



N*



Квантовые компьютеры на основе ультрахолодных атомов

Семинар «Высокопроизводительные вычисления»

*Илья Игоревич Бетеров
ИФП СО РАН, НГУ, НГТУ, ИЛФ СО РАН*



Идея квантового компьютера

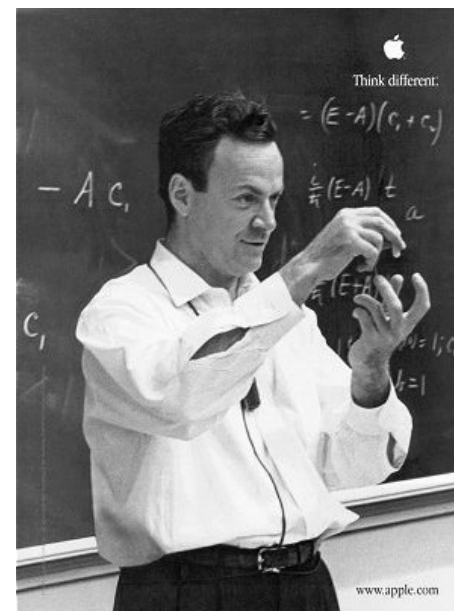
Юрий Манин



“Вычислимое и невычислимое”,
1980

Для моделирования ДНК нужен
квантовый автомат

Ричард Фейнман



“Моделирование физики
на компьютерах”,
“Квантовые компьютеры”,
1981



История и математическая основа квантовой информатики

NISQ и квантовые алгоритмы

Физические системы для квантовых вычислений

Кубиты в Новосибирске

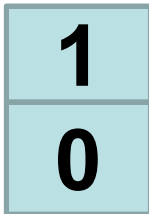


История квантовой информатики

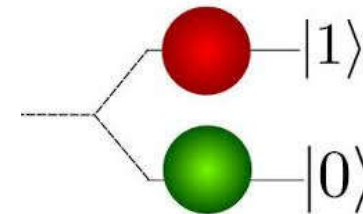
- 196x** С. Визнер, сопряженное кодирование
- 1973** А.С. Холево «Теорема Холево». Ч. Беннет – обратимые вычисления
- 1980** Ю.И. Манин «Вычислимое и невычислимое»
- 1981** Лекции Р. Фейнмана «Моделирование физики на компьютерах», «Квантовые компьютеры»
- 1984** Алгоритм квантовой криптографии BB84
- 1985** Д. Дойч Описание универсального квантового компьютера
- 1994** П. Шор. Квантовый алгоритм факторизации
И. Цирак, П. Цоллер – схема квантовых вычислений с холодными ионами
- 1995** П. Шор и А. Стин. Схемы коррекции ошибок. К. Монро и Д. Вайнленд – вентиль CNOT
- 1998** Реализация квантового алгоритма на двухкубитовом ЯМР компьютере
- 2011** D-Wave One
- 2017-18** Сверхпроводящие процессоры IBM и Google
- 2018** Квантовый компьютер IonQ с 79 кубитами
- 2019** Квантовое превосходство Google, точные вентили с двумя атомами
- 2021** Квантовое превосходство на фотонном процессоре (Китай)

КВАНТОВЫЙ БИТ

Классический бит
- переключатель



Квантовый бит (кубит) -
двухуровневая квантовая
система



Состояние кубита

$$|\psi_1\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

Состояние пары кубитов

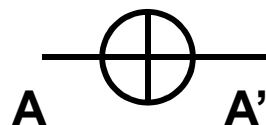
$$|\psi_2\rangle = a|00\rangle + b|01\rangle + c|10\rangle + d|11\rangle$$

Перепутанные состояния

$$|\psi_{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

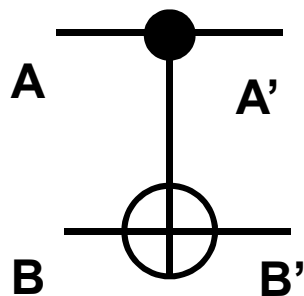
Квантовые вентили

НЕ



A	A'
0	1
1	0

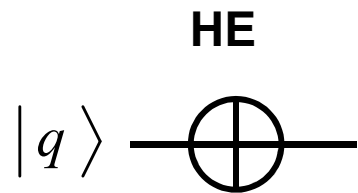
Управляемое НЕ - XOR



A	B	A'	B'
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

Квантовые вентили

Квантовый вентиль описывается матрицами, а не таблицами истинности:

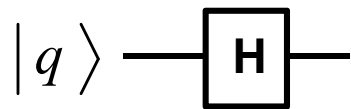


$$|\psi_1\rangle = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

$$NOT = X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

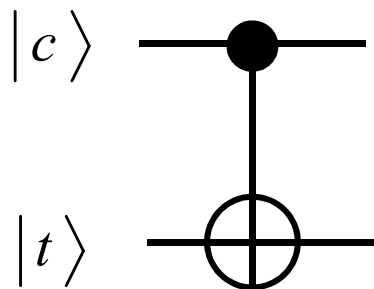
Ключ Адамара



$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$iY = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

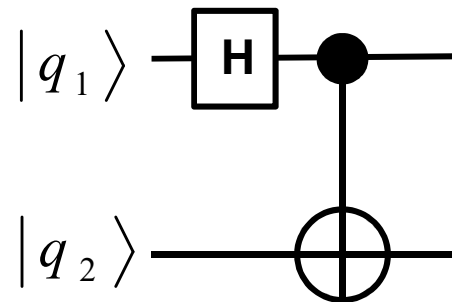
CNOT



$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |00\rangle \\ |01\rangle \\ |10\rangle \\ |11\rangle \end{pmatrix}$$

Квантовые схемы

Пример: генерация перепутанных состояний (парадокс Эйнштейна, Подольского, Розена)



Начальное состояние:

$$|00\rangle$$

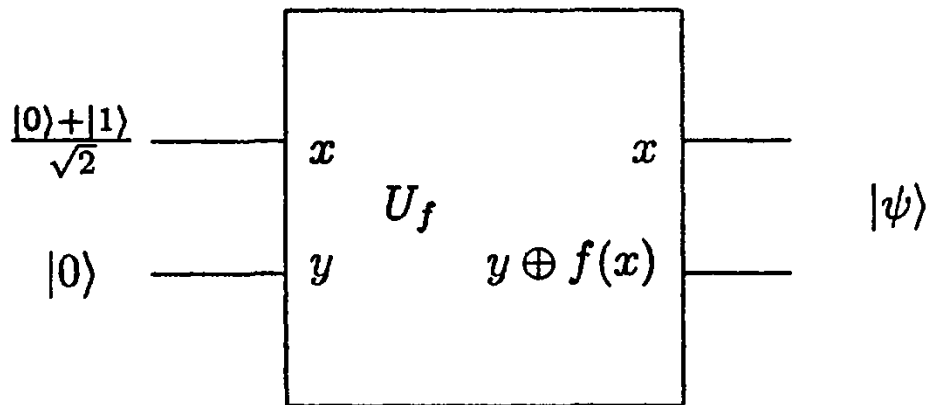
После вентиля Адамара:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle)$$

После CNOT:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Квантовый параллелизм



Функции одного бита:

	f(0)	f(1)	
f1	0	0	C
f2	1	1	C
f3	0	1	B
f4	1	0	B

Начальное состояние:

$$|\psi_{in}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)|0\rangle$$

После выполнения операции «черным ящиком»:

$$|\psi_{out}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle|f(0)\rangle + |1\rangle|f(1)\rangle)$$

Квантовый параллелизм: функция двух начальных состояний вычисляется одновременно



История и математическая основа квантовой информатики

NISQ и квантовые алгоритмы

Физические системы для квантовых вычислений

Кубиты в Новосибирске



Шумные квантовые компьютеры промежуточного масштаба (NISQ)

Quantum Computing in the NISQ era and beyond

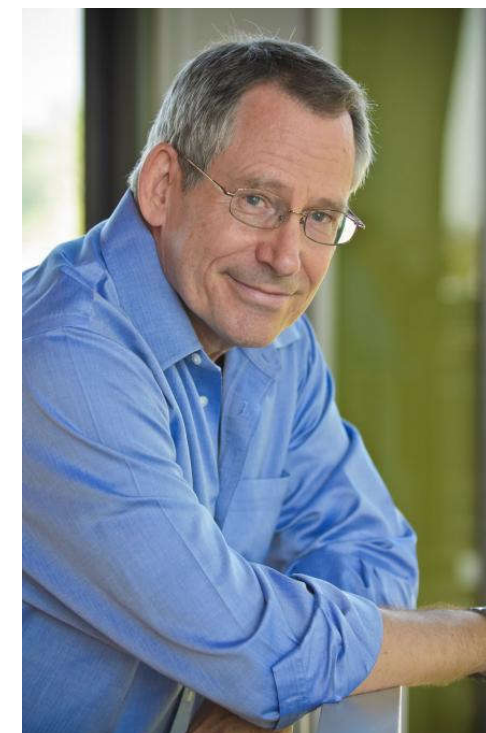
John Preskill

*Institute for Quantum Information and Matter
California Institute of Technology, Pasadena CA 91125, USA*

27 January 2018

Abstract

Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) technology will be available in the near future. Quantum computers with 50-100 qubits may be able to perform tasks which surpass the capabilities of today's classical digital computers, but noise in quantum gates will limit the size of quantum circuits that can be executed reliably. NISQ devices will be useful tools for exploring many-body quantum physics, and may have other useful applications, but the 100-qubit quantum computer will not change the world right away — we should regard it as a significant step toward the more powerful quantum technologies of the future. Quantum technologists should continue to strive for more accurate quantum gates and, eventually, fully fault-tolerant quantum computing.





Тезисы Прескилла

Квантовая информатика – новый фронт в физических исследованиях

Впервые в истории у нас появились возможности создавать и управлять перепутанными состояниями многочастичных квантовых систем

Принцип квантовой сложности и квантовой коррекции ошибок

Преимущества квантовых компьютеров: существование квантовых алгоритмов для классически неразрешимых задач, теория сложности, невозможность моделирования квантового компьютера на классическом

Промежуточный этап: 50-100 кубитов с точностью лучше 1%



NISQ

Архитектура современных процессоров: связи между отдельными кубитами (не всеми)

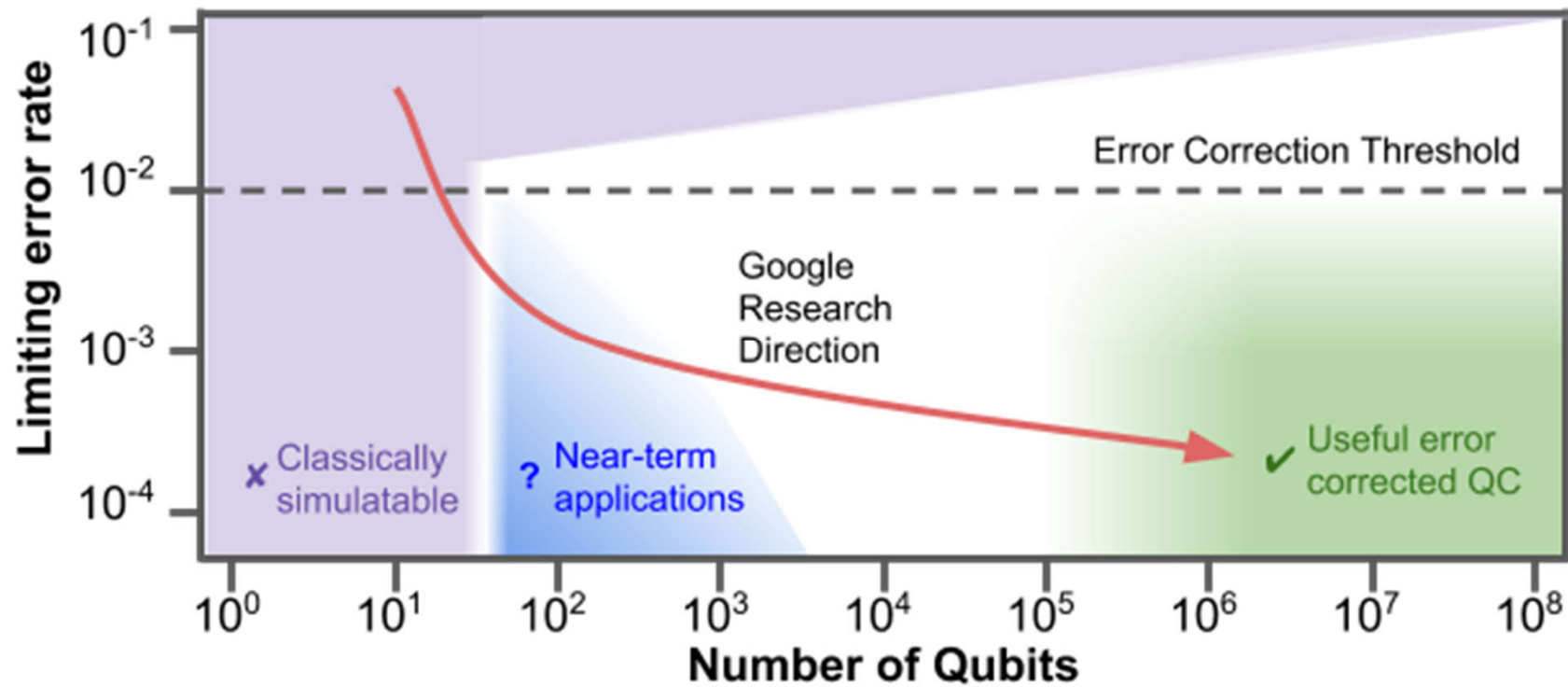
Небольшая глубина алгоритмов (из-за ошибок)

Частичное использование коррекции ошибок

Классические вычисления и использование «квантового ядра» для вычислительно сложных элементов алгоритма



Перспективы





NISQ arXiv:2101.08448v2

Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms

Kishor Bharti,^{1, *} Alba Cervera-Lierta,^{2,3, *} Thi Ha Kyaw,^{2,3, *} Tobias Haug,⁴ Sumner Alperin-Lea,³ Abhinav Anand,³ Matthias Degroote,^{2,3,5} Hermanni Heimonen,¹ Jakob S. Kottmann,^{2,3} Tim Menke,^{6,7,8} Wai-Keong Mok,¹ Sukin Sim,⁹ Leong-Chuan Kwek,^{1,10,11, †} and Alán Aspuru-Guzik^{2,3,12,13, ‡}

¹Centre for Quantum Technologies, National University of Singapore 117543, Singapore

²Department of Computer Science, University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 2E4, Canada

³Chemical Physics Theory Group, Department of Chemistry, University of Toronto, Toronto, Ontario M5G 1Z8, Canada

⁴QOLS, Blackett Laboratory, Imperial College London SW7 2AZ, UK

⁵current address: Boehringer Ingelheim, Amsterdam, Netherlands

⁶Department of Physics, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

⁷Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

⁸Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

⁹Department of Chemistry and Chemical Biology, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

¹⁰MajuLab, CNRS-UNS-NUS-NTU International Joint Research Unit UMI 3654, Singapore

¹¹National Institute of Education and Institute of Advanced Studies, Nanyang Technological University 637616, Singapore

¹²Vector Institute for Artificial Intelligence, Toronto, Ontario M5S 1M1, Canada

¹³Canadian Institute for Advanced Research, Toronto, Ontario M5G 1Z8, Canada



Теория сложности arXiv:2101.08448v2

EXPTIME: classically solvable in exponential time
Unrestricted chess on an $n \times n$ board

PSPACE: classically solvable in polynomial space
Restricted chess on an $n \times n$ board

QMA: quantumly verifiable in polynomial time

NP: classically verifiable in polynomial time

NP-Complete: hardest problems in NP
Traveling salesman problem

P: classically solvable in polynomial time
Testing whether a number is prime

Integer factorization

BQP: quantumly solvable in polynomial time

QMA-Complete: hardest problems in QMA
Quantum Hamiltonian ground state problem

P – задача решается за полиномиальное время
NP – решение проверяется за полиномиальное время
BPP – решается на вероятностной машине Тьюринга за полиномиальное время
BQP – решается на квантовом компьютере, если вероятность правильного выхода $2/3$

Типы квантовых алгоритмов

arXiv:1804.03719v2

Основные парадигмы:

- Оператор Гровера (GO)
- Квантовое преобразование Фурье (QFT)
- Алгоритм Харроу - Хассидим - Ллойда (HHL)
- Вариационный поиск собственных значений (VQE)
- Прямое моделирование гамильтониана (SIM)

Типы квантовых алгоритмов

arXiv:1804.03719v2

Класс	Проблема/алгоритм	Инструмент
Расчет обратной функции	Алгоритм Гровера	GO
	Алгоритм Бернштейна-Вазириани	n/a
Теория чисел	Алгоритм Шора	QFT
Алгебраические задачи	Системы линейных уравнений	HHL
	Матричные элементы представления группы	QFT
	Проверка произведения матриц	GO
	Изоморфизм подгрупп	QFT
Графы	Квантовые случайные блуждания	n/a
	Минимальное остовное дерево	GO
	Задача о максимальном потоке	GO
	Приблизительные квантовые алгоритмы	SIM
Машинное обучение	Квантовый метод главных компонент	QFT
	Квантовый метод опорных векторов	QFT
	Статистическая сумма	QFT

Типы квантовых алгоритмов

arXiv:1804.03719v2

Класс	Проблема/алгоритм	Инструмент
Квантовое моделирование	Моделирование уравнения Шрёдингера	SIM
	Поперечная модель Изинга	VQE
Вспомогательные алгоритмы	Приготовление начального состояния	
	Квантовая томография	
	Квантовая коррекция ошибок	



Приложения NISQ алгоритмов

Физика многочастичных систем и квантовая химия
 определение энергии молекул
 анализ механизмов химических реакций
 вариационные квантовые симуляторы

Квантовое машинное обучение

Комбинаторная оптимизация (графы)

Решение вычислительных задач (факторизация, решение систем линейных уравнений)



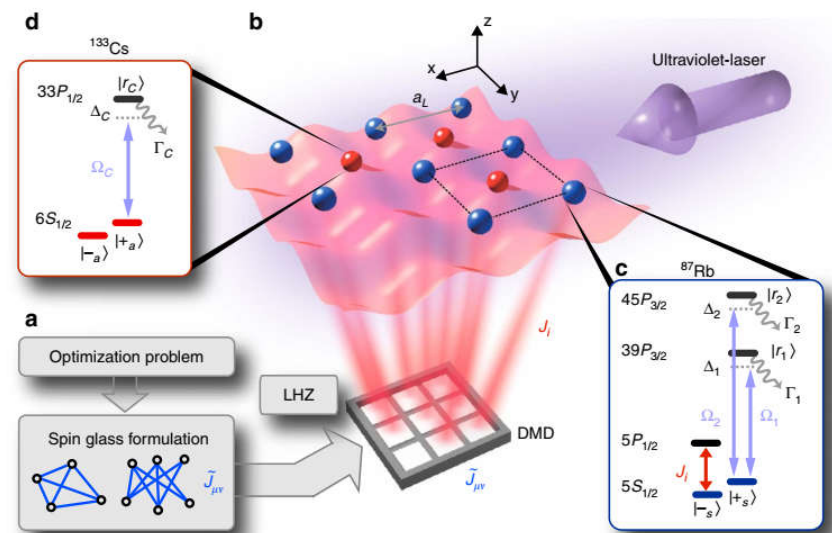
ARTICLE

Received 27 Oct 2016 | Accepted 4 May 2017 | Published 22 Jun 2017

DOI: 10.1038/ncomms15813 OPEN

A coherent quantum annealer with Rydberg atoms

A.W. Glaetzle^{1,2,3,4,*}, R.M.W. van Bijnen^{1,2,*}, P. Zoller^{1,2} & W. Lechner^{1,2}





Геофизика

Quantum computing in geophysics: algorithms, computational costs and future applications

Shahpoor Moradi¹, Daniel Trad¹, and Kristopher A. Innanen¹

¹University of Calgary, Department of Geoscience, Calgary, Canada

Распространение сейсмических волн в трехмерной модели Земли.
Проблема: размерность системы. Решение: алгоритм HHL

Алгоритм Дейкстры

ISSN 0278-6419, Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics, 2019, Vol. 43, No. 1, pp. 47–51. © Allerton Press, Inc., 2019.
Russian Text © K.R. Khadiev, L.I. Safina, 2019, published in Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 15: Vychislitel'naya Matematika i Kibernetika, 2019, No. 1, pp. 76–83.

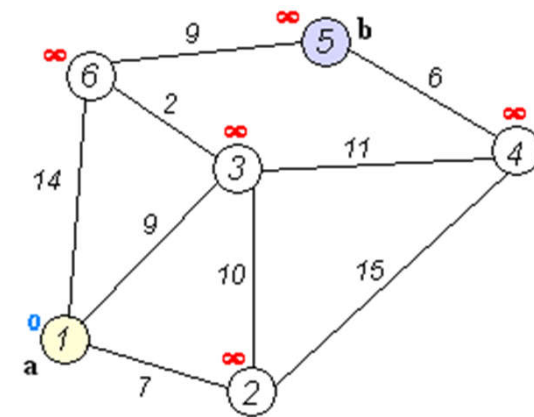
Quantum Algorithm for Shortest Path Search in Directed Acyclic Graph[#]

K. R. Khadiev^{1,2*} and L. I. Safina^{2**}

¹ООО Квантовые Интеллектуальные Технологии, Kazan, 420111 Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

Received July 26, 2018





История и математическая основа квантовой информатики

NISQ и квантовые алгоритмы

Физические системы для квантовых вычислений

Кубиты в Новосибирске



Критерии ди Винченцо

Пять критериев для создания квантового компьютера

1. Квантовый регистр должен состоять из множества кубитов – квантовых систем
2. Перед началом вычислений квантовый регистр должен быть инициализирован
3. Время разрушения когерентных квантовых состояний (декогерентизации) кубитов должно быть большим
4. Должны выполняться обратимые квантовые логические операции над парами кубитов
5. Конечное состояние регистра должно быть надежно измерено

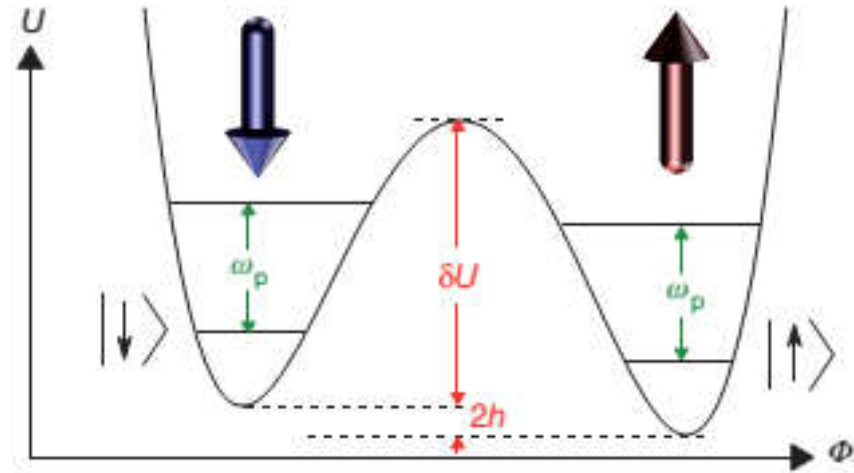
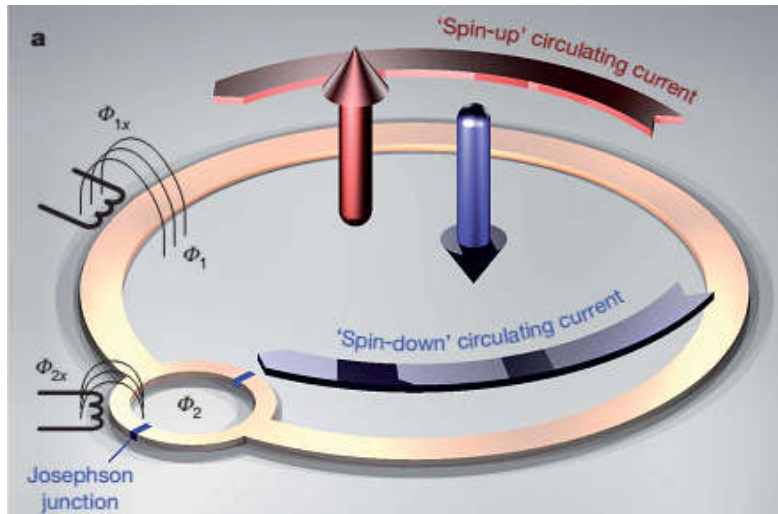
D.P. DiVincenzo "Quantum computation", Science. 1995. V. 270. P. 255.

D.P. DiVincenzo "The Physical Implementation of Quantum Computation", Fortschr.Phys. 2000. V. 48. P. 771.

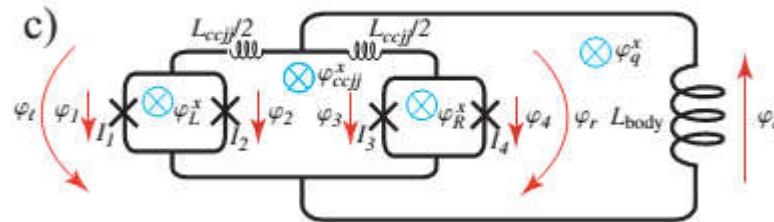


Сверхпроводящие кубиты

Разрыв в сверхпроводящем кольце - переход Джозефсона



M.W. Johnson et al., Nature 473, 194-198 (2011)

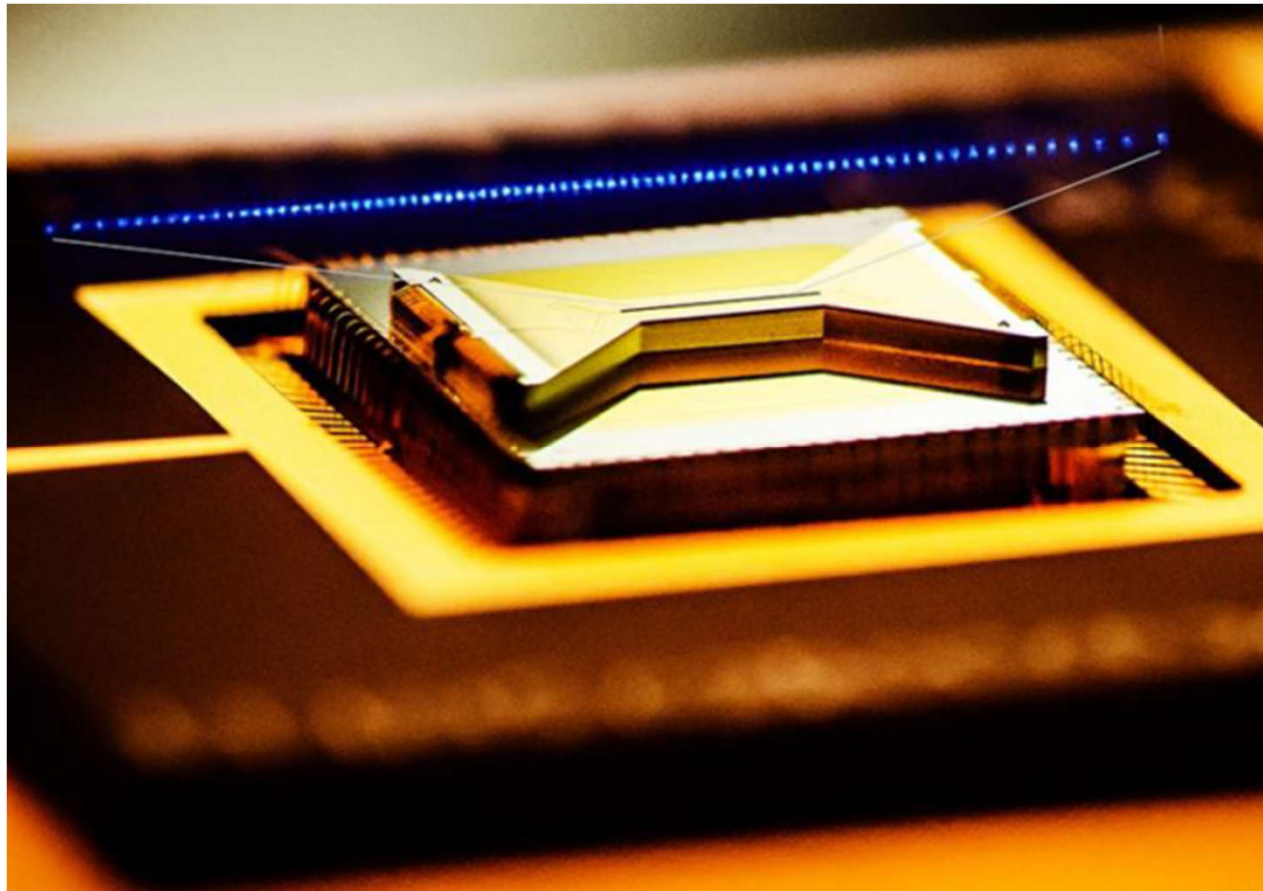


Элементы процессора D-Wave: Phys. Rev. B 81, 134510 (2010) ²⁴



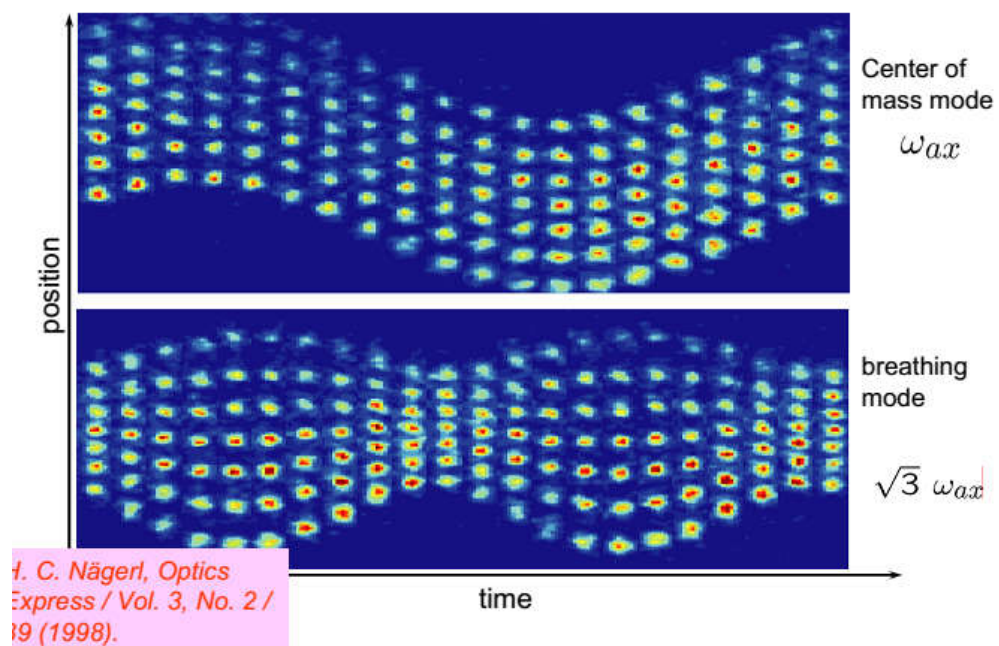
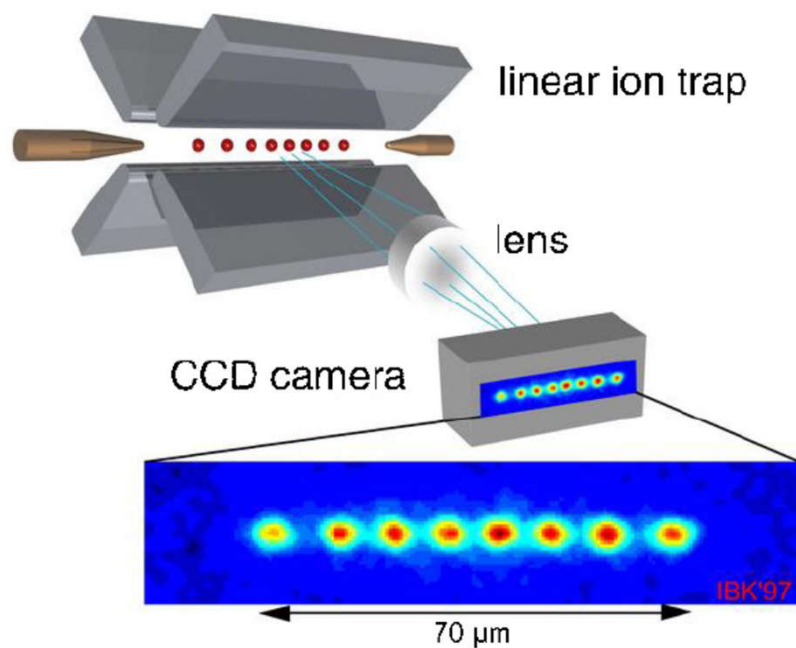
Процессор IonQ

<https://www.research.ibm.com/ibm-q/>



<https://physicsworld.com/a/ion-based-commercial-quantum-computer-is-a-first//>

Ловушка для ионов





Квантовое превосходство

PHYSICAL REVIEW LETTERS **127**, 180501 (2021)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

Strong Quantum Computational Advantage Using a Superconducting Quantum Processor

Yulin Wu,^{1,2,3} Wan-Su Bao,⁴ Sirui Cao,^{1,2,3} Fusheng Chen,^{1,2,3} Ming-Cheng Chen,^{1,2,3} Xiawei Chen,² Tung-Hsun Chung,^{1,2,3} Hui Deng,^{1,2,3} Yajie Du,² Daojin Fan,^{1,2,3} Ming Gong,^{1,2,3} Cheng Guo,^{1,2,3} Chu Guo,^{1,2,3} Shaojun Guo,^{1,2,3} Lianchen Han,^{1,2,3} Linyin Hong,⁵ He-Liang Huang,^{1,2,3,4} Yong-Heng Huo,^{1,2,3} Liping Li,² Na Li,^{1,2,3} Shaowei Li,^{1,2,3} Yuan Li,^{1,2,3} Futian Liang,^{1,2,3} Chun Lin,⁶ Jin Lin,^{1,2,3} Haoran Qian,^{1,2,3} Dan Qiao,² Hao Rong,^{1,2,3} Hong Su,^{1,2,3} Lihua Sun,^{1,2,3} Liangyuan Wang,² Shiyu Wang,^{1,2,3} Dachao Wu,^{1,2,3} Yu Xu,^{1,2,3} Kai Yan,² Weifeng Yang,⁵ Yang Yang,² Yangsen Ye,^{1,2,3} Jianghan Yin,² Chong Ying,^{1,2,3} Jiale Yu,^{1,2,3} Chen Zha,^{1,2,3} Cha Zhang,^{1,2,3} Haibin Zhang,² Kaili Zhang,^{1,2,3} Yiming Zhang,^{1,2,3} Han Zhao,² Youwei Zhao,^{1,2,3} Liang Zhou,⁵ Qingling Zhu,^{1,2,3} Chao-Yang Lu,^{1,2,3} Cheng-Zhi Peng,^{1,2,3} Xiaobo Zhu^{1,2,3} and Jian-Wei Pan^{1,2,3}

¹Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale and Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

²Shanghai Branch, CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Shanghai 201315, China

³Shanghai Research Center for Quantum Sciences, Shanghai 201315, China

⁴Henan Key Laboratory of Quantum Information and Cryptography, Zhengzhou 450000, China

⁵QuantumCTek Co., Ltd., Hefei 230026, China

⁶Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

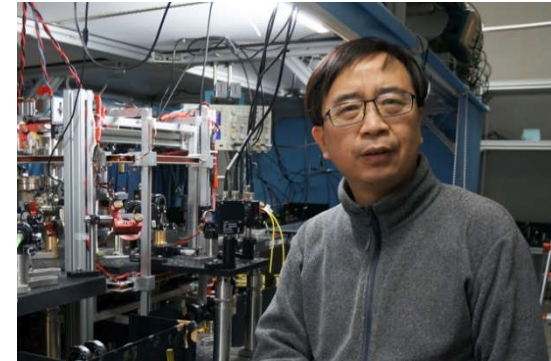


(Received 1 July 2021; accepted 26 August 2021; published 25 October 2021)



Квантовое превосходство

Jian-wei Pan



Phase-Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light

Han-Sen Zhong,^{1,2,*} Yu-Hao Deng,^{1,2,*} Jian Qin,^{1,2,*} Hui Wang,^{1,2} Ming-Cheng Chen,^{1,2} Li-Chao Peng,^{1,2}
Yi-Han Luo,^{1,2} Dian Wu,^{1,2} Si-Qiu Gong,^{1,2} Hao Su,^{1,2} Yi Hu,^{1,2} Peng Hu,³ Xiao-Yan Yang,³ Wei-Jun Zhang,³ Hao Li,³
Yuxuan Li,⁴ Xiao Jiang,^{1,2} Lin Gan,⁴ Guangwen Yang,⁴ Lixing You,³ Zhen Wang,³ Li Li,^{1,2} Nai-Le Liu,^{1,2}
Jelmer J. Renema,⁵ Chao-Yang Lu^{1,2} and Jian-Wei Pan^{1,2}

¹*Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale and Department of Modern Physics,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China*

²*CAS Centre for Excellence and Synergetic Innovation Centre in Quantum Information and Quantum Physics,
University of Science and Technology of China, Shanghai 201315, China*

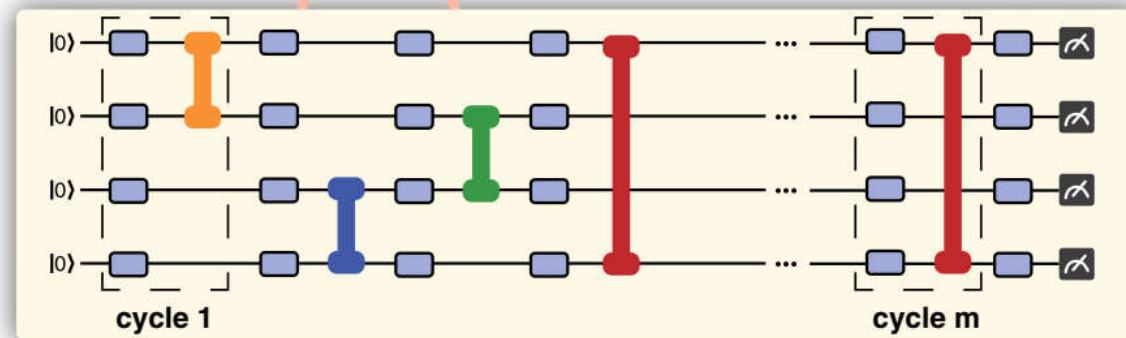
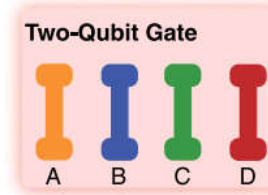
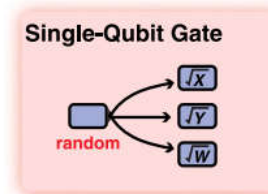
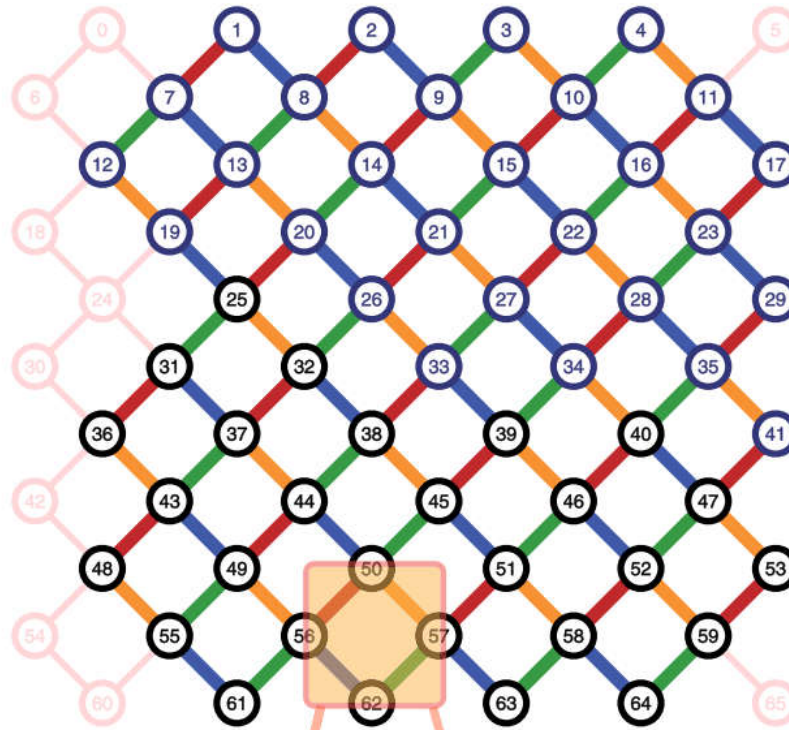
³*State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and
Information Technology (SIMIT), Chinese Academy of Sciences, 865 Changning Road, Shanghai 200050, China*

⁴*Department of Computer Science and Technology and Beijing National Research Center for Information Science and Technology,
Tsinghua University, Beijing, China*

⁵*Adaptive Quantum Optics Group, Mesa+ Institute for Nanotechnology, University of Twente,
P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, Netherlands*



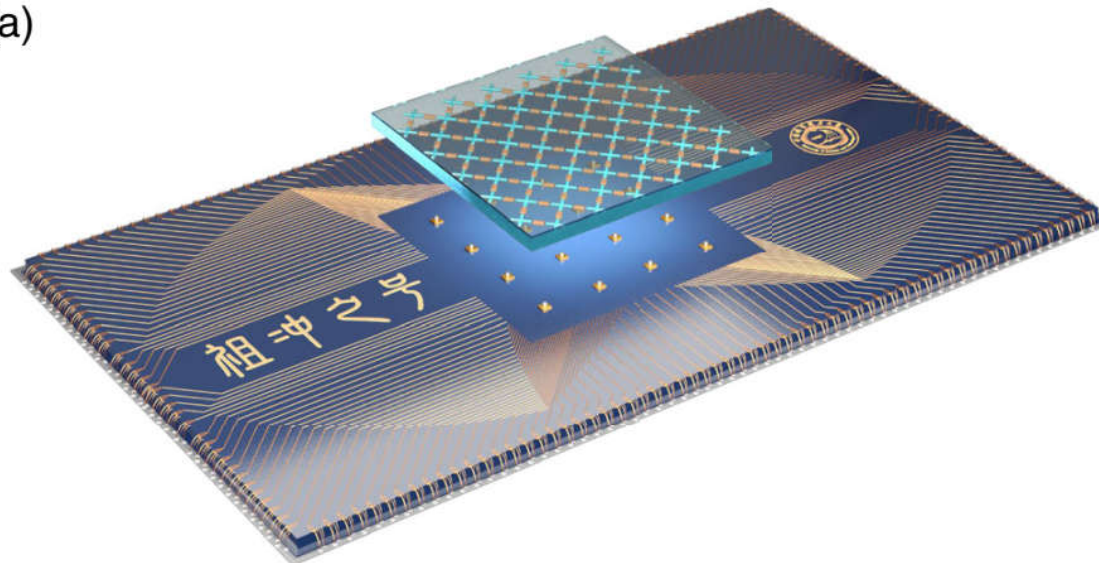
Генерация случайных цепочек



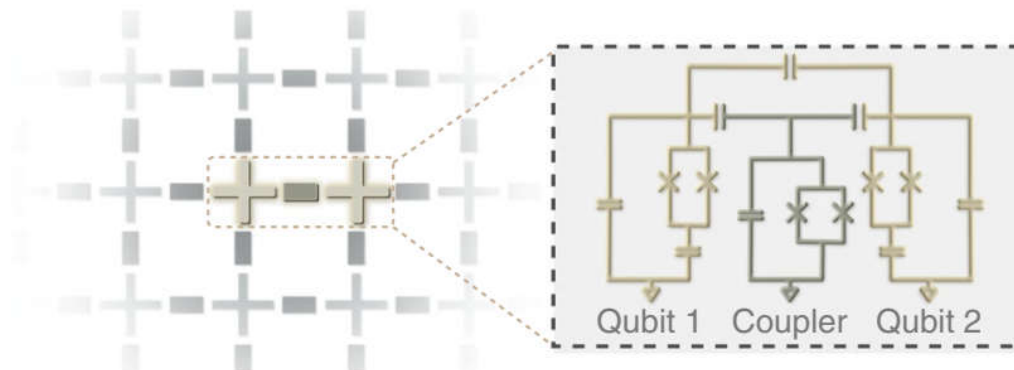


Сверхпроводящий процессор

(a)

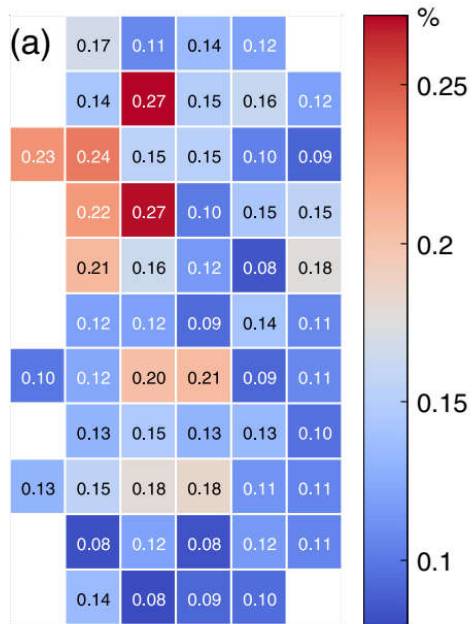


(b)

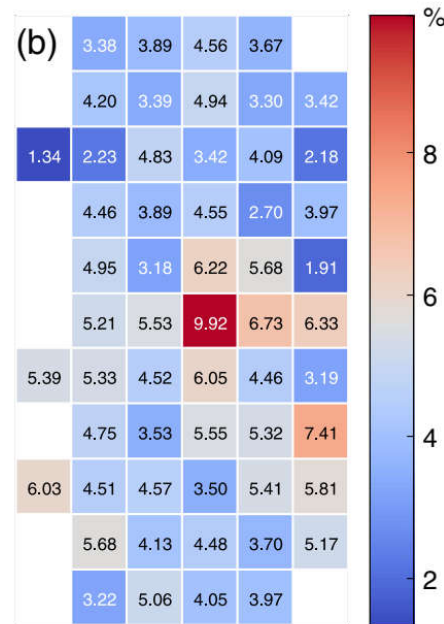




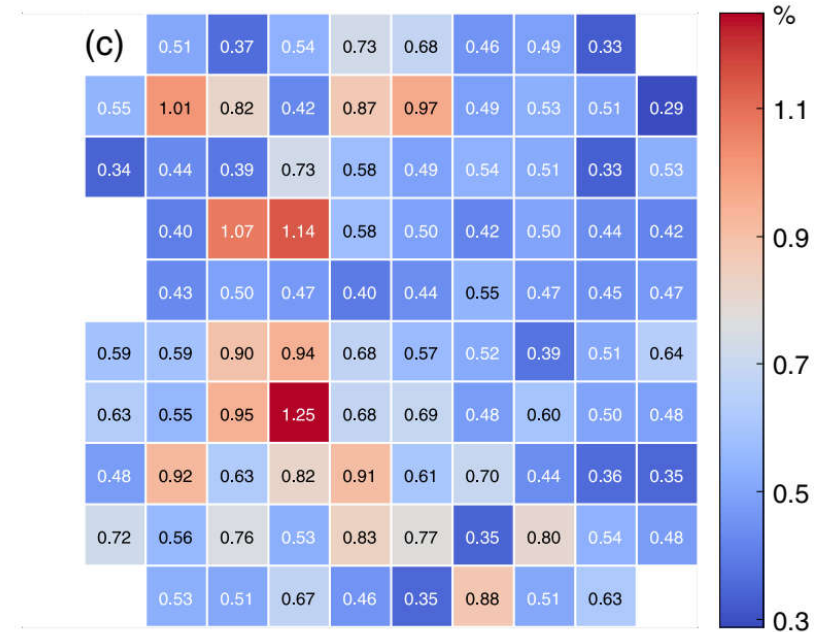
Точность



Average error e_1 : 0.14%



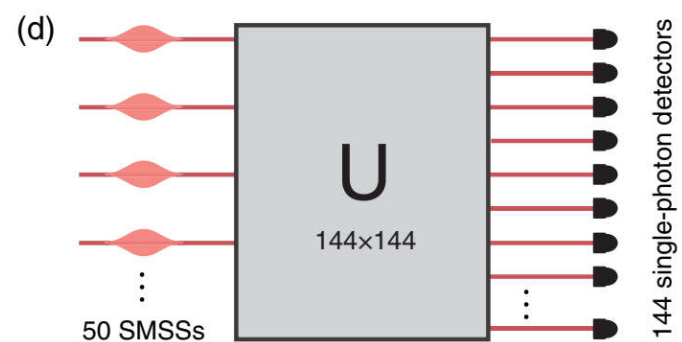
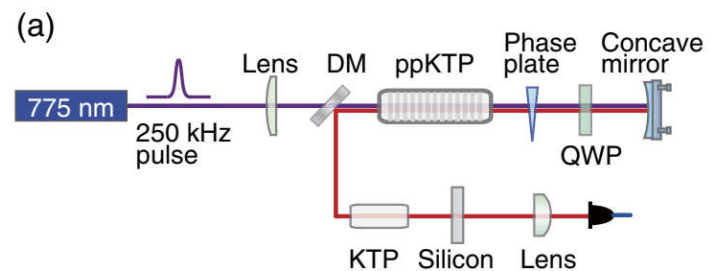
Average error e_r : 4.52%



Average error e_2 : 0.59%



Фотонный процессор





Квантовый процессор на атомах

1. Ультрахолодные атомы (10-100 мК) загружаются в массивы оптических пинцетов
2. Логические состояния кубита - долгоживущие сверхтонкие подуровни основного состояния атомов
3. Инициализация начального состояния - оптическая накачка
4. Переходы между сверхтонкими подуровнями индуцируются СВЧ излучением или двухчастотным лазерным излучением. Нужно индивидуальная адресация
5. Измерение конечного состояния регистра методом резонансной флуоресценции. Необходимы пространственное разрешение и селективность по состояниям
6. Двухкубитовые вентили - кратковременное возбуждение атомов в ридберговские состояния, диполь-дипольное взаимодействие



CNOT

PRL **104**, 010503 (2010)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
8 JANUARY 2010

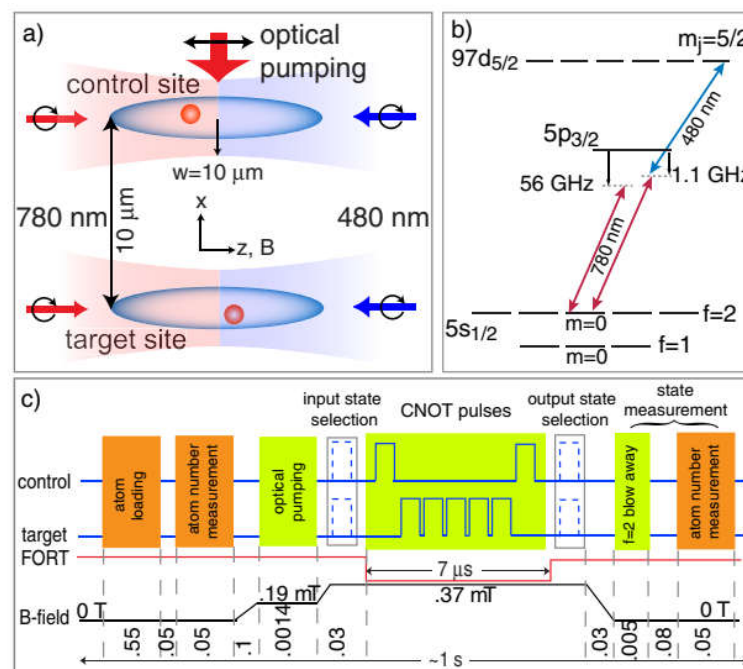
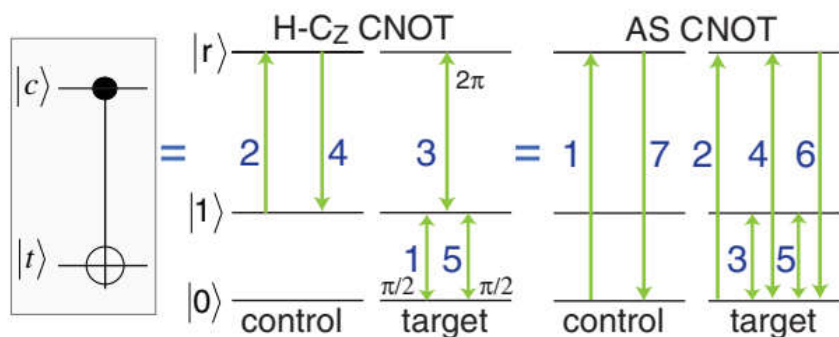
Demonstration of a Neutral Atom Controlled-NOT Quantum Gate

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

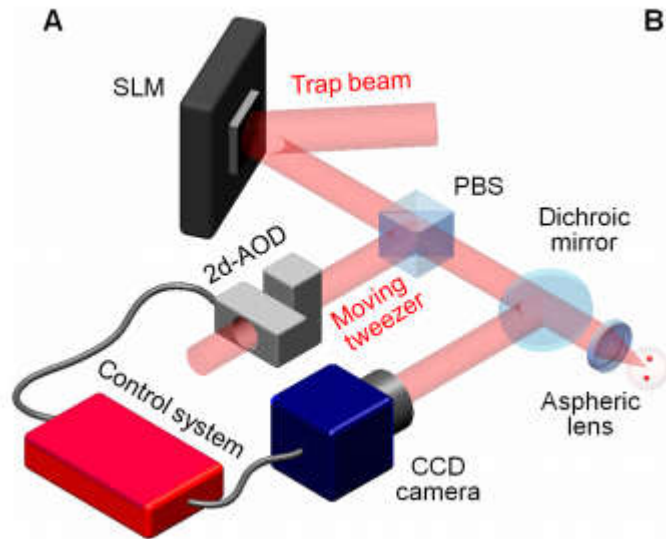
Department of Physics, University of Wisconsin, 1150 University Avenue, Madison, Wisconsin 53706 USA

(Received 5 August 2009; published 8 January 2010)

We present the first demonstration of a CNOT gate between two individually addressed neutral atoms. Our implementation of the CNOT uses Rydberg blockade interactions between neutral atoms held in optical traps separated by $>8 \mu\text{m}$. Using two different gate protocols we measure CNOT fidelities of $F = 0.73$ and 0.72 based on truth table probabilities. The gate was used to generate Bell states with fidelity $F = 0.48 \pm 0.06$. After correcting for atom loss we obtain an *a posteriori* entanglement fidelity of $F = 0.58$.

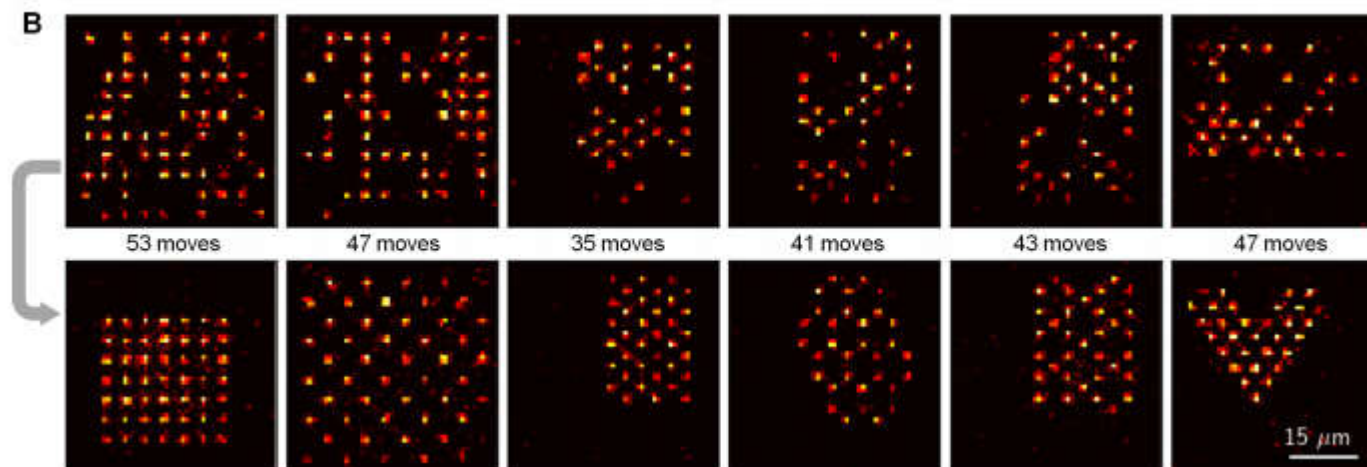


Массивы ловушек



Daniel Barredo et al., **An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary 2d atomic arrays**

Science 25 Nov 2016:
Vol. 354, pp. 1021-1023

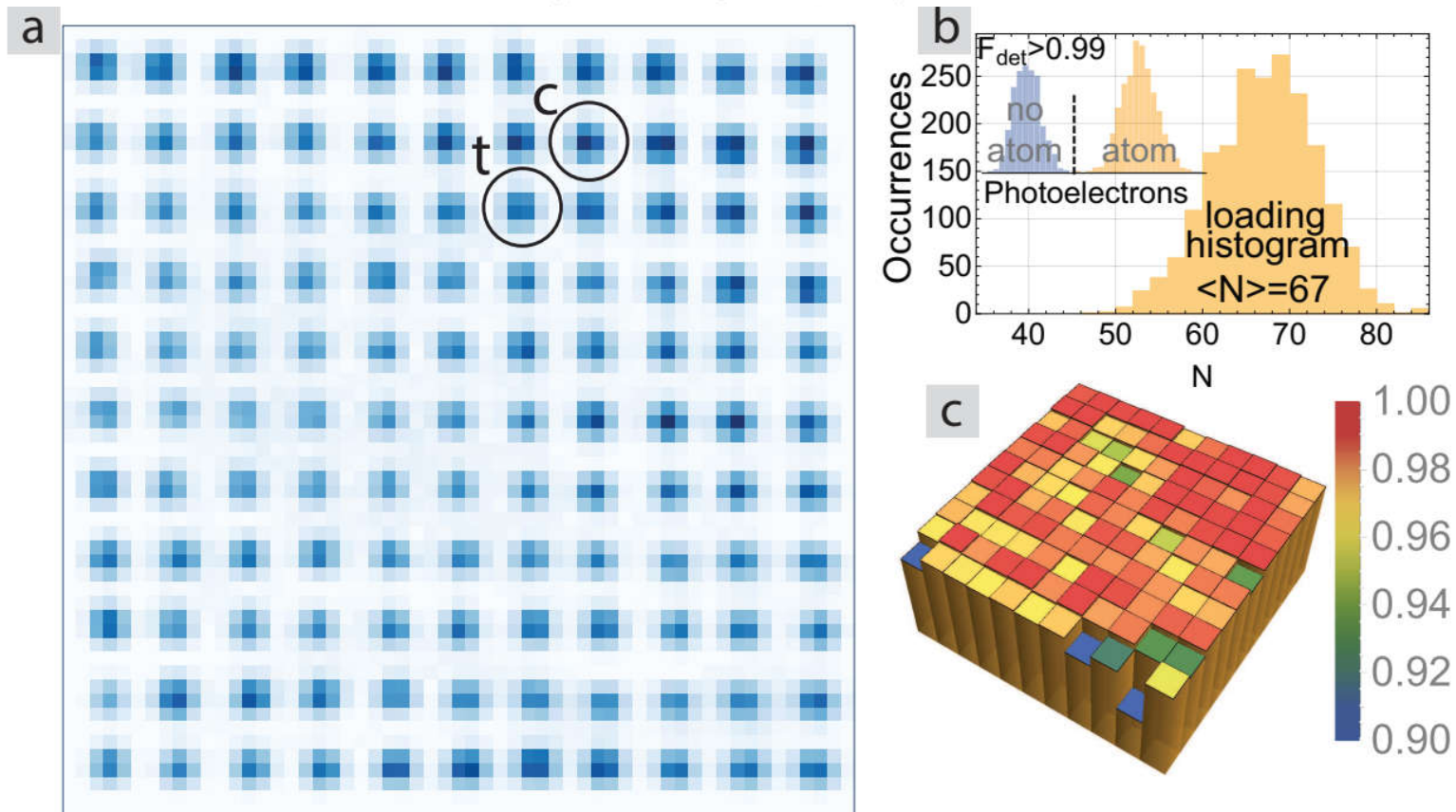




Квантовый регистр на нейтральных атомах

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*
 (Dated: August 20, 2019)





Двухкубитовые вентили

Parallel implementation of high-fidelity multi-qubit gates with neutral atoms

H. Levine,¹ A. Keesling,¹ G. Semeghini,¹ A. Omran,¹ T. T. Wang,^{1,2} S. Ebadi,¹ H. Bernien,³ M. Greiner,¹ V. Vuletić,⁴ H. Pichler,^{1,5} and M. D. Lukin¹

¹Department of Physics, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

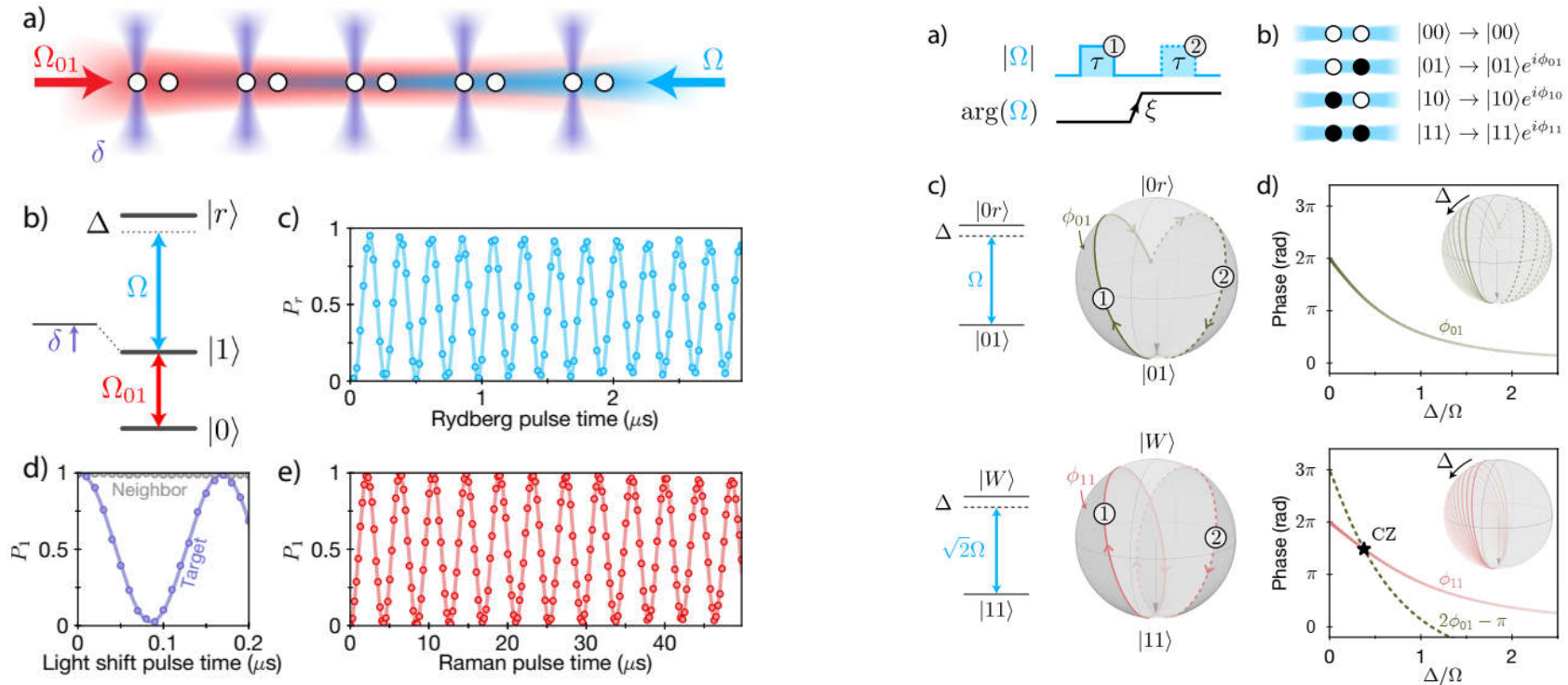
²Department of Physics, Gordon College, Wenham, MA 01984, USA

³Pritzker School of Molecular Engineering, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA

⁴Department of Physics and Research Laboratory of Electronics,

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

⁵ITAMP, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA 02138, USA



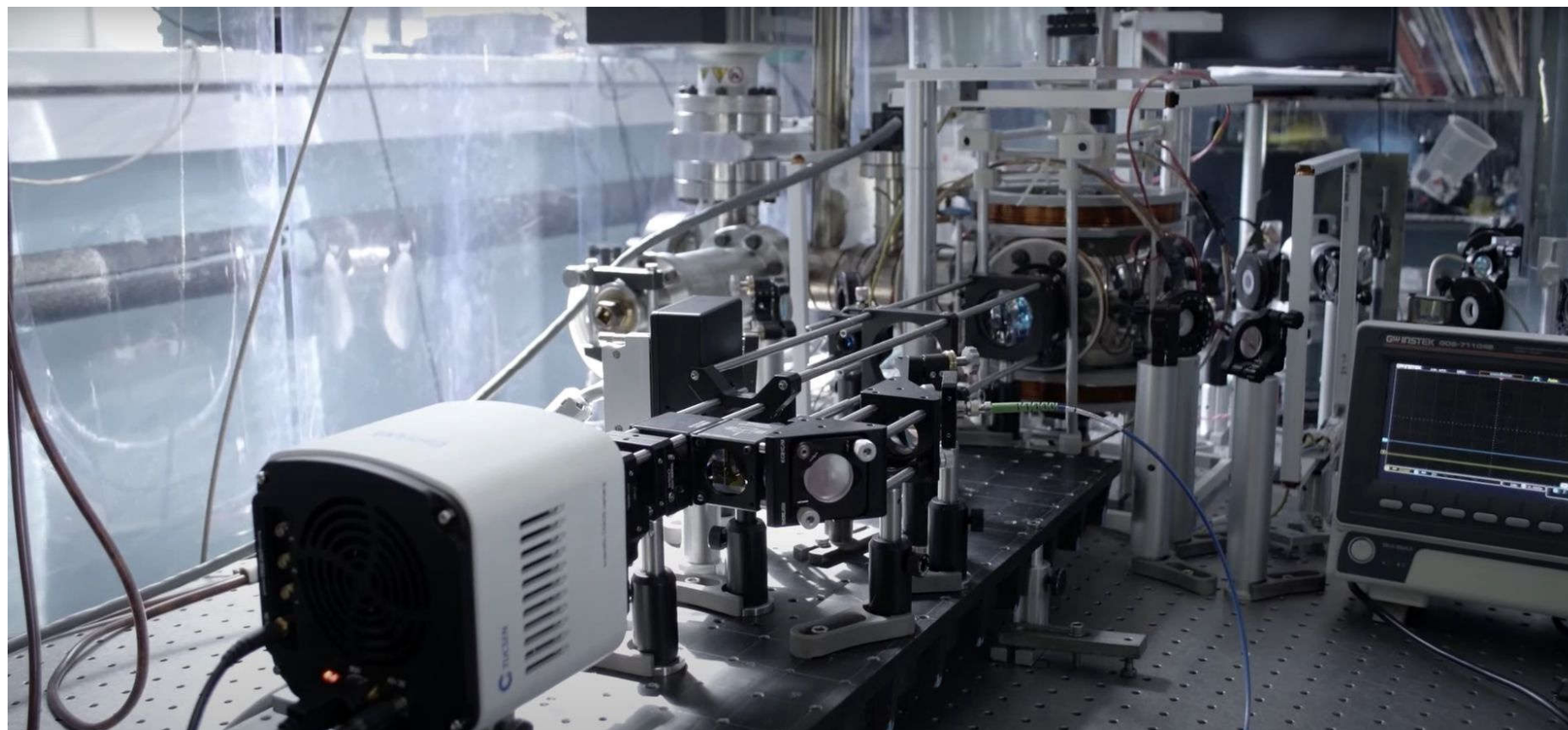


История и математическая основа квантовой информатики

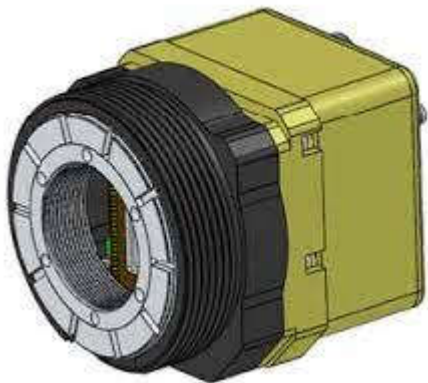
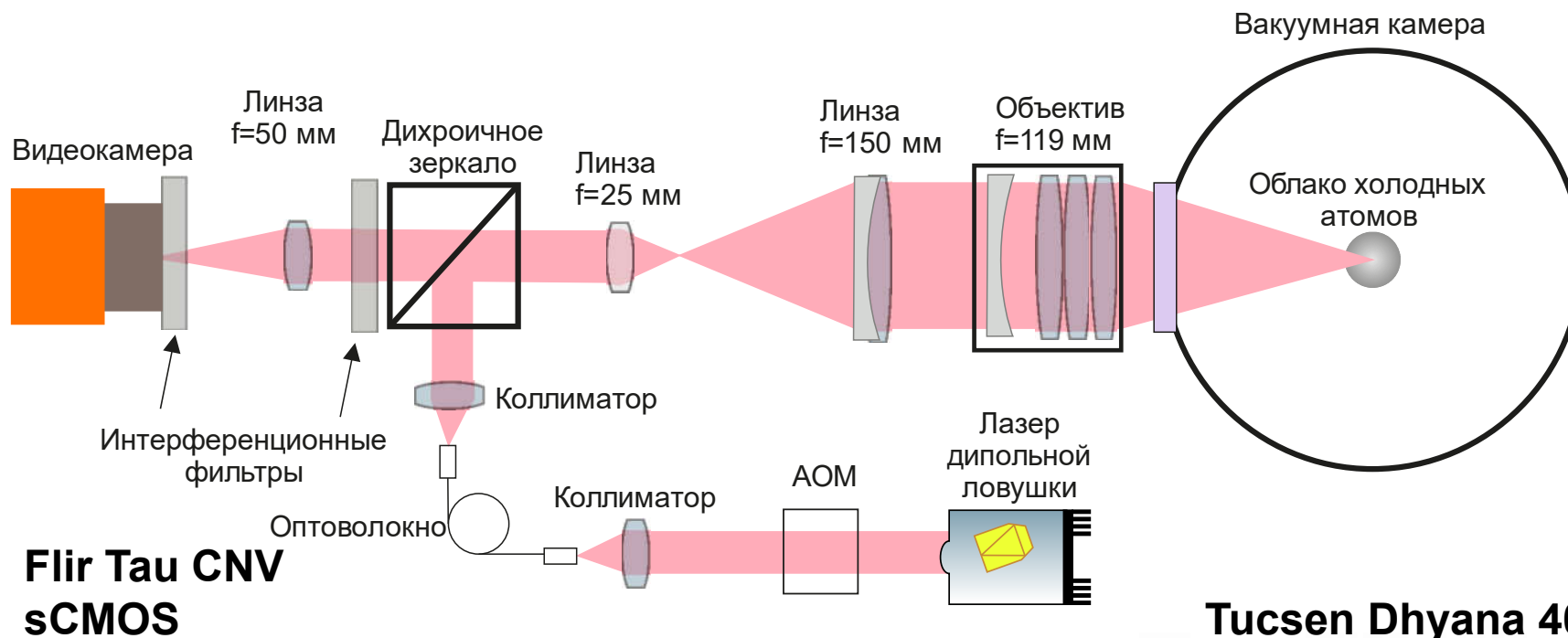
NISQ и квантовые алгоритмы

Физические системы для квантовых вычислений

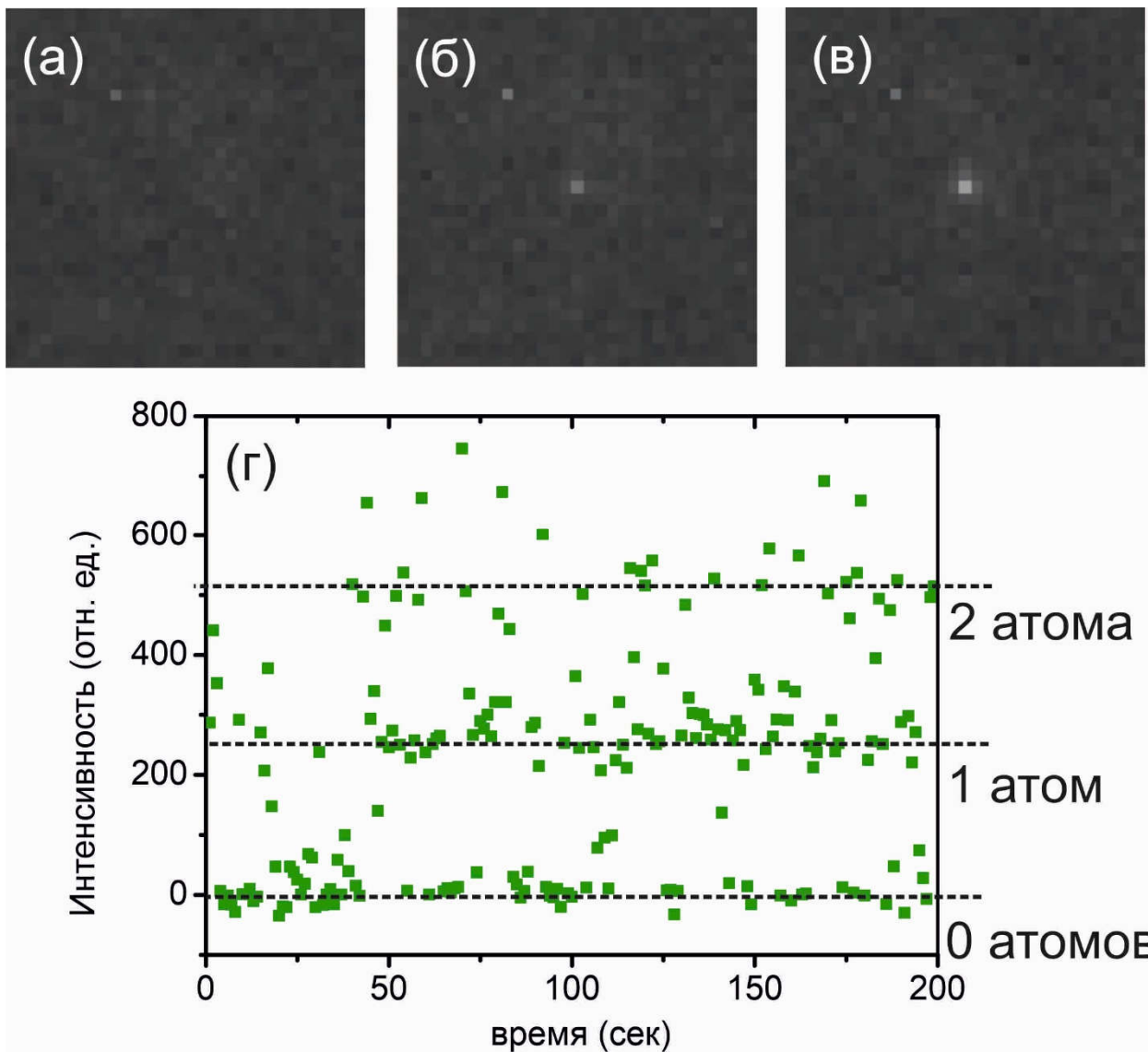
Кубиты в Новосибирске



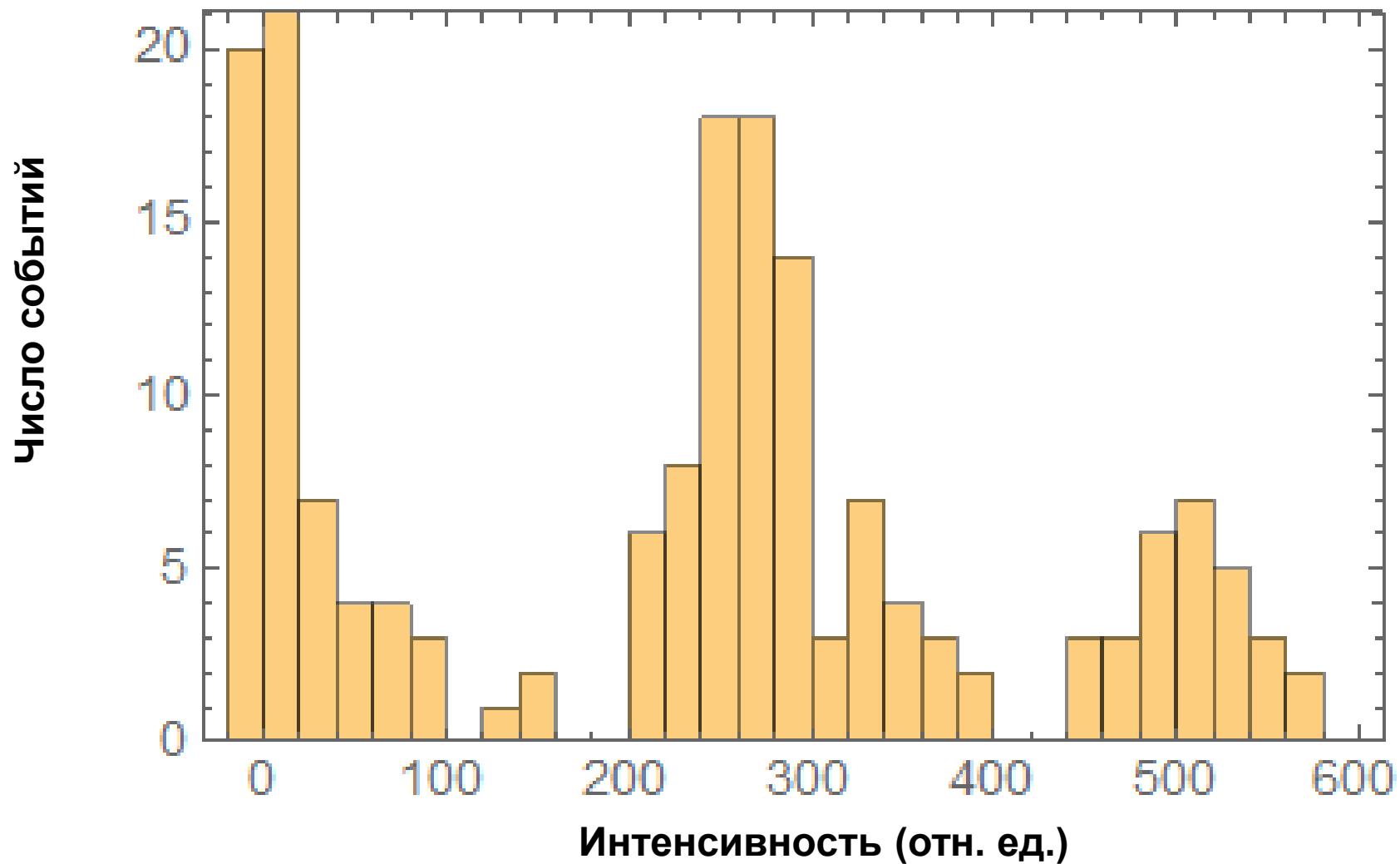
Дипольная ловушка с одним атомом



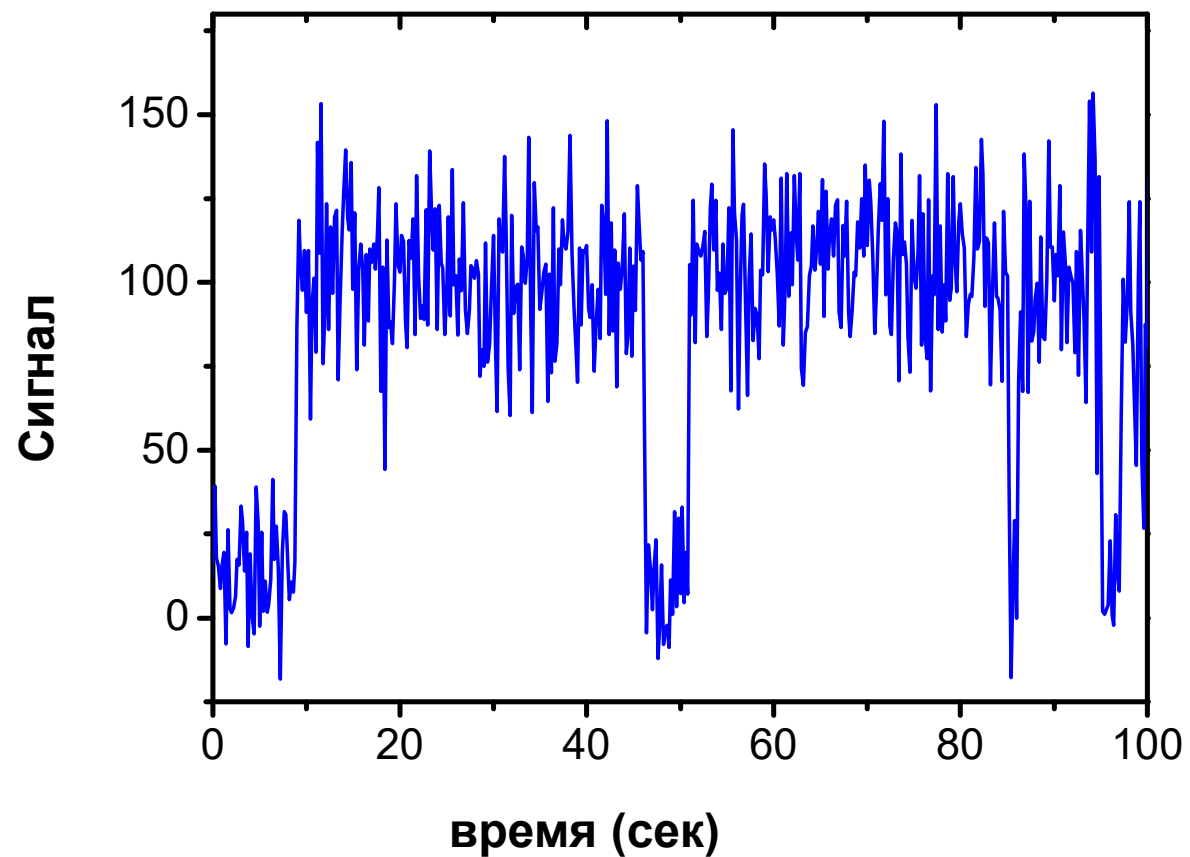
Регистрация отдельного атома



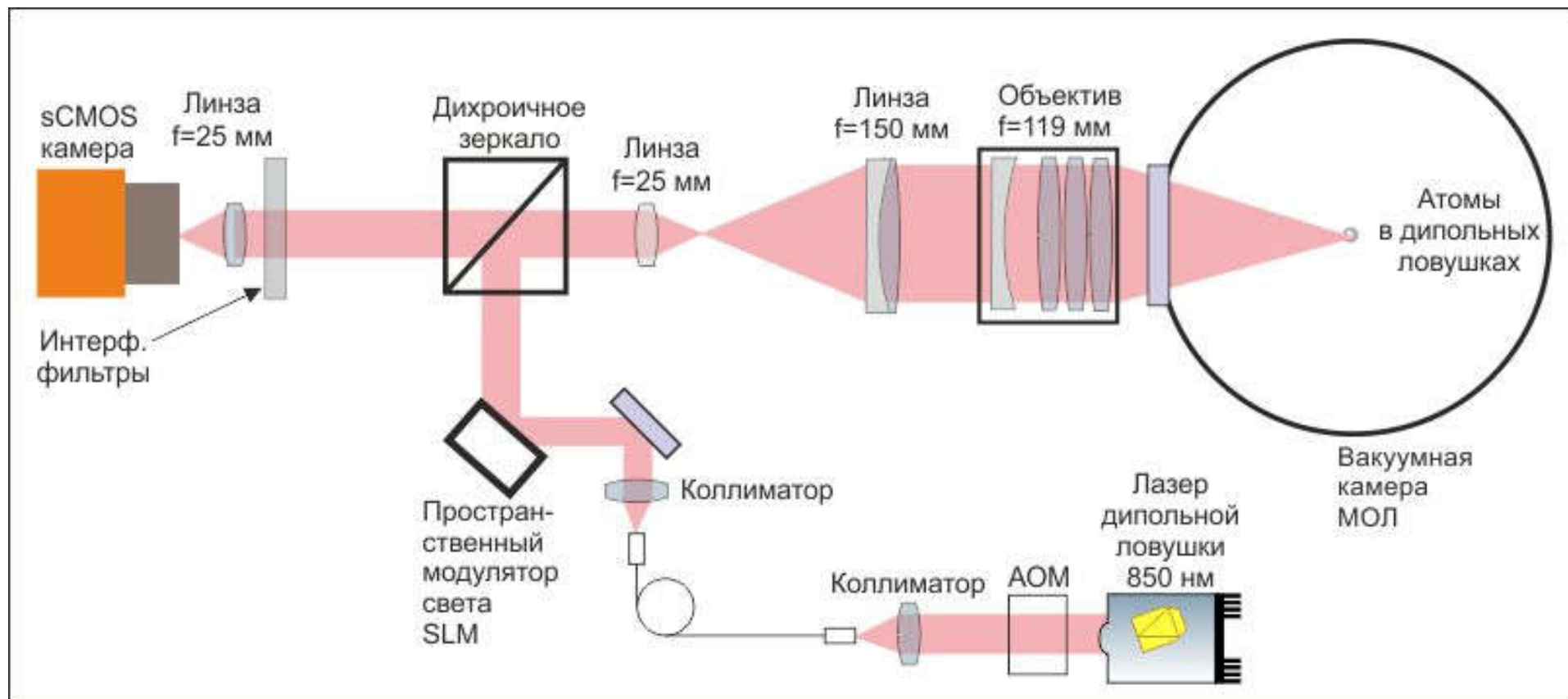
Регистрация отдельного атома



Телеграфный сигнал



Квантовый регистр на холодных атомах

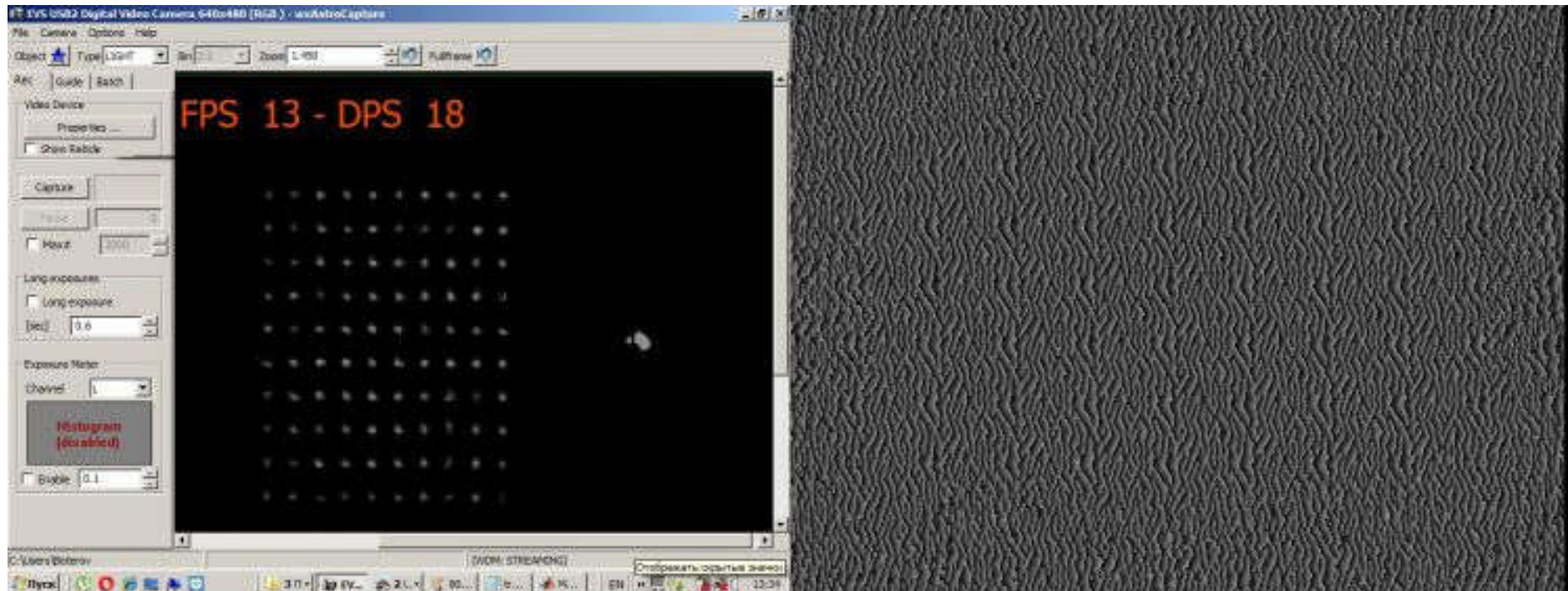


Массив оптических дипольных ловушек на основе пространственного модулятора света

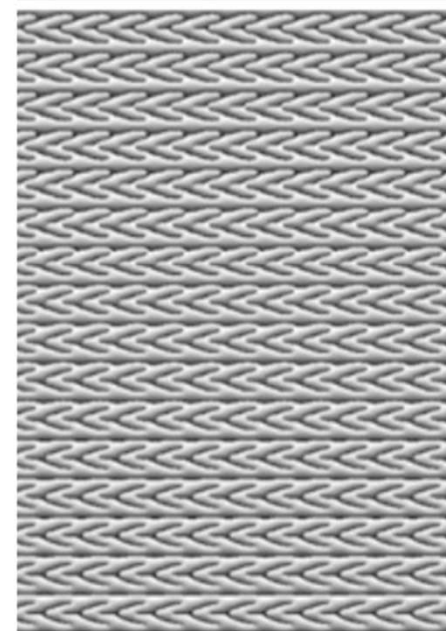
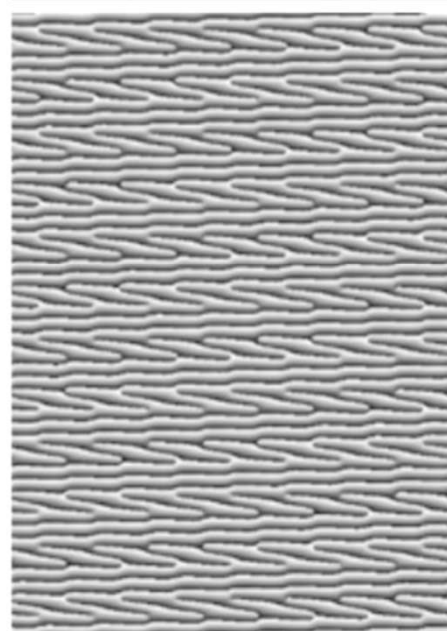
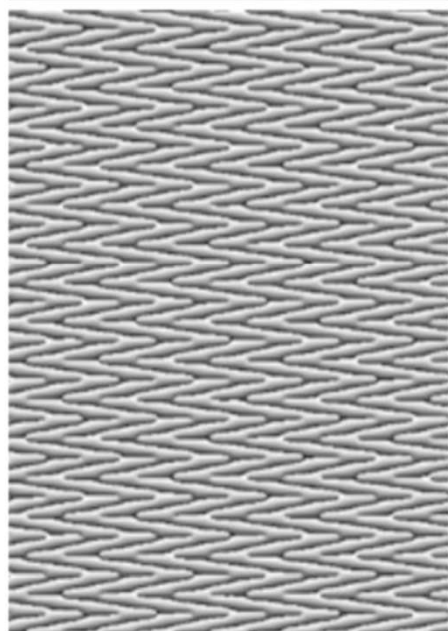
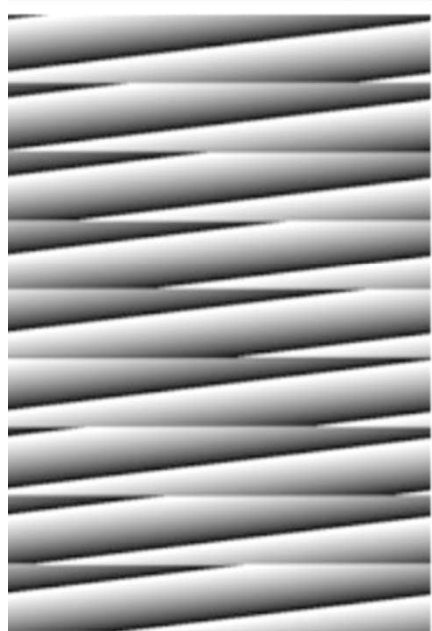
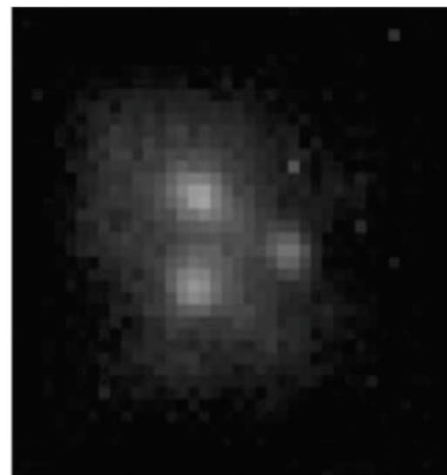
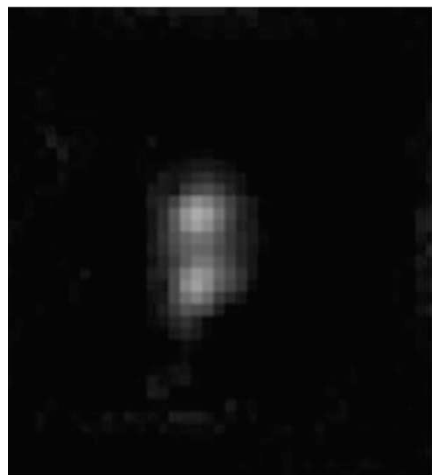


Hamamatsu Spatial Light Modulator

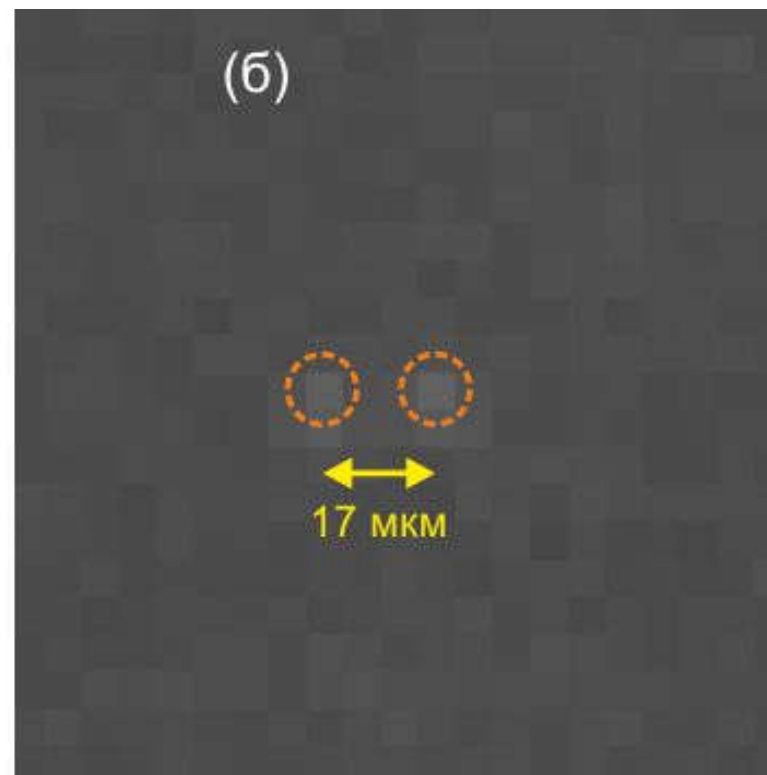
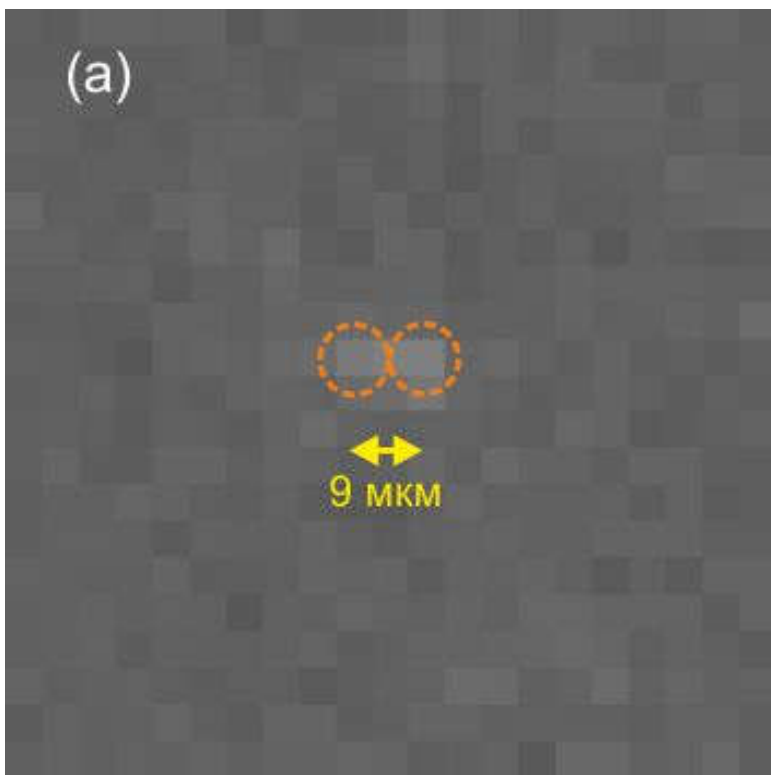
Gerchberg–Saxton algorithm for mask generation



Захват атомов Rb в различные массивы оптических дипольных ловушек и их фазовые маски



Два одиночных атома



Однокубитовые вентили в двух ловушках

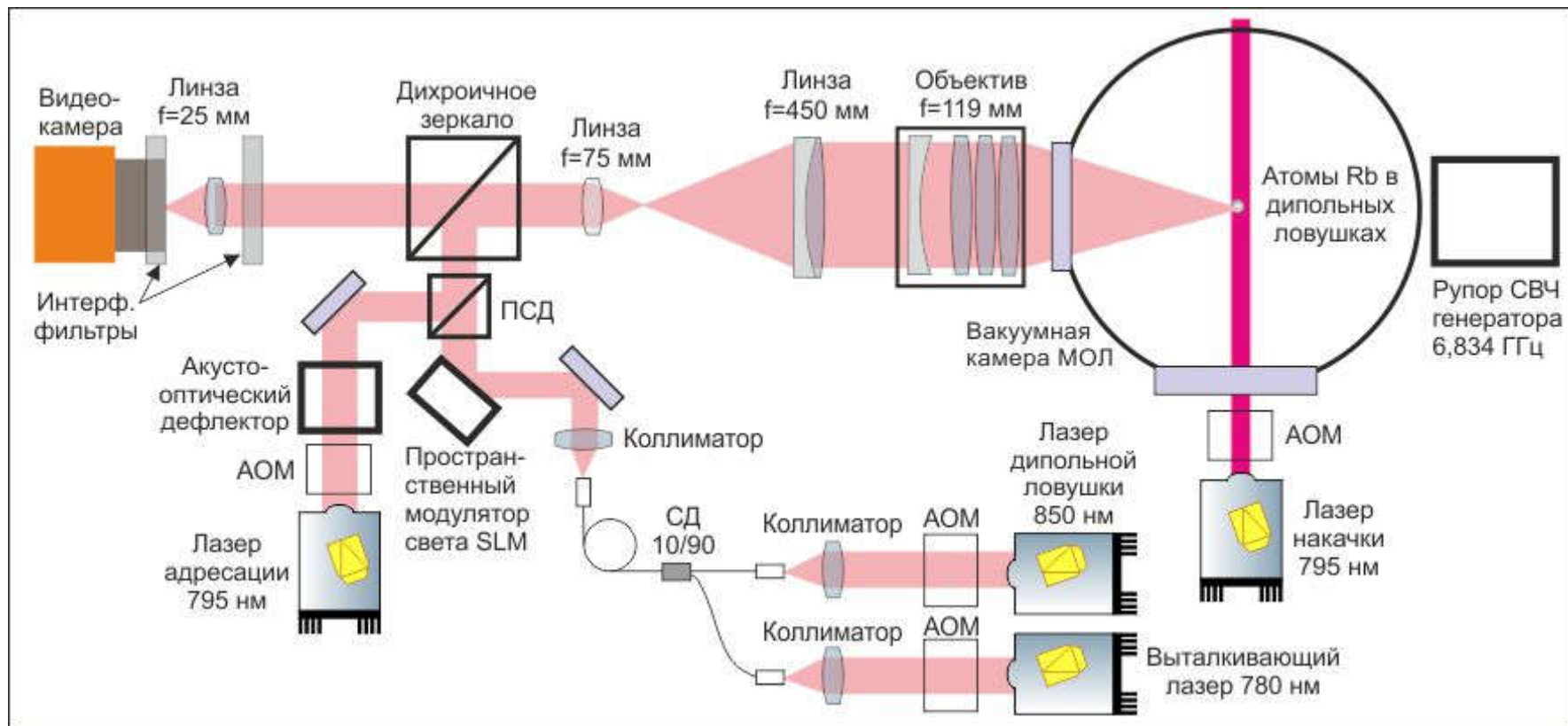
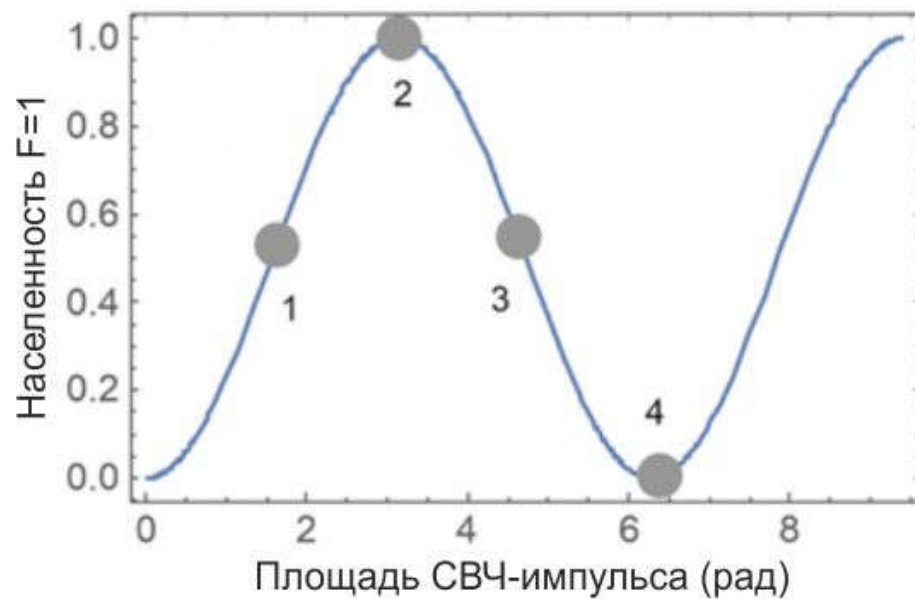
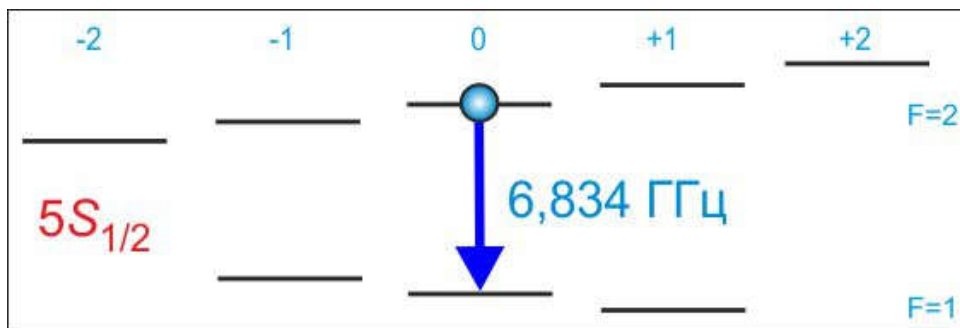
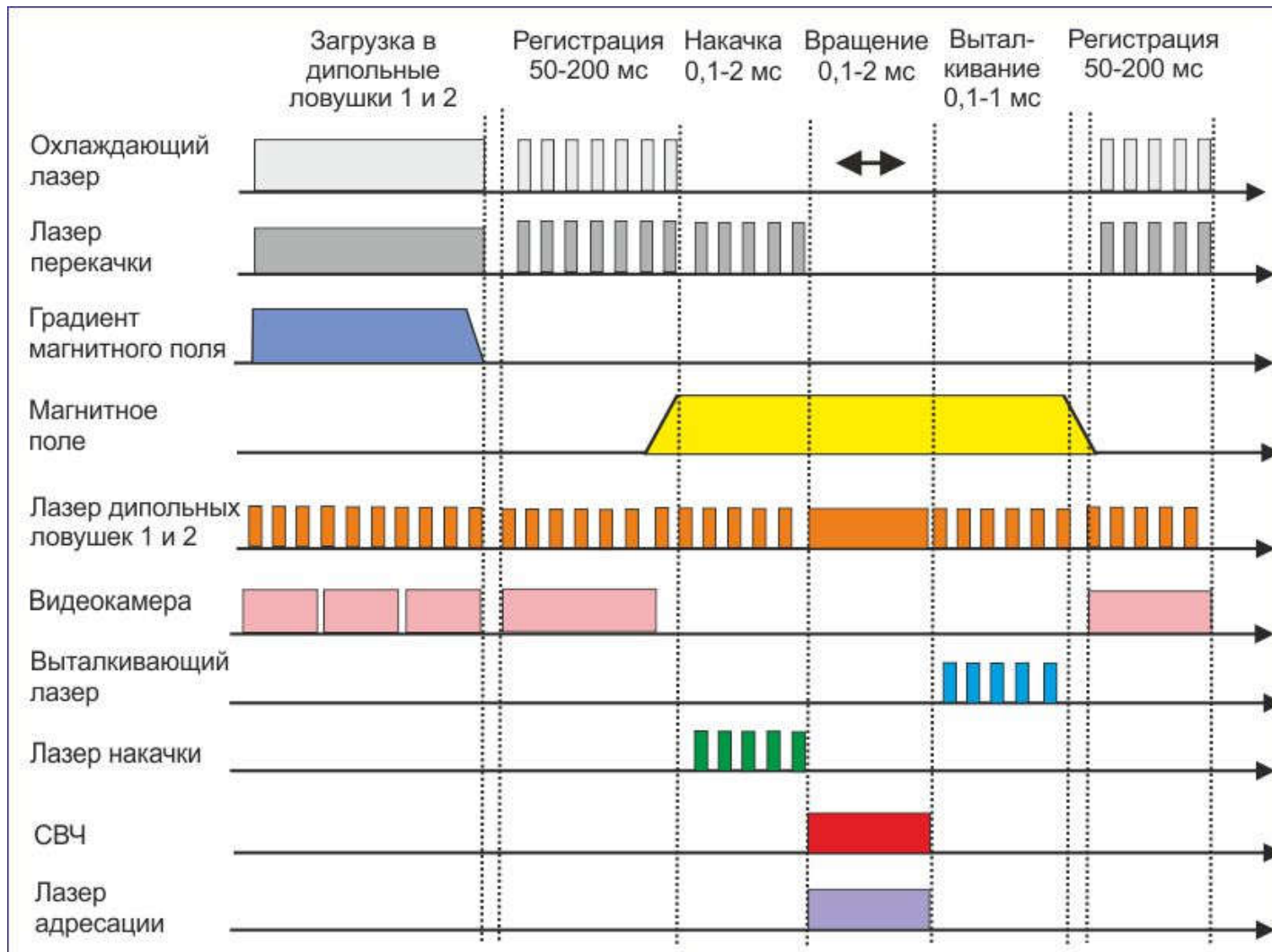


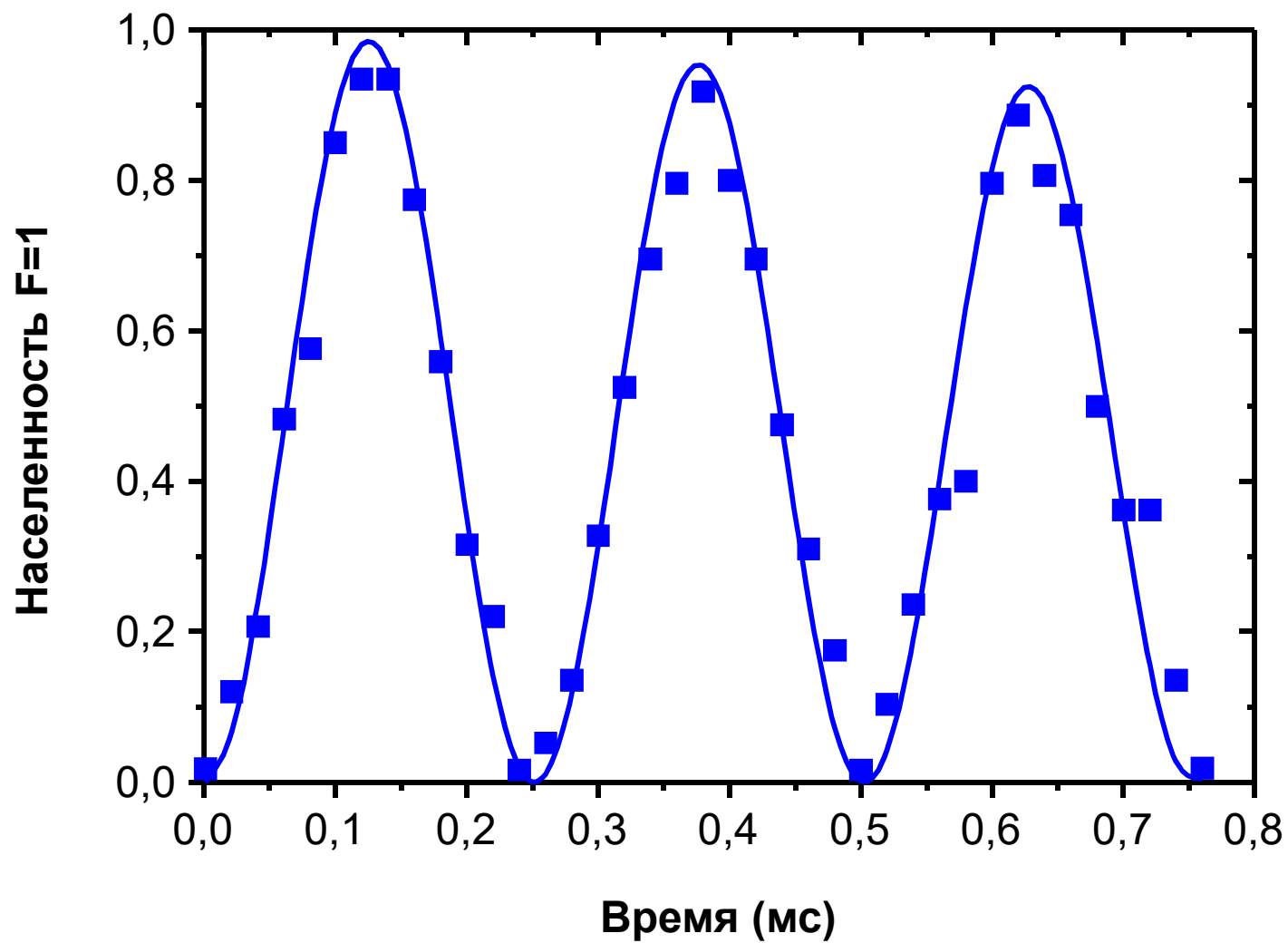
Схема СВЧ-перехода и однокубитового вентиля



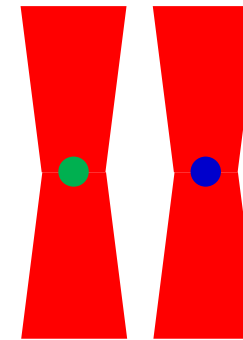
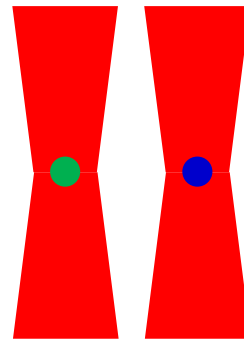
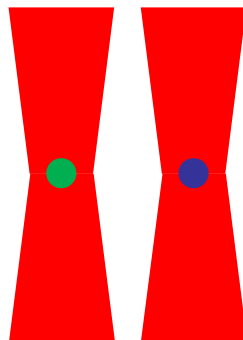
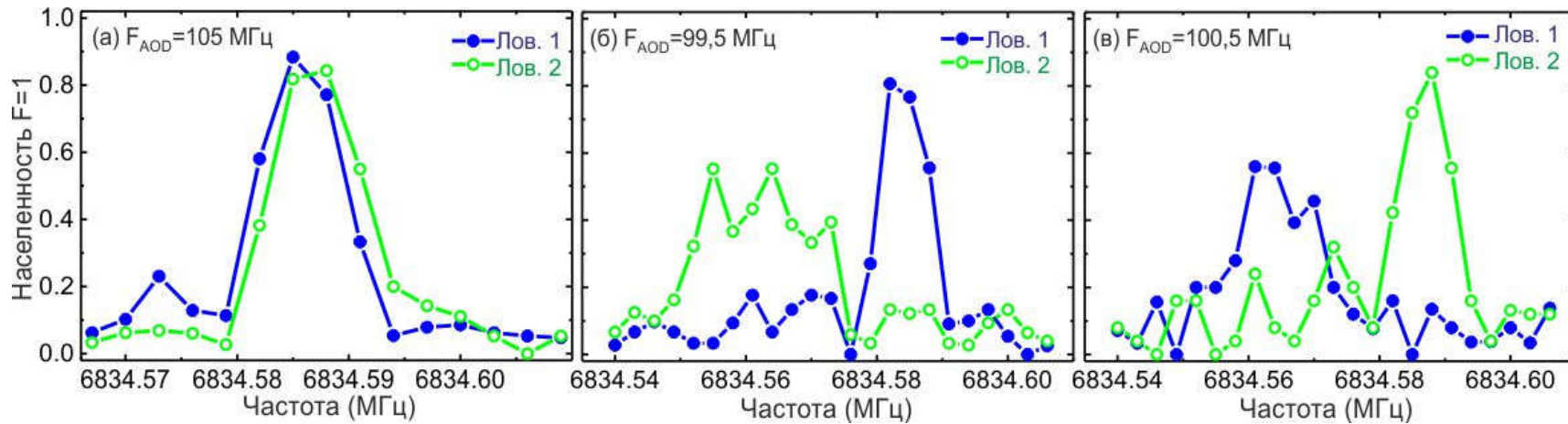
Временная диаграмма



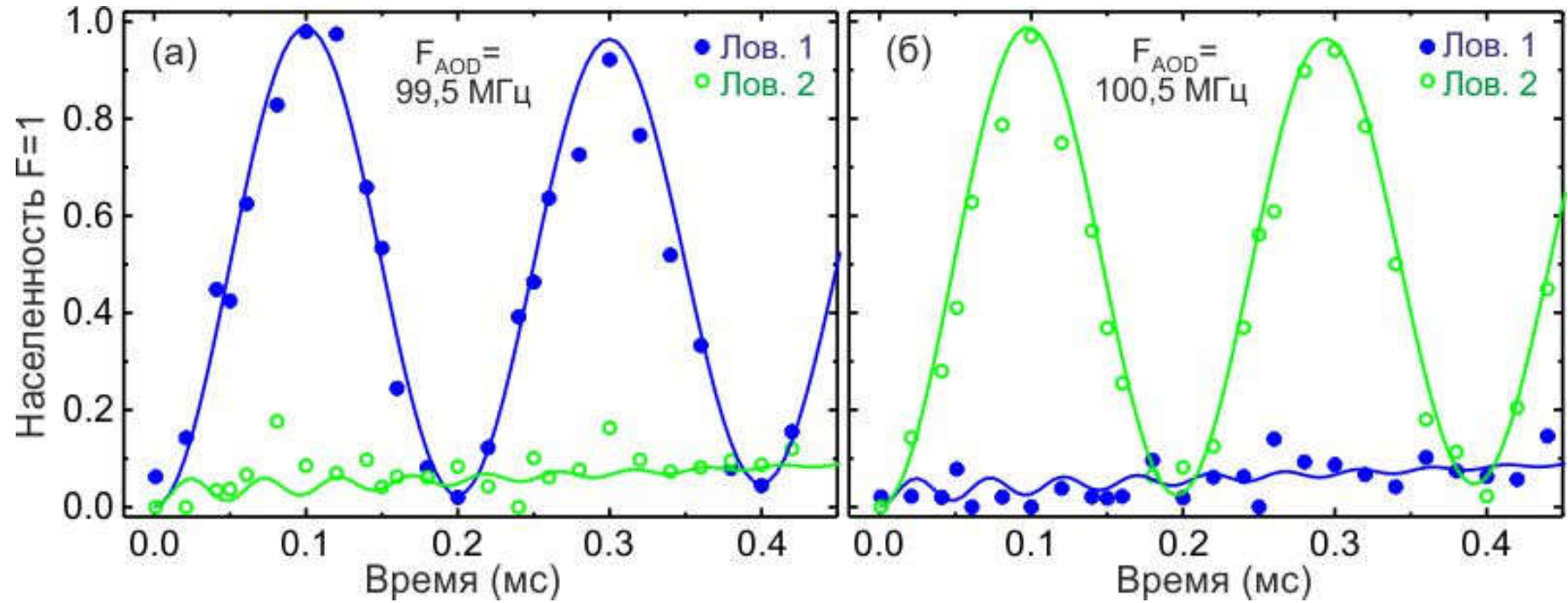
Осцилляции Раби



Спектры СВЧ переходов в двух ловушках



Два ОДИНОЧНЫХ атома





Выводы

В настоящее время квантовая информатика находится на переходном этапе – уже есть превосходство, но еще нет приложений

Различные физические системы могут быть использованы для создания квантового процессора

Атомные системы – одно из «догоняющих», но перспективных направлений

В Новосибирске создано два атомных кубита



Образовательные программы

ФФ НГУ: Магистерская программа «Квантовые информационные технологии»

Введение в физическое квантовое программирование
Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов
Кремниевая фотоника
Квантовое машинное обучение
Квантовая электродинамика сверхпроводящих джозефсоновских кубитов
Полупроводниковая элементная база квантовой информатики

ФИТ НГУ: Master's Programme "Quantum Technologies and Cryptography"

Фонд поддержки проектов в области образования: «Всем кванты»



Публикации

1. **Захват и регистрация одиночных атомов рубидия в оптической дипольной ловушке с использованием длиннофокусного объектива / И.И. Бетеров, Е.А. Якшина, Д.Б. Третьяков, В.М. Энтин, У. Сингх, Я.В. Кудлаев, К.Ю. Митянин, К.А. Панов, Н.В. Альянова, И.И. Рябцев // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 6. С. 543-550**
2. **Реализация однокубитовых квантовых операций на СВЧ-переходе в одиночном атоме рубидия в оптической дипольной ловушке / И.И. Бетеров, Е.А. Якшина, Д.Б. Третьяков, В.М. Энтин, Н.В. Альянова, К.Ю. Митянин, И.И. Рябцев // ЖЭТФ. 2021. Т. 159. №3. С. 409-423**
3. **Trapping, detection and manipulation of single Rb atoms in an optical dipole trap using a long-focus objective lens / I I Beterov, E A Yakshina, D B Tretyakov, V M Entin, U Singh, Ya V Kudlaev, K Yu Mityanin, K A Panov, N V Alyanova, S Andreeva // J. Phys.: Conf. Ser. 1859 012049**
4. **Реализация однокубитовых квантовых операций с индивидуальной адресацией двух атомов рубидия в двух оптических дипольных ловушках / И.И. Бетеров, Е.А. Якшина, Д.Б. Третьяков, В.М. Энтин, Н.В. Альянова, К.Ю. Митянин, А.М. Фарук, И.И. Рябцев // Квантовая электроника 2021. Т. 51. № 6. С. 464-472**