

Квантовые компьютеры

И.И. Рябцев

В.И.Тельнов,
Лекции по современной экспериментальной физике
Новосибирский Государственный университет



Институт физики полупроводников СО РАН
Новосибирский государственный университет

И.И.Рябцев

КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ
(обзорная лекция)

Пионеры квантовых вычислений

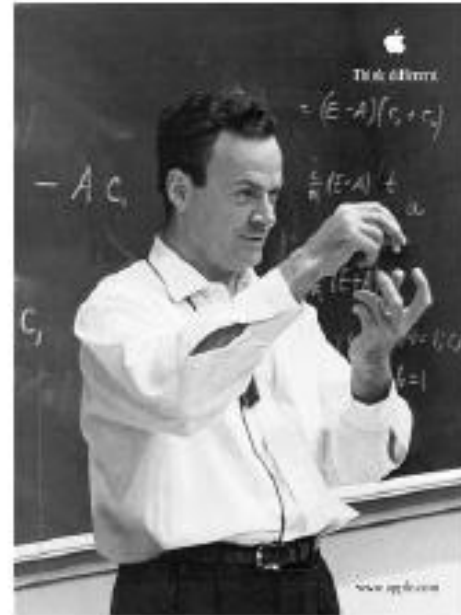
Yuri Manin



**“Computable and Uncomputable”,
1980**

**You need quantum automat to
model quantum systems like DNA!**

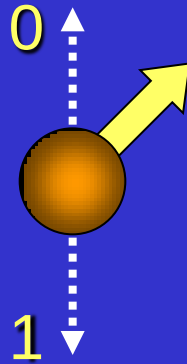
Richard Feynman



**“Simulating Physics with computers”,
“Quantum mechanical computers”,
1981**

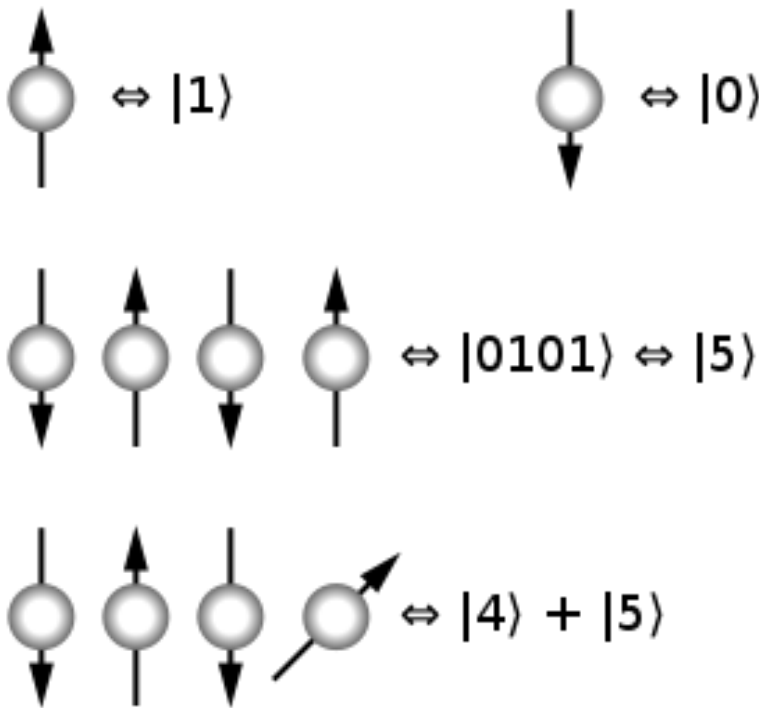
**Проблема: с увеличением числа взаимодействующих
частиц n число базисных состояний растет как 2^n**

Квантовые биты и регистры



Квантовый бит (кубит)

$$\psi = a_0 |\uparrow\rangle + a_1 |\downarrow\rangle$$



qubits can be in a superposition of all the classically allowed states

Квантовый
регистр
с четырьмя
кубитами

Квантовый
параллелизм!

Квантовый регистр из n кубитов

$$|\Psi\rangle = \sum_{k=1}^N A_k |k\rangle$$

Волновая функция
регистра из n кубитов

$$N = 2^n$$

Число базисных
состояний

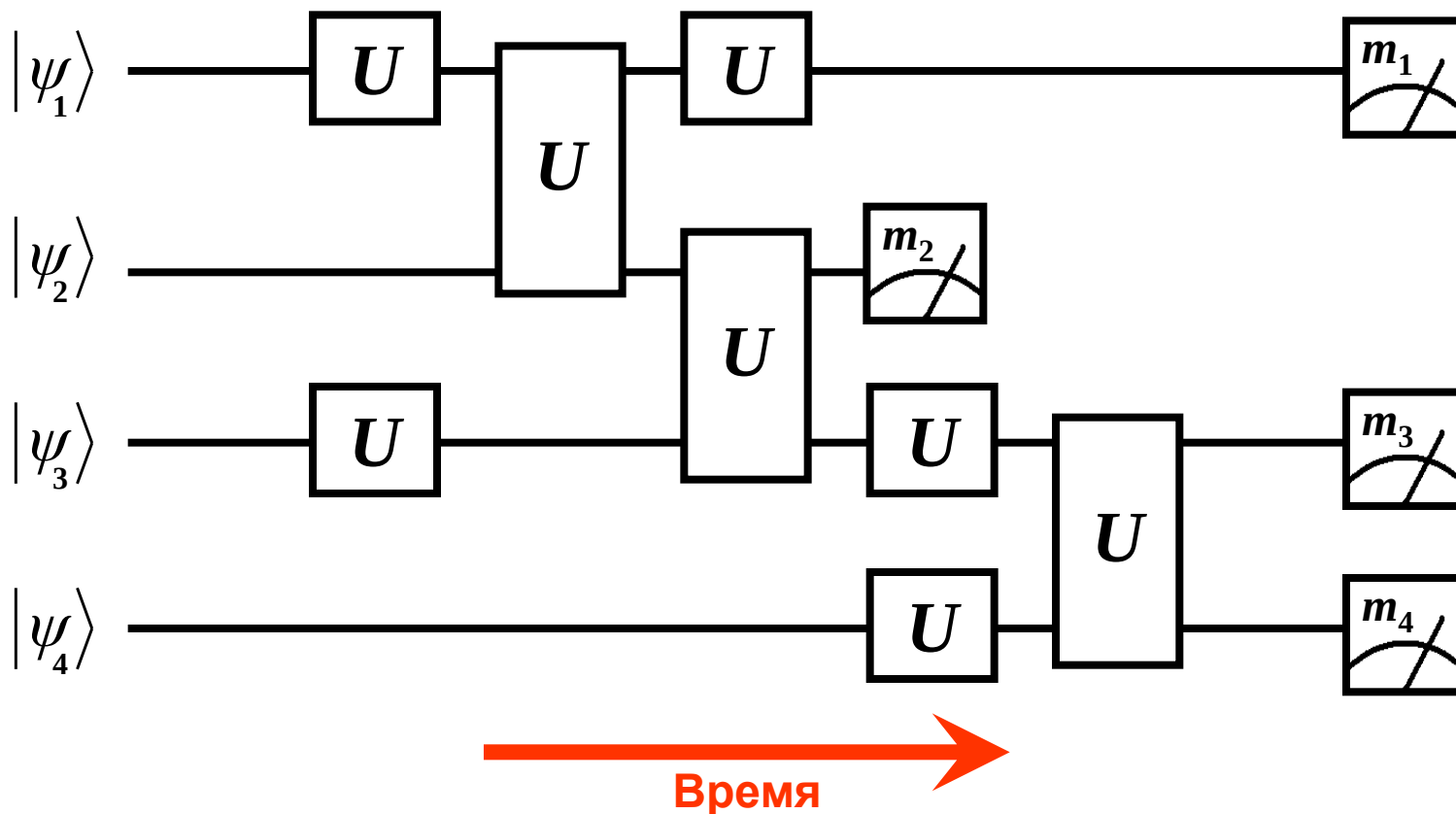
$$A^{in} = \{A_1^{in}, \dots, A_N^{in}\}$$

Начальное
состояние регистра

$$A^{out} = \{A_1^{out}, \dots, A_N^{out}\}$$

Конечное
состояние регистра

Вычисления с квантовым регистром



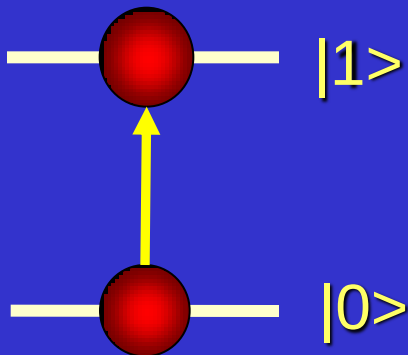
$\{U\}$ – набор универсальных унитарных операций (напр. $\{CZ, R(\xi, \eta, \zeta)\}$)

Универсальные однокубитовые квантовые операции

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & i \sin \theta \\ i \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

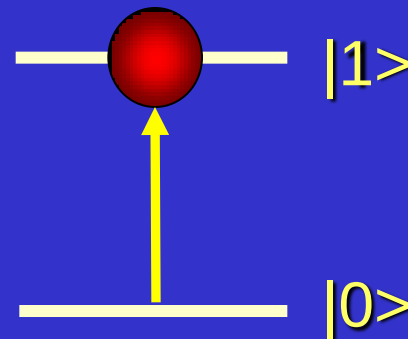
Поворот кубита на
заданный угол

$\theta = \pi / 4$ Hadamard gate



$$|0\rangle \rightarrow [|0\rangle \pm |1\rangle] / \sqrt{2}$$

$\theta = \pi / 2$ NOT gate



$$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$$

Универсальные двухкубитовые квантовые операции

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & i \sin \theta \\ 0 & 0 & i \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Controlled quantum
phase gate

$$|a\ b\rangle \rightarrow \exp(i\ \theta\ \delta_{a1}\ \delta_{b1})\ |a\ b\rangle$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Controlled
NOT

Before		After	
Control	Target	Control	Target
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

$$(|0\rangle + |1\rangle)_C |1\rangle_T \rightarrow |0\rangle_C |1\rangle_T + |1\rangle_C |0\rangle_T$$

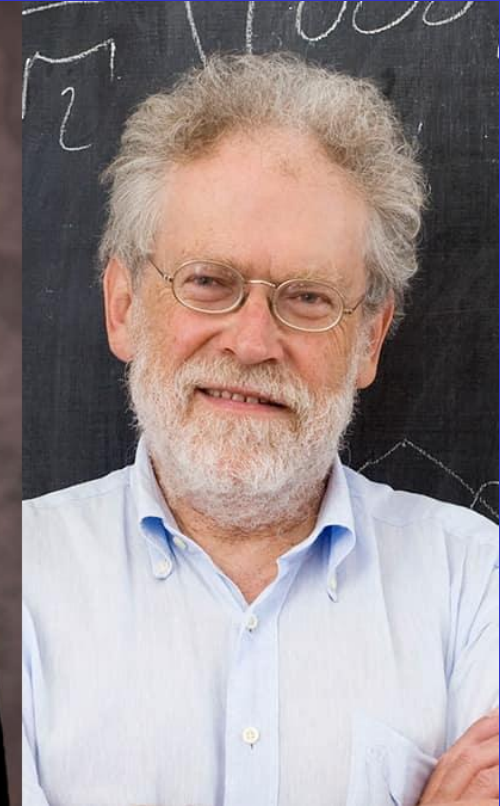
Нобелевская премия по физике 2022 года



*Ален Аспе
(Франция)*



*Джон Клаузер
(США)*



*Антон
Цайлингер
(Австрия)*

"За эксперименты в области квантовой запутанности, изучение нарушений неравенств Белла и новаторство в квантовой информатике"

Универсальные трехкубитовые квантовые операции

Toffoli gate

ВХОД			ВЫХОД		
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	0

Fredkin gate

ВХОД			ВЫХОД		
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1

Полезны для коррекции ошибок и дальнейшего ускорения квантовых вычислений

Наиболее известные квантовые алгоритмы

Алгоритм Гровера позволяет найти решение уравнения $f(x) = 1, 0 \leq x < N$ за время $O(\sqrt{N})$.

Алгоритм Шора позволяет разложить натуральное число n на простые множители за полиномиальное от $\log(n)$ время.

Алгоритм Залки - Визнера позволяет моделировать унитарную эволюцию квантовой системы системы n частиц за почти линейное время с использованием $O(n)$ кубитов.

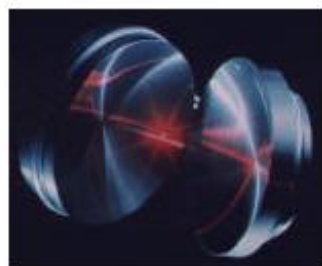
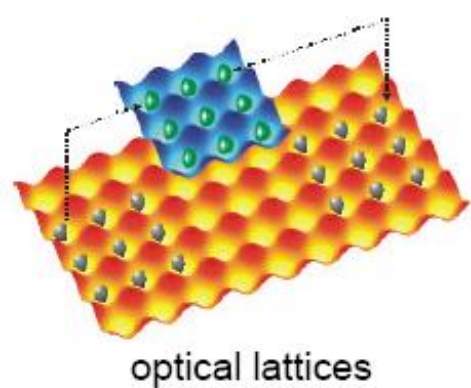
Алгоритм Дойча — Джоза позволяет «за одно вычисление» определить, является ли функция двоичной переменной $f(n)$ постоянной ($f_1(n) = 0, f_2(n) = 1$ независимо от n) или «сбалансированной» ($f_3(0) = 0, f_3(1) = 1; f_4(0) = 1, f_4(1) = 0$).

Критерии ДиВинченцо для физической реализации кубитов

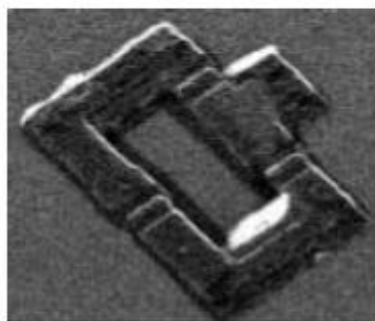
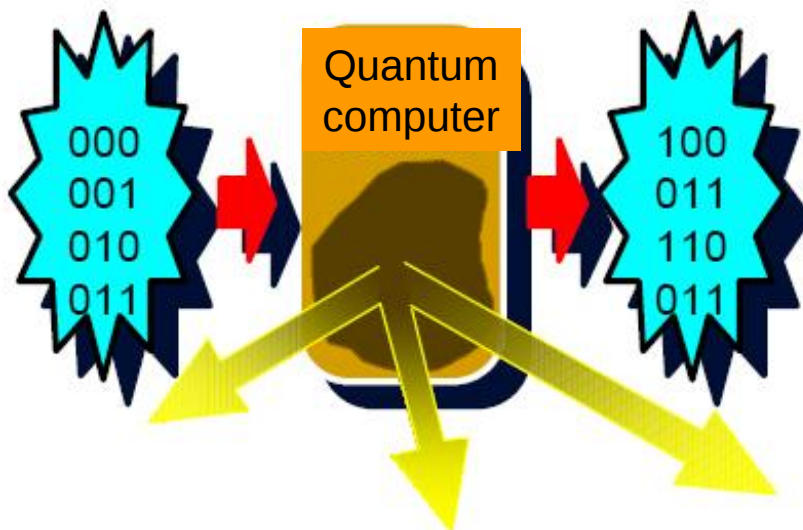
- 1) возможность масштабирования к большому числу кубитов (~ 1000) и индивидуальной адресации к ним
- 2) возможность инициализации произвольных начальных квантовых состояний кубитов
- 3) выполнение квантовых операций быстрее времени декогерентизации
- 4) обеспечение набора универсальных квантовых операций
- 5) возможность измерения состояний отдельных кубитов

D.P.DiVincenzo, "The Physical Implementation of Quantum Computation", Fortschr. Phys., 2000, v.48, p.771-783.

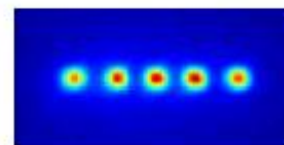
Варианты кубитов квантового компьютера



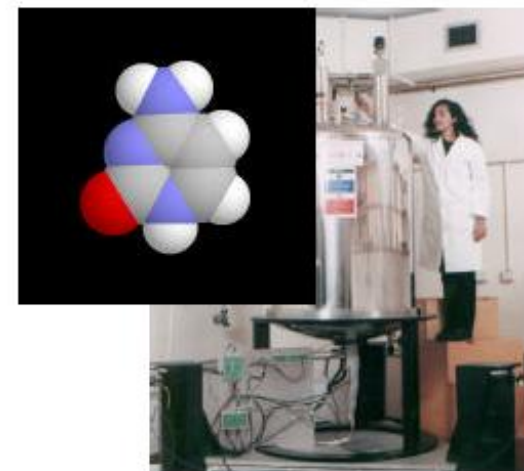
cavity QED



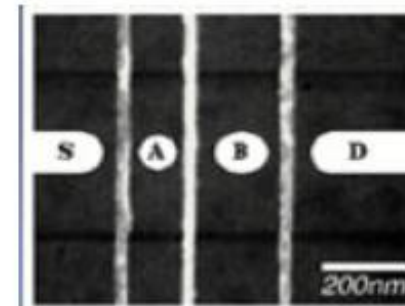
superconductors



ion traps (Innsbruck)

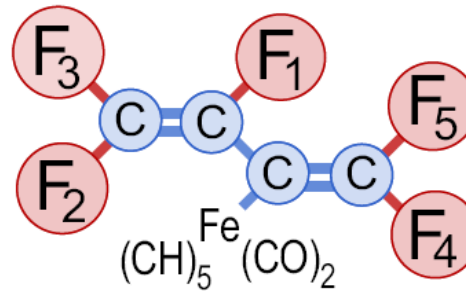
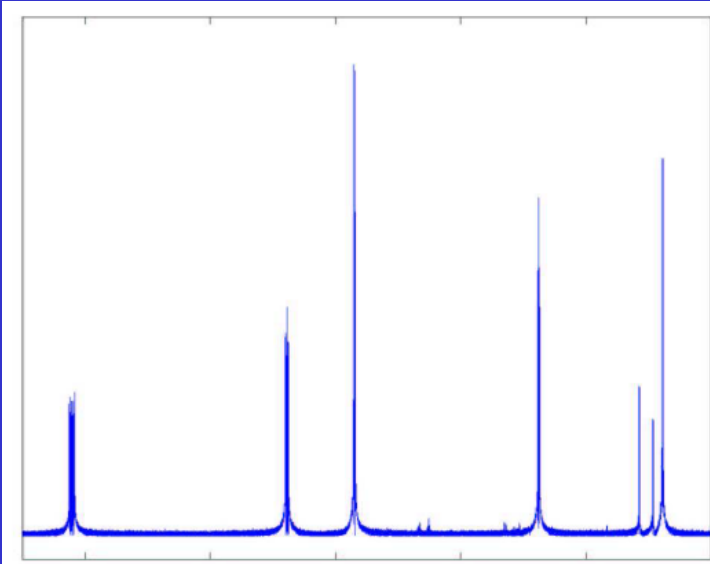


NMR

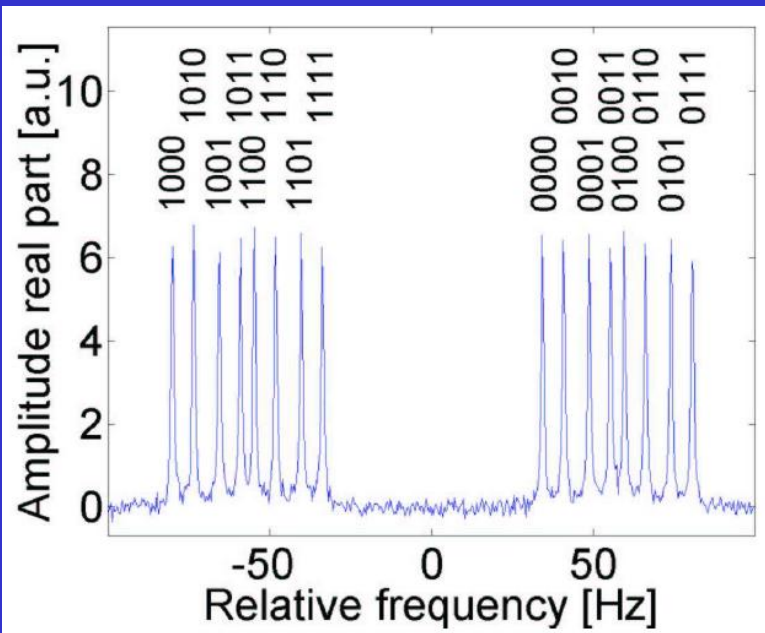


quantum dots

Ядерные спины в сложных молекулах



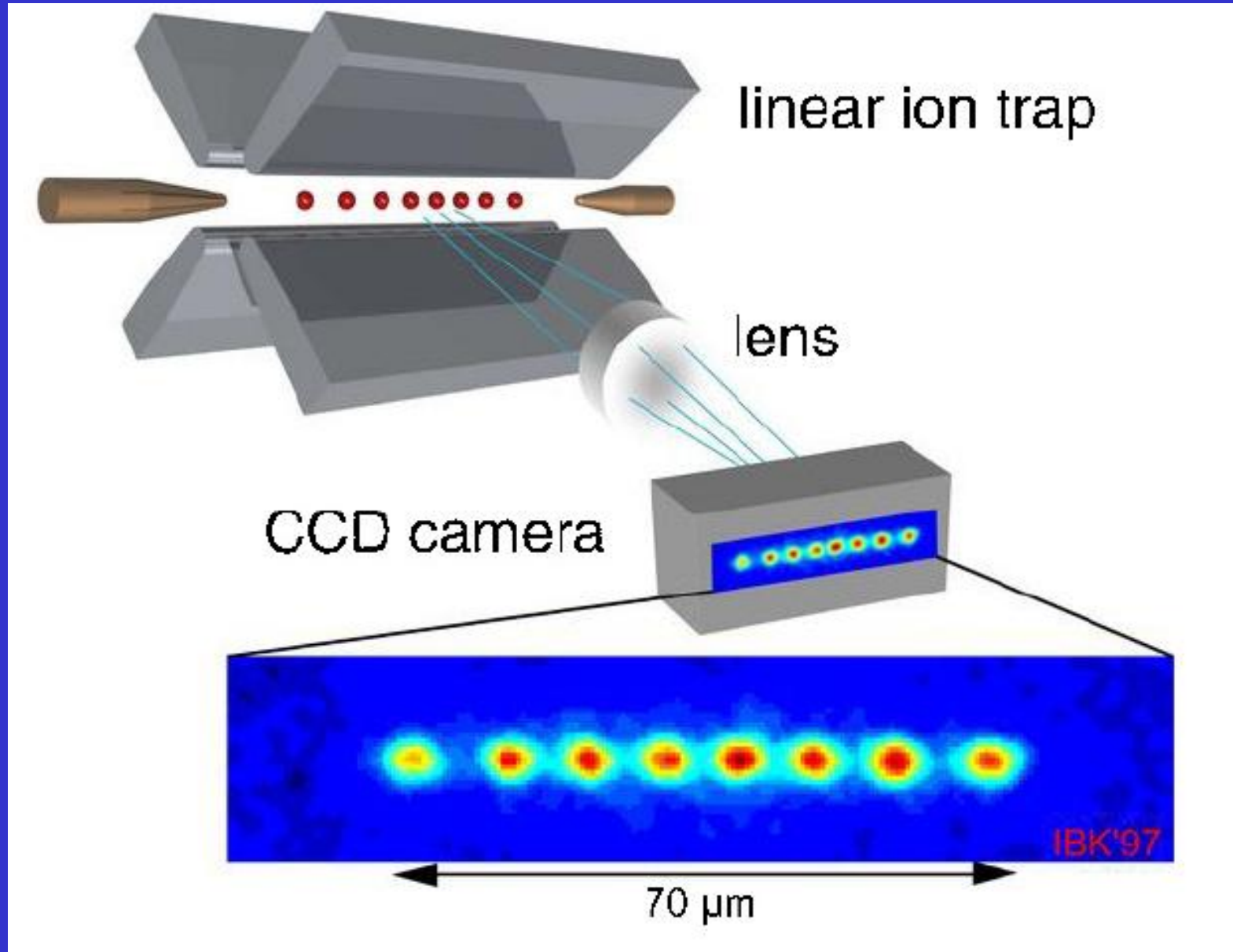
Спектр ЯМР для ядер атомов фтора в специально созданной сложной молекуле. Пять основных линий в спектре соответствуют пяти различным атомам фтора в молекуле.



Спектр крайнего левого пика, записанный с высоким разрешением. Наблюдаемые линии соответствуют различным взаимным ориентациям спинов.

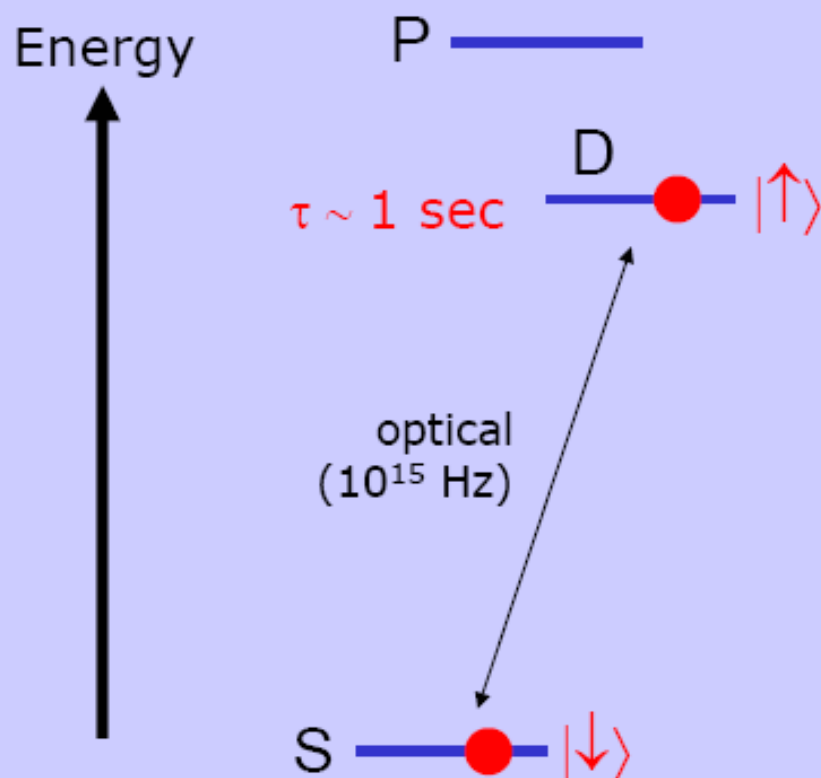
Проблемы: низкая скорость квантовых операций и ограничение по числу кубитов (~ 20)

Одиночные ионы в радиочастотной ловушке

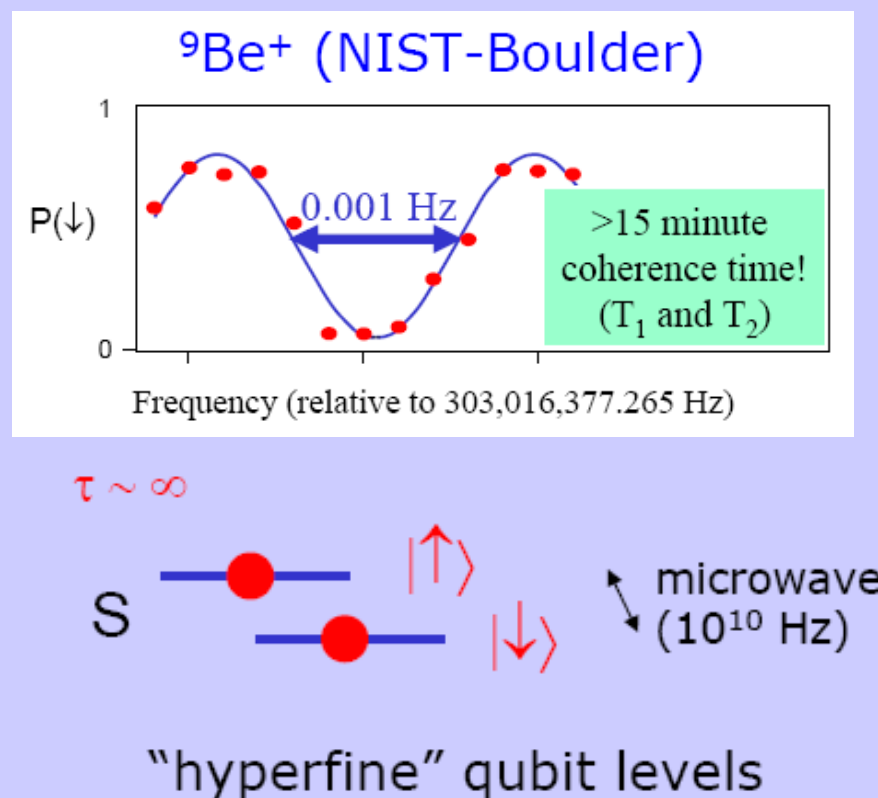


Atomic Ion Internal Energy Levels (**think: HYDROGEN**)

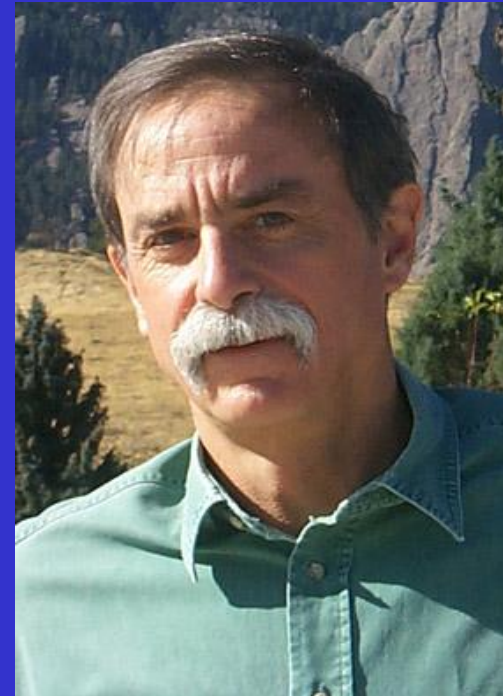
Ca⁺, Sr⁺, Ba⁺, Yb⁺



Be⁺, Mg⁺, Hg⁺, Cd⁺, Zn⁺



Нобелевские лауреаты по физике за 2012 г.



Serge Haroche

Born: 1944, Casablanca, Morocco

Affiliation at the time of the award: Collège de France, Paris, France, École Normale Supérieure, Paris, France

Prize motivation: "for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

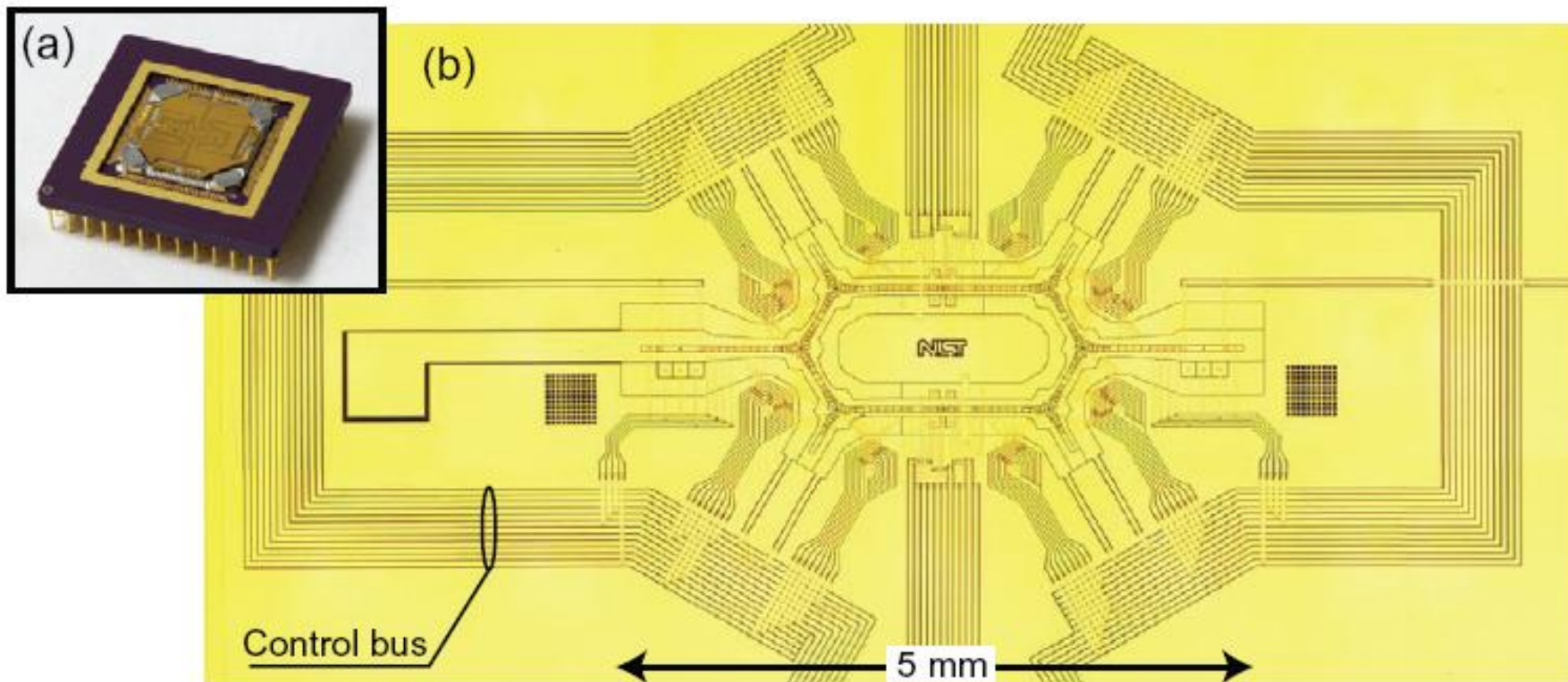
David J. Wineland

Born: 1944, Milwaukee, WI, USA

Affiliation at the time of the award: National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA, University of Colorado, Boulder, CO, USA

Prize motivation: "for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

Микрочипы NIST для захвата ионов и создания квантового регистра



Проблемы: 1) микроскопические флуктуации тока в микропроводниках приводят к неконтролируемому разогреву ионов и потере когерентности, так как ионы находятся слишком близко к поверхности (~ 100 нм); 2) сложно масштабировать к $10^3 - 10^4$ кубитов.

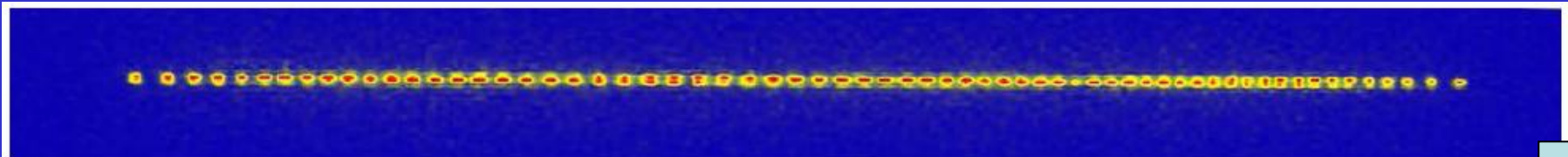
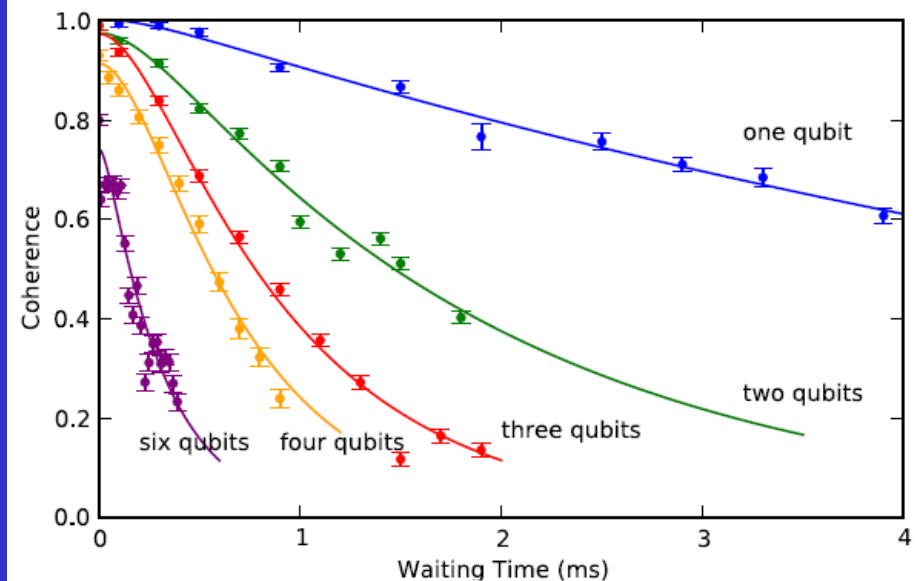
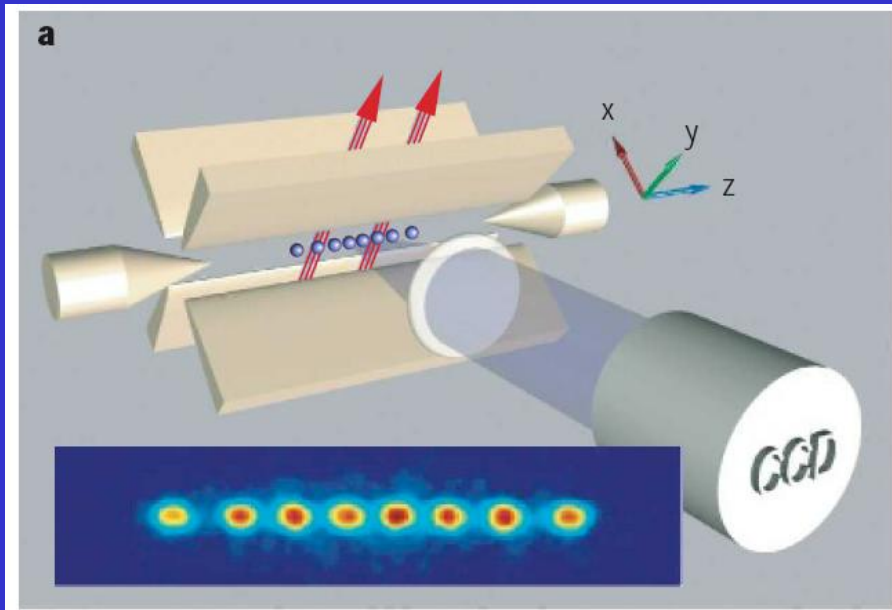
Coherence of large-scale entanglement

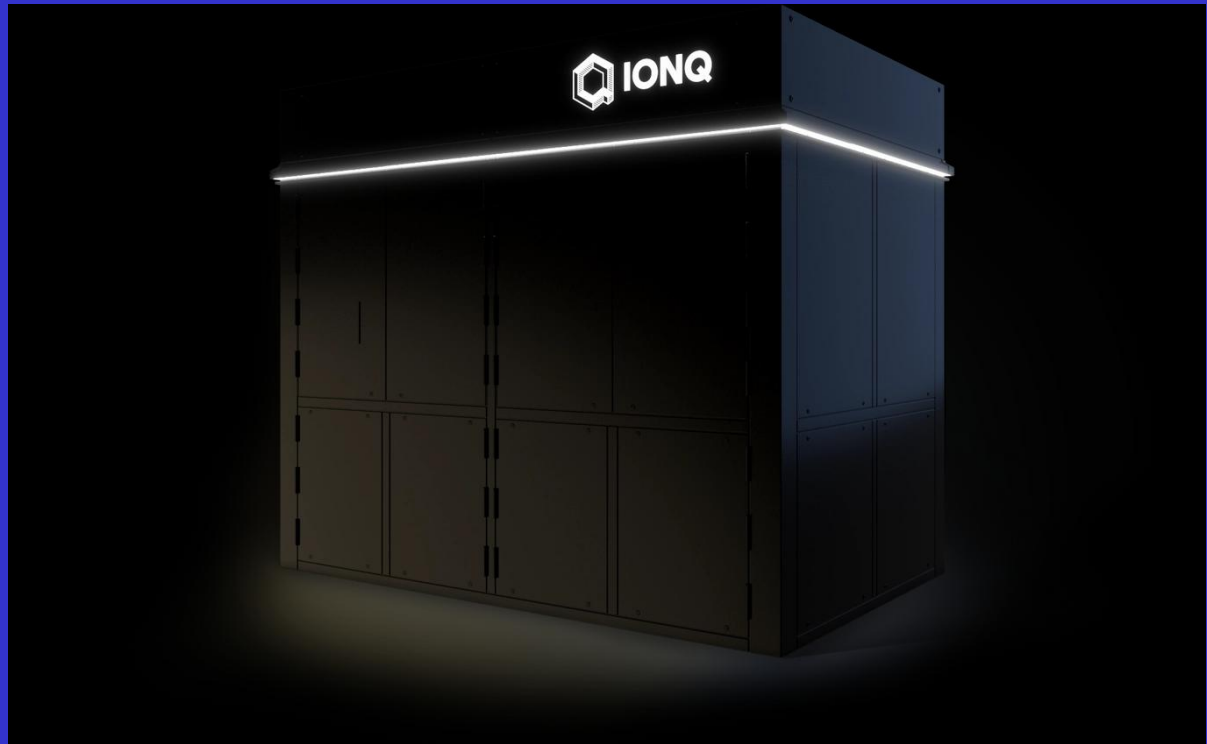
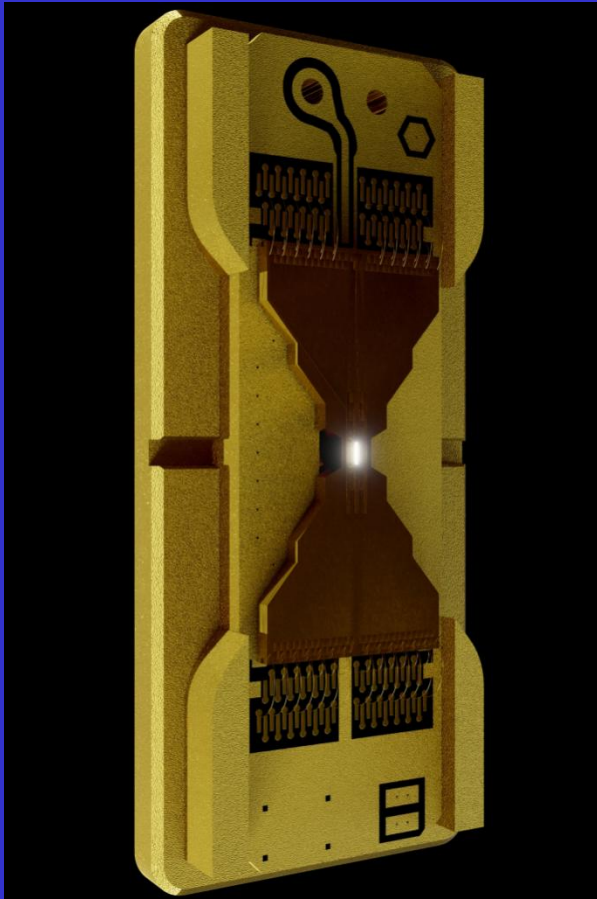
Thomas Monz,¹ Philipp Schindler,¹ Julio T. Barreiro,¹ Michael Chwalla,¹ Daniel Nigg,¹

William A. Coish,^{2,3} Maximilian Harlander,¹ Wolfgang Hänsel,⁴ Markus Hennrich,¹ and Rainer Blatt^{1,4}

We report the creation of large Schrödinger-Cat states with up to 14 qubits. By investigating their coherence over time, we observe a decay proportional to the square of the number of qubits. The observed decay agrees with our theoretical model which assumes a system affected only by correlated, Gaussian phase noise. Our model holds for the majority of current experimental systems developed towards quantum computation and quantum metrology.

Phys. Rev.
Lett. 106,
130506 (2011)





Однокубитовые операции для цепочки из 79 ионов,
квантовые алгоритмы до 11 ионов $^{171}\text{Yb}^+$.

2019: Точность однокубитовых операций до 99.5%,
двухкубитовых операций до 97.5%,
ошибки приготовления и измерения 0.7%.

Для одного и двух кубитов точность однокубитовых операций 99.9999%¹ на СВЧ-переходах и лучше 99.99% на оптических переходах^{2,3}, ошибка приготовления и измерения менее 10^{-4} ⁴, точность двухкубитовых операций лучше 99.9%^{2,3}. Квантовые алгоритмы реализованы до 7 кубитов⁵, квантовые симуляторы до 50 кубитов, включая цепоски Изинга⁶ и квантовый магнетизм⁷.

1. Harty, T. P. et al, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 220501 (2014).
2. Gaebler, J. P. et al.,. *Phys. Rev. Lett.* **117**, 060505 (2016).
3. Ballance, C. J. et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 060504 (2016).
4. Crain, S. et al.,. *Commun. Phys.* **2**, 97 (2019).
5. Landsman, K. A. et al. , *Nature* **567**, 61–65 (2019).
6. Zhang, J. et al. ,. *Nature* **551**, 601–604 (2017).
7. Bohnet, J. G. et al. , *Science* **352**, 1297–1301 (2016).

G. Pagano *et al.*
Cryogenic
trapped-ion
system for large
scale quantum
simulation.
*Quantum Sci.
Technol.* 4
(2019) 014004

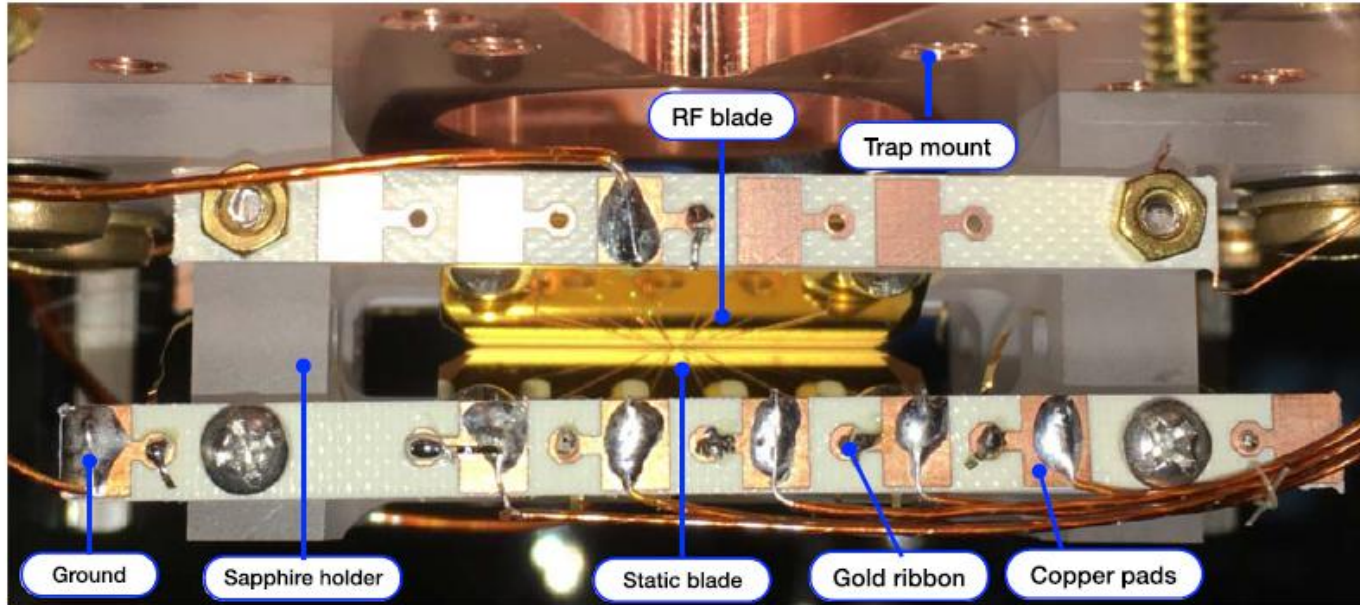
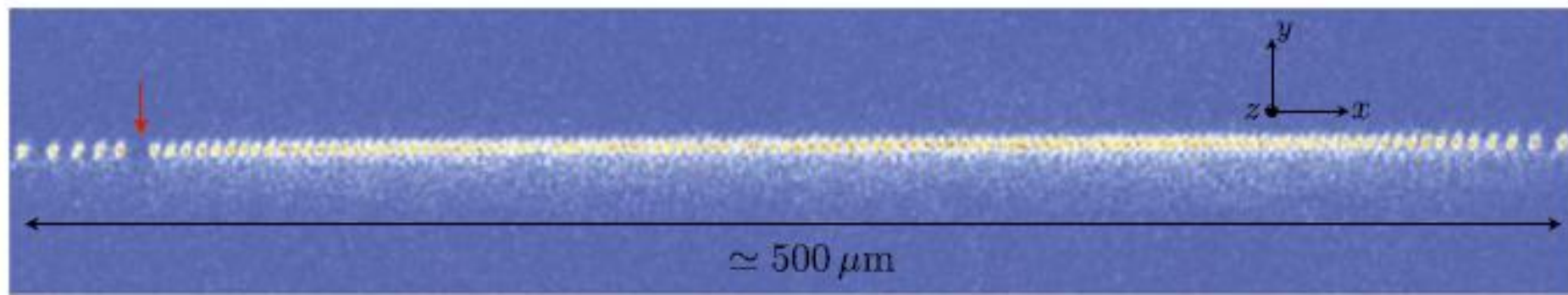
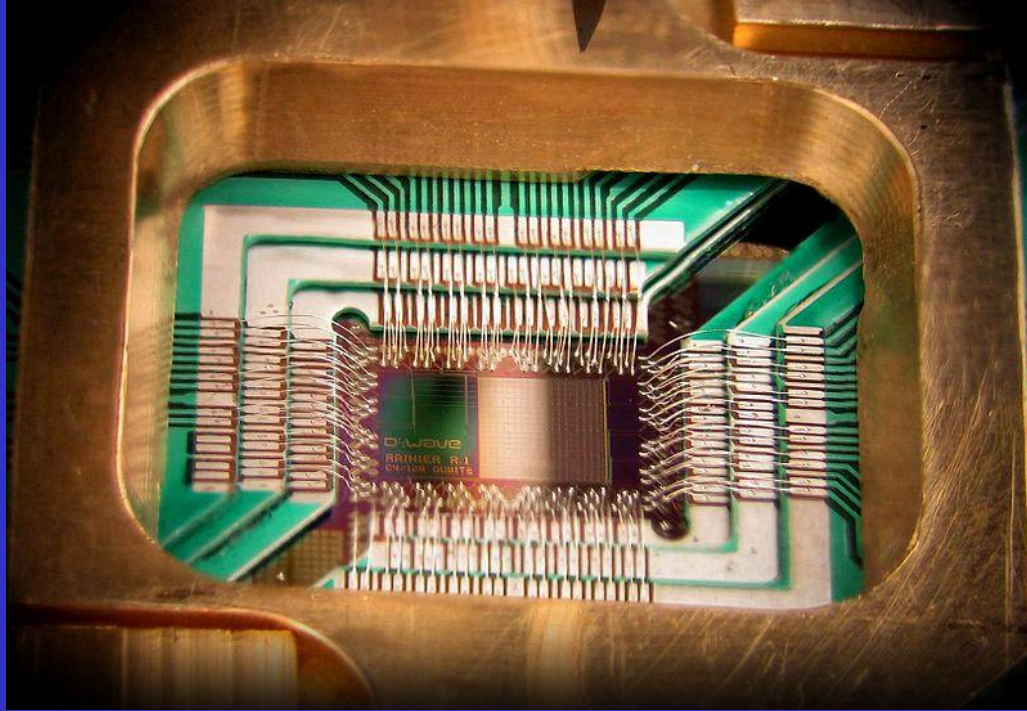


Figure 3. Blade ion trap. The blades are mounted on a sapphire holder and gold ribbons are wirebonded on top of them. The connection between the gold ribbons and the kapton wires is provided by copper pads printed on Roger 4350B PCB.

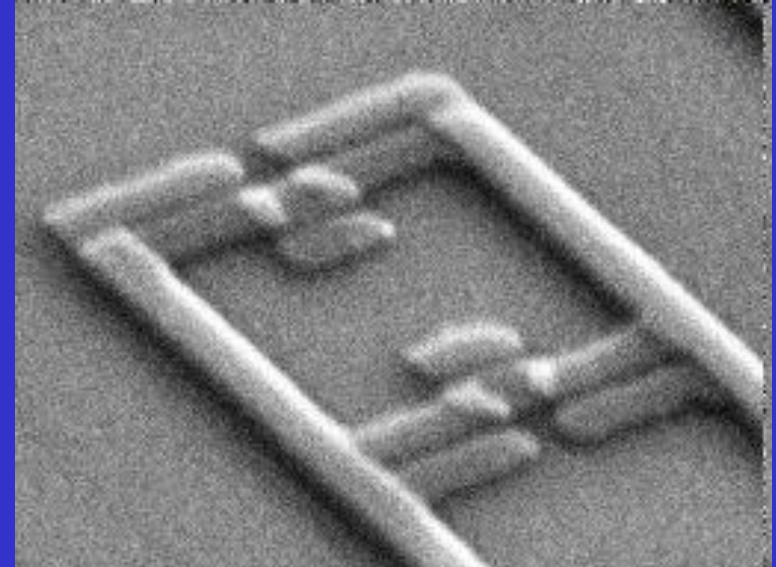


Линейная цепочка из 121 иона $^{171}\text{Yb}^+$. Слева один ион в состоянии $^2F_{7/2}$ не светится, показан стрелкой. Ион оставался в этом состоянии более 4 часов, что означает отсутствие паразитных столкновений с остаточными газами в вакуумной камере.

Сверхпроводниковые джозефсоновские кубиты



Фотография чипа компании D-Wave Systems со 128 сверхпроводниковыми кубитами, смонтированными на держателе с вводами.



Изображение сверхпроводникового потокового кубита с 4 джозефсоновскими переходами (Royal Holloway University of London)

Josephson junction: washboard potential

Dynamics of a small Josephson junction is equivalent to the motion of a particle

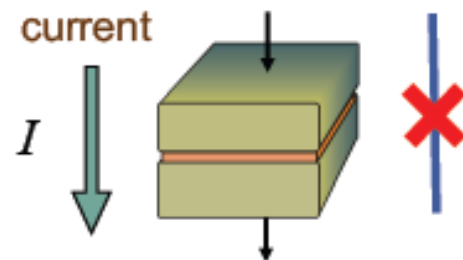
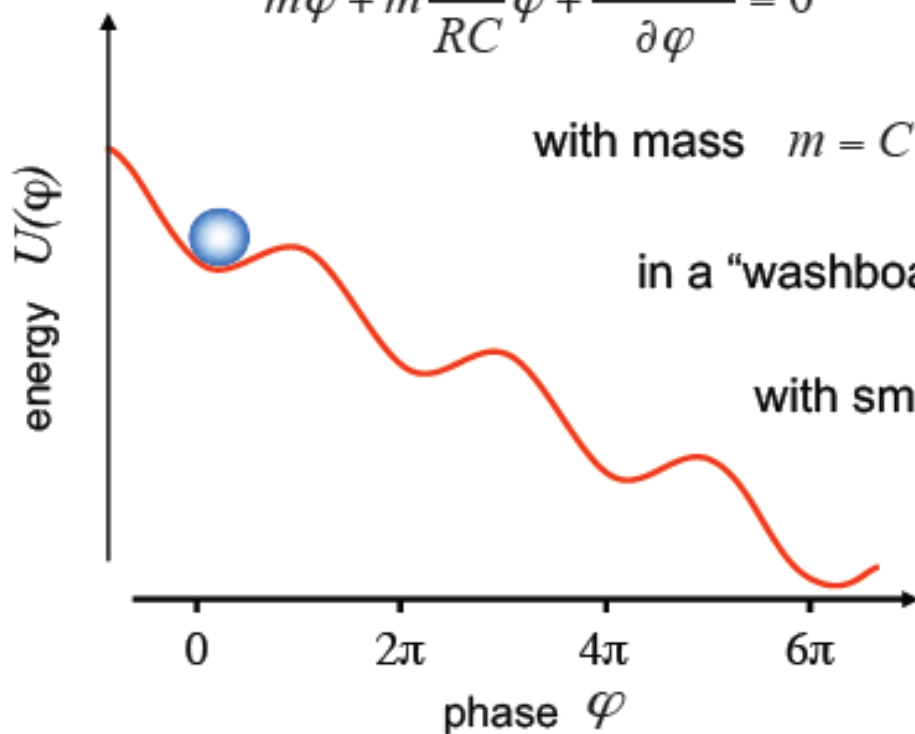
$$m\ddot{\varphi} + m\frac{1}{RC}\dot{\varphi} + \frac{\partial U(\varphi)}{\partial \varphi} = 0$$

with mass $m = C\left(\frac{\Phi_0}{2\pi}\right)^2$

in a "washboard" potential $U(\varphi) = -\frac{I_c \Phi_0}{2\pi} \left(\frac{I\varphi}{I_c} + \cos \varphi \right)$

with small-amplitude oscillation frequency

$$\omega(I) = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{I^2}{I_c^2}} \quad ; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{2\pi I_c}{\Phi_0 C_J}}$$

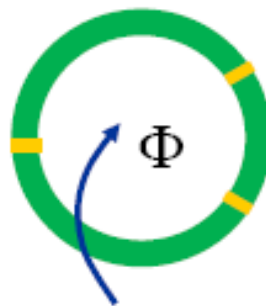


Overview of superconducting qubits

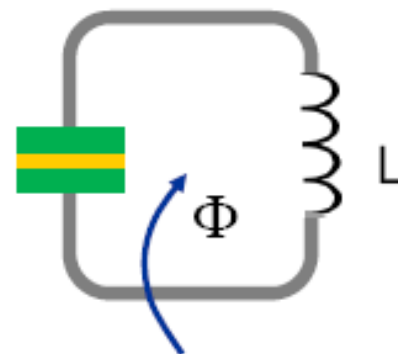
charge qubit
1999



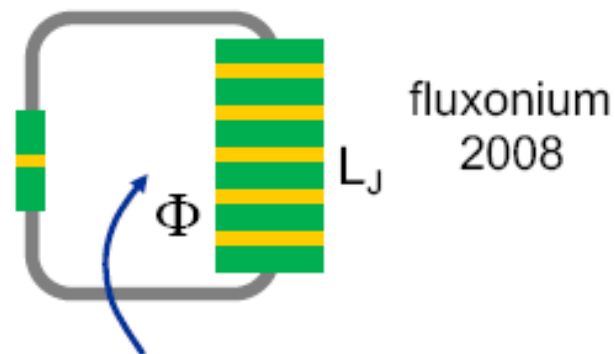
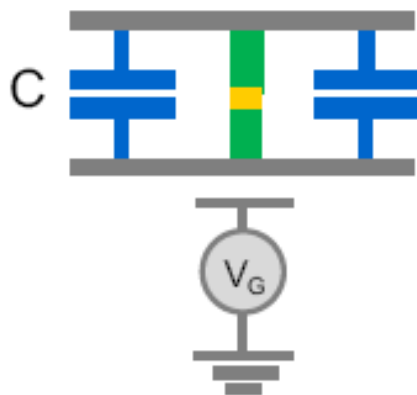
flux qubit
2000



phase qubit
2002

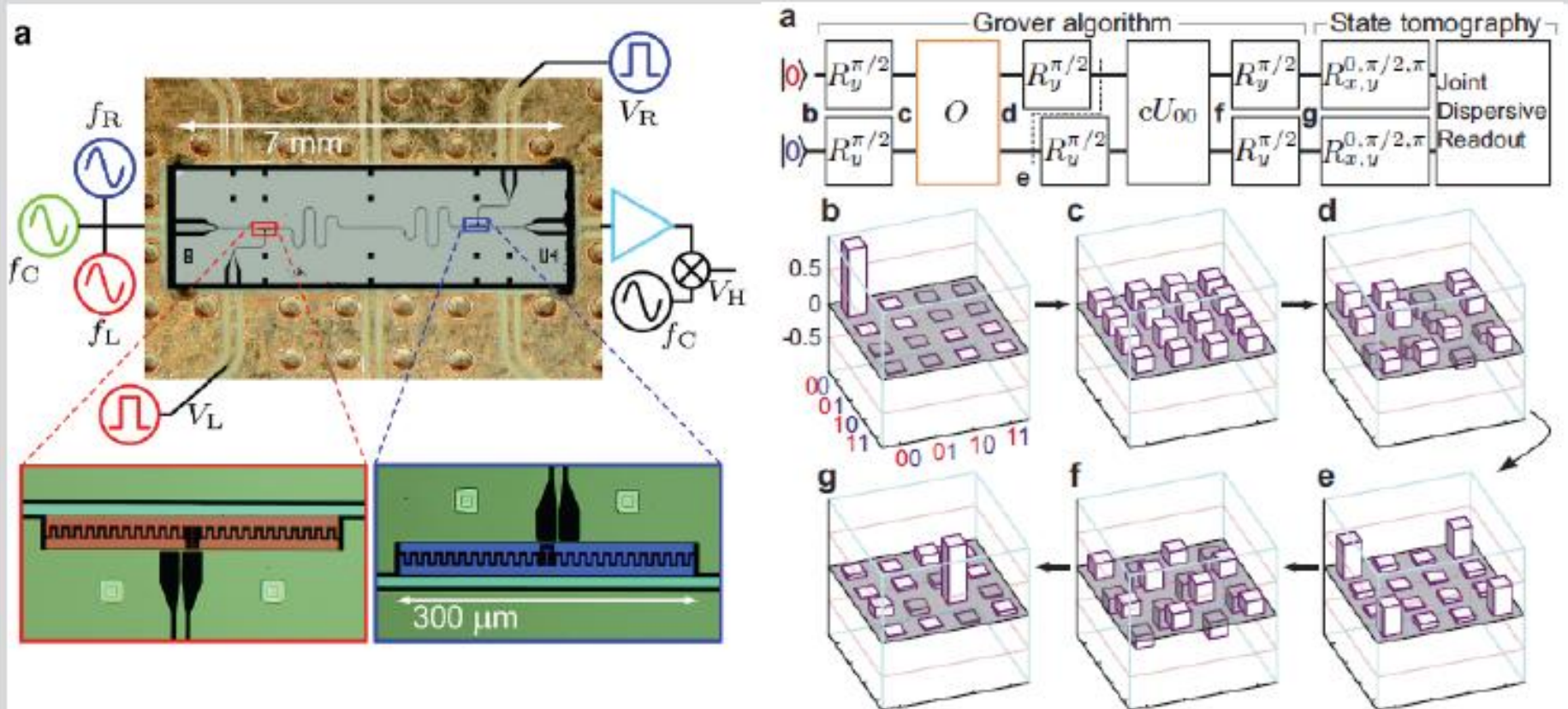


transmon
2007

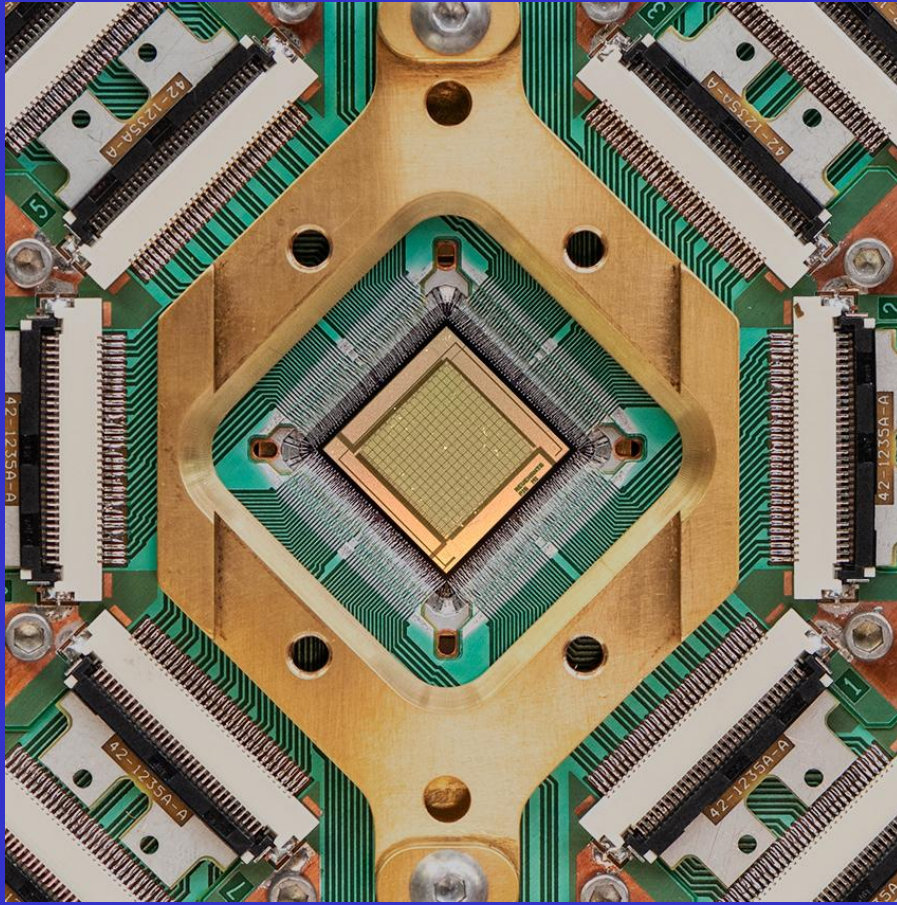


Demonstration of 2-Qubit Algorithms

L. DiCarlo et al., Nature 460, 240 (2009)

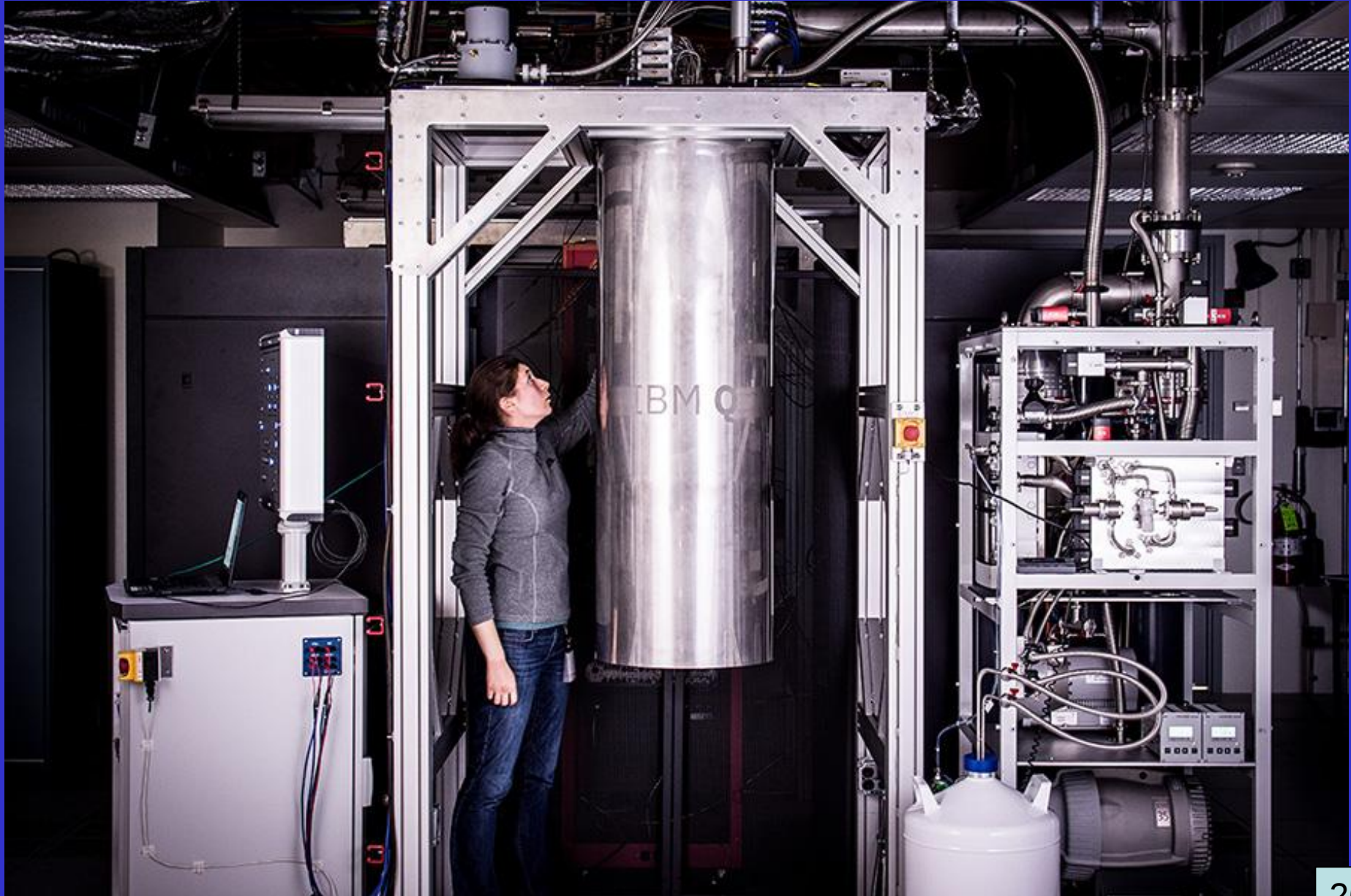


- the Grover algorithm for searching an unsorted database is demonstrated with a fidelity of 85 %.
- (b) starting state (00)
- (c) equal superposition of all 4 states
- (d) rotation of the phase of the searched state (10)
- (g) maximal amplitude of the searched state.

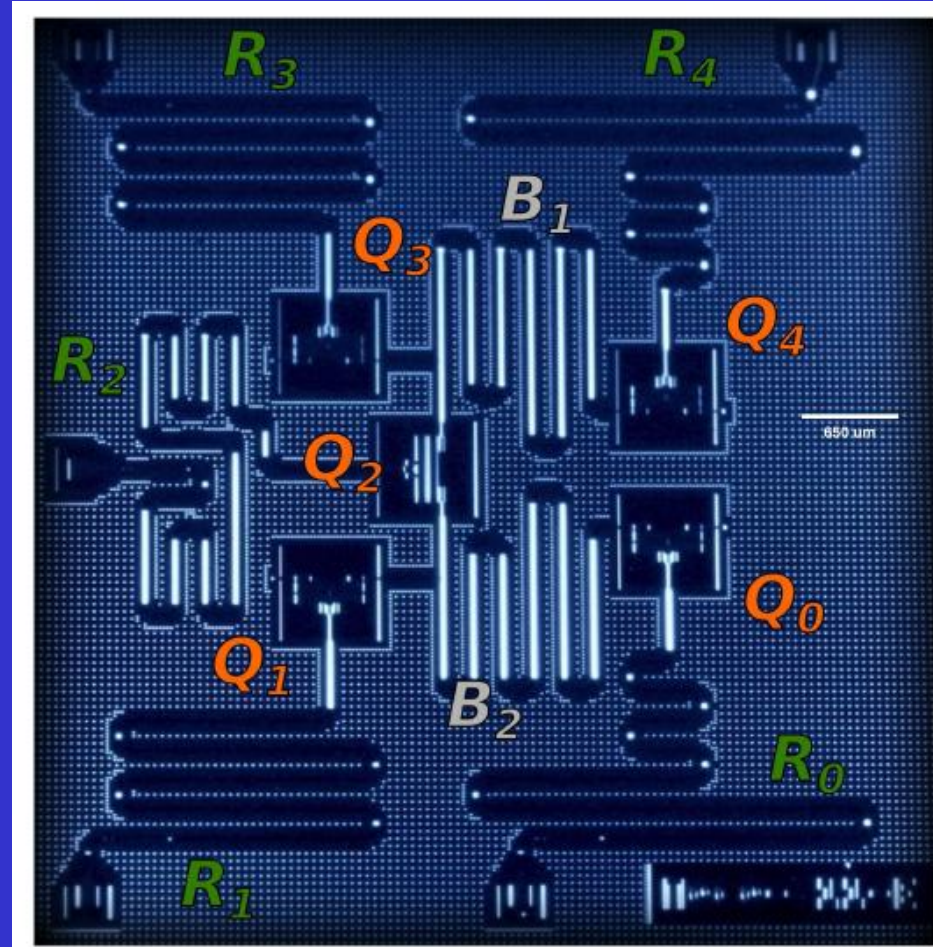
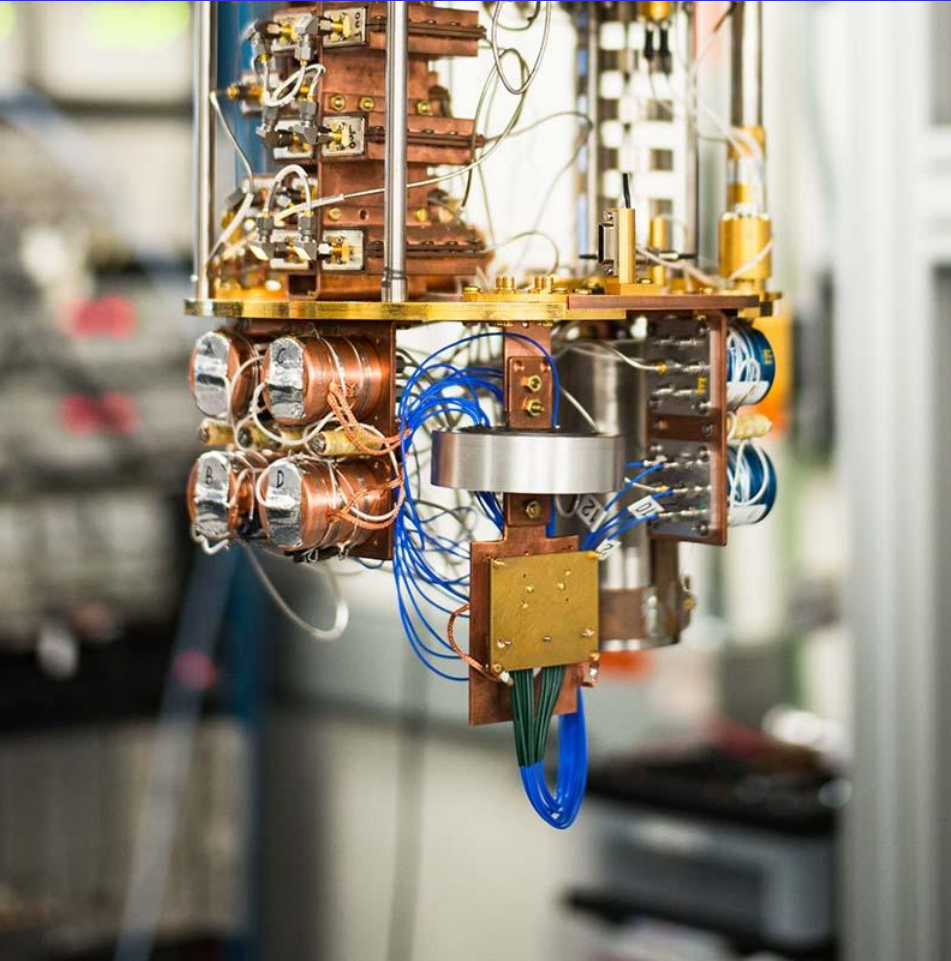


2022: 5-е поколение квантового процессора Advantage с новой архитектурой, дающей 5 000 кубитов и связанность каждого кубита с 15 соседними кубитами. Этот процессор предназначен только для **квантового отжига** (поиск основного состояния большой квантовой системы).

Сверхпроводниковый квантовый компьютер IBM Q



Сверхпроводниковый квантовый компьютер IBM с 5 кубитами



Вычисления на квантовых компьютерах IBM

Discrimination of Highly Entangled Z-states in IBM Quantum Computer

Saipriya Satyajit,¹ Karthik Srinivasan,² Bikash K. Behera,³ and Prasanta K. Panigrahi³

¹*Department of Physics, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai 400076, India*

²*Department of Physics, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600036, India*

³*Department of Physical Sciences, Indian Institute of Science Education and Research Kolkata,*

Five Experimental Tests on the 5-qubit IBM Quantum Computer

Diego García-Martín and Germán Sierra

Instituto de Física Teórica (IFT) UAM-CSIC, Universidad Autónoma de Madrid, Cantoblanco, Madrid, Spain

Experimental Demonstration of Quantum Tunneling in IBM Quantum Computer

Narendra N. Hegade¹ ¶, Bikash K. Behera² ¶, Prasanta K. Panigrahi²

¹*Department of Physics, National Institute of Technology Silchar, Silchar 788010, India*

²*Department of Physical Sciences, Indian Institute of Science Education
and Research Kolkata, Mohanpur 741246, West Bengal, India*

Decoherence of up to 8-qubit entangled states in a 16-qubit superconducting quantum processor

Asier Ozaeta^{1,*} and Peter L. McMahon^{2,3,†}

¹*QC Ware Corp., 125 University Ave., Suite 260, Palo Alto, CA 94301, USA*

²*E. L. Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305, USA*

³*QC Ware Corp., 125 University Ave., Suite 260, Palo Alto, CA 94301, USA*

(Dated: December 20, 2017)



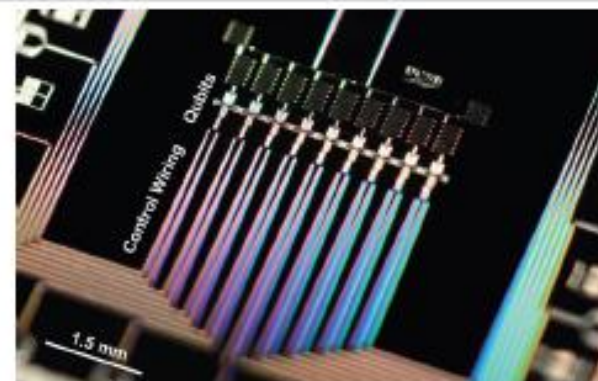
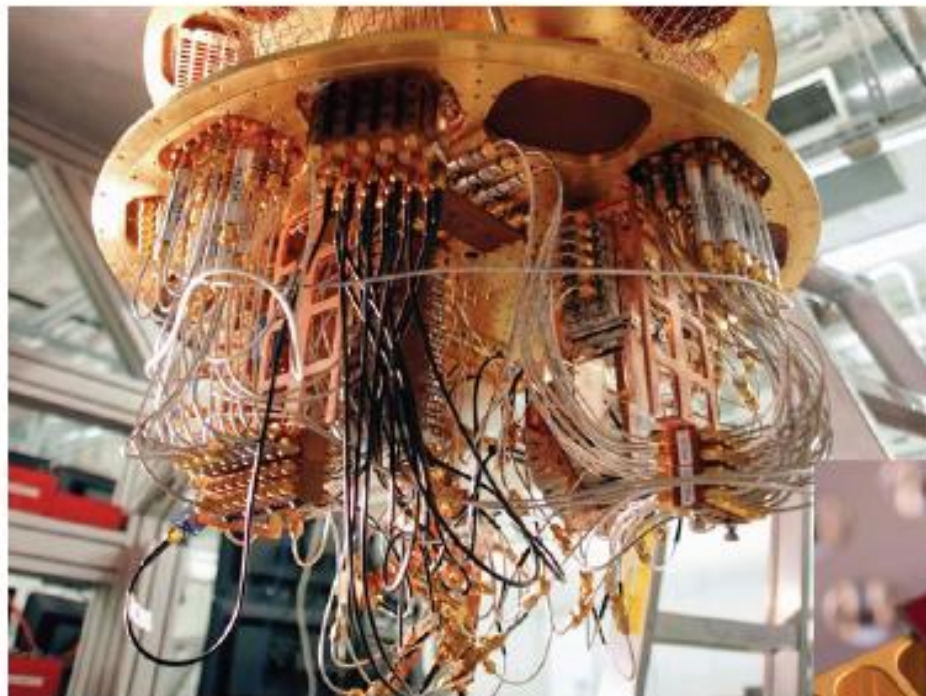
433-qubit IBM Quantum Osprey, самый большой квантовый процессор на ноябрь 2022 года.

2022: IBM Quantum computing systems. Quantum System One первая интегрированная компьютерная система для коммерческих применений. На основе процессоров Falcon с 27 трансмонными кубитами, Hummingbird с 65 кубитами и Eagle со 127 кубитами.

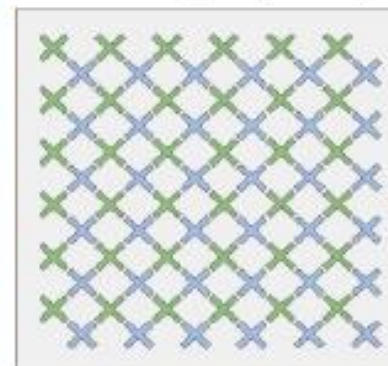
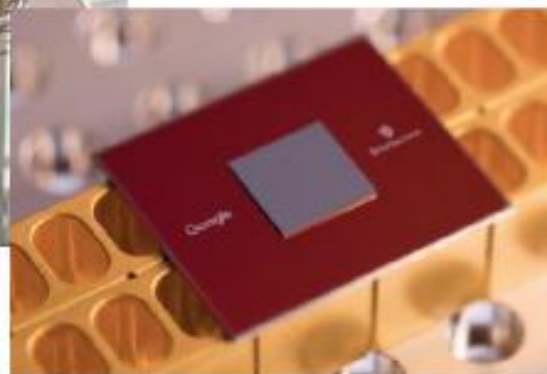


Продemonстрирована новая архитектура для трансмонов, подавляющая нежелательные связи. Используются 2 фиксированных элемента связи для настройки одетых уровней энергии. Поддерживается высокая скорость операций. Достигнуты большие времена когерентности (T_1 , $T_2 > 100$ мкс) и в 6 раз улучшена селективность адресации. Продemonстрирован вентиль CNOT за время 180 ns с точностью 99.77 %.

Проблемы: 1) требуется высокая воспроизводимость критических токов для переходов Джозефсона Al - AlO_x - Al для всех кубитов процессора; 2) избыточный шум от оксидов алюминия на поверхностях сверхпроводников; 3) сложно масштабировать к 10^3 - 10^4 кубитов.

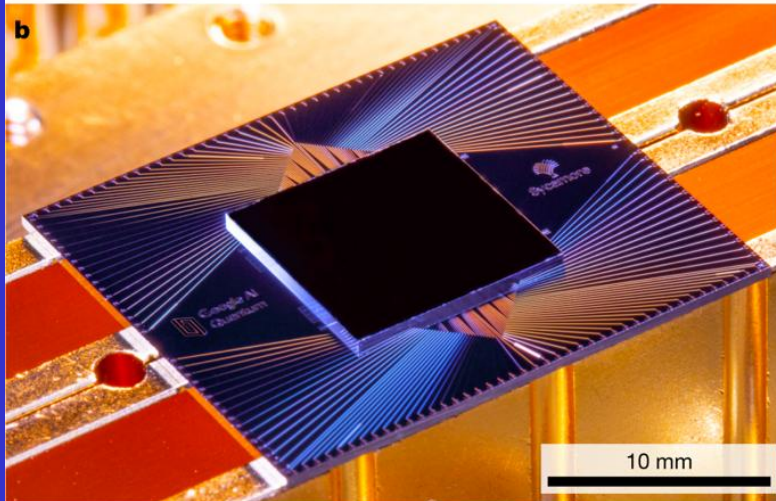
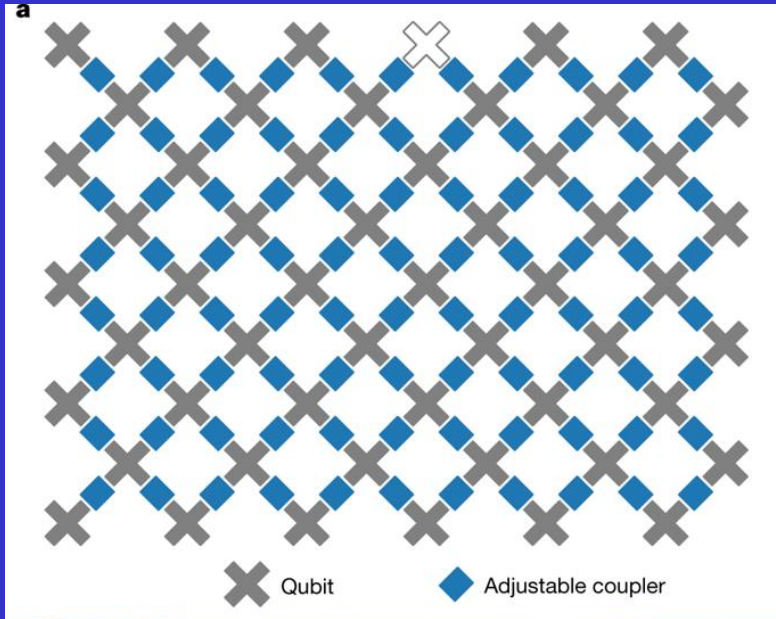


9 кубитов Google (2015)

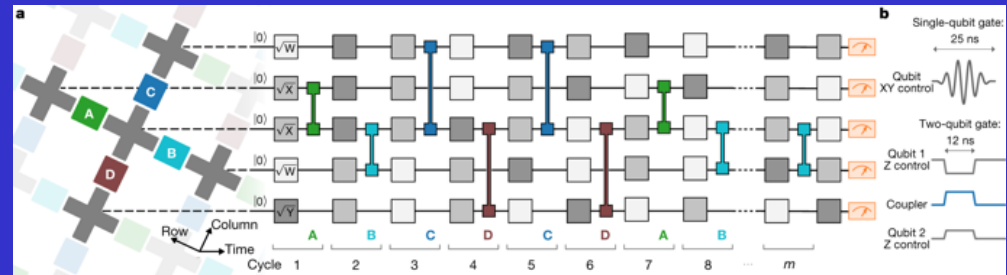


72 кубита Google (2018)

Google: квантовый процессор на 72 кубитах (5.3.2018).
Цель - продемонстрировать „quantum supremacy”.



a, Процессор на основе квадратных ячеек с 54 кубитами), каждый связан с 4 ближайшими соседями. Есть один неработающий кубит. **b**, Фотография процессора Sycamore.

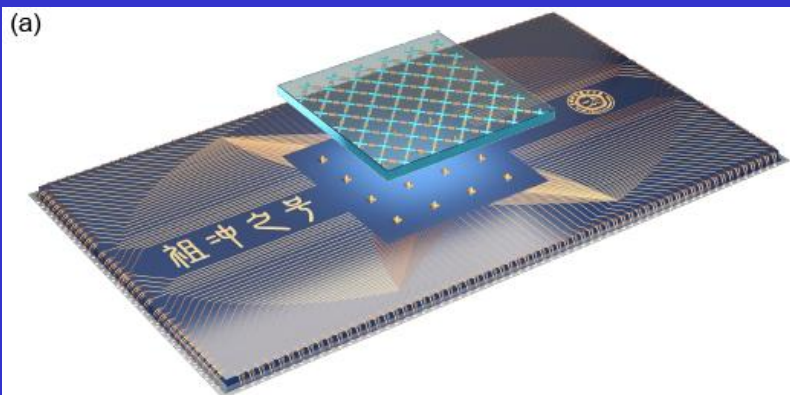


Реализован алгоритм, полезный для генерации случайных чисел. Усреднение по многим реализациям дало распределение вероятностей. Расчеты заняли 200 секунд на реализацию случайных квантовых цепочек 1000000 раз, эквивалентная задача на лучших суперкомпьютерах заняла бы 10 000 лет.

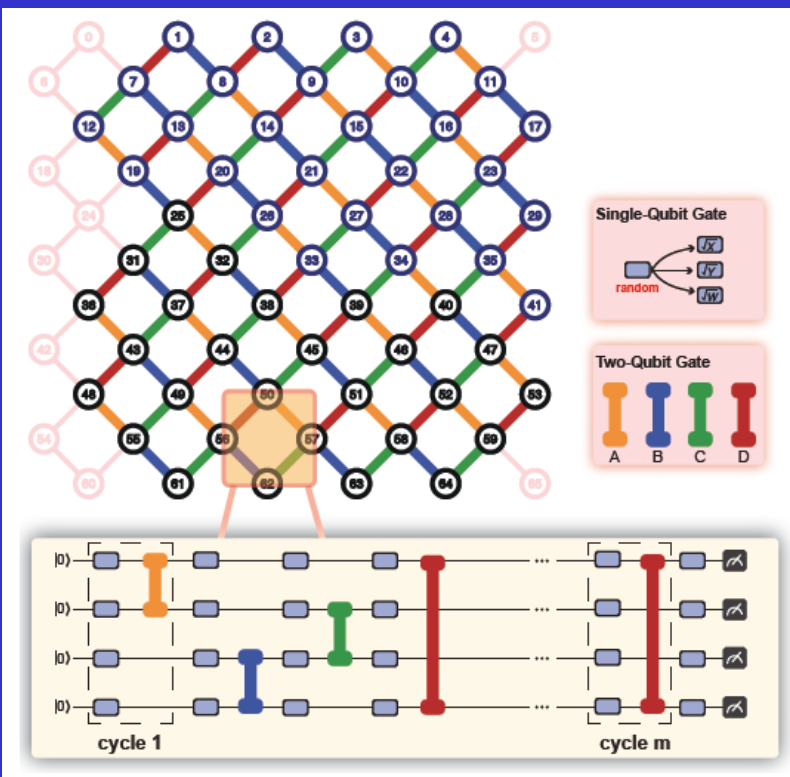
Последствие Quantum Supremacy - обвал курса биткойна



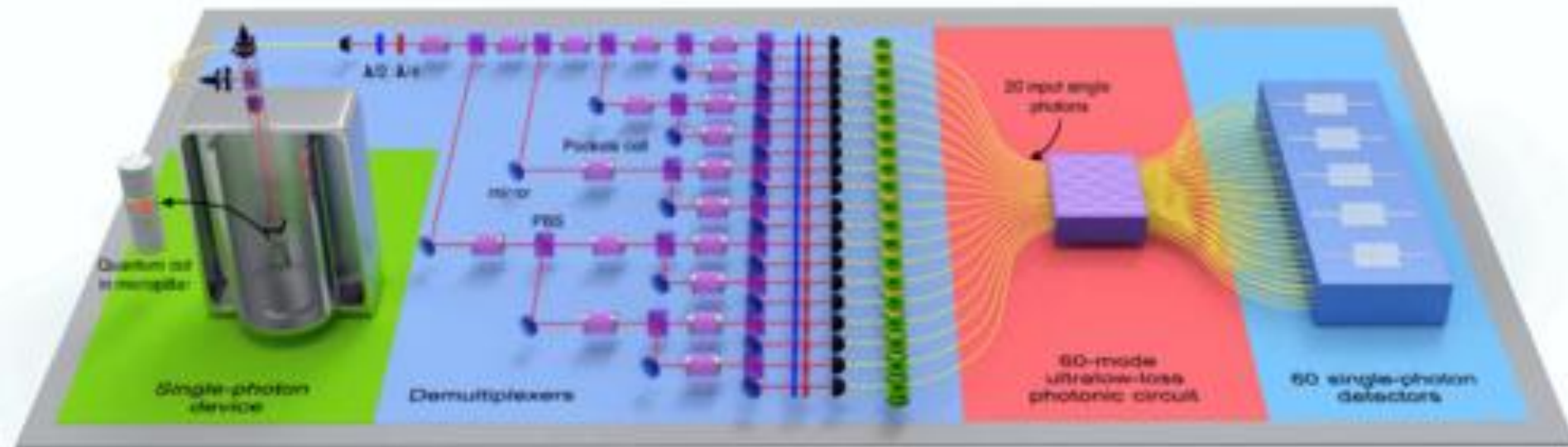
Figure 1: *The price of bitcoin in USD in a period of 4 weeks around 9/23/2019. Source: CoinDesk*



(a) Zuchongzhi quantum processor на двух сапфировых подложках. Одна содержит 66 кубитов и 110 соединений, каждый кубит связан с 4 соседними кубитами, кроме границ. Другая содержит компоненты считывания и управления. Две подложки соединены индиевыми столбиками
(b) 56-кубитные случайные цепочки операций.



Случайные квантовые цепочки реализованы для 56 кубитов в 20 циклах. Расчетные затраты для реализации этой задачи на классических компьютерах на 2-3 порядка выше, чем для эксперимента Google с 53-кубитовым процессором Sycamore. Задача решена за 1,2 часа. На самом мощном суперкомпьютере потребовалось бы 8 лет.

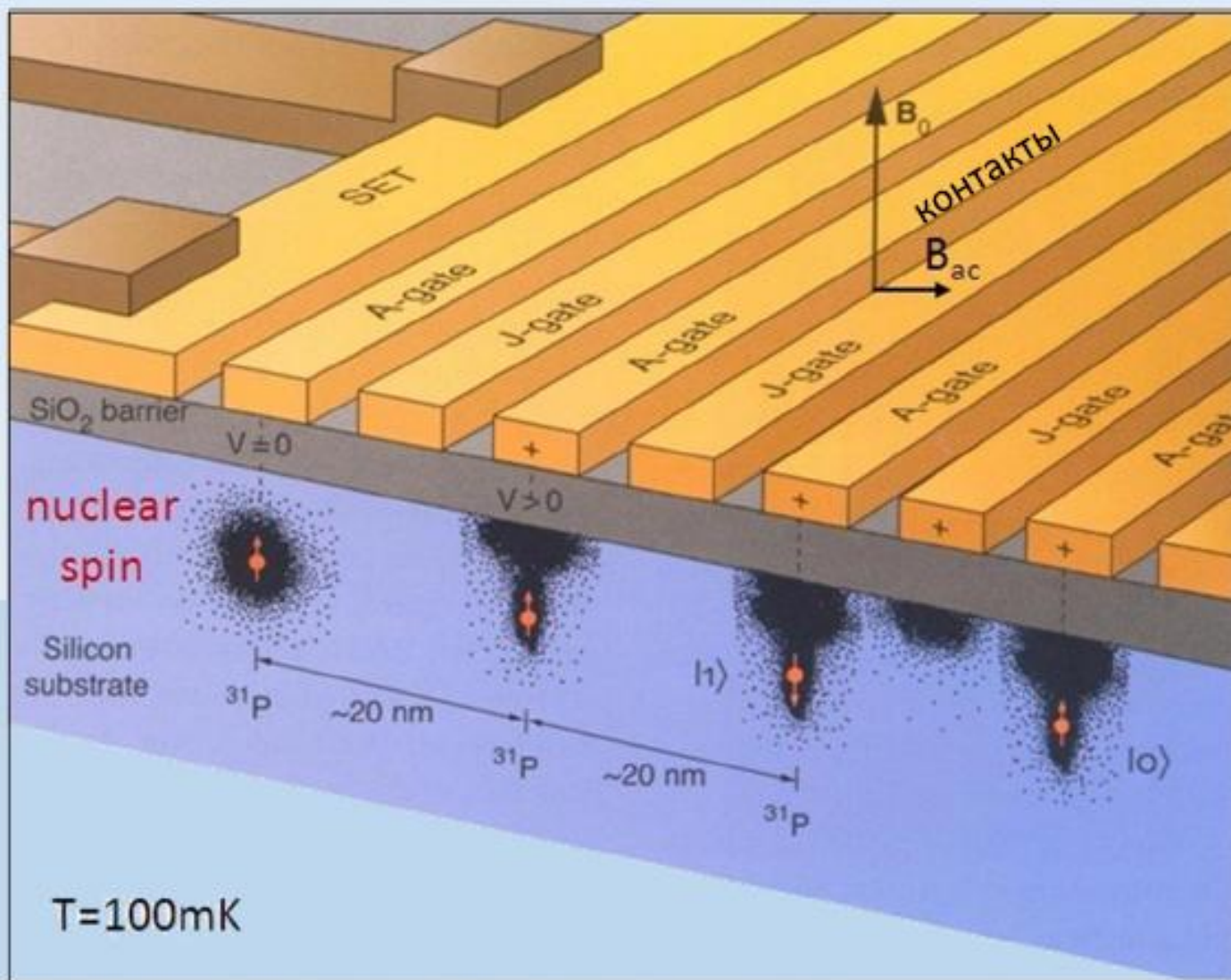


Эксперимент по бозонному сэмплингу с одиночными фотонами. Однофотонный излучатель на квантовых точках InAs/GaAs создает последовательность одиночных фотонов. Через линии задержки они распределяются на входы 20 интерферометров одновременно. Выходные фотоны детектируются 60 сверхпроводниковыми детекторами с эффективностью 0,6-0,8. На выходе зарегистрировано до 14 фотонов одновременно, что соответствует гильбертову пространству размерностью до 3.7×10^{14} . Это на 10 порядков больше, чем во всех предыдущих экспериментах. На классических компьютерах такое реализовать невозможно.



Эксперимент с 50 неразличимыми входными фотонами, направленными на 100 связанных интерферометров, с последующей регистрацией на 100 сверхпроводниковых детекторах. Наблюдалось до 76 выходных фотонов, которые дают гильбертово пространство размерностью $\sim 10^{30}$ и скорость сэмпинга в $\sim 10^{14}$ больше, чем могут дать современные суперкомпьютеры.

Кубиты на адатомах фосфора в кремниевых структурах



B.E. Kane, A silicon-based nuclear spin quantum computer, *Nature* **393**, 133 (1998)

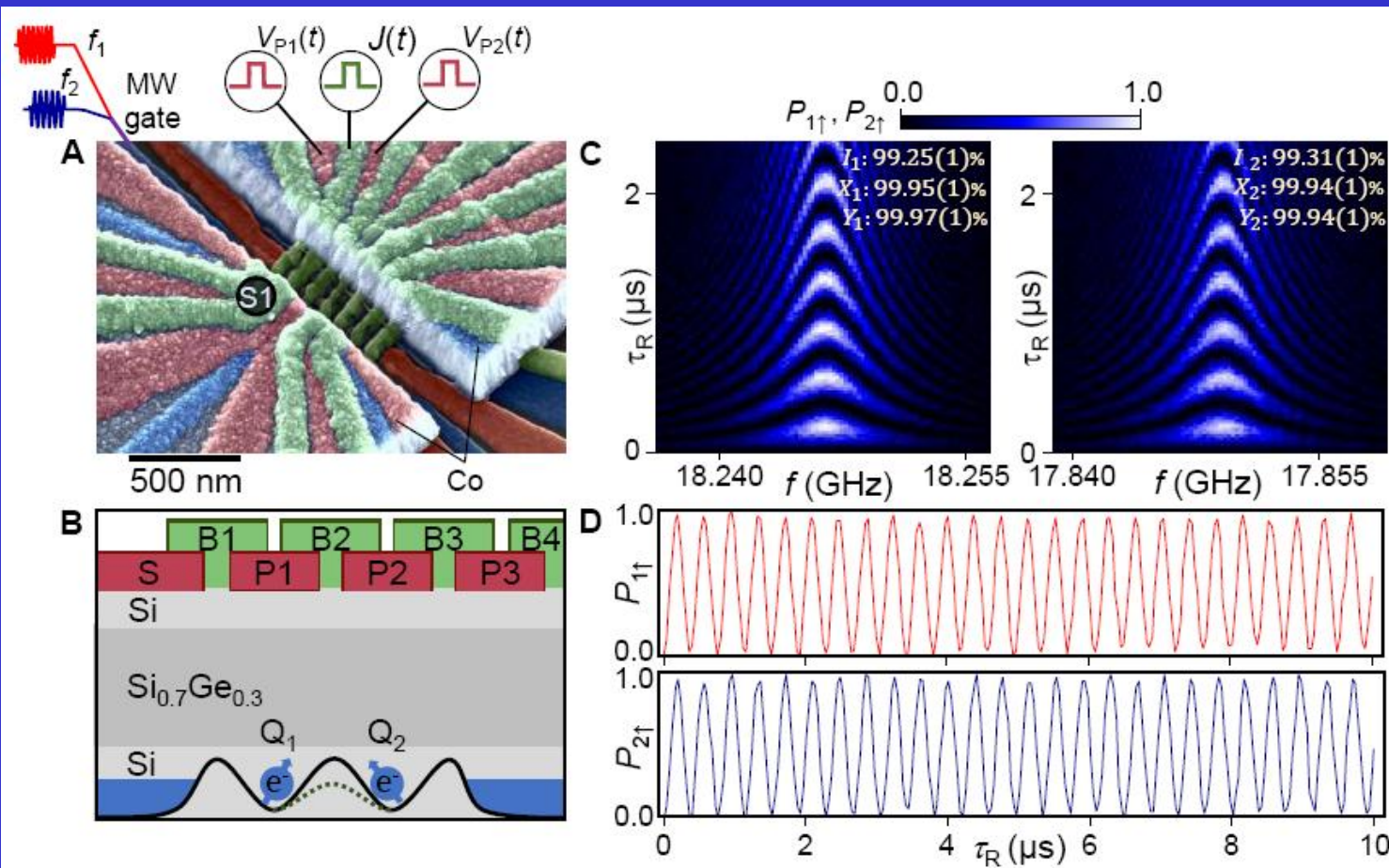
Кубиты на квантовых точках в полупроводниках

Two-qubit silicon quantum processor with operation fidelity exceeding 99%

A. R. Mills,¹ C. R. Guinn,¹ M. J. Gullans,^{1,*} A. J. Sigillito,^{1,†} M. M. Feldman,¹ E. Nielsen,² and J. R. Petta¹

¹Department of Physics, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544, USA

²Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185, USA arXiv:2111.11937



В изотопически чистой ^{28}Si подложке созданы два кубита Si/SiGe в градиенте магнитного поля. Продемонстрированы приготовление и считывание с точностью 97%, а также одно- и двухкубитовые операции с точностью 99%.

Кубиты на квантовых точках в полупроводниках

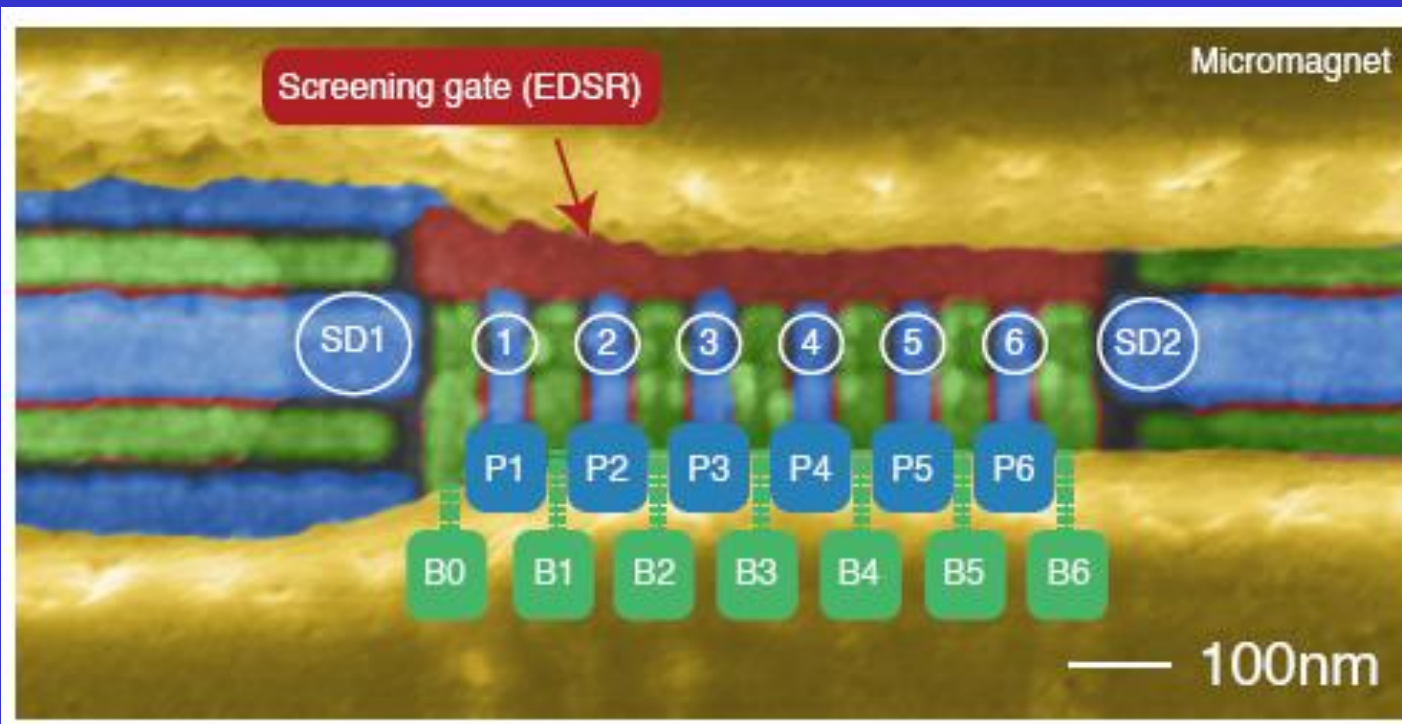
Universal control of a six-qubit quantum processor in silicon

arXiv:2202.09252

Stephan G.J. Philips^{*1}, Mateusz T. Mądzik^{*1}, Sergey V. Amitonov¹, Sander L. de Snoo¹, Maximilian Russ¹, Nima Kalhor¹, Christian Volk¹, William I.L. Lawrie¹, Delphine Brousse², Larysa Tryputen², Brian Paquelet Wuetz¹, Amir Sammak², Menno Veldhorst¹, Giordano Scappucci¹, and Lieven M.K. Vandersypen^{† 1}

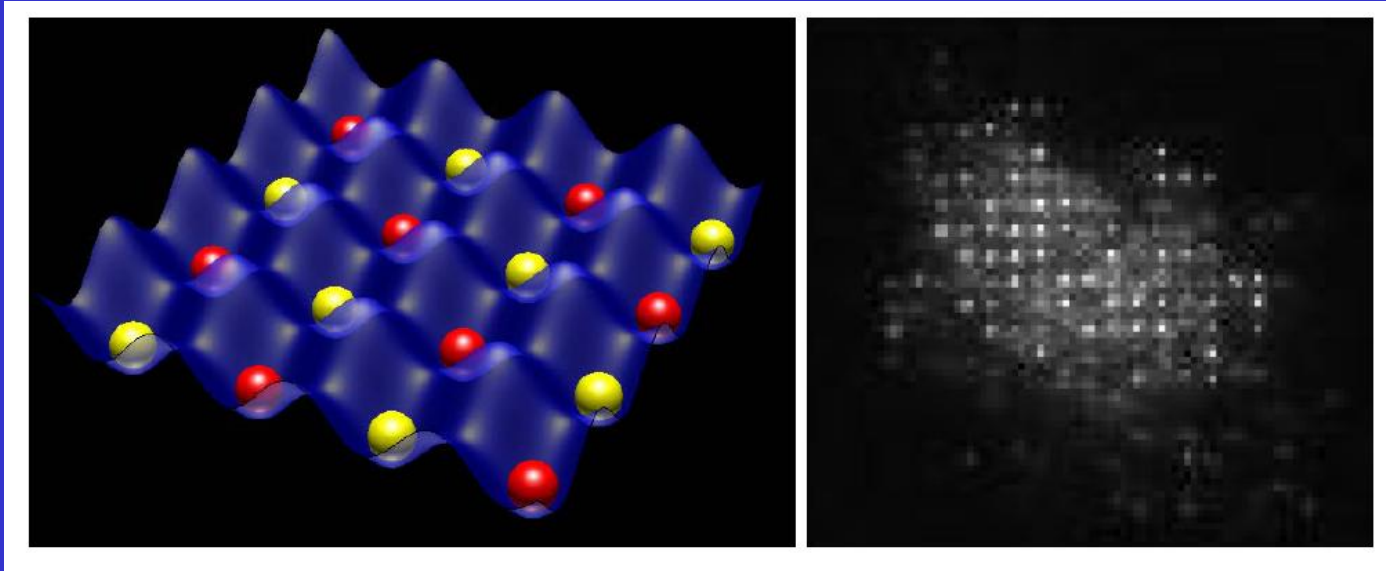
¹QuTech and the Kavli Institute of Nanoscience, Delft University of Technology, 2600 GA Delft, The Netherlands.

²QuTech and Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), Delft, The Netherlands.



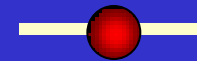
6-кубитовый массив в изотопически чистом ^{28}Si с квантовыми ямами $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ и двумя считывающими квантовыми точками. Точность инициализации **93.5-98%**. Точность однокубитовых операций **99.77-99.96%**, точность двухкубитовых операций **88-96%**.

Кубиты квантового компьютера - одиночные нейтральные атомы в оптических ловушках



Уровни кубита -
сверхтонкая структура
нейтрального атома в
основном состоянии

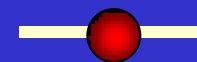
6,8 ГГц



$F=2$

$5S_{1/2}$

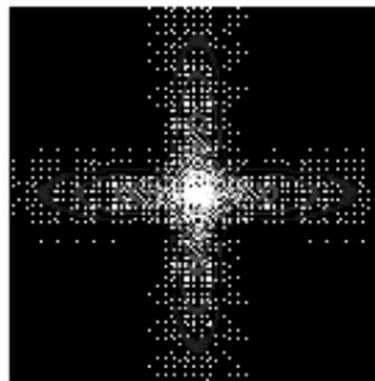
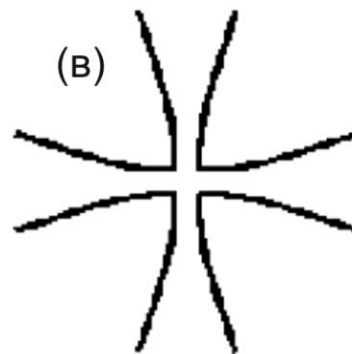
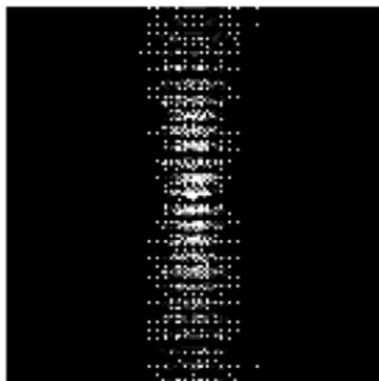
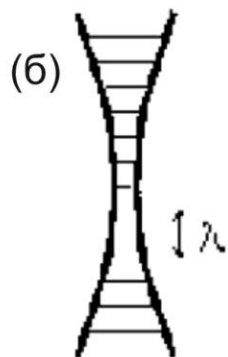
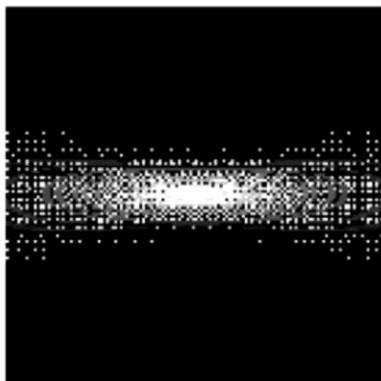
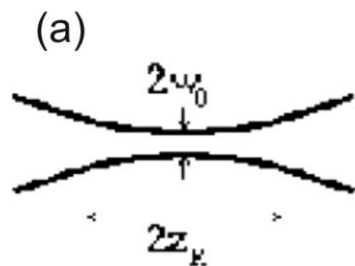
^{87}Rb



$F=1$

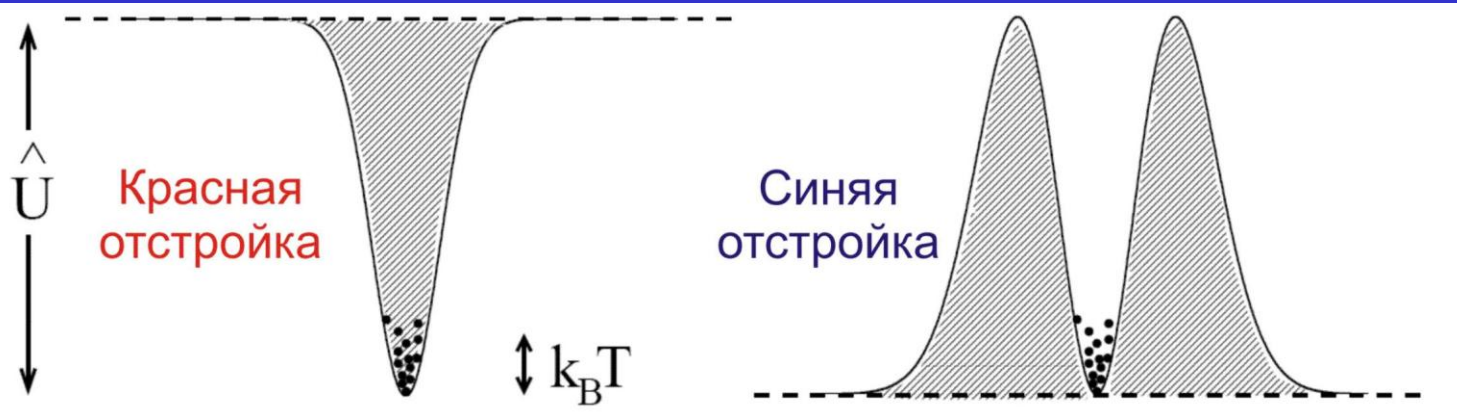
Удовлетворяют критериям DiVincenzo для кубитов
квантового компьютера

Оптические дипольные ловушки и решетки



*Потенциал атома
в световом поле:*

$$U_{dip}(\mathbf{r}) = \pm \frac{3\pi c^2}{2\omega_0^3} \left(\frac{\Gamma}{\Delta} \right) I(\mathbf{r})$$



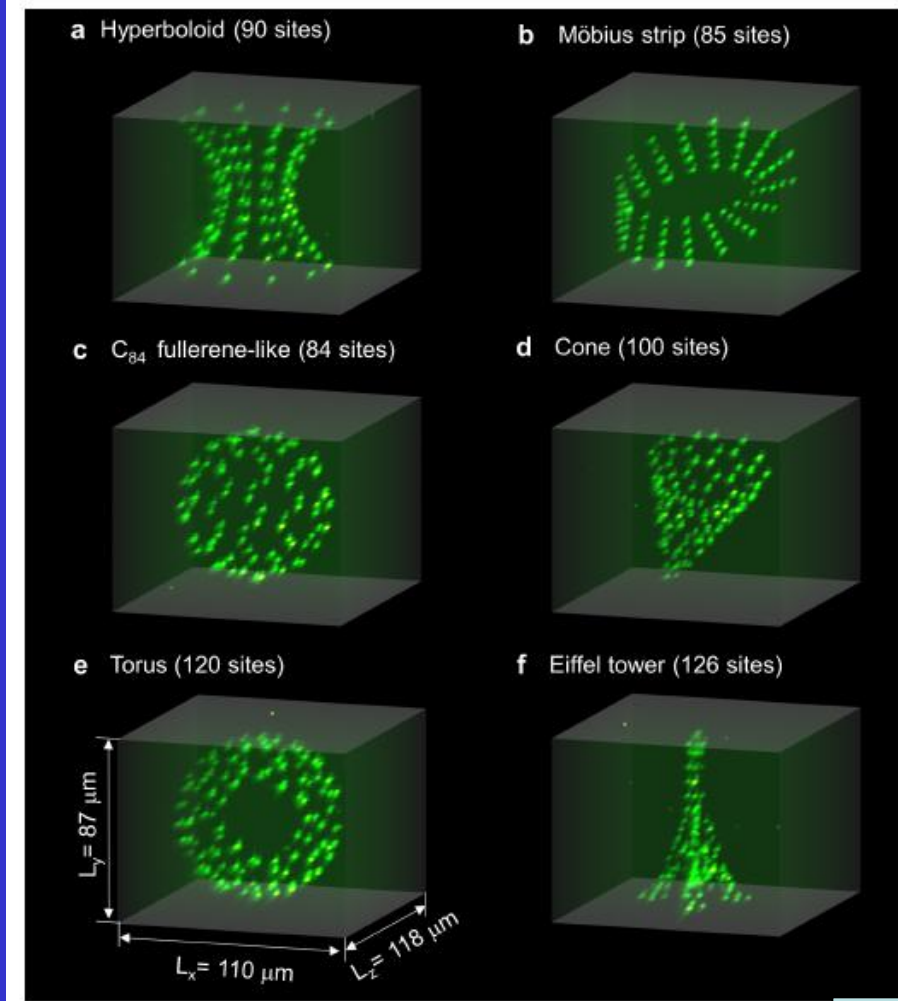
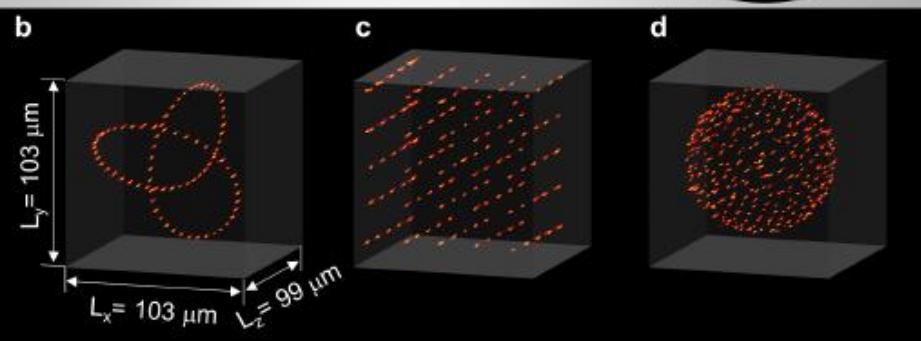
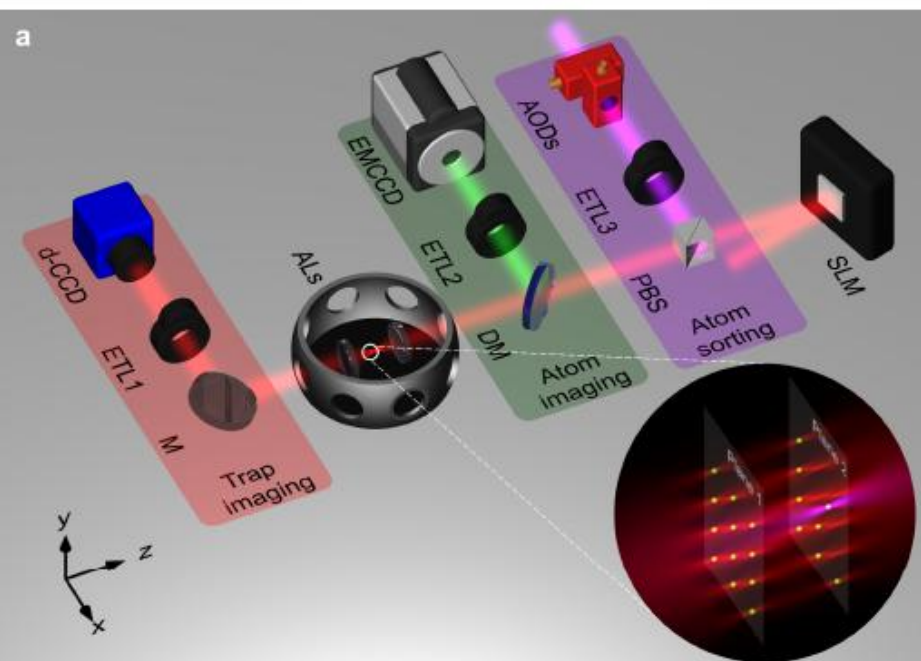
Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom

Daniel Barredo*, Vincent Lienhard*, Sylvain de Léséleuc*, Thierry Lahaye, and Antoine Browaeys

Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School, CNRS,

Université Paris-Saclay, F-91127 Palaiseau Cedex, France

(Dated: December 8, 2017)

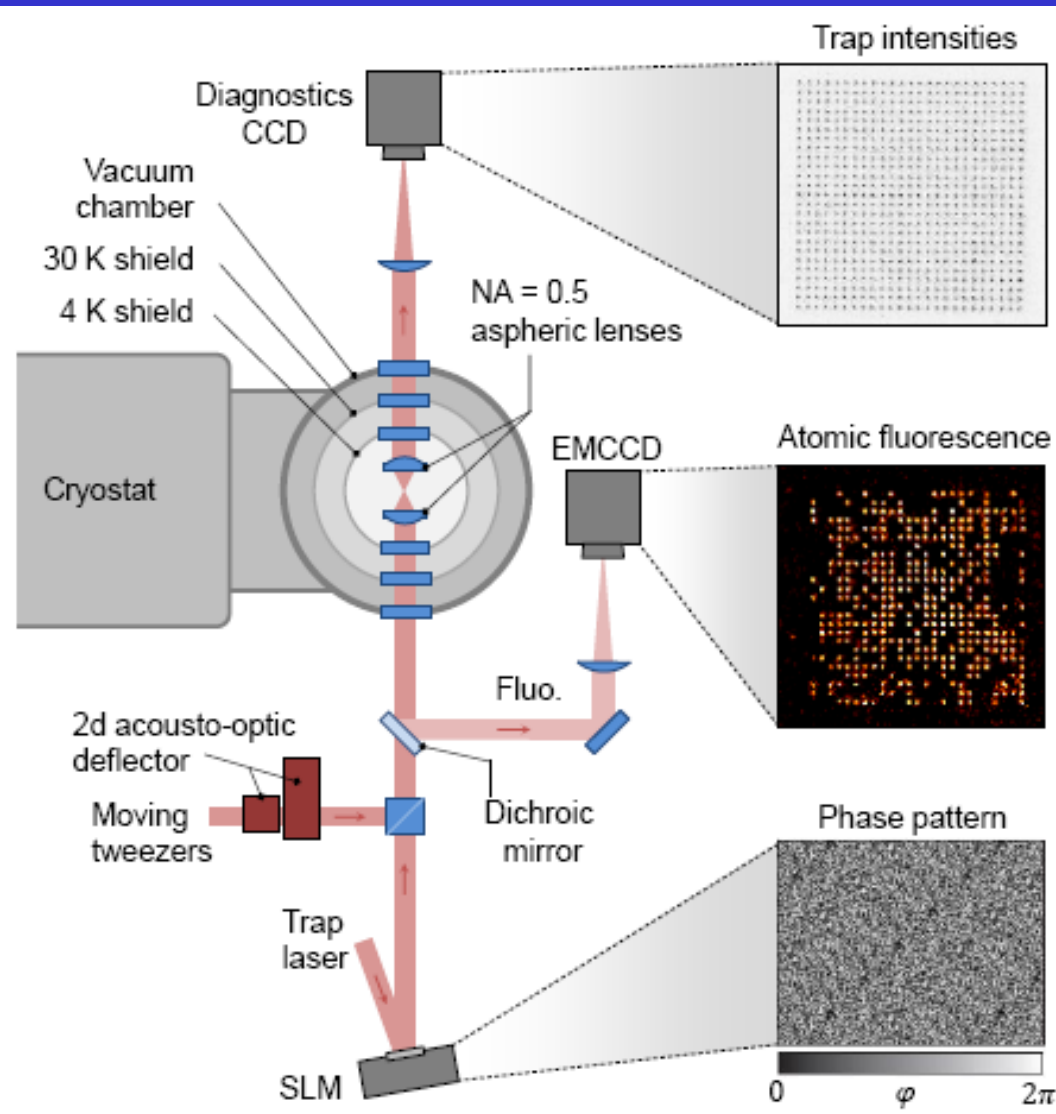


In-situ equalization of single-atom loading in large-scale optical tweezers arrays

Kai-Niklas Schymik,¹ Bruno Ximenez,² Etienne Bloch,² Davide Dreon,² Adrien Signoles,²
Florence Nogrette,¹ Daniel Barredo,^{1,3} Antoine Browaeys,¹ and Thierry Lahaye¹

¹Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School,
CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau Cedex, France

Phys. Rev. A
106, 022611
(2022)



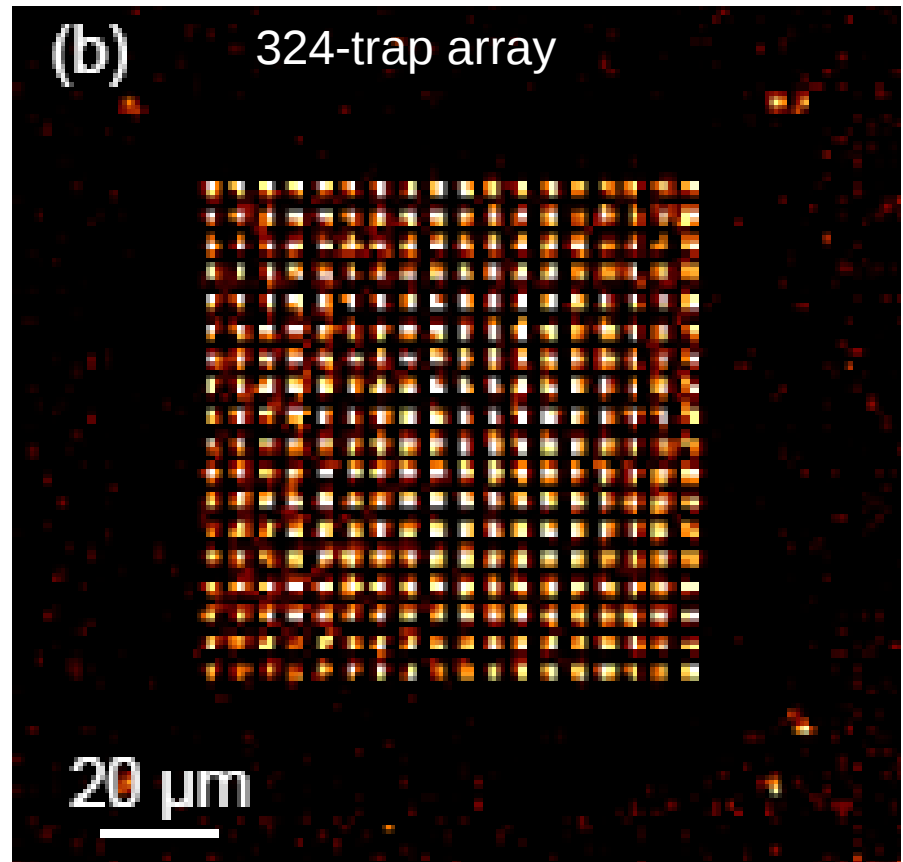
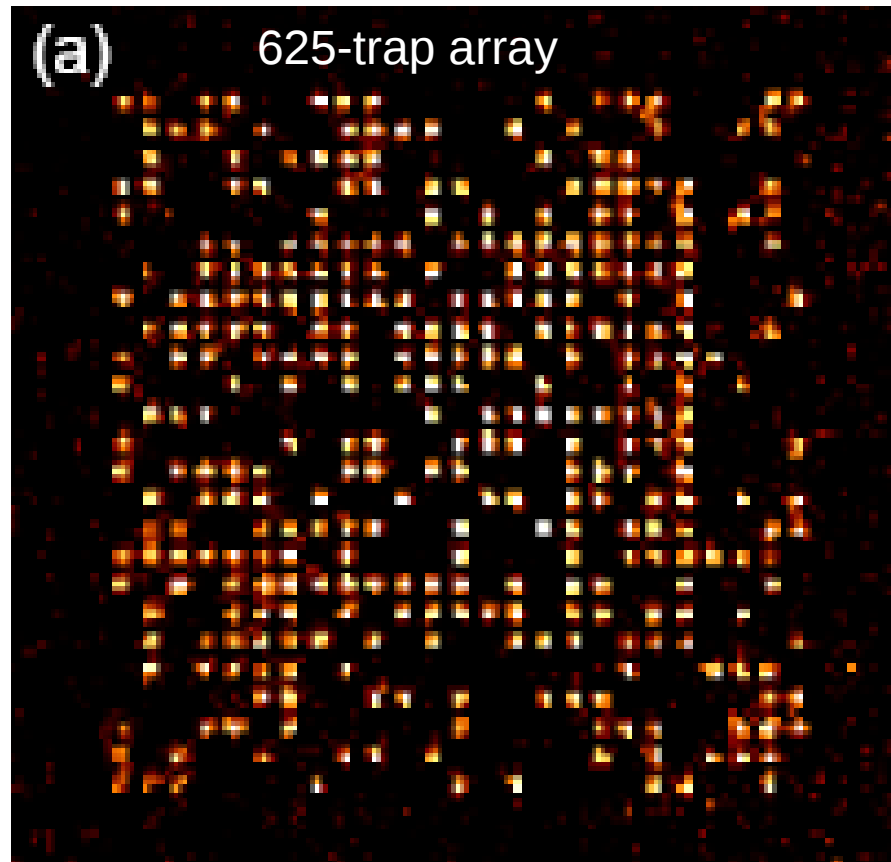
Реализован массив из более 300 одиночных атомов ^{87}Rb в оптических дипольных ловушках (пинцетах) и криогенном окружении при $T=4$ К. Для 324 атомов сборка массива дает полное отсутствие дефектов в ~37% случаев.

In-situ equalization of single-atom loading in large-scale optical tweezers arrays

Kai-Niklas Schymik,¹ Bruno Ximenez,² Etienne Bloch,² Davide Dreon,² Adrien Signoles,²
Florence Nogrette,¹ Daniel Barredo,^{1,3} Antoine Browaeys,¹ and Thierry Lahaye¹

¹*Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School,
CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau Cedex, France*

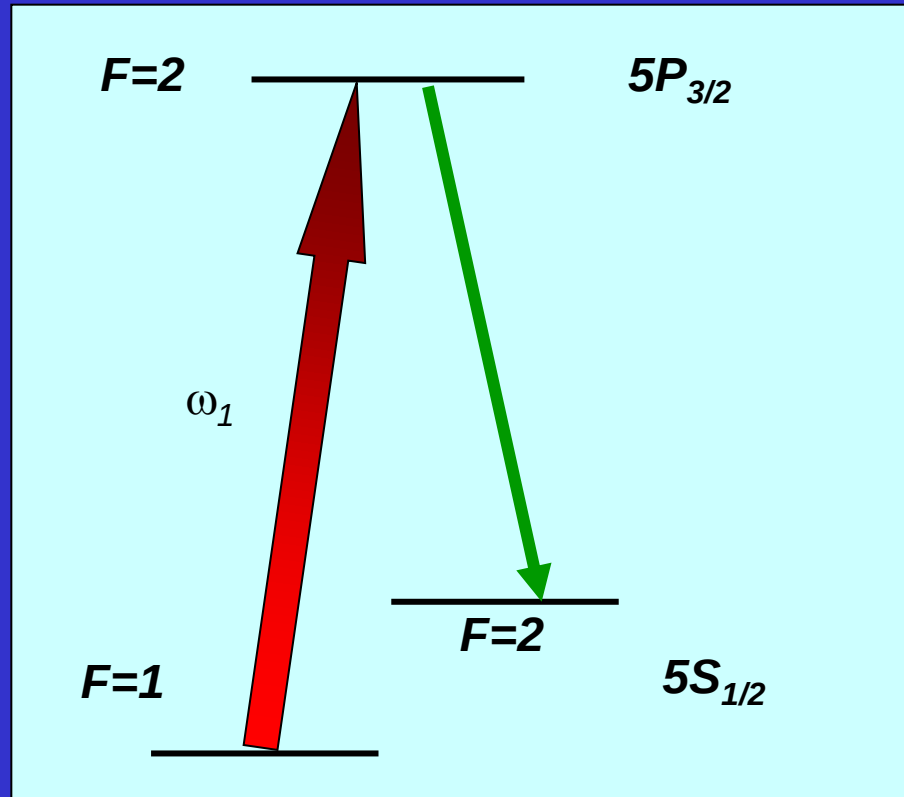
Phys. Rev. A
106, 022611
(2022)



Инициализация состояний кубитов на атомах ^{87}Rb



Оптическая накачка

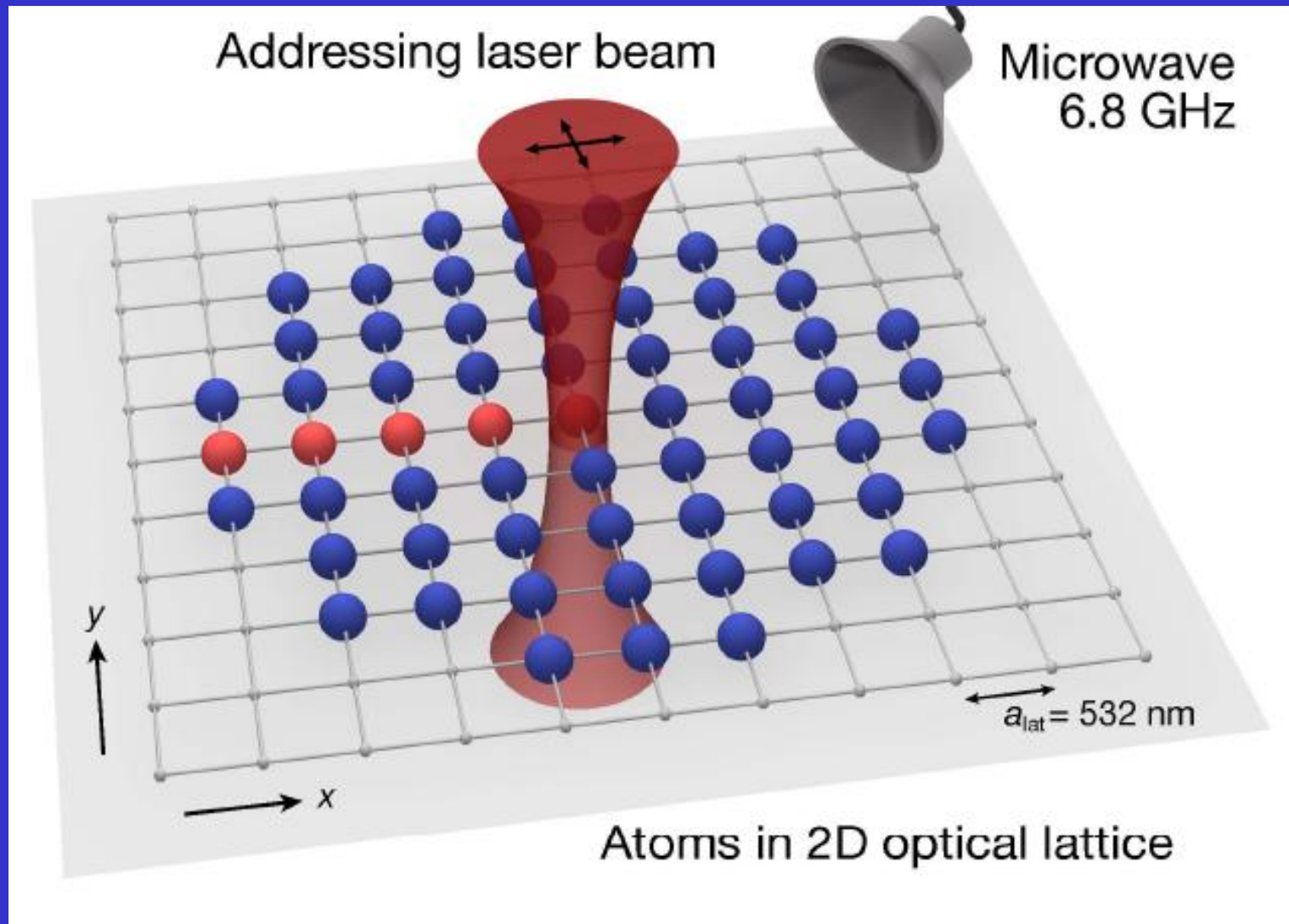


A. Kastler, Нобелевская премия, 1966 г.

Single-spin addressing in an atomic Mott insulator

17 MARCH 2011 | VOL 471 | NATURE | 319

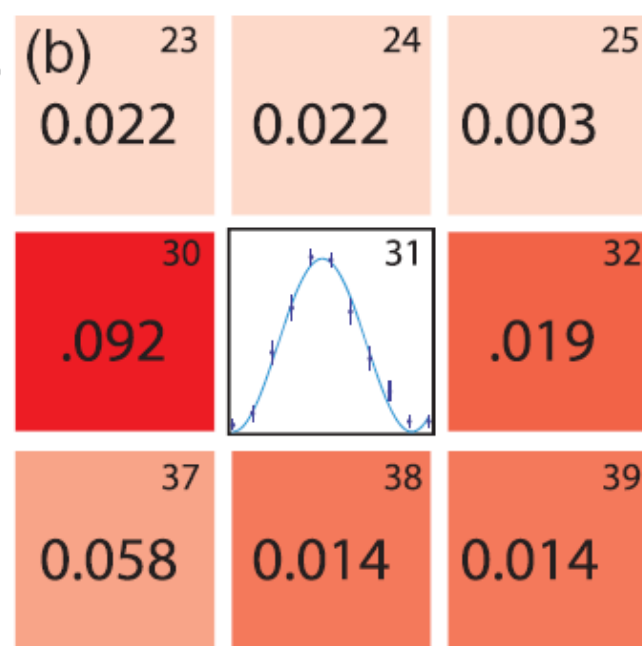
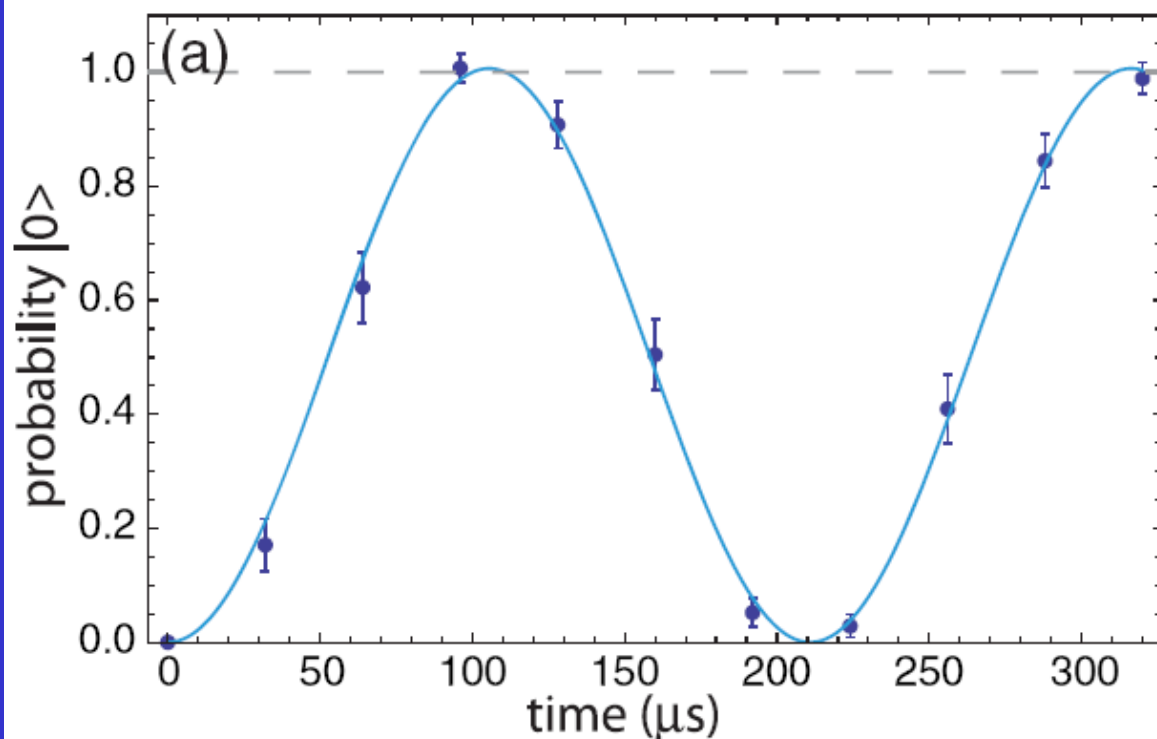
Christof Weitenberg¹, Manuel Endres¹, Jacob F. Sherson^{1†}, Marc Cheneau¹, Peter Schauß¹, Takeshi Fukuhara¹, Immanuel Bloch^{1,2} & Stefan Kuhr¹





Randomized Benchmarking of Single-Qubit Gates in a 2D Array of Neutral-Atom Qubits

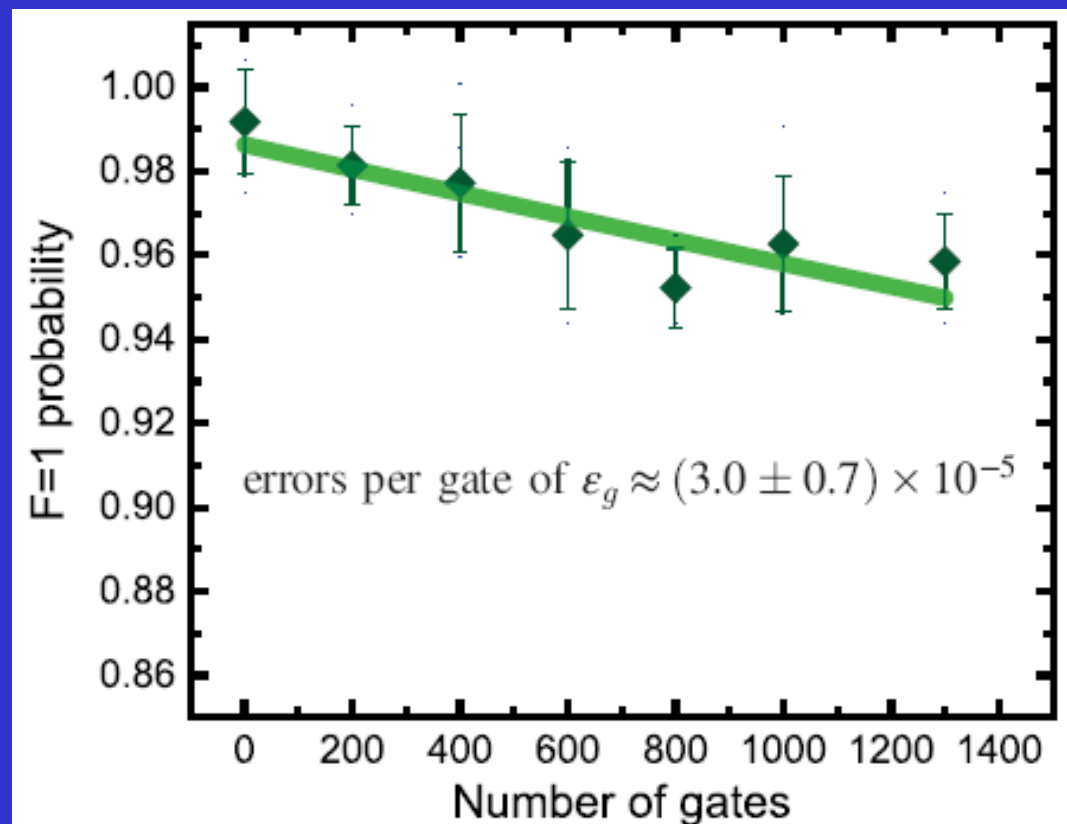
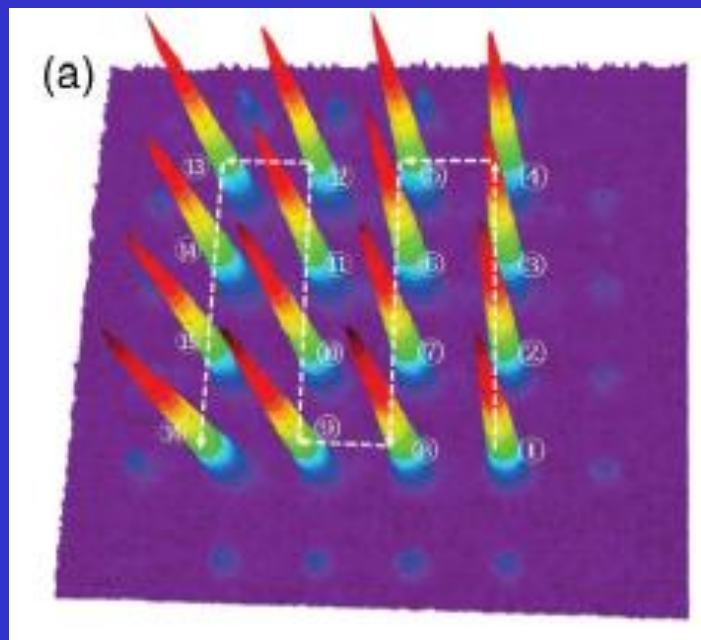
T. Xia, M. Lichtman, K. Maller, A. W. Carr, M. J. Piotrowicz, L. Isenhower, and M. Saffman



Адресация узлов сфокусированным лучом 459 нм, световой сдвиг 33 кГц. Для одной ловушки средняя точность с адресацией $F = 0,9923$, но crosstalk 1-5%. Основные источники ошибок - конечная температура атомов (5-10 мкК), шумы магнитного поля и перекачка населенности при измерении выталкиванием.

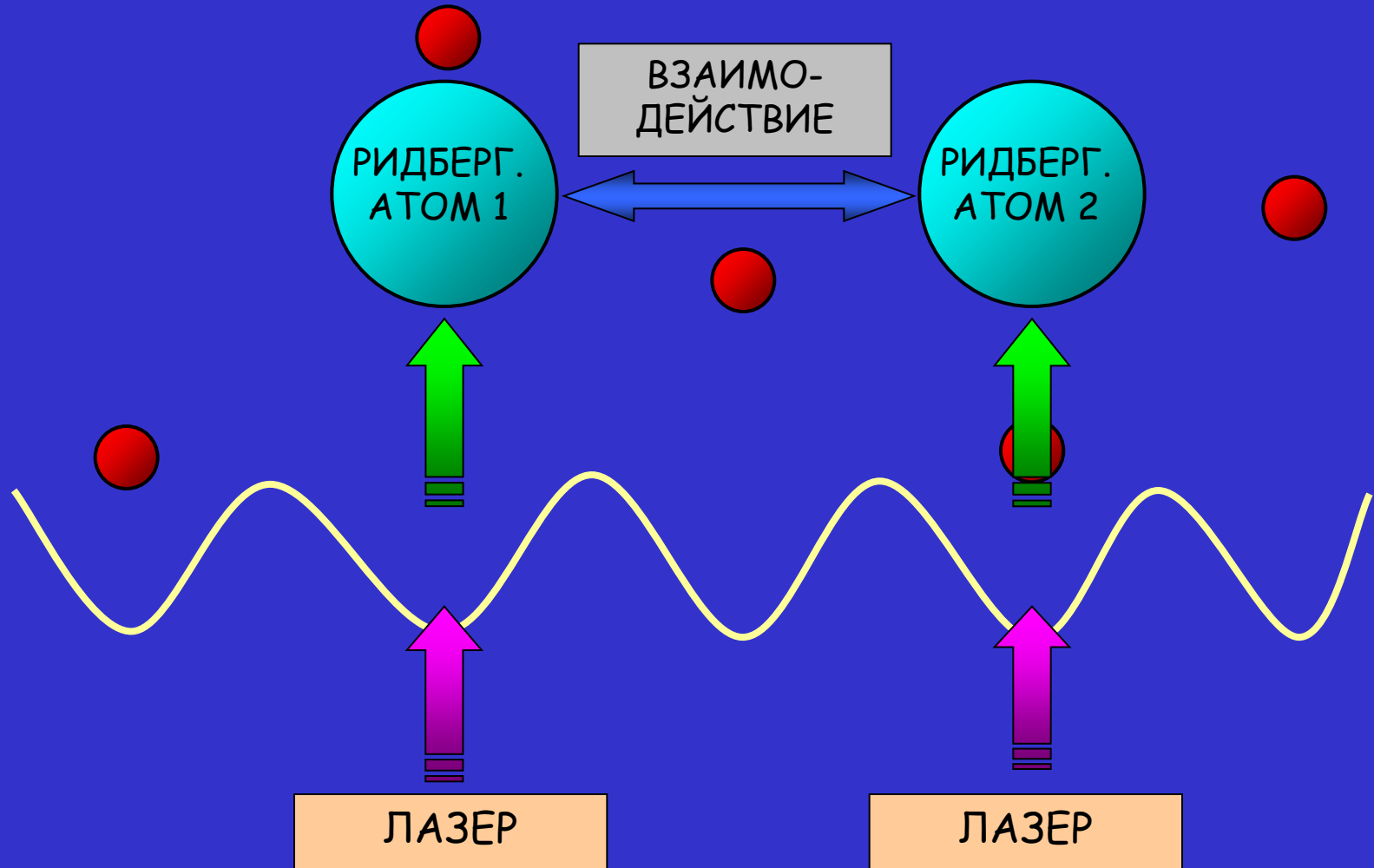
High-Fidelity Single-Qubit Gates on Neutral Atoms in a Two-Dimensional Magic-Intensity Optical Dipole Trap Array

Cheng Sheng,^{1,2,3} Xiaodong He,^{1,3,*} Peng Xu,^{1,3} Ruijun Guo,^{1,2,3} Kunpeng Wang,^{1,2,3}
Zongyuan Xiong,^{1,3} Min Liu,^{1,3} Jin Wang,^{1,3} and Mingsheng Zhan^{1,3,†}



Массив 4×4 оптических дипольных ловушек для атомов Rb. Средняя ошибка однокубитовой операции 3×10^{-5} благодаря компенсации светового сдвига при циркулярной лазерной поляризации и активной стабилизации магнитного поля на уровне 1 мГц.

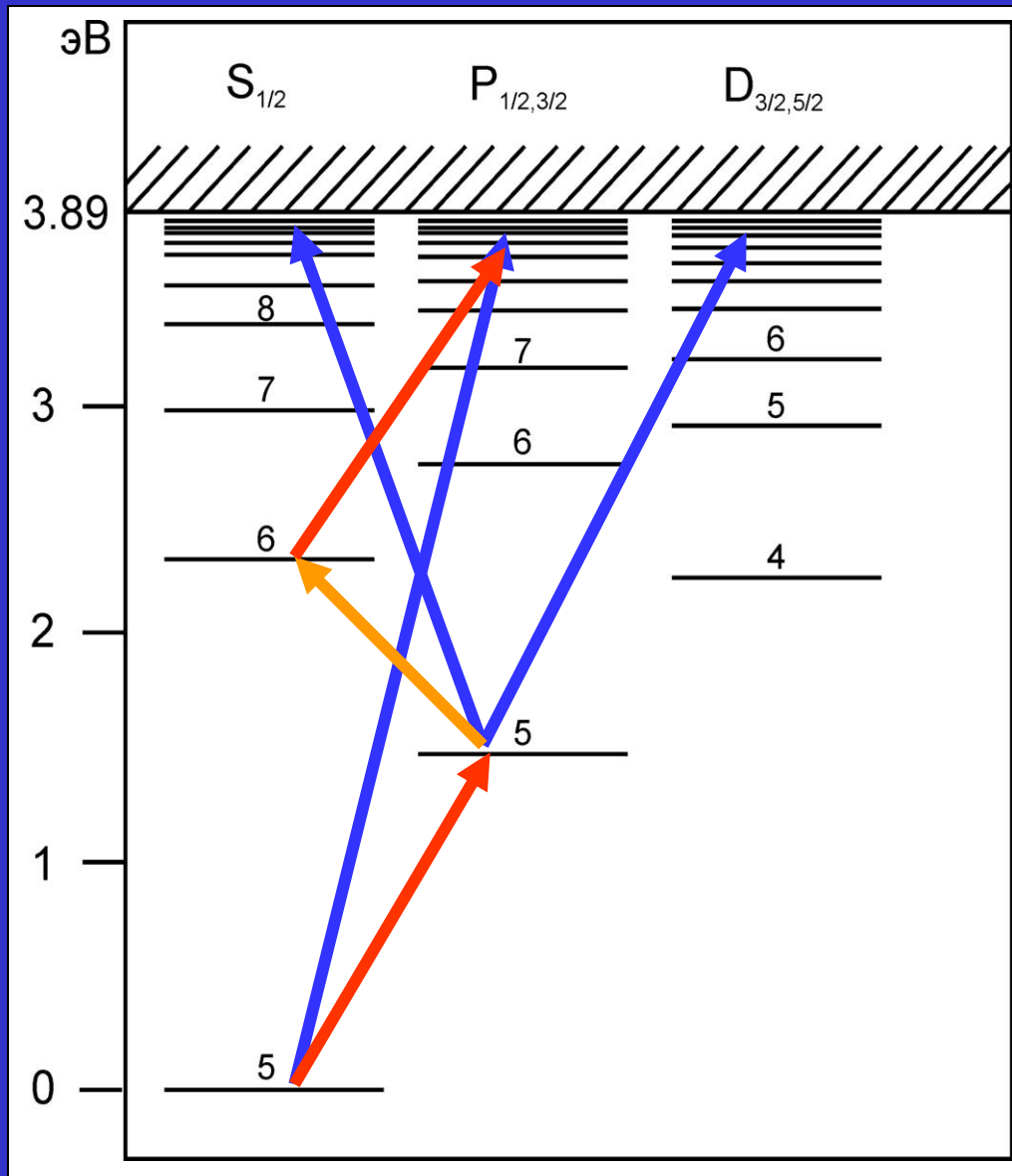
Двухкубитовые операции с нейтральными атомами



D. Jaksch et al. PRL 85 (2000) 2208; M.Lukin et al. PRL 87 (2001) 037901

Ридберговские атомы

Уровни энергии в атомах Rb



$$E_n = -\frac{Ry}{(n - \delta_L)^2}$$

$$r_n \sim n^2$$

$$\tau_n \sim n^3 - n^5$$

$$d \sim e a_0 n^2$$

$$\alpha_n \sim n^7$$

Энергия
взаимодействия

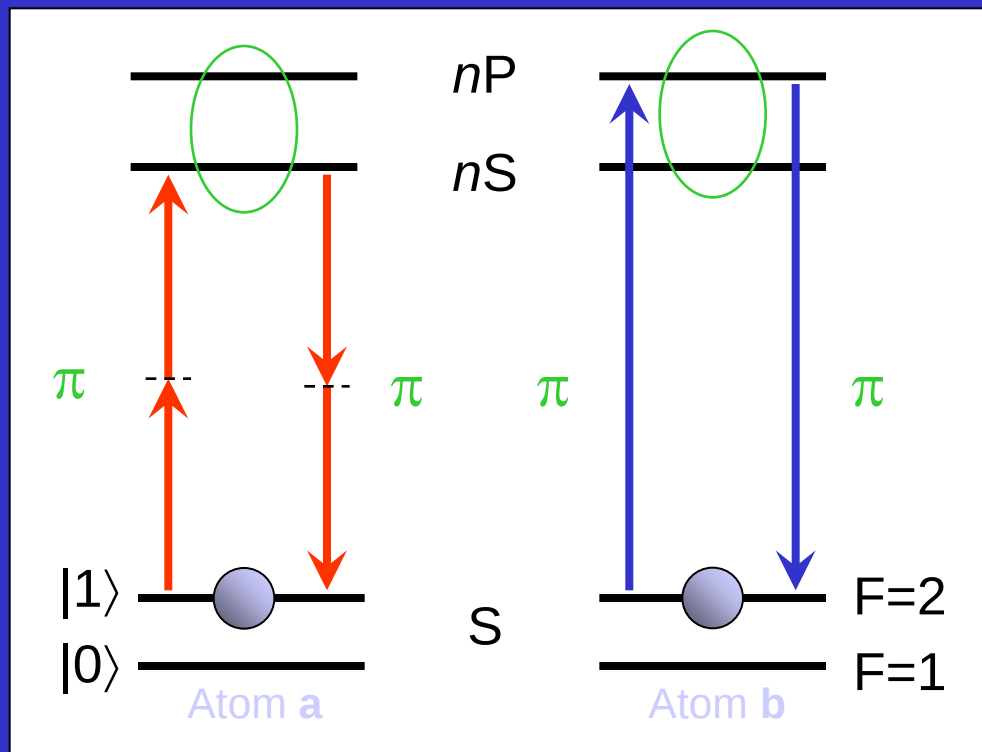
$$V_{ab} \sim \frac{d_a d_b}{R_{ab}^3} \sim n^4$$

$V \sim 10$ МГц при
 $n = 50, R \approx 5$ мкм

УСЛОВНЫЙ КВАНТОВЫЙ ФАЗОВЫЙ ВЕНТИЛЬ

Conditional Quantum Phase Gate

$$|ab\rangle \rightarrow \exp(i\Phi\delta_{a1}\delta_{b1}) |ab\rangle$$



I.I.Ryabtsev, D.B.Tretyakov, I.I.Beterov,
J. Phys. B, 2005, v.38, p.S421

$$\Psi(t) = |SP\rangle \cos(V_{dd}t/\hbar) - i |PS\rangle \sin(V_{dd}t/\hbar)$$

$$\Phi = \pi \quad \text{при} \quad T = \pi\hbar / V_{dd}$$

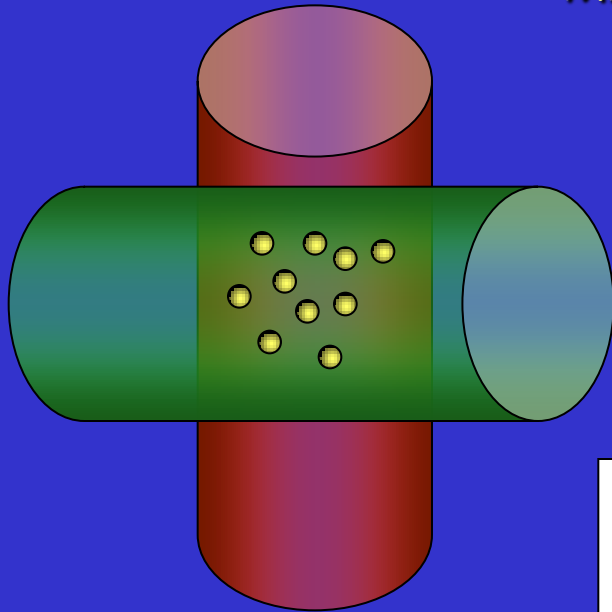
$$\langle r \rangle \sim 2500 \quad \text{при} \quad n = 50$$

$$R \approx 5 \text{ мкм}$$

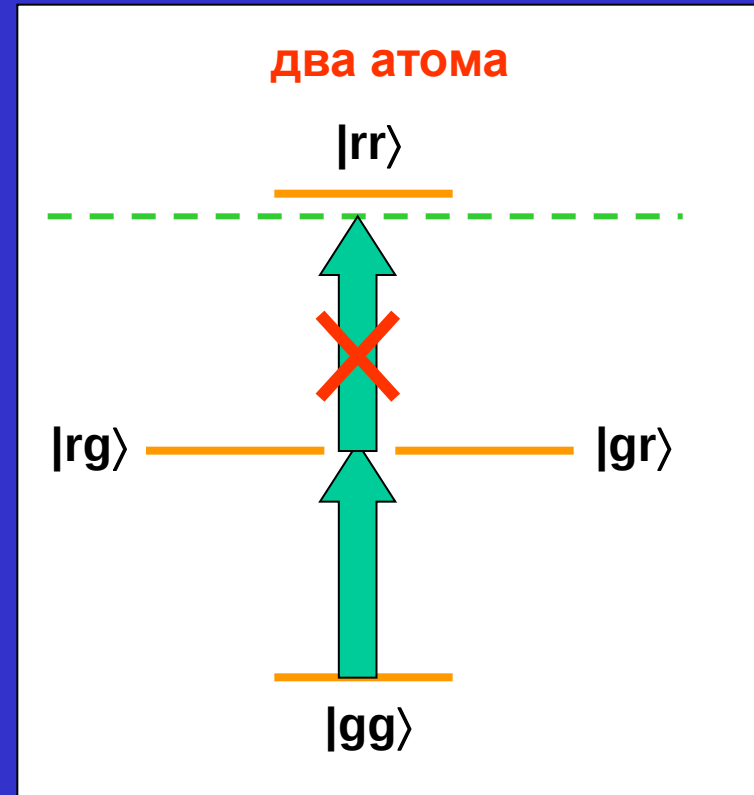
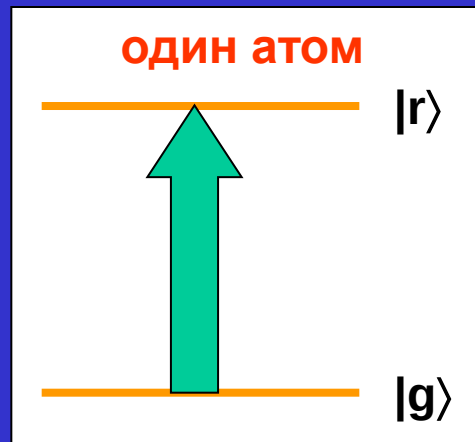
$$V_{dd}/\hbar \sim 10 \text{ МГц} \quad T \sim 50 \text{ нс}$$

Дипольная блокада в мезоскопических ансамблях

M. Lukin et al. PRL 87 (2001) 037901



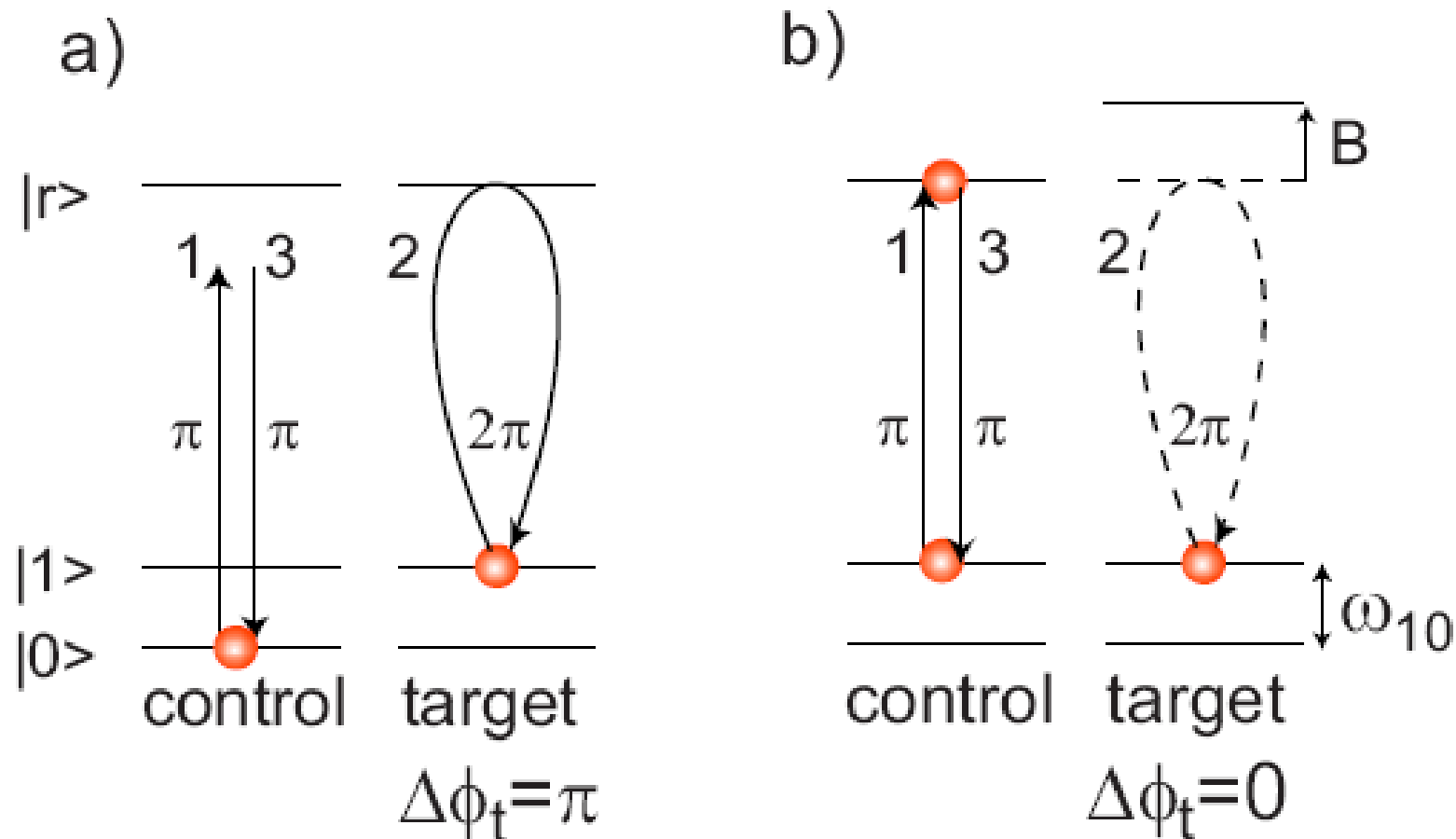
$$\Psi = |rg\rangle + |gr\rangle$$



M. Saffman et al., Rev. Mod. Phys. **82**, 2313 (2010)

D. Comparat et al., J. Opt. Soc. Am. B **27**, A208 (2010)

Квантовый вентиль CZ при дипольной блокаде



M.D.Lukin et al., Phys. Rev. Lett., 2001, v.87, p.037901

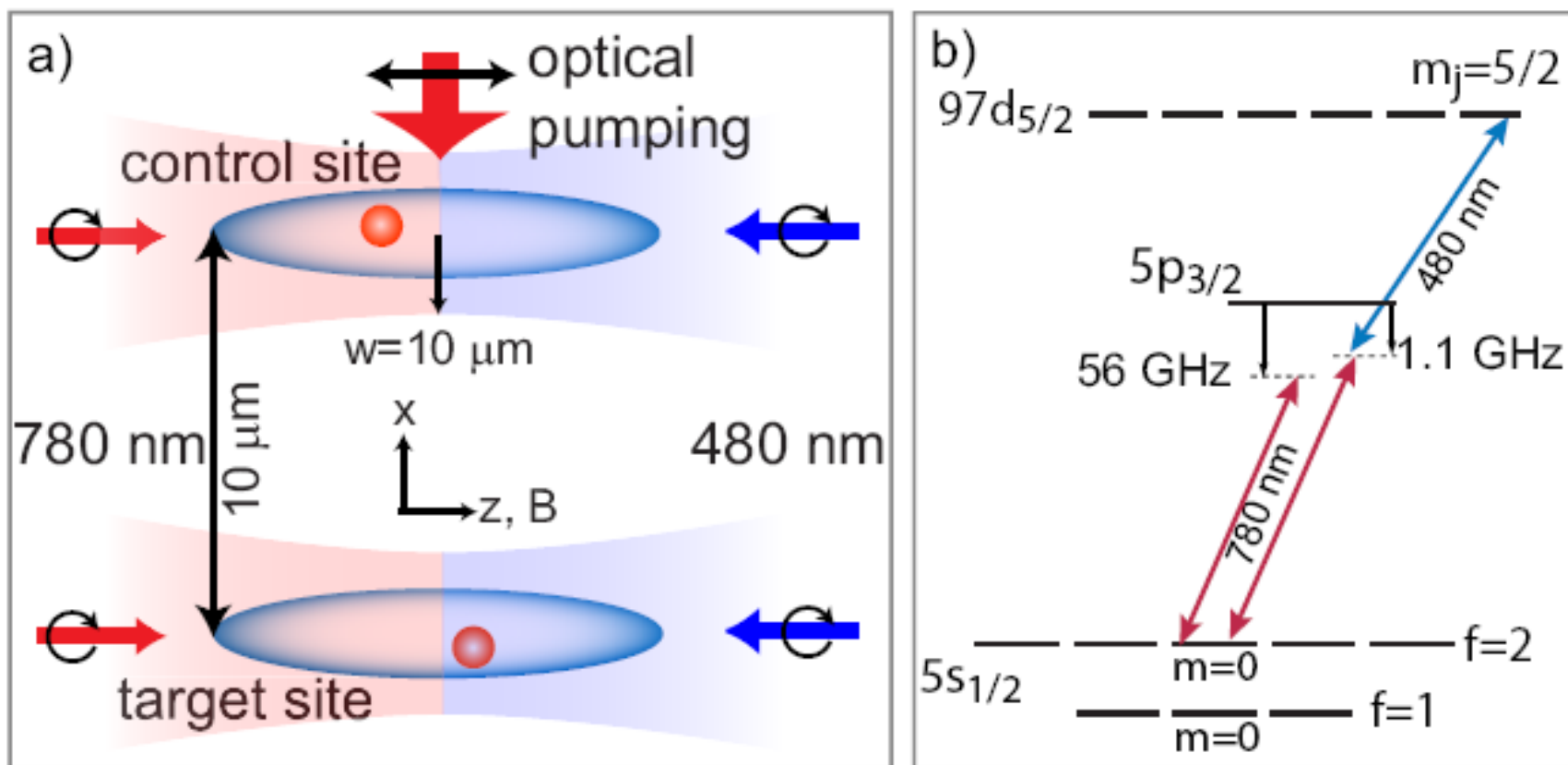


Demonstration of a Neutral Atom Controlled-NOT Quantum Gate

L. Isenhower, E. Urban, X.L. Zhang, A.T. Gill, T. Henage, T.A. Johnson,^{*} T.G. Walker, and M. Saffman

Department of Physics, University of Wisconsin, 1150 University Avenue, Madison, Wisconsin 53706 USA

(Received 5 August 2009; published 8 January 2010)

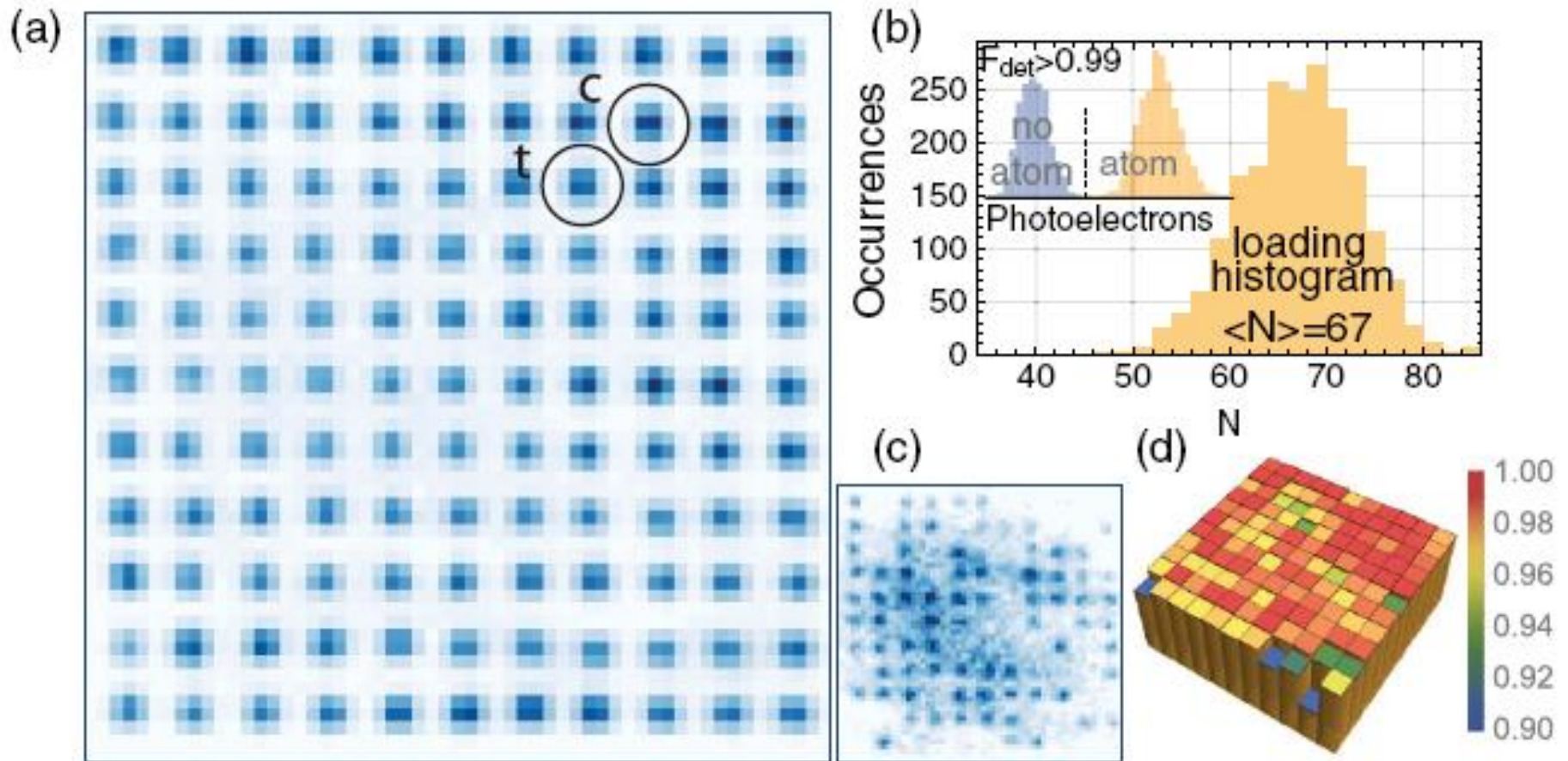


Точность двухкубитовх операций $F \sim 80\%$.

Rydberg-Mediated Entanglement in a Two-Dimensional Neutral Atom Qubit Array

T. M. Graham, M. Kwon[✉], B. Grinkemeyer[✉], Z. Marra, X. Jiang, M. T. Lichtman[✉],
Y. Sun,[†] M. Ebert^{✉,‡} and M. Saffman^{✉,‡}

Department of Physics, University of Wisconsin-Madison, 1150 University Avenue, Madison, Wisconsin 53706, USA



Для соседних кубитов $F=88-89\%$

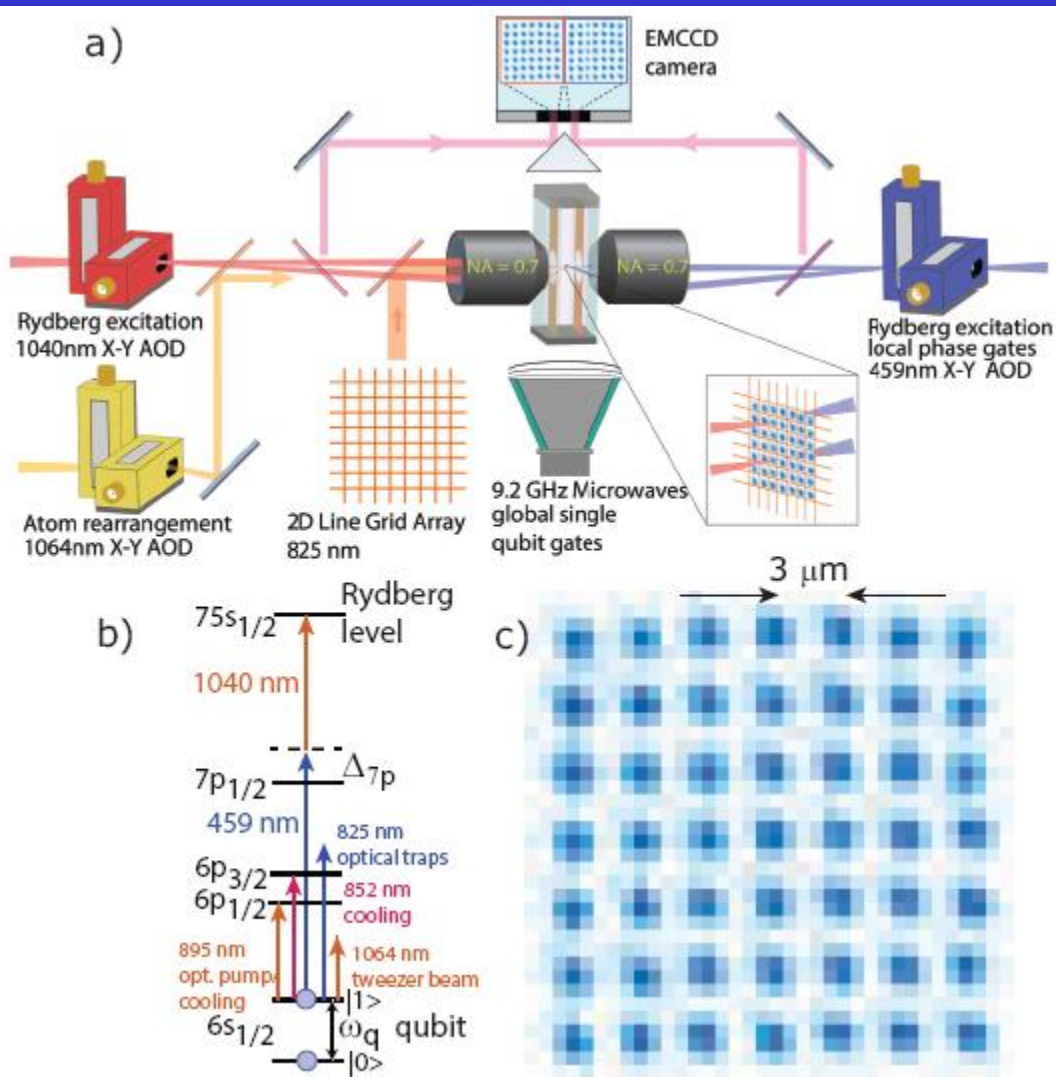
Demonstration of multi-qubit entanglement and algorithms on a programmable neutral atom quantum computer

Nature **604**,
457 (2022)

T. M. Graham,¹ Y. Song,¹ J. Scott,¹ C. Poole,¹ L. Phuttitarn,¹ K. Jooya,¹ P. Eichler,¹ X. Jiang,¹ A. Marra,^{1,*} B. Grinkemeyer,^{1,†} M. Kwon,^{1,‡} M. Ebert,² J. Cherek,³ M. T. Lichtman,² M. Gillette,² J. Gilbert,³ D. Bowman,⁴ T. Ballance,⁴ C. Campbell,³ E. D. Dahl,³ O. Crawford,⁵ N. S. Blunt,⁵ B. Rogers,⁵ T. Noel,³ and M. Saffman^{1,2}

¹Department of Physics, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, 53706, USA

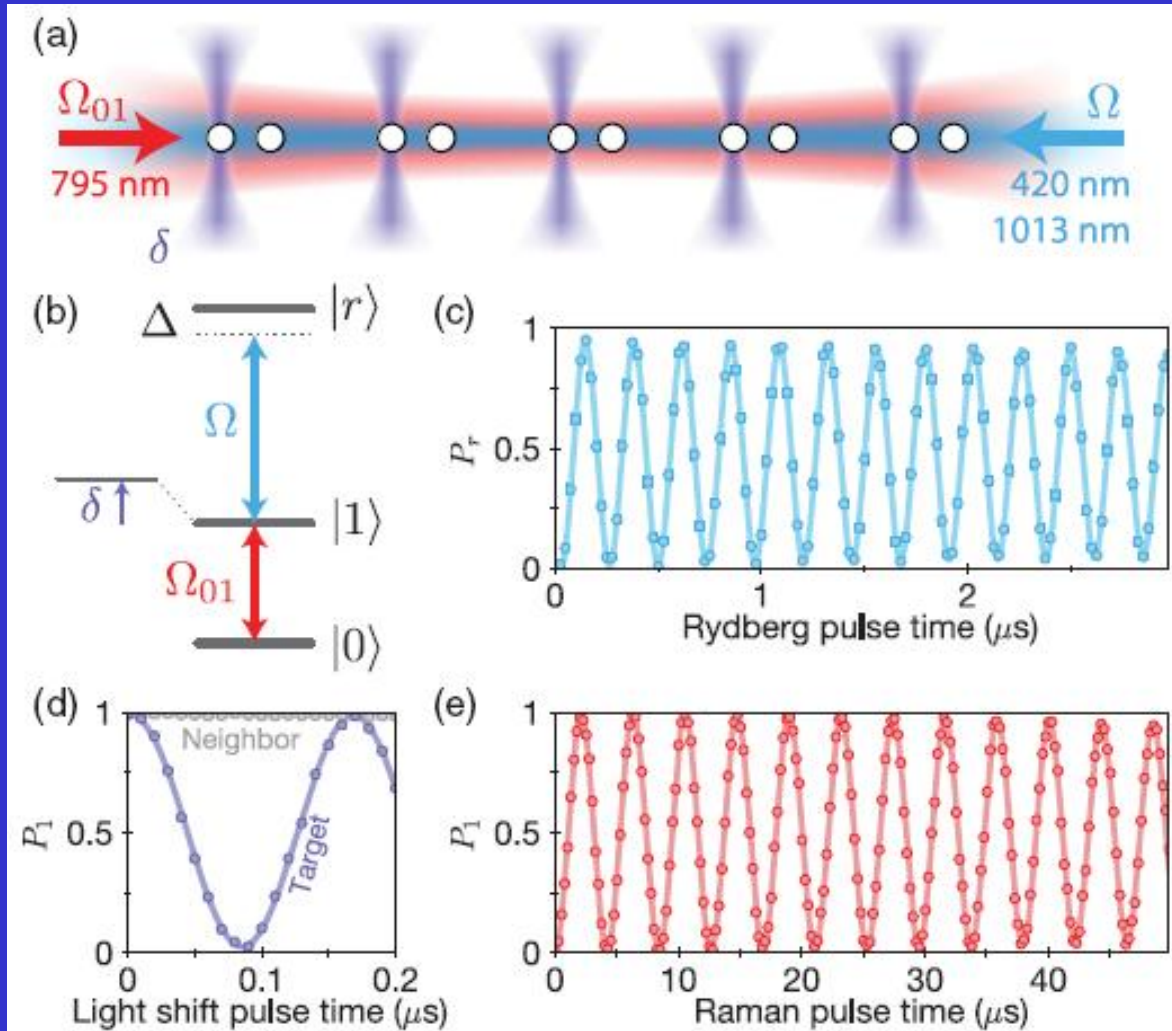
²ColdQuanta, Inc., 111 N Fairchild St, Madison, WI 53703, USA



Продемонстрировано несколько квантовых алгоритмов с применением до 6 кубитов: квантовая оценка фазы для квантовой химии, квантовая оптимизация для задачи графов MaxCut. Точность получения состояний Белла 92.7% для двух кубитов (95.5% с учетом точности приготовления кубитов).

Parallel Implementation of High-Fidelity Multiqubit Gates with Neutral Atoms

Harry Levine^{1,*} Alexander Keesling¹ Giulia Semeghini¹ Ahmed Omran¹ Tout T. Wang^{1,2} Sepehr Ebadi,¹
 Hannes Bernien,³ Markus Greiner,¹ Vladan Vuletić,⁴ Hannes Pichler,^{1,5} and Mikhail D. Lukin¹



Уменьшены
 фазовые шумы
 ридберговских
 лазеров.

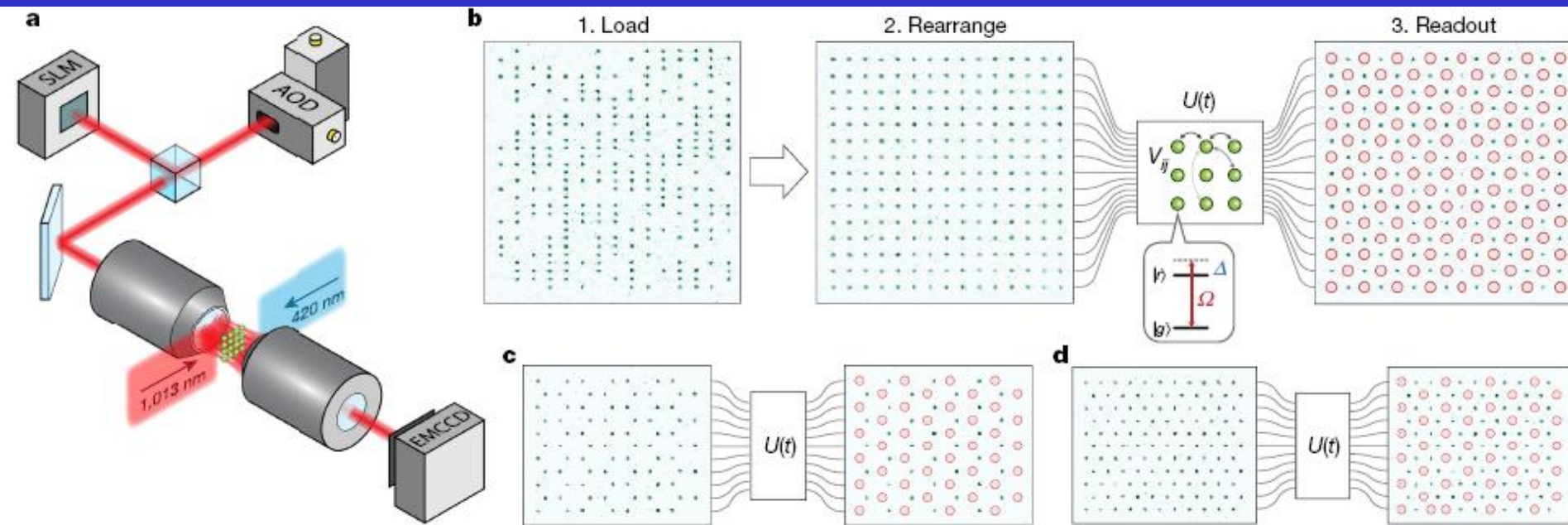
Достигнута
 точность
 двухкубитовых
 операций для
 соседних кубитов
 $F=97-98\%$

2023 год: $F=99,5\%$

Quantum phases of matter on a 256-atom programmable quantum simulator

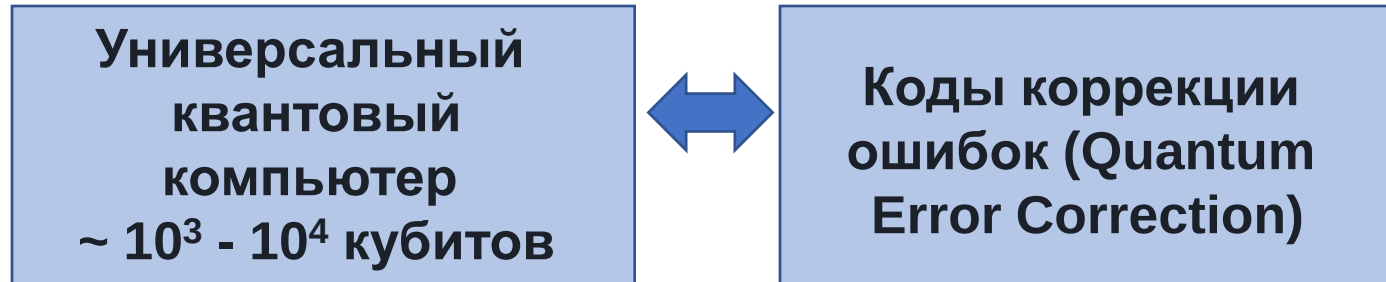
Nature **595**,
227 (2021)

Sepehr Ebadi¹, Tout T. Wang¹, Harry Levine¹, Alexander Keesling^{1,2}, Giulia Semeghini¹, Ahmed Omran^{1,2}, Dolev Bluvstein¹, Rhine Samajdar¹, Hannes Pichler^{3,4}, Wen Wei Ho^{1,5}, Soonwon Choi⁶, Subir Sachdev¹, Markus Greiner¹, Vladan Vuletić⁷ & Mikhail D. Lukin^{1,8}



Реализована модель квантовых спинов для системы из 64 - 256 кубитов. Продемонстрированы антиферромагнитные состояния и квантовая критическая динамика для квантового фазового перехода Изинга в $(2 + 1)$ измерениях. Реализованы несколько новых квантовых фаз на основе ридберговских взаимодействий и когерентного лазерного возбуждения, получены фазовые диаграммы, изучена роль квантовых флуктуаций.

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ:



Альтернативы



ФАЗЫ ЗРЕЛОСТИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В БЛИЖНЕСРОЧНОЙ, СРЕДНЕСРОЧНОЙ И ДОЛГОСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВАХ

	«Эра» NISQ 3-5 лет	Всеобщее квантовое превосходство Более 10 лет	Полномасштабный помехоустойчивый квантовый компьютер Более 20 лет
Технические достижения	Устранение ошибок	Исправление ошибок	Модульная архитектура
Пример влияния на бизнес	Симуляторы задач материаловедения	Оценки финансовых рисков в близком к реальному времени (например, для инвестиционных фондов)	Дизайн лекарств, содержащих большие биопрепараты, с минимальными побочными эффектами
Операционная прибыль	2-5 млрд. долларов	25-50 млрд. долларов	450-850 млрд. долларов

По данным Boston Consulting Group

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

Задача	Полезно для...	Отраслевые приложения
Комбинаторная оптимизация	Минимизация или максимизация целевой функции, например, поиск наиболее эффективных ресурсов или поиск самого короткого расстояния между точками (задача странствующего коммивояжера)	• Оптимизация сети (например, для авиалиний, такси) • Оптимизация цепочек поставок и/или логистики • Оптимизация финансовых сервисов
Решение систем диф. уравнений	Моделирование поведения сложных систем (например, уравнение Навье-Стокса в гидродинамике)	• Моделирование гидродинамики для дизайна - автомобильной и авиационной техники; • Моделирование медицинских приложений (например, анализ кровотока); • Молекулярное моделирование новых материалов и/или лекарств
Решение систем линейных уравнений	Задачи машинного обучения с использованием матрицы диагонализации (например в задаче кластеризации)	• Управление рисками в финансовой сфере • Классификация последовательностей ДНК • Маркетинг и сегментация клиентов
Задача факторизации	Криптография и компьютерная безопасность, (например, RSA)	• Дешифрование и/или взлом кода

По данным Boston Consulting Group

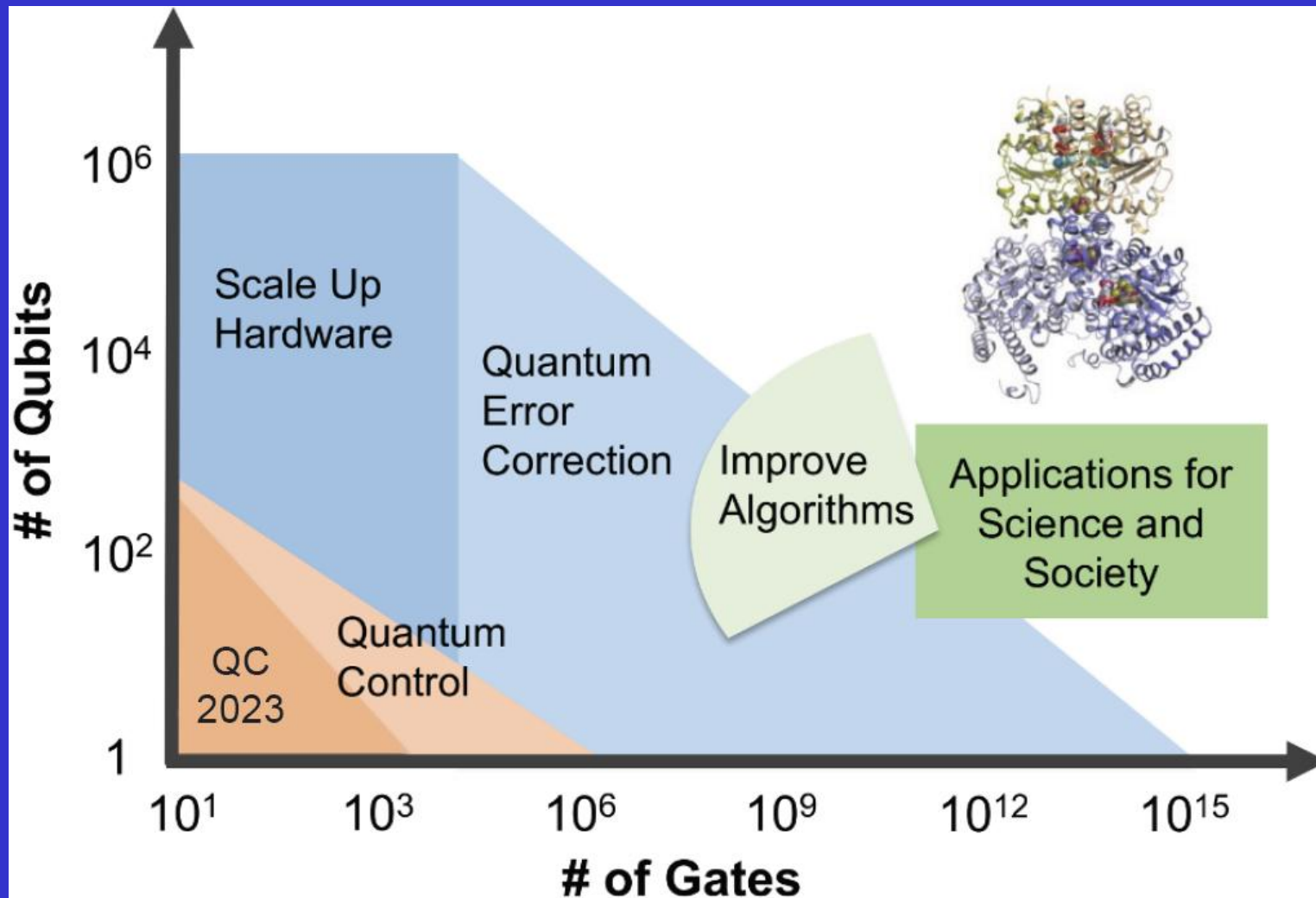
СРАВНЕНИЕ МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ ПЛАТФОРМАМИ

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

Из презентации Н.Н.Колачевского (ФИАН)
"Квантовые вычислители на ионной платформе"

ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ СРОКИ СОЗДАНИЯ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ ОТ ЛИДИРУЮЩИХ КОМПАНИЙ

№	компания	Тип кубита	Срок создания
1	IBM	сверхпроводники	Сегодня: 137 кубитов Начало 2022: 433 кубитов "Osprey"; Конец 2023 - 1121 кубитов "Condor"
2	Google	сверхпроводники	Квантовый компьютер с коррекцией ошибок, способный выполнять полезные вычисления, будет построен к 2029 г.
3	IONQ	ионы	2023 год – демонстрация полномасштабного квантового превосходства. 2028 год – 1024 алгоритмических кубита
4	Psi Quantum	фотоны	2025 г. - 1 млн. кубитов, 1000 логических кубитов
5	Xanadu	фотоны	1 млн. кубитов с коррекцией ошибок (срок не указан)
6	Pascal	Нейтральные атомы	1000 физических кубитов (срок не указан)
7	QuERA	Нейтральные атомы	2021 г. - 256-512 физических кубитов 2022 г. - полностью программируемый КК с 64 кубитами 2024 г. – полностью программируемый КК с 1024 кубитами
8	D-Wave	квантовый отжиг и сверхпроводниковые кубиты	2023-2024 гг. – 7000 кубитов



arXiv:
2403.
08780

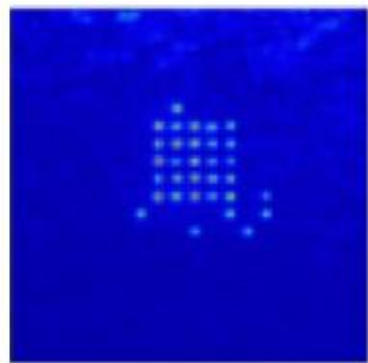
Fig 1. Quantum computers in 2023 have a limited number of qubits and are able to perform a limited number of gates. In order to use quantum computers to study challenging scientific problems (e.g., the quantum dynamics of metal-organic centers of enzymes), we need to be able to perform many more operations.

(Image by K. Brown and E. Edwards)

Российские разработки в области квантовых вычислений

Работы выполняются в рамках проектов ФПИ, РВК (центры НТИ, ЛИЦ), РНФ и госзадания Минобрнауки.

Работы объединены в рамках ДК "Квантовые вычисления" (ГК "Росатом")



Приоритетные платформы

Классификация уровней готовности к развитию и использованию квантовых вычислений (Quantum Technology Readiness Levels, QTRL), характеризует зрелость соответствующих разработок



Приоритетные платформы	Сверхпроводники	Ионы в ловушке	Нейтральные атомы	Фотонные чипы
QTRL	4	3	3	3

(i) Сверхпроводники / МИСИС, МФТИ, ИФТТ, МГТУ им. Баумана, ВНИИА, РКЦ

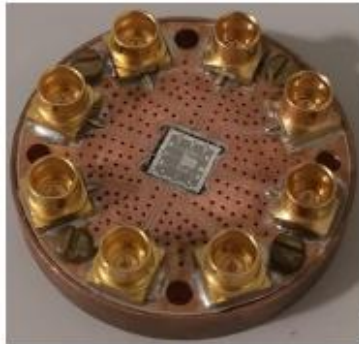
(ii) Нейтральные атомы / МГУ, ИФП СО РАН

(iii) Оптические кубиты/ МГУ, МГТУ им. Баумана

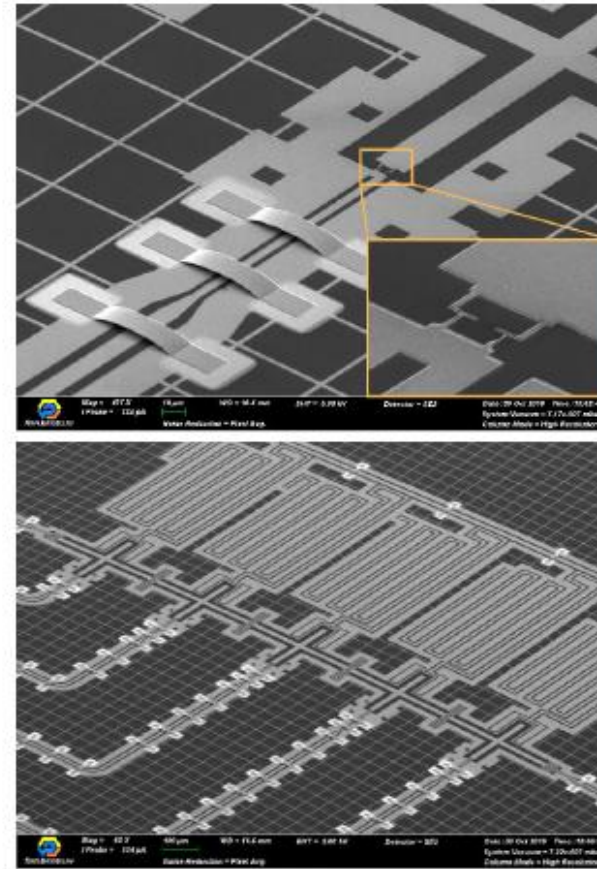
(iv) Ионы / ФИАН, РКЦ

Из презентации Н.Н.Колачевского (ФИАН) "О состоянии направления "Квантовые вычисления" в России и мире"

Проект «Лиман» 2016-2019 гг.



- Реализованы **двухкубитные квантовые вентили, квантовый алгоритм Гровера (МИСИС)**



квантовые
схемы,
сделанные в
МГТУ
им.Баумана

Точность однокубитовых операций 99%, время когерентности ~50 мкс, точность двухкубитовых операций 80%, точность алгоритма Гровера с 2 кубитами 53%.

Из презентации Н.Н.Колачевского (ФИАН) "О состоянии направления "Квантовые вычисления" в России и мире"

Эксперименты ФИАН с двумя ионами $^{171}\text{Yb}^+$

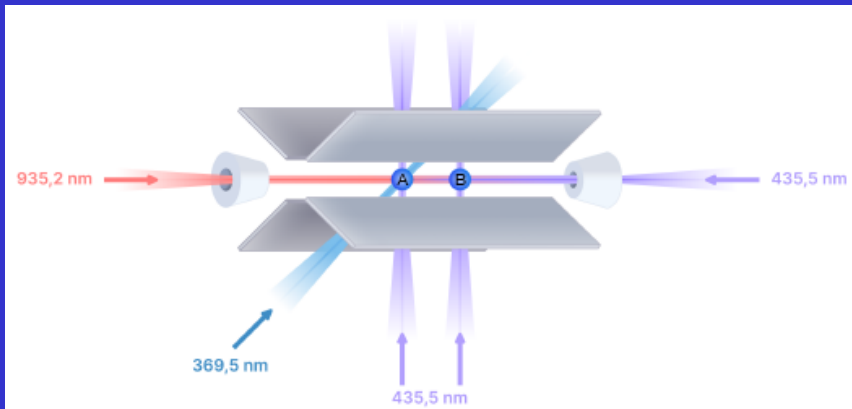
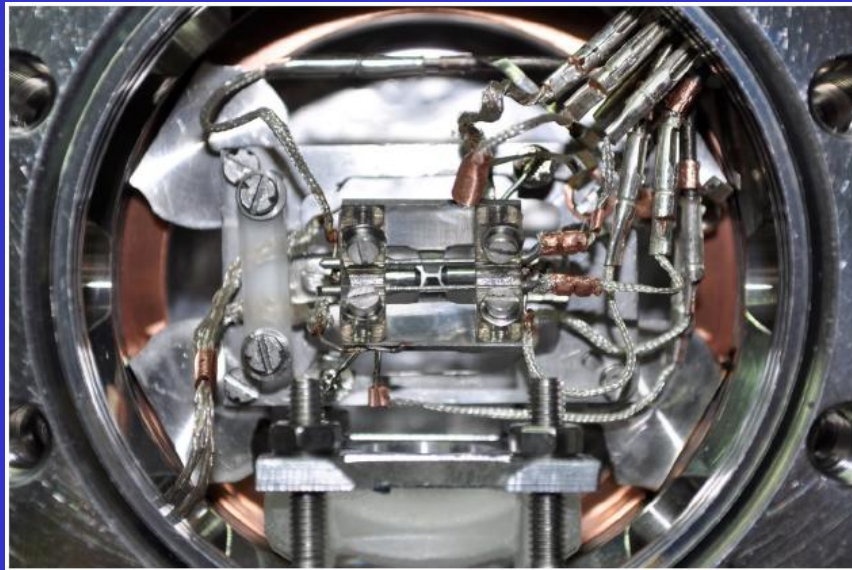
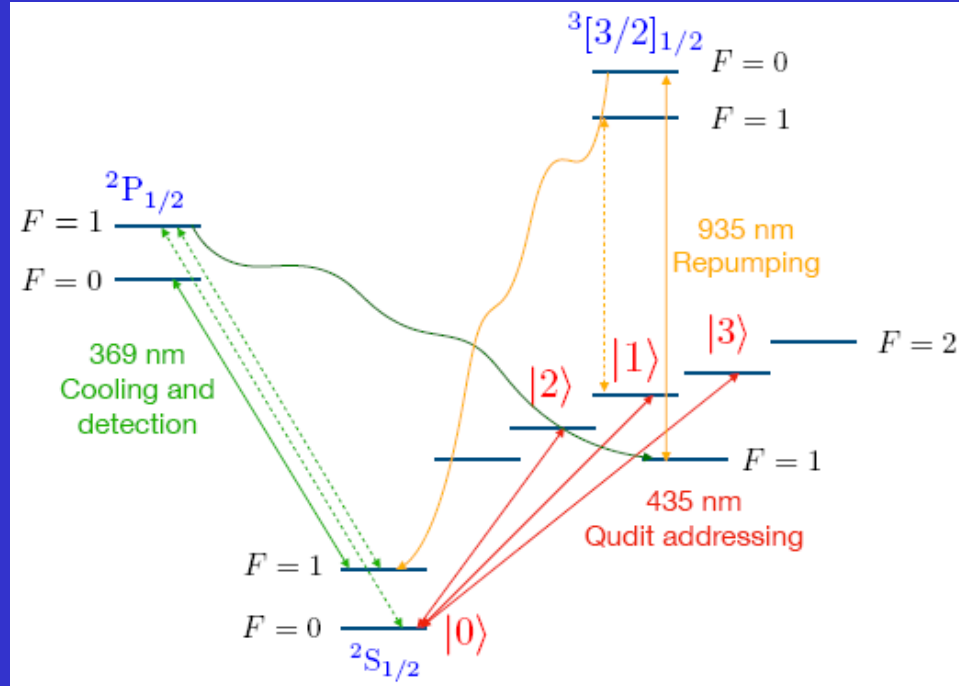


FIG. 2. The one-segment linear 4-blades Paul trap is used for trapping $^{171}\text{Yb}^+$ ions (two ions are labeled as A and B).

М.А.Аксенов et al., "Realizing quantum gates with optically-addressable $^{171}\text{Yb}^+$ ion qubits", PRA **107**, 052612 (2023)



	$0 \rightarrow 1$	$0 \rightarrow 2$	$0 \rightarrow 3$
Qudit A	$\mathcal{F}_{01}^A = 85\%$	$\mathcal{F}_{02}^A = 83\%$	$\mathcal{F}_{03}^A = 87\%$
Qudit B	$\mathcal{F}_{01}^B = 87\%$	$\mathcal{F}_{02}^B = 89\%$	$\mathcal{F}_{03}^B = 87\%$

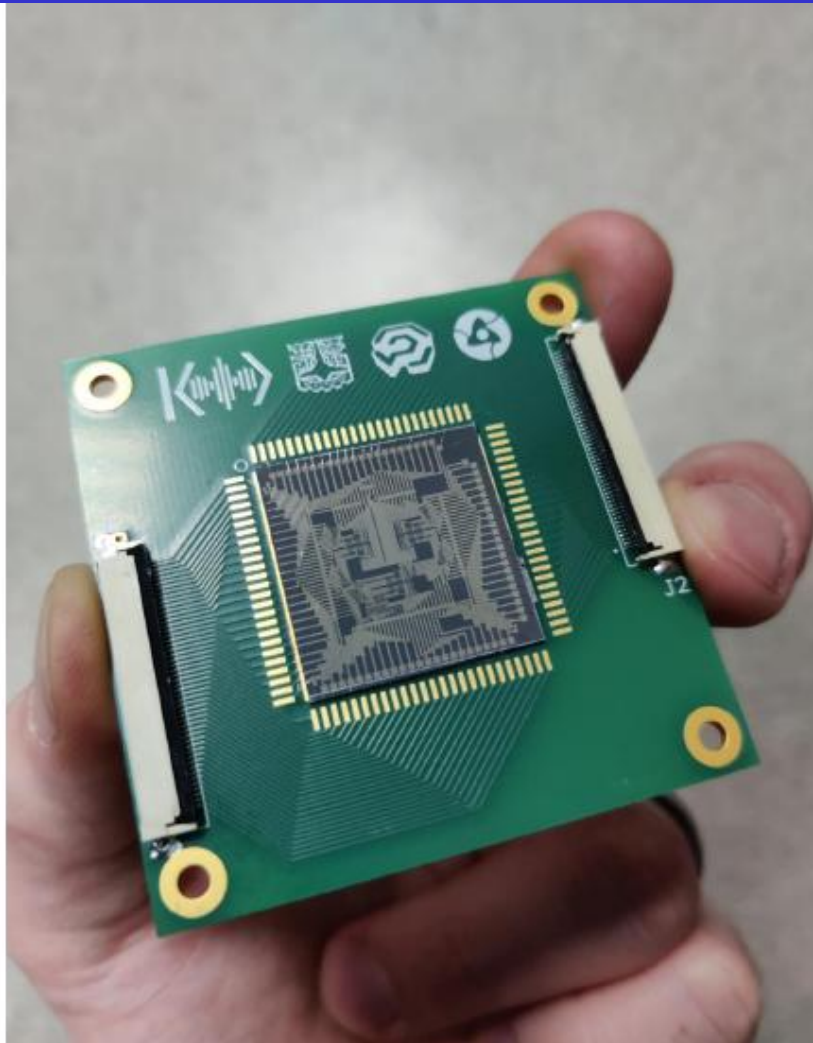
TABLE I. Fidelities of single-qudit gates for two ion qubits. Operations were performed with two ions in the trap.

Получена точность $F = 65 \pm 4 \%$ для 2-кубитовой операции за время 310 мкс, эквивалентной 4-кубитовому квантовому процессору.

Эксперименты МГУ с квантовым процессором на фотонах

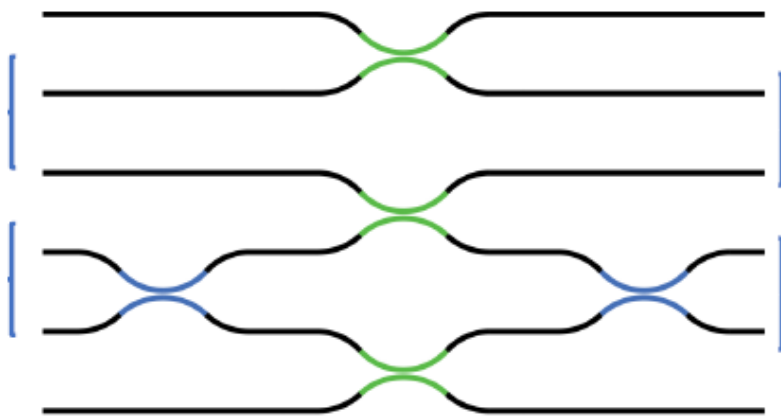


ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ имени М. В. ЛОМОНОСОВА



Чип, содержащий 3
двухкубитных
схемы
(однокубитные
гейты +
двухкубитный для
приготовления и
однокубитные
проекторы).
Металл –
титан/аллюминий

Ситуация в России: гейт CNOT



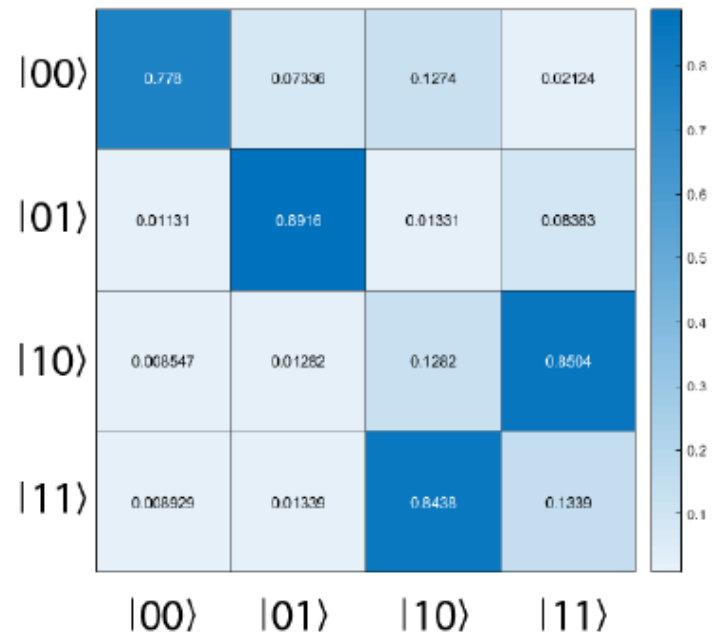
Светоделитель, $R = 1/3$



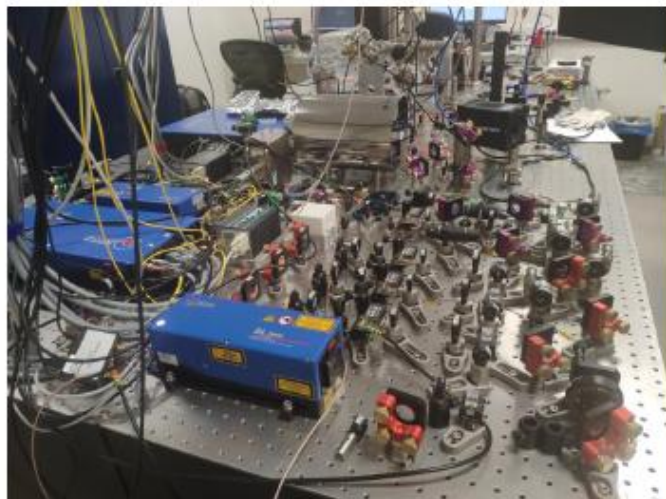
Светоделитель, $R = 1/2$

Однокубитные гейты: точность $> 95\%$

Двухкубитный гейт CNOT: точность $> 91\%$

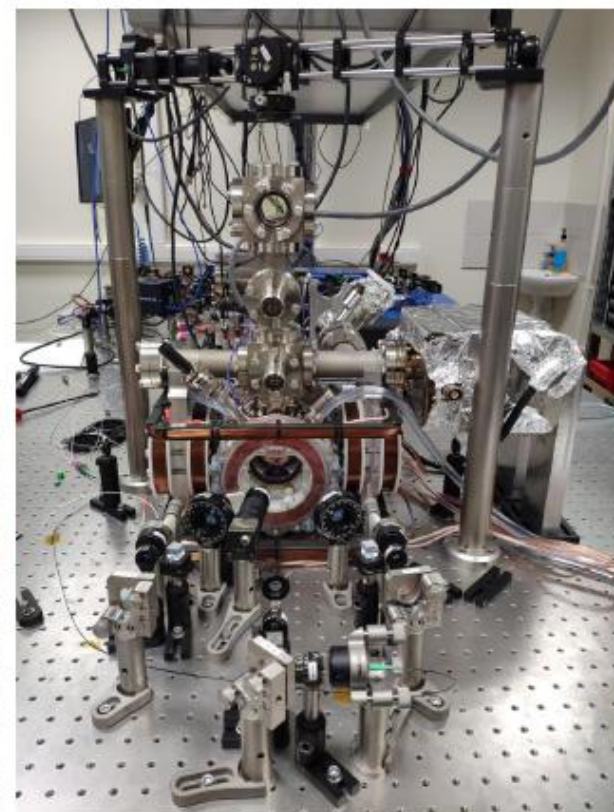
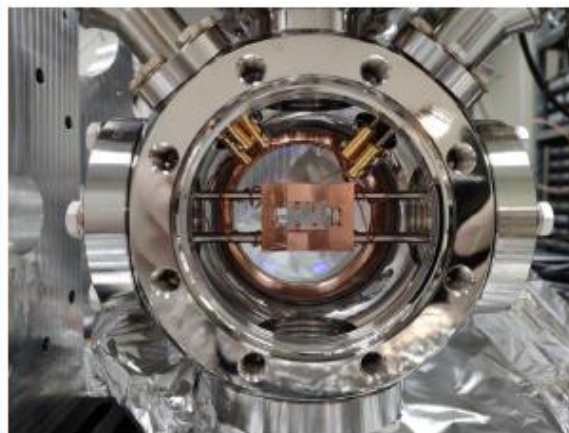


Установка нового поколения (under construction)

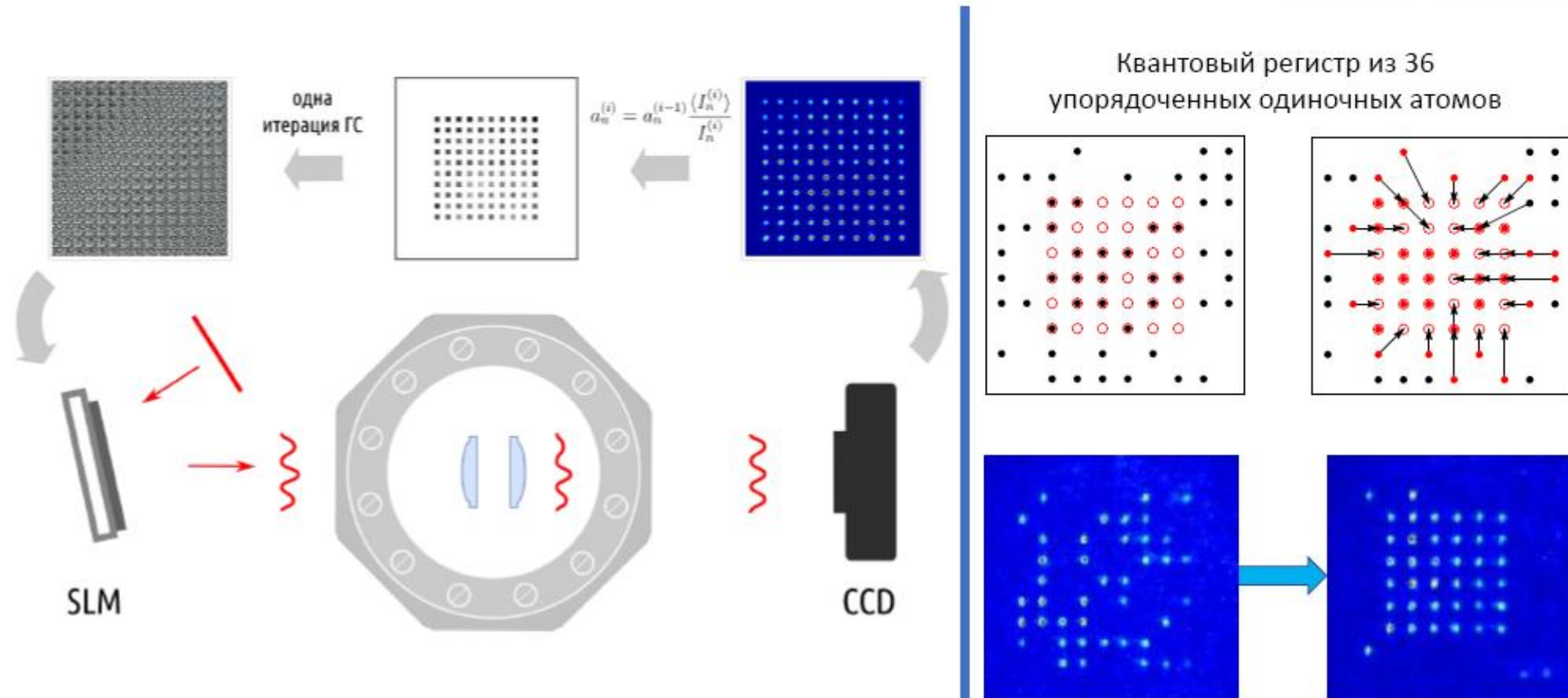


Лазерная система с привязкой к
Высокостабильному резонатору

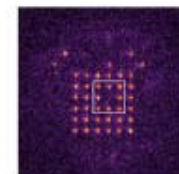
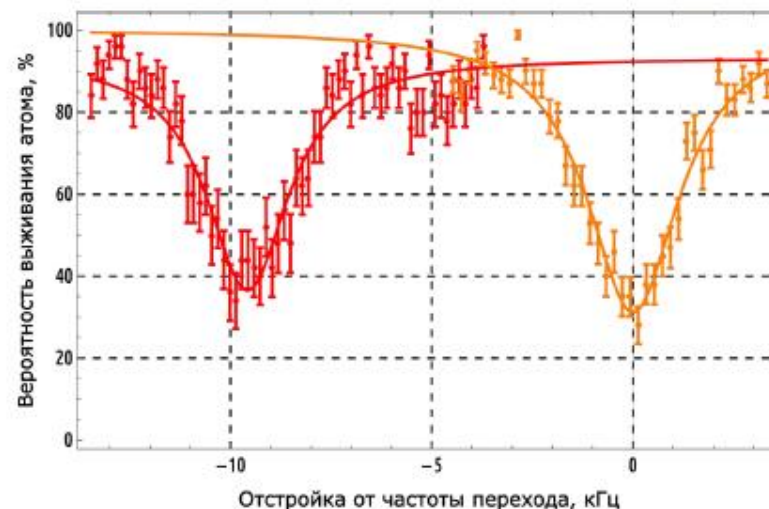
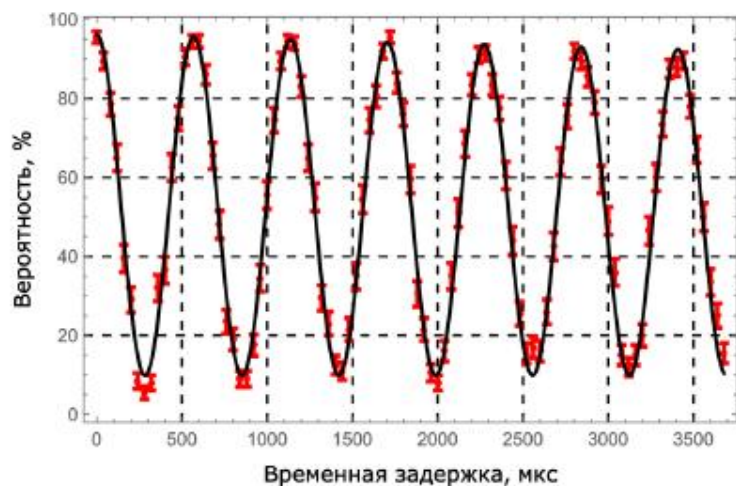
Вакуумная система с
экранированной ITO оптикой и
компенсирующими
электродами



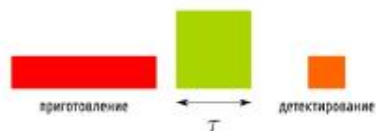
Одиночные атомы в массивах микроловушек



Индивидуальная адресация

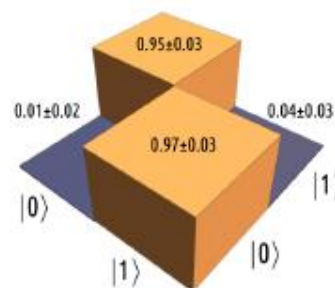


кросс-корреляции
при π -импульсе
в центральном узле

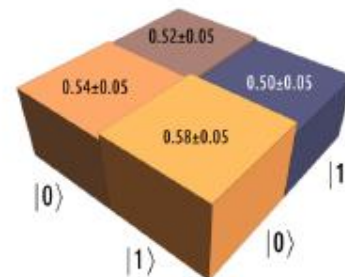


$$V \simeq 90\%$$

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

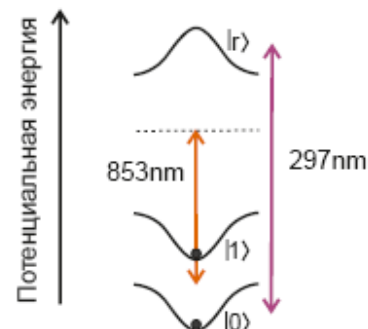


операция NOT

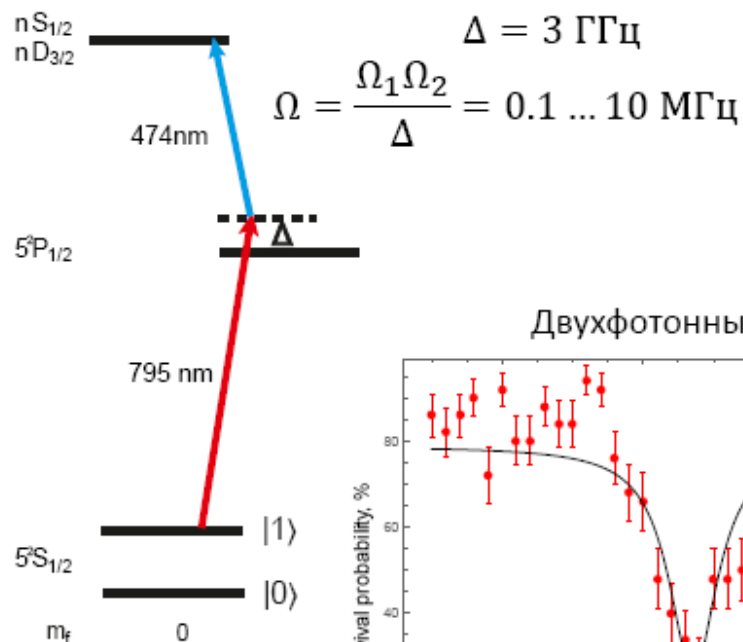


преобразование Адамара

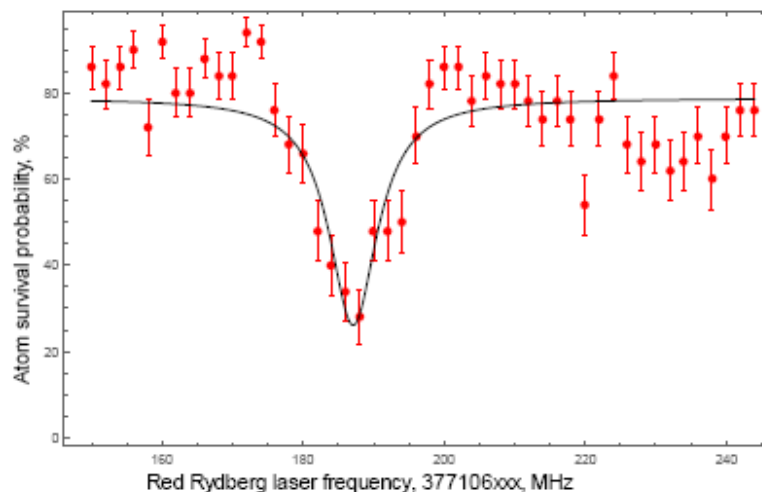
Ридбергские состояния одиночных атомов



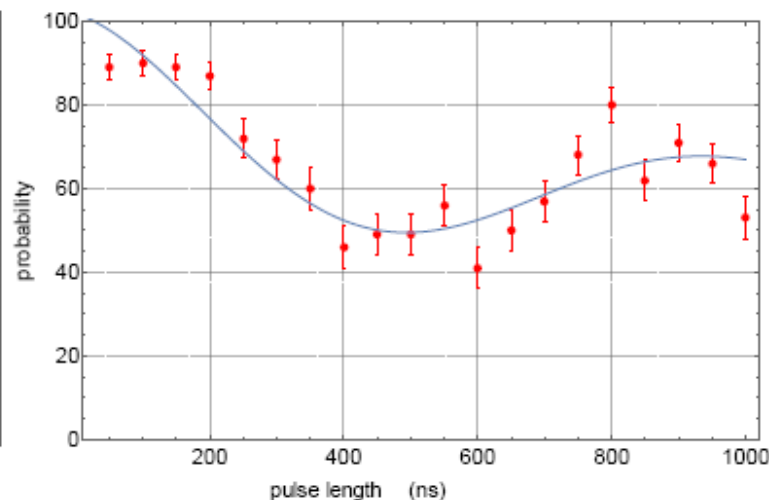
- Двухфотонное возбуждение ридберговских состояний
- Оптическое детектирование



Двухфотонный резонанс



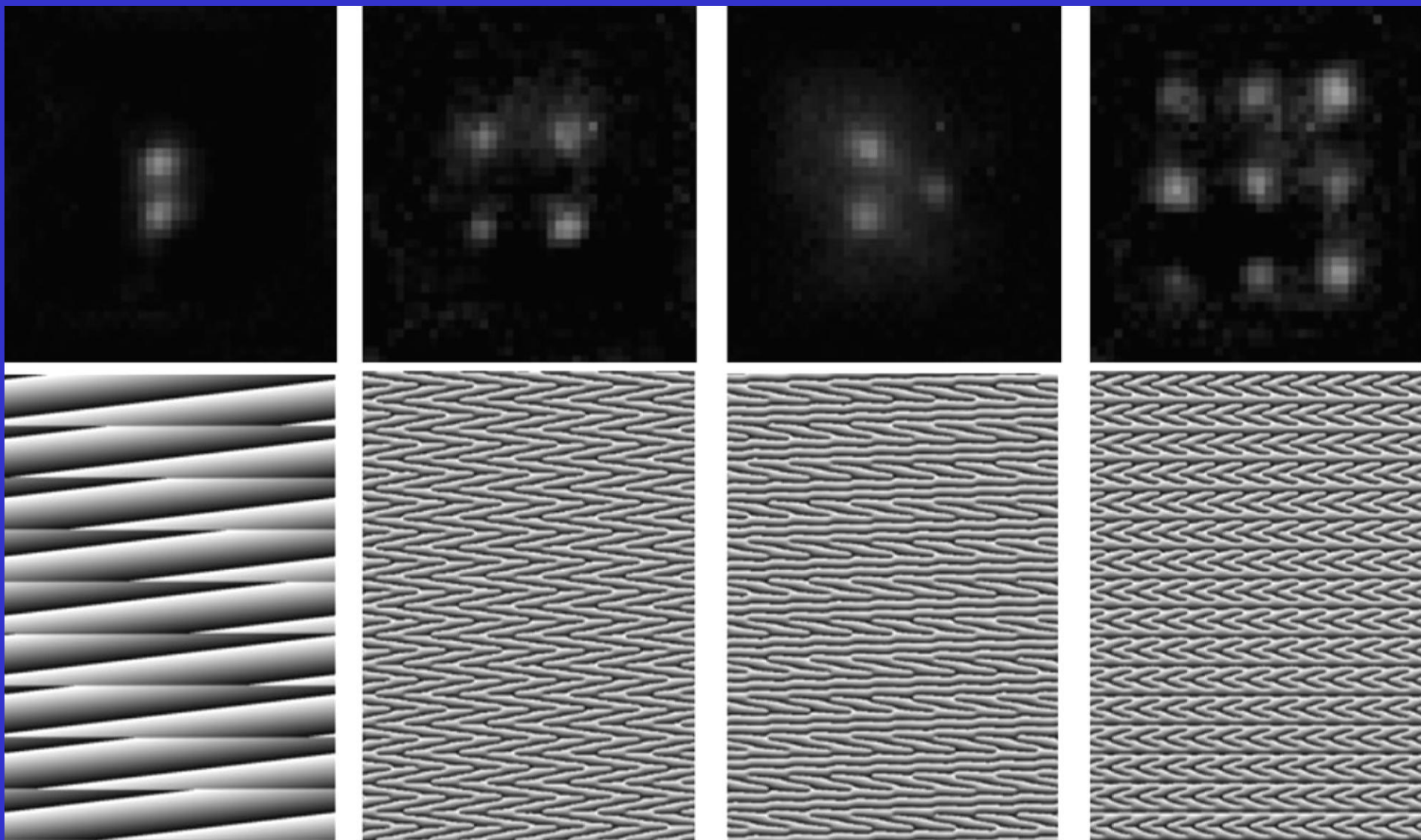
Осцилляции Раби ground-Rydberg



Экспериментальная установка ИФТ СО РАН для реализации квантовых вычислений с одиночными атомами ^{87}Rb в массивах оптических дипольных ловушек



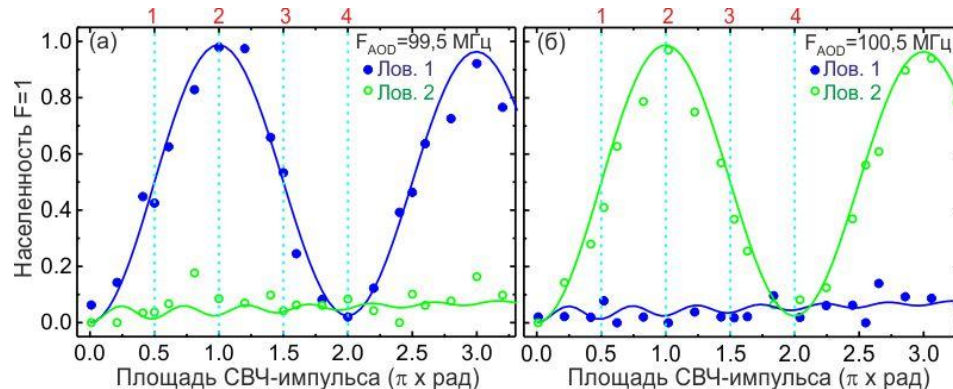
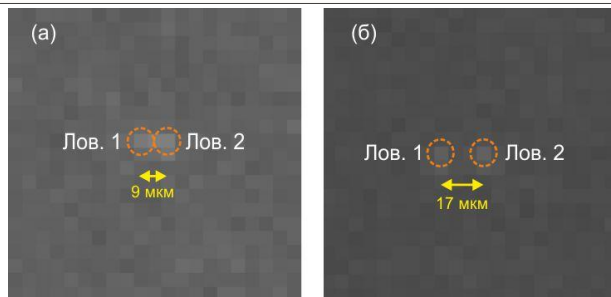
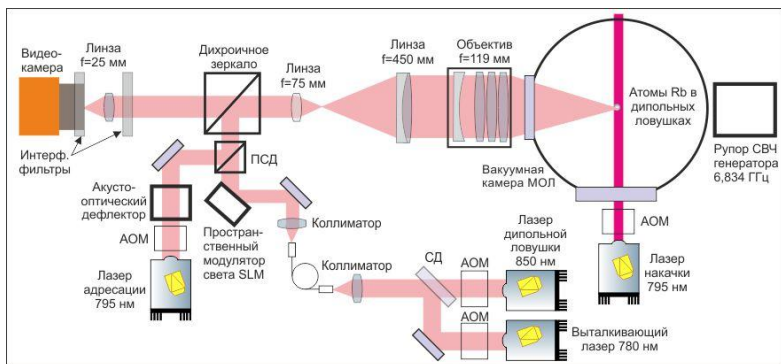
Захват атомов Rb в различные массивы оптических дипольных ловушек с шагом 15 мкм и их фазовые маски





Однокубитовые квантовые операции на СВЧ-переходе в двух одиночных атомах Rb в двух оптических дипольных ловушках

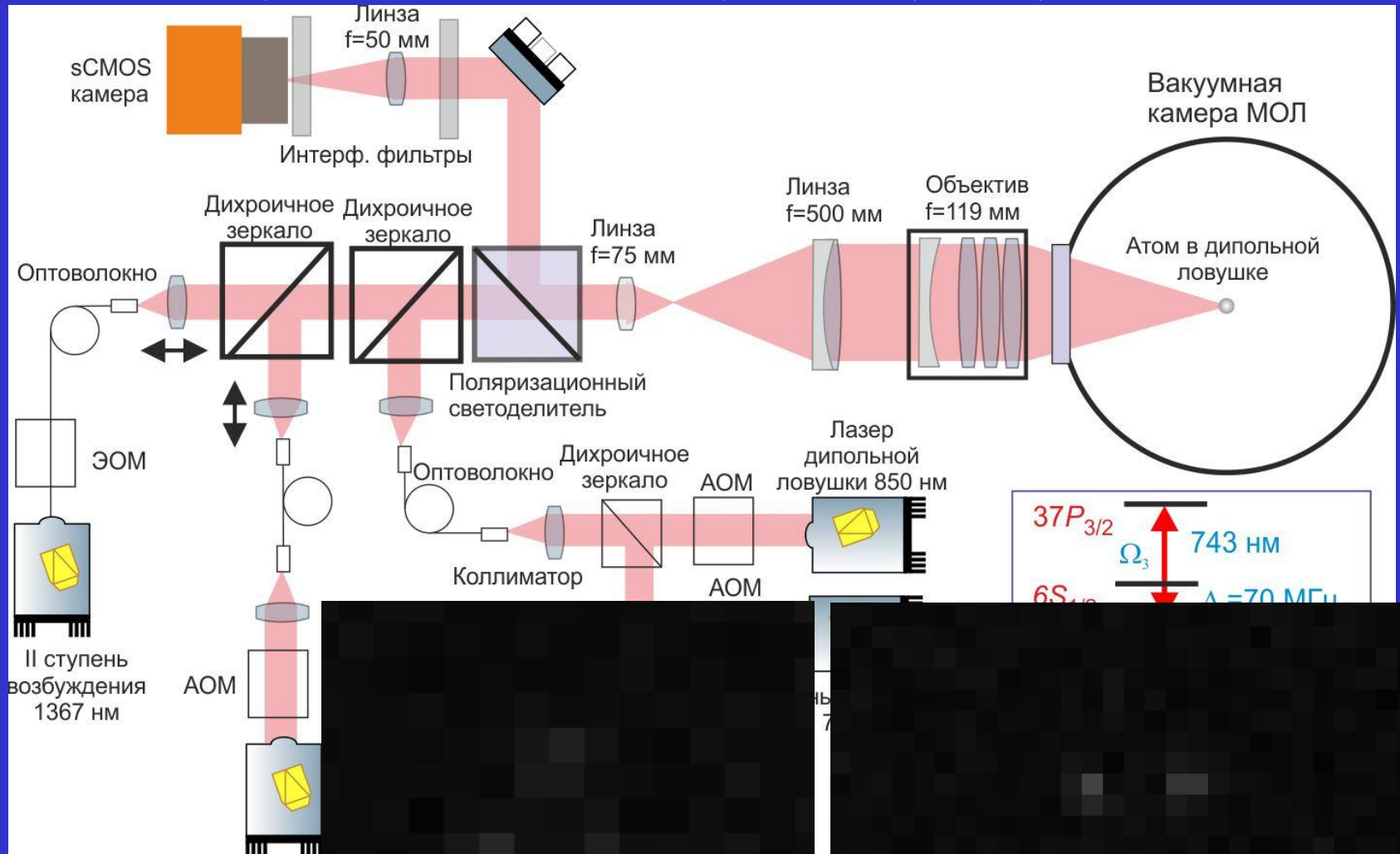
И.И.Бетеров, Е.А.Якшина, В.М.Энтин, Д.Б.Третьяков, К.Ю.Митянин, Н.В.Альянова, И.И.Рябцев



Экспериментальные записи осцилляций Раби, приведенных к масштабу площади СВЧ-импульса. Вертикальные линии задают точки 1-4 для пересечения площадей $\pi/2$, π , $3\pi/2$, 2π с экспериментальными осцилляциями для определения точности выполнения однокубитовых операций. (а) Осцилляции Раби в ловушке 1 и перекрестная помеха в ловушке 2 при настройке луча лазера адресации на ловушку 2 ($F_{AOD}=99,5$ МГц). (б) Осцилляции Раби в ловушке 2 и перекрестная помеха в ловушке 1 при настройке луча лазера адресации на ловушку 1 ($F_{AOD}=100,5$ МГц). Лазер адресации выводит атом из резонанса с СВЧ.

- ❖ Реализован захват и удержание двух атомов ^{87}Rb в двух оптических дипольных ловушках.
- ❖ Получены осцилляции населенностей Раби на "часовом" СВЧ-переходе $5S_{1/2}(F=2, M_F=0) \rightarrow 5S_{1/2}(F=1, M_F=0)$ в каждом атоме с индивидуальной адресацией.
- ❖ Осцилляции Раби соответствуют реализации операций Адамара и НЕ со средней точностью $97 \pm 3\%$.

Ведутся эксперименты по реализации двух- и трехкубитовых квантовых операций на основе возбуждения ридберговских состояний



Реализованы массивы с 3 и 4 одиночными атомами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Квантовые компьютеры могут быть альтернативой специализированным высокопроизводительным вычислительным системам для решения ряда задач, имеющих квантовые алгоритмы.
- Квантовые компьютеры используют квантовый параллелизм для ускорения вычислений и требуют сравнительно малого числа кубитов ($\sim 10^3$ - 10^4).
- Наибольшее развитие получили физические реализации квантового компьютера на основе одиночных ионов и сверхпроводниковых кубитов. Однако оба варианта имеют проблемы с масштабированием до 10^3 - 10^4 кубитов при сохранении точности.
- Перспективным вариантом кубитов являются нейтральные атомы в оптических ловушках. Они могут масштабироваться к большому числу кубитов и управляться лазерными импульсами и межатомными взаимодействиями.
- Создание квантового компьютера в РФ требует как большого финансирования, так и широкой кооперации физиков, математиков, инженеров и программистов.