

**Физико-технологический институт РАН**  
**Кафедра квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ**

---

**КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА И  
КВАНТОВАЯ ИНФОРМАТИКА:  
гармония, на которой держится мир**

*Ю.И. Богданов*

**12 февраля 2022**

# Сложность разложения большого целого числа на простые множители. Алгоритм Шора против криптосистемы с открытым ключом RSA (Rivest, Shamir и Adleman)

---

Метод решета числового поля (наилучший известный классический алгоритм)

$$L_{clas} \approx \exp\left(\left(64/9\right)^{1/3} n^{1/3} (\ln(n))^{2/3}\right) \quad \begin{array}{l} n \text{ число двоичных знаков} \\ k \text{ число десятичных знаков} \\ n = k \ln(10) \end{array}$$
$$L_{quant} \approx n^2 \ln(n) \ln(\ln(n)) \quad \text{Алгоритм Шора}$$

(1994)

Классический компьютер эксафлопсного диапазона ( $10^{18}$  оп/сек) против квантового компьютера мегагерцового диапазона (1 млн. оп/сек)

Число десятичных знаков k	k=250	k=500	k=1000
Трудоемкость классического алгоритма (лет)	200 часов	5 миллионов лет	$4 \cdot 10^{17}$ лет
Трудоёмкость квантового алгоритма (сек)	4 сек	18 сек	84 сек

# Если бы Вселенная была компьютером

$N = 10^{78}$  Число нуклонов во Вселенной

$3 \cdot 10^{23}$  Гц, «тактовая» частота, определяемая временем пролёта света через протон

$2 \cdot 10^{119}$  Полное число операций за время существования Вселенной – ресурс, достаточный для разложения числа с 12 тысячами знаков по классическому алгоритму, квантовый мегагерцовый компьютер решает задачу за 5 часов

$10^{120}$  Оценка информационного ресурса Вселенной, полученная проф. Ллойдом из МИТ из других соображений



Вселенная как суперкомпьютер

*Seth Lloyd Computational Capacity of the Universe// Phys. Rev. Lett.*  
2002, V.88, 237901

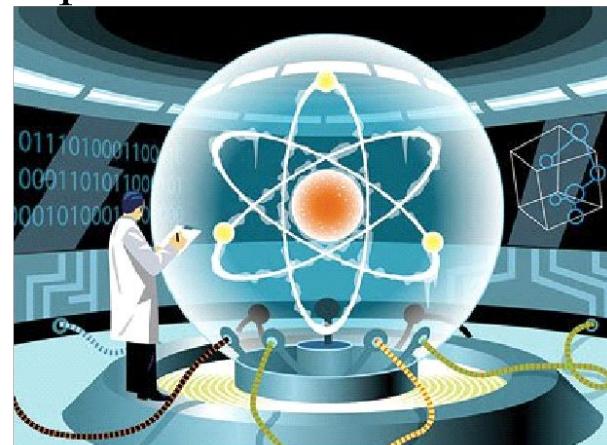
# Через 100 лет изобретение квантовых компьютеров будут сравнивать с открытием огня

---

Два основных события в истории человечества



Открытие огня:  
1,5 миллиона лет назад



Создание квантового  
компьютера: 2030-2050 гг

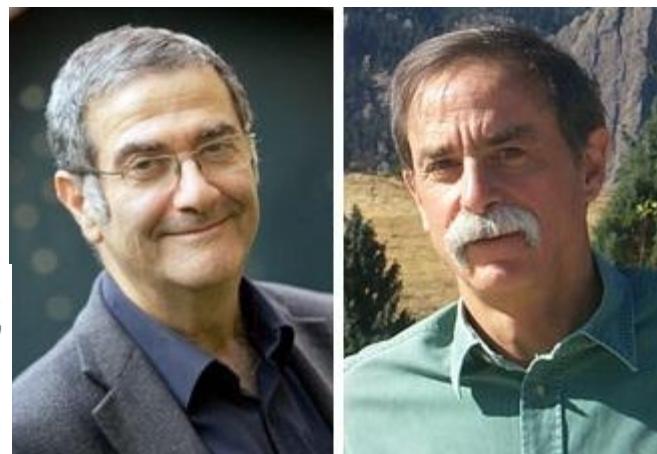
Квантовые информационные технологии приведут к радикальному изменению экономической и социальной среды человечества.

# Нобелевская премия по физике (09 октября 2012)

---

«За новаторские экспериментальные методы, позволяющие измерять и контролировать отдельные квантовые системы».

Серж Арош  
(Serge Haroche)



Дэвид Уайнленд  
(David Wineland)

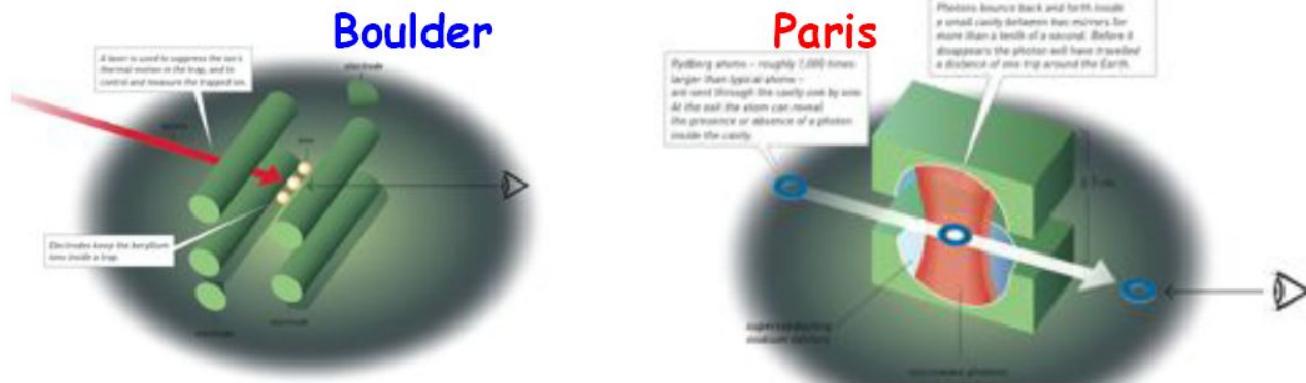


COLLÈGE  
DE FRANCE  
1530

**NIST**  
National Institute of  
Standards and Technology  
U.S. Department of Commerce

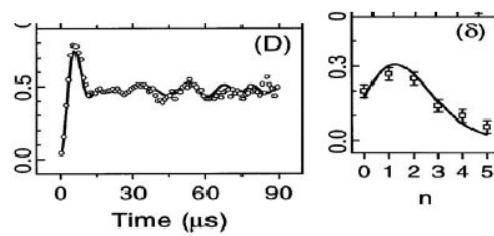
# Слайд из Нобелевской Лекции Сержа Ароша, 08 December 2012, Stockholm University

## «Particle control in a quantum world»

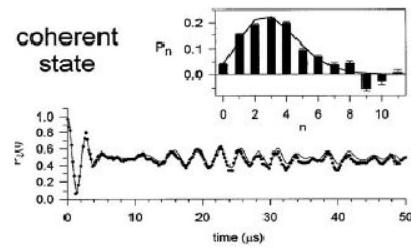


Two sides of the same coin: manipulating non destructively  
single atom with photons or single photon with atoms

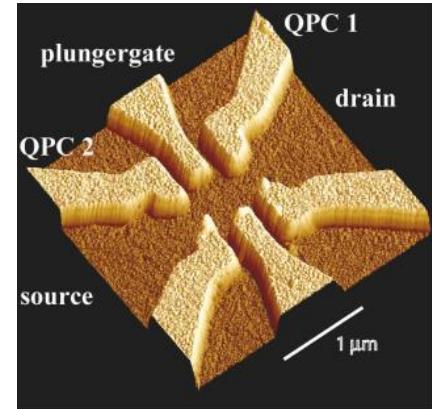
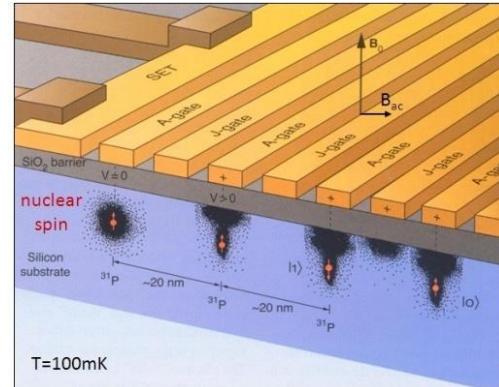
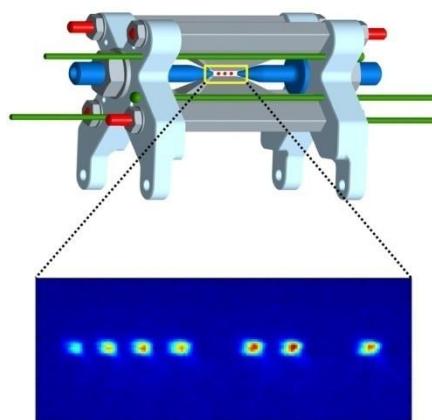
Trapped  
photons  
(CQED):  
Brune et al.,  
PRL, 76, 1800  
(1996)



Trapped ions:  
Meekhof et al.,  
PRL, 76, 1796  
(1996).



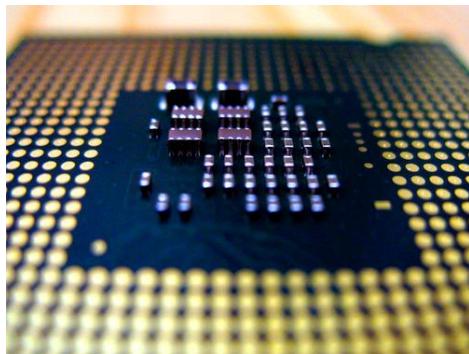
# Модели квантовых компьютеров



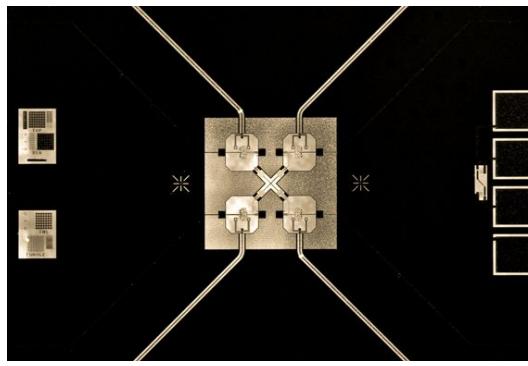
Ионы в ловушках

ядерные спины

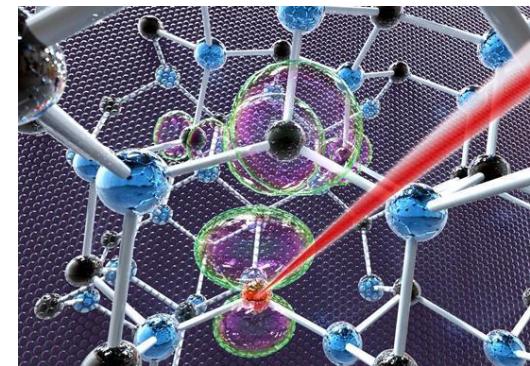
квантовые точки



фотоны



сверхпроводники



NV центры в алмазе

# Google Sycamore квантовый процессор vs IBM суперкомпьютера Summit (Ок-Риджская национальная лаборатория США). Quantum supremacy

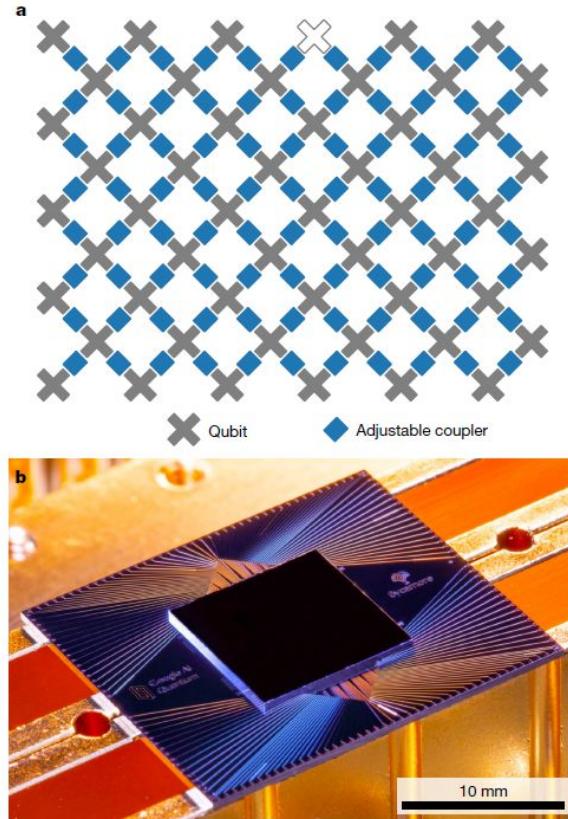


Fig. 1 | The Sycamore processor. a, Layout of processor, showing a rectangular array of 54 qubits (grey), each connected to its four nearest neighbours with couplers (blue). The inoperable qubit is outlined. b, Photograph of the Sycamore chip.



Google: достигнуто «квантовое превосходство», т.к. за 200 сек решена задача, для которой современному суперкомпьютеру потребовалось бы приблизительно 10 тыс лет.

IBM: суперкомпьютер может решить указанную задачу за 2,5 дня или ещё быстрее.

# Google Sycamore квантовый процессор для анализа химических реакций

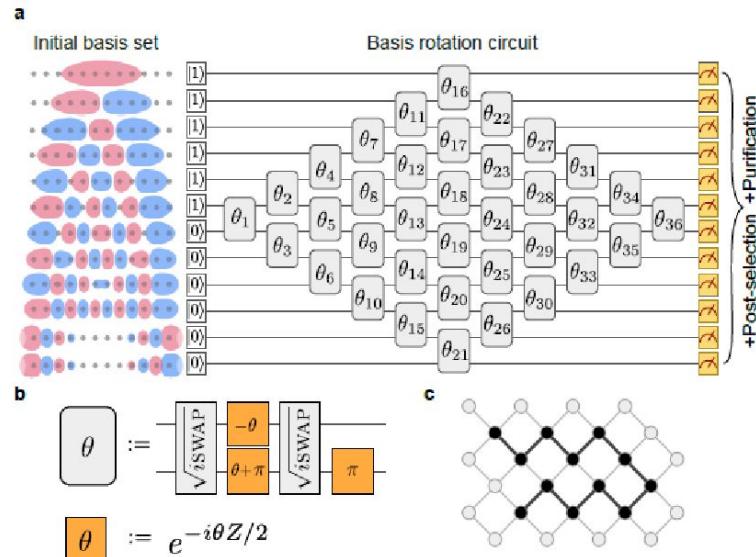
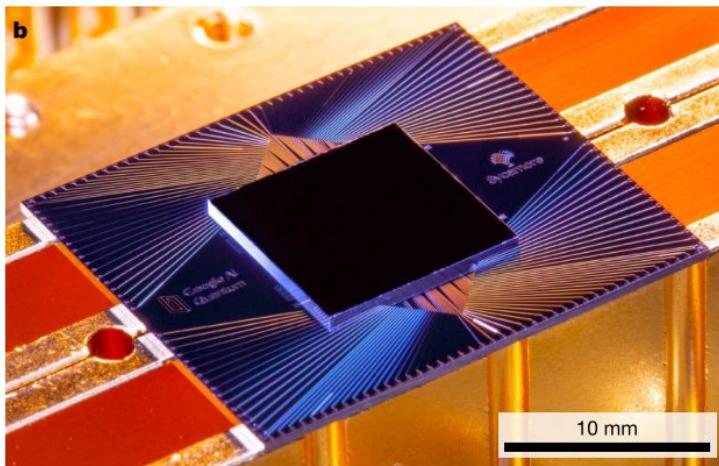


FIG. 1. Basis rotation circuit and compilation. a) To the left of the circuit diagram are the initial orbitals for the  $H_{12}$  chain with atom spacings of  $1.3 \text{ \AA}$ , obtained by diagonalizing the Hamiltonian ignoring electron-electron interactions. The circuit diagram depicts the basis rotation ansatz for a linear chain of twelve hydrogen atoms. Each grey box with a rotation angle  $\theta$  represents a Givens rotation gate. b) Compilation of the Givens rotation gate to  $\sqrt{i\text{SWAP}}$  gates and single-qubit gates that can be realized directly in hardware. The  $H_{12}$  circuit involves 72  $\sqrt{i\text{SWAP}}$  gates and 108 single-qubit  $Z$  rotation gates with a total of 36 variational parameters. c) Depiction of a twelve qubit line on a subgrid of the entire 54-qubit Sycamore device. All circuits only require gates between pairs of qubits which are adjacent in a linear topology.

**Hartree-Fock on a superconducting qubit quantum computer**  
Science 28 Aug 2020:  
Vol. 369, Issue 6507, pp. 1084-1089  
DOI: 10.1126/science.abb9811

Выполнена серия квантовых симуляций химии, в крупнейшей из которых участвовали 12 кубитов, 78 двухкубитных вентилей и 114 однокубитных вентилей. Рассчитана энергию связи цепочек Н6, Н8, Н10 и Н12, а также изучена изомеризация диазена.

# Сверхпроводниковые квантовые вычислители



«Квантовое превосходство» от Google (2019)

53 кубита

99,8% точность 1-кубитных

гейтов

99,4% точность 2-кубитных

гейтов

3,8% ошибки приготовления и измерения

Широкие возможности по дизайну кубитов и их взаимодействиям

Относительно простое

управление

Масштабируемость

ь

Относительно низкие времена

когерентности

Требуются сложные системы

охлаждения

Google

IBM

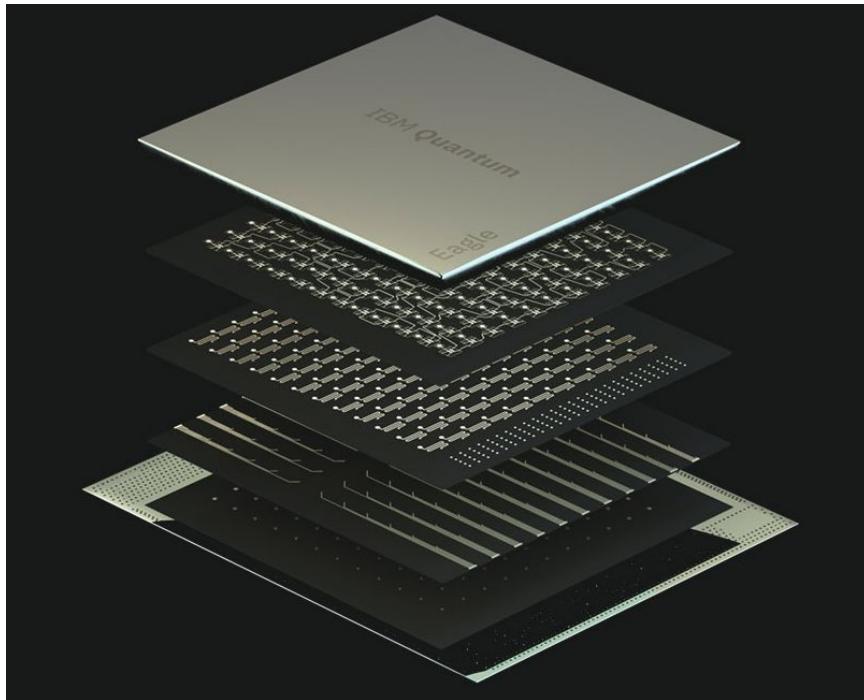
D-Wave  
The Quantum Computing Company™

ROSATOM

ВНИИА

# IBM Unveils Breakthrough 127-Qubit Quantum Processor

---

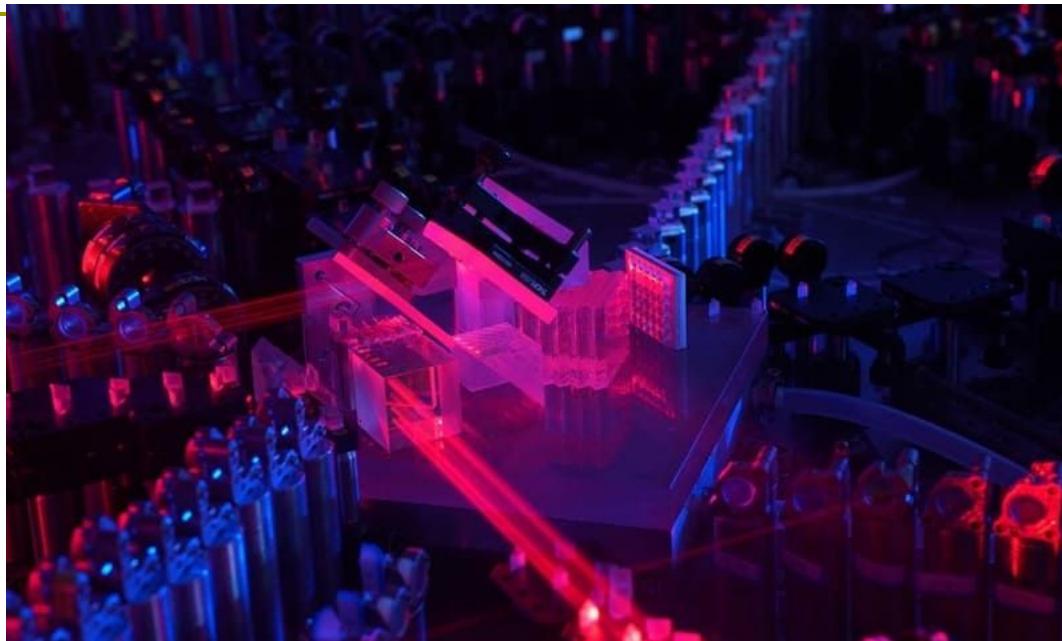


Ноябрь 2021.  
Квантовый процессор IBM  
Eagle ("Орёл"),  
расчитанный на 127  
кубитов.

Компания планирует выпустить в 2022 году  
процессор Osprey ("Скопа") с 433 кубитами, а в  
2023 - Condor ("Кондор") с 1121 кубитом.

# Quantum computational advantage using photons

---



В декабре 2020, the University of Science and Technology of China (USTC), квантовое превосходство на бозонных выборках на 76 фотонах с помощью фотонного квантового компьютера Jiuzhang (Цзючжан). Авторы утверждают, что классическому современному суперкомпьютеру потребуется 600 миллионов лет вычислительного времени, чтобы сгенерировать количество отсчетов, которое их квантовый процессор может сгенерировать за 20 секунд.

# IBM quantum processor

IBMQ

IBM Q 5 Tenerife [ibmqx4]

Last Calibration: 2018-07-02 05:16:35

	Q0	Q1	Q2	Q3	Q4
Frequency (GHz)	5.24	5.31	5.35	5.41	5.19
T1 (μs)	43.30	53.90	40.80	32.30	50.40
T2 (μs)	11.30	46.20	51.60	12.50	16.10

	Gate error ( $10^{-3}$ )	Readout error ( $10^{-3}$ )			
MultiQubit gate error ( $10^{-3}$ )	0.94 4.60	2.06 8.50	1.20 5.80	3.18 7.90	1.12 6.20
CX1_0	3.31	CX2_0	CX3_2	CX4_2	
CX2_1	3.62		11.32	5.26	
CX3_4	3.95		8.41		



*Web-interface for implementing arbitrary quantum circuit using the basic set of gates*

Switch to Qasm Editor

Backend: ibmqx4   Experiment Units: 3

Run   Simulate

The circuit diagram shows five qubits (q[0] to q[4]) and one classical register (c[0]). The circuit consists of the following operations:

- q[0]: X gate at time 0, CNOT gate from q[0] to c[0] at time 0.
- q[1]: S gate at time 0, T gate at time 1, CNOT gate from q[1] to c[0] at time 1.
- q[2]: H gate at time 0, CNOT gate from q[2] to c[0] at time 1.
- q[3]: No operations.
- q[4]: No operations.

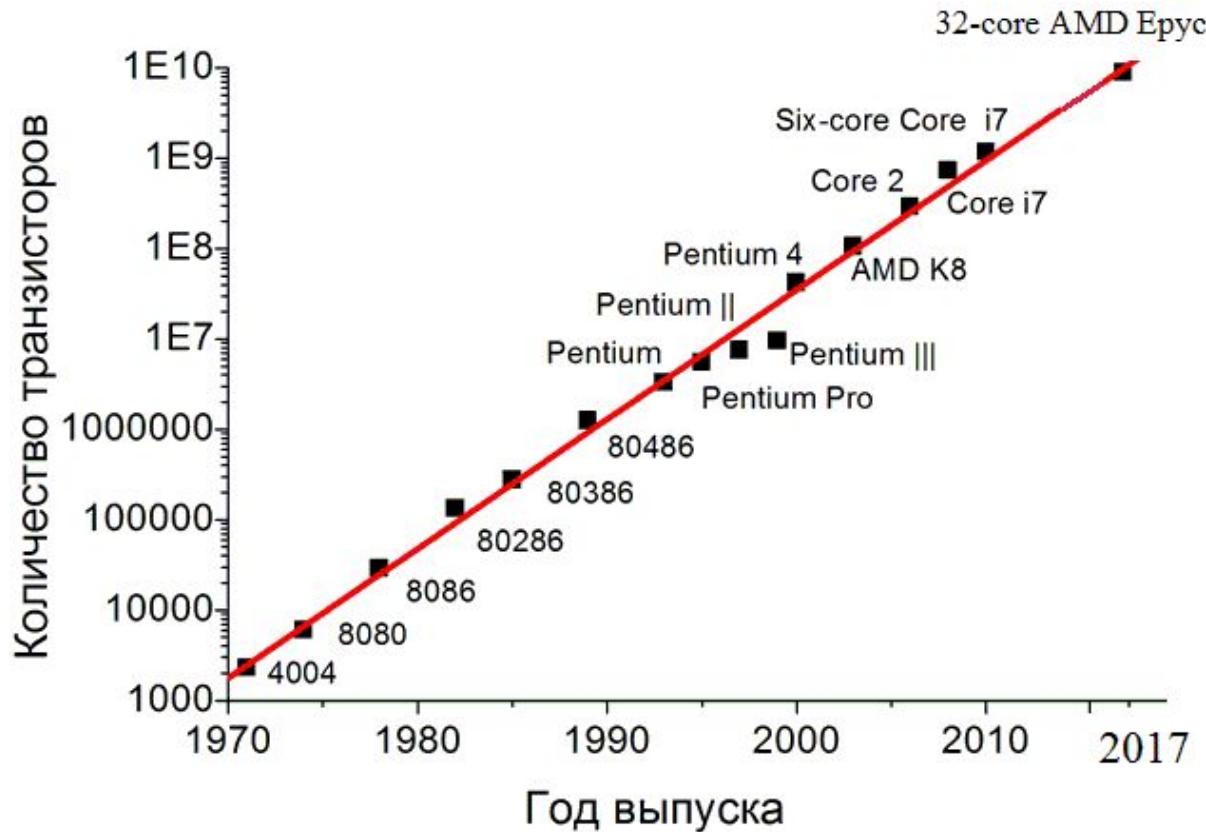
The gate catalog includes the following gates:

GATES	id	X	Y	Z
H	S	$S^\dagger$	+	
T	$T^\dagger$			

Operations include a Barrier gate.

*One could also create and run schemes programmatically using IBM Python library Qiskit*

# Закон Мура и развитие информационных технологий



1971: Intel 4004-

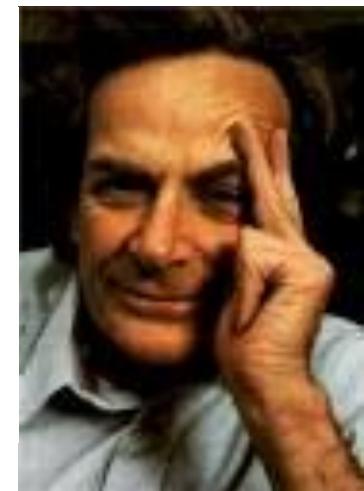
2300 транзисторов

2017: 32-core AMD Ерус - 19,2 млрд. транзисторов

# Идея квантовых вычислений

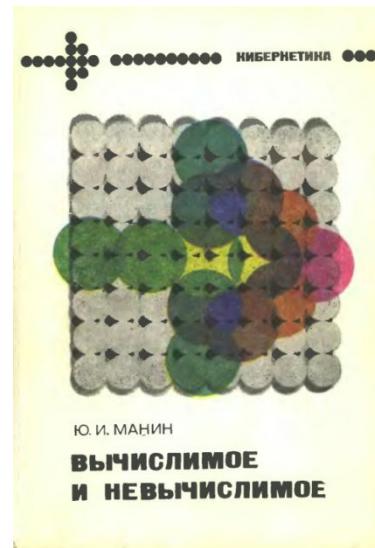
Feynman R. Simulating Physics with Computers // Int. J. Theor. Phys. 1982. V.21. №6/7. P.467-488.

Feynman R. Quantum Mechanical Computers // Found. of Phys. 1986. V.16. №6. P.507-531.



Ричард Фейнман

Манин Ю.И. Вычислимое и невычислимое. М. Советское Радио. 1980. 128с.



Юрий Манин

# К.А. Валиев – основоположник исследований в области физики квантовых компьютеров и квантовой информации в России

---

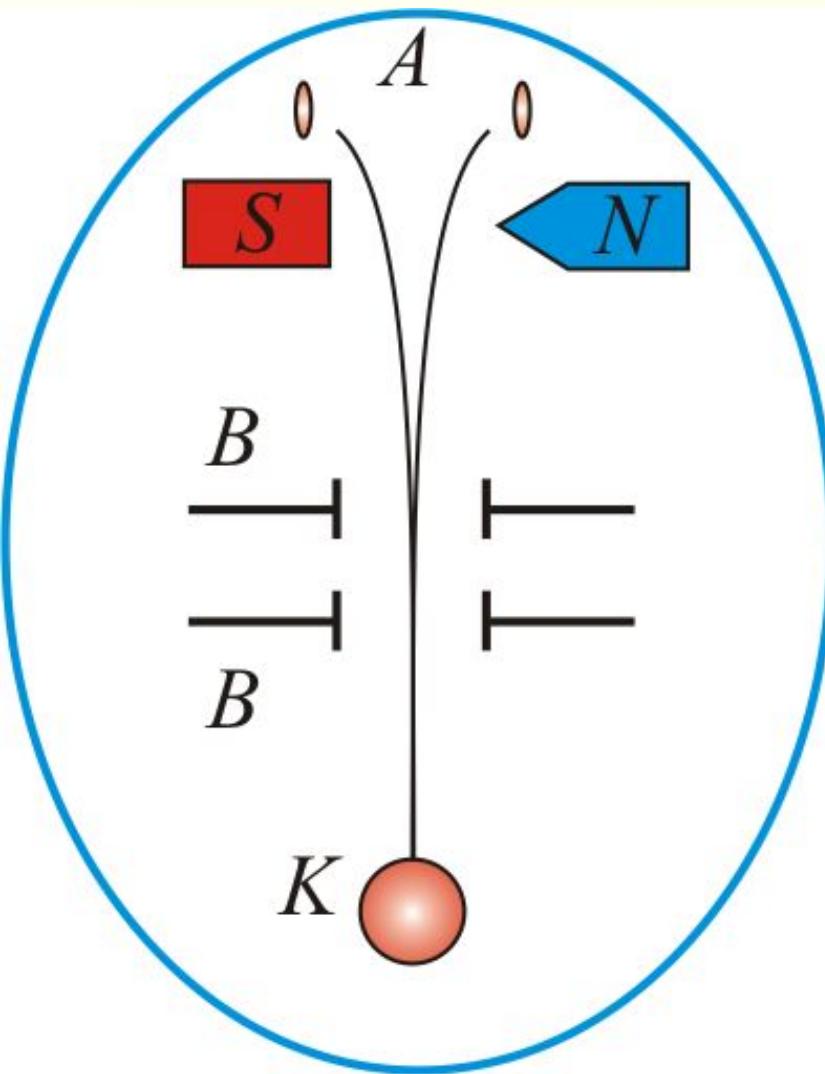


*Валиев К.А., Кокин А.А.* Квантовые компьютеры: надежда и реальность. Ижевск. РХД. 2001, 2004.

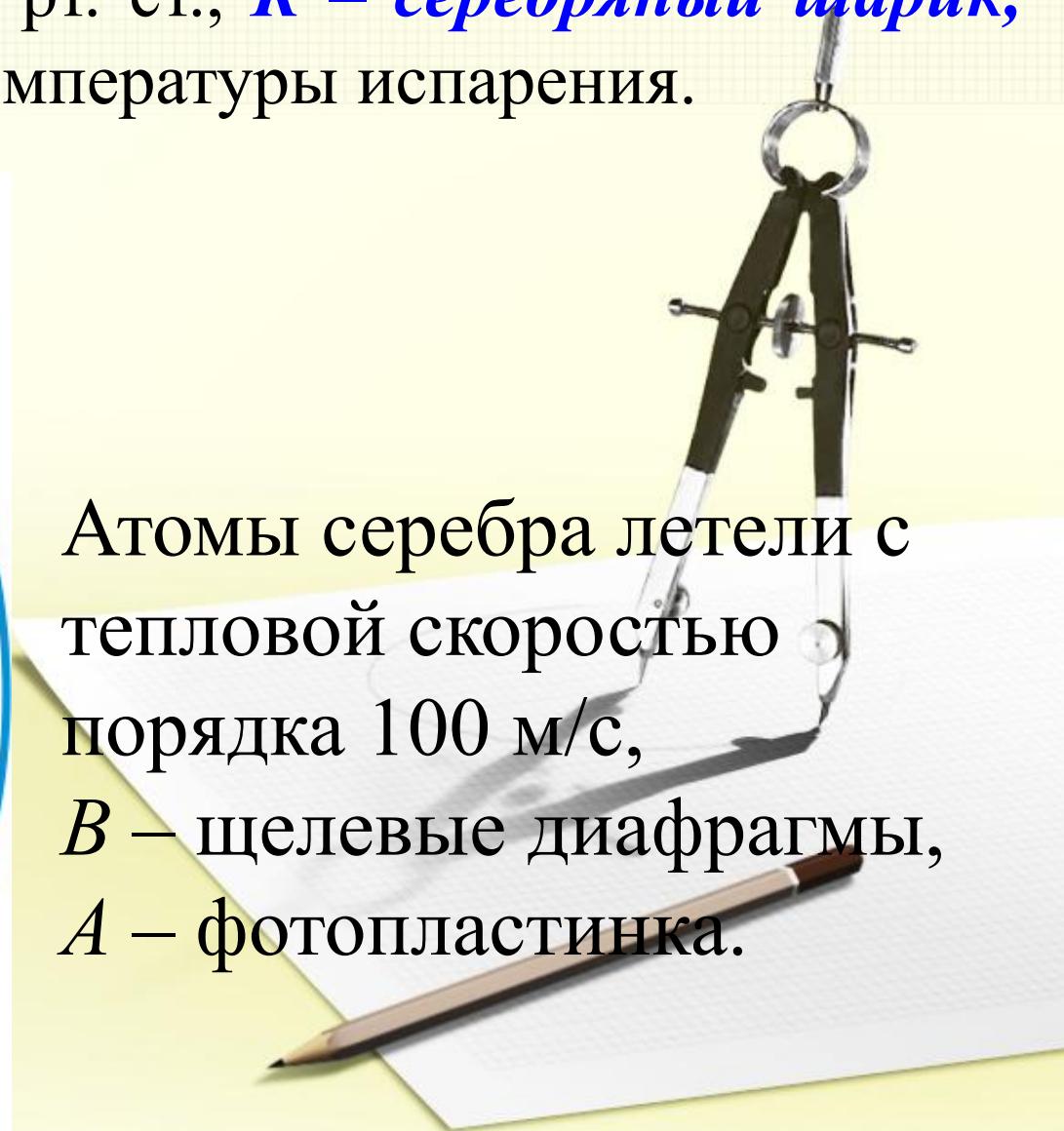
*Валиев К.А.* Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН, 2005. том 175, №1. стр.3-39.

# Опыт Штерна-Герлаха

В колбе вакуум  $10^{-5}$  мм. рт. ст., *K – серебряный шарик*, который нагревался до температуры испарения.



Атомы серебра летели с тепловой скоростью порядка 100 м/с,  
*B* – щелевые диафрагмы,  
*A* – фотопластиинка.



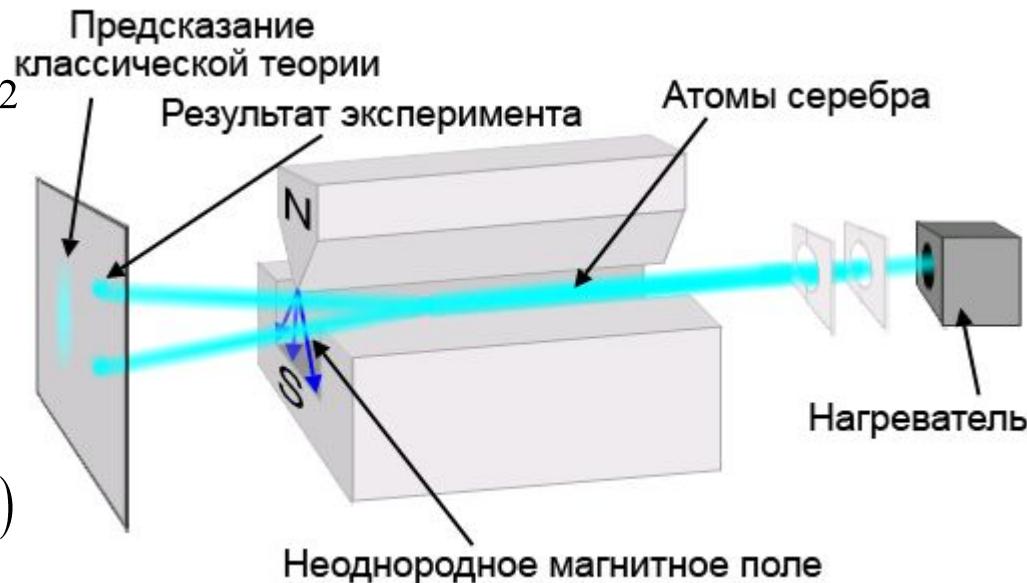
# Анализ опыта Штерна-Герлаха

Одна из важнейших формул физики  $P = |\langle \varphi | \psi \rangle|^2$

В плоскости (z,x)

$$|\psi_\theta\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + \sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

$$|0_x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \quad |1_x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$



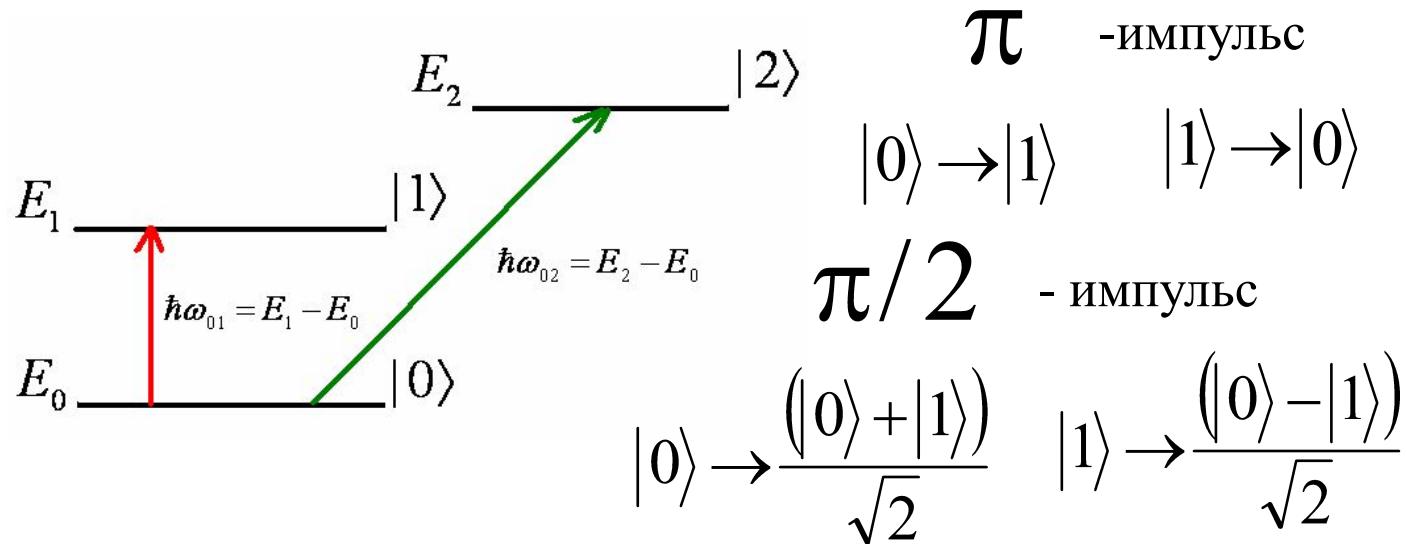
$$|0_y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(a|0\rangle + b|1\rangle) \quad |a| = 1 \quad |b| = 1$$

<https://ru.wikipedia.org/wiki/>

$$\langle 0_x | 0_y \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\langle 0 | + \langle 1 |) \frac{1}{\sqrt{2}}(a|0\rangle + b|1\rangle) = \frac{1}{2}(a+b) \quad |\langle 0_x | 0_y \rangle|^2 = \frac{1}{4}|a+b|^2 = \frac{1}{2} \quad |a+b|^2 = 2 \quad a = 1 \quad b = i$$

$$|0_y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + i|1\rangle) \quad |1_y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - i|1\rangle)$$

# Кубит vs. бит



Статистическая неопределённость квантовых систем является управляемой. Чистые квантовые состояния не несут в себе никакой энтропийной неопределённости.

В основе кубита лежит естественное квантование информации, в основе бита- искусственная дискретизация аналогового сигнала.

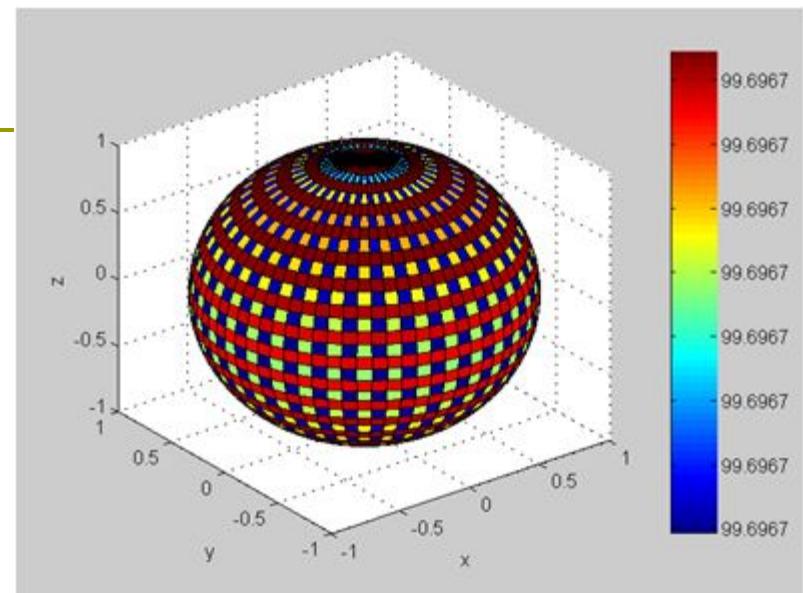
# Представление кубита на сфере Блоха

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle = c_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix}$$

$$\psi = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) \exp\left(-i\frac{\Phi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \exp\left(i\frac{\Phi}{2}\right) \end{pmatrix} \quad |c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$$

$|0\rangle$  северный полюс

$|1\rangle$  южный полюс



$$E_1 \xrightarrow{\uparrow} |1\rangle = \varphi_1(-1/2)$$

$$E_0 \xrightarrow{\downarrow} |0\rangle = \varphi_0(1/2)$$

$$\boxed{R_{\vec{n}}(\theta)}$$

$$\begin{aligned} R_{\vec{n}}(\theta) &= \exp\left(-i\theta \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{n}}{2}\right) = \\ &= \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) I - i \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \end{aligned}$$

# Двухкубитовые состояния

---

$$|\psi\rangle = c_{00}|00\rangle + c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle + c_{11}|11\rangle \quad |c_{00}|^2 + |c_{01}|^2 + |c_{10}|^2 + |c_{11}|^2 = 1$$

$|\psi\rangle \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$  если  $c_{00}c_{11} - c_{01}c_{10} \neq 0$  (запутанность состояний)

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) \text{ - запутанное состояние (синглет)}$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

- незапутанное состояние

# Многокубитовые состояния

трёхкубитовое состояние- 8 комплексных параметров  $8 = 2^3$

$$|\psi\rangle = c_{000}|000\rangle + c_{001}|001\rangle + c_{010}|010\rangle + c_{011}|011\rangle + c_{100}|100\rangle + c_{101}|101\rangle + c_{110}|110\rangle + c_{111}|111\rangle$$

n-кубитовые состояния  $2^n$  комплексных параметров

$2^{n+1} - 2$  -действительных физически значимых  
параметров для состояния общего вида

$2n$  -действительных параметров для незапутанного  
состояния

$$n = 2, \quad 2n = 4, \quad 2^{n+1} - 2 = 6$$

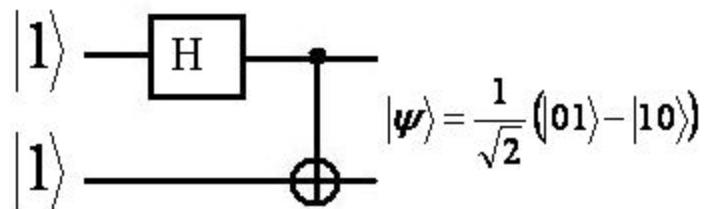
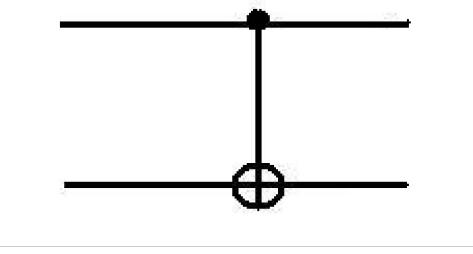
$$n = 1000, \quad 2n = 2000, \quad 2^{n+1} - 2 \approx 2.14 \cdot 10^{301}$$

# Управление запутанностью

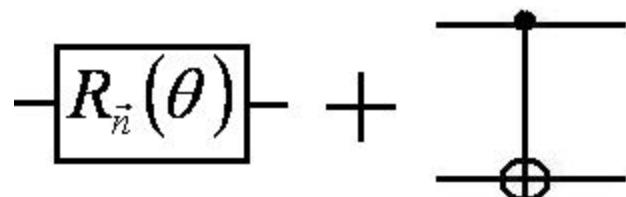
Двухкубитовый квантовый элемент СНОТ (Контролируемое -Не)

$$\text{CNOT : } \begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |00\rangle, \\ |01\rangle &\rightarrow |01\rangle, \\ |10\rangle &\rightarrow |11\rangle, \\ |11\rangle &\rightarrow |10\rangle. \end{aligned}$$

$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

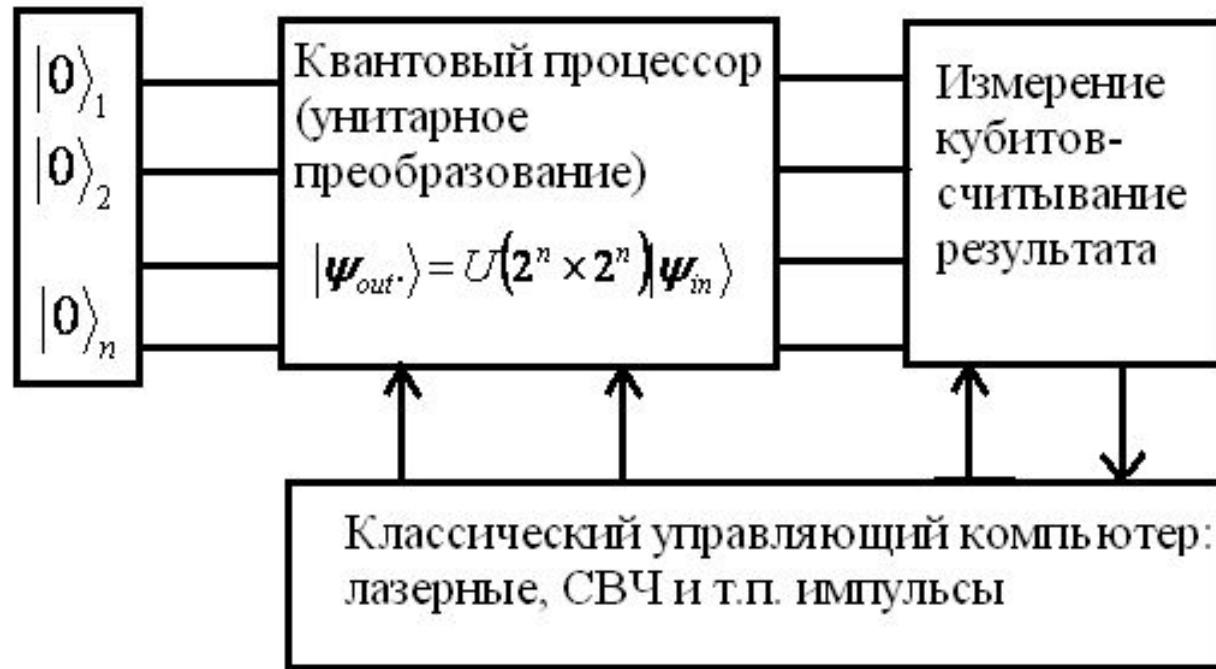


$$\text{H : } \begin{aligned} |0\rangle &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), \\ |1\rangle &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \end{aligned}$$



Универсальный набор  
квантовых логических  
вентилей!

# Схема идеального квантового компьютера



Валиев К.А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН, 2005. Т.175, №1. стр.3-39.

DiVincenzo D.P. The Physical Implementation of Quantum Computation. // Fortschr. der Phys., 2000, V.48, № 9-11, pp.771-783, arXiv:quant-ph/0002077.

# Декогерентизация- самое узкое место в квантовых информационных технологиях

---

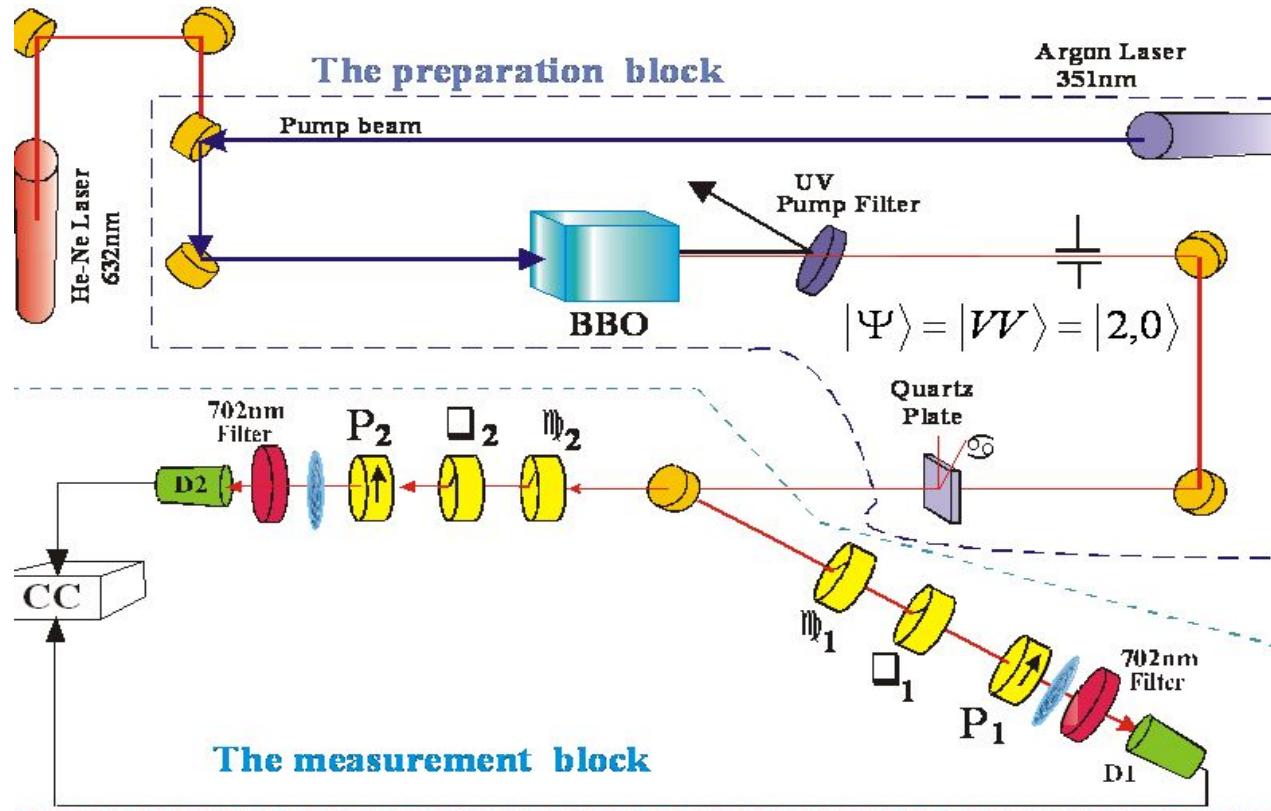
Достигнутая точность реализации (Fidelity) составляет всего 60-80%, в то время как требуемая точность должна быть 99.99 % и выше.

TABLE I. Populations, coherence, and fidelity with a  $N$ -qubit GHZ state of experimentally prepared states. Entanglement criteria supported by  $\sigma$  standard deviations. All errors in parenthesis, 1 standard deviation.

Number of ions	2	3	4	5	6	8	10	12	14
Populations, %	99.50(7)	97.6(2)	97.5(2)	96.0(4)	91.6(4)	84.7(4)	67.0(8)	53.3(9)	56.2(11)
Coherence, %	97.8(3)	96.5(6)	93.9(5)	92.9(8)	86.8(8)	78.7(7)	58.2(9)	41.6(10)	45.4(13)
Fidelity, %	98.6(2)	97.0(3)	95.7(3)	94.4(5)	89.2(4)	81.7(4)	62.6(6)	47.4(7)	50.8(9)

1.T. Monz *et al.* 14-Qubit Entanglement: Creation and Coherence // Phys. Rev. Lett. 2011. V.106, 130506

# Квантовая томография - средство контроля квантовых состояний и операций

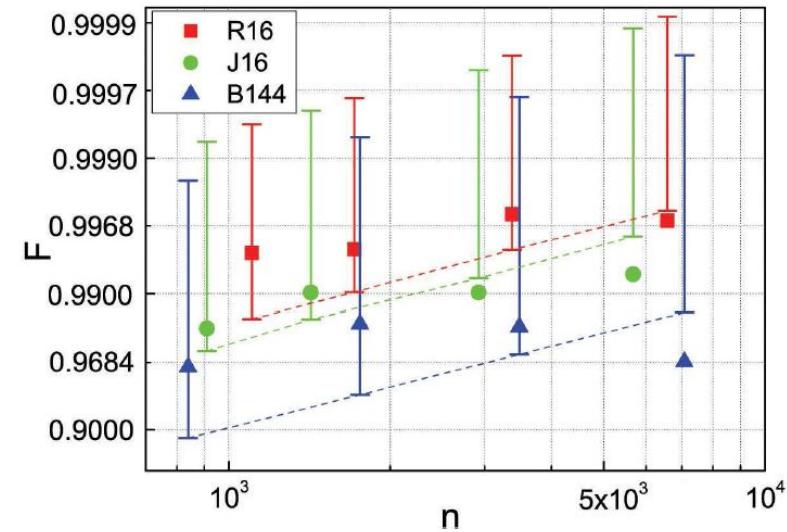
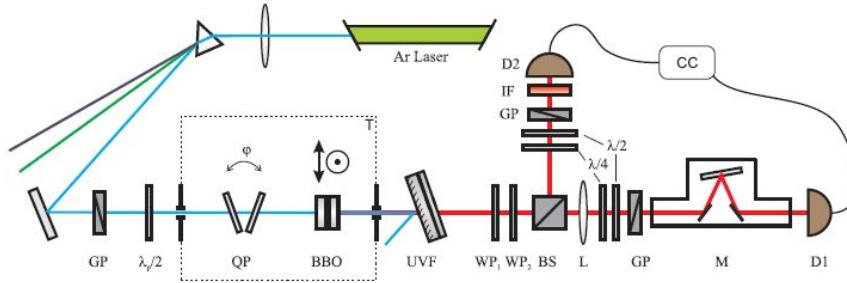


*Yu.I. Bogdanov, M.V. Chekhova, S.P. Kulik et al.* Qutrit state engineering with biphotons // **Physical Review Letters**. 2004. V.93. 230503. 4 p.

*Yu.I. Bogdanov, M.V. Chekhova, S.P. Kulik et al.* Statistical Reconstruction of Qutrits// **Physical Review A**, 2004, V.70, №4, 042303, 16p.

# Методология оценки адекватности, полноты и точности в эксперименте.

## ФТИАН, МГУ им. Ломоносова



Bogdanov Yu.I., Brida G, Genovese M., Kulik S.P., Moreva E.V., Shurupov A.P.

Statistical Estimation of the Efficiency of Quantum State Tomography Protocols  
// **Physical Review. Letters.** 2010. V.105. 010404. 4p.

Yu. I. Bogdanov, G. Brida, I. D. Bukeev, M. Genovese, K. S. Kravtsov, S. P. Kulik, E. V. Moreva, A. A. Soloviev, A. P. Shurupov . Statistical Estimation of Quantum Tomography Protocols Quality // Phys. Rev. A. 2011. V.84. 042108. 19 p.

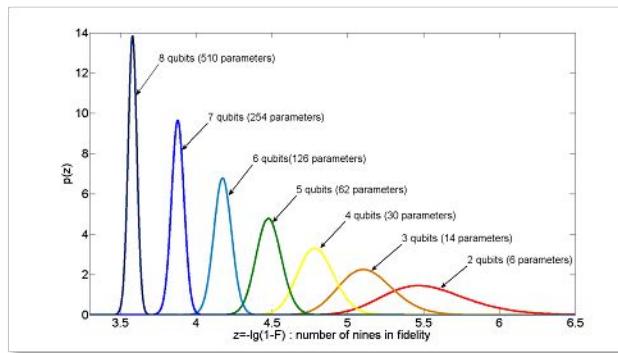
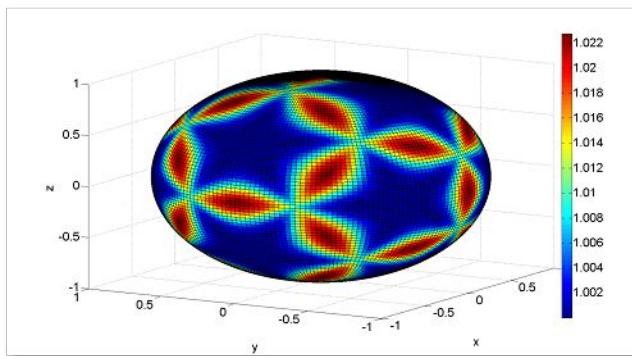
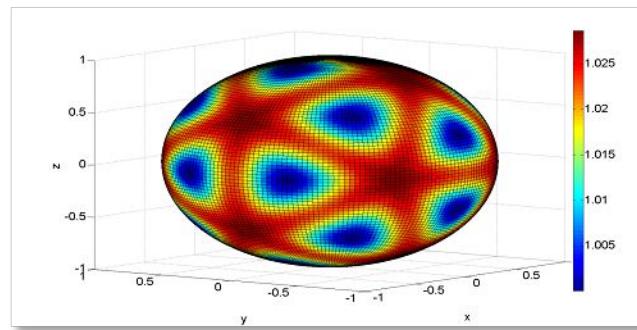
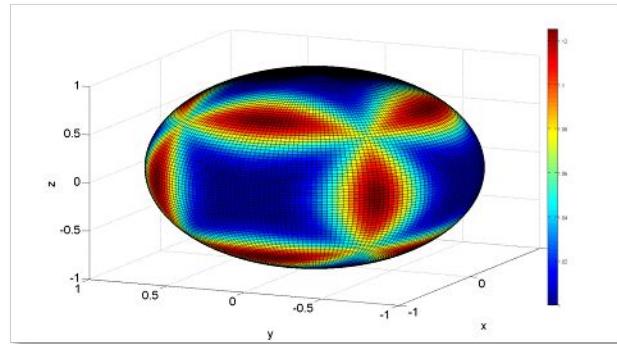
# Универсальный метод оценки зашумленных квантовых состояний и операций

---

- Преимущества:
- Восстановление квантовых состояний в гильбертовом пространстве высокой размерности
- Разработка универсальной теории статистических флуктуаций квантовых состояний
- Обеспечение точности, близкой к фундаментальному пределу
- Применение метода к экспериментам в области квантовой оптики совместно с группой проф. С.П. Кулика позволило обеспечить точность, существенно превышающую точность, полученную в других работах

# Методология анализа полноты, адекватности и точности реализации квантовых вентилей

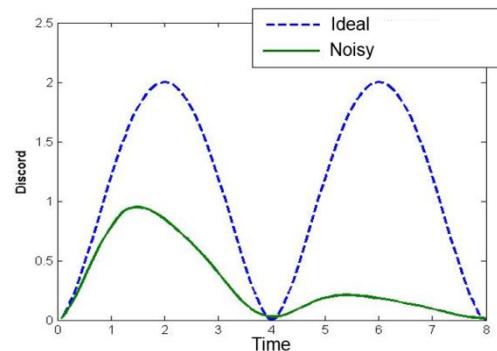
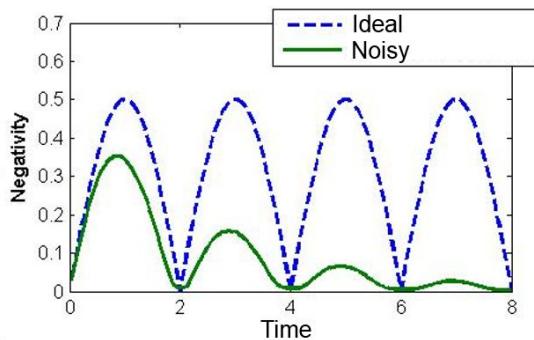
Направлена на борьбу с декогерентизацией квантовых состояний и операций.  
Разработана ФТИАН им. К.А. Валиева РАН



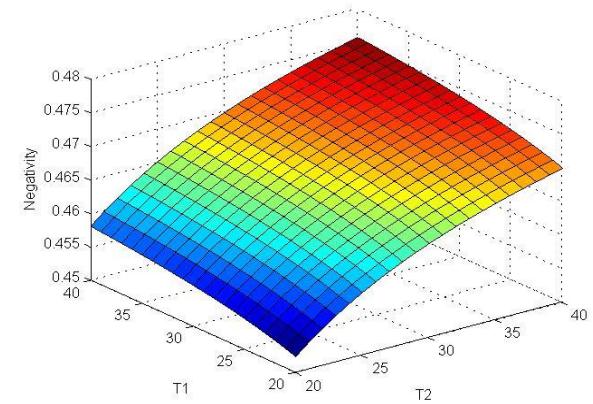
Точность различных протоколов квантовых измерений для различных квантовых состояний

# Анализ квантовых корреляций

- Анализ свойств и динамики квантовых корреляций в гейтах и схемах на всех уровнях:
  - Редуцированная энтропия фон Неймана
  - Негативность
  - Минимум энтропии измерений
  - Квантовый дискорд
  - ...



Динамика негативности и дискорда гейта CNOT

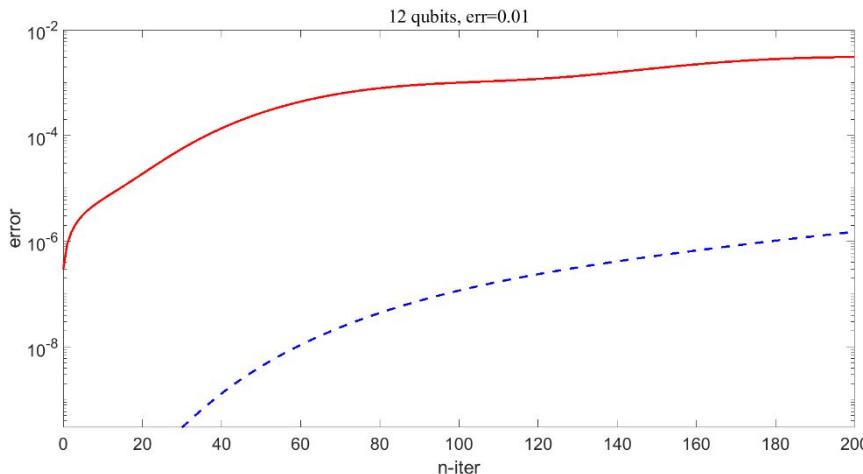


Влияние амплитудной и фазовой релаксации на негативность гейта CNOT



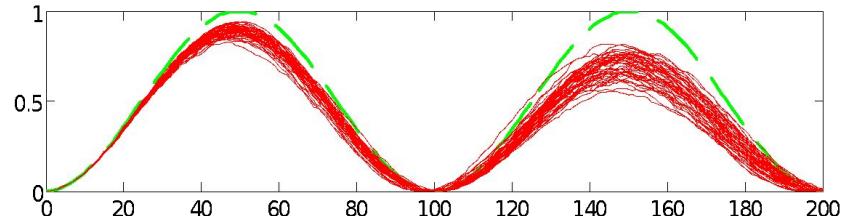
# Теоретический и численный анализ алгоритма Гровера

$$p_{noise}(j) = \lambda_1^{n+2nj} p_{ideal}$$
$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left( 1 + \exp(-2e^2) \right)$$



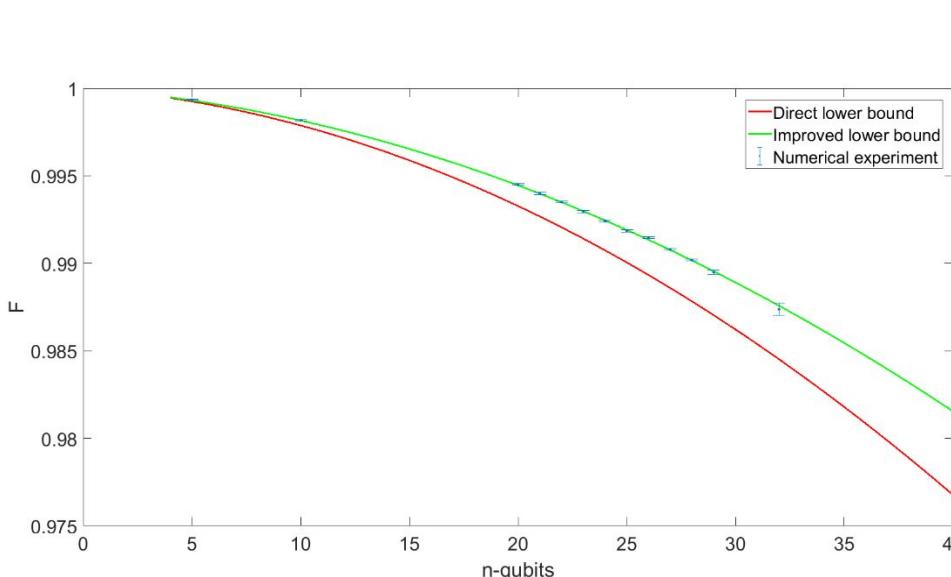
Ошибка аппроксимации зашумленного алгоритма Гровера для рангов 1 (сплошная линия) и 30 (пунктирная линия) соответственно для 12 кубит;  $e = 0.01$  – уровень ошибки.

Динамика точности зашумленного алгоритма Гровера. Разные способы моделирования.



# Теоретический и численный анализ QFT и алгоритма Шора

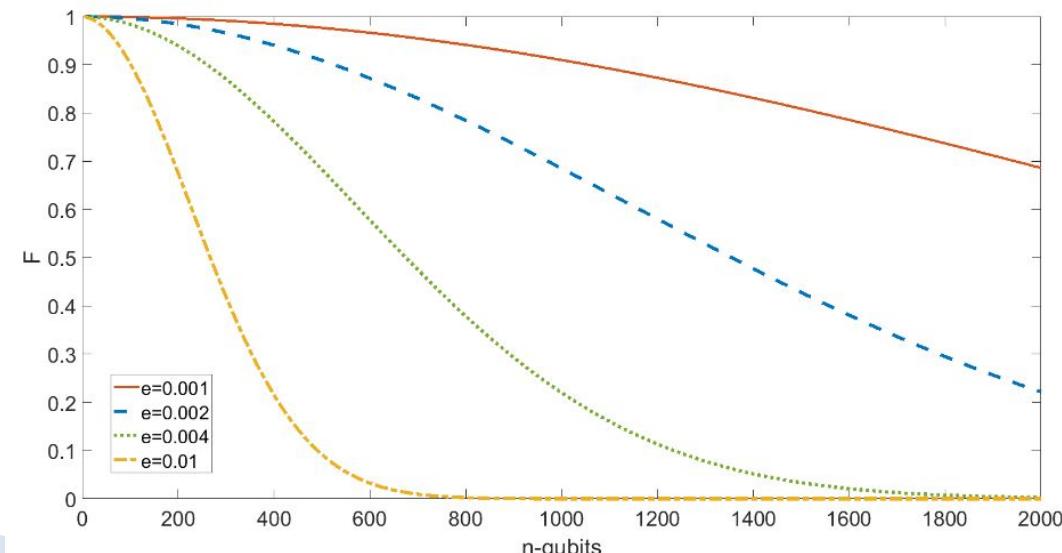
$$F_{QFT} = \tilde{P}_H^n P_R^{n(n-1)/8}$$



$$P_H = \lambda_1 \quad \tilde{P}_R = \frac{\sqrt{P} + f\sqrt{1-P}}{(1+f^2)^4} \quad \lambda_1 = \frac{1}{2}(1 + \exp(-2e^2))$$

Степень совпадения схемы квантового преобразования Фурье ( $e = 0.01$ ), полученная методом Монте-Карло, прямой аппроксимацией единичного ранга и аппроксимацией единичного ранга с «приведением к главным осям».

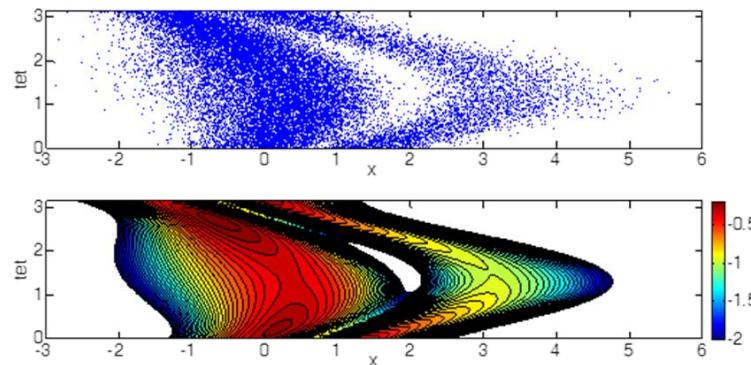
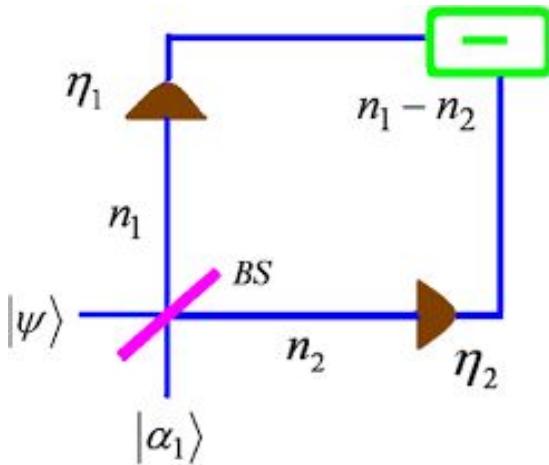
Прогноз точности квантового преобразования Фурье от числа кубитов для разных уровней шума.



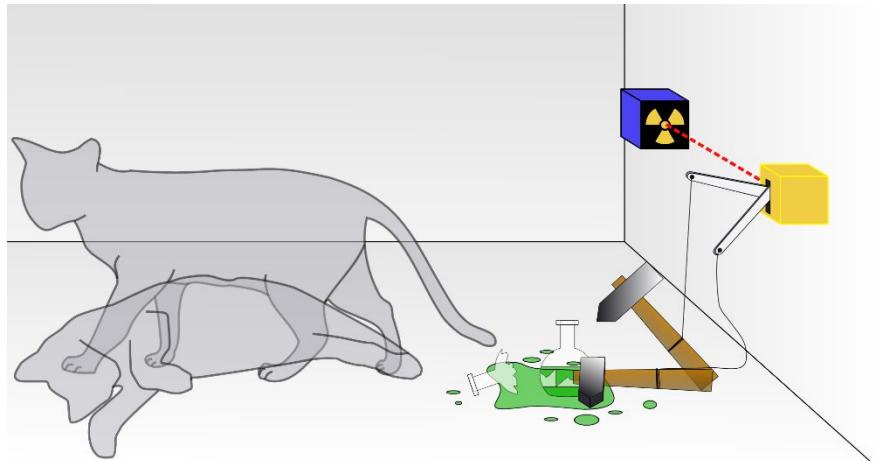
# Принцип дополнительности Нильса Бора

Данные, получаемые при разных условиях опыта, не могут быть охвачены одной-единственной картиной; эти данные должны скорее рассматриваться как дополнительные в том смысле, что только совокупность разных явлений может дать более полное представление о свойствах объекта. Н. Бор

Мы можем назвать современную квантовую механику теорией дополнительности (по аналогии с теорией относительности. В. Паули



# Реконструкция состояния кота Шредингера

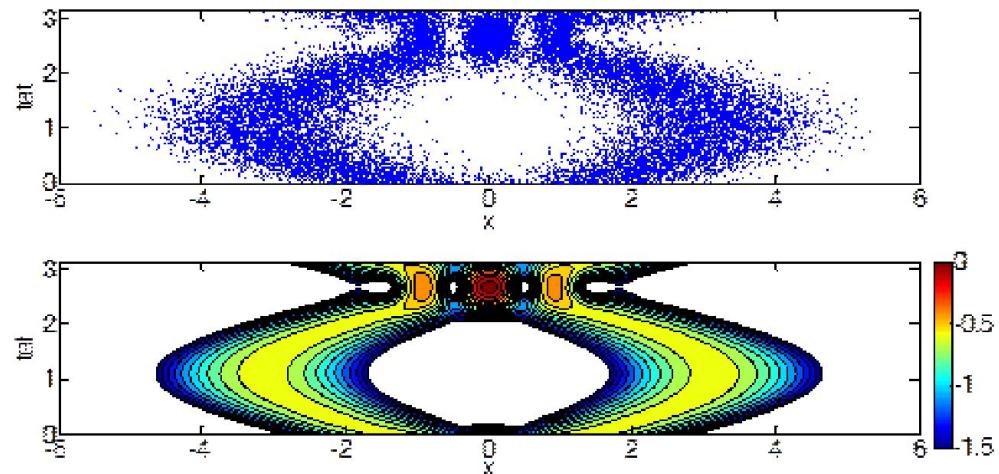


[https://en.wikipedia.org/wiki/Schrödinger%27s\\_cat](https://en.wikipedia.org/wiki/Schrödinger%27s_cat)

Суперпозиция состояний живого и мёртвого кота Шредингера

Уравнение Шредингера

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \hat{H} |\psi\rangle$$

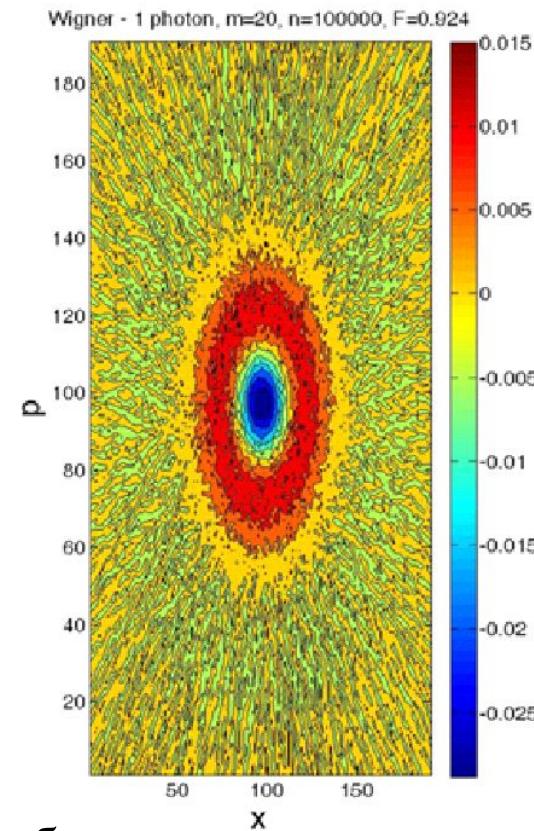
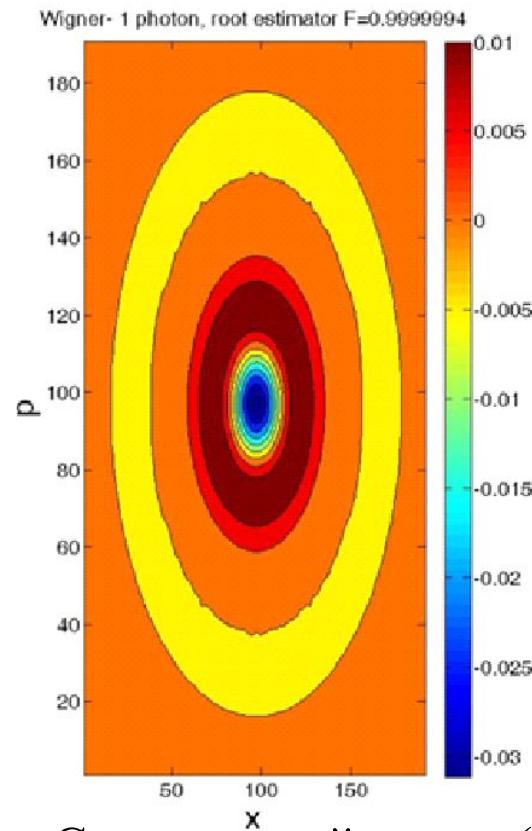


Сравнение данных (вверху) с результатами статистического восстановления состояния кота Шредингера

Вероятность в квантовой физике

$$P = |\langle \phi | \psi \rangle|^2$$

# Точность контроля квантовых состояний



Стандартный метод (справа) обеспечивает низкую точность восстановления квантового состояния (всего 92,4%). В то же время, корневая оценка (root estimator) обеспечивает, точность, которая измеряется шестью девятками (99,99994%)



# САПР квантовых вычислений



# Автоматизация квантовых технологий

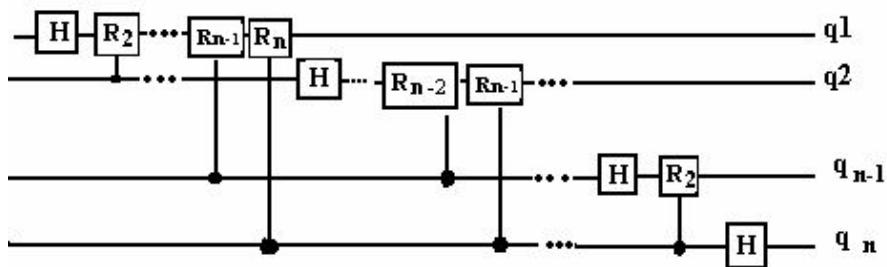
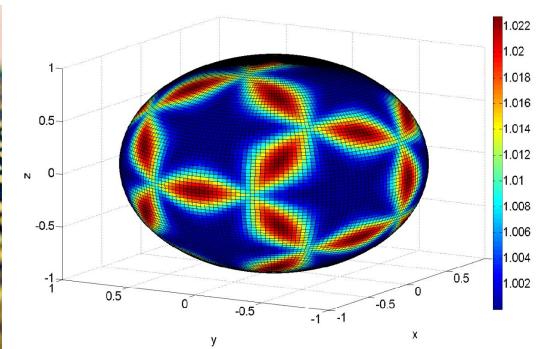
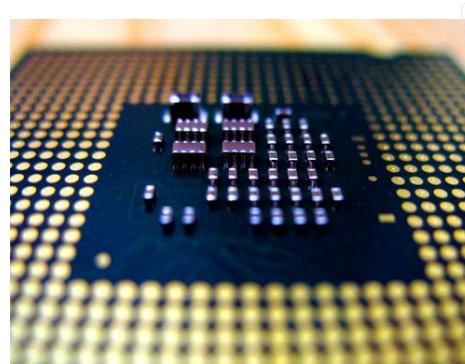
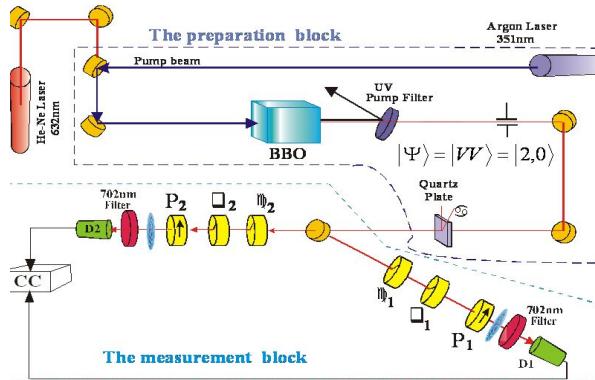
Автоматизация физического управления (лазерные, СВЧ, магнитные импульсы и пр.)

Автоматизация проектирования квантовых схем

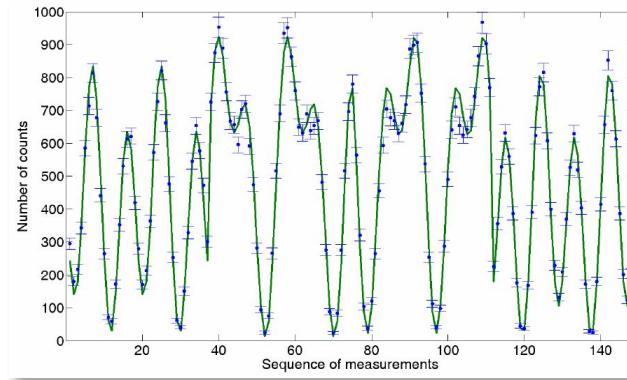
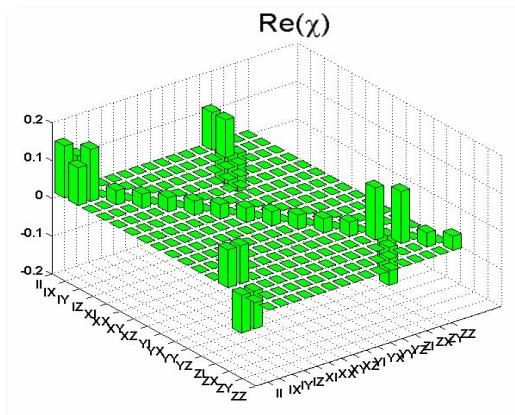
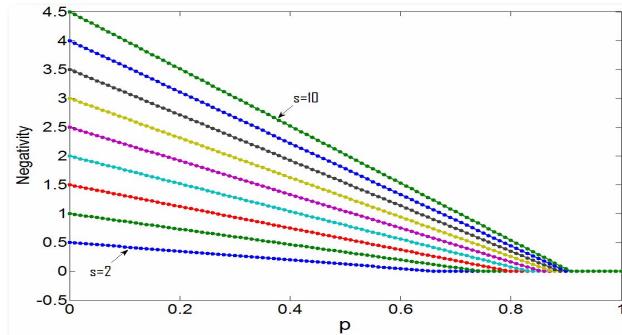
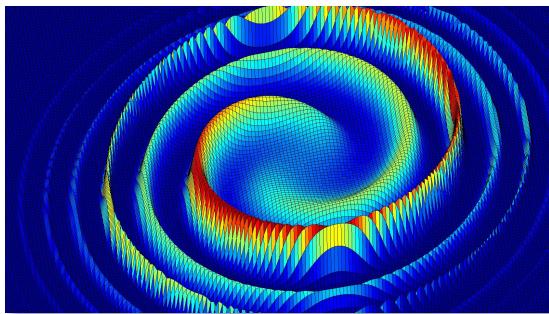
Автоматизация формирования помехоустойчивых квантовых схем

Автоматизация проверки качества квантовых схем с учетом шумов

Автоматизация экспериментов , обработка и визуализация данных



# Влияние квантовых шумов на качество элементной базы квантовых компьютеров



Динамика квантовой системы в фазовом пространстве, разрушение сцепленности в квантовых операциях под действием шума, квантовый вентиль СНОТ под действием шума, восстановление квантового состояния в задаче фотоупругости.



# Выводы

---

Существенный прогресс в области экспериментальных и технологических исследований вселяет реальную надежду на создание в среднесрочной перспективе квантовых вычислительных устройств, способных решать практически важные задачи.

Критически важное значение имеет моделирования квантовых схем с учетом декогерентизации и шумов. Актуальной задачей является реализация соответствующей программной суперкомпьютерной библиотеки

Интерфейс между моделированием и технологическим воплощением систем квантовой обработки информации должен осуществляться посредством таких квантовых измерений, которые обеспечивают адекватный и полный контроль квантовых состояний и процессов с точностью, ограниченной только законами квантовой физики.

# Заключение

---

- Квантовые компьютеры, когда они будут созданы, позволят решать задачи, недоступные классическим компьютерам.
- В основе квантового компьютера лежит квантовый бит, двухуровневая квантовая система.
- Основным ресурсом квантовых вычислений служит явление запутанности, не имеющее классического аналога.

# Заключение (прод.)

---

- Любое квантовое вычисление может быть выполнено с помощью универсального набора одно- и двухкубитовых элементарных операций.
- Предложены различные варианты квантовых компьютеров: на фотонах, на ионах в ловушках, на сверхпроводниках, на спиновых состояниях в кремнии, на NV- центрах в алмазе и др.
- Основное препятствие на пути создания квантовых компьютеров - декогерентизация, неконтролируемое взаимодействием квантовой системы с окружением.

CHACMEO 32 BHVHVE