

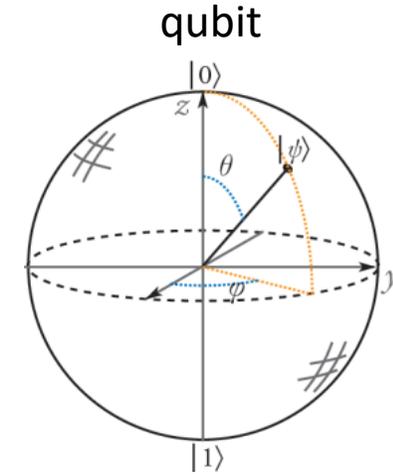
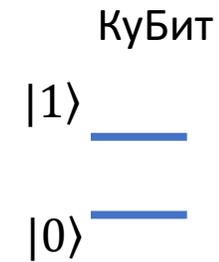
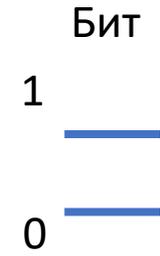
# Квантовый компьютер на ионных кубитах

Илья Семериков

Отделение оптики, отдел спектроскопии

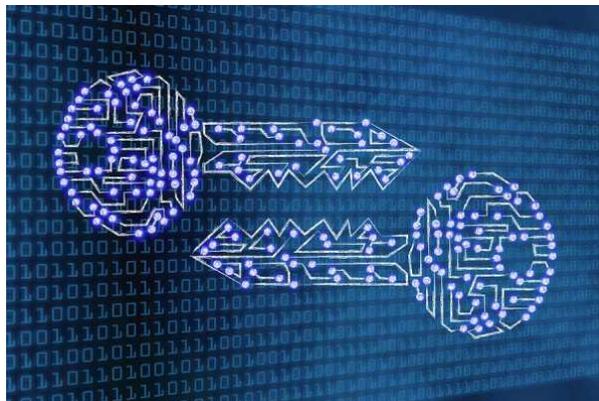
# Задачи квантовых вычислений

- Суперпозиция
- Перепутанные состояния
- Квантовый параллелизм



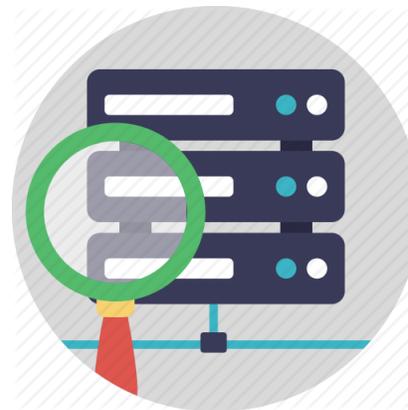
## Решение задач за полиномиальное время

Разложение на простые множители



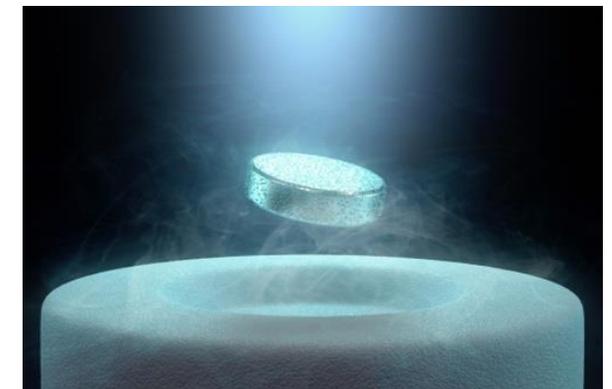
Алгоритм Шора

Поиск по базам данных



Алгоритм Гровера

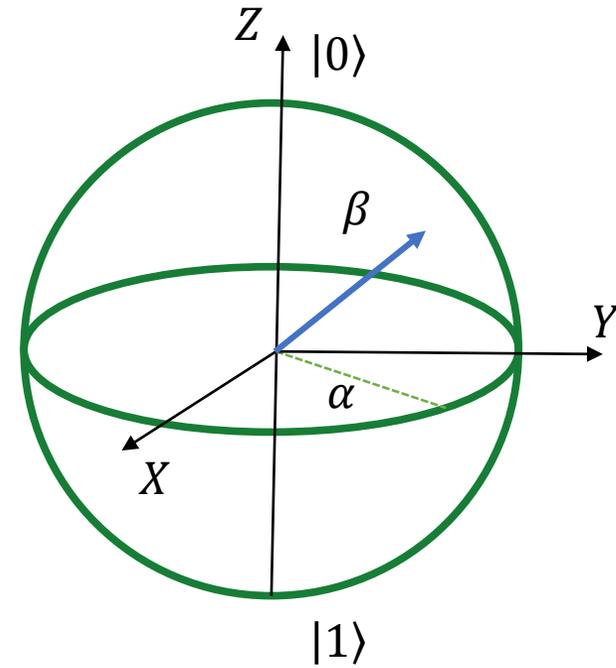
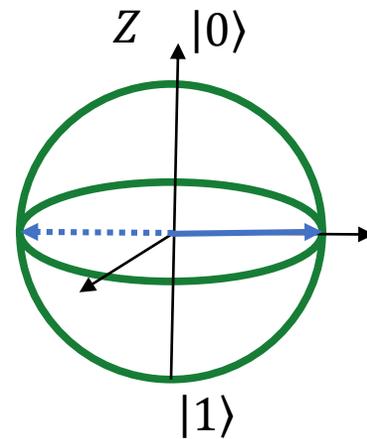
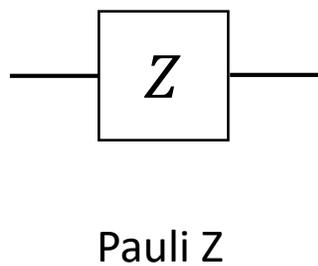
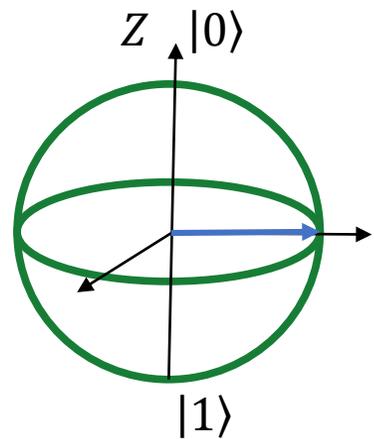
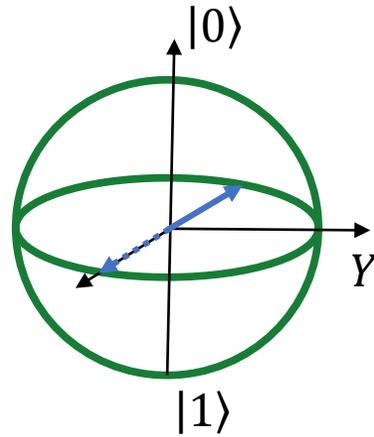
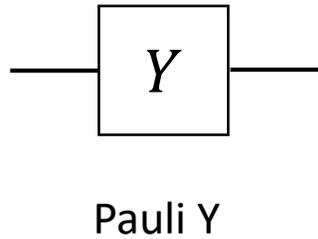
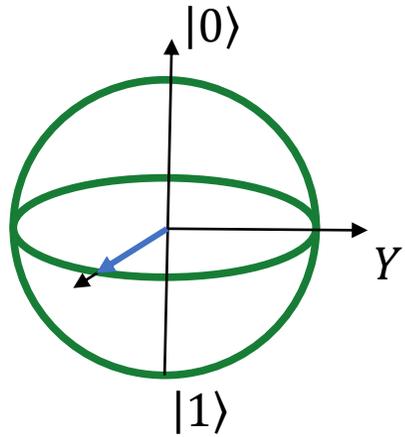
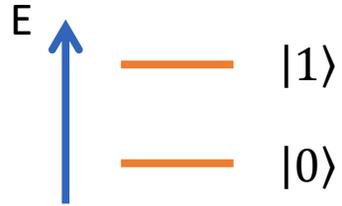
Разработка новых материалов



Квантовые симуляторы

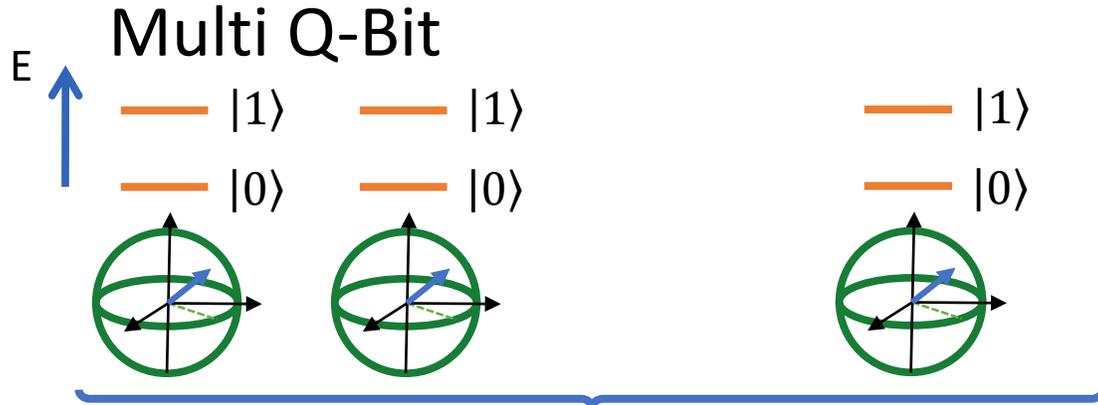
# Кубит, однокубитные операции

Q-Bit



$$|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

# Двухкубитные квантовые операции



$$|\Psi\rangle = a_{00}|00\rangle + a_{01}|01\rangle + a_{10}|10\rangle + a_{11}|11\rangle$$

$N_{qubits}$   $\longrightarrow$   $2^N$  размерность пространства

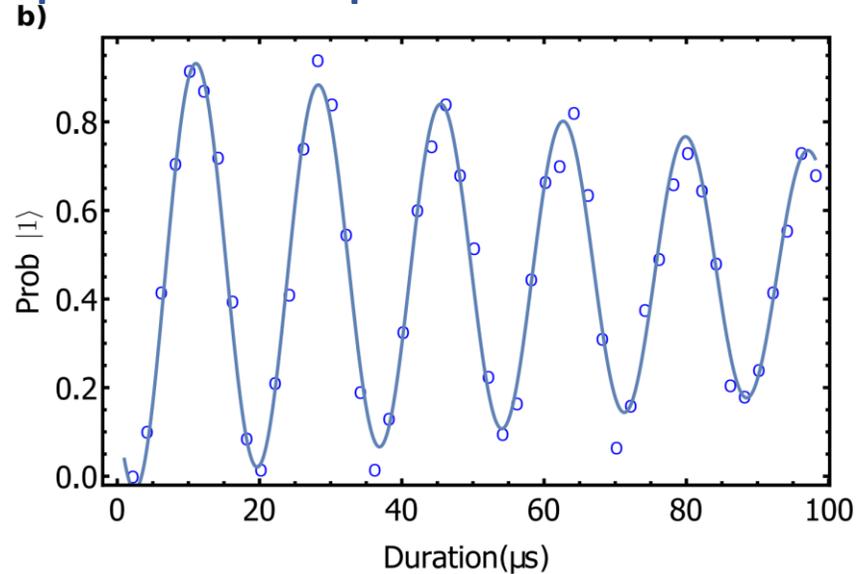
$$\begin{pmatrix} a'_{00} \\ a'_{01} \\ a'_{10} \\ a'_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{00} \\ a_{01} \\ a_{10} \\ a_{11} \end{pmatrix}$$

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

Перепутывание в ионной цепочке происходит за счёт кулоновского взаимодействия.

# Свойства кубита

- **Время когерентности**



- **Рост ошибки с числом операций**

После  $N$  операций с достоверностью  $F$

$$P_N = F^N$$

$N$	$F$	$P_N$
50	0,99	0,6
500	0,999	0,6

- **Достоверность**

$F$  – вероятность успешного проведения операции

$$F = \frac{N_{\text{усп}}}{N_{\text{опер}}}$$

- **Алгоритмы коррекции ошибок**

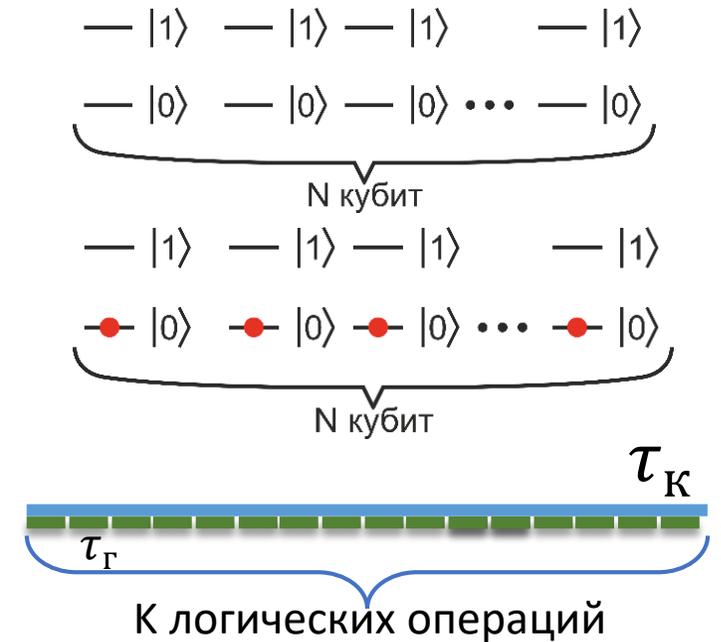
Принцип избыточного кодирования  
больше ошибок – больше дублирования:

Min **7** физических кубит = **1** логический

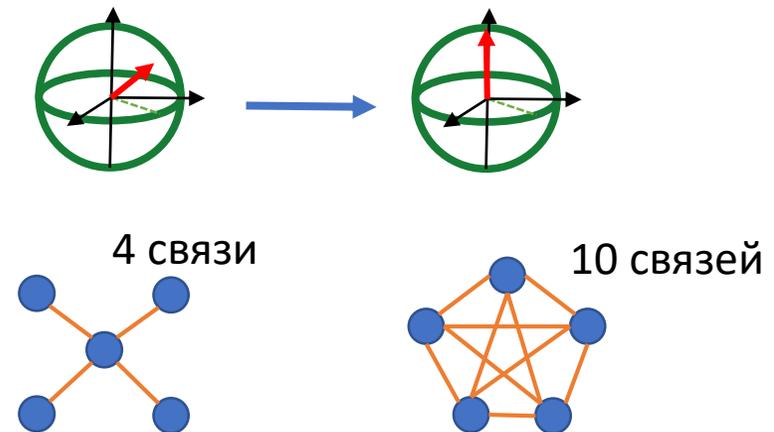
Max  **$10^6$**  физических кубит = **1** логический

# Критерии Ди-Винченцо

1. Большое число кубит
2. Можно подготовить чистое начальное состояние
3. Время декогеренции  $\tau_K$  много больше времени проведения гейта  $\tau_G$
4. Возможность реализации полного набора операций с высокой достоверностью
5. Возможность измерения состояния кубита
6. Возможность проводить операции между максимальным числом кубит
7. \*Квантовый объем – размерность пространства доступного для работы



CNOT + Pauli Y + Pauli Z;  $F > 0.99$

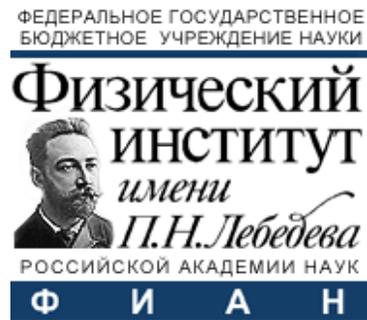


	Ионы	Нейтральные атомы	Сверхпроводники
Масштабируемость	Симуляторы - <b>53</b> кубита <b>1D-2D</b> Вычислители — <b>32</b> кубит (попарно связанных)	Симуляторы — <b>51</b> кубит <b>1D-3D</b>	Вычислители - <b>72</b> кубита <b>1D-2D</b>
Время когерентности $\tau_{\text{ког}}$	До <b>60 мин</b>	До <b>7 с</b>	До <b>320 мкс</b>
Время операции $\tau_{\text{оп}}$	От <b>1 мкс</b>	<b>400 нс</b>	<b>10 нс</b>
Достоверность операции	<b>99.996%</b> один кубит <b>99.9%</b> два кубита	<b>99.6%</b> один кубит <b>97.4%</b> два кубита	<b>99.92 %</b> один кубит <b>99.4%</b> два кубита
$\tau_{\text{ког}}/\tau_{\text{оп}}$	До <b><math>10^9</math></b>	До <b><math>10^7</math></b>	До <b><math>10^4</math></b>
Организации в России	<b>ФИАН, РКЦ</b>	<b>МГУ, ИФП СО РАН</b>	<b>ВНИИА им. Духова, МИСиС, МГТУ, МФТИ</b>

# Мы ведем работы в рамках Лидирующего исследовательского центра, ДК



Российский  
Квантовый  
Центр



ФИАН: физическая  
реализация квантового  
компьютера на ионах



РВК: финансирование



ФТИАН:  
Томография  
квантовых  
процессов



Skolkovo Institute of Science and Technology

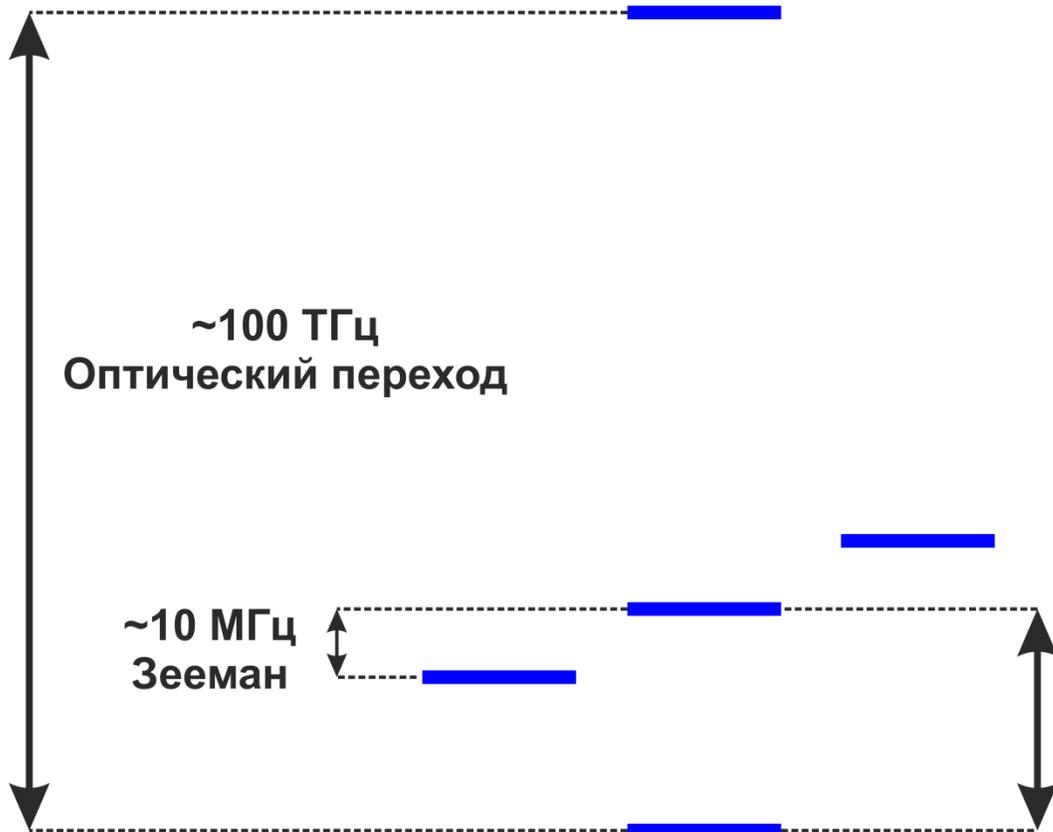
Сколтех:  
Разработка  
квантовых  
алгоритмов

РКЦ: головная организация  
Разработка квантовых алгоритмов,  
Разработка облачной платформы  
доступа к квантовому компьютеру

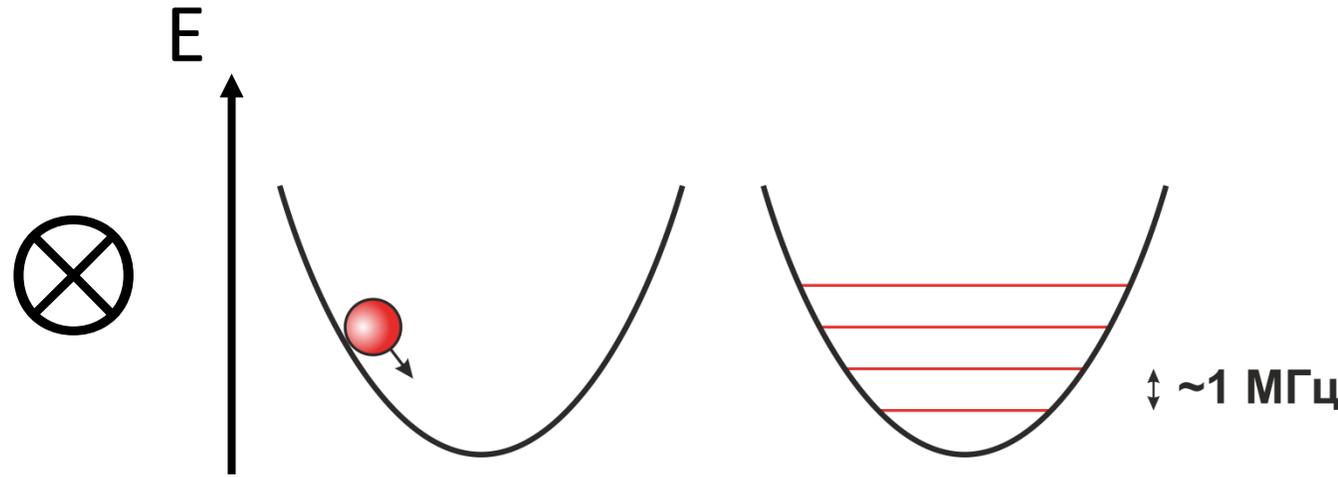
	2021	2022	2023	2024
Число кубит	2	5	20	20
Достоверность однокубитной операции	90 %	99 %	99,9 %	99,9 %
Достоверность двухкубитной операции	80 %	98 %	99 %	99 %

# Кубит в ионном квантовом компьютере

## Электронные состояния



## Колебательные подуровни



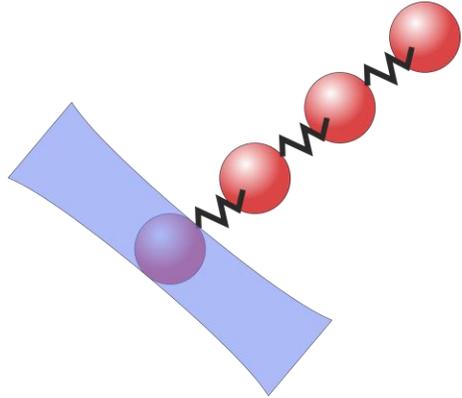
Ион в псевдогармоническом потенциале

$$E = h\nu_{\text{сек}} \left( n + \frac{1}{2} \right)$$

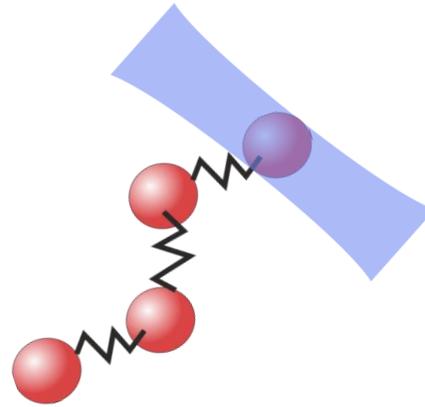
$$\nu_{\text{сек}} \sim 1 \text{ МГц}$$

# Перепутывание в ионном квантовом компьютере

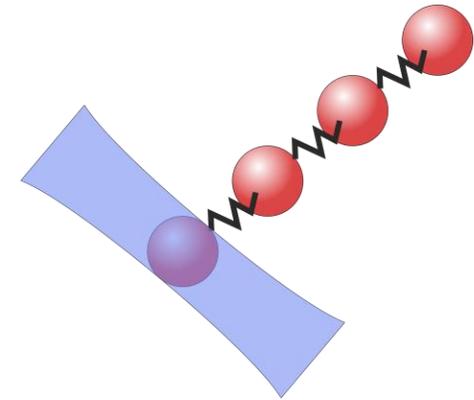
Проецирование электронного  
состояние на колебательное



Перепутывание электронного и  
Колебательного состояния 2-го иона



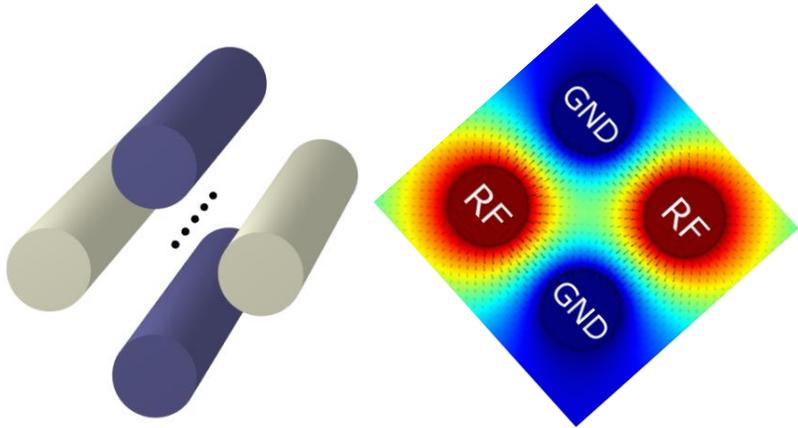
Обратное проецирование



# Схема работы ионного квантового компьютера



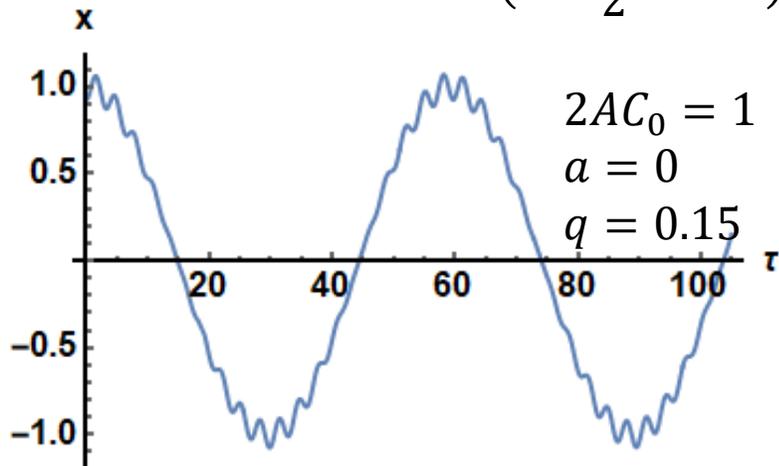
# 1. Захват ионов : ловушка Пауля



$$E_x = \frac{\kappa_x \Phi_0}{r_0^2} x; E_y = -\frac{\kappa_y \Phi_0}{r_0^2} y; E_z = 0$$

$$\Phi_0 = U_{dc} - V_{ac} \cos \omega t$$

$$x(t) = 2AC_0 \cos(\Omega_{\text{сек}} t) \left(1 - \frac{q}{2} \cos \omega t\right)$$

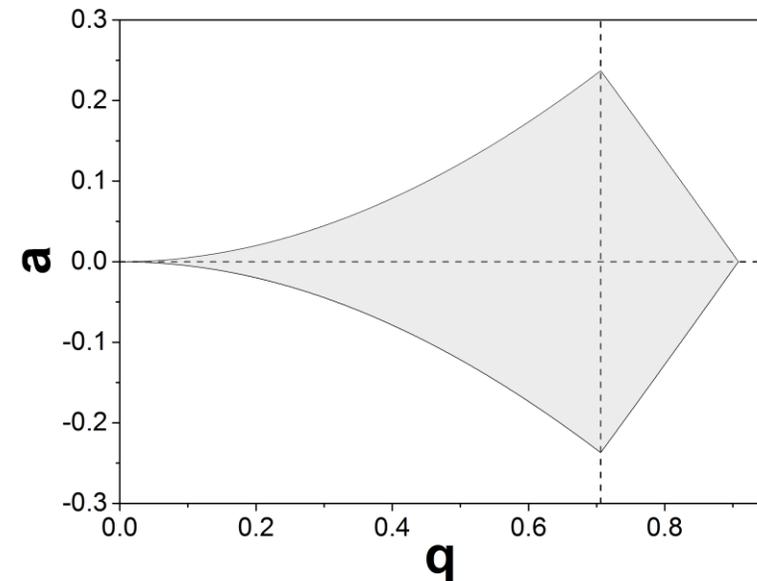


$$\tau = \frac{\omega}{2} t; a = \frac{4eU_{dc}}{m\omega^2 r_0^2}; q = \frac{2eV_{ac}}{m\omega^2 r_0^2}$$

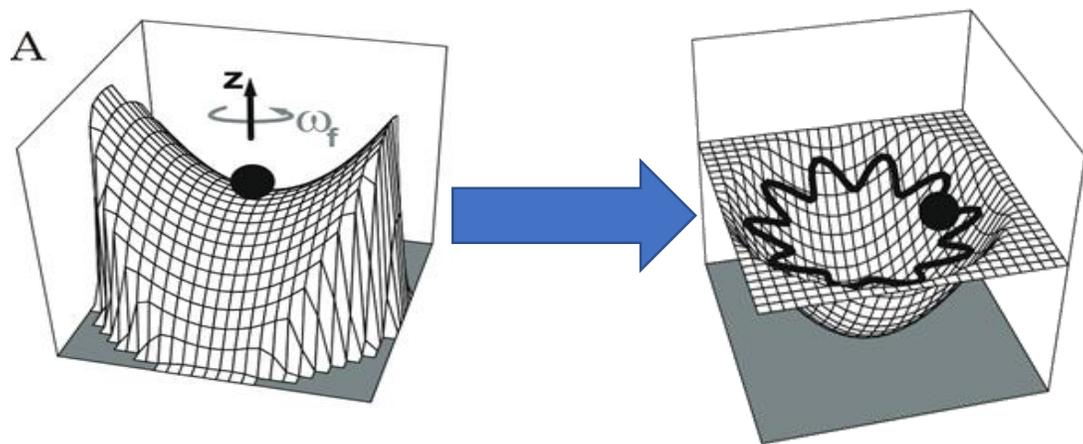
$$\Omega_{\text{сек}} = \frac{\omega}{2} \sqrt{a + \frac{q^2}{2}} \quad (\text{при } |a|, |q| \ll 1)$$

$$\frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} + (a - 2q \cos 2\tau)x = 0$$

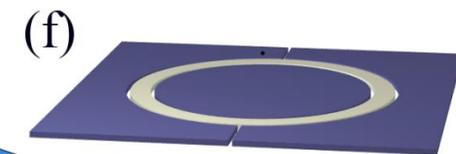
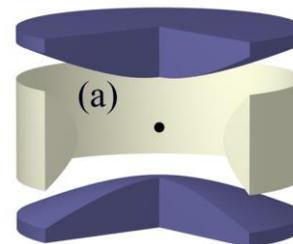
$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} - (a - 2q \cos 2\tau)y = 0$$



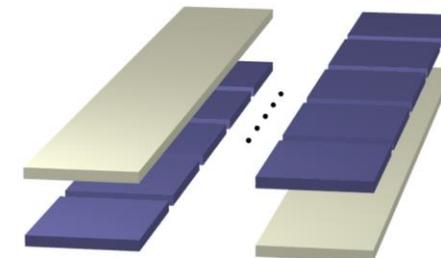
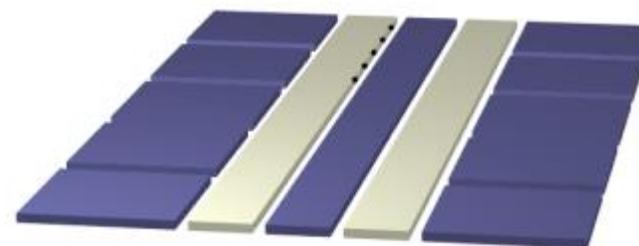
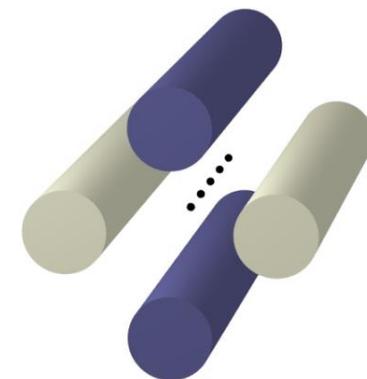
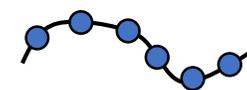
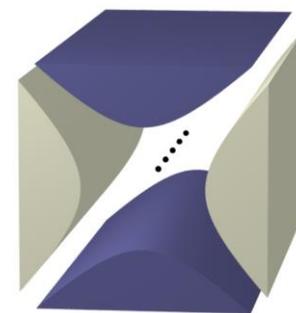
# 1. Захват ионов: возможные конфигурации ловушек



Точечная конфигурация



Линейная конфигурация



Время жизни иона в ловушке:  
**В ФИАНе продемонстрировано  
более 3 суток**

Частота колебаний:

$$\Omega_{\text{сек}} \sim 2\pi \times 1 \text{ МГц.}$$

Глубина псевдопотенциала

$$\sim 1 \text{ эВ} = \mathbf{12000 \text{ К}}$$

# Захват ионов (ФИАН)

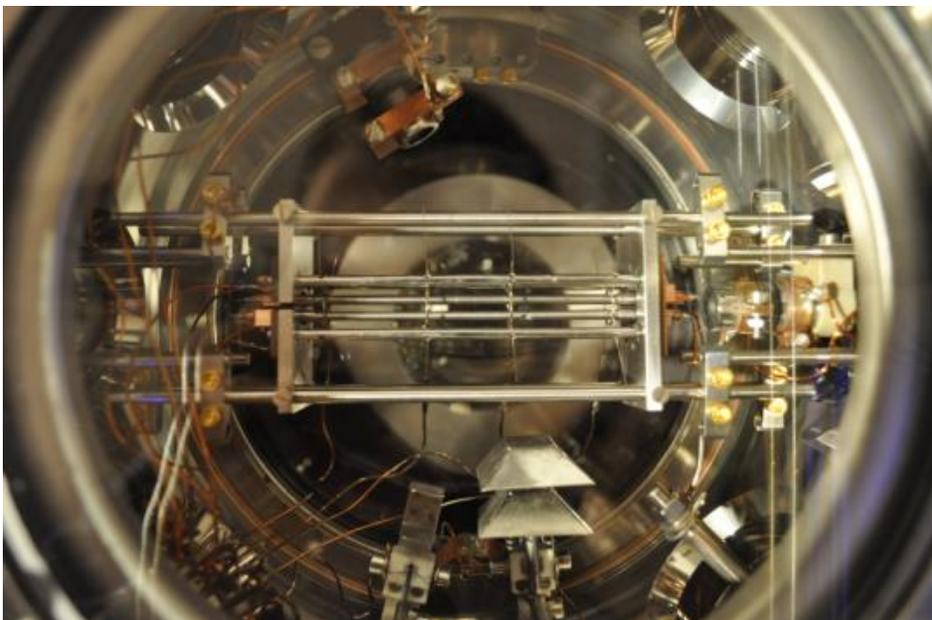
Время жизни:

10 мин

1 час

> 3 суток

Линейная ловушка, Mg<sup>+</sup>, Yb<sup>+</sup>

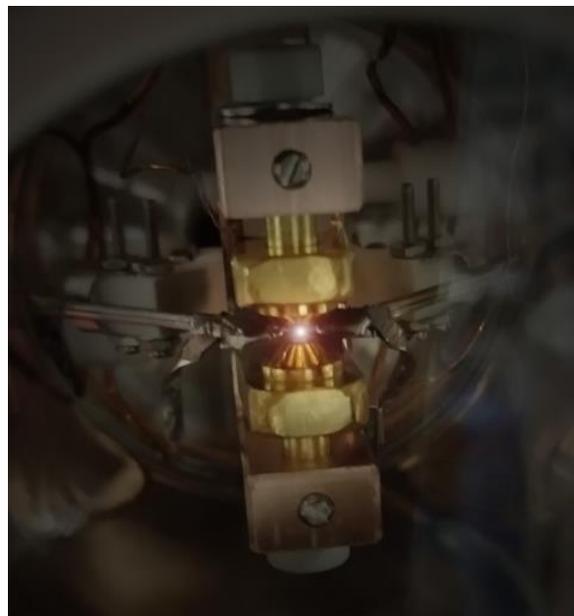


$$\Omega_{\text{сек}Z} = 2\pi \times (51.5) \text{ кГц (Mg)}$$

$$\Omega_{\text{сек}^{\text{рад}}} = 2\pi \times (980) \text{ кГц (Mg)}$$

$$r_0 = 1500 \text{ мкм}$$

3D ловушка, Yb<sup>+</sup>

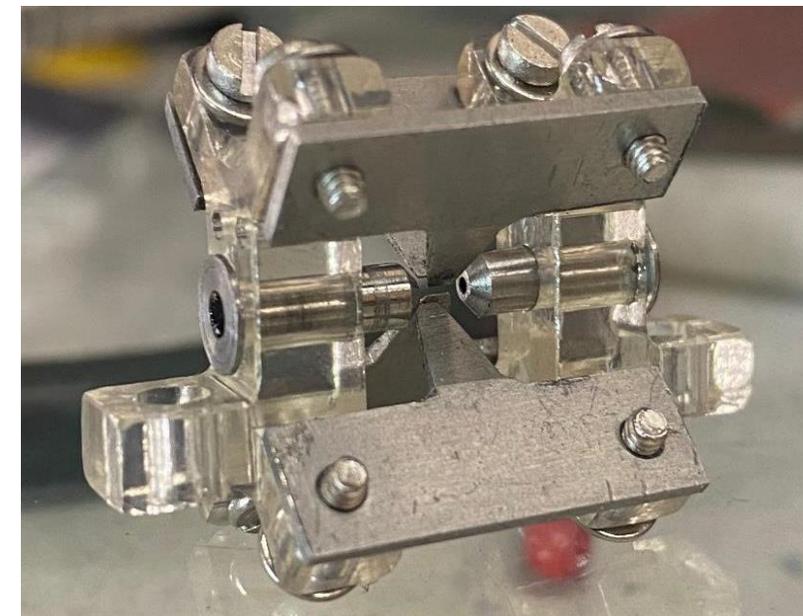


$$\Omega_{\text{сек}Z} = 2\pi \times (716) \text{ кГц (Yb)}$$

$$\Omega_{\text{сек}^{\text{рад}}} = 2\pi \times (1581) \text{ кГц (Yb)}$$

$$r_0 = 250 \text{ мкм}$$

Линейная ловушка, Yb<sup>+</sup>



$$\Omega_{\text{сек}Z} = 2\pi \times (300) \text{ кГц}$$

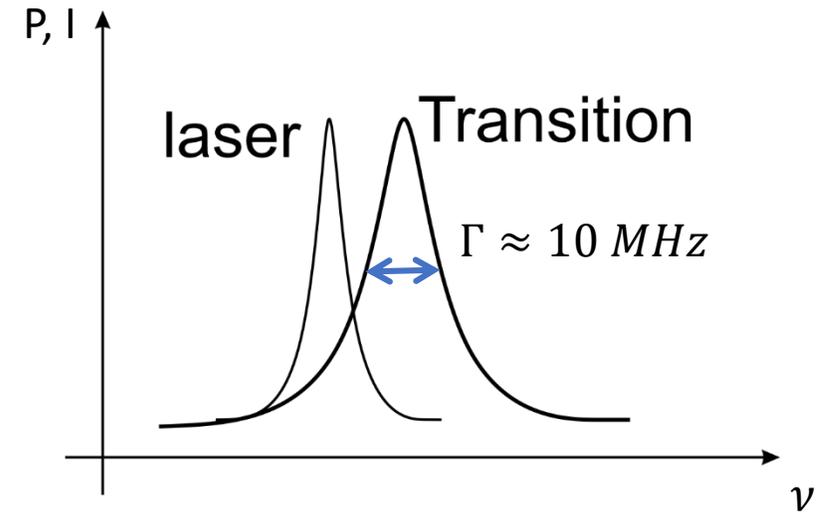
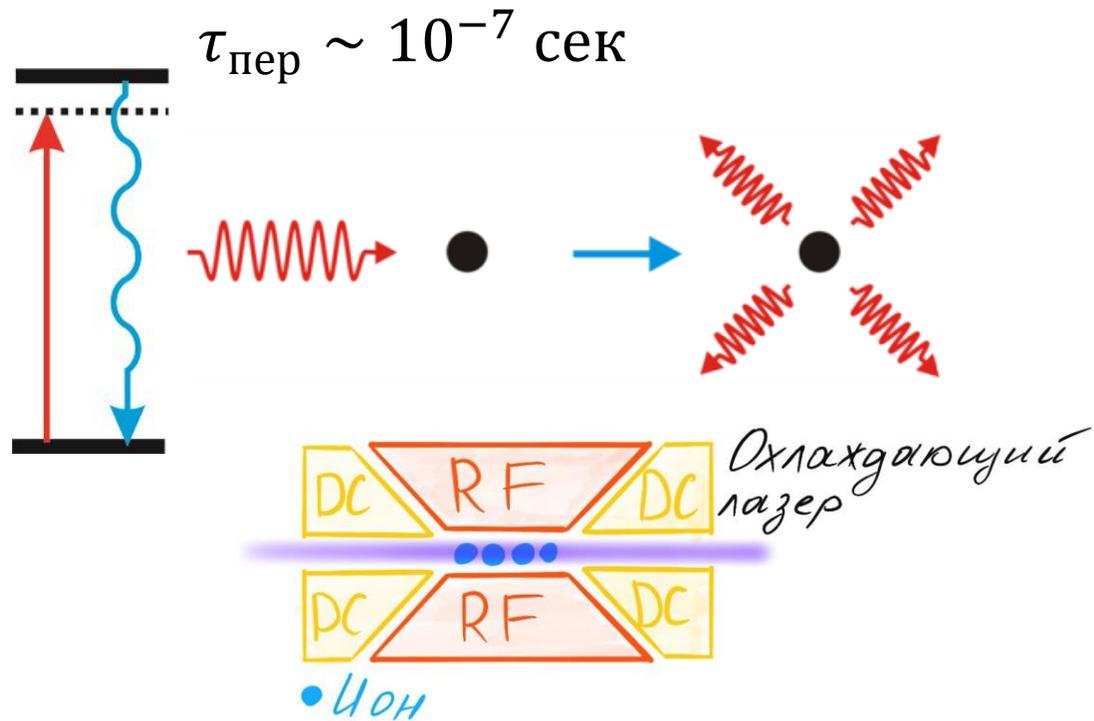
$$\Omega_{\text{сек}^{\text{рад}}} = 2\pi \times (1200) \text{ кГц}$$

$$r_0 = 400 \text{ мкм}$$

Semerikov, I. A., et al. "Linear Paul Trap for Quantum Logic Experiments." *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* 47.12 (2020): 385-389.

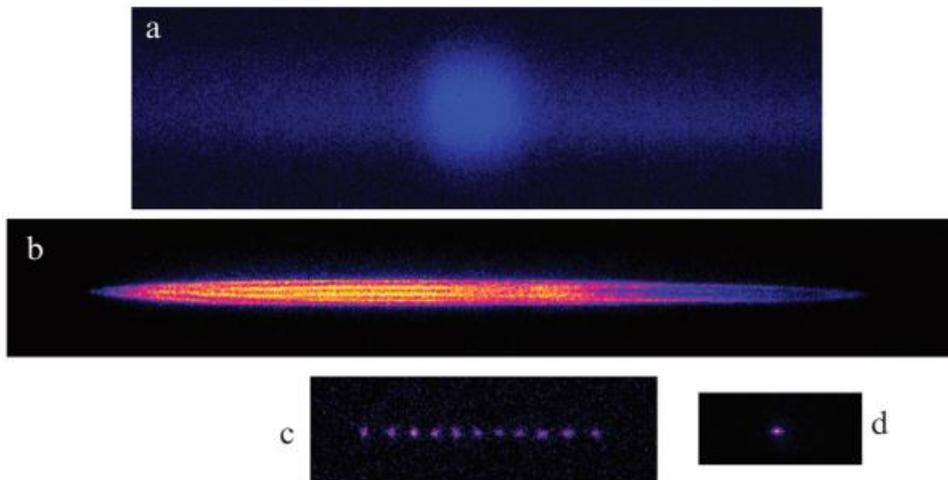
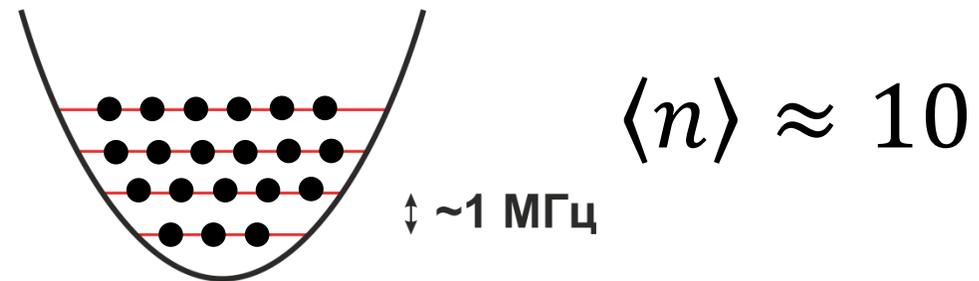
Semerikov, I. A., et al. "Three-dimensional Paul trap with high secular frequency for compact optical clock." *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* 46.9 (2019): 297-300.

## 2. Доплеровское охлаждение



$$T_{\min} \sim 1 \text{ mK}$$

$$\lambda = 369 \text{ нм (Yb)}$$

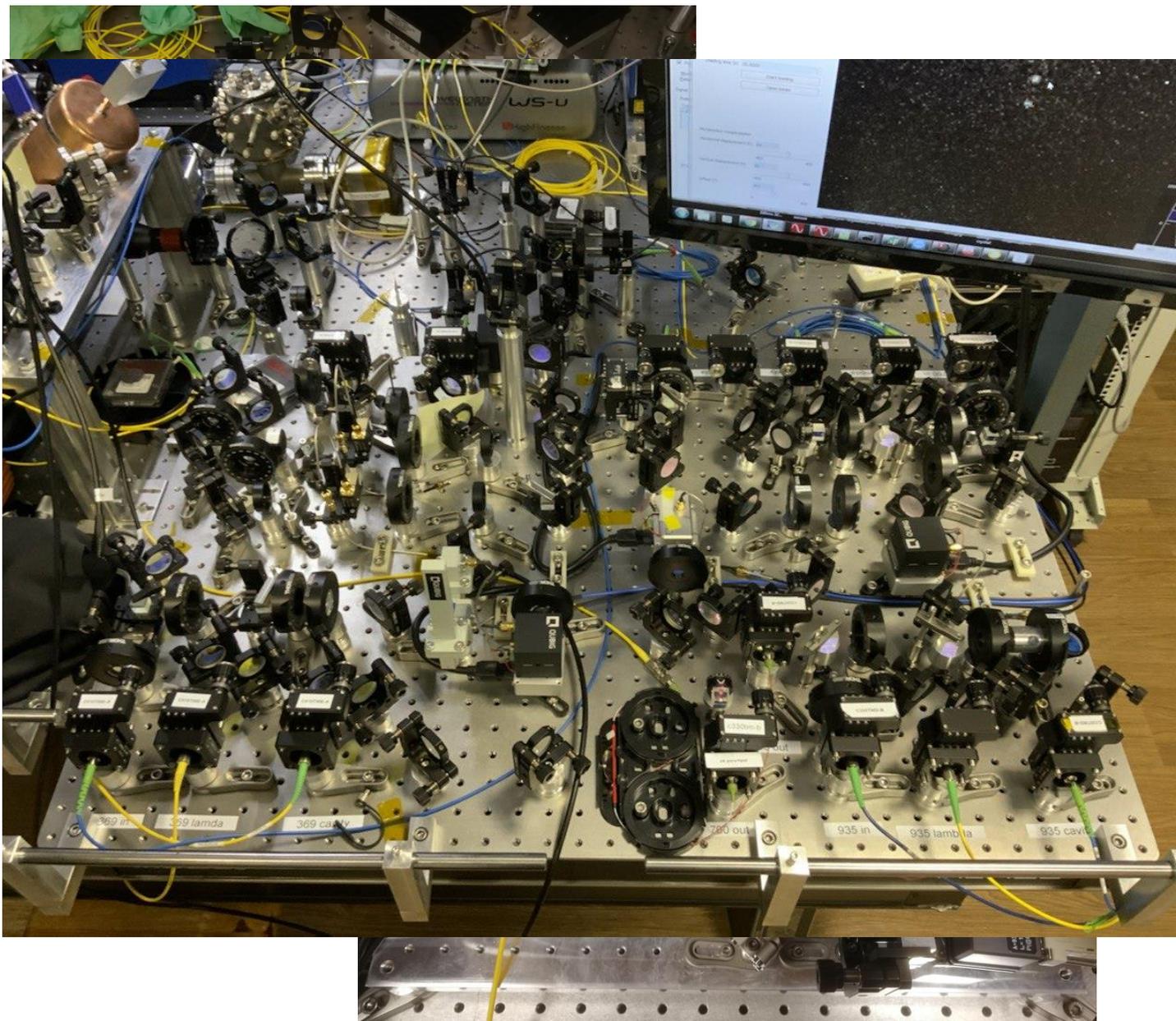
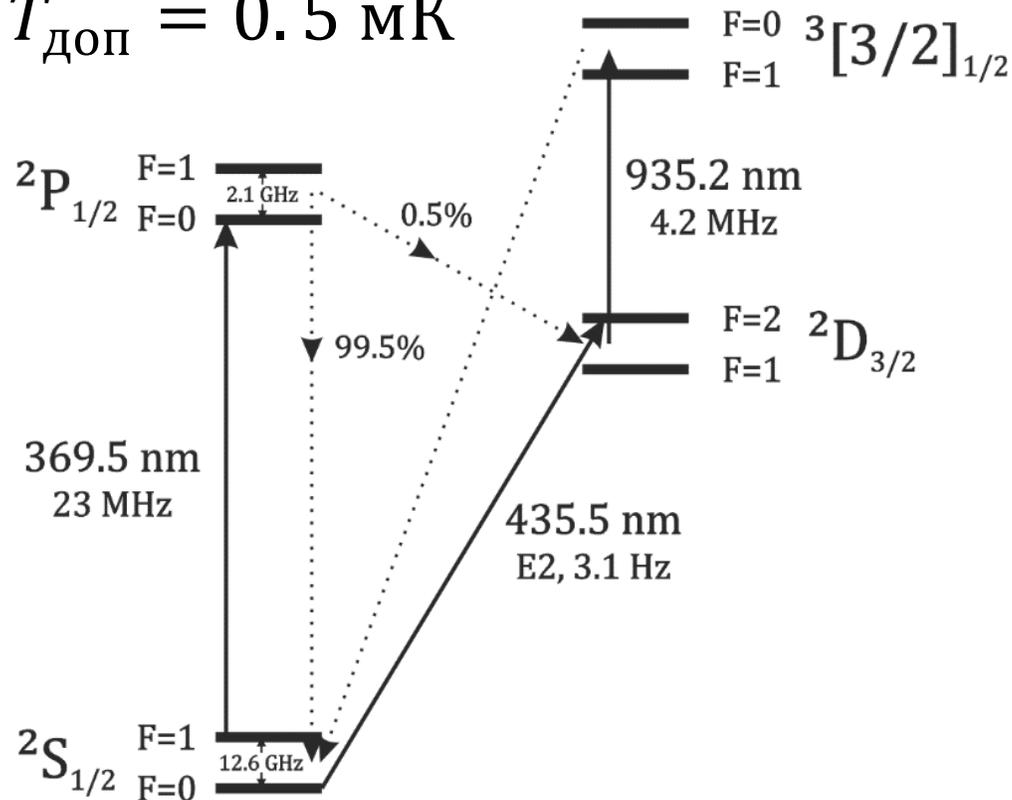


## 2. Доплеровское охлаждение $^{171-176}\text{Yb}^+$ (ФИАН)

$$\lambda = 369; 399; 935 \text{ нм}$$

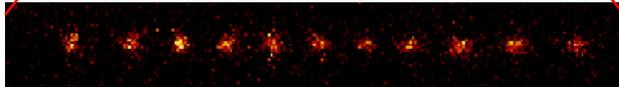
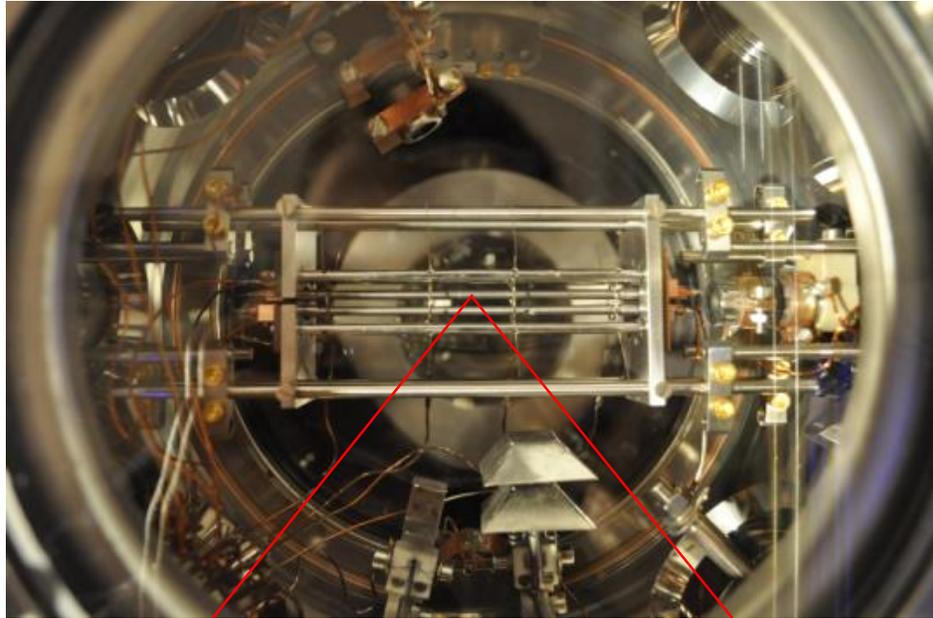
$$\Gamma = 2\pi \times 20 \text{ МГц}$$

$$T_{\text{Доп}} = 0.5 \text{ мК}$$

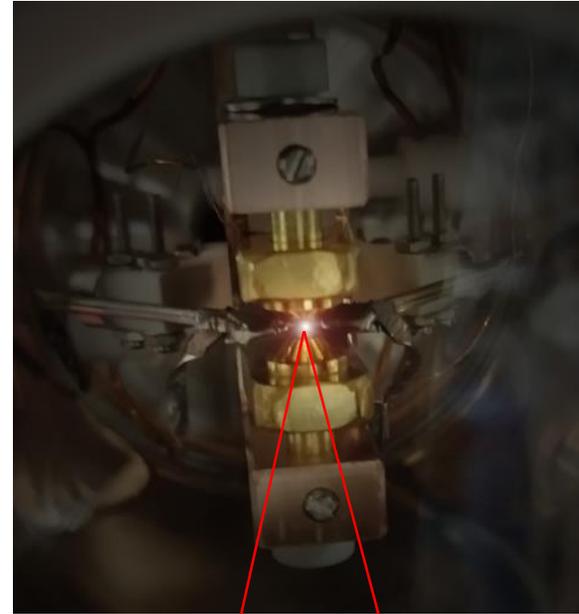


## 2. Доплеровское охлаждение (ФИАН)

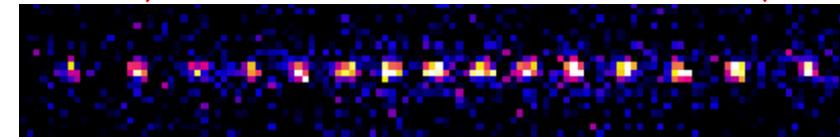
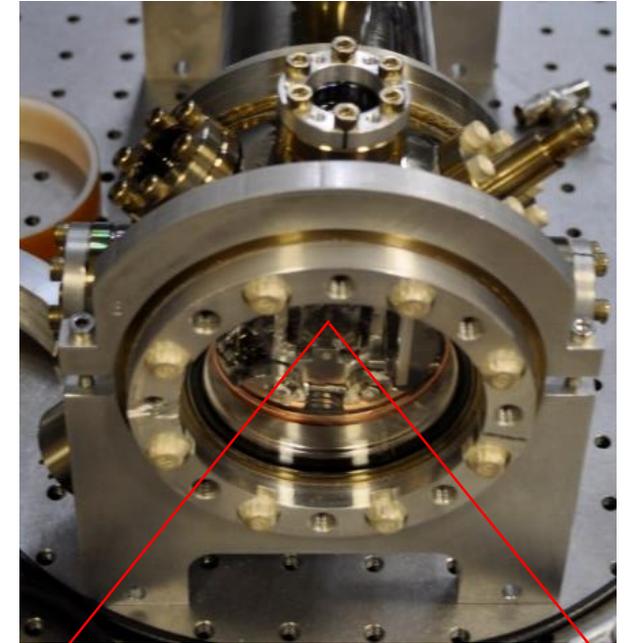
Линейная ловушка, Yb+



3D ловушка, Yb+

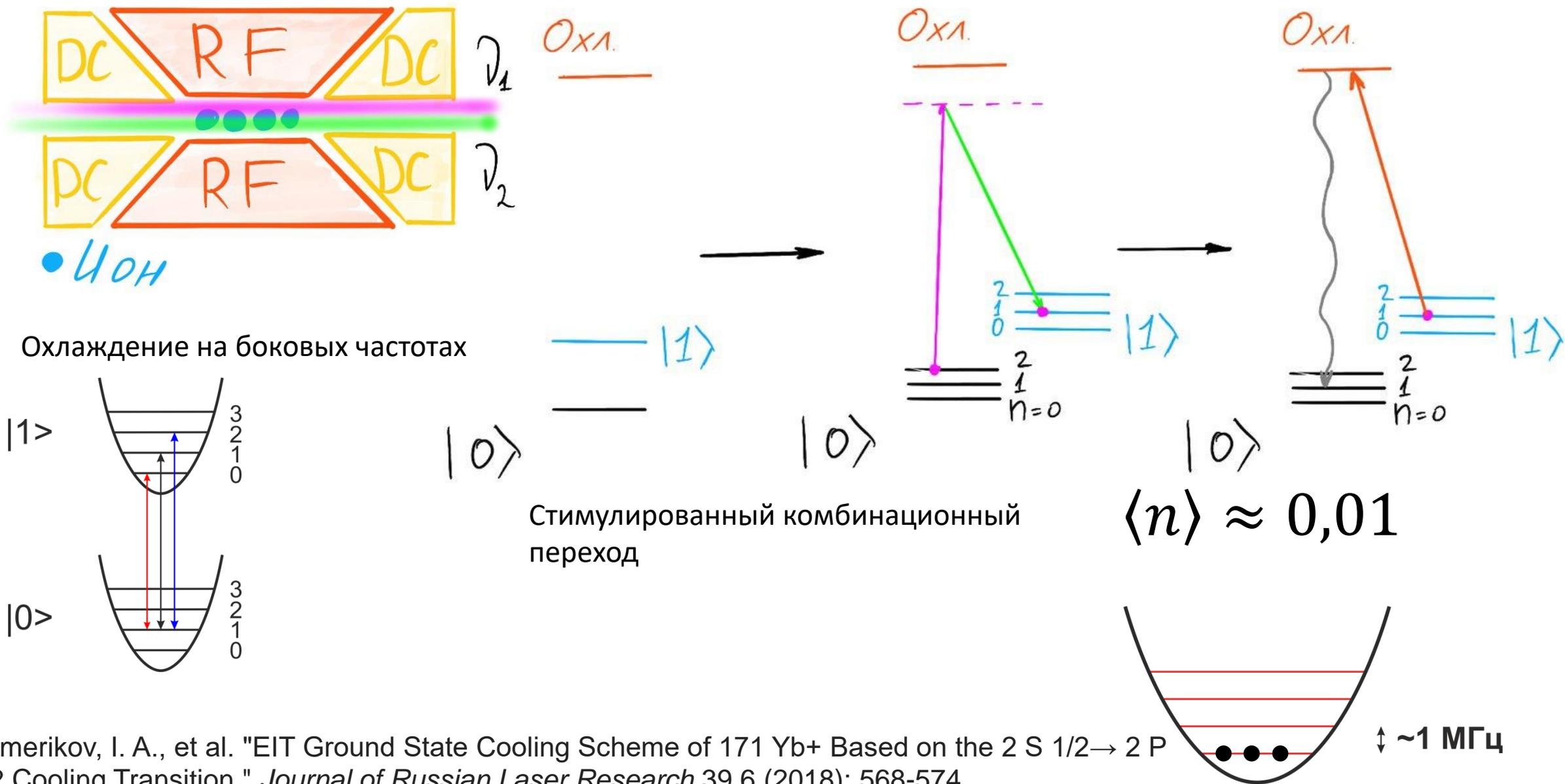


Линейная ловушка, Yb+



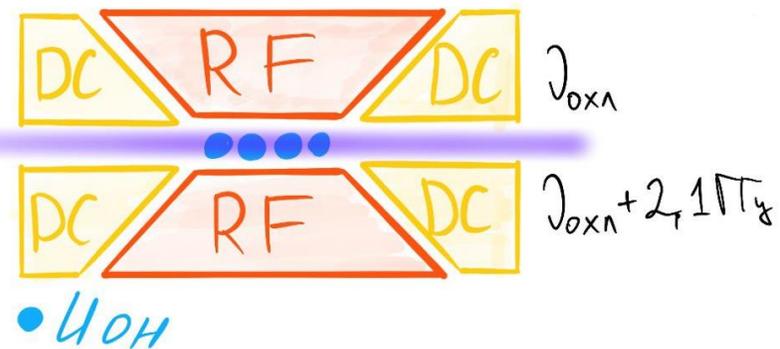
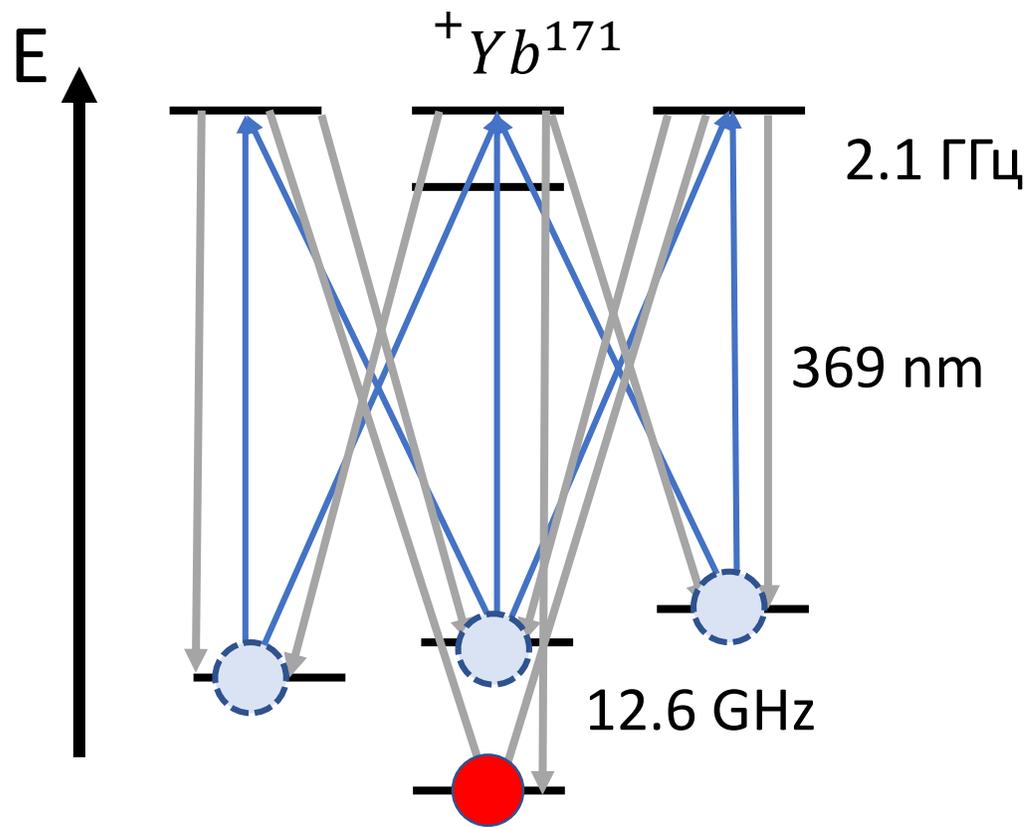
Zalivako, Iliia, et al. "Improved Wavelength Measurement of  $2 S \ 1/2 \rightarrow 2 P \ 1/2$  and  $2 D \ 3/2 \rightarrow 3 [3/2] \ 1/2$  Transitions in Yb+." *Journal of Russian Laser Research* 40.4 (2019): 375-381.

### 3. Охлаждение в основное колебательное состояние



Semerikov, I. A., et al. "EIT Ground State Cooling Scheme of  $^{171}\text{Yb}^+$  Based on the  $2\text{S } 1/2 \rightarrow 2\text{P } 1/2$  Cooling Transition." *Journal of Russian Laser Research* 39.6 (2018): 568-574.

# 4. Инициализация состояния

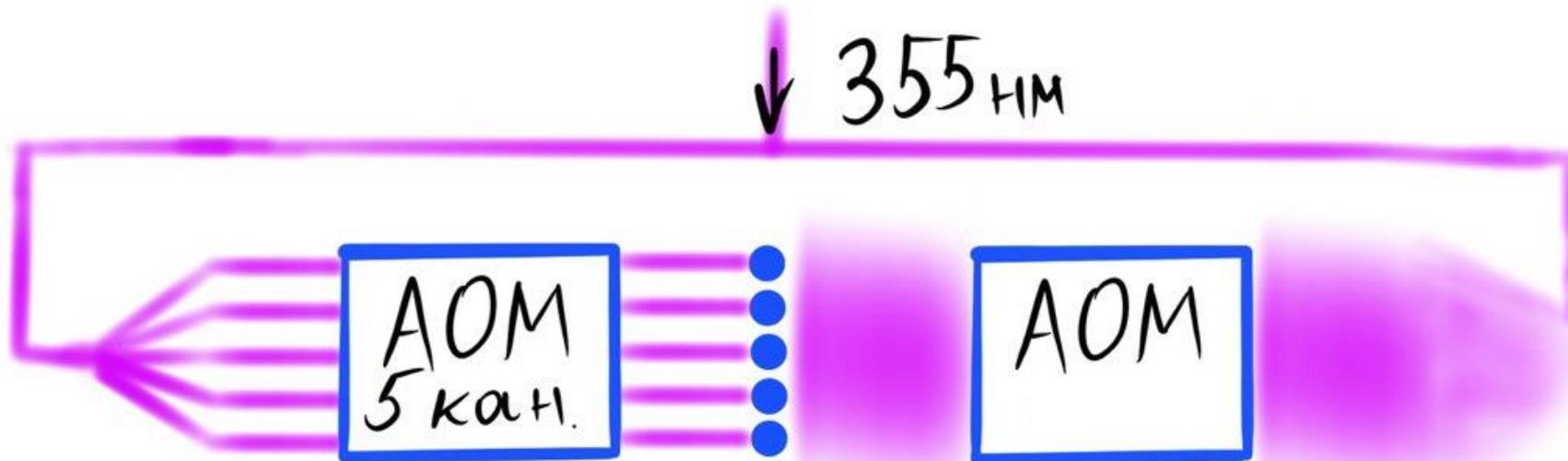


+ Только одно общее оптическое поле для всех ионов

$$+ T_{prep} \approx \frac{1}{\Gamma} < 1 \mu\text{s}$$

+ Используется только лазер охлаждения

# 5. Однокубитные квантовые операции (РЧ кубит)

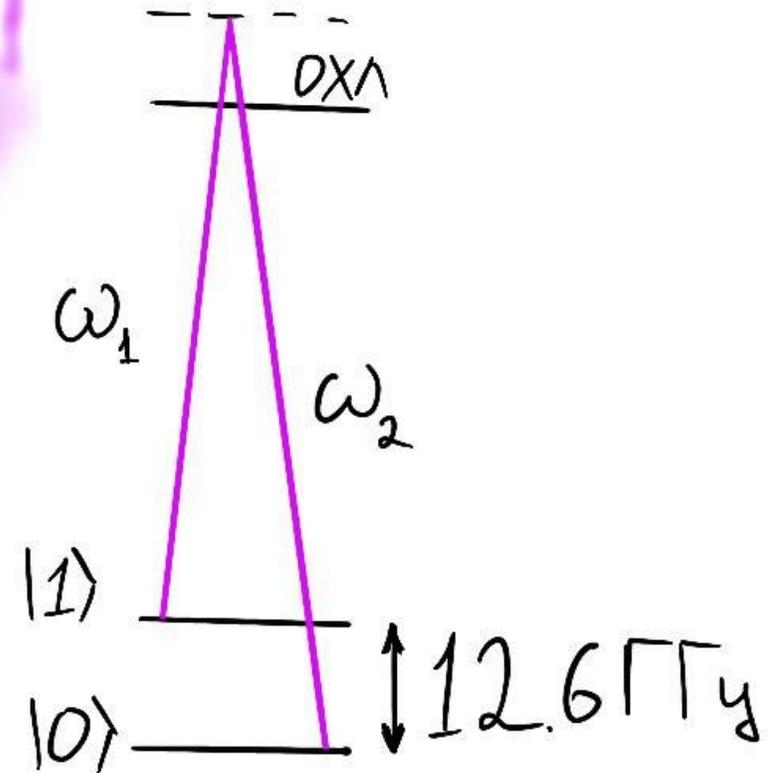


$$I = I_0 \sin(\omega_1 t - kx + \phi)$$

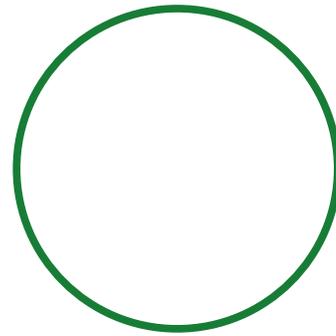
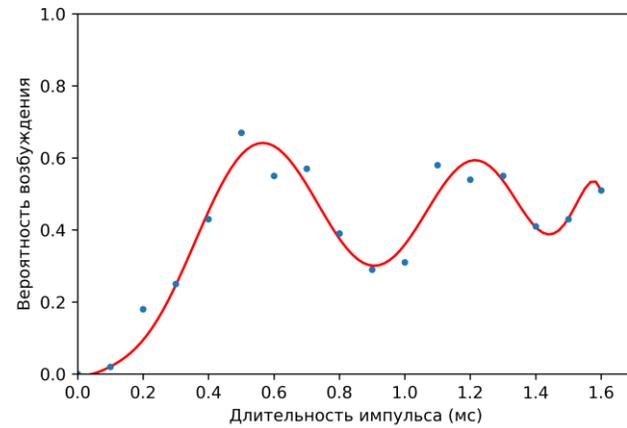
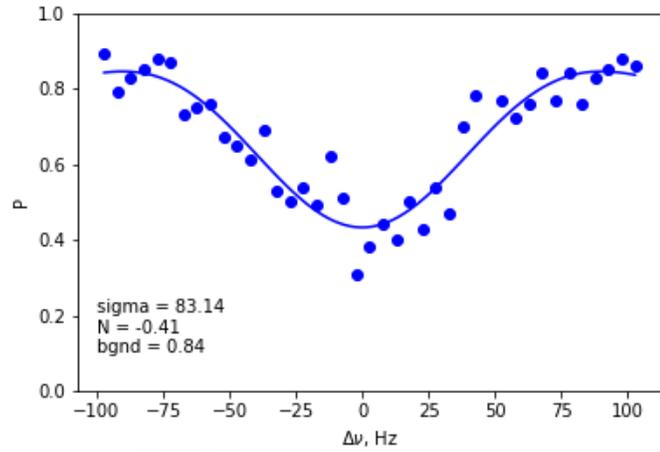
Индивидуальная оптическая адресация

$$I = I_0 \sin(\omega_2 t - kx)$$

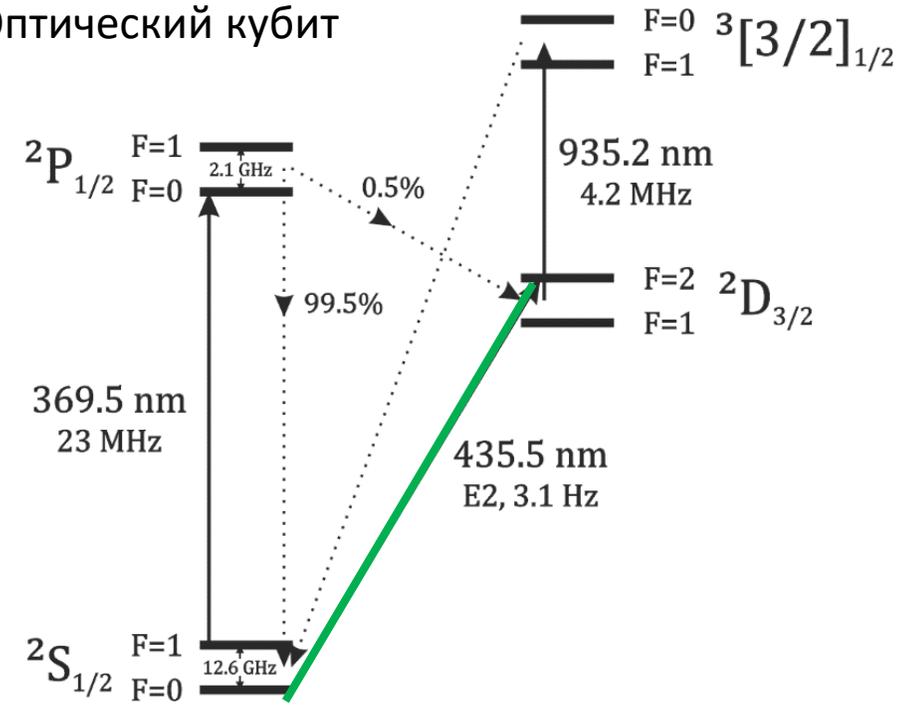
Глобальный рамановский оптический пучок



# 5. Однокубитные квантовые операции (ФИАН)



Оптический кубит



# 5. Двухкубитный гейт Цирака-Цоллера

## Quantum Computations with Cold Trapped Ions

J. I. Cirac and P. Zoller\*

*Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck, Technikerstrasse 25, A-6020 Innsbruck, Austria*

(Received 30 November 1994)

A quantum computer can be implemented with cold ions confined in a linear trap and interacting with laser beams. Quantum gates involving any pair, triplet, or subset of ions can be realized by coupling the ions through the collective quantized motion. In this system decoherence is negligible, and the measurement (readout of the quantum register) can be carried out with a high efficiency.

PACS numbers: 89.80.+h, 03.65.Bz, 12.20.Fv, 32.80.Pj

A quantum computer (QC) obeys the laws of quantum mechanics, and its unique feature is that it can follow a superposition of computation paths simultaneously and produce a final state depending on the interference of these paths [1]. Recent results in quantum complexity theory and the development of algorithms indicate that quantum

and an excited state  $|e\rangle_n \equiv |1\rangle_n$ . The state of the QC is a macroscopic superposition

$$|\psi\rangle = \sum_{x=0}^{2^N-1} c_x |x\rangle \equiv \sum_{\underline{x}=\{0,1\}^N} c_{\underline{x}} |\underline{x}\rangle$$

### Realization of the Cirac-Zoller controlled-NOT quantum gate

Ferdinand Schmidt-Kaler, Hartmut Häffner, Mark Riebe, Stephan Gulde, Gavin P. T. Lancaster, Thomas Deuschle, Christoph Becher, Christian F. Roos, Jürgen Eschner & Rainer Blatt

*Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Technikerstraße 25, A-6020 Innsbruck, Austria*

Quantum computers have the potential to perform certain computational tasks more efficiently than their classical counterparts. The Cirac-Zoller proposal<sup>1</sup> for a scalable quantum computer is based on a string of trapped ions whose electronic states represent the quantum bits of information (or qubits). In this scheme, quantum logical gates involving any subset of ions are realized by coupling the ions through their collective quantized motion. The main experimental step towards realizing the scheme is to implement the controlled-NOT (CNOT) gate operation between two individual ions. The CNOT quantum logical gate corresponds to the XOR gate operation of classical logic that flips the state of a target bit conditioned on the state of a control bit. Here we implement a CNOT quantum gate according to the Cirac-Zoller proposal<sup>1</sup>. In our experiment, two <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> ions are held in a linear Paul trap and are individually addressed using focused laser beams<sup>2</sup>; the qubits<sup>3</sup> are represented by superpositions of two long-lived electronic states. Our work relies on

of the qubits<sup>13</sup> encoded in long-lived internal states<sup>3</sup>, and their quantum state can be detected with efficiencies close to 100% (ref. 15). During the past years two and four ions have been entangled<sup>16,17</sup>, a single-ion CNOT gate<sup>18</sup> has been realized, and recently the Deutsch-Jozsa algorithm<sup>19</sup> has been implemented on a single-ion quantum processor. While the entangling operations demonstrated in ref. 17 can be used as a logic gate, a two-ion gate using individual addressing has not been demonstrated. This may serve as a key element for the further development and future perspectives towards general purpose quantum computing with trapped ions.

To implement a QC, Cirac and Zoller proposed a string of ions in a linear trap to serve as a quantum memory where the qubit information is carried by two internal states of each ion. Computational operations are carried out by addressing the ions individually with a laser beam. Single-qubit rotations are performed using coherent excitation by a single laser pulse driving transitions between the qubit states. For a two-qubit CNOT operation, Cirac and Zoller proposed to use the common vibration of an ion string to convey the information for a conditional operation (this vibrational mode is called the 'bus-mode'). This can be achieved with a sequence of three steps after the ion string has been prepared in the ground state ( $n = 0$ ) of the bus-mode. First, the quantum information of the control ion is mapped onto this vibrational mode, that is, the entire string of ions is moving and thus the target ion participates in this common motion. Second, and conditional upon the motional state, the target ion's qubit is inverted. Finally, the state of the bus-mode is mapped back onto the control ion. Mathematically, this amounts to performing the operation

Table 1 Pulse sequence for the Cirac-Zoller CNOT quantum gate operation

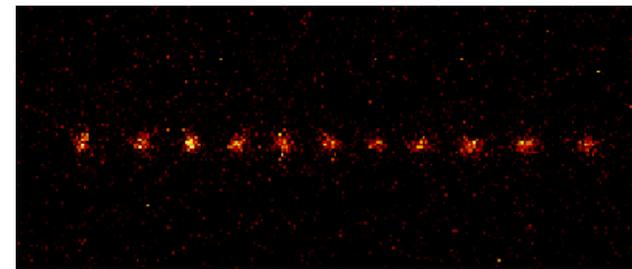
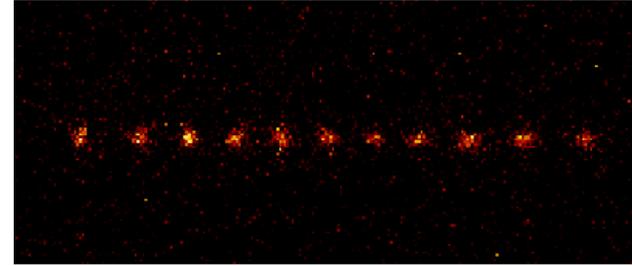
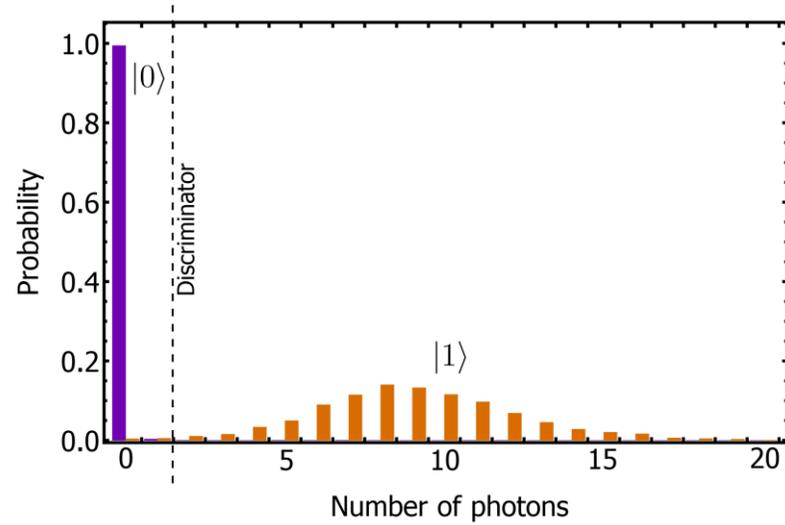
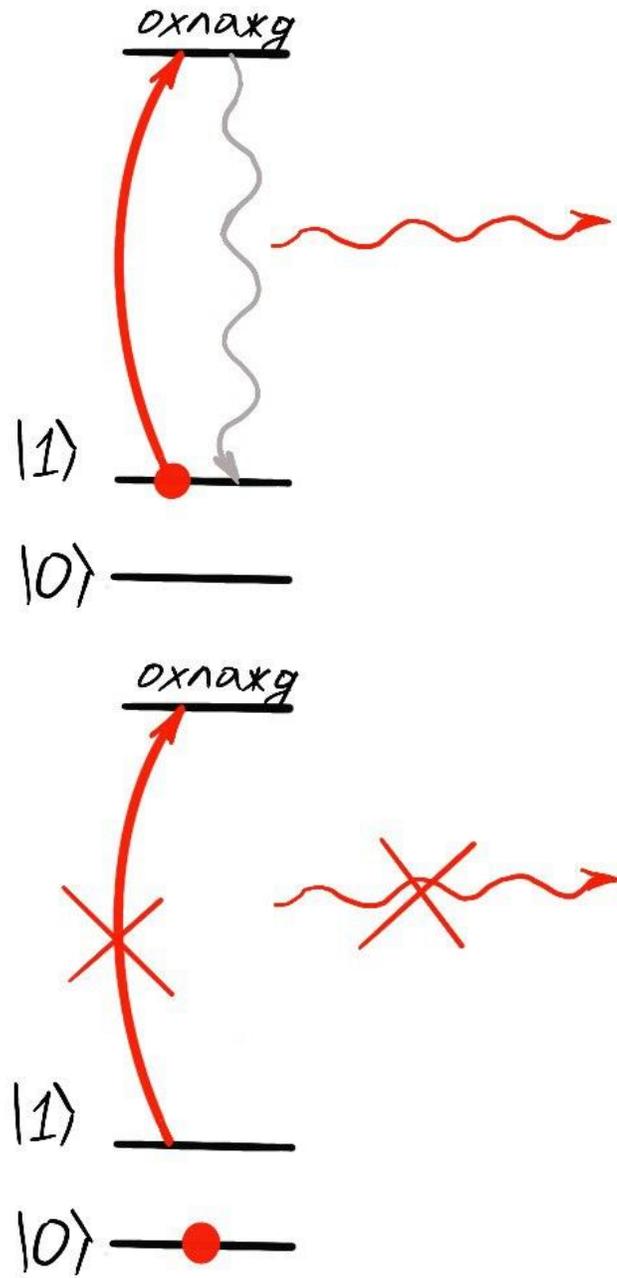
Ion 1	Ion 2	Ion 2	Ion 2	Ion 2	Ion 1
$R_1^+(\pi, 0)$	$R_2(\pi/2, 0)$	$R_2^+(\pi, 0)$	$R_2^+(\pi/\sqrt{2}, \pi/2)$	$R_2^+(\pi, 0)$	$R_2(\pi/2, \pi)$
Mapping	Ramsey	Composite single ion phase gate	Composite single ion phase gate	Ramsey	Mapping <sup>-1</sup>

$R_i(\theta, \varphi)$ ,  $R_i^+(\theta, \varphi)$  denote transitions on the carrier and the blue sideband, respectively, for the  $i$ th ion.  $\theta$  denotes the angle of the rotation, defined by the Rabi frequency and the pulse length;  $\varphi$  denotes the axis of the rotation, given by the phase between the exciting radiation and the atomic polarization.

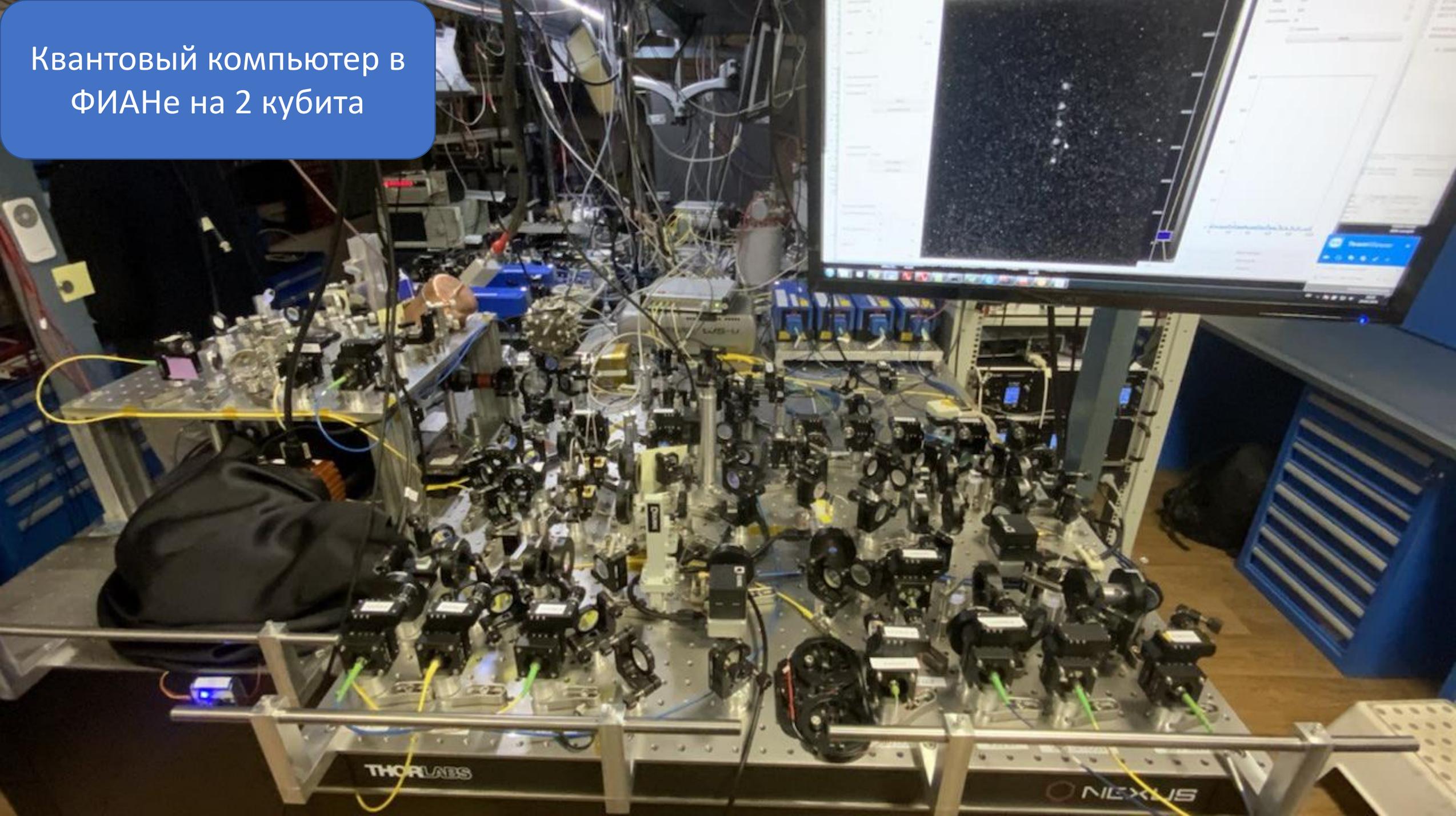
- +Первый предложенный квантовый гейт
- Требуется сильной фокусировки
- Скорость ограничена частотой ловушки
- Требуется охлаждение до основного состояния

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

# 6. Считывание состояния

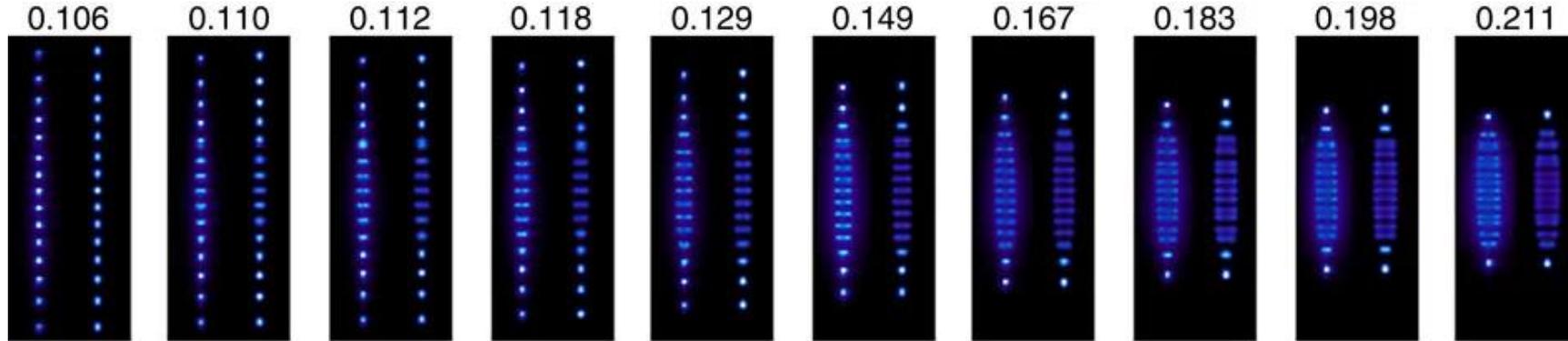


Квантовый компьютер в  
ФИАНе на 2 кубита

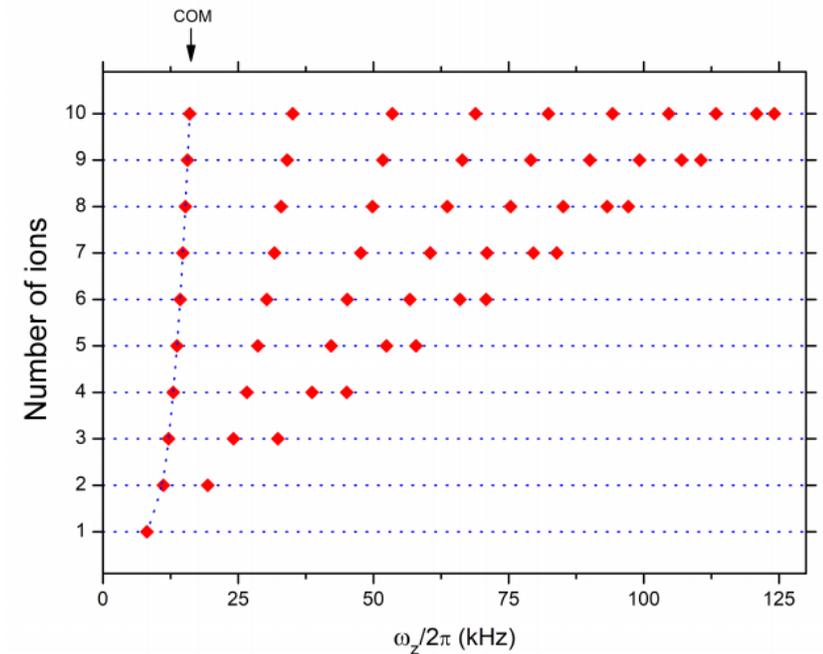


# Основная сложность ионного КК – масштабирование

Осевое удержание 

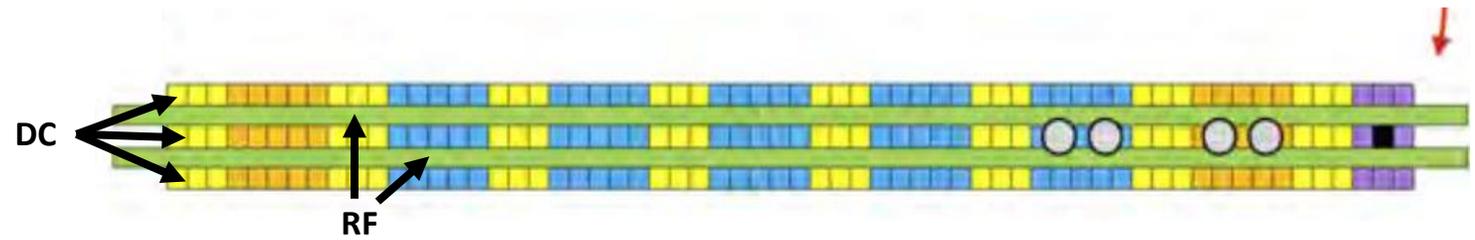
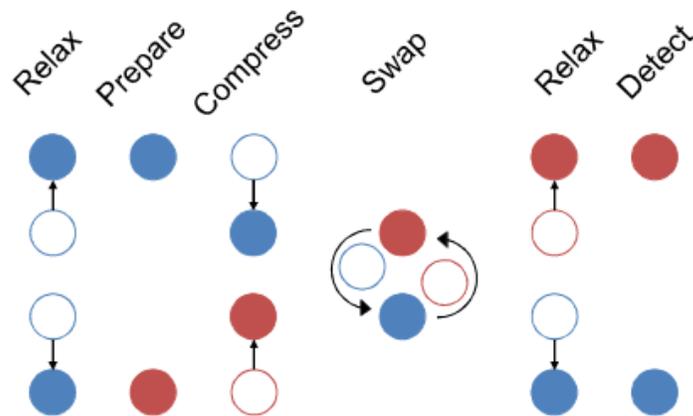
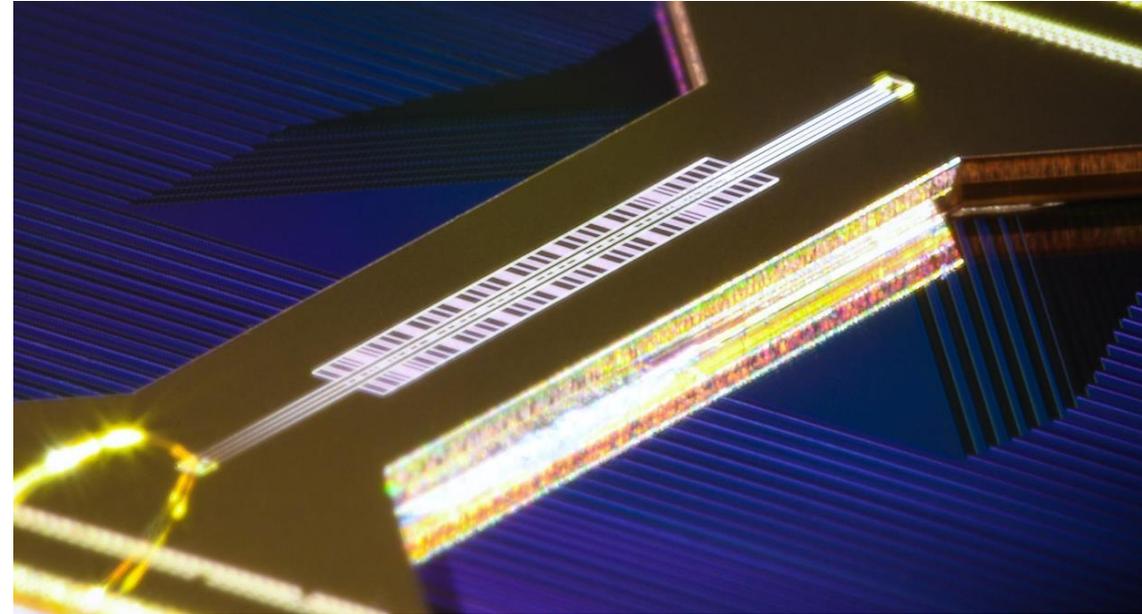


Ограничивает количество ионов в ловушке около 50.  
Основная проблема масштабирования ионных систем



# Состояние в мире: Honeywell

- 10 кубит
- Планарная ловушка при 12 K
- 5 зон проведения операций (голубой)
- 2 зоны удержания (оранжевый)
- 8 Вспомогательных зон (желтый)
- 198 DC электродов
- Параллельные вычисления в различных зонах
- Кубит  $Yb$ , симпатическое охлаждение  $Ba$
- Достоверность однокубитной операции 99.9 %
- Достоверность двухкубитной операции 99 %



# Honeywell Quantum Solutions

Our quantum computing future is built on our technology heritage.

[CONTACT US →](#)



## Honeywell to release most powerful quantum computer yet by mid-2020; QCCD architecture

09 March 2020

Honeywell **announced** that due to a breakthrough in technology, it will release a quantum computer with a quantum volume of at least 64, twice that of the next alternative in the industry, by the middle of 2020.



## Industrial giant Honeywell says it's built the world's best quantum computer



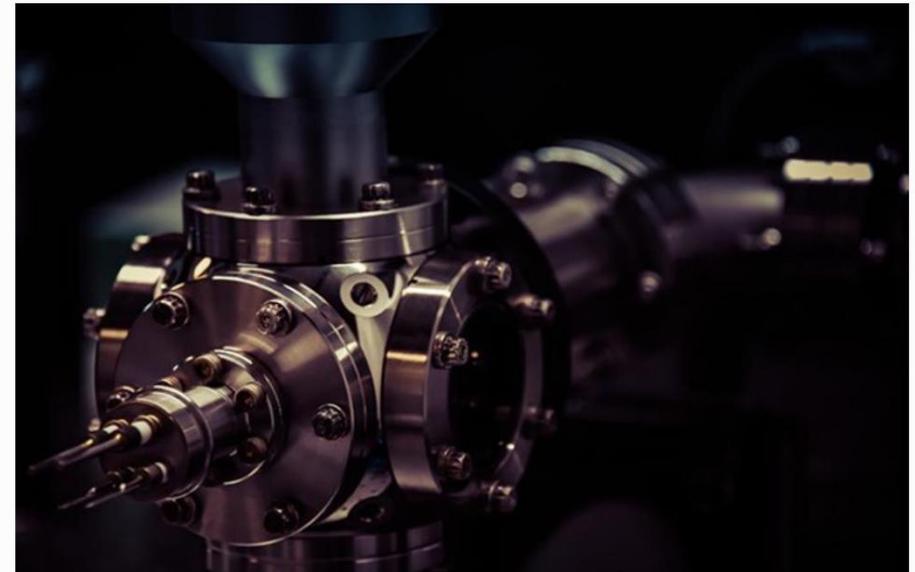
Forbes

Mar 9, 2021, 10:13am EST | 12,974 views

### Honeywell Quantum Computer Model H1 Sets A New Measured Quantum Volume Record Of 512

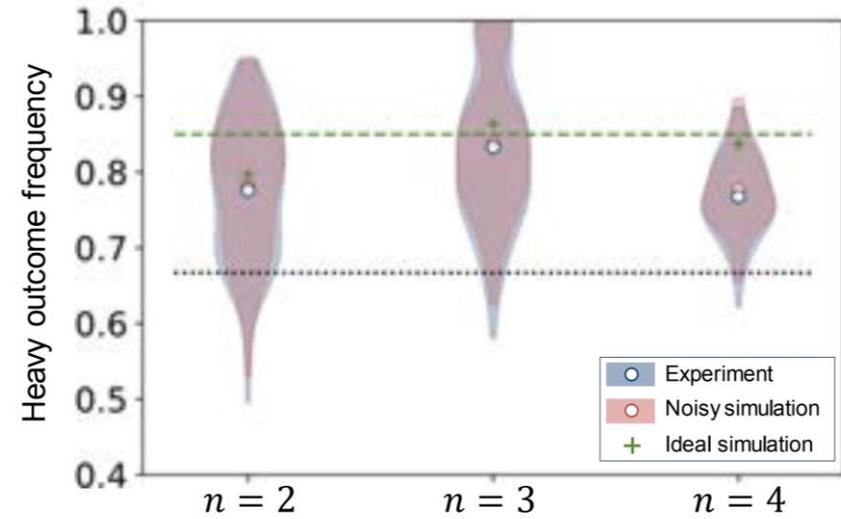
Paul Smith-Goodson Contributor  
Moor Insights and Strategy Contributor Group  
Cloud  
*Analyst-in-residence, Quantum Computing*

f  
t  
in

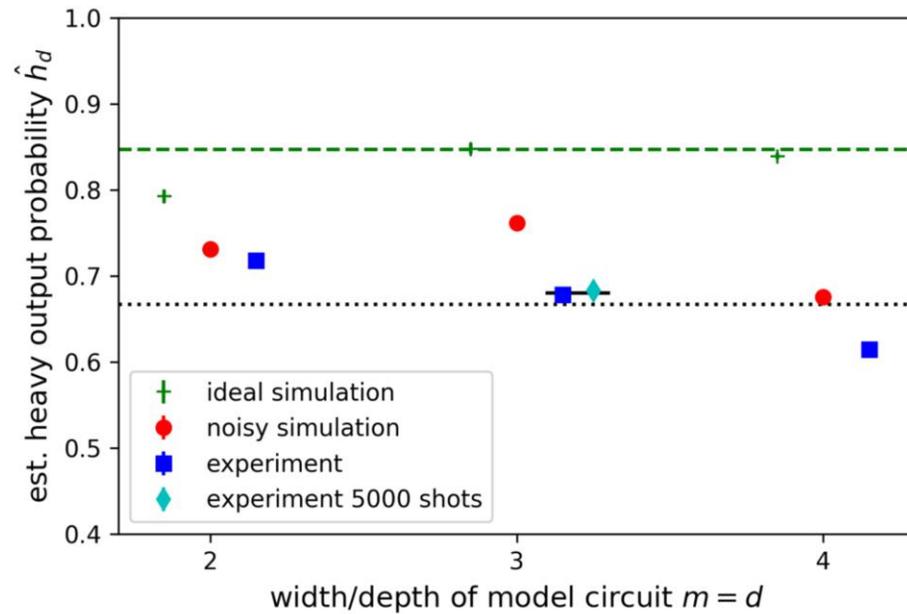


# Honeywell vs IBM

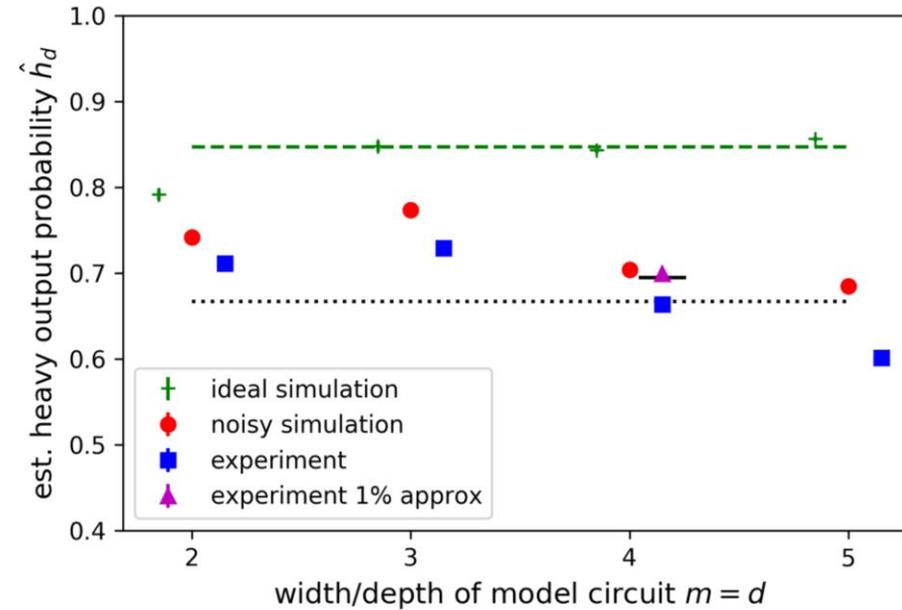
## Honeywell



## IBM Q 20-qubit Tokyo



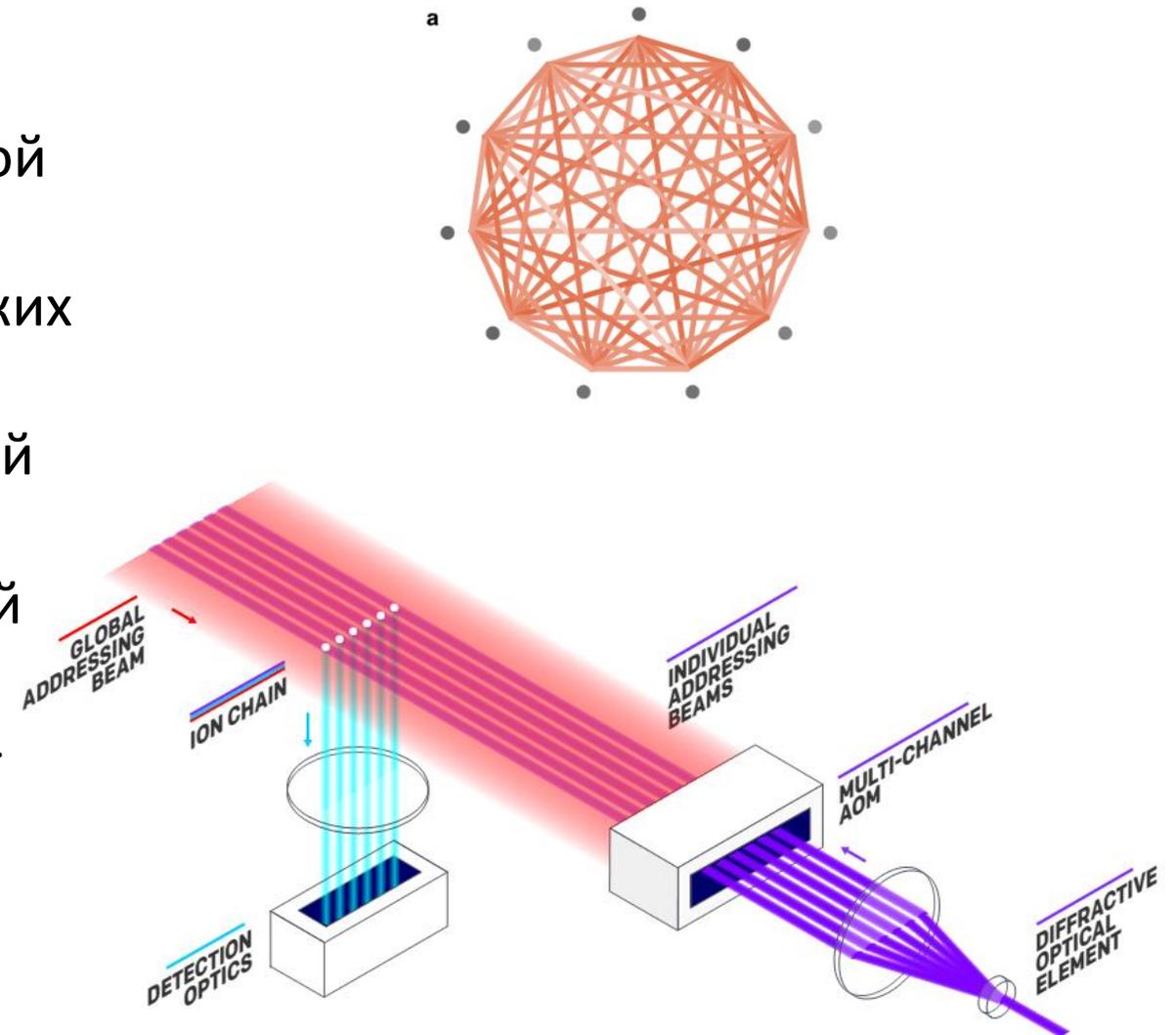
## IBM Q 20-qubit Johannesburg



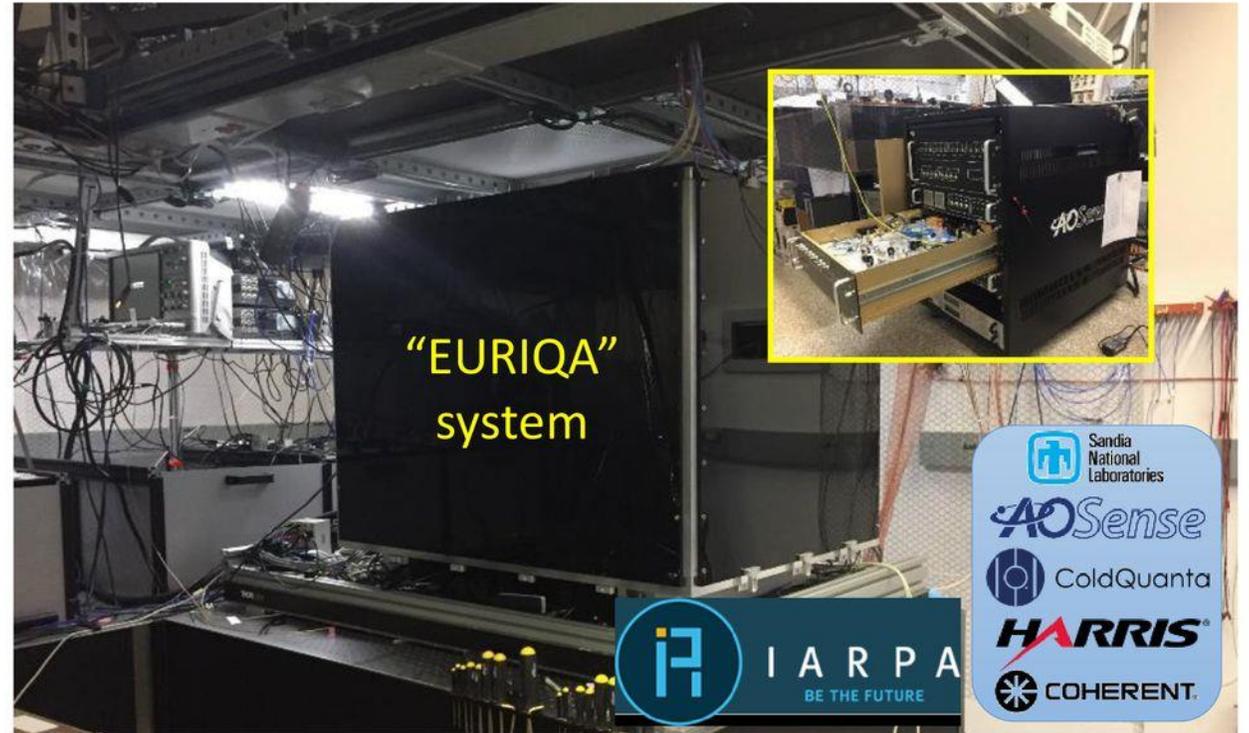
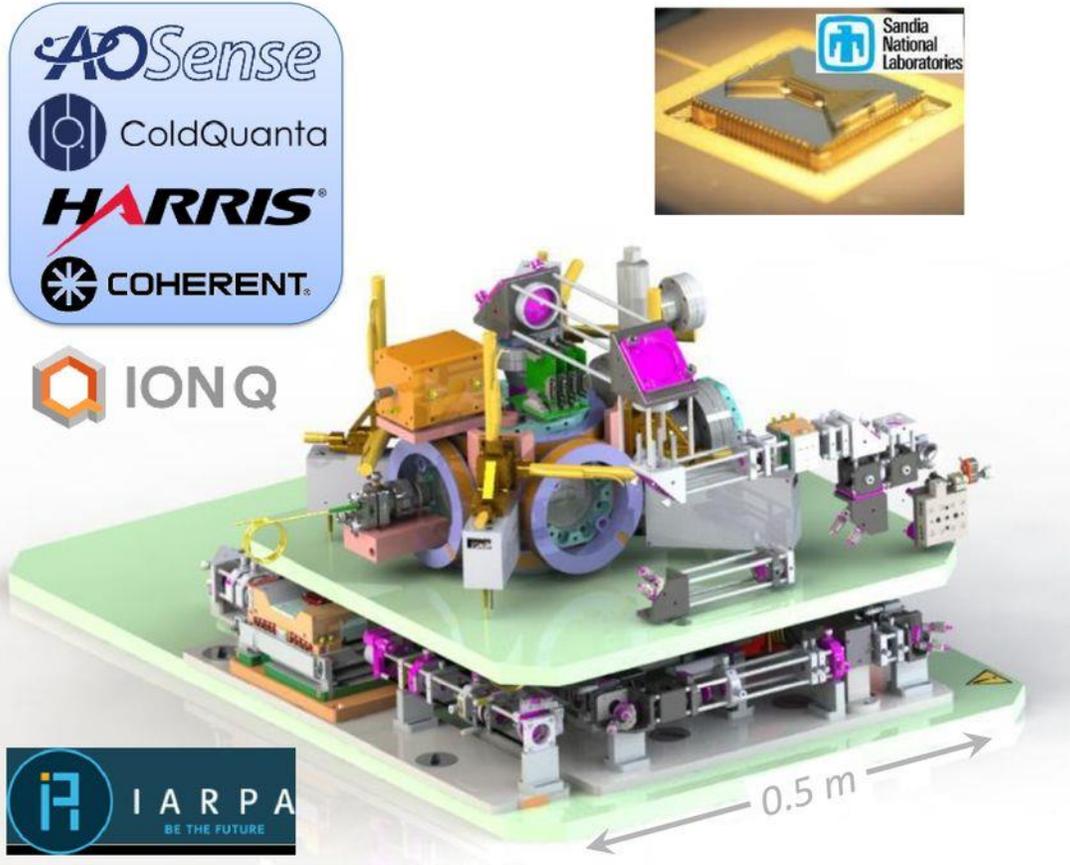
# Состояние в мире: IONQ

- 32 радиочастотных кубита  $^{171}\text{Yb}^+$
- 2-кубитная операция на произвольной паре ионов
- Параллельные операции на нескольких парах кубит
- Средняя достоверность однокубитной операции  $F_{\text{single}} > 99\%$
- Средняя достоверность двухкубитной операции  $F_{\text{two-qubit}} > 98\%$
- Реализованные алгоритмы: Deutsch–Jozsa, Bernstein–Vazirani, Hidden shift, QFT, коррекция ошибок
- Коммерческая система

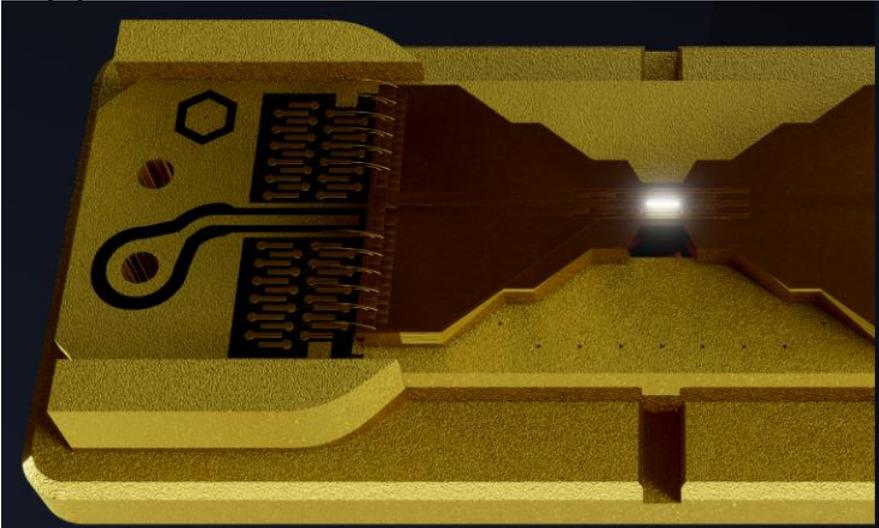
Любая пара ионов может быть перпутана



# Состояние в мире: IONQ



- Ожидаемый квантовый объем  $\sim 4000000$



Forbes

Mar 23, 2021, 10:46am EDT | 40 330 views

## IonQ Takes Quantum Computing Public With A \$2 Billion Deal

Paul Smith-Goodson Contributor

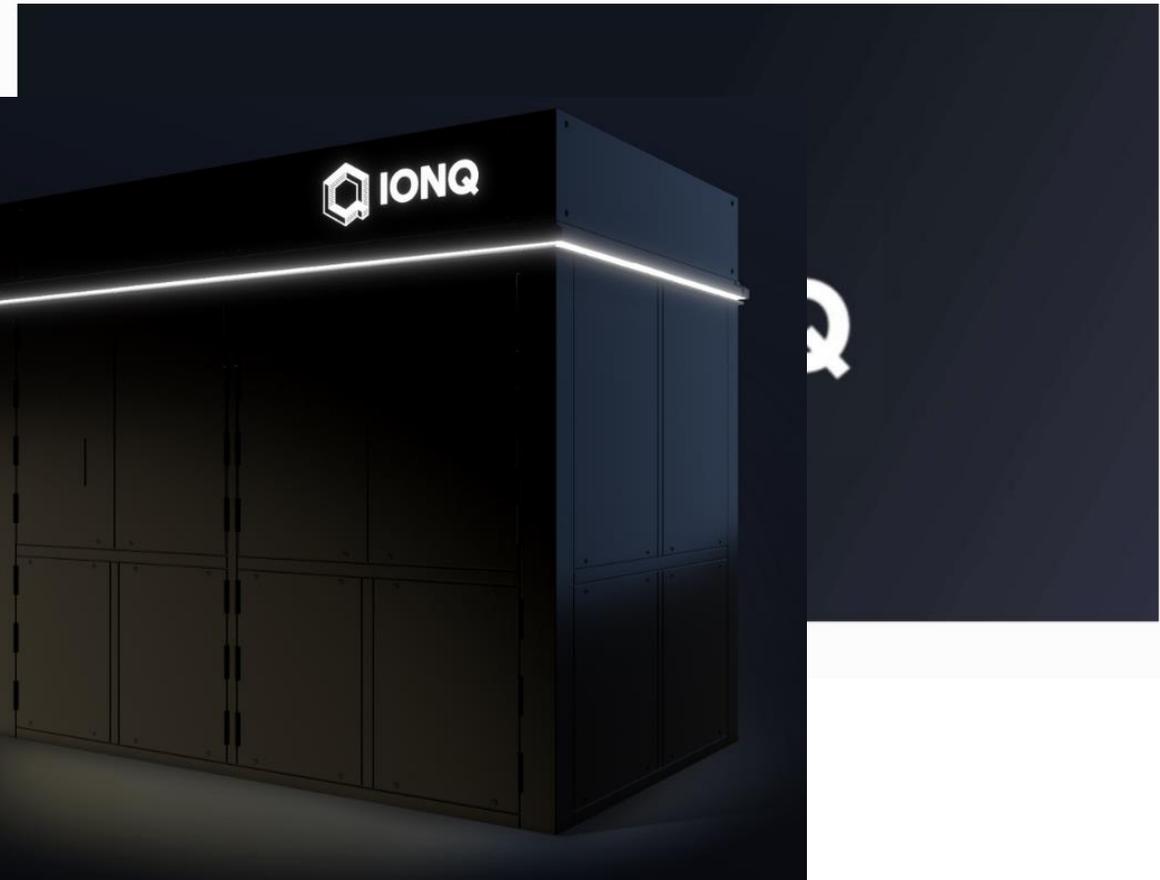


Moor Insights and Strategy Contributor Group ©

Cloud

Analyst-in-residence, Quantum Computing

f



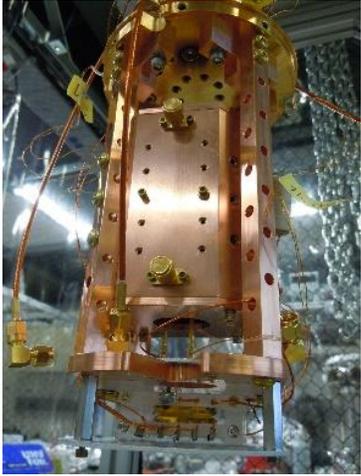
Unparalleled performance

## The world's most powerful quantum computer

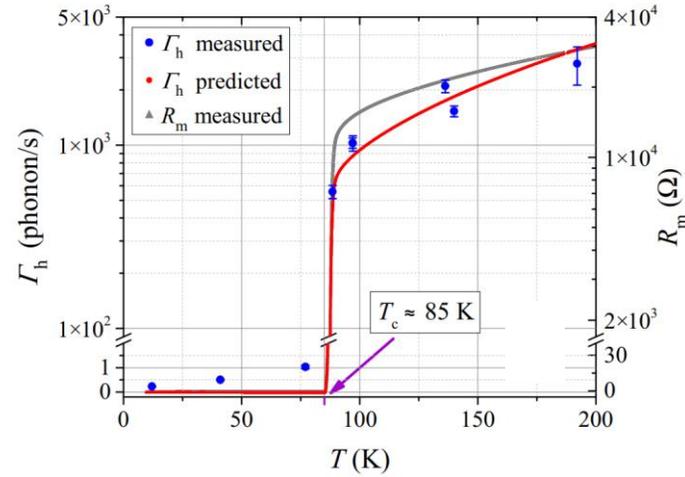
Featuring 32 qubits, minimal gate errors, and a world-leading expected quantum volume. Available on the cloud in 2021 to help solve humanity's hardest problems.

[Read more about our latest breakthrough →](#)

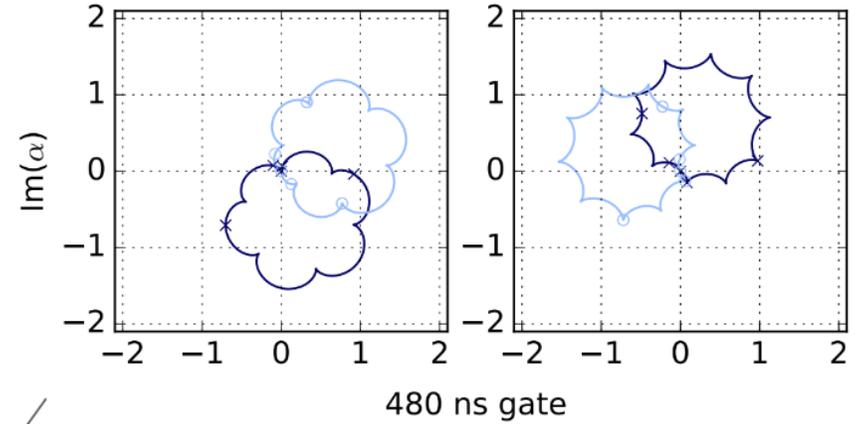
# Фундаментальная задачи ионных КК



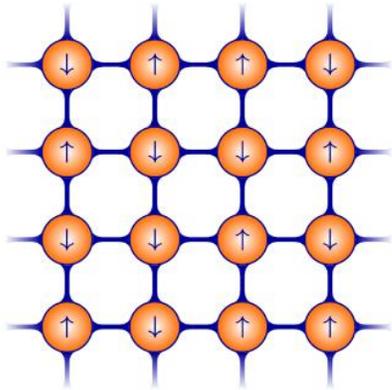
Криогенные системы



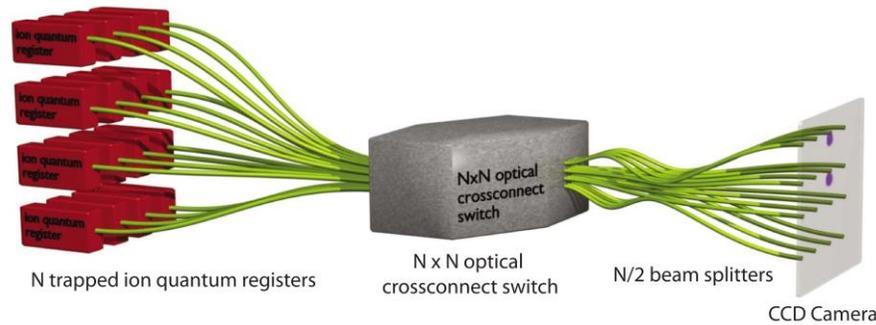
Сверхпроводящие ловушки



Неадиабатические вентили



2D массивы



Фотонные интегральные системы

РЧ удержание  
+  
Оптическое удержание

Комбинированное управление движением ионов

# TIM

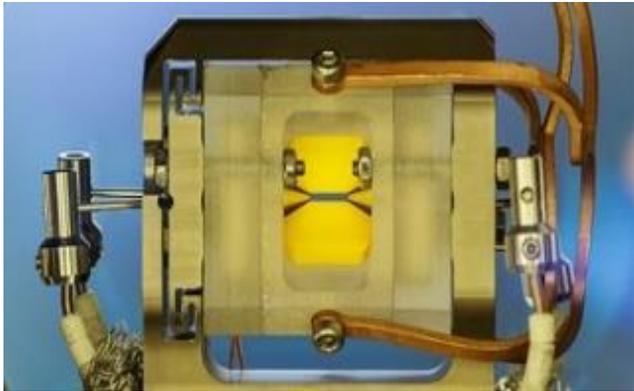


# Состояние в мире: обзор

Симуляторы на ионах - 53 кубита	Kim, Kihwan, et al. "Quantum simulation of frustrated Ising spins with trapped ions." <b>Nature</b> 465.7298 (2010): 590-593.	США, университет Мериленда
Вычислители на ионах – 32 кубита (попарно связанных)	Landsman, Kevin A., et al. "Two-qubit entangling gates within arbitrarily long chains of trapped ions." <b>Physical Review A</b> 100.2 (2019): 022332.	США, университет Мериленда
Время когерентности 60 мин	Wang, Pengfei, et al. "Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour." <b>Nature communications</b> 12.1 (2021): 1-8.	Китай, Tsinghua University
Время операции 1 мкс	Schäfer, V. M., et al. "Fast quantum logic gates with trapped-ion qubits." <b>Nature</b> 555.7694 (2018): 75-78.	Великобритания, Оксфорд
Достоверность однокубитной операции 99.996%	Gaebler, John P., et al. "High-fidelity universal gate set for be 9+ ion qubits." <b>Physical review letters</b> 117.6 (2016): 060505.	США, NIST
Достоверность двухкубитной операции 99.9%	Gaebler, John P., et al. "High-fidelity universal gate set for be 9+ ion qubits." <b>Physical review letters</b> 117.6 (2016): 060505.	США, NIST

# Состояние в мире: AQTION

- Оптический кубит на ионе Ca
- Демонстрация алгоритма Шора ( $15 = 5 \times 3$ )
- Квантовая химия
- 24 перепутанных кубита (GHZ state)



# Планы ФИАН: развитие планарных ловушек

- 2 зоны удержания
- Высота иона над поверхностью 150 мкм
- Оптическая апертура адресации
- Материал подложки – поликор
- Напыление 700 нм Au



- Изготовлены подложки сложной формы
- Разработана криогенная вакуумная камера

