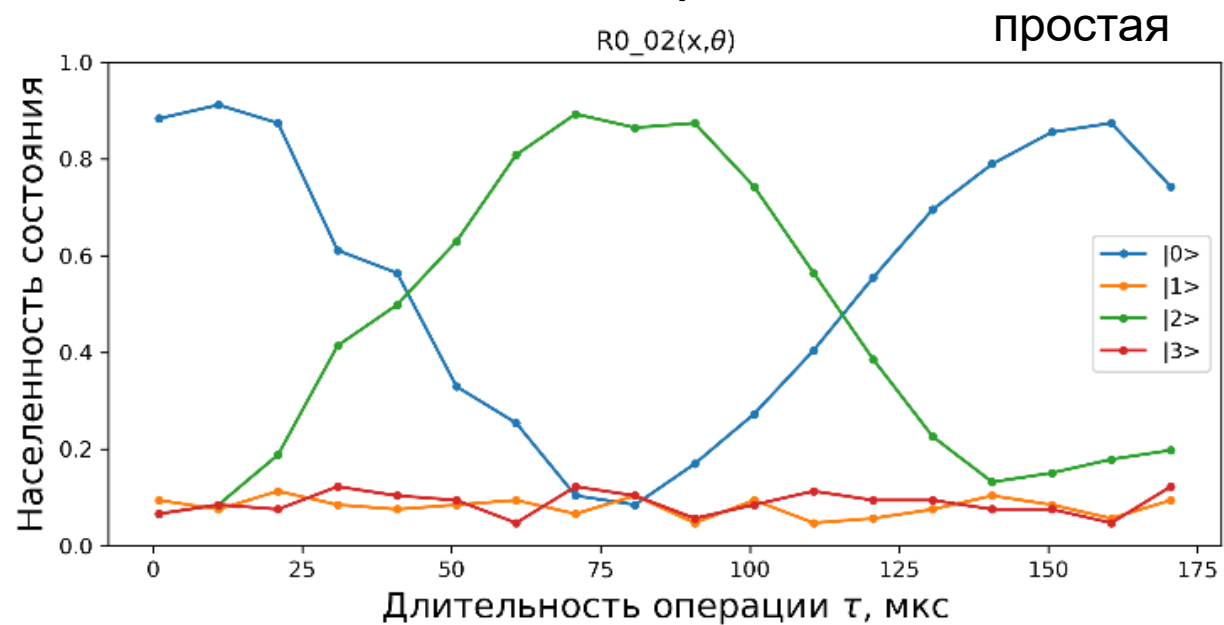
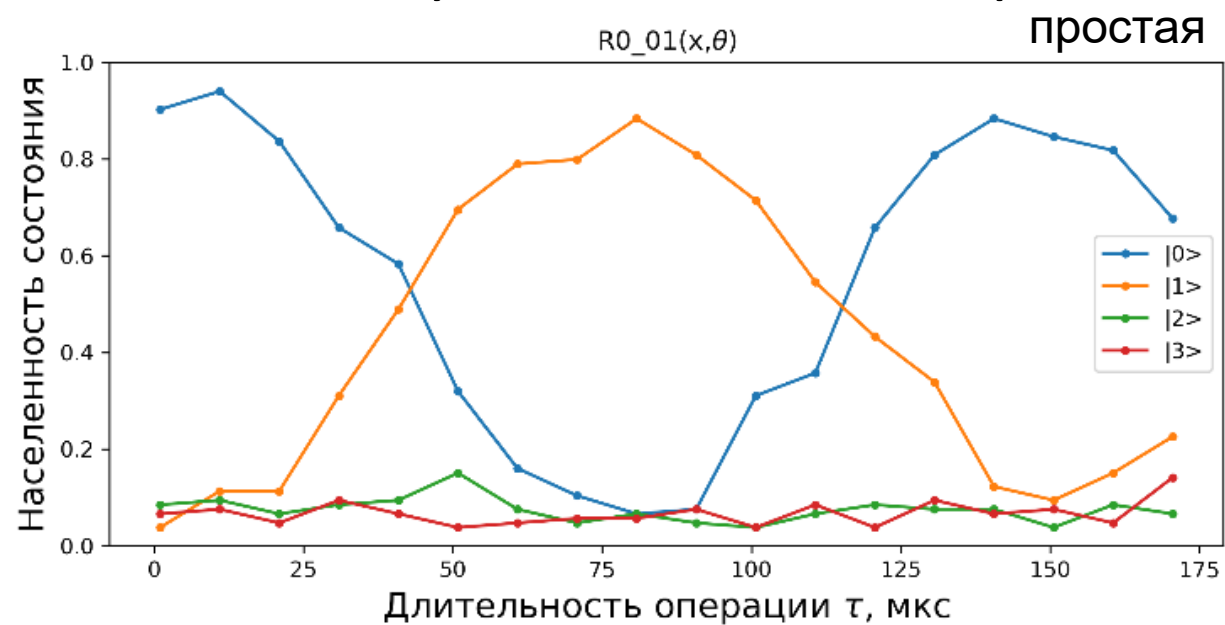
Изображение ионов с камеры

Результаты экспериментов ФИАН-2021

- противофазная мода $n = 0.3$
- синфазная мода $n = 3$

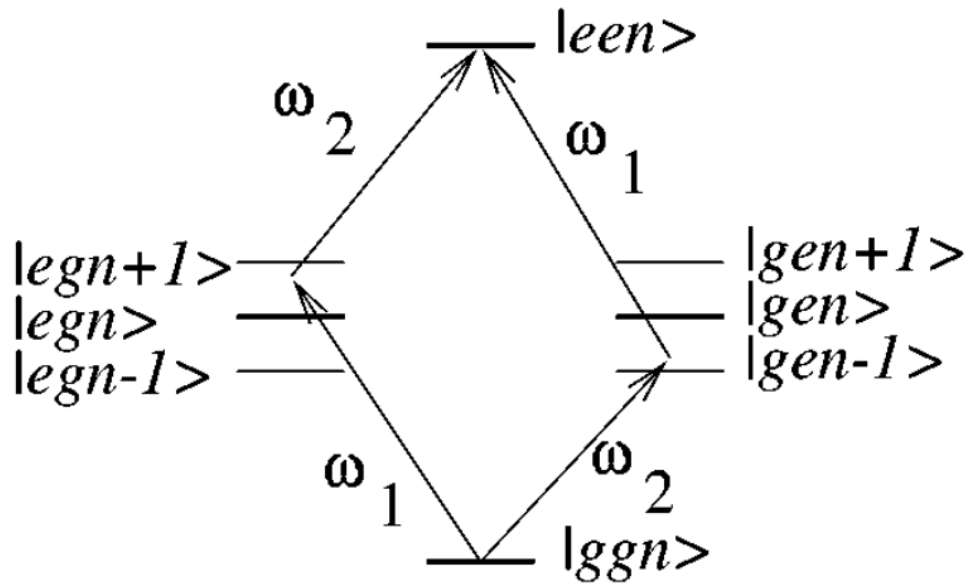


Однокудитные операции (полный набор)



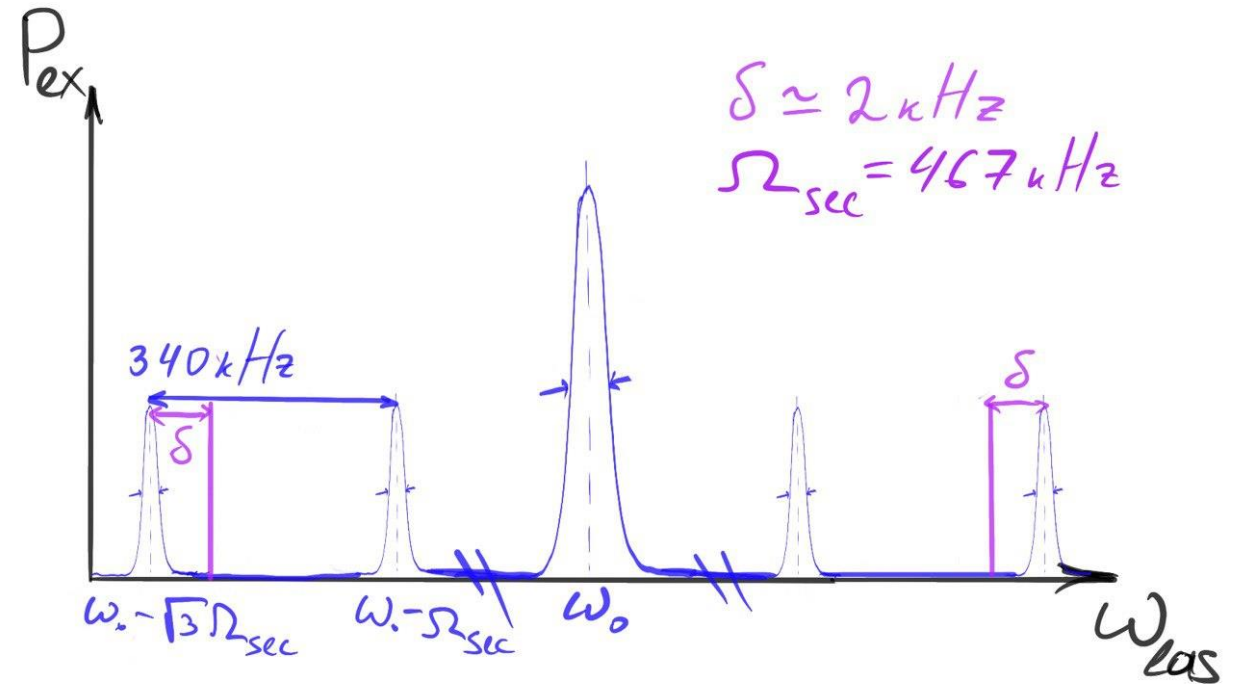
Перепутывание ионов – гейт Мельмера Соренсена

Бихроматическое облучение ионов

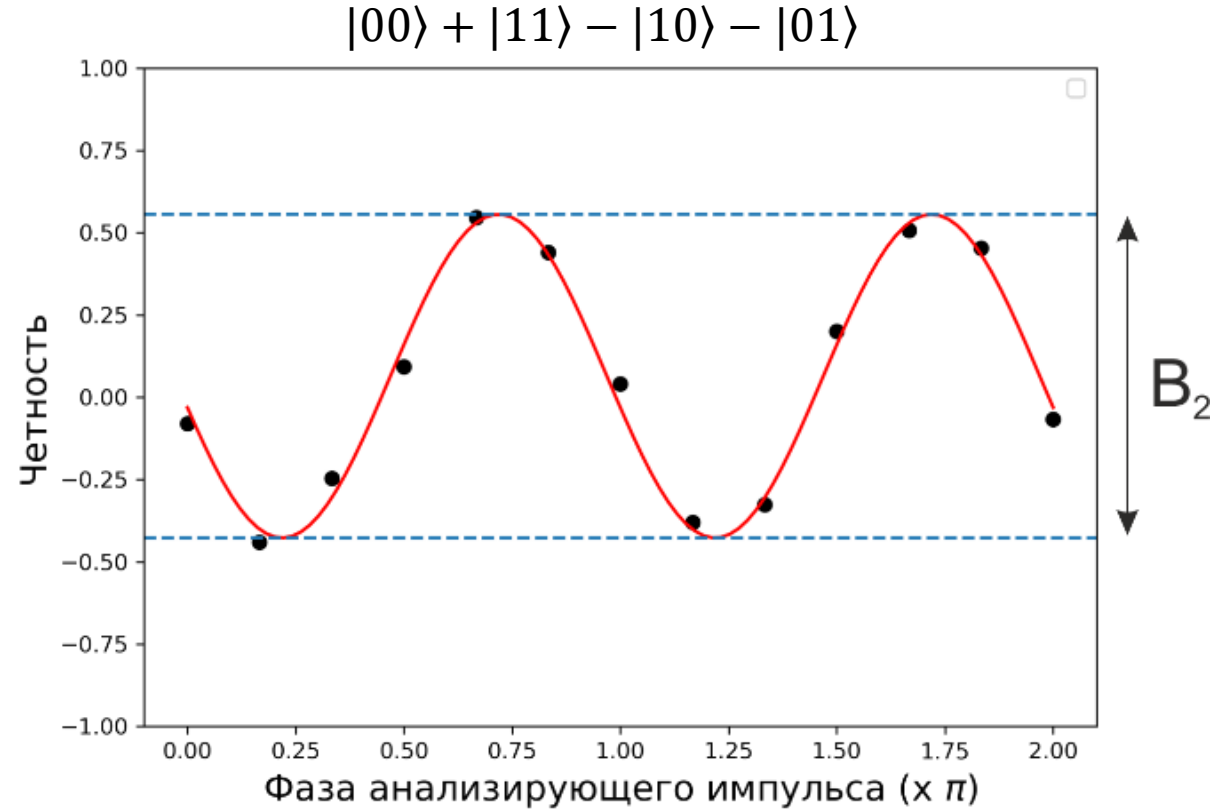
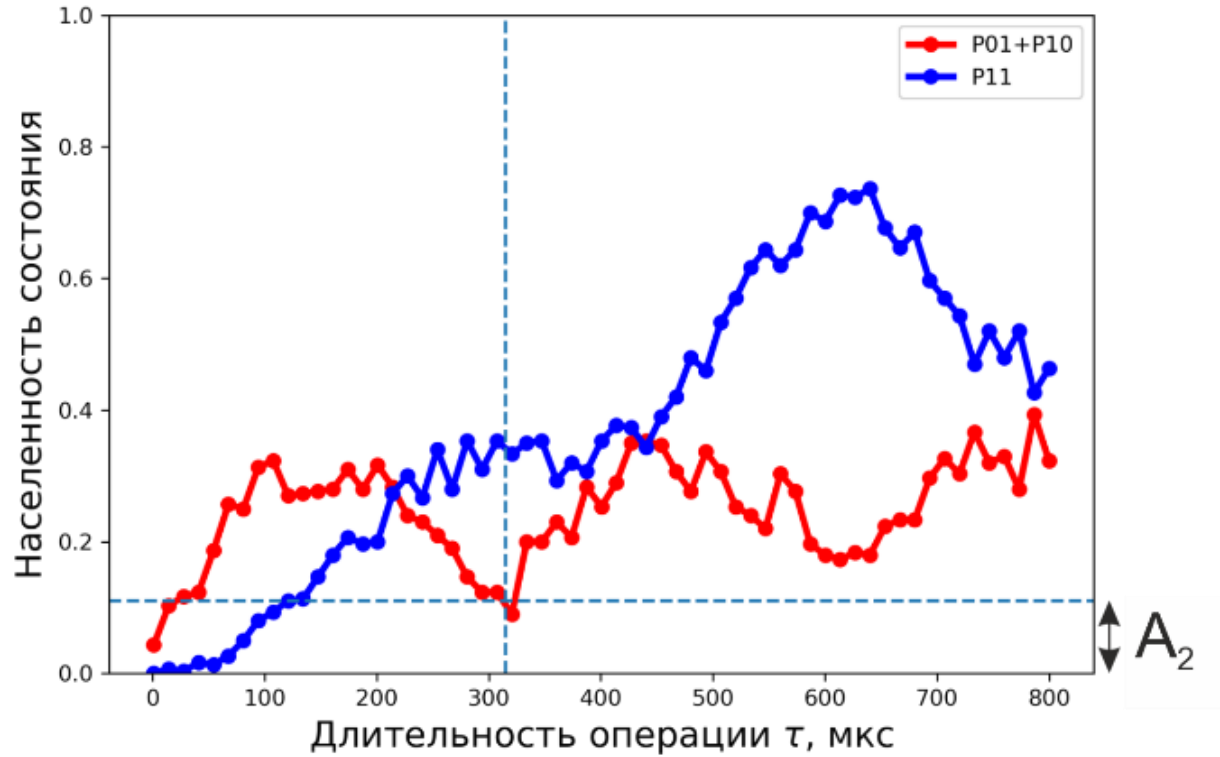


$$XX(\chi_{ij}) = \exp[i\chi_{i,j}\sigma_x^i\sigma_x^j] =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\chi_{ij}) & 0 & 0 & -i \sin(\chi_{ij}) \\ 0 & \cos(\chi_{ij}) & -i \sin(\chi_{ij}) & 0 \\ 0 & -i \sin(\chi_{ij}) & \cos(\chi_{ij}) & 0 \\ -i \sin(\chi_{ij}) & 0 & 0 & \cos(\chi_{ij}) \end{bmatrix}$$



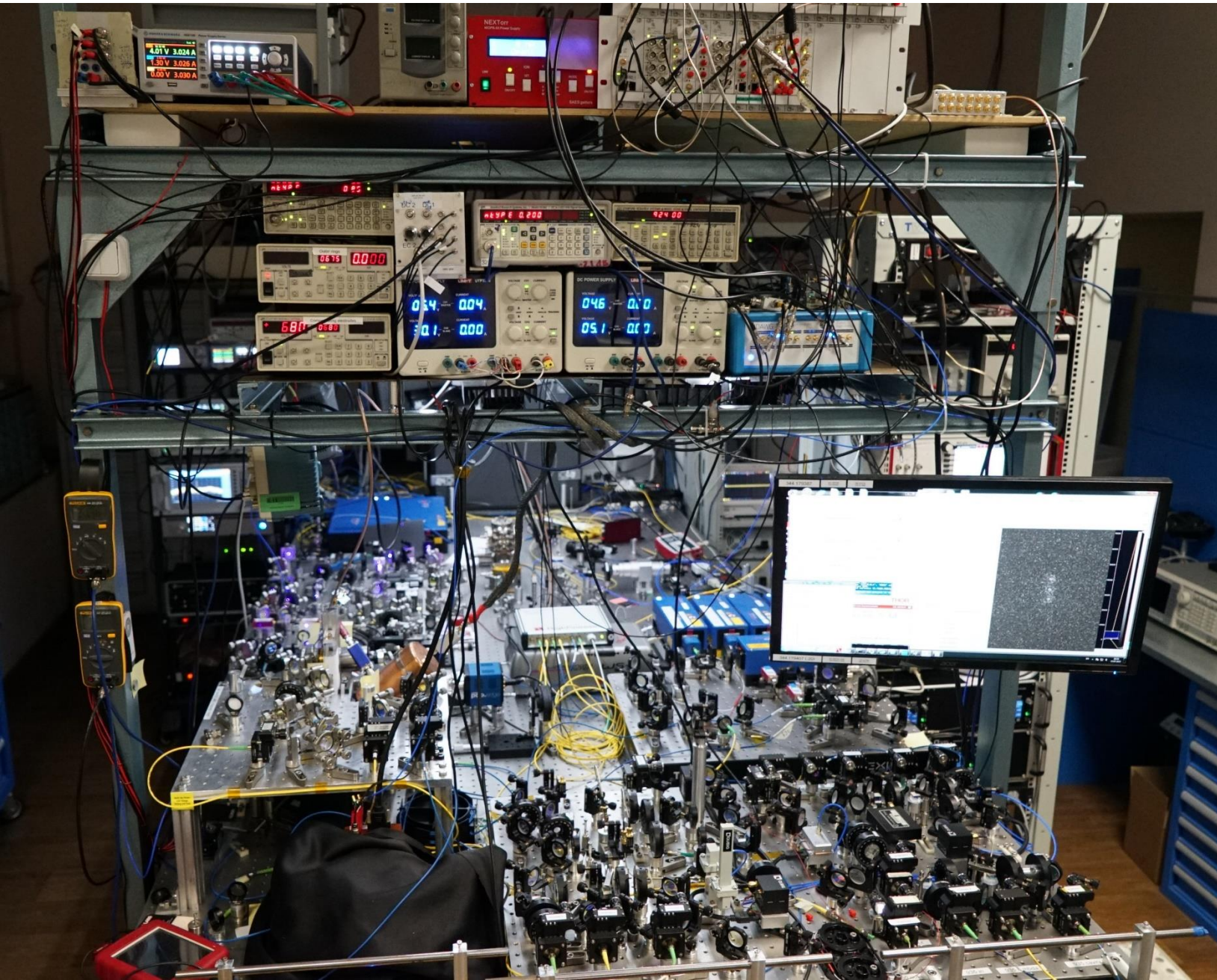
Двухчастичное перепутывание



В точке максимальной перепутанности
 $\frac{\pi}{2}$ импульс с изменяемой фазой

$$F = \left(\frac{1 - A}{2} + \frac{B}{4} \right) \times 100\% = 69 \pm 3\%$$

Заключение



В 2021 г создан прототип 4х кубитного ионного квантового компьютера

- Подготовка $F > 95\%$
- Считывание $F > 98\%$
- Охлаждение $n \sim 0.07$
- Однокубитная операция $F \sim 85\%$
- Двухкубитная операция в одном кукварте $F \sim 85\%$
- Двухчастичное перепутывание $F = 69\%$

Ведутся работы по созданию 16и кубитного компьютера в 2022 г