



P.N.Lebedev **Physical Institute** 

## Ультрахолодные ионы как платформа для квантовых вычислений

Илья Семериков, Илья Заливако,

А. Борисенко, М. Аксенов, П. Сидоров П. Вишняков, Н. Семенин К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский

#### Направления развития квантовых вычислений

- Увеличение числа кубитов
- Увеличение числа связей между кубитами
- Увеличение фиделити
- Увеличение времени когерентности
- Комбинирование кубитов на различных физических системах
- Оптимизация алгоритмов коррекции ошибок,
- Использование квантовых систем с более чем 2 состояниями
  - кудитов и оптимизация квантовых алгоритмов
- Достижение Fault-tolerant computation

#### Современное состояние квантовых вычислений



Как закодировать кубит?



## Перепутывание кубитов



- Использование общих колебательных мод для перепутывания
- Возможность прямого перепутывания удаленных частиц
- Высокое fidelity многокубитных операций



	Ионы	Нейтральные атомы	Сверхпроводники
Масштабируемость	Симуляторы - <b>53</b> кубита <b>1D-2D</b> Вычислители - <b>11</b> кубит (попарно связанных) [1,2]	Симуляторы — <b>51</b> кубит <b>1D-3D</b> [5]	Вычислители - <b>72</b> кубита <b>1D-2D</b> [9]
Время когерентности	До <b>10 мин</b> [3]	До <b>7 с</b> [6]	До <b>320 мкс</b> [10]
Время гейта	От <b>1 мкс</b>	400 нс	10 нс
Fidelity	<b>99.996%</b> один кубит [4] <b>99.9%</b> два кубита [4]	<b>99.6%</b> один кубит [7] <b>97.4%</b> два кубита [8]	<b>99.92 %</b> один кубит[11] <b>99.4%</b> два кубита [11]
Отношение времени когерентности к времени гейта	До <b>10</b> 9	До <b>10<sup>7</sup></b>	До <b>10</b> 4

#### Алгоритм работы квантового вычислителя на ионах



#### Ион в радиочастотной ловушке



$$\tau \equiv \frac{\omega}{2}t, \qquad a \equiv \frac{4QU_{dc}}{m\omega^2 r_0^2}, \qquad q \equiv \frac{2QV_{ac}}{m\omega^2 r_0^2},$$
$$\frac{d^2x(\tau)}{d\tau^2} + (a - 2q\cos 2\tau)x(\tau) = 0,$$
$$\frac{d^2y(\tau)}{d\tau^2} - (a - 2q\cos 2\tau)y(\tau) = 0.$$



Диаграмма стабильности



#### Топологии ловушек



-Глубины ловушки порядка 1 эВ -Секулярные частоты порядка 1 МГц

## Ловушки в ФИАНе













Yb

#### Охлаждение <sup>171</sup>Yb+



#### Охлаждение ионов в ФИАН-RQC

#### Линейная ловушка, Mg+, Yb+



#### 3D ловушка, Yb+



# Сигнал флуоресценции от отстройки



## Охлаждение до температур, близких к доплеровскому пределу

#### Лазерные системы охлаждения в ФИАН-RQC



-Транспортируемая система для доплеровского и DEIT охлаждения Yb<sup>171</sup> - Лазеры изготовлены в

ФИАНе

- 100 мкВт @ 369, 300 мкВт @ 399
- 1 мВт @ 935, 1 мВт @ 760
- Возможность подготовки квантовых состояний

40 см

#### Подготовка состояния. Оптическая накачка



#### Однокубитные операции



## Двухкубитные операции, Cirac-Zoller gate



Отображение состояния контрольного кубита на колебательную степень свободы



Одноионный гейт, аналогичный C-NOT (управляется колебательным состоянием)



Возвращение контрольного кубита в исходное состояние

**RSB** *π* 

RSB 2π

+Первый предложенный квантовый гейт

- Требует сильной фокусировки
- Скорость ограничена частотой ловушки
- Требуется охлаждение до основного состояния

 $|gg 0\rangle \longrightarrow |gg 0\rangle |gg 0\rangle |ge 0\rangle \longrightarrow |ge 0\rangle |ge 0\rangle |ge 0\rangle |ge 0\rangle |ge 0\rangle |ge 0\rangle |eg 0\rangle |eg 0\rangle |eg 0\rangle |eg 0\rangle |eg 0\rangle |ee 0\rangle |ee 0\rangle |ge 0\rangle |ge$ 

#### Двухкубитные операции, Mølmer Sørensen gate

- + Ground state не является необходимым
- + Возможны гейты с тремя и более ионами
- + Fidelity до 99.9% достижимы
- Скорость ограничена частотой ловушки



 $\begin{aligned} \left|\downarrow\downarrow\downarrow\rangle \Rightarrow \left(\left|\downarrow\downarrow\rangle\right\rangle + i\left|\uparrow\uparrow\rangle\right\rangle\right)/\sqrt{2} \\ \left|\uparrow\uparrow\rangle\Rightarrow \left(\left|\uparrow\uparrow\right\rangle + i\left|\downarrow\downarrow\downarrow\right\rangle\right)/\sqrt{2} \\ \left|\downarrow\uparrow\rangle\Rightarrow \left(\left|\uparrow\uparrow\right\rangle - i\left|\downarrow\downarrow\downarrow\right\rangle\right)/\sqrt{2} \\ \left|\downarrow\downarrow\rangle\Rightarrow \left(\left|\downarrow\uparrow\right\rangle - i\left|\uparrow\downarrow\right\rangle\right)/\sqrt{2} \\ \left|\uparrow\downarrow\rangle\Rightarrow \left(\left|\uparrow\downarrow\right\rangle - i\left|\downarrow\uparrow\right\rangle\right)/\sqrt{2} \end{aligned}$ 

#### Однокубитные операции





Coherence time T = 4 ms



#### Лазерные системы манипуляции оптическим кубитом в ФИАНе



-871 лазер -ULE резонатор -Ширина линии по пределу тепловых шумов порядка 1 Гц -Волоконный удвоитель 871-435

#### Детектирование состояний



- Используется циклический переход (чаще всего охлаждающий)
- 1 фотон за цикл
- $T_{read} \approx 50 \, \mu s$
- Эффективность одиночного считывания до 99%
- Возможно увеличение точности за счет



временного разрешения пришедших фотонов

## Универсальный ионный квантовый компьютер lonQ [2]

- 11 микроволновых кубитов на ионе <sup>171</sup>Yb+
- Двухкубитная операция на любой паре ионов
- Одновременное проведение сразу нескольких двухкубитных операций [12]
- Среднее фиделити однокубитной операции F<sub>single</sub> > 99%
- Среднее фиделити двухкубитной операции F<sub>two-qubit</sub> > 98%
- Реализация алгоритмов of Deutsch–Jozsa, Bernstein–Vazirani, Hidden shift, quantum Fourier algorithm.
- Компактная, автономная, коммерчески готовая система.





## Универсальный квантовый компьютер на ионах lonQ [2]

#### Scaling concept 1: control over ~20 qubits





Marko Cetina



Michael Goldman



Laird Egan



## Универсальный квантовый компьютер на ионах AQTION [13]

Европейский проект по квантовым вычислениям на ультрахолодных ионах

- Реализация алгоритма Шора (факторизация числа 15) [13]
- Симуляторы квантовой химии [14]
- 14 Одновременно перепутаных кубитов (GHZ state) [15]
- Са+ ионы





## Оптические и рч кубиты реализация



311A

## Детектирование состояний



-С одного иона 20 × 10<sup>4</sup>фот/сек -Проблемы с паразитными засветками -Проблемы с глубиной резкости и аберрациями

Тип детектора	Мультиканальн ый ФЭУ	EMCCD	Однофотонная камера
Модель	H9500	Falcon iii	Quantar 2601B
Частота обновления	100 МГц	30 Гц	100 МГц
Квантовая эффективность на 369 нм	20	25	10
Разрешение	16x16	1024x1024	200x200
Размер пикселя	2 мм	10 мкм	55 мкм
Итоговый сигнал-шум при эффективности сбора 1%	90	150	Определяется считывающей электроникой

- - -

## Что дальше?

- Fast gates (<500 ns)
- Криогенные двумерные массивы точечных ловушек
- Комбинирование РЧ и оптических ловушек
- Оптические интерконнекты
- Лучшая стабилизация лазеров
- Использование алгоритмов









#### Команда



N. Kolachevsky

I. Semerikov

A. Borisenko N. Zhadnov

I. Zalivako

M. Aksenov

V. Sorokin

K. Khabarova

#### Ссылки

[1] J. Zhang, ..., C. Monroe, Observation of a many-body dynamical phase transition with a 53-qubit quantum simulator, Nature. 551 (2017) 601.

[2] C. Collins, ..., and J. Kim, Benchmarking an 11-qubit quantum computer, arXiv:1903.08181, 2019

[3] Y. Wang, ..., K. Kim, Single-qubit quantum memory exceeding ten-minute coherence time, Nat. Photonics. 11 (2017) 646–650.

[4] J.P. Gaebler, ..., D.J. Wineland, High-Fidelity Universal Gate Set for Be 9 + Ion Qubits, Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 1–5.

[5] H. Bernien, ..., M.D. Lukin, Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator, Nature. 551 (2017) 579–584.

[6] J. Wang, ..., D.S. Weiss, Coherent Addressing of Individual Neutral Atoms in a 3D Optical Lattice, PRL 115 (2015) 043003.

[7] J. Wang, ..., D.S. Weiss, Single-qubit gates based on targeted phase shifts in a 3D neutral atom array, Science. 352 (2016) 1562.

[8] H. Levine, ..., M.D. Lukin, Parallel implementation of high-fidelity multi-qubit gates with neutral atoms, arXiv:1908.06101 (2019) 1–16.
[9] C. Neill, A path towards quantum supremacy with superconducting qubits, 2017.

[10] N. Ofek, ..., R.J. Schoelkopf, Extending the lifetime of a quantum bit with error correction in superconducting circuits, Nature. 536 (2016) 441–445.

[11] R. Barends, ..., J.M. Martinis, Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance, Nature. 508 (2014) 500–503.

[12] http://aqt.eu

[13] T. Monz, ..., R. Blatt, Realization of a scalable Shor algorithm, Science. 351 (2016) 1068–1070.

[14] C. Hempel, ..., C.F. Roos, Quantum Chemistry Calculations on a Trapped-Ion Quantum Simulator, Phys. Rev. X. 8 (2018) 31022.

[15] T. Monz, ..., R. Blatt, 14-qubit entanglement: Creation and coherence, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 1–4.