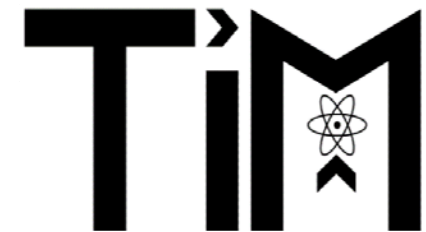




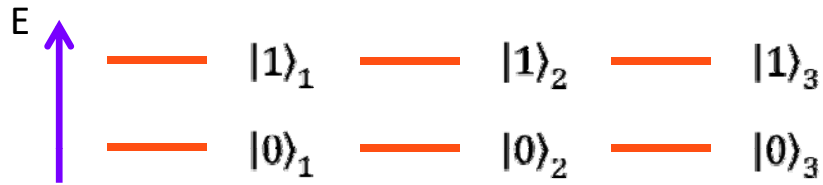
Реализация базовых алгоритмов квантовых вычислений на ионной платформе

Николай Колачевский



Квантовые vs классические вычисления

$|1\rangle_1$



Ключевое свойство— запутанность

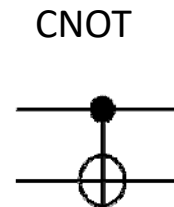
Нет запутанности

$$\alpha_1|0\rangle_1 + \beta_1|1\rangle_1 + \alpha_2|0\rangle_2 + \beta_2|1\rangle_2 + \alpha_3|0\rangle_3 + \beta_3|1\rangle_3 - 2^N \text{ чисел}$$

Есть запутанность

$$\alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{011}|011\rangle + \alpha_{100}|100\rangle + \alpha_{110}|110\rangle + \alpha_{101}|101\rangle + \alpha_{111}|111\rangle - 2^N \text{ чисел}$$

Двухкубитные операции генерируют запутанность



$$\begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |00\rangle \\ |01\rangle &\rightarrow |01\rangle \\ |10\rangle &\rightarrow |11\rangle \\ |11\rangle &\rightarrow |10\rangle \end{aligned}$$

Свойства квантовых компьютеров

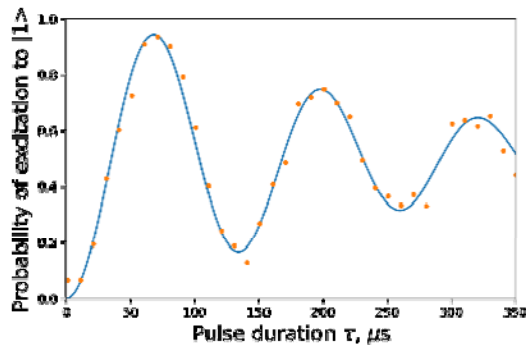


РОСАТОМ



Время когерентности

Характерное время на котором сохраняются квантовые свойства системы



Число кубит N

Число двухуровневых квантовых систем на которых можно проводить однокубитные и двухкубитные операции

Достоверность операции

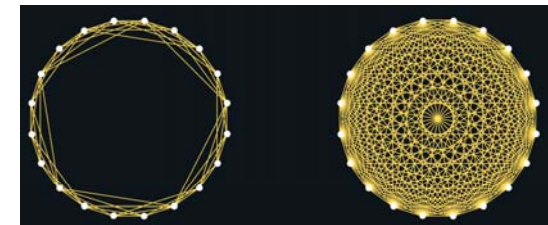
$$F = \frac{\text{Число успешных операций}}{\text{Число проведенных операций}}$$

Доступная глубина цепочки L

- $F_{\text{алгоритм}} = F_1 F_2 \dots F_L > 50\%$
- Пример: $F_i = 99.9\% \rightarrow L \approx 500$
- Пример: $F_i = 99\% \rightarrow L \approx 50$

Связность

Между какими кубитами можно провести двухкубитную операцию



Квантовый объем = 2^N

- Число кубит не меньше чем N
- На этом массиве можно провести квантовый алгоритм состоящий из двухкубитных операций глубиной N

Потенциал квантовых вычислений



РОСАТОМ



Квантовые алгоритмы

- <https://quantumalgorithmzoo.org/> - более 50 квантовых алгоритмов, превосходящих классические
- Взлом систем шифрования – алгоритм Шора позволяет раскладывать число на простые множители за $O(N^3)$ вместо $O(2^{N/4})$
- Быстрый поиск по базам данных (алгоритм Гровера) $O(\sqrt{N})$ вместо $O(N)$
- Быстрое решение систем линейных уравнений $O(\text{Log}(N))$ вместо $O(N)$
- Новый класс вычислительных задач **VQP**

Области применения

- Взлом классической криптографии
- Синтез новых химических соединений/лекарств
- Решение логистических задач
- Моделирование динамики сложных систем
- Моделирование ранее недоступных физических процессов (например, динамика атмосферы)
- Машинное обучение, искусственный интеллект (сильный искусственный интеллект?)

Требования

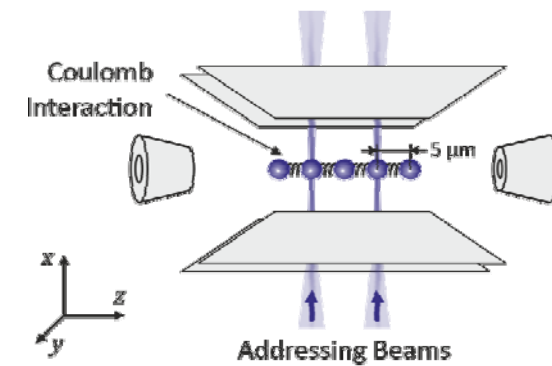
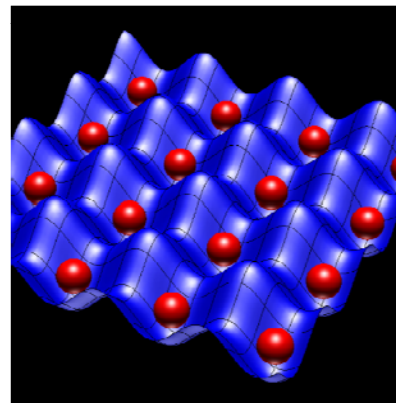
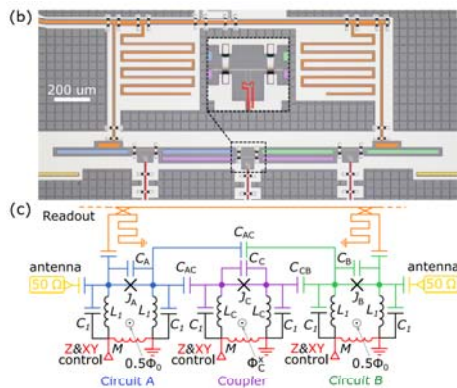
- Пример: для взлома RSA 1024 (алгоритм Шора) нужно примерно **3000** идеальных кубит. Или **3 млн** кубит с ошибкой **0.01%**. Или **10 млн** кубит с ошибкой **0.1%**.
- Сейчас есть **15 кубит** с ошибкой **0.5 %** (ионы) **433 кубита** с ошибкой **2-5 %** (сверхпроводники)

А.К. Федоров, Е.О. Киктенко, Н.Н. Колачевский “Вычислимое и невычислимое в квантовом мире: утверждения и гипотезы”, УФН 2024, DOI: 10.3367/UFNr.2024.07.039721

Основные платформы для квантовых вычислений



РОСАТОМ



Сверхпроводники

- Сверхпроводящая электрическая цепь в криостате
- Кубит – коллективном состоянии многих электронов

Фотоны

Атомы

- Атомы в оптической решетке
- Кубит – в электронных состояниях атома
- Двухкубитная операция – через ридберговские состояния атома

Полупроводники

Ионы

- Ионы в электромагнитных ловушках
- Кубит – в электронных состояниях иона
- Двухкубитная операция – через кулоновское взаимодействие

Другие квантовые объекты

Сравнение платформ



РОСАТОМ

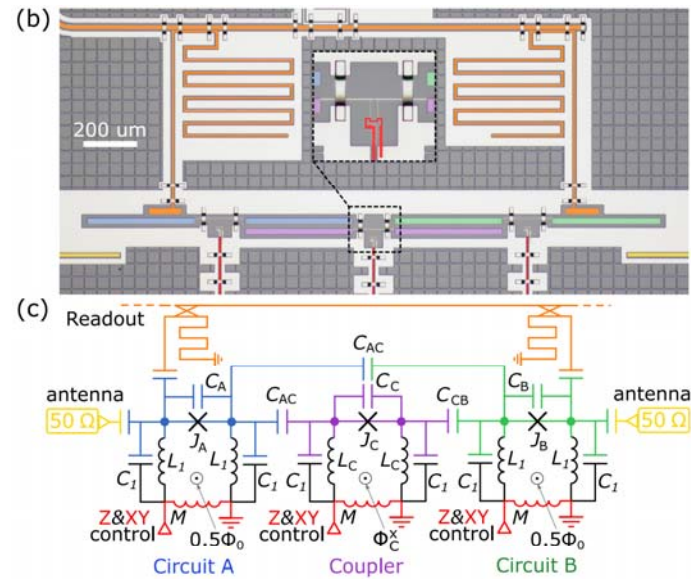


	Сверхпроводники	Атомы	Ионы
Число кубит в универсальном процессоре	433	256	64
Время когерентности	Миллисекунды	Секунды	Минуты
Время двухкубитной операции	Порядка 10 нс	Порядка 100 нс	Порядка 100 мкс
Достоверности рекордные	99.97% однокубитная 99.7% двухкубитная	99.6% однокубитная 99.5% двухкубитная	99.996% однокубитная 99.97% двухкубитная
Достоверности на массиве	97-98% двухкубитная	99.5% двухкубитная (?)	99.5% двухкубитная
Квантовый объем	2⁹	??	2¹⁹

Сверхпроводники



Алексей Валентинович Устинов

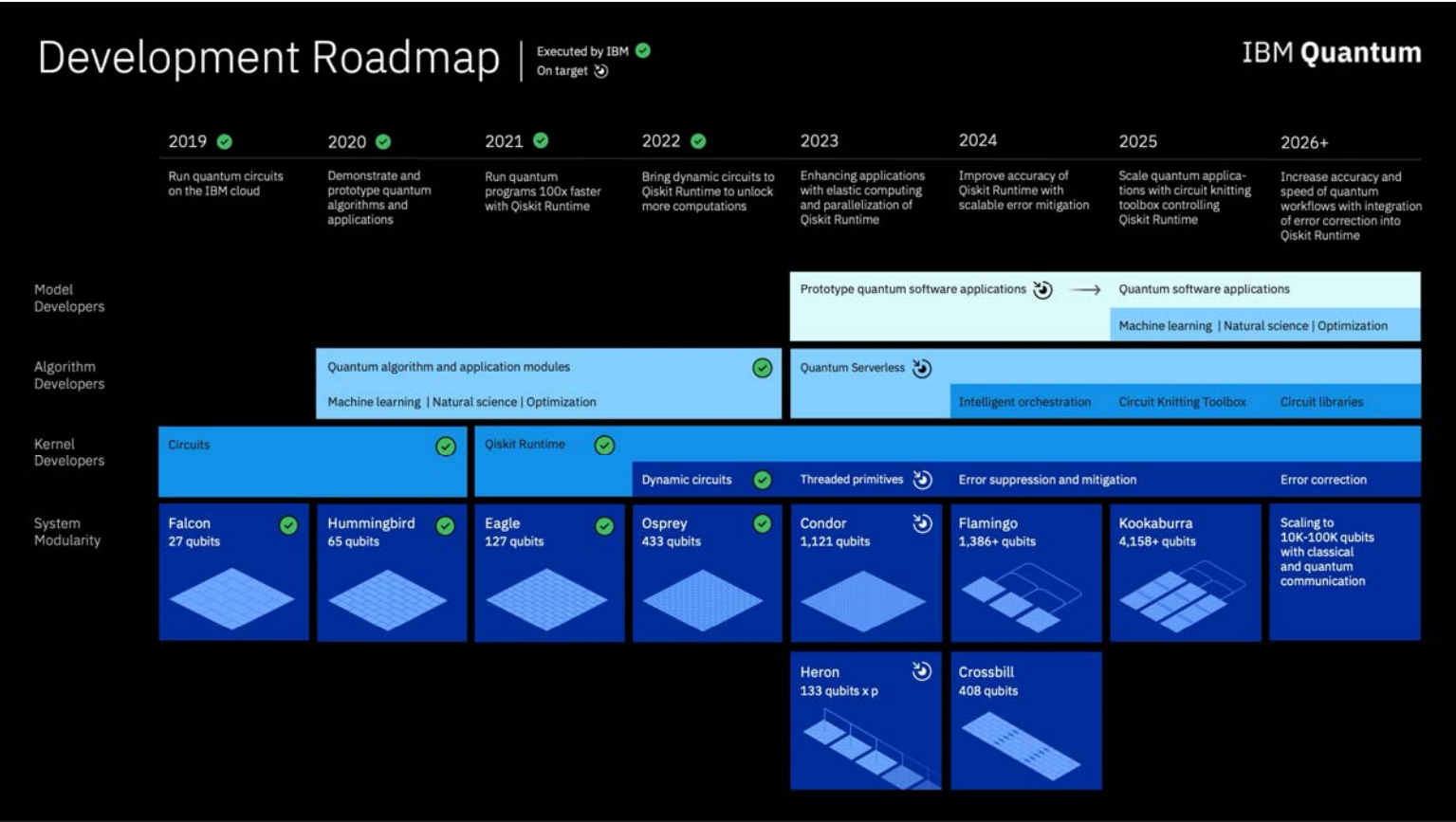


- Электрическая сверхпроводящая цепь в криостате при температуре 20-30 мК
- Управление кубитом – при помощи микроволновых импульсов
- Двухкубитная операция

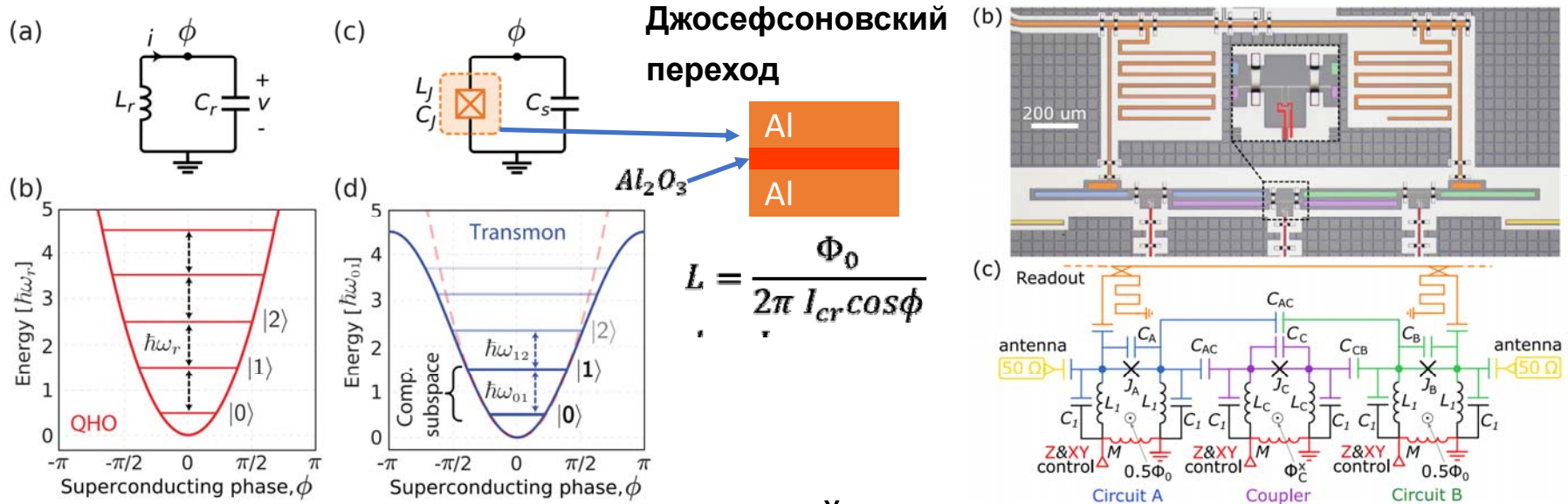


Прогресс в сверхпроводниковой платформе

- 433 кубита
- Ограниченная связность
- Не охарактеризованные ошибки двухкубитных операций
- План по внедрению
 - error suppression
 - error mitigation
- Опубликованный квантовый объем 2^9



Как проходят квантовые операции в сверхпроводниковом квантовом компьютере



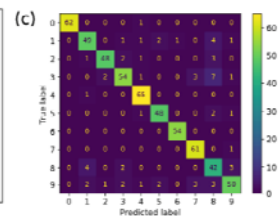
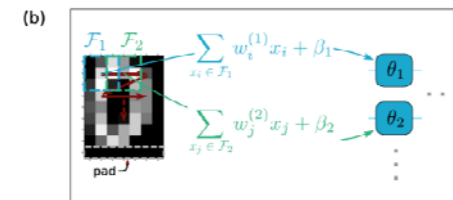
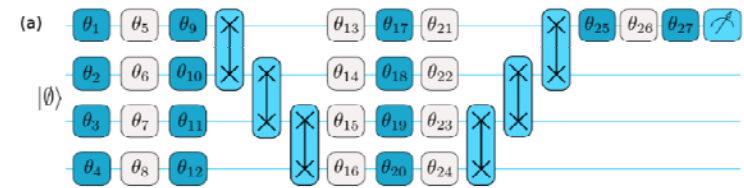
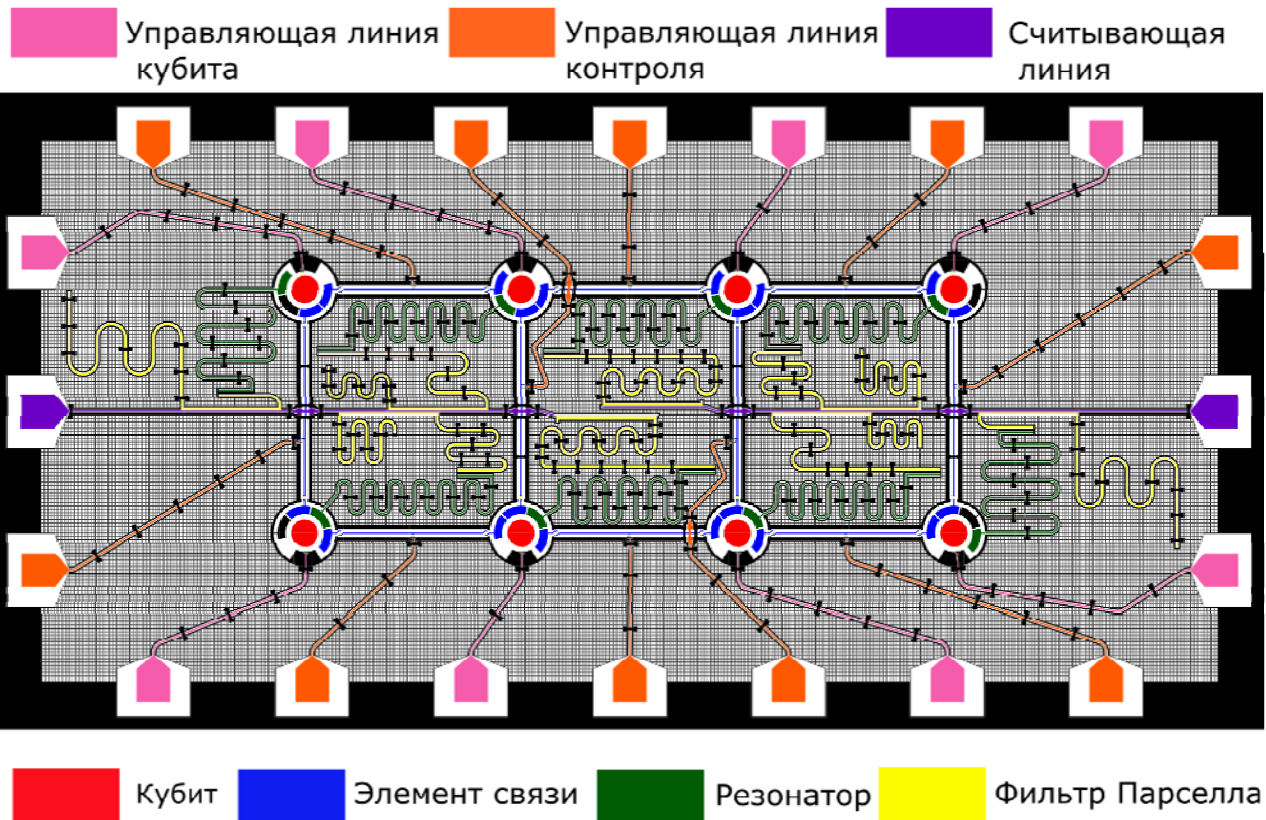
Кубит

Уровни энергии в ангармоническом осцилляторе из сверхпроводящих емкости, индуктивности и джозефсоновского перехода; $\omega_{01} \sim 10 - 50$ ГГц

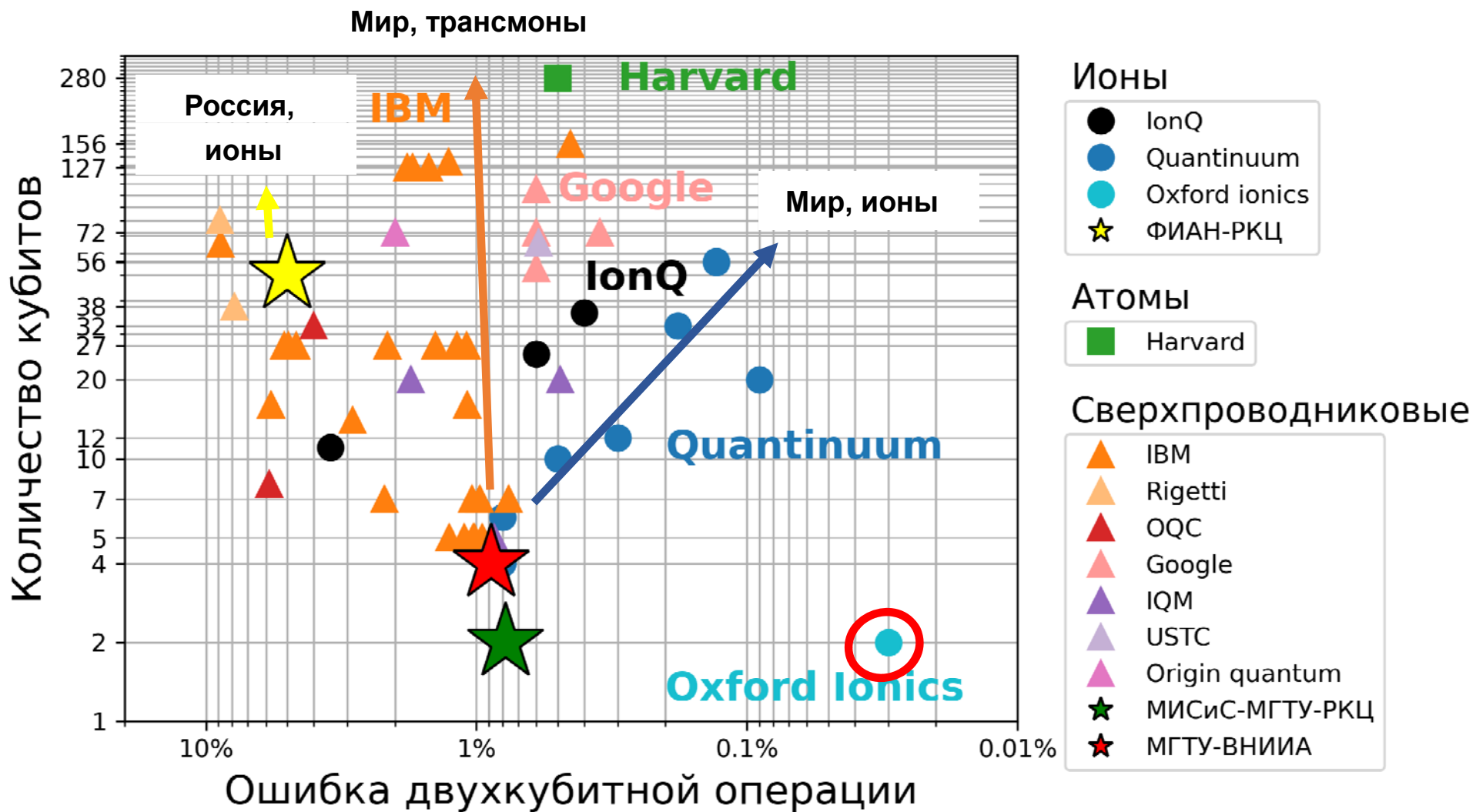
Управление

- Манипуляция кубитом – при помощи микроволновых импульсов
- Соседние кубиты управляемо связываются через вспомогательный кубит

Реализации кубитов – сверхпроводниковые квантовые компьютеры в России

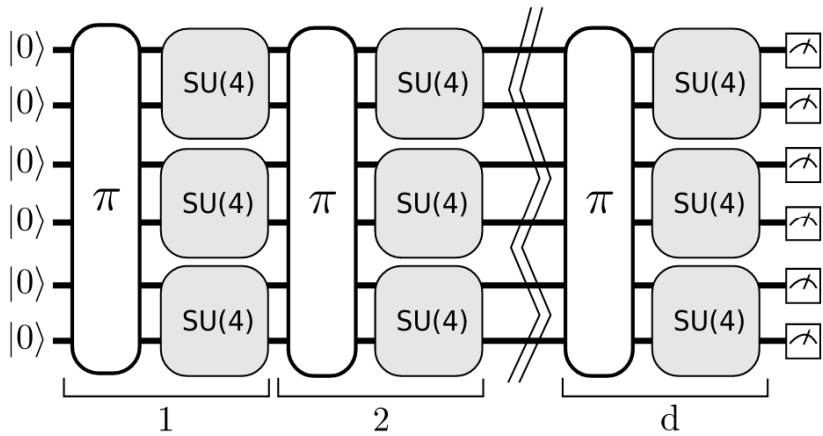


Количество кубит vs достоверность

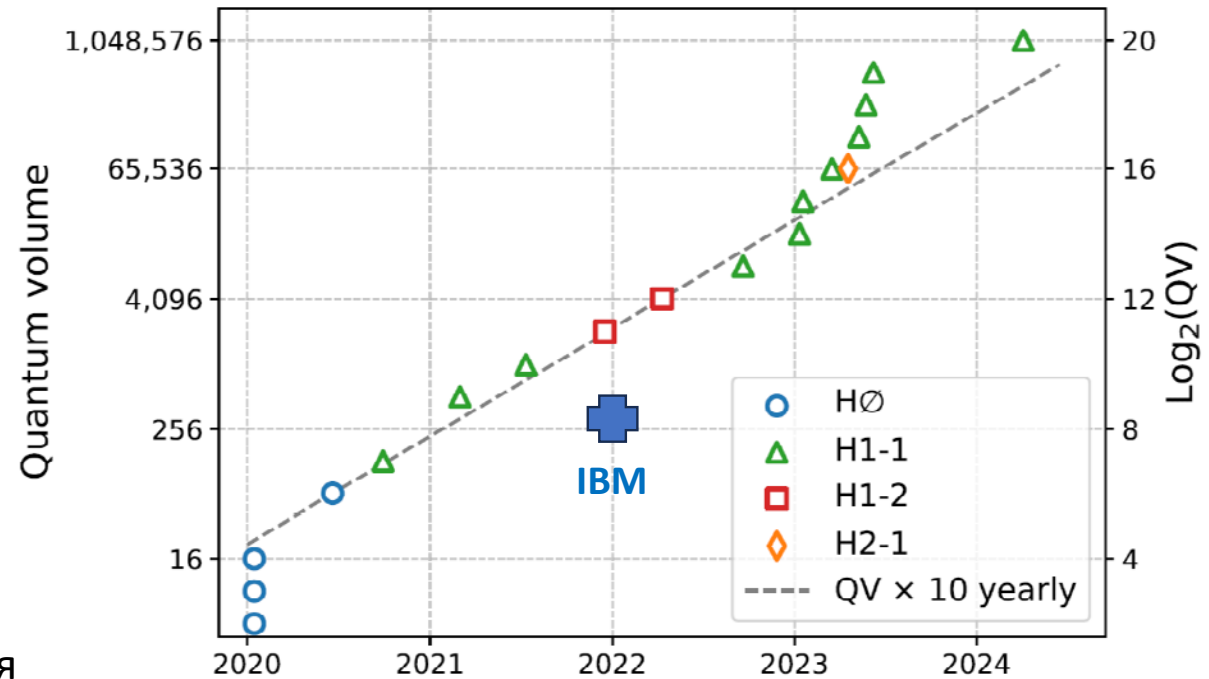


Динамика квантового объема

Квантовый объем



Система имеет квантовый объем 2^n , если доля «heavy output» для n кубитов и n слоев превышает $2/3$



Параметры ионных вычислителей



РОСАТОМ



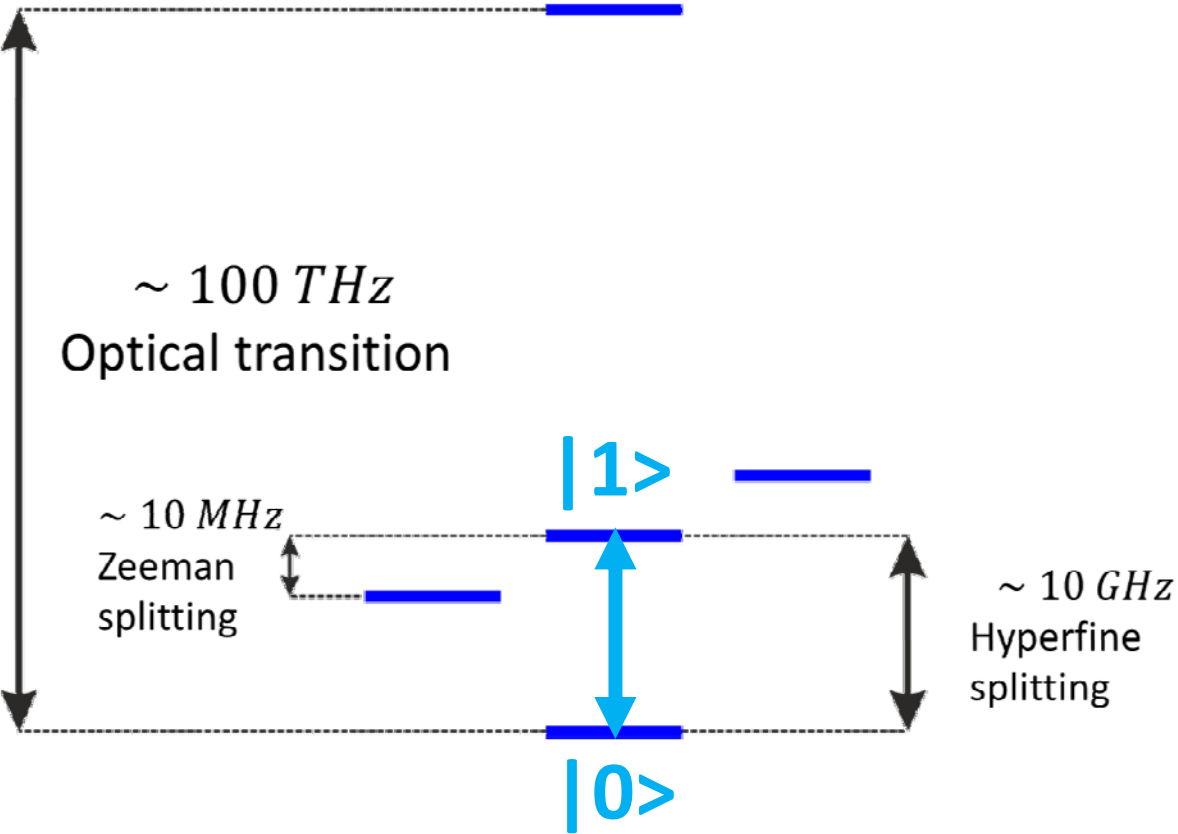
- Рекордное время когерентности до 1 часа [1]
- Рекордные достоверности операций в многокубитных системах [2]:
 - $F_{1Q} = 99.99916(7)\%$
 - $F_{2Q} = 99.97\%$
- Рекордный квантовый объем 2^{20}
- Количество кубит на сегодняшний день – до 56
- Связность «все со всеми»
- Характерное время однокубитной операции – 1-10 мкс
- Характерное время двухкубитной операции – 50-200 мкс

[1] Wang P. et al. //Nature communications. – 2021. – Т. 12. – №. 1. – С. 233.

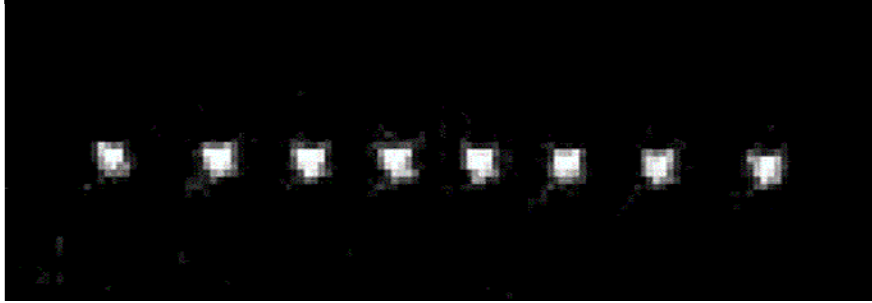
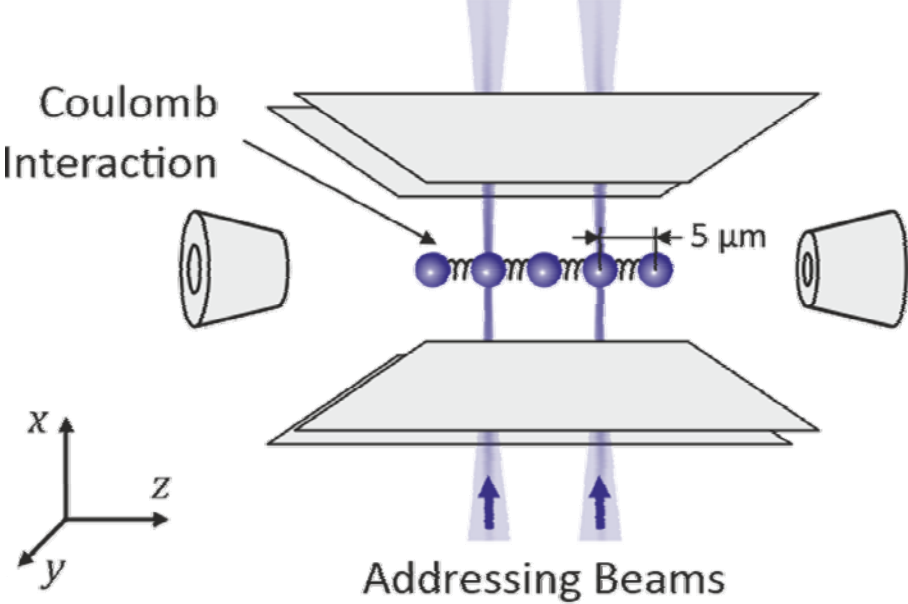
[2] Löschnauer C. M. et al. //arXiv preprint arXiv:2407.07694. – 2024.

Общий принцип работы

Electronic states



Микроволновый кубит



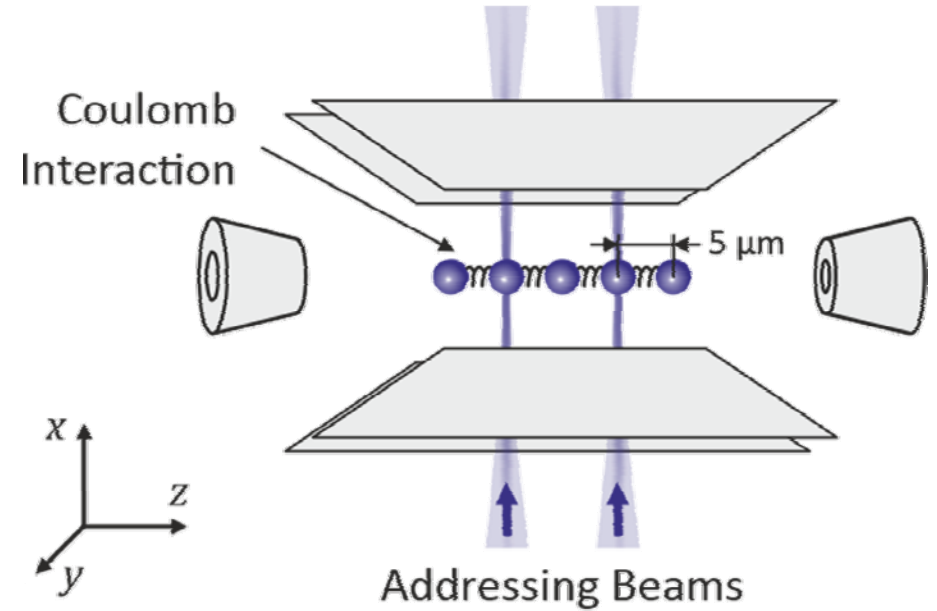
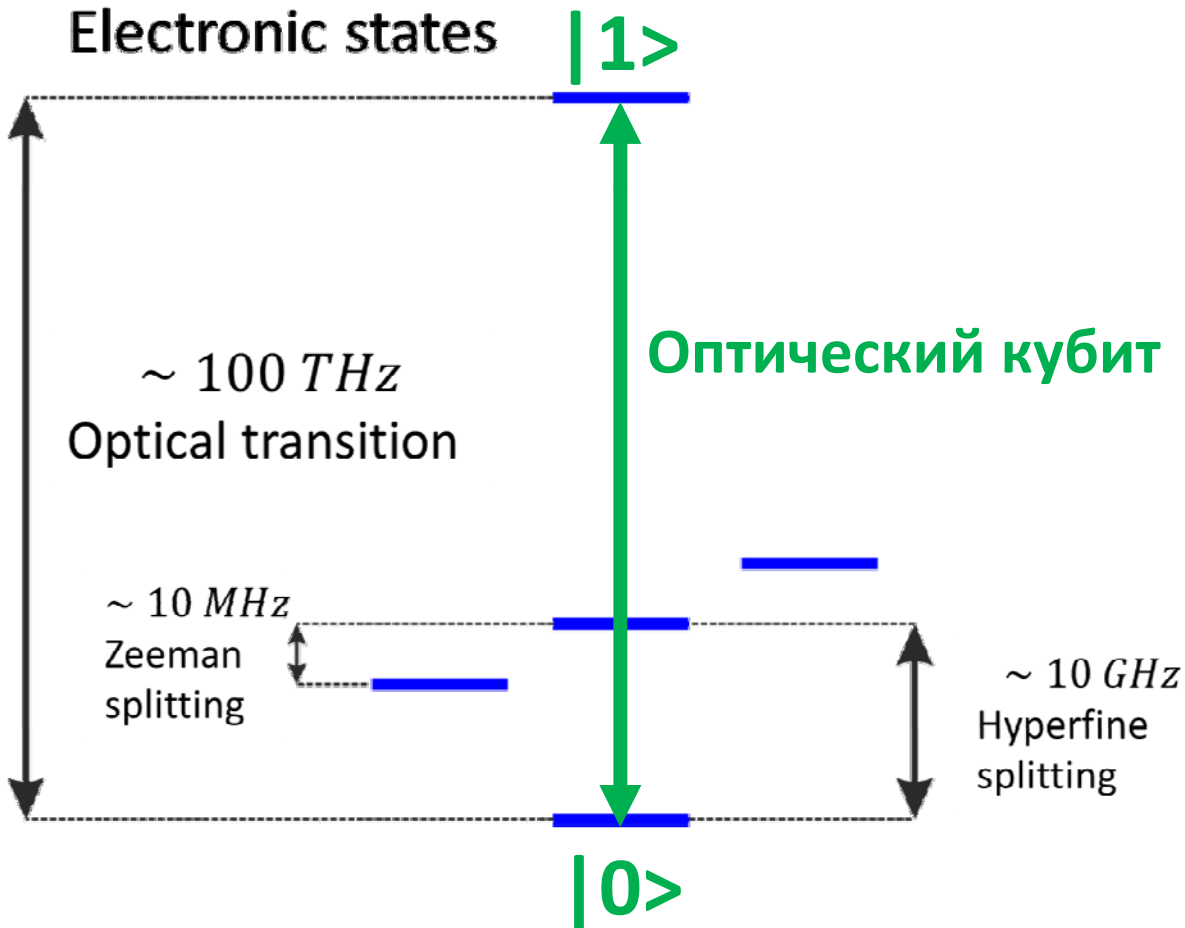
Кодирование кубитов



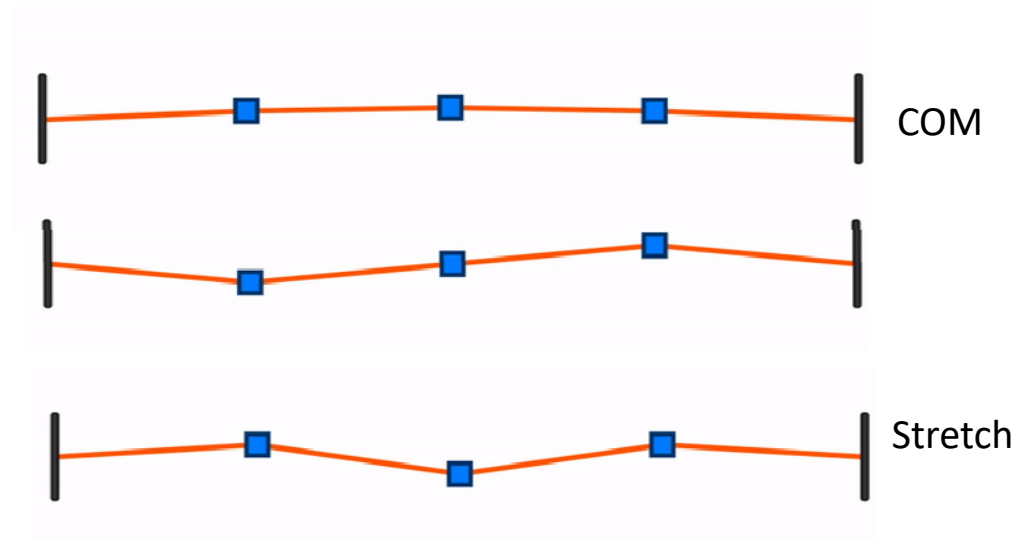
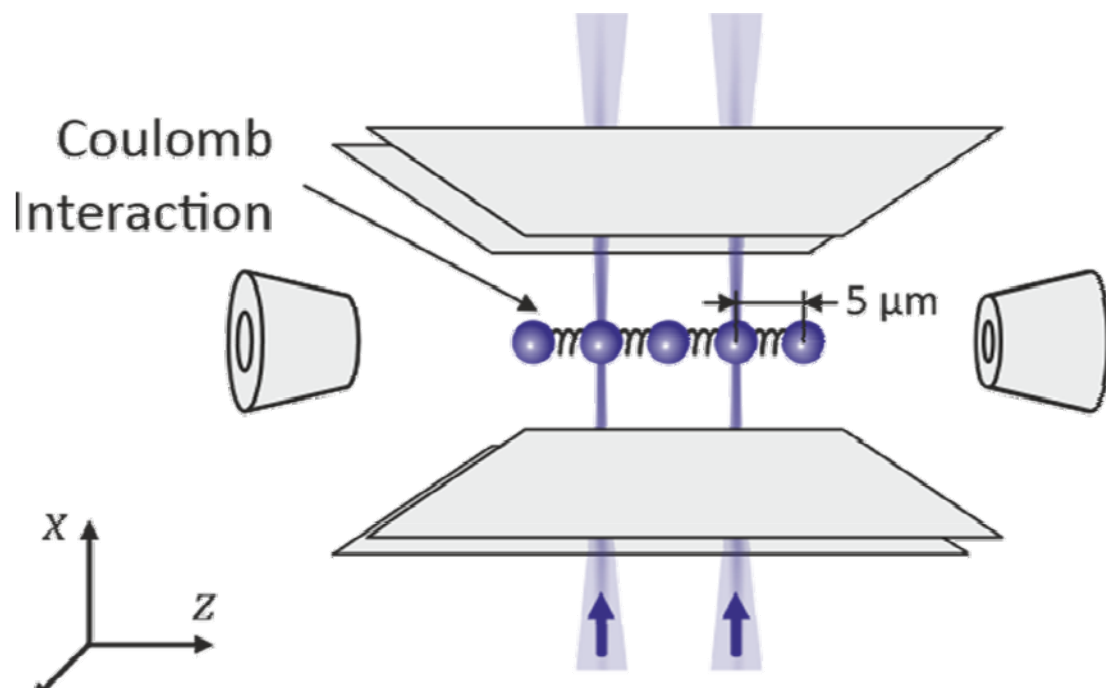
POCATOM



1974 2024

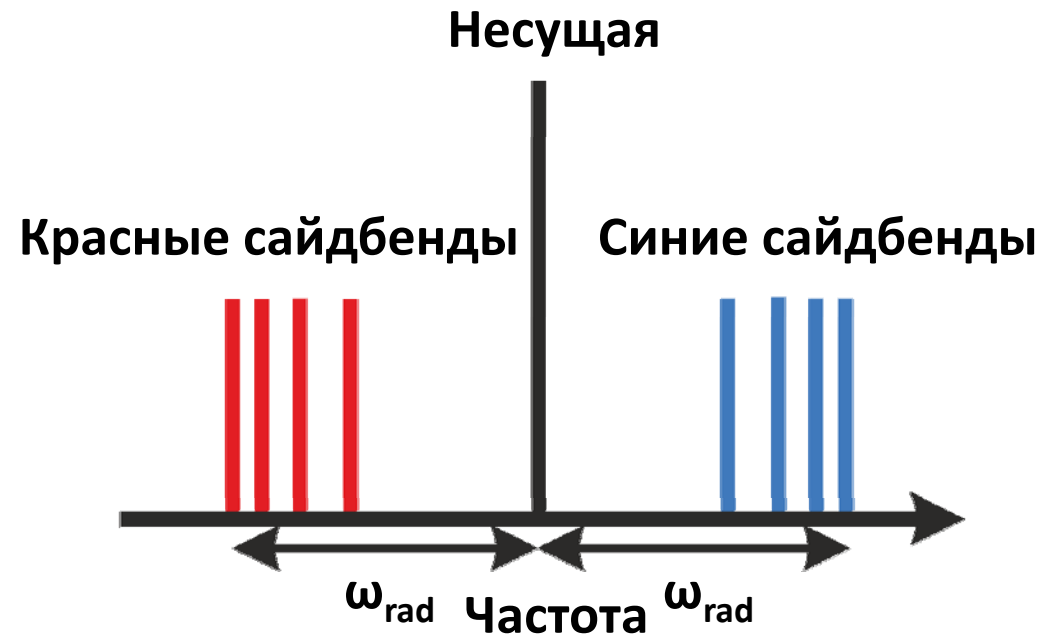
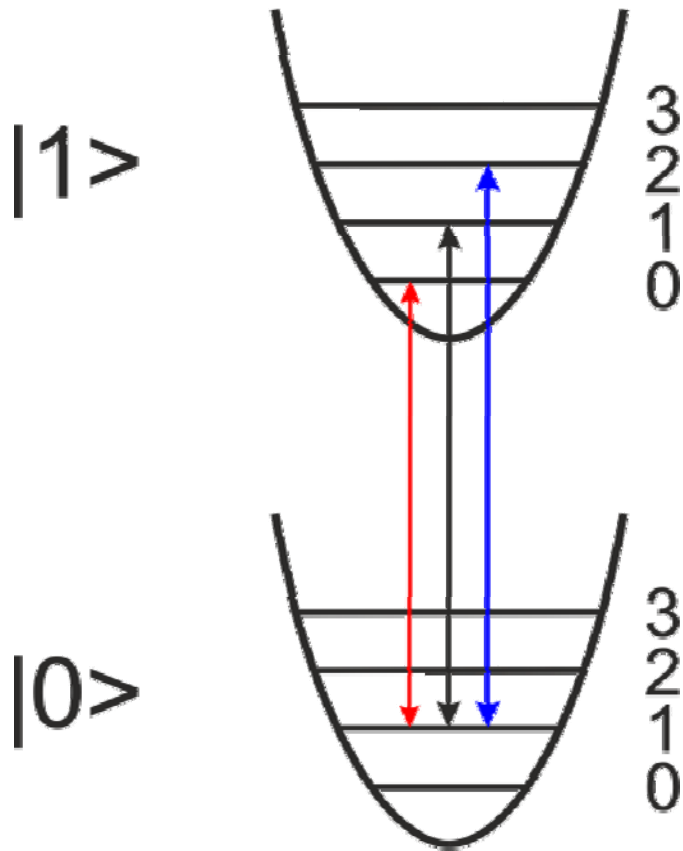


Механически ионы в ловушке – набор связанных маятников со своими нормальными модами

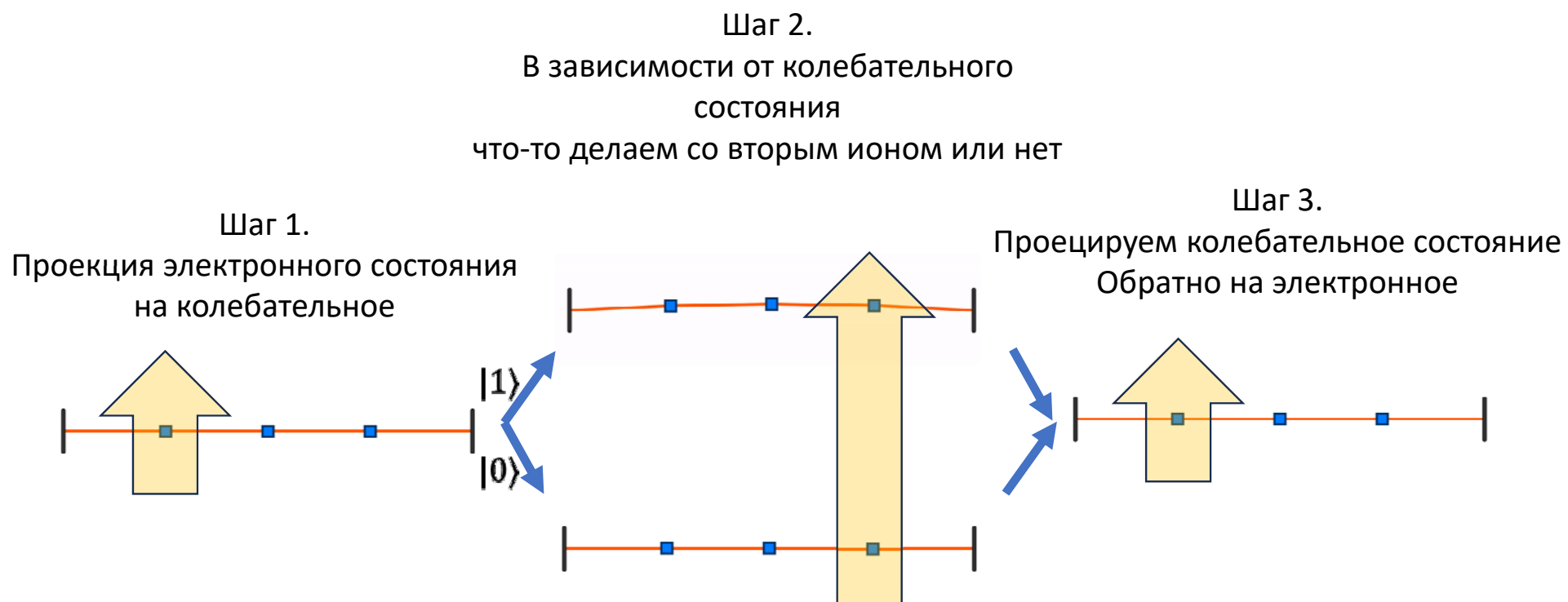


Колебательные моды – шина данных

Этими колебаниями можно когерентно управлять



Перепутывание ионов – гейт Сирака-Цоллера



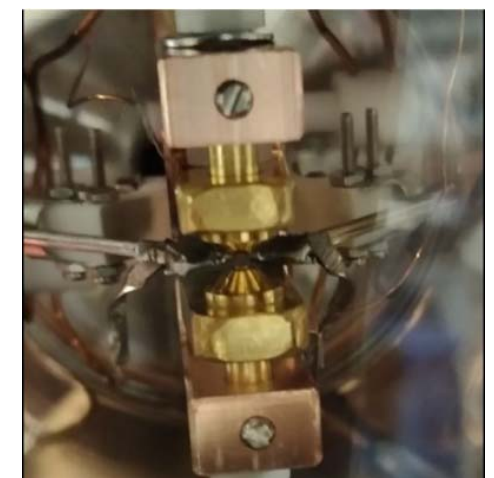
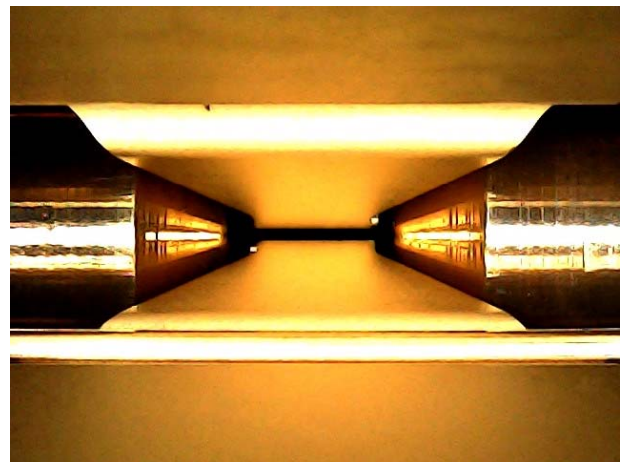
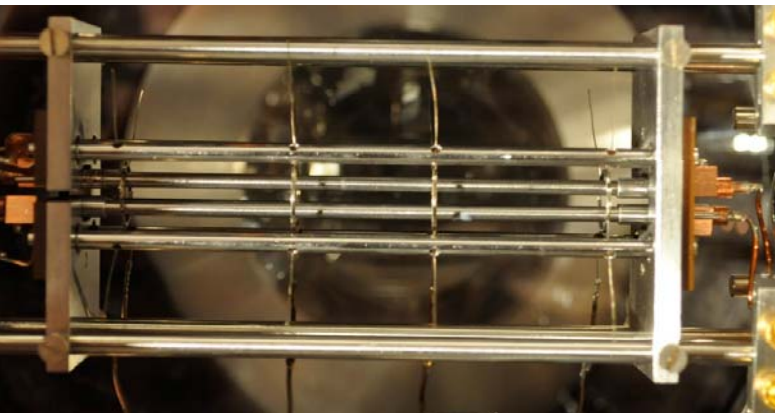
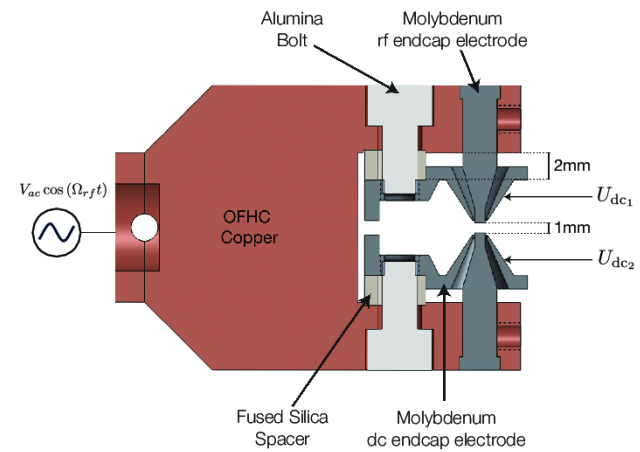
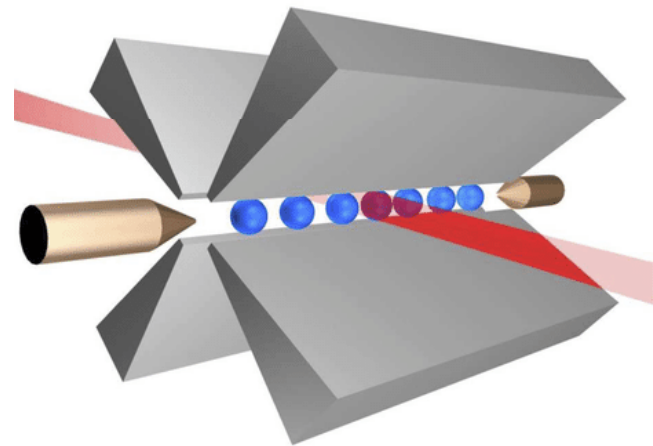
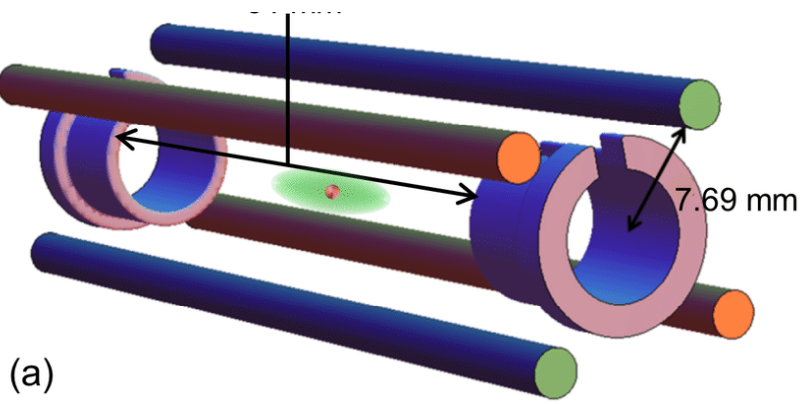
Ионная ловушка Пауля



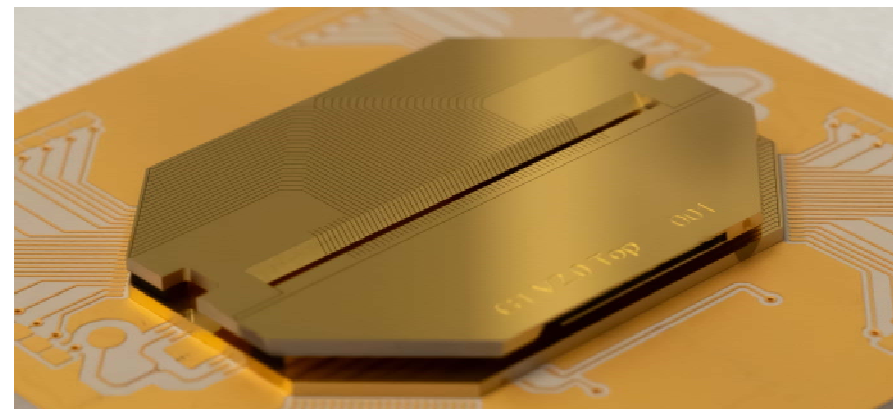
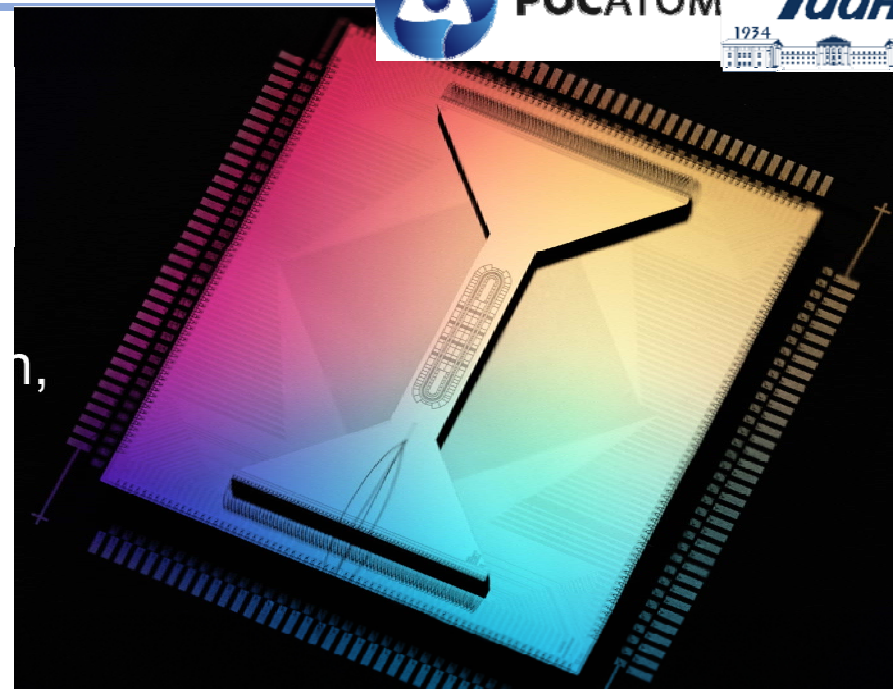
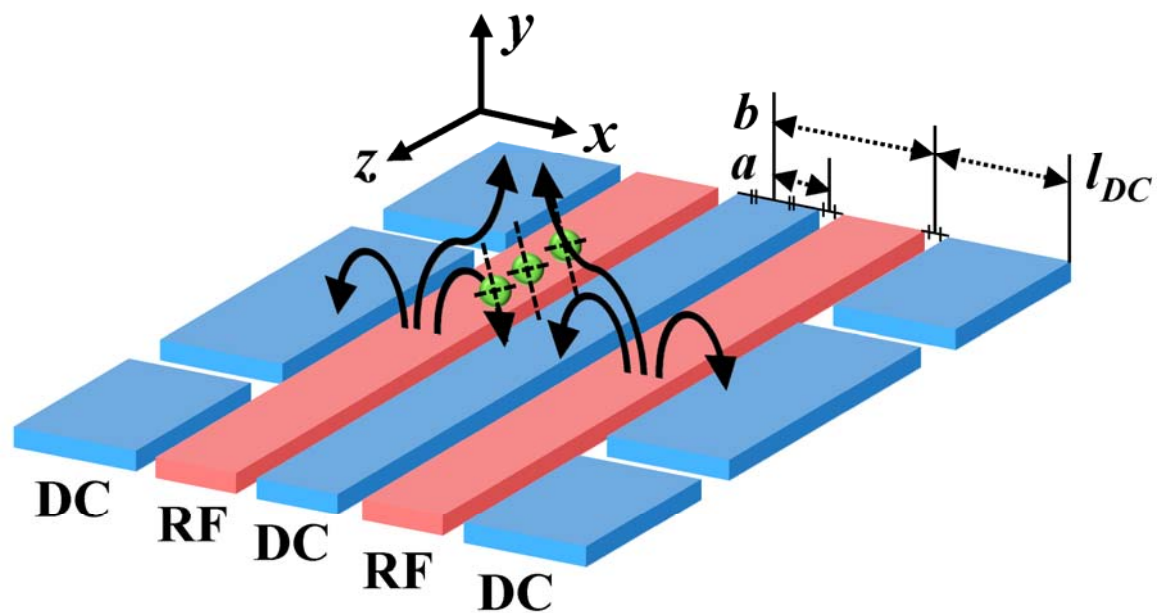
РОСАТОМ



Ионная ловушка Пауля



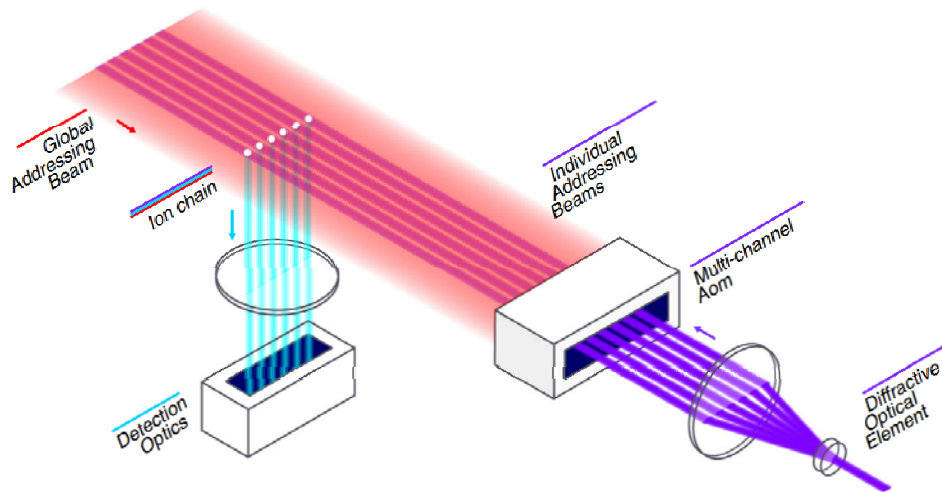
Чип-ловушки Пауля



- Можно использовать литографические технологии
- Компактность
- Сложные конфигурации ловушек, шаттлинг и т.д.

Индивидуальная оптическая адресация

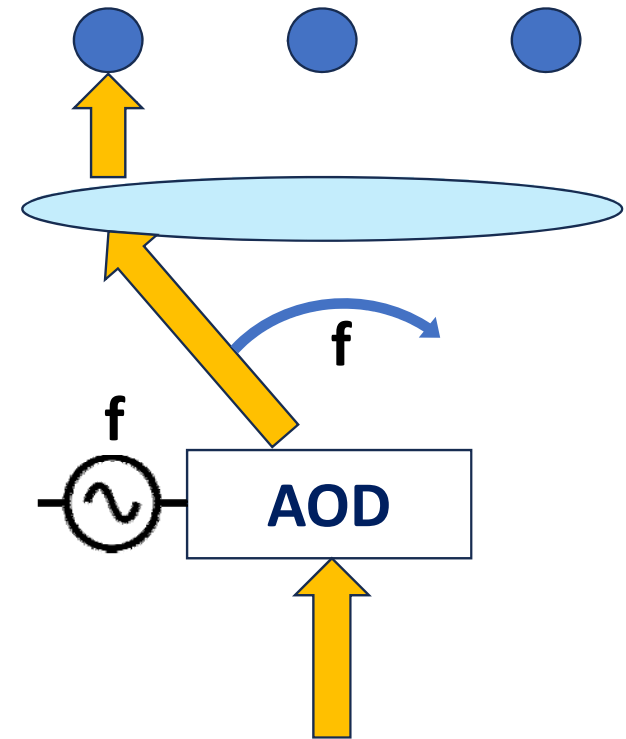
Многоканальный акусто-оптический модулятор



+ Одновременно много независимых пучков

- Неэффективно с точки зрения мощности
- Подразумевает эквидистантность ионов

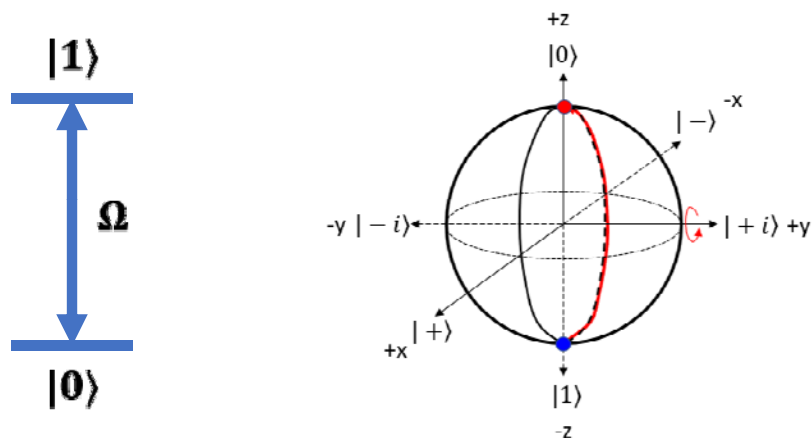
Акусто-оптический дефлектор



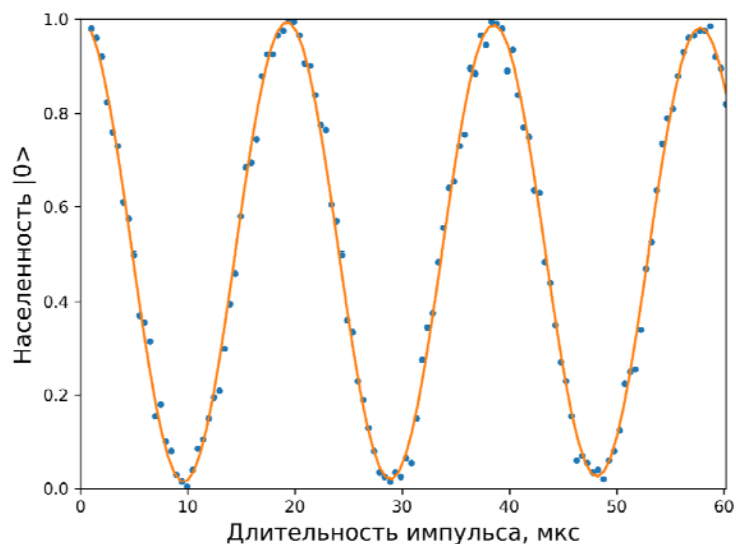
+ Хорошо масштабируется

- Меньше степеней свободы

Однокубитные гейты



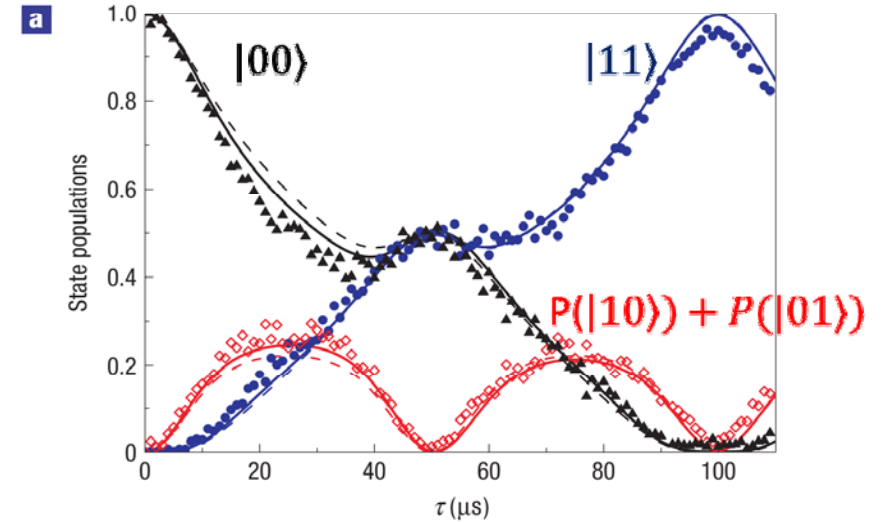
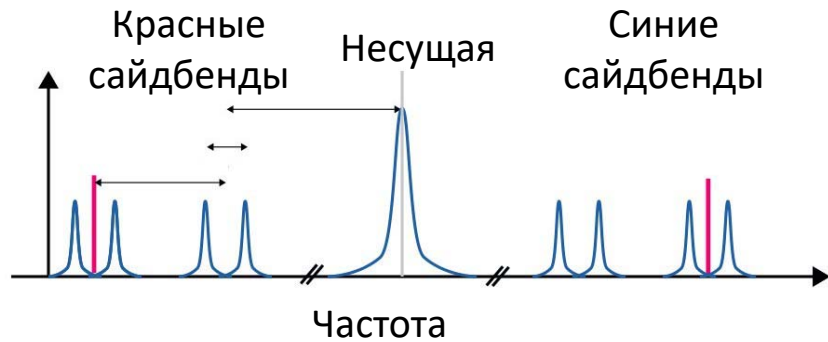
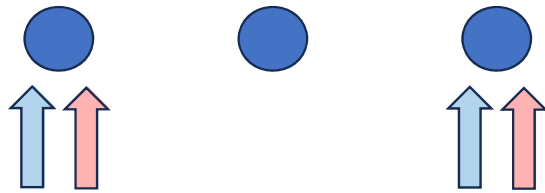
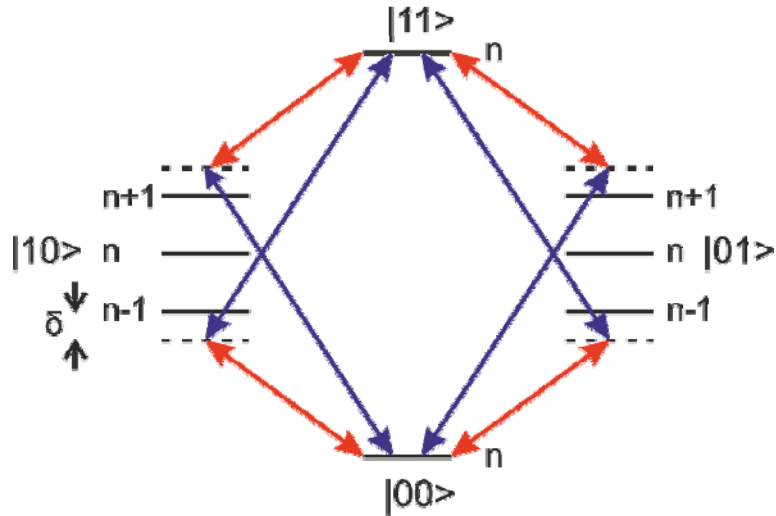
$$R_{\phi}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & ie^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} \\ ie^{-i\phi} \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$$



ϕ – определяется фазой поля
 $\theta = \Omega\tau$ – определяется амплитудой
и длительностью импульса

Составляет универсальный набор
однокубитных операций

Гейт Мёльмера-Зоренсена



Spin-motion coupling

Spin-dependent phase shift

$$U_{MS}(t) = \exp \left[\hat{S} \left(\alpha(t)a + \alpha^*(t)a^\dagger \right) + i\hat{S}^2\Phi(t) \right]$$

$$\alpha(t) = \frac{\eta\Omega_0}{2} \frac{e^{i\epsilon t} - 1}{i\epsilon} e^{i\phi_m} = \frac{\eta\Omega_0}{\epsilon} e^{i\epsilon t/2} \sin(\epsilon t/2) e^{i\phi_m}$$

$$R_{XX}(\theta) = \exp \left(-i\frac{\theta}{2} X \otimes X \right) = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\theta}{2}) & 0 & 0 & -i \sin(\frac{\theta}{2}) \\ 0 & \cos(\frac{\theta}{2}) & -i \sin(\frac{\theta}{2}) & 0 \\ 0 & -i \sin(\frac{\theta}{2}) & \cos(\frac{\theta}{2}) & 0 \\ -i \sin(\frac{\theta}{2}) & 0 & 0 & \cos(\frac{\theta}{2}) \end{pmatrix}$$

Использование кудитов

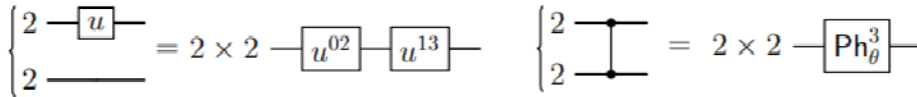


РОСАТОМ

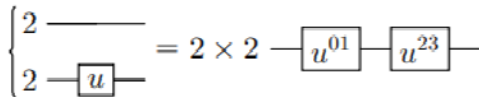


- Дополнительные уровни можно использовать в качестве ancilla => алгоритмы можно сделать эффективнее
- Более плотное кодирование информации
 - Все системы одинаковой размерности изоморфны друг-другу

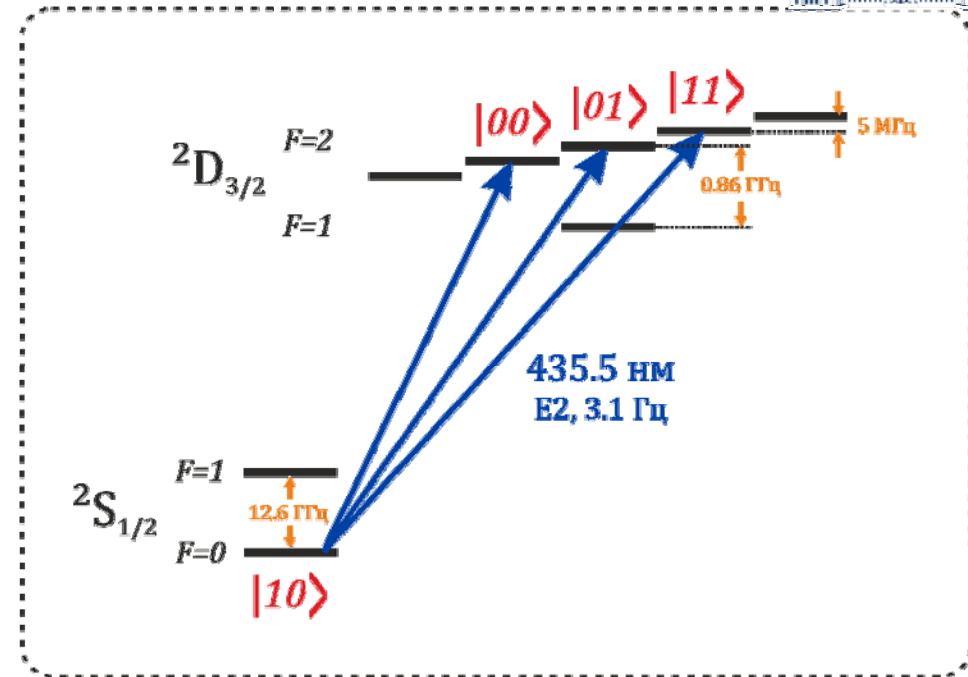
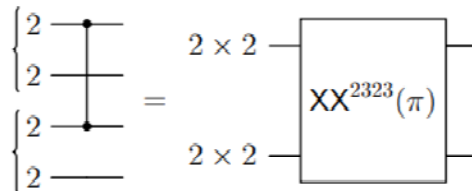
$$\begin{aligned} |0\rangle|0\rangle &\rightarrow |2\rangle \\ |0\rangle|1\rangle &\rightarrow |1\rangle \\ |1\rangle|0\rangle &\rightarrow |0\rangle \\ |1\rangle|1\rangle &\rightarrow |3\rangle \end{aligned}$$



(b)



(d)



Nikolaeva A. S., Kiktenko E. O., Fedorov A. K. Universal quantum computing with qubits embedded in trapped-ion qudits //Physical Review A. – 2024. – Т. 109. – №. 2. – С. 022615

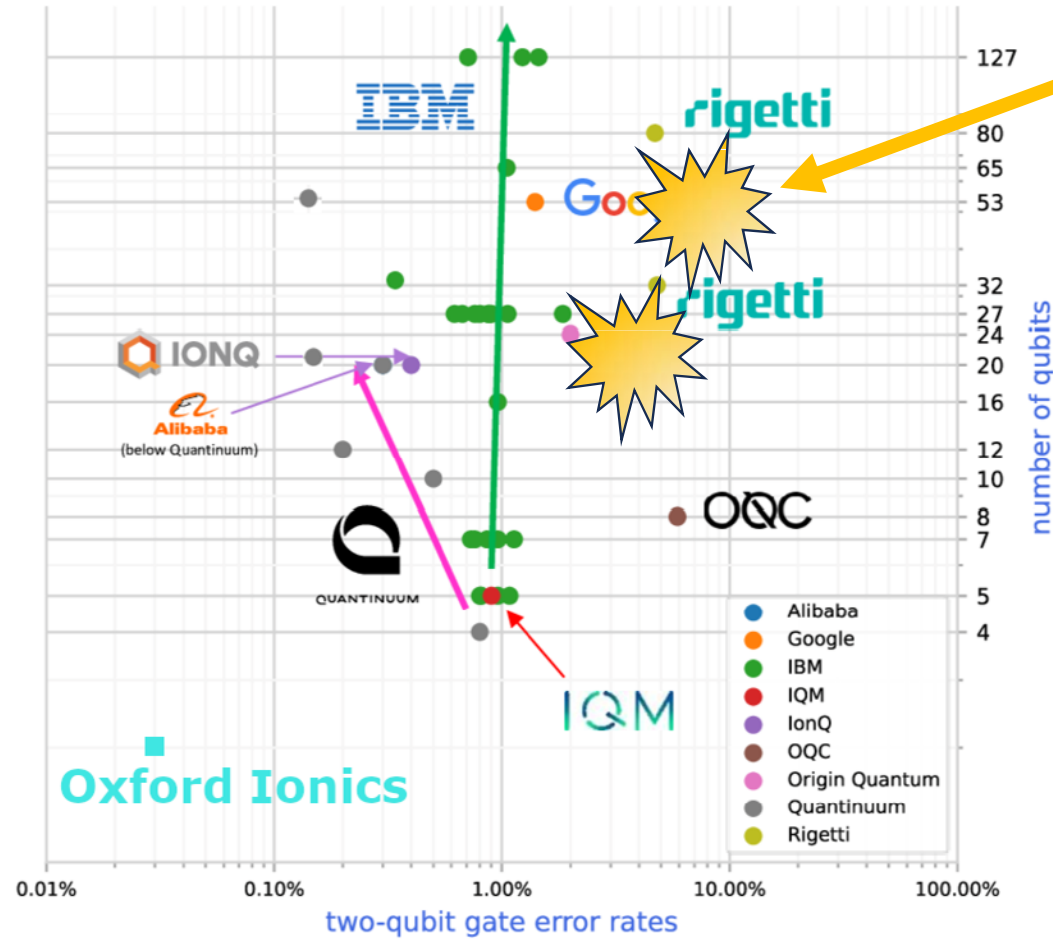
Ионный компьютер в России



РОСАТОМ

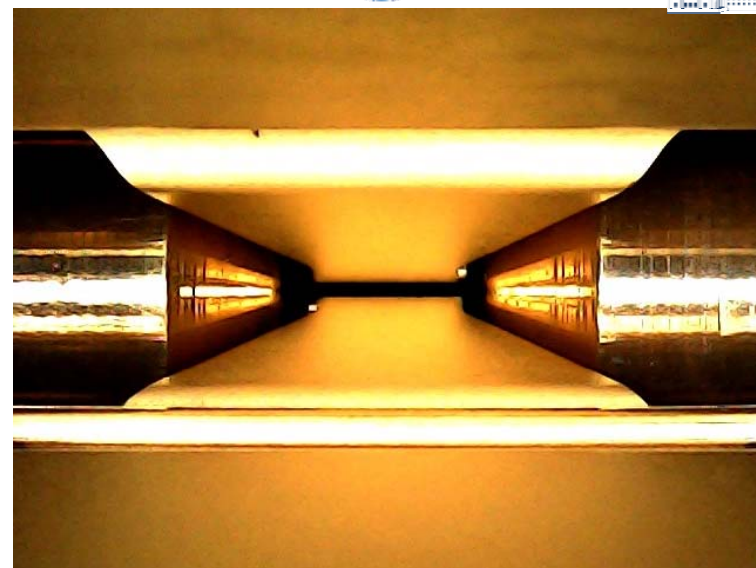
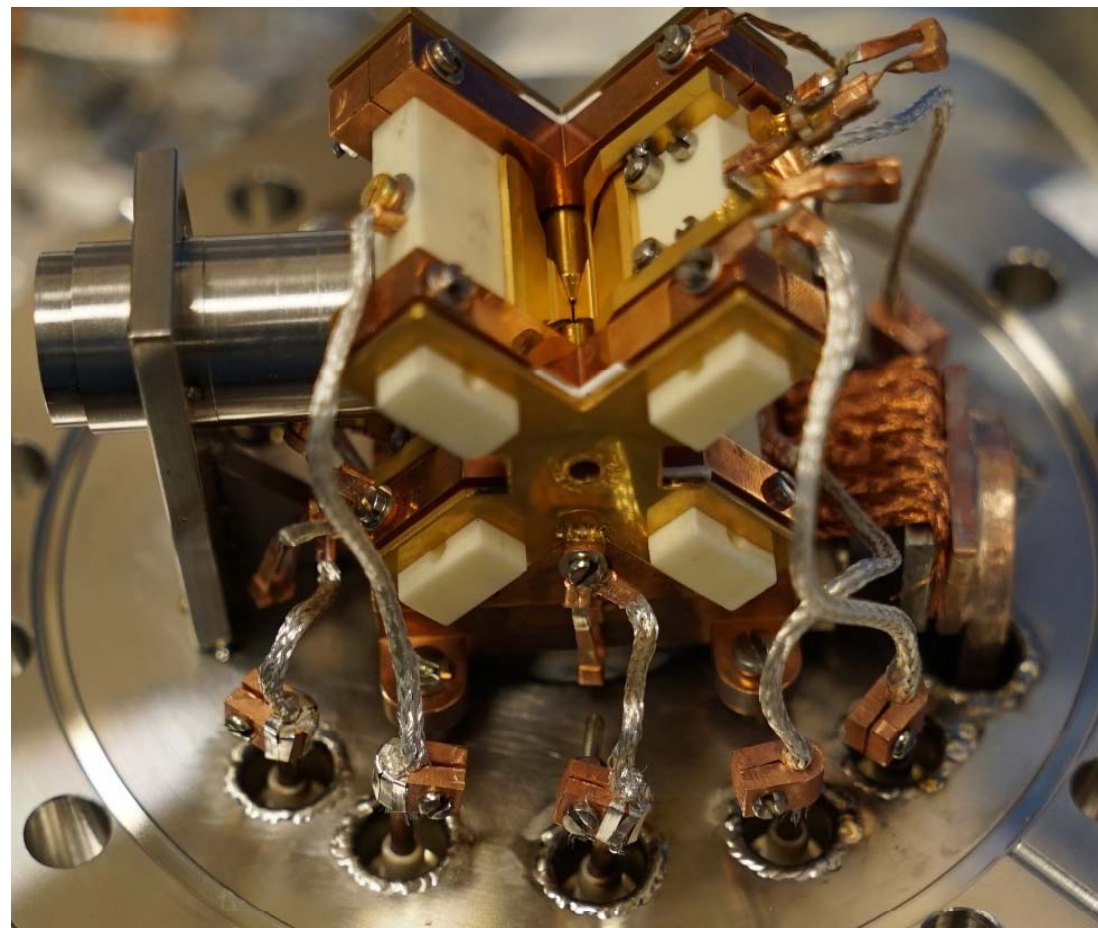


1974 2024



ЭТО МЫ

Ионная ловушка



- Позолоченные медные электроды
- $\omega_{\text{rad}} = 2 \pi \times 3.8 \text{ MHz}$,
- $\omega_{\text{ax}} = 2 \pi \times 120 \text{ kHz}$
- Внутривакуумная оптика

- Охлаждение до $-100 \text{ }^\circ\text{C}$

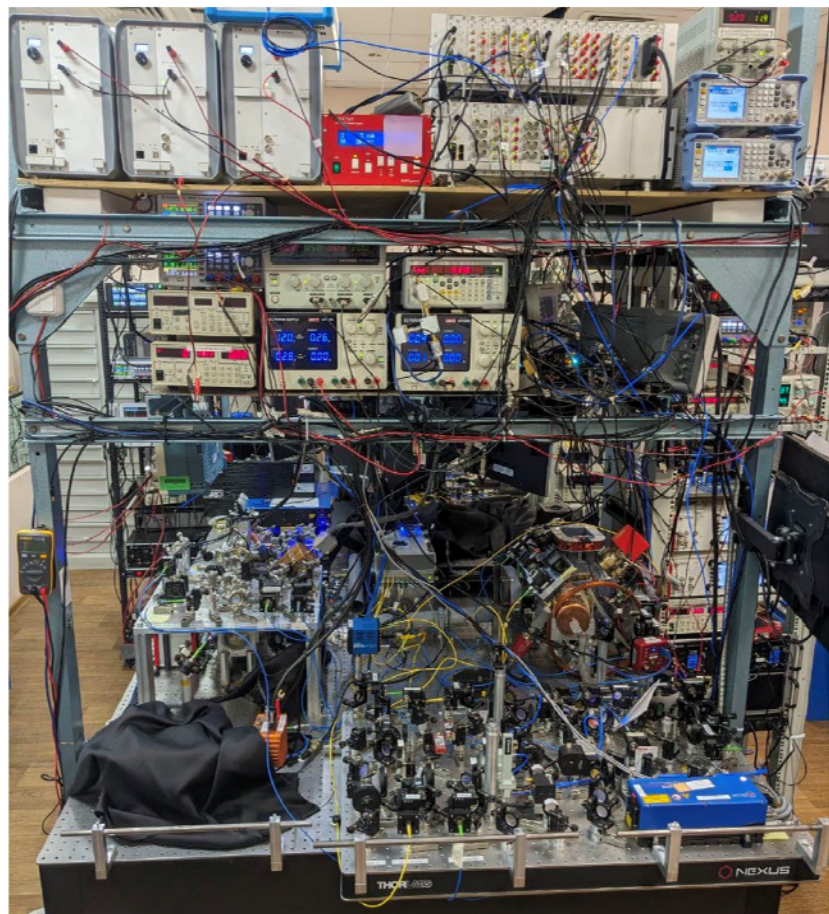
Экспериментальная установка



РОСАТОМ

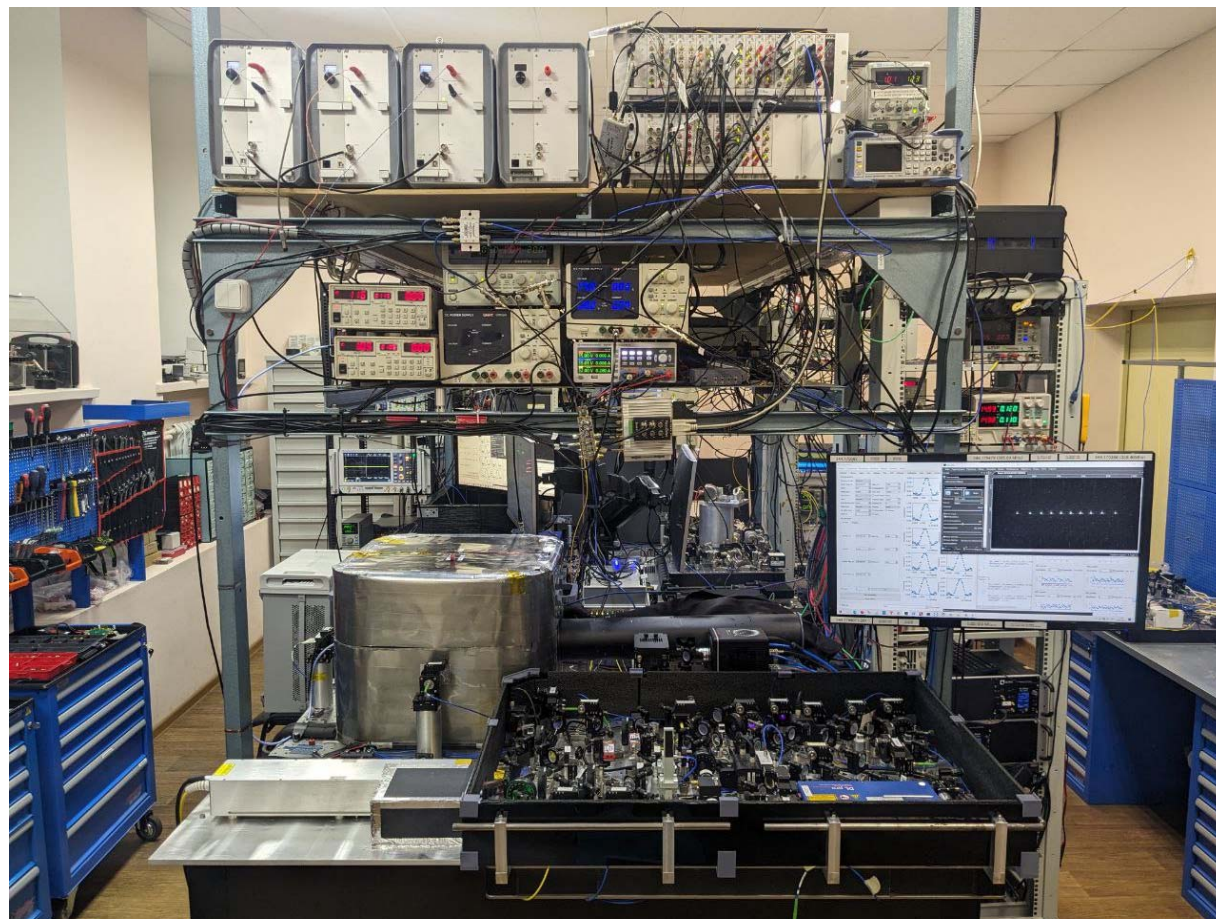


2022 год



||

2023 год

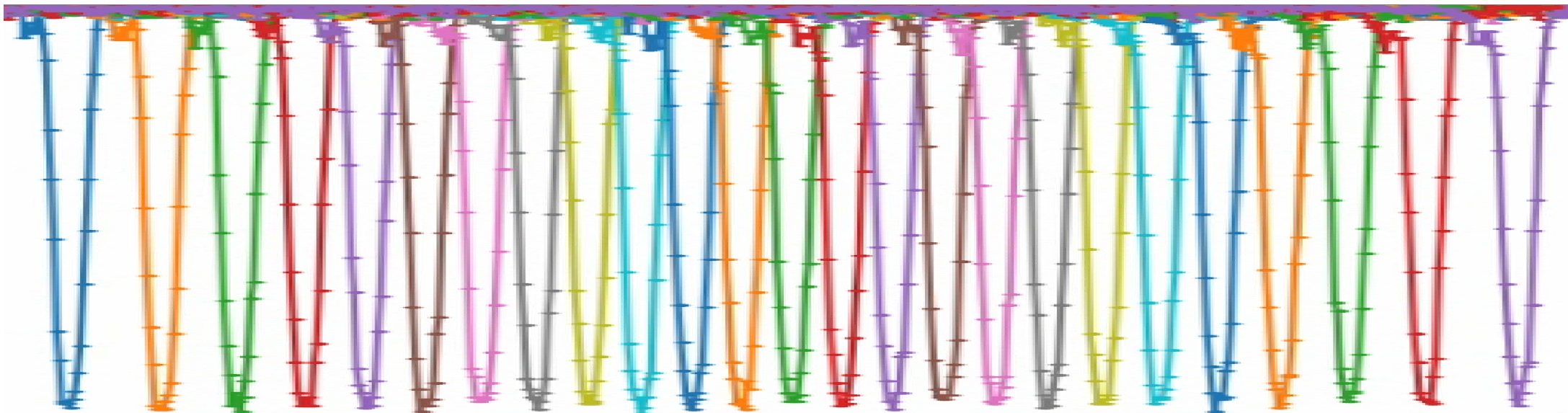


Линейный ионный кристалл



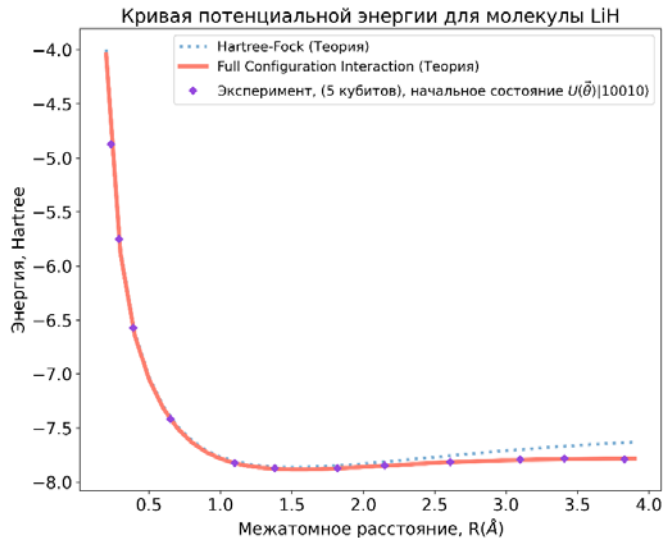
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

Адресация дефлектором



Мы изучаем и реализуем алгоритмы

Квантовая химия

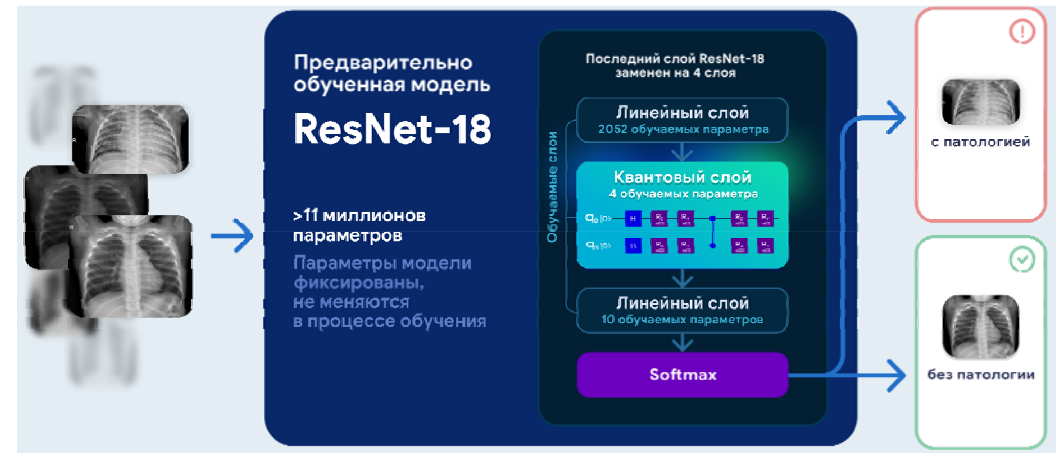
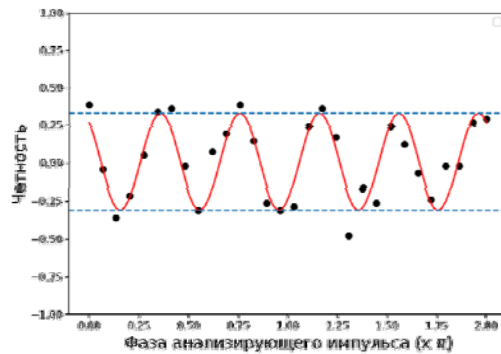
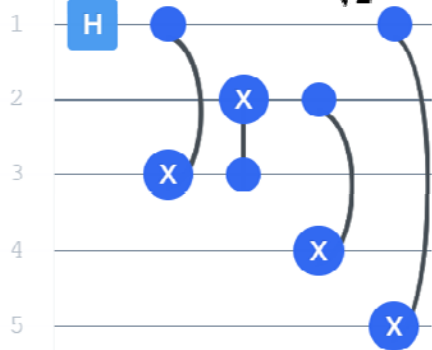


Квантовое машинное обучение

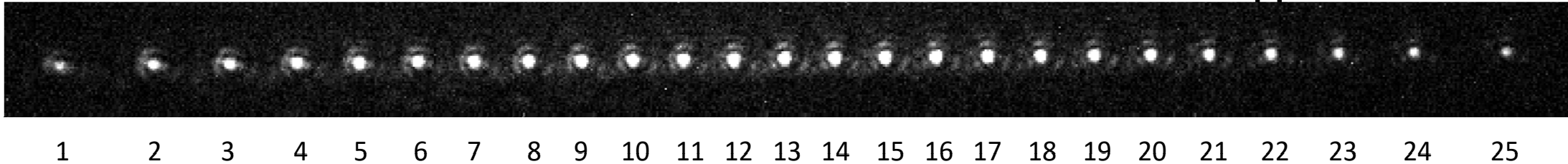


Полностью перепутанное GHZ состояние

$$|GHZ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00000\rangle + |11111\rangle)$$

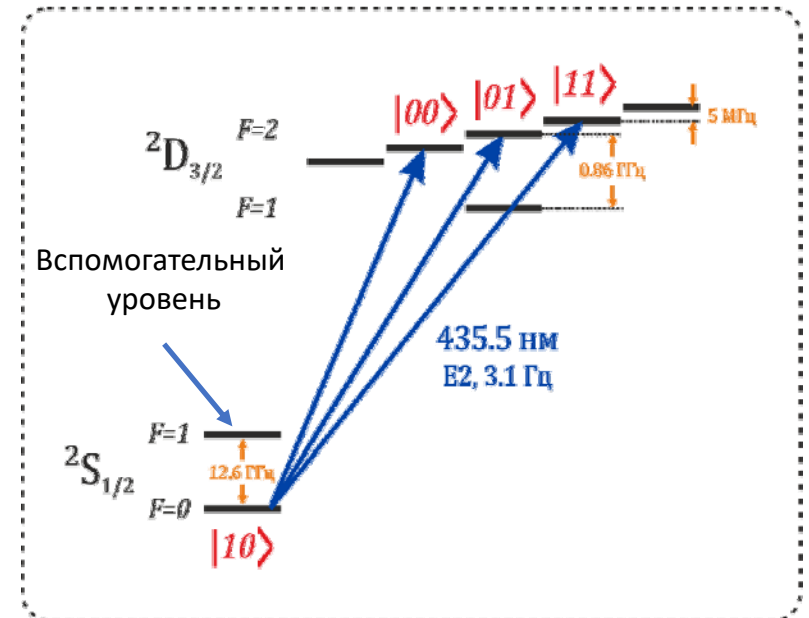


Демонстрация 50-кубитного вычислителя (2024 г)



25 ионов (квартов), каждый из которых кодирует по 2 кубита

- Индивидуальная адресация и считывание каждого иона
- Полный универсальный набор однокубитных и двухкубитных операций
- Полная связность
- Возможность использования дополнительных уровней-анцилл для оптимизации квантовых алгоритмов
- Совместимость с прототипом облачной платформы



$^{171}\text{Yb}^+$

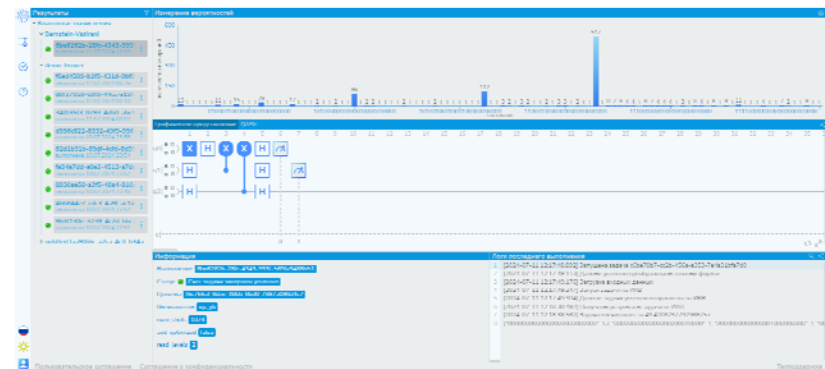
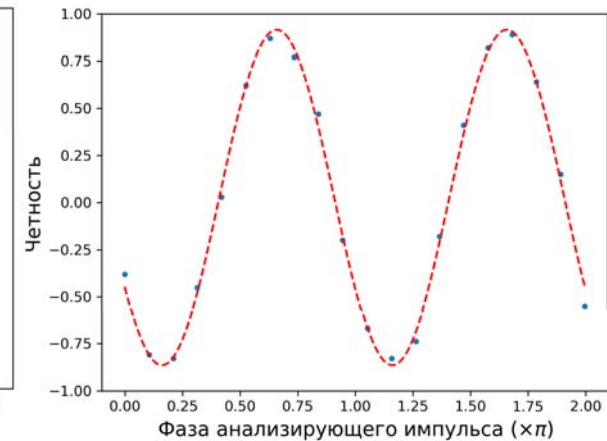
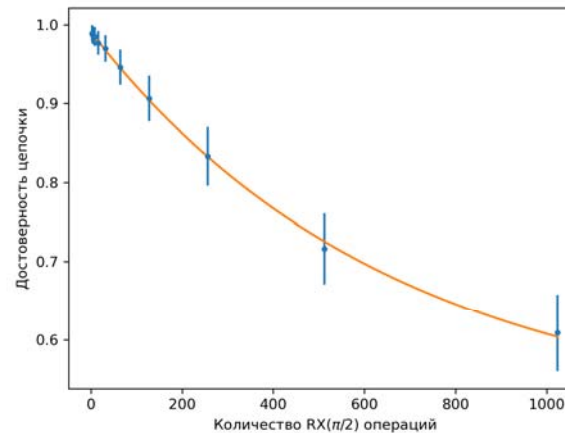
Демонстрация 50-кубитного вычислителя (2024 г)

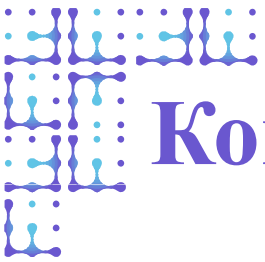


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

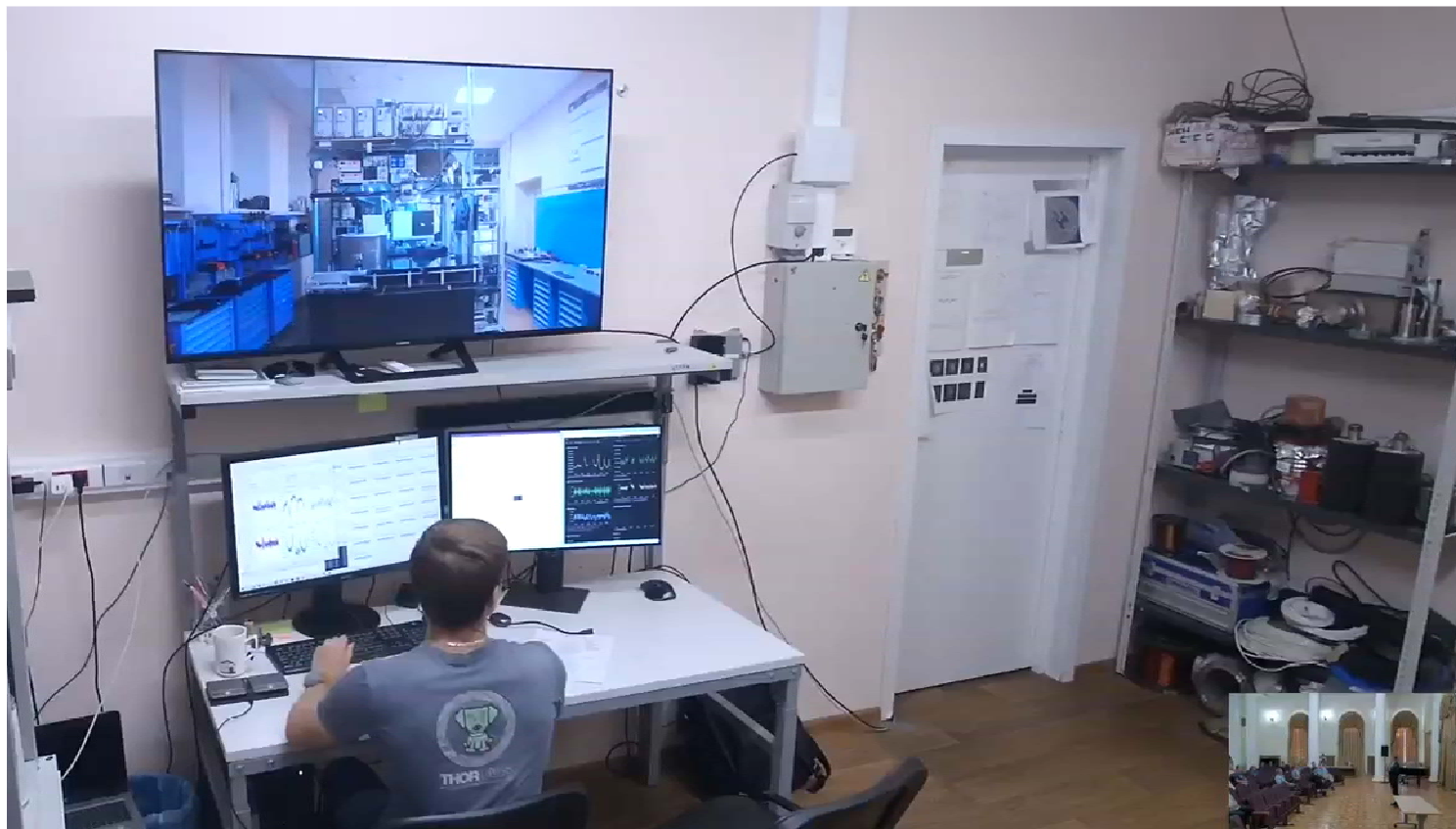
Результаты:

- $F_{1Q} = 99.85\%$ (рандомизированный бенчмаркинг)
- $F_{2Q} > 90\%$ (достоверность подготовки состояния Белла)
- Запуск бенчмаркинг-алгоритмов (алгоритм Бернштейна-Вазирани, алгоритм Гровера)





Контрольный эксперимент





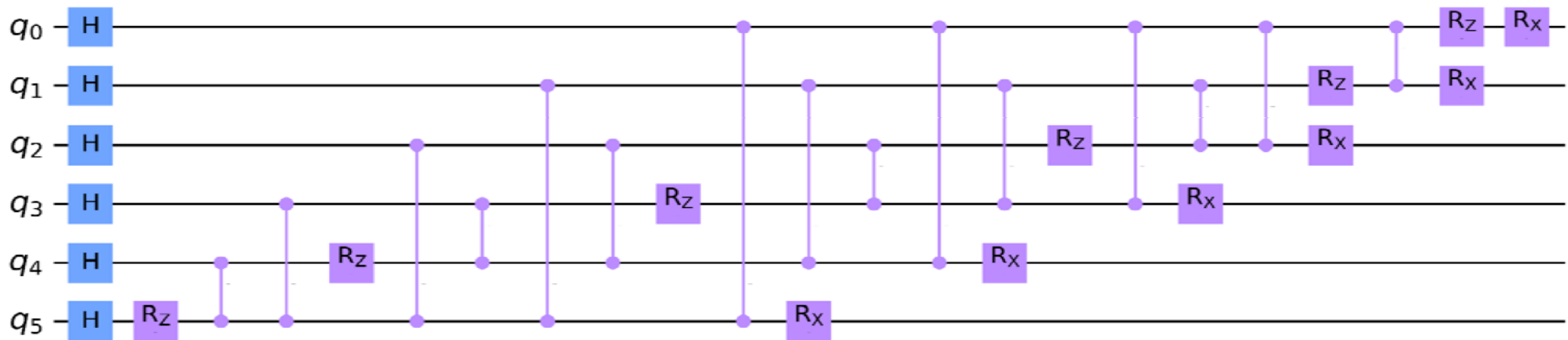
Оптимизация под решение практических задач



- Фокусировка на задачах, наиболее полно использующих преимущества платформы (высокое качество операций, полная связность)
- Исследование эффективных кодировок под различные задачи, адаптация нативных операций для повышения эффективности транспилиации
- Реализация квантовой коррекции ошибок



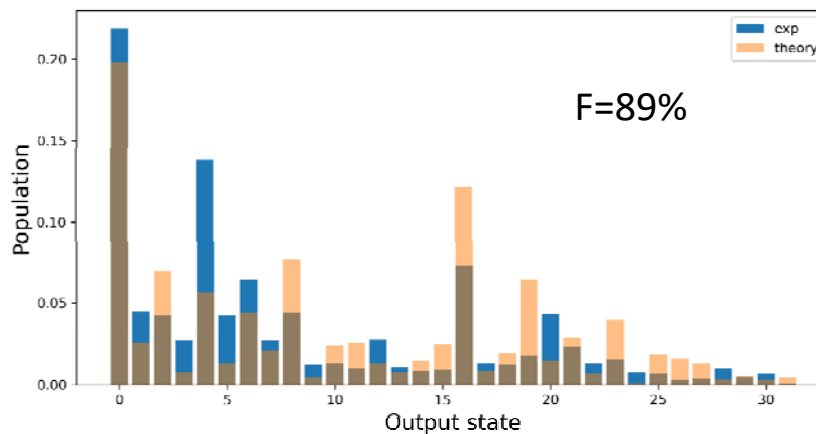
- Выполнен алгоритм Шнорра, включая квантовую часть fpQAOA (квантовый алгоритм приближенной оптимизации с фиксированными параметрами)
- Число $1591=37 \times 43$ разложено на простые множители с использованием 6 ионов из 10
- 15 двухкубитных операций с произвольными углами, полная связность



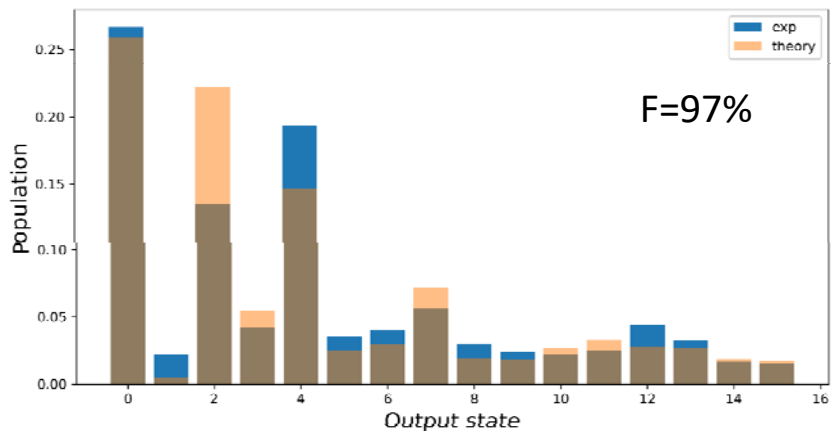
$$F_S(P_{ideal}, P_{output}) = \left(\sum_x \sqrt{P_{output}(x)P_{ideal}(x)} \right)^2$$

<https://arxiv.org/pdf/2308.05071>

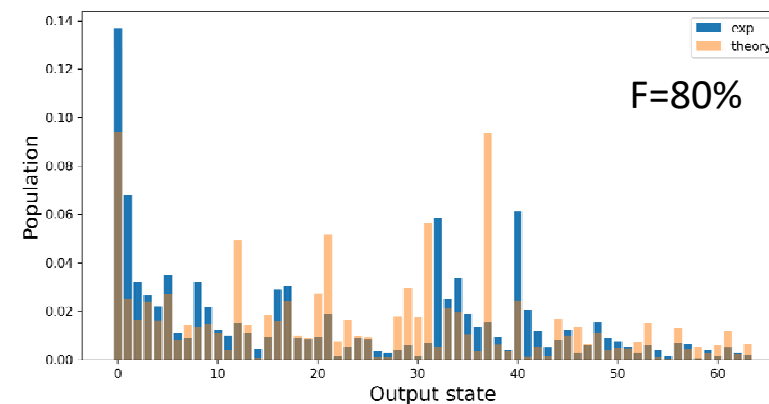
5 ИОНОВ

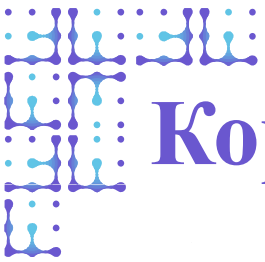


4 иона

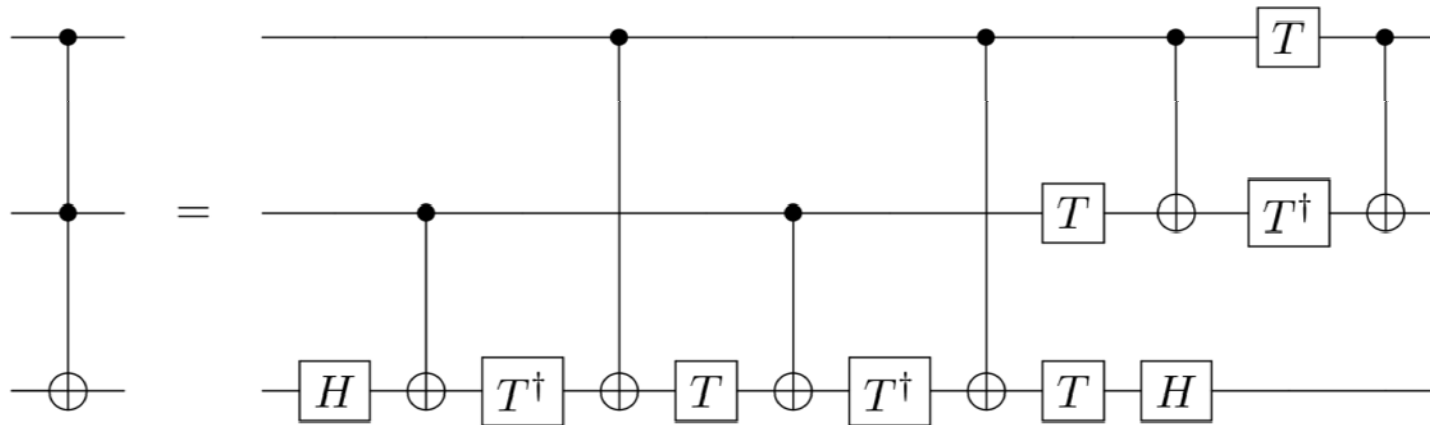


6 ИОНОВ





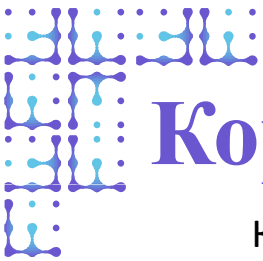
Коррекция ошибок – гейт Тоффоли



$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$$

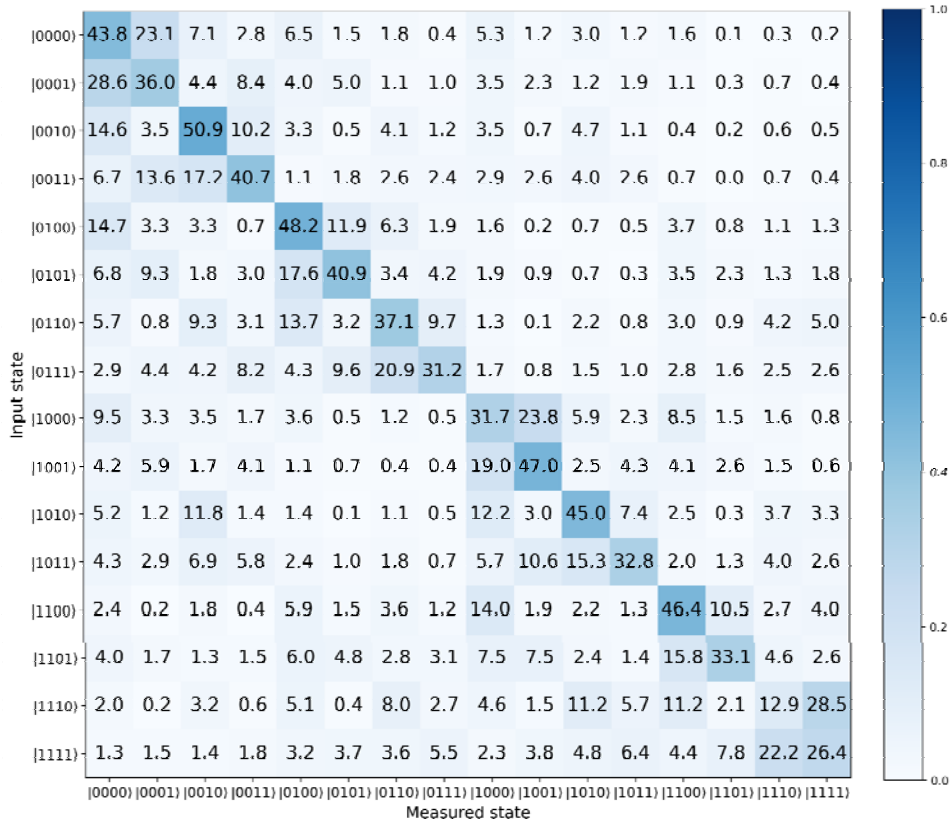
- Гейты Тоффоли играют ключевую роль в:
 - алгоритмах коррекции ошибок
 - алгоритме Гровера.
- Число двухкубитных операций быстро растет с увеличением числа кубит ($\sim N^2$)

N	3	4	5	6
2Q	6	14	36	92

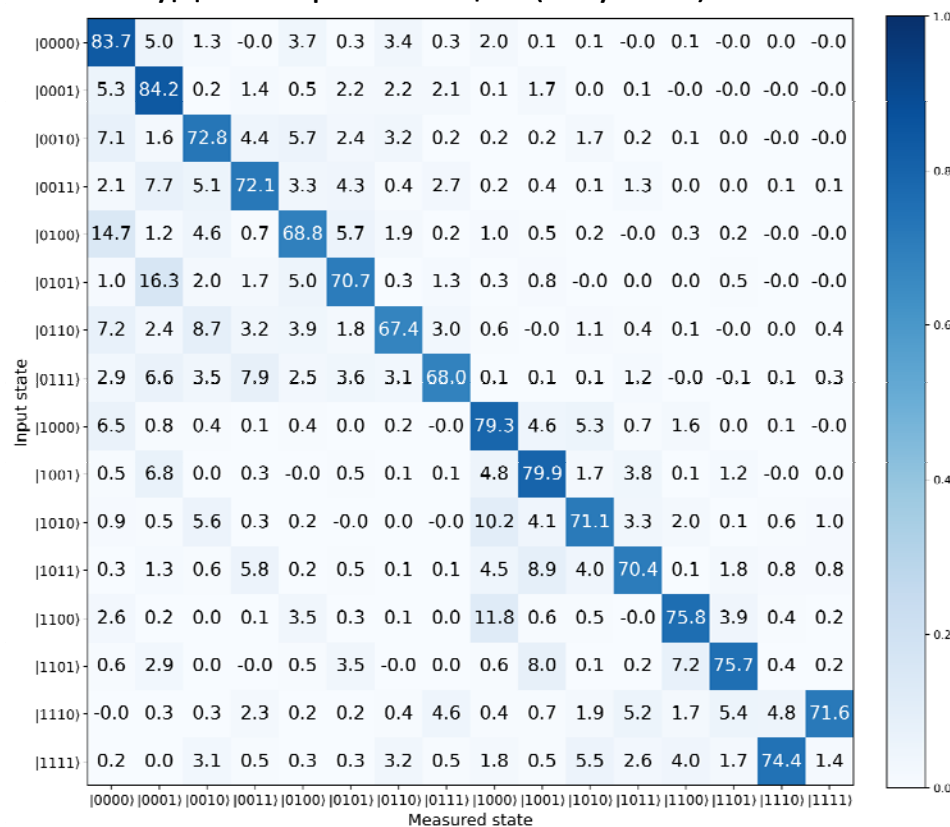


Коррекция ошибок – гейт Тоффоли

Кубитная реализация (4 кубита) F = 39%



Кудитная реализация (4 кубита) F = 74%



Nikolaeva A. S. et al. //arXiv preprint arXiv:2407.07758. – 2024.

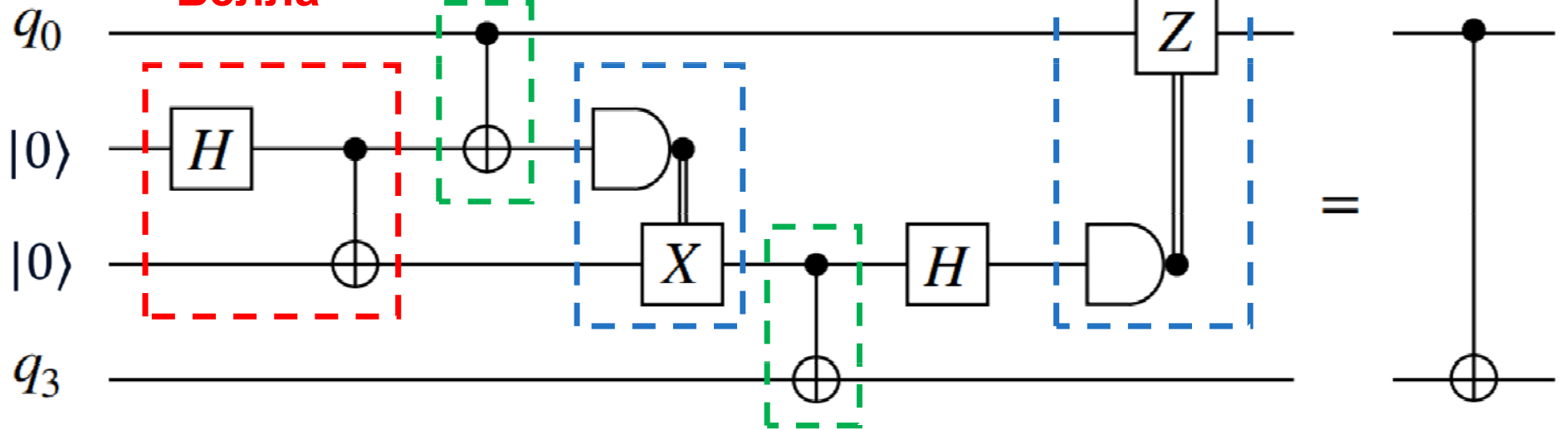


Коррекция ошибок – промежуточное считывание

Промежуточное считывание и
условные вентили

Создание состояния

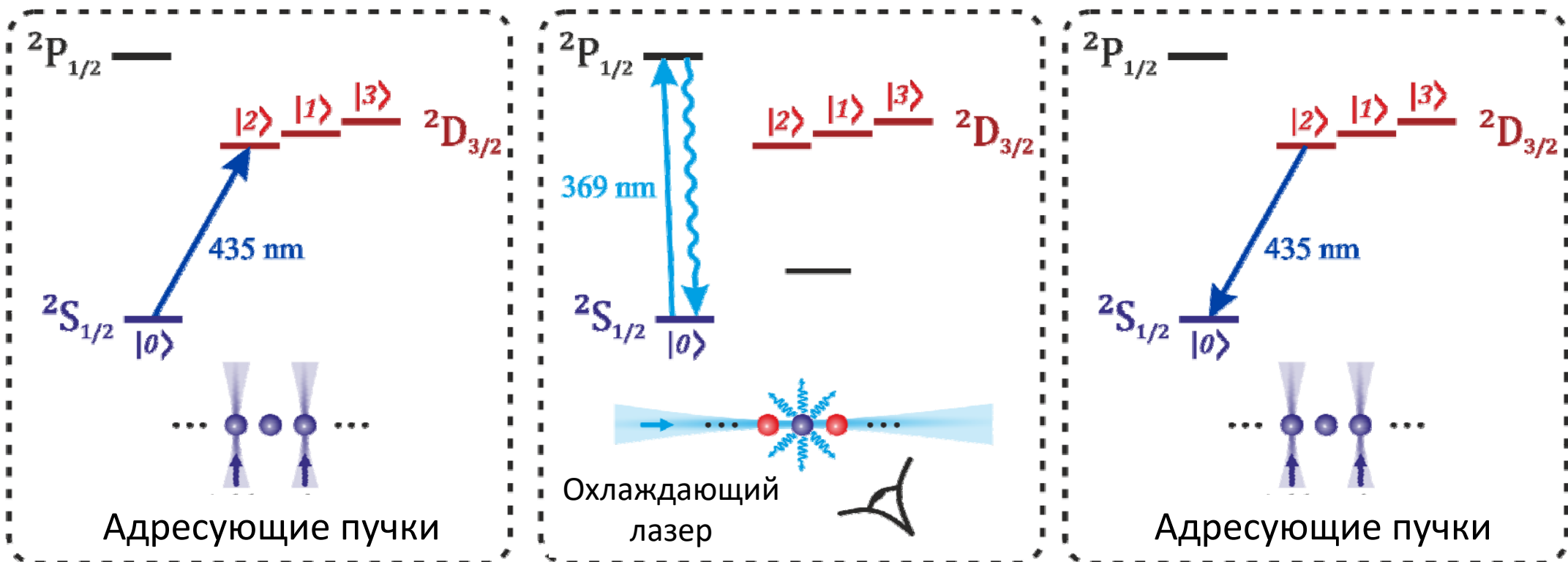
Белла

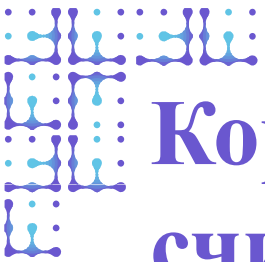


Локальные операции

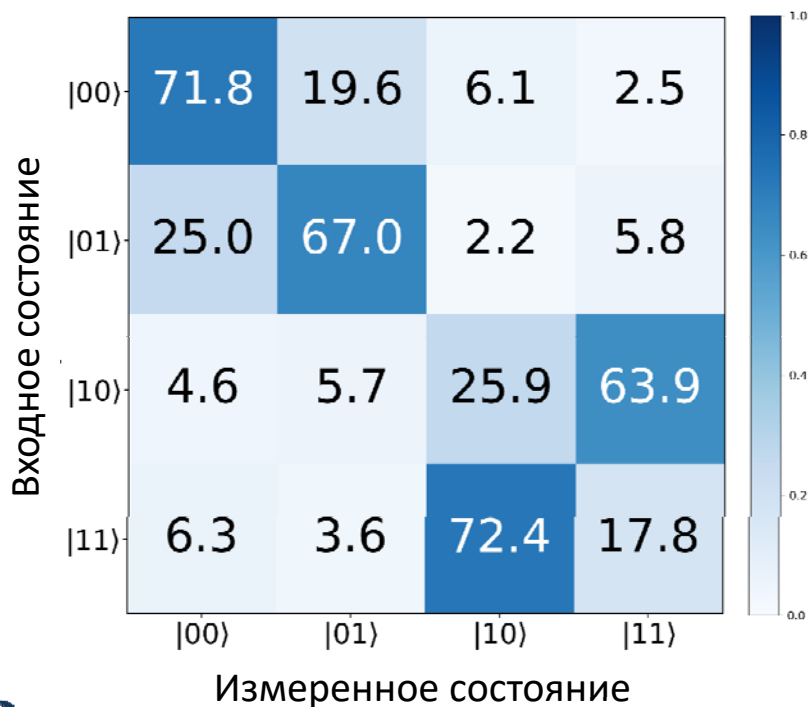


Коррекция ошибок – промежуточное считывание





Коррекция ошибок – промежуточное считывание

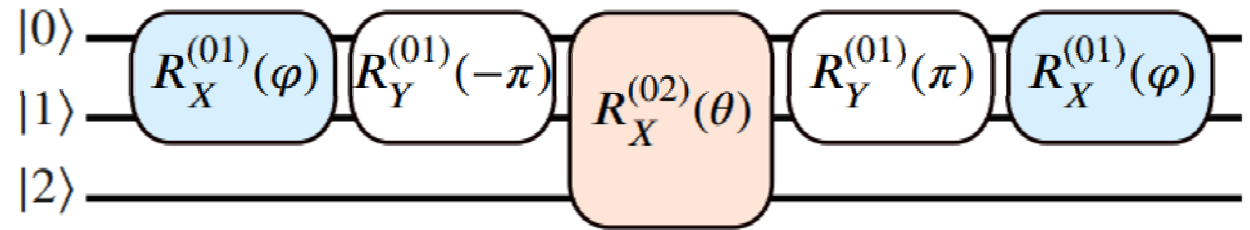


$$H = \sigma_x + ir\sigma_z = \begin{pmatrix} ir & 1 \\ 1 & -ir \end{pmatrix}$$

$$h_{\pm} = \pm h, h = \sqrt{1 - r^2}$$

$r < 1$: PT-symmetry unbroken
 $r > 1$: PT-symmetry broken

- Параметры гамильтониана r, t кодируются в φ, Θ

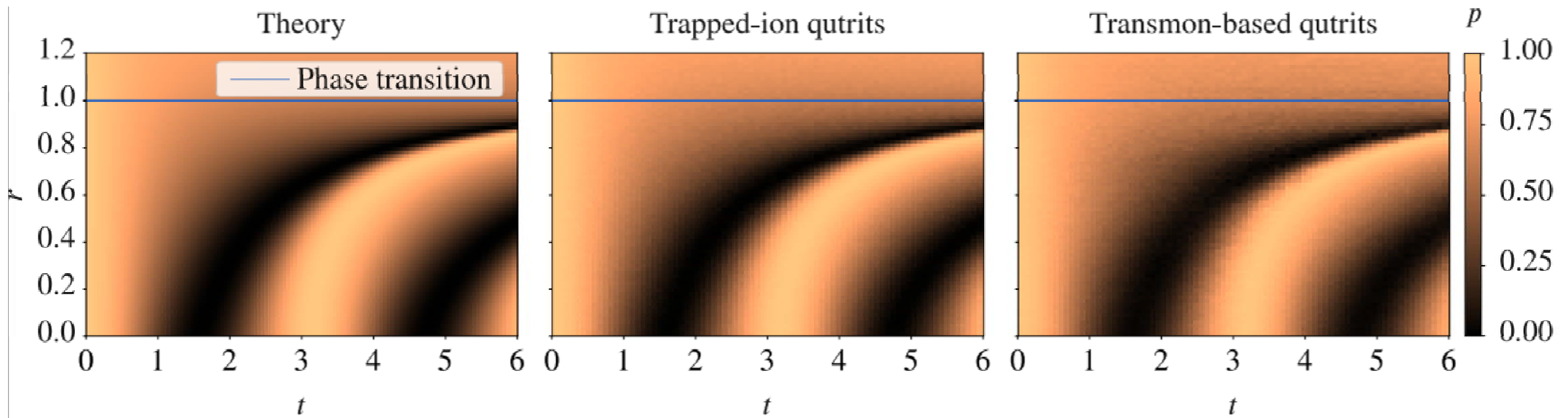


$$\sigma_{\pm}(t) = \frac{1}{|h|} \left(\sqrt{|1 - r^2 \cos^2(ht)|} \pm |r \sin(ht)| \right)$$

$$\varphi(r, t) = \arctan \frac{\tan(ht)}{h}, \quad \theta(r, t) = -2 \arccos \frac{\sigma_-}{\sigma_+}$$

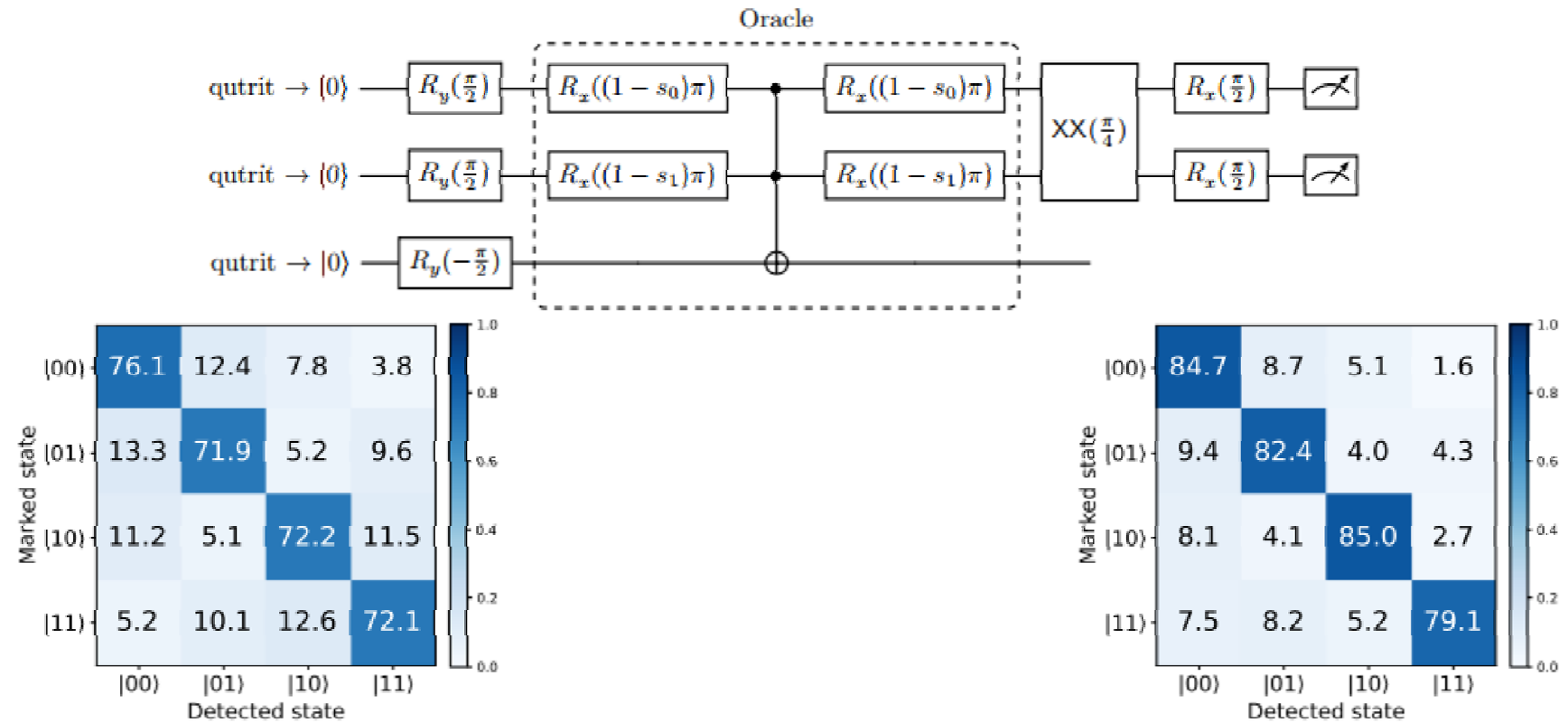
$$\frac{p_0(r, t)}{p_0(r, t) + p_1(r, t)}$$

Кутритная симуляция нарушения РТ-симметрии



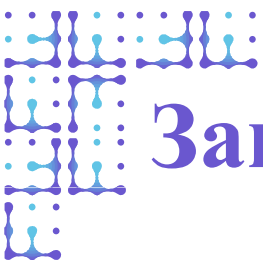
5 из 10 ионов использовались параллельно
для ускорения вычислений

3-кубитный Гровер с использованием кудитов



Grover's results with qubits (7 2Q gates)

Grover's results with quDits (4 2Q gates)



Заключение



- Был экспериментально продемонстрирован 50-кубитный квантовый процессор с универсальным набором квантовых операций
- Показана возможность выполнения на нем квантовых алгоритмов с использованием облачной платформы
- Начаты работы по реализации алгоритмов коррекции ошибок
- Ведутся исследования по адаптации платформы для реализации практических алгоритмов (задачи оптимизации)



Перспективы

Проблема #1 – скорость

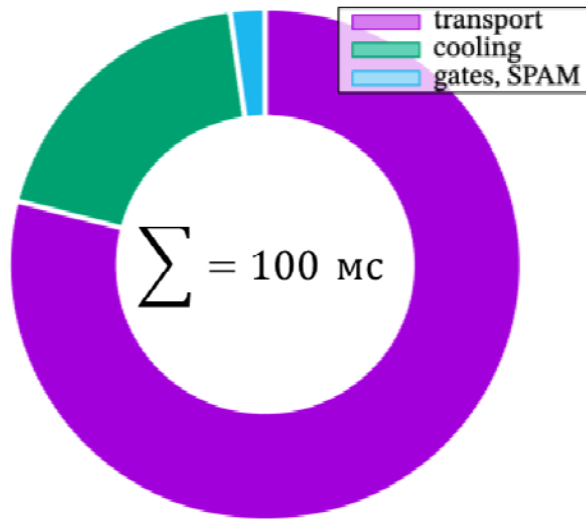
$$\omega_{ax} \sim 2\pi \times 500 \text{ кГц}$$

$$\omega_{rad} \sim 2\pi \times 4 \text{ МГц}$$

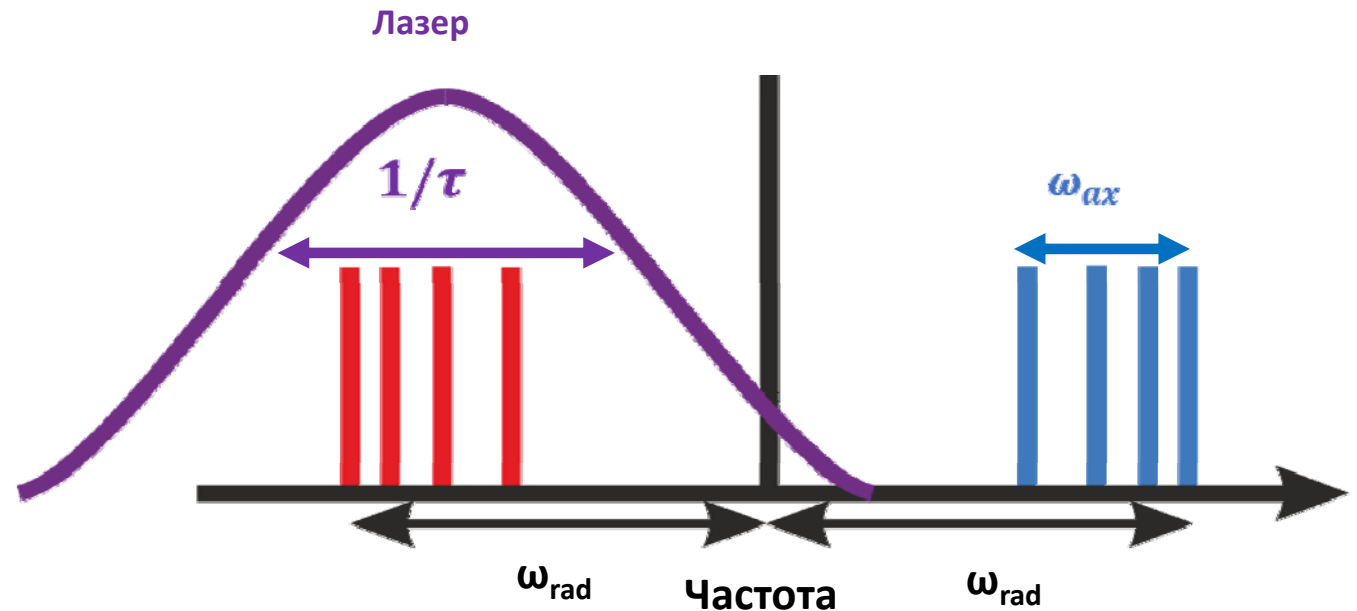
При сокращении времени гейта начинается взаимодействие со всеми модами и несущей.

Характерное время двухкубитных гейтов $\sim 100 \text{ мкс}$

Рекордное время $\sim 1.6 \text{ мкс}$

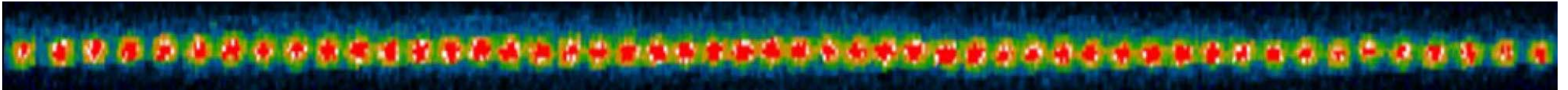


Распределение времени на 1 шот



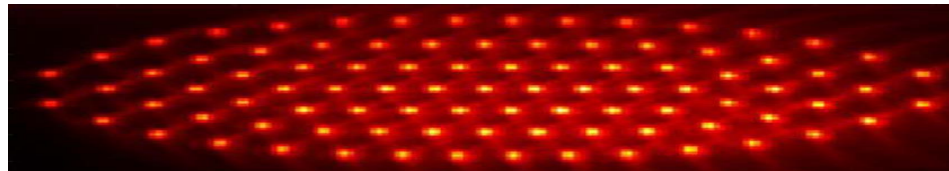
Проблема #2 – масштабирование

1. Сложно индивидуально адресовать и считывать

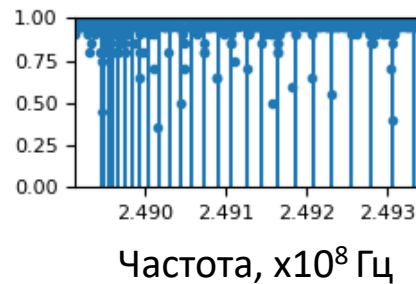


~2-3 мкм между ионами

2. Кристалл начинает «ломаться»



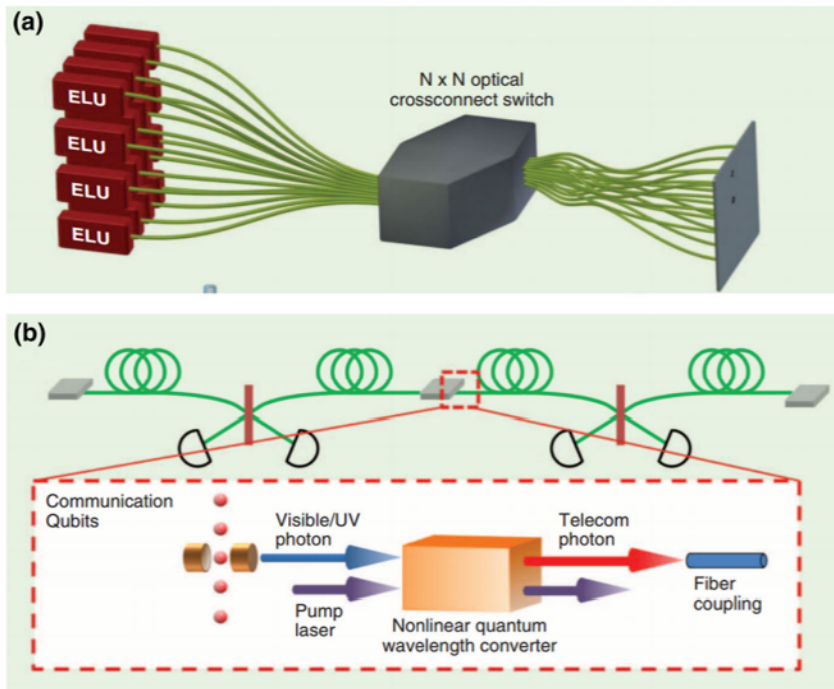
3. Очень много колебательных мод



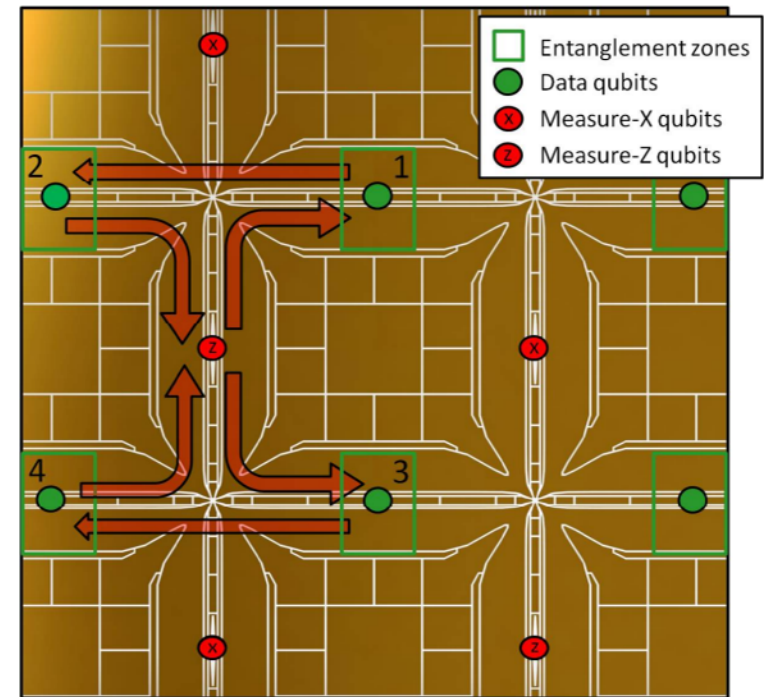
Подходы к масштабированию

Главная проблема: сложность работы с длинными цепочками. Медленно и сложно.

Базовая идея: перейти на работу с несколькими цепочками комфортного размера

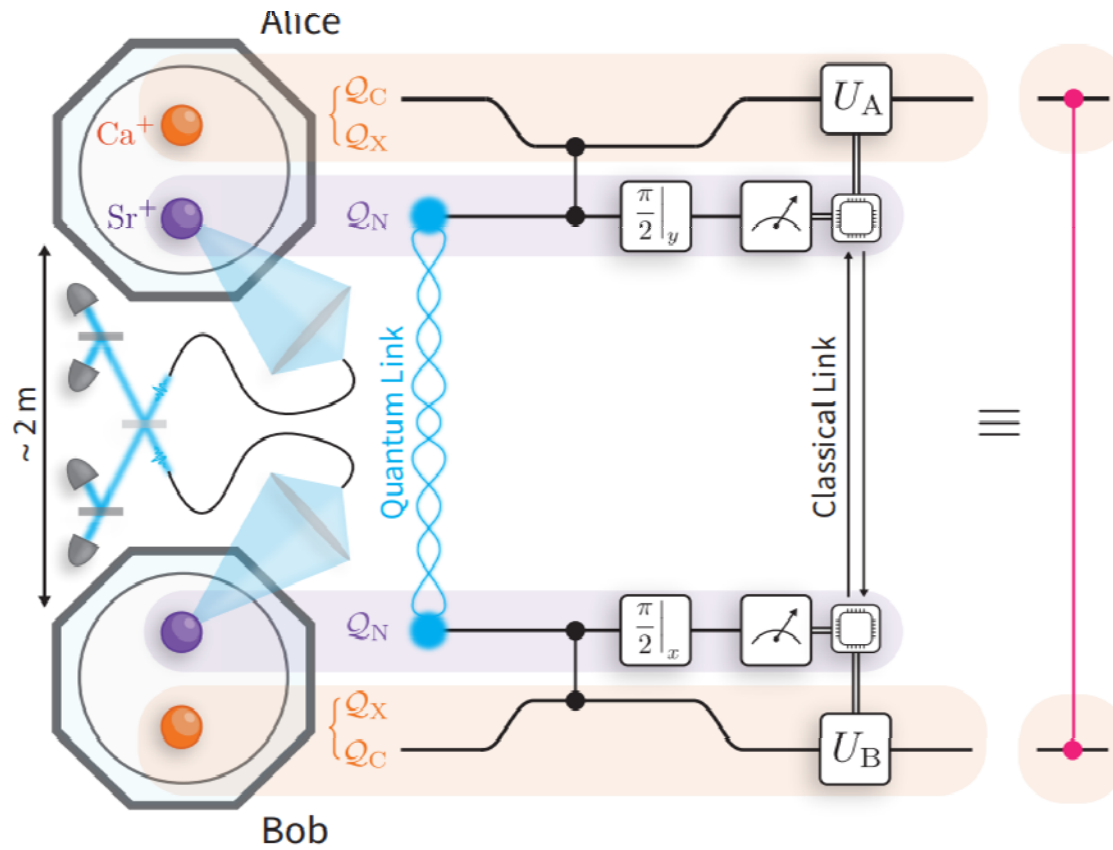


Фотонные интерконнекты



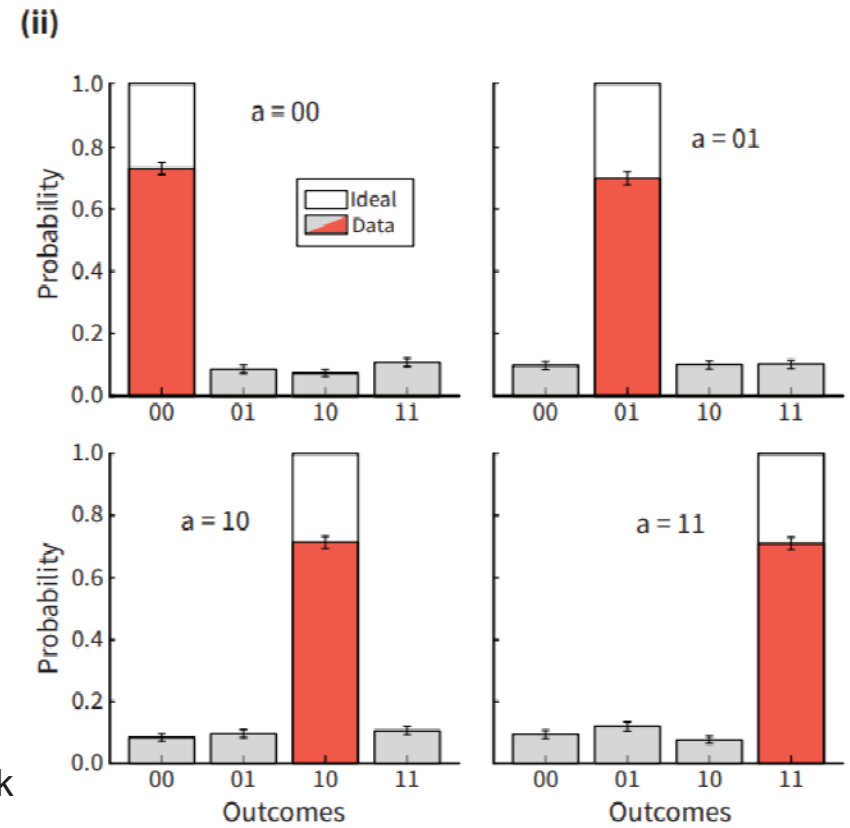
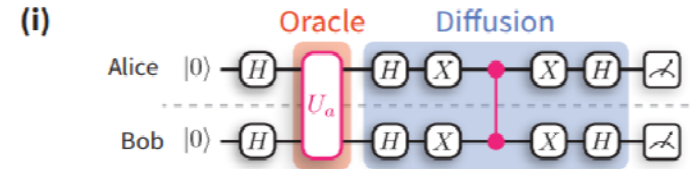
QCCD

Фотонные интерконнекты



$$F_{full} = 86\%, F_{bell} = 97\%, Rate \sim 187 s^{-1}$$

c Grover's Algorithm



Main D. et al. Distributed Quantum Computing across an Optical Network Link //arXiv preprint arXiv:2407.00835. – 2024.

Фотонные интерконнекты

Преимущества

- Возможность использования множества удаленных нод произвольного типа

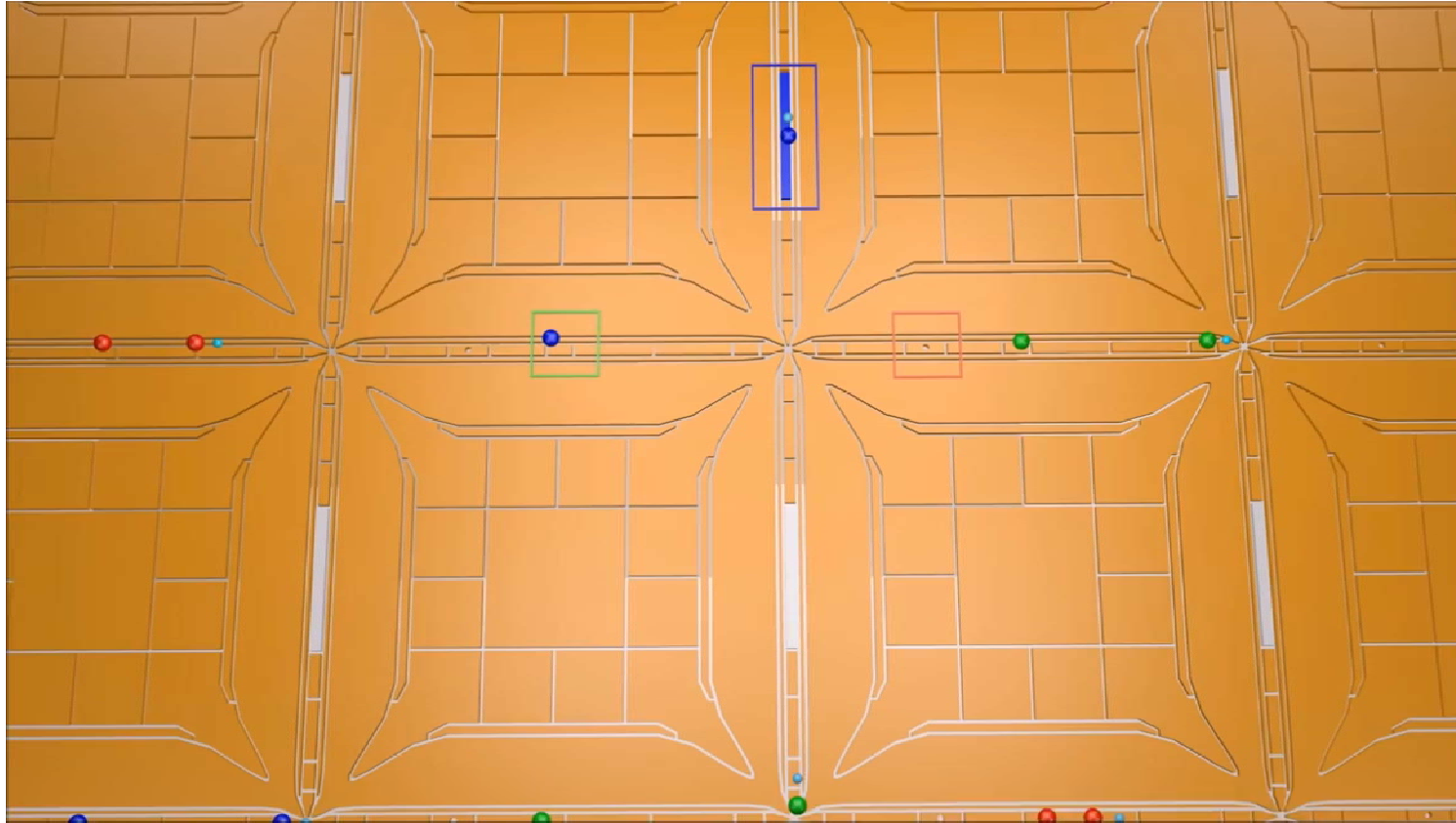
Недостатки

- При текущем подходе скорость создания белловских пар ограничена на уровне $\sim 500 \text{ с}^{-1}$. Решается переходом к использованию резонаторов

Используется сейчас

- University of Oxford (текущий рекорд по точности и скорости создания перепутывания, демонстрация распределенных вычислений)
- IonQ (пока на коммерческих системах продемонстрировано перепутывание ионов с фотонами)
- Иннсбрук (работы над Cavity QED, преобразованием излучения ионов в телекомовский диапазон)

QCCD – город для ионов



- Наличие различных функциональных зон (загрузка, память, перепутывание, однокубитные операции)
- Возможность быстрого физического транспорта ионов между зонами
- Возможность соединения и разъединения цепочек ионов

Quantinuum – экспериментальная демонстрация

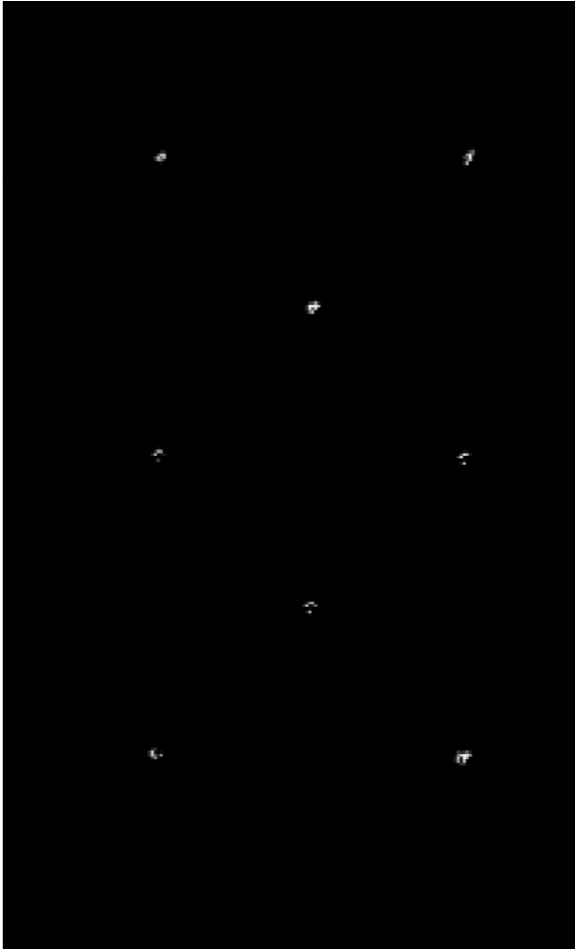
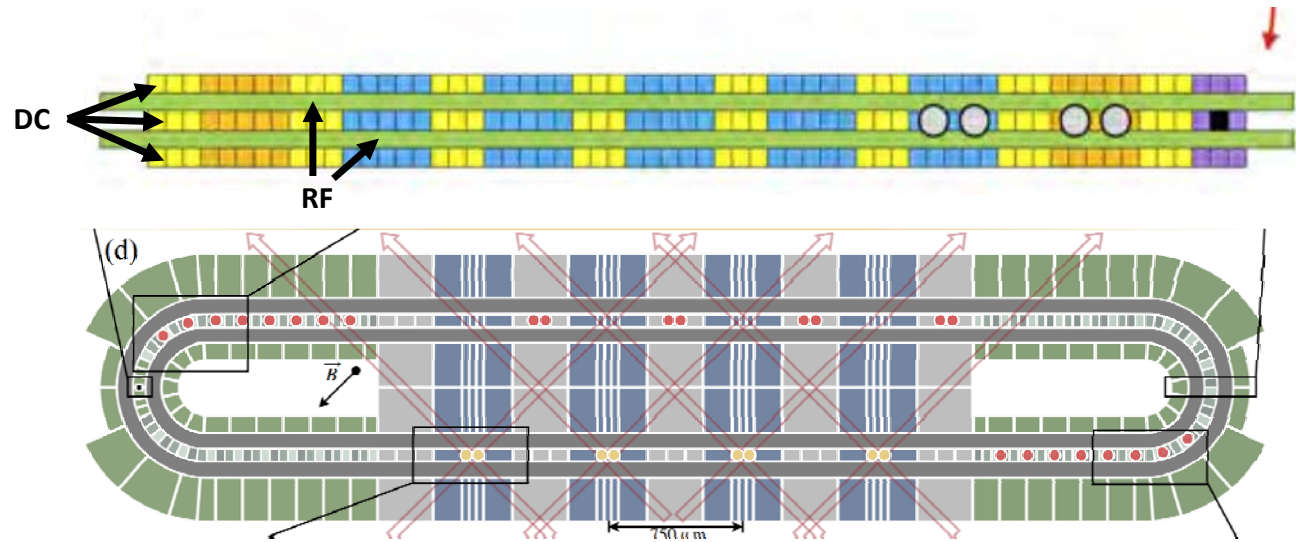
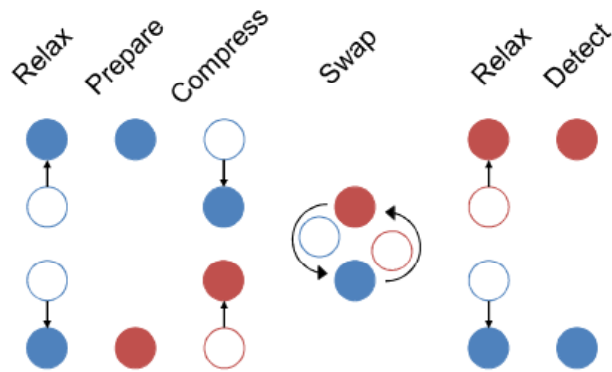
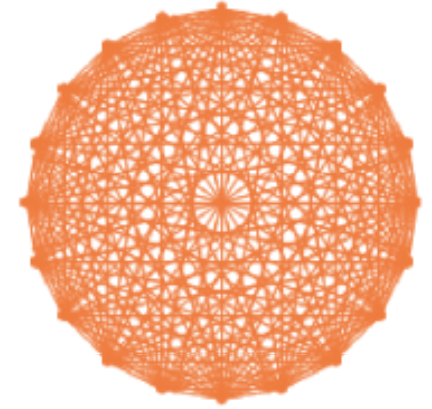
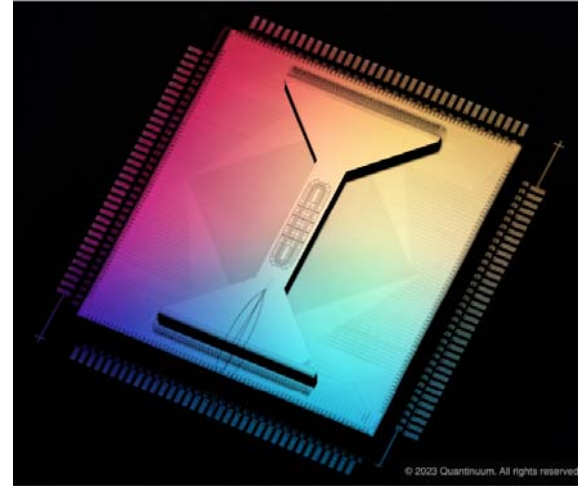


FIG. 1. Representative drawing of the top metal detailing the rf rail (red), generic control electrodes (yellow), special center-to-left-or-right electrodes (C2LR, shown in purple), shim electrodes (green), and ground plane (gray). The rf rail is continuous; the apparently isolated top metal features are connected through traces routed beneath the surface [10] The generic control electrodes are co-wired between equivalent locations in each leg. Lettering on several such electrodes illustrates the pattern. All measurements here use legs in the 3×2 region at the center of the grid (bold).

Quantinuum (H1 и H2)

	H1	H2
Количество кубитов	20	56
Точность 1Q	99.9979%	99.997%
Точность 2Q	99.914%	99.87%
Квантовый объем	2^{20}	2^{18}

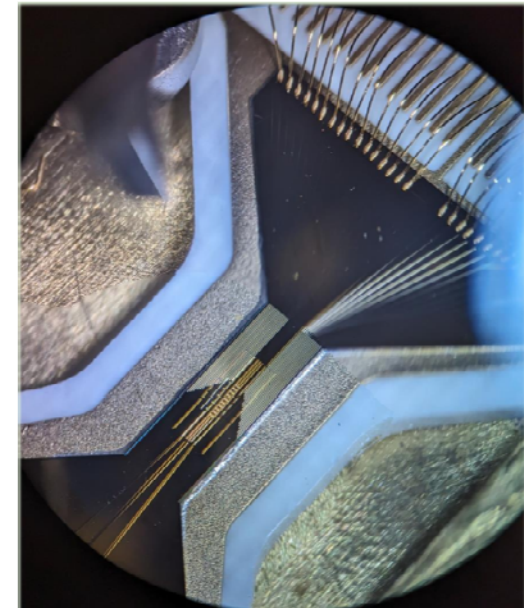


Заключение

Ожидания:

- На горизонте 2030 года квантовые компьютеры будут использоваться для решения практически значимых задач
- Квантовые вычислители будут использоваться в качестве сопроцессора для выполнения специализированных операций
- Будет использоваться (эффективно) несколько сотен кубит, $F(2Q) > 99.99\%$
- Алгоритмы на логических кубитах
- Лидеров квантовой гонки будет определять освоение и применение технологий микроэлектроники

Планарная ловушка ФИАН



Спасибо за внимание!