

XI Научно-практическая конференция с международным участием «НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»



18-19(20) мая, 2023. Санкт-Петербург

Квантовые вычисления: общий подход и перспективы

Калмычков В.А., Матвеева И.В.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



Квантовые компьютеры: начальный этап

- **1980 (идея):**

Первое обозначение идеи квантовых вычислений:

Манин, Ю.И. Вычислимое и невычислимое. – М.: Сов. радио, 1980. – С.15.

- **1982 (модель):**

Feynman, R.P.: Simulating physics with computers. Int. J. Theor. Phys. 21, 467–488

- **1995 (базис, гейты):**

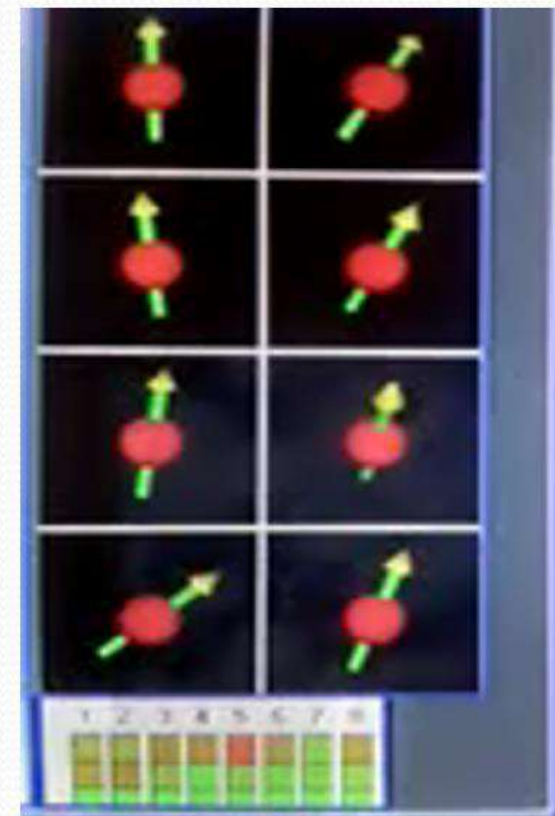
Barenco, A., Benett, C.H., Cleve, R., Divincenzo, D.P., Margolus, N., Shor, P.W., Sleator, T., Smolin, J., Weinfurter, H.

Elementary gates for quantum computation. Phys. Rev. A 52, 3457–3467



Юрий Иванович Манин (16.02.1937–07.01.2023) – советский и американский математик, алгебраический геометр. Один из основоположников некоммутативной алгебраической геометрии, теории квантовых вычислений и квантовой информатики.

Ричард Филлипс Фейнман – американский физик, основные достижения относятся к области теоретической физики и квантовой физики. Один из создателей квантовой электродинамики.



Квантовые компьютеры: начальный этап

- 1980 (идея):

Первое обозначение идеи квантовых вычислений:

Манин, Ю.И. Вычислимое и невычислимое. – М.: Сов. радио, 1980. – С.15.

- 1982 (модель):

Feynman, R.P.: Simulating physics with computers. Int. J. Theor. Phys. 21, 467–488

Elementary gates for quantum computation

Adriano Barenco

*Oxford University**

Charles H. Bennett

IBM Research[†]

Richard Cleve

University of Calgary[‡]

David P. DiVincenzo

IBM Research[†]

Norman Margolus

MIT[§]

Peter Shor

AT&T Bell Labs[¶]

Tycho Sleator

New York Univ.^{||}

John Smolin

UCLA^{**}

Harald Weinfurter

Univ. of Innsbruck^{††}

submitted to Physical Review A, March 22, 1995 (AC5710)

* Clarendon Laboratory, Oxford OX1 3PU, UK; a.barenco@mildred.physics.ox.ac.uk.

[†] Yorktown Heights, New York, NY 10598, USA; bennetc/divince@watson.ibm.com.

[‡] Department of Computer Science, Calgary, Alberta, Canada T2N 1N4; cleve@cpsc.ucalgary.ca.

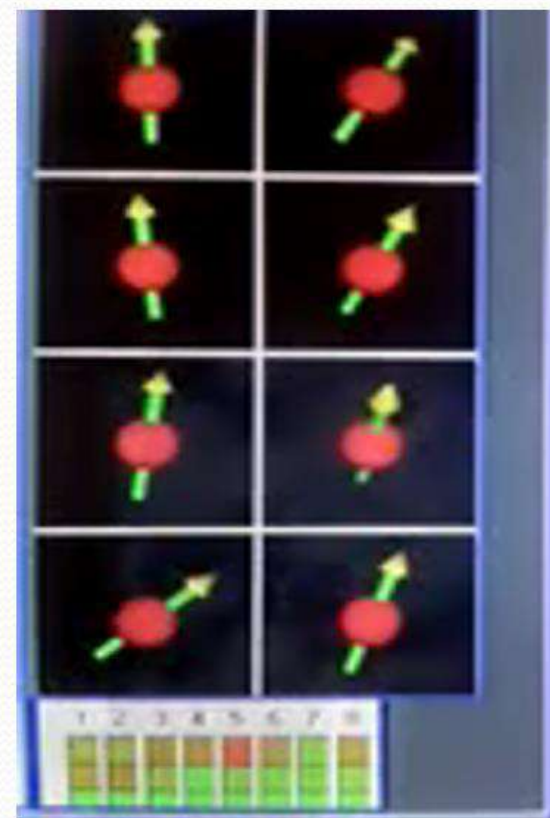
[§] Laboratory for Computer Science, Cambridge MA 02139 USA; nhm@im.lcs.mit.edu.

[¶] Murray Hill, NJ 07974 USA; shor@research.att.com.

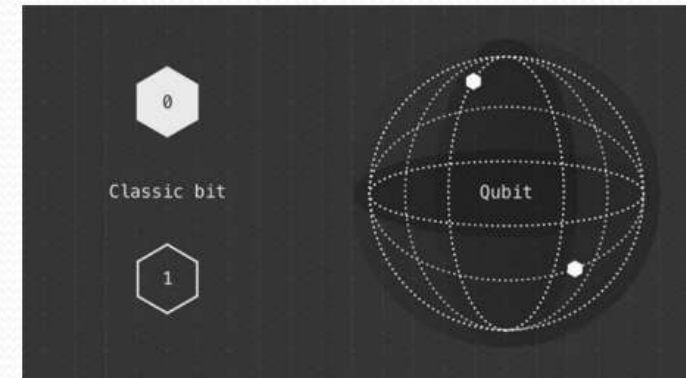
^{||} Physics Dept., New York, NY 10003 USA; tycho@sleator.physics.nyu.edu.

^{**} Physics Dept., Los Angeles, CA 90024; smolin@vesta.physics.ucla.edu. (and IBM Research.)

^{††} Inst. for Exptl. Physics, A-6020 Innsbruck, Austria; harald.weinfurter@uibk.ac.at.



Общая схема организации вычислений с использованием квантового компьютера



- **Модель квантовой цепи** – форма записи спецификации для реализации квантовых вычислений на основе изменения состояний кубитов (qubits) с помощью последовательности преобразователей (gates).

Квантовый бит (кубит) – единичный вектор в двумерном комплексном векторном пространстве с базисом $\{|0\rangle, |1\rangle\}$.

Суперпозиция базовых состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$: $a|0\rangle + b|1\rangle$, где амплитуды вероятности a и b комплексные числа, причем $|a|^2 + |b|^2 = 1$.

Квантовый регистр – набор кубитов.

Квантовая цепь: основные модельные представления

Четырехкомпонентный базис для двухкубитовой системы:

$$\begin{aligned}
 |00\rangle &= |0\rangle|0\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ 0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \quad |01\rangle = |0\rangle|1\rangle = |0\rangle \otimes |1\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ 0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 |10\rangle &= |1\rangle|0\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ 1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \quad |11\rangle = |1\rangle|1\rangle = |1\rangle \otimes |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ 1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Квантовые преобразователи. При вычислениях квантовый регистр подвергается преобразованиям, переводящим регистр в новое состояние.

Квантовое вычисление – выполнение над входным значением регистра $|\phi\rangle$ последовательности квантовых унитарных операторов $U_1 U_2 \dots U_m$ для получения конечного состояния $U_1 U_2 \dots U_m |\phi\rangle$.

Пример унитарной матрицы (2 x 2) оператора *NOT* для преобразования кубита по схеме $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ и $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$:

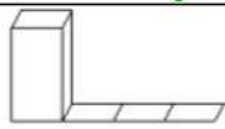
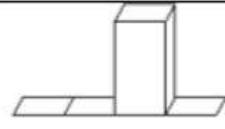
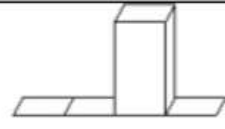
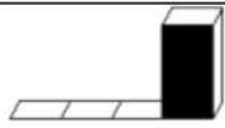
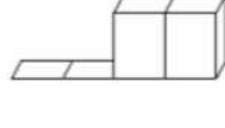
$$NOT = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Графическая спецификация *NOT*: $\oplus$

Квантовая цепь: преобразователи (gates), нотации

Преобразователь	Матричная спецификация квантового преобразователя	Графическая спецификация с учетом поведения преобразователя
<i>NOT</i>	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$ x_0\rangle \oplus x_0\rangle \oplus 1$
<i>CNOT</i> (Фейнмана)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c} x_0\rangle \text{---} \bullet \text{---} x_0\rangle \\ x_1\rangle \text{---} \oplus \text{---} x_1\rangle \oplus x_0\rangle \end{array}$
<i>C²NOT</i> (Тоффоли)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c} x_0\rangle \text{---} \bullet \text{---} x_0\rangle \\ x_1\rangle \text{---} \bullet \text{---} x_1\rangle \\ x_2\rangle \text{---} \oplus \text{---} x_2\rangle \oplus x_0\rangle x_1\rangle \end{array}$
<i>SWAP</i>	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c} x_0\rangle \text{---} \diagup \text{---} x_1\rangle \\ x_1\rangle \text{---} \diagdown \text{---} x_0\rangle \end{array}$

Квантовая цепь: преобразователи (gates), нотации

Преобразование	Состояния	Нотация	Амплитуда
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ – два одинаковых скалярных значения в двух векторах	0  $1 + 0i$ $ 00\rangle$ 1  $0 + 0i$ $ 01\rangle$ 2  $0 + 0i$ $ 10\rangle$ 3  $0 + 0i$ $ 11\rangle$	Q1   Q2  	
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ – два разных скалярных значения в двух векторах	0  $0 + 0i$ $ 00\rangle$ 1  $0 + 0i$ $ 01\rangle$ 2  $1 + 0i$ $ 10\rangle$ 3  $0 + 0i$ $ 11\rangle$	Q1   Q2  	
$\text{Not}\left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}\right) \otimes \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ – смена проекций на оси (обмен осей первого вектора)	0  $0 + 0i$ $ 00\rangle$ 1  $0 + 0i$ $ 01\rangle$ 2  $1 + 0i$ $ 10\rangle$ 3  $0 + 0i$ $ 11\rangle$	Q1   Q2   	
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \text{Not}\left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}\right) \xrightarrow{e^{j\pi/4} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}$ $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ 1+j \end{bmatrix}$ – обмен осей и зависимый поворот по одной оси	0  $0 + 0i$ $ 00\rangle$ 1  $0 + 0i$ $ 01\rangle$ 2  $0 + 0i$ $ 10\rangle$ 3  $0.70711 + 0.70711i$ $ 11\rangle$	Q1     Q2   	
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{H} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ – преобразование Адамара	0  $0 + 0i$ $ 00\rangle$ 1  $0 + 0i$ $ 01\rangle$ 2  $0.70711 + 0i$ $ 10\rangle$ 3  $0.70711 + 0i$ $ 11\rangle$	Q1    Q2  	

Преобразователи: инструкции физического уровня

The screenshot displays a quantum circuit simulation interface with three main windows:

- MI Set: xyz**: A list of instructions including 'MI h_nmr2', 'MI h_nmr4', 'MI h_xyz', 'MI h_xyz2', 'MI Initialize', 'MI set1one', 'MI set2one', 'MI set3one', 'MI sqrt_x3', 'MI sqrt_y1', 'MI sqrt_y1a', 'MI sqrt_y2', 'MI sqrt_y3', 'MI u23', 'MI x1', 'MI x2', 'MI x3', 'MI y1', 'MI y1exact', 'MI y2', 'MI y2exact', 'MI y3', 'MI y3exact', 'QP cnot_12', 'QP cnot_12xyz', 'QP cnot_13', 'QP cnot_23', 'QP cv_13', 'QP cv_23', 'MI h_exact', 'MI h_nmr', and 'MI h_nmr12'.
- QP tof_exact**: A sequence of instructions including 'Start', 'MI Initialize', 'MI set2one', 'MI set1one', 'MI set3one', 'QP cnot_23', 'MI sqrt_y3', 'QP cnot_13', 'MI sqrt_y3', 'QP cnot_23', and 'MI sqrt_y3'.
- QP cnot_13**: A sequence of instructions including 'Start', 'MI y3', 'MI h_nmr2', 'MI x2', 'MI x2', 'MI h_nmr2', 'MI x2', 'MI x2', 'MI y3', 'MI x3', 'MI x1', 'MI y1', 'MI x1', 'MI x2', 'MI y2', and 'MI x2'.

A small window titled 'QE tof_exact' is also visible, showing a 2x2 grid of red spheres with green arrows indicating movement.

Преобразователь Тоффоли:

- слева:

2 управляющих кубита

- справа:

целевой кубит



Квантовые технологии

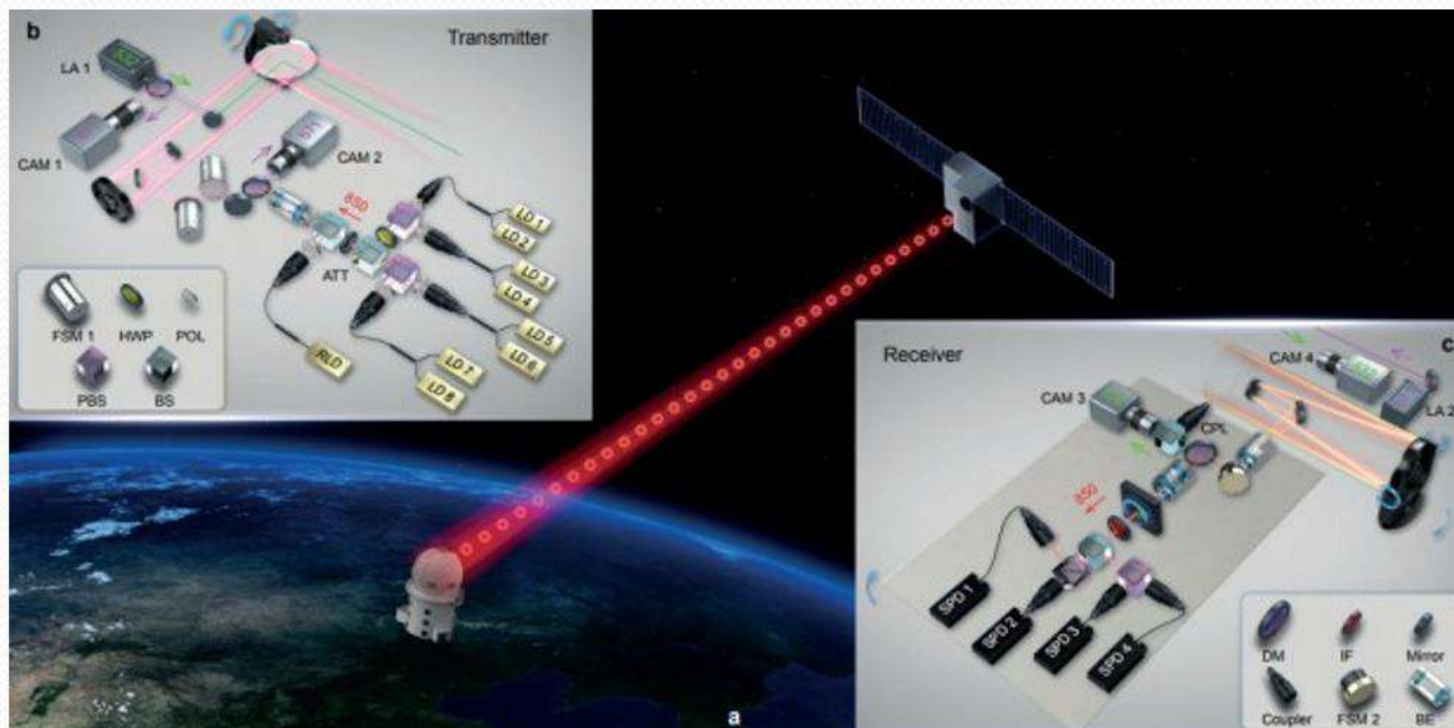


Квантовые технологии: коммуникации

Квантовые коммуникации активно применяются в современной мировой практике:

В 2017 году Китайская академия наук запустила:

- квантовую линию связи между Пекином и Шанхаем,
- первый спутник квантовой связи (первый сеанс трансконтинентальной связи Австрийской и Китайской академии наук, ключ шифрования с помощью методов квантовой криптографии - состояния фотона), дальности квантовой связи свыше 7400 км



Источник: Sheng-Kai Liao et al. / Nature

- «городские» квантовые сети существуют уже в десятках стран, в том числе и в России (Москва, Казань, Санкт-Петербург)

Квантовые компьютеры: на марше

- **1980 (идея):** Первое обозначение идеи квантовых вычислений: Манин, Ю.И. Вычислимое и невычислимое. – М.: Сов. радио, 1980. – С.15.
- **1982 (модель):** Feynman, R.P.: Simulating physics with computers. Int. J. Theor. Phys. 21, 467–488
- **1995 (базис, гейты):** Barenco, A., Benett, C.H., Cleve, R., Divincenzo, D.P., Margolus, N., Shor, P.W., Sleator, T., Smolin, J., Weinfurter, H. Elementary gates for quantum computation. Phys. Rev. A 52, 3457–3467

1998	Демонстрация 2-х, 3-х кубитных квантовых компьютеров на ЯМР (ЯМР-компьютер)
2001	IBM: тестирование 7-кубитного квантового компьютера, реализованного с помощью ядерного магнитного резонанса
2007	Лаборатории сверхпроводимости г. Москвы: при помощи японских специалистов построен двухкубитный квантовый процессор на сверхпроводящих элементах
2007	D-Wave Systems: создание квантового компьютера с 16 кубитами (довели до 2000 кубитов) - использует квантовые эффекты
2009	Физики Национального института стандартов и технологий (США) впервые собрали программируемый квантовый компьютер, состоящий из двух кубитов
2016	IBM: первый квантовый компьютер (пятикубитный квантовый процессор) в облаке
2017	Физики под руководством Михаила Лукина (сооснователь Российского квантового центра, профессора Гарвардского университета), создали программируемый 51-кубитный квантовый симулятор
2017	IBM: прототип процессора с 50 кубитами
2018	Google: 72-кубитный квантовый процессор
2019	IBM: первый в мире коммерческий квантовый компьютер IBM Q System One
2019	Google: 53-кубитный сверхпроводящий квантовый процессор
2021	Группа китайских учёных создали два прототипа квантовых компьютеров: - сверхпроводящий квантовый процессор с 66 кубитами - квантовый компьютер со 113 обнаруженными фотонами (кубитами)
2021	IBM: квантовый процессор на сверхпроводящих кубитах (127 кубитов)
2022	Исследовательский центр Юлиха (Германии): квантовый суперкомпьютер более чем 5000 кубитов - на базе D-Wave с удалённым облачным доступом
2022	IBM: квантовый процессор с 433 кубитами (2023 компьютер IBM Quantum System Two)

Квантовые компьютеры и вычисления

Цели применения:

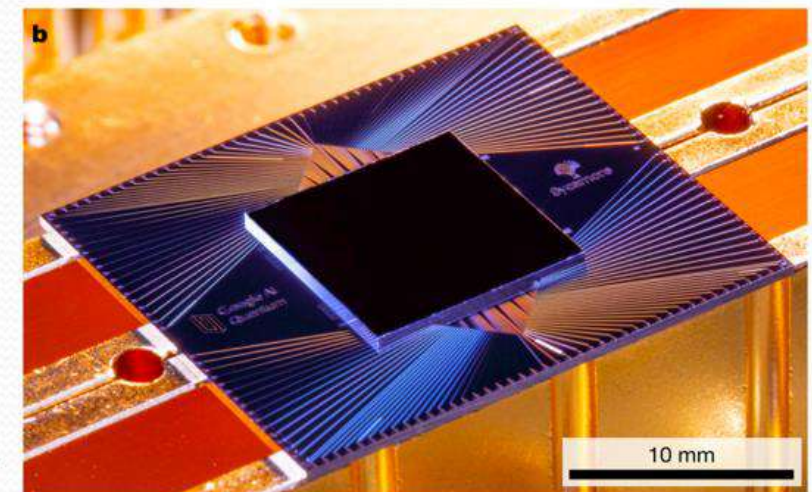
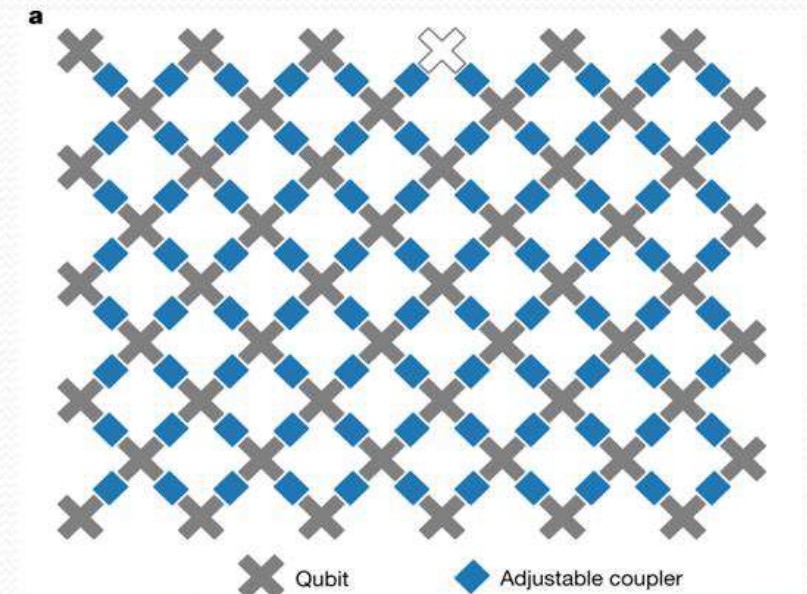
- решение задач значительно быстрее компьютеров классической архитектуры
- «одновременная» обработка набора данных на основе классических алгоритмов
- высокоскоростные эмуляторы

Решаемые задачи:

- обеспечение стабильного состояния большого числа кубитов на существенный временной промежуток (+«температурное» влияние)
- обнаружение и исправление квантовых ошибок при вычислениях
- взаимодействие кубитов на уровне близкого соседства (ЛБС – линейно ближайшее соседство, LNN – Linear Nearest Neighbor)
- физические носители и процессы
- обработка результатов (измерение)
- воспроизводимость

Квантовый компьютер, следуя законам квантовой физики, получит огромную вычислительную мощность благодаря способности данных находиться в нескольких состояниях с выполнением задач при использовании всех их возможных перестановок одновременно.

Квантовые вычисления могут обеспечить вычислительный импульс искусственному интеллекту, позволяя ему решать более сложные проблемы во многих областях бизнеса и науки.



Источник: Google

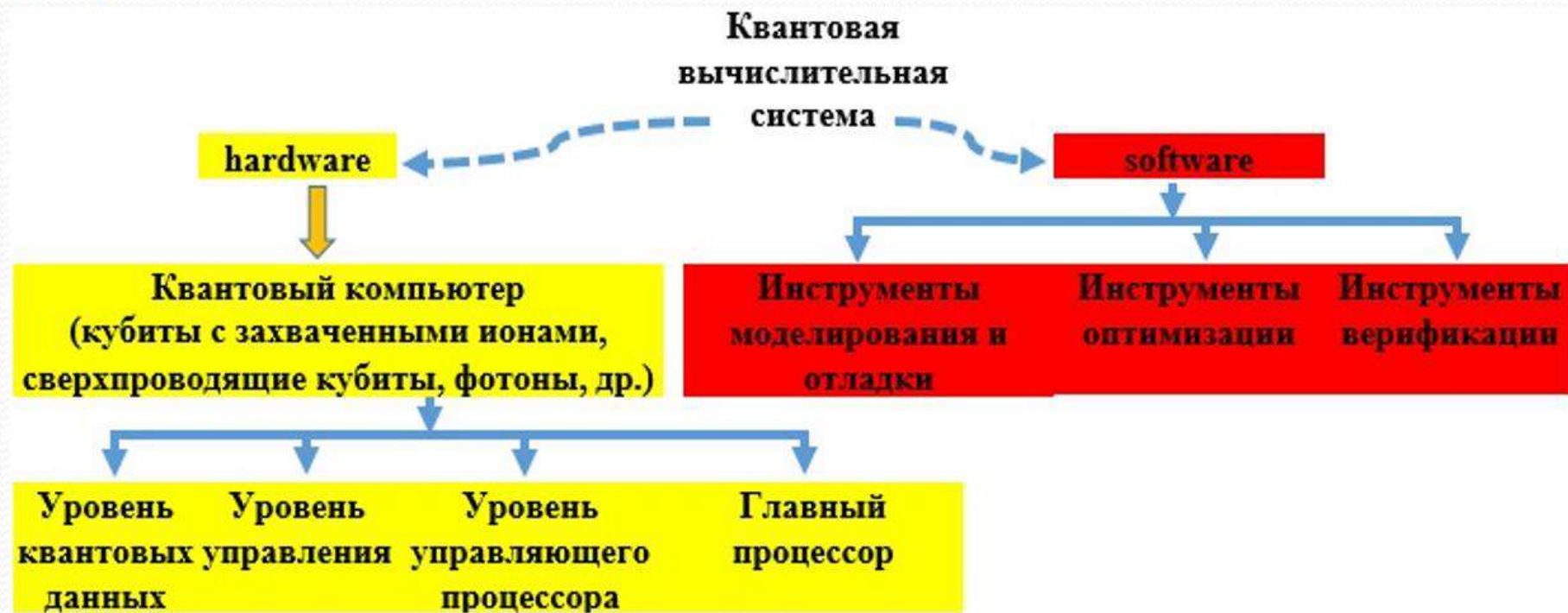
- a: Компоновка процессора (53 кубита)
b: Sycamore chip – 2019 (Google Quantum AI)

Квантовые компьютеры: основные технологии

Квантовая вычислительная система (QCS) - это система, состоящая из двух частей: аппаратной и программной.

Аппаратное обеспечение QCS - это квантовый компьютер на основе разных технологий. Квантовый компьютер содержит основные компоненты, которые представляют собой квантовые данные, управление и измерение, также есть управляющий процессор и основной процессор.

Программное обеспечение QCS состоит из основных инструментов, которые являются инструментами моделирования и отладки, инструментами оптимизации и инструментами проверки.



Квантовые компьютеры: основные технологии

Технология	Логический кубит	Управление
Твердотельные квантовые точки на полупроводниках	Зарядовые состояния (электрон) или направление электронного и/или ядерного спина в квантовой точке	Внешние потенциалы или лазерный импульс
Сверхпроводящие элементы (Superconducting Qubit)	Присутствие/отсутствие куперовской пары в определённой точке пространства	Внешний потенциал, магнитный поток
Фотонный кубит (Photonic Qubit)	Сжатое состояние (свет, работающий как кубит) создается путем распределения лазерного излучения по массиву сжимателей (микроскопические устройства, состоящие из относительно небольших кольцевых резонаторов)	Лазерные импульсы, поляризация
Атомы в оптических ловушках (ионы) (Trapped Ion Qubit)	Состояния внешнего электрона в ионе. Лазеры ионизируют атомы и удерживают их в электрических потенциалах	Лазерные импульсы вдоль оси ловушки или на ионы

Квантовые компьютеры: воплощение

Производство оборудования для квантовых компьютеров: **D-Wave Systems, IonQ, IBM, Alibaba, Microsoft, Google, Intel, Quantum Circuits, Honeywell, Xanadu, Rigetti, ...**

D-Wave Systems (Канада) – начало промышленных квантовых вычислений:

2007 - 16-кубитный квантовый компьютер

(«adiaбатический» процесс - «квантовый отжиг»),

2018 - облачная квантовая среда приложений,

2020 - 5000-кубитовые квантовые компьютеры

IonQ: квантовые вычисления с захваченными ионами (IonQAria)

Dell: 2022 - вычислительная система Dell Quantum Computing Solution (сервера Dell Power Edge+IonQAria) и платформа Qiskit Dell Runtime для удаленной работы с классико-квантовыми алгоритмами

Intel: процессоры на основе технологии «спиновой кубит»

Google: 2019 - собственные процессоры

2022 - виртуальная квантовая машина Quantum Virtual Machine (платформа Google Colab)

Alibaba: 2015 - с Китайской Академией Наук «Лаборатория квантовых вычислений CAS-Alibaba»

2018 - «сверхпроводящее облако квантовых вычислений» для 11-кубитного квантового компьютера

Xanadu: фотонные квантовые вычисления

Microsoft: квантовые компьютеры на основе «топологических кубитов».

2020 - сервис облачных вычислений Azure Quantum

IBM: 2016 - 5-кубитный квантовый компьютер на сайте доступа IBM Q Experience, программная платформа для квантовых вычислений с открытым исходным кодом Qiskit,

2019 - универсальная платформа IBM Q System One, организация облачного доступа



Фото: D-Wave

Квантовые технологии: развитие в России

2020

- Мишустин утвердил правила получения субсидий на разработку квантовых процессоров
- «Ростех», «Росатом» и РЖД получают деньги из госбюджета на 5G и квантовые технологии вместо институтов развития
- Ростех вступил в проект БРИКС по созданию межконтинентального канала квантовой связи
- Правкомиссия по цифровому развитию утвердила дорожную карту РЖД по квантовым коммуникациям
- В России создают квантовый компьютер с облачным доступом ←
- РВК предоставила 300 млн рублей на разработку квантового интернета в России
- Российские ученые разработали платформу для наноэлектроники и квантовых процессоров
- Новый глава IBM усомнился в возможности России создать квантовый компьютер
- Российские учёные научили искусственный интеллект «видеть» квантовые преимущества

2019

- Разработка «Росатомом» квантового компьютера за 24 млрд рублей ←
- В НИТУ «МИСиС» заработал прототип квантового компьютера
- Бюджет на развитие квантовых технологий в России оценили в 44 млрд рублей
- Одобрена дорожная карта развития технологий квантовой обработки информации
- Успешный эксперимент МГУ по созданию ловушек для массивов нейтральных холодных атомов

2018

- Разработка комплекса стандартов в области квантовых коммуникаций, ИИ и умного города
- Соглашение о создании 50-кубитного квантового компьютера

2017

- В России представлен квантовый телефон ViPNet
- Ученые из России и США создали 51-кубитный квантовый компьютер
- В Казани испытали «квантовый телефон» ←

2016

- В Московской области квантовую связь испытали между двумя городами
- Пилотная квантовая сеть передачи данных в Татарстане
- В России нашли способ «утрамбовать» несколько элементов квантового компьютера в один
- В России утвержден проект по созданию универсального квантового компьютера

2013: В России измерили состояние кубита ←

Квантовые технологии: развитие в России

2022

- Утвержден профстандарт для специалистов по квантовым технологиям в России
- В России впервые продемонстрирован действующий квантовый процессор
- Создание учеными алгоритма, способного предсказывать поведение квантовых систем
- Обнаружен физический эффект, который может лечь в основу квантовых устройств
- США запретили экспорт и продажу в Россию услуг в сфере квантовых вычислений
- Правительство выделяет 100 млрд рублей на развитие квантовых технологий
- Минобороны РФ создало рабочую группу для использования квантовых технологий
- Российские ученые создали библиотеку алгоритмов для разработки квантовых приложений
- Назначение куратором разработок в сфере искусственного интеллекта и квантовых вычислений Дмитрия Чернышенко
- Сотрудниками МТУСИ через многосердцевидное волокно одновременно реализовано несколько каналов квантовой связи
- В России начинают обучать инженеров по квантовым вычислениям
- Создан узел российской квантовой сети для интернета будущего
- Российские ученые запатентовали архитектуру квантового процессора на основе кудитов
- Российские ученые разработали метод создания квантовой запутанности
- Российские ученые предложили актуальный подход к масштабированию квантовых компьютеров

2021

- В «Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова» состоялся запуск «Университетской квантовой сети»
- В России создали технологию развертывания бюджетной квантовой сети
- Запуск экосистемной межвузовской квантовой сети в России
- В Москве запущена квантовая сеть
- «Национальная квантовая лаборатория» за 6 месяцев создала прототип квантового компьютера
- Запуск двух квантовых облачных платформ для бизнеса и разработчиков в РФ
- Создание единой цифровой платформы по квантовым технологиям
- «Транстелеком» построил квантовую сеть Москва – Петербург
- Завершение строительства квантовой линии связи между Москвой и Санкт-Петербургом
- В МФТИ создана квантовая интегральная схема на основе пяти сверхпроводниковых кубитов
- Ученые НИТУ МИСиС, РКЦ и Технологического института Карлсруэ разработали квантовый сенсор

Квантовые технологии: развитие в России

2022

Утвержден профстандарт для специалистов по квантовым технологиям в России

В Р

Со

Об

СШ

Пра

Ми

Рос

На

Чер

Со

кван

В Р

Со

Рос

Рос

Рос

2021

В

кван

В Р

За

В М

«Н

За

Со

«Тр

Завершение строительства квантовой линии связи между Москвой и Санкт-Петербургом

В МФТИ создана квантовая интегральная схема на основе пяти сверхпроводниковых кубитов

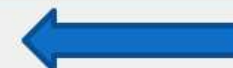
Ученые НИТУ МИСиС, РКЦ и Технологического института Карлсруэ разработали квантовый сенсор

НИЯУ МИФИ: первая в России образовательная программа «Квантовый инжиниринг». Программа сформирована «с нуля» и учитывает интересы современной квантовой науки, которой нужны молодые кадры с фундаментальной научной подготовкой.

В разработке программы курса принял участие Институт лазерных и плазменных технологий (Институт ЛаПлаз) МИФИ при поддержке СП «Квант» (Росатом) и научном сопровождении Российского квантового центра и МИАН имени В.А. Стеклова. Со второго курса студентов начнут привлекать к лабораторной и производственной практике на площадках НИЯУ МИФИ и организаций-партнеров.

«Росатом»: «В образовательную программу входят такие дисциплины как квантовые вычислительные алгоритмы, топология, математическая статистика и машинное обучение, динамический хаос, квантовая сенсорика, квантовая оптика, лазерная физика, фотоника, линейная алгебра и др. Также от будущего квантового инженера требуется умение работать со специальным исследовательским оборудованием».

«Росатому» отводится управляющая и координирующая роль в развитии квантовых технологий в России. В частности, «Росатом» работает над реализацией плана Правительства Российской Федерации по созданию в стране к 2024 году квантового компьютера на одновременно 4 основных платформах: сверхпроводниках, холодных атомах и ионах, а также фотонах. Для работы со всем этим и для развития направления необходимы специально подготовленные кадры, которых в должном количестве сегодня явно нет.



Квантовые технологии: развитие в России

2023

Российские ученые создали математическую модель для повышения качества спутниковой квантовой связи

Российские ученые повысили производительность квантовых процессоров с помощью кудитов

Впервые в России открыт доступ к отечественному квантовому компьютеру через облако

Российские ученые повысили устойчивость сверхпроводниковых квантовых процессоров к ошибкам

Разработан алгоритм непрерывного мониторинга характеристик квантового процессора

Российские ученые предложили алгоритм для точного расчета динамики квантовых систем

В ИТМО предложили протокол для генерации запутанных состояний, который поможет создавать чипы следующего поколения



2016: Старт первого в России проекта по созданию квантовых информационных систем на основе **сверхпроводящих кубитов** (Проектный офис по квантовым технологиям госкорпорации «Росатом»).

2018: Пилотный проект по развитию двух других платформ квантовых вычислений - нейтральных атомов в оптических ловушках и интегральных оптических чипов.

2021: Прототип квантового компьютера (Национальная квантовая лаборатория, РКЦ, ФИАН) на платформе из 20 ионов, захваченных электромагнитной ловушкой.

2021: Первый в России квантовый сопроцессор на основе 5 **сверхпроводниковых кубитов** — трансмонов (лаборатория Искусственных квантовых систем МФТИ).

2021: Квантовый симулятор на основе массива из 11 сверхпроводящих кубитов (Российский квантовый центр, НИТУ «МИСиС», Университет ИТМО, МГТУ им. Баумана, Росатом и Институт Иоффе).

2023: Облачный интерфейс для взаимодействия с процессором и запуска квантовых алгоритмов (первый удаленный доступ к пятикубитному **квантовому ионному компьютеру** – для команды физиков из РКЦ и ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН): проект был запущен в 2020 г. при поддержке Фонда НТИ и Минцифры, в 2021 - прототип из 4 кубитов (на многоуровневых квантовых системах - кудитах), в 2022 - увеличили мощность квантового компьютера до 5 кубитов, Сколтех и ФТИАН им. К. А. Валиева РАН - стек программного обеспечения для работы с ионным квантовым вычислителем.

Квантовые технологии: развитие в России

Чип пятикубитного квантового процессора в держателе:

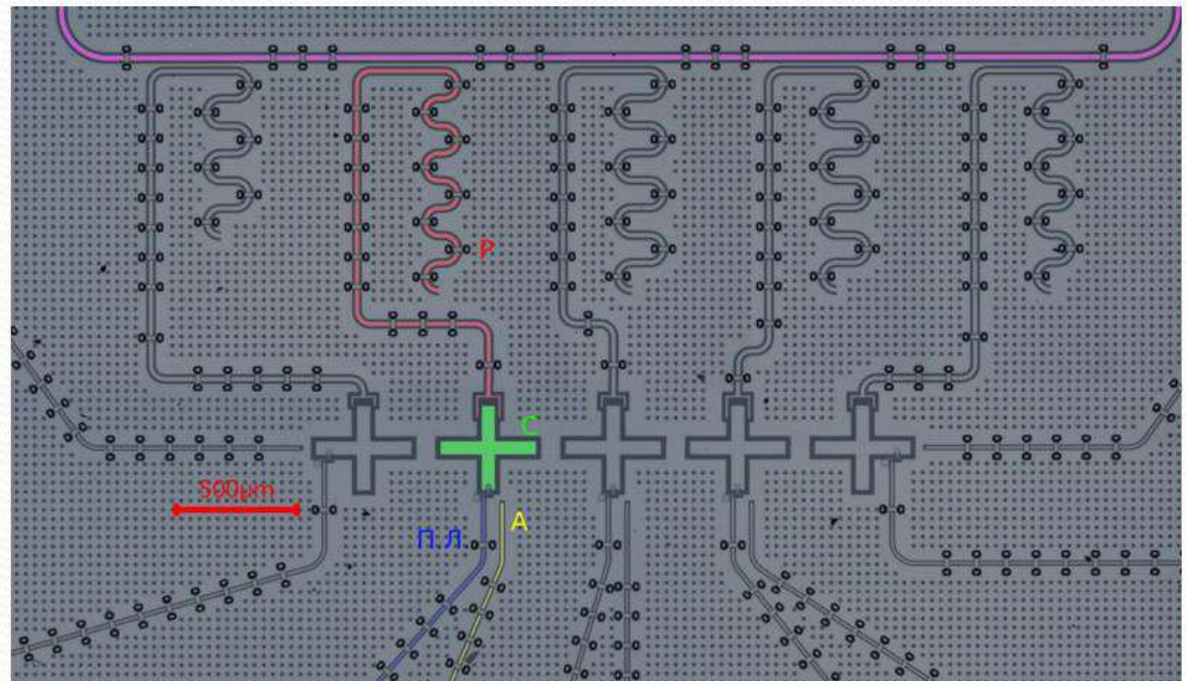


Фото МФТИ: КИМС с оптического микроскопа (в ложном цвете). Микросхема - 5 кубитов (емкость одного отмечена зеленым), связанных с резонаторами (красный) для индивидуального считывания.

Каждый кубит снабжен управляющей потоковой линией и антенной для осуществления однокубитных операций (синий и желтый).

Эксперимент: время отдельной логической операции - около 0.025 мкс.

Реализация порядка 3200 операций за время жизни квантового состояния процессора.



Квантовые языки программирования

Квантовые компьютеры требуют использования двух ключевых функций для эффективной работы: языков программирования и инструментов программирования.

Язык программирования может быть как высокоуровневым, так и низкоуровневым. Примером низкоуровневого языкового программирования является квантовый язык ассемблера (ASM).

Язык программирования высокого уровня является функциональным (например, Q#) и императивным (например, ProjectQ).



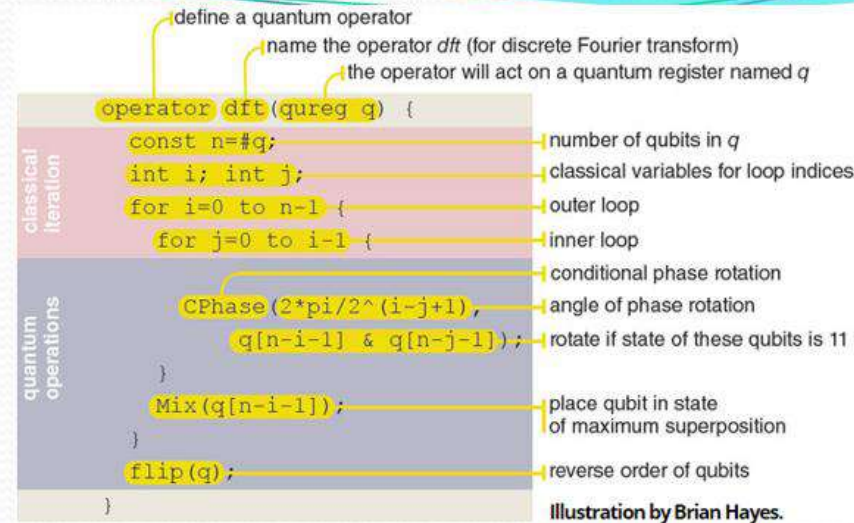
Квантовые языки программирования

- QCL, 1998

(Quantum Computation Language)

- QDK (Microsoft Quantum Development Kit) Q# (2017)

```
1 open Microsoft.Quantum.Primitive;
2 ...
3 (qubits : Qubit[]) :
4 ...
5 body {
6     CNOT(qubits[2], qubits[1]);
7     H(qubits[0]);
8     CNOT(qubits[1], qubits[2]);
9     CNOT(qubits[0], qubits[1]);
10    CNOT(qubits[2], qubits[0]);
11    CNOT(qubits[2], qubits[1]);
12    CNOT(qubits[0], qubits[1]);
13    CNOT(qubits[2], qubits[0]);
14    CNOT(qubits[1], qubits[2]);
15    H(qubits[0]);
16    CNOT(qubits[0], qubits[1]);
17    CNOT(qubits[1], qubits[2]);
18 }
```



- ProjectQ (Python) (2017)

```
1 from projectq.engines import MainEngine
2 from projectq.ops import All, H, X, Measure
3 from projectq.meta import Compute, Uncompute,
4 import revkit
5 eng = MainEngine()
6 qubits = eng.allocate_quireg(6)
7 x = qubits[::2]
8 y = qubits[1::2]
9 with Compute(eng):
10     All(H) | qubits
11     All(X) | [x[0], x[1]]
12 Uncompute(eng)
13 All(H) | qubits
14 Measure | qubits
15 eng.flush()
```

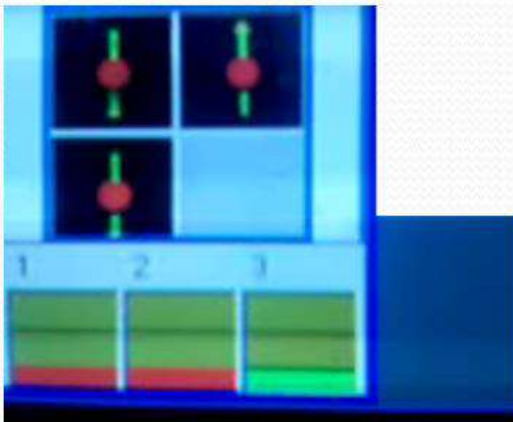

Квантовые языки программирования

- Open Quantum Assembly Language (OpenQASM), IBM (2017)
Пример (A.W. Cross, L.S. Bishop, J.A. Smolin, J.M. Gambetta):

```
// controlled-NOT
gate cx c,t { CX c,t; }
// Pauli gate: bit-flip
gate x a { u3(pi,0,pi) a; }
// Pauli gate: bit and phase flip
gate y a { u3(pi,pi/2,pi/2) a; }
// Pauli gate: phase flip
gate z a { u1(pi) a; }
// C3 gate: sqrt(S) phase gate
gate t a { u1(pi/4) a; }
// C3 gate: conjugate of sqrt(S)
gate tdg a { u1(-pi/4) a; }
```

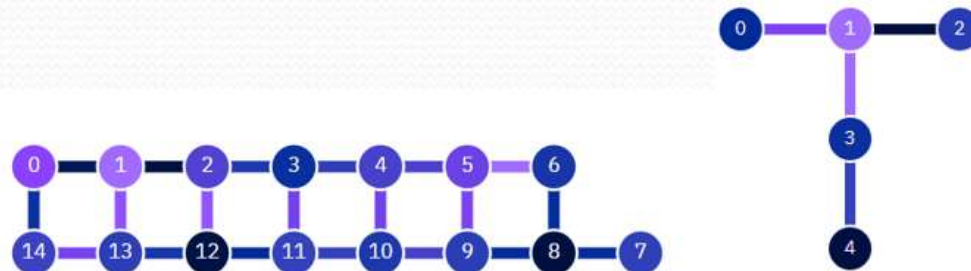
```
// C3 gate: Toffoli
gate ccx a,b,c
{
    h c;
    cx b,c; tdg c;
    cx a,c; t c;
    cx b,c; tdg c;
    cx a,c; t b; t c; h c;
    cx a,b; t a; tdg b;
    cx a,b;
}
```

```
// controlled-H
gate ch a,b {
    h b; sdg b;
    cx a,b;
    h b; t b;
    cx a,b;
    t b; h b; s b; x b; s a;
}
```



Квантовые компьютеры: топологические особенности

Первоначально использовались схемы с размещением кубитов в квадратных и треугольных решетках:



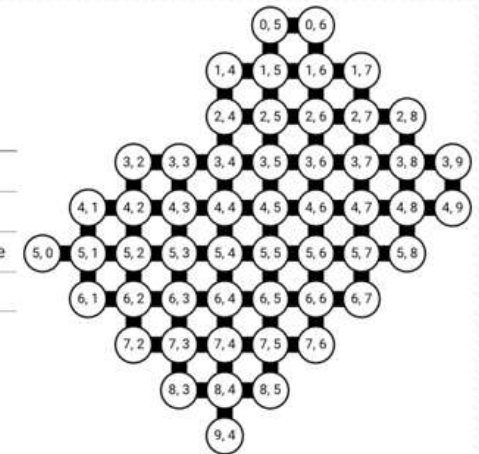
Источник: IBM

Weber Quantum Computer

Qubit Grid

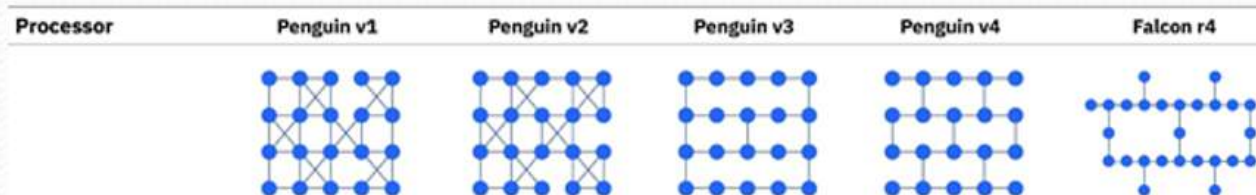
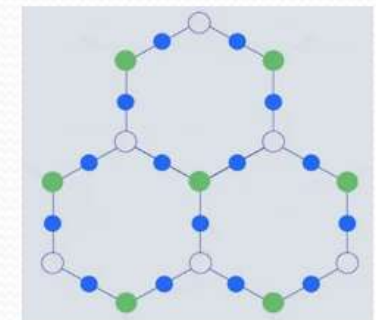
processor_id	Weber
Family	Sycamore
Supported two-qubit gates	$\sqrt{\text{ISWAP}}$, Sycamore
Number of qubits in the grid	53
Qubit Layout	

Источник: Google



8 августа 2021 IBM Quantum отказывается от своих квадратных топологий и топологий в виде галстука-бабочки (треугольной) в пользу решетки heavy-hex. IBM перешла на новую технологию с квантового процессора на 27 кубит. На этом и следующих квантовых процессорах кубиты располагаются, формируя «шестигранную решетку» - каждый кубит соединяется с двумя или тремя соседями в зависимости от нахождения в узлах или на рёбрах шестиугольников.

Справа 3 элементарные ячейки решетки с шестигранником. Цвета указывают на схему из трех различных частот для управления (темно-синий) и двух наборов целевых кубитов (зеленый и серый).



Сокол

Колибри

Орел

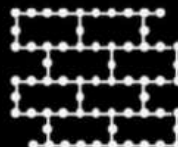
Скопа

Кондор

Falcon:
27 qubits



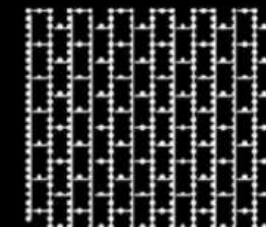
Hummingbird:
65 qubits



Eagle:
127 qubits



Osprey:
433 qubits

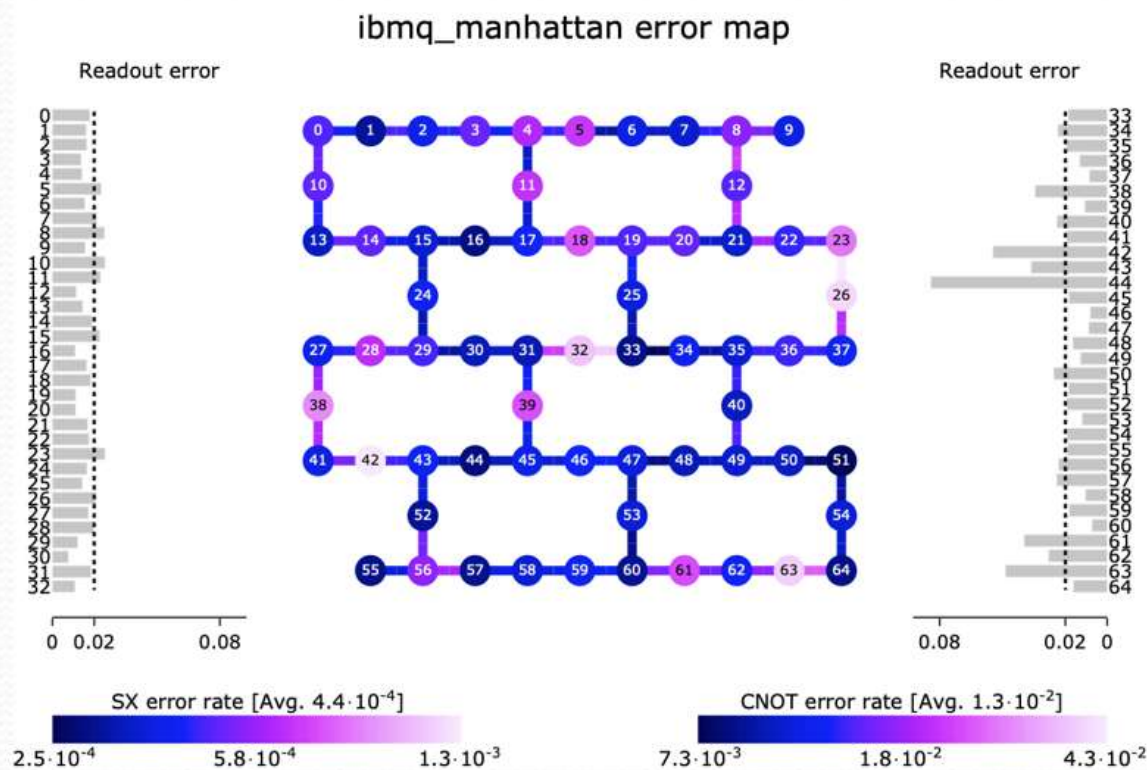


Квантовые компьютеры: процессоры IBM

IBM исследует сверхпроводящие кубиты с середины 2000-х годов, уменьшая количество ошибок. В начале 2010-х годов появились многокубитные устройства.



Источник: IBM



Производительность Osprey по сравнению с Eagle в 10 раз выше и составляет 1,4 тыс. операций на уровне цепи в секунду.

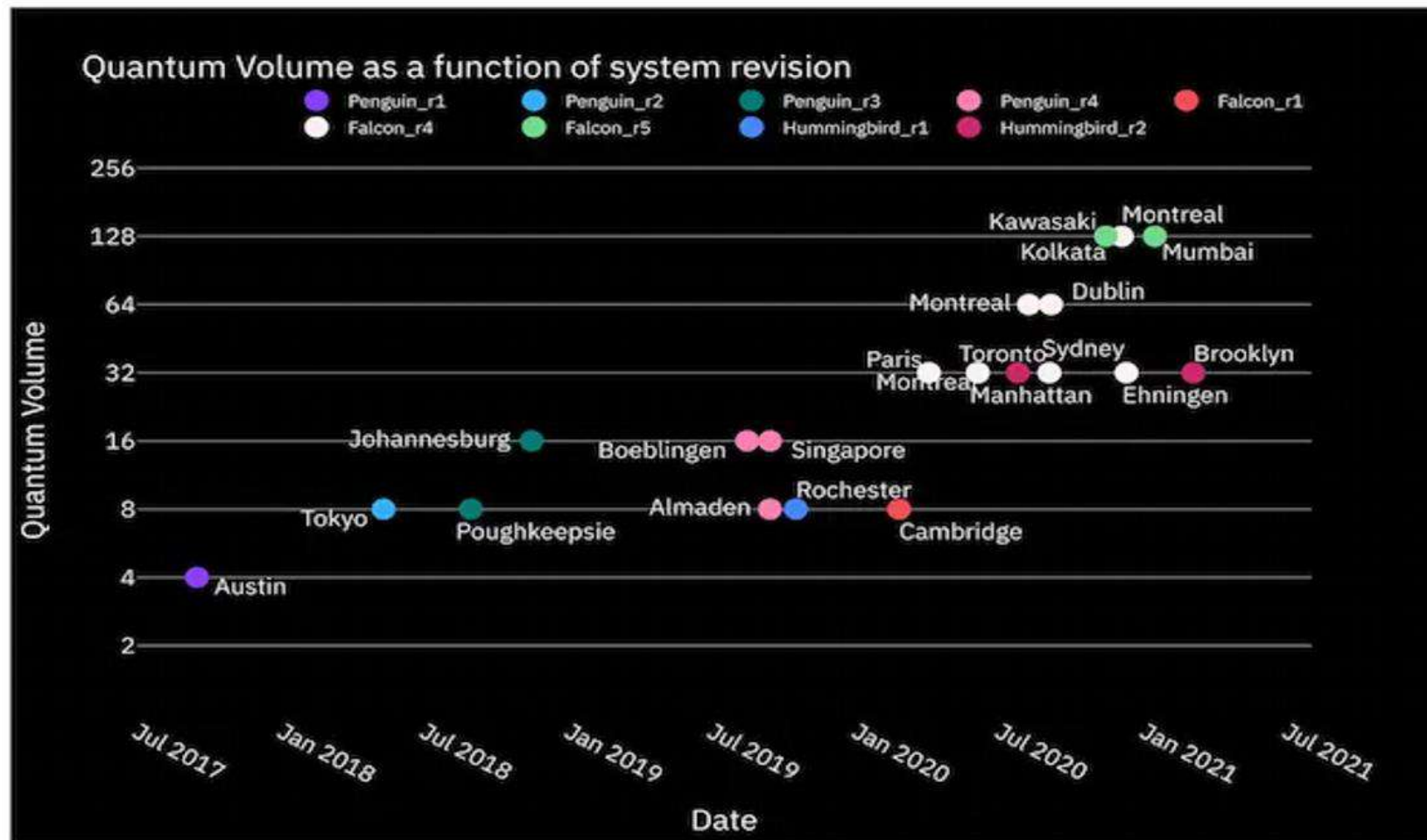
Архитектура Osprey (начиная с Falcon на 27 кубит шестигранная решетка) - однослойная установка кубитов поверх нескольких слоев управляющей проводки.

Решение позволило увеличить количество квантовых элементов при одновременном снижении числа и частоты ошибок.

Квантовые компьютеры: процессоры IBM

Для сравнения различных архитектур квантовых процессоров используют обобщённые характеристики, например, *квантовый объём (quantum volume)* — эвристическую метрику производительности, которая учитывает и количество кубитов, и частоту возникновения ошибок в квантовой вычислительной схеме.

Квантовый объём (QV) - это целостная, не зависящий от аппаратного обеспечения, оценка квантовой системы, которая объединяет системные свойства (количество кубитов, подключение, ошибки преобразователя, наблюдателя и измерений) в единое числовое значение путем нахождения наибольшей цепи, которую квантовое устройство может надёжно вычислить.



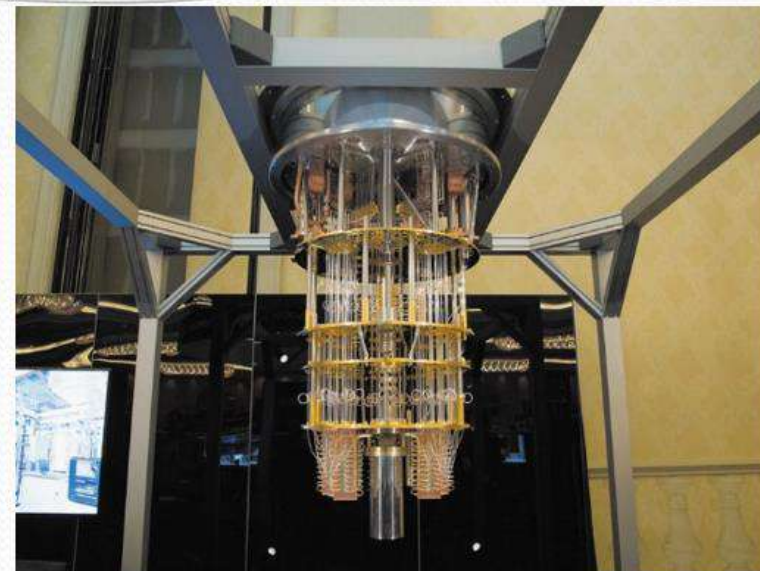
Квантовые компьютеры: процессоры IBM

«Сочетание инженерии с исследованиями
для будущего квантовой техники»

Квантовая лаборатория IBM
в Исследовательском центре Томаса Дж. Уотсона



Источник: Конни Чжоу из IBM



Источник: IBM

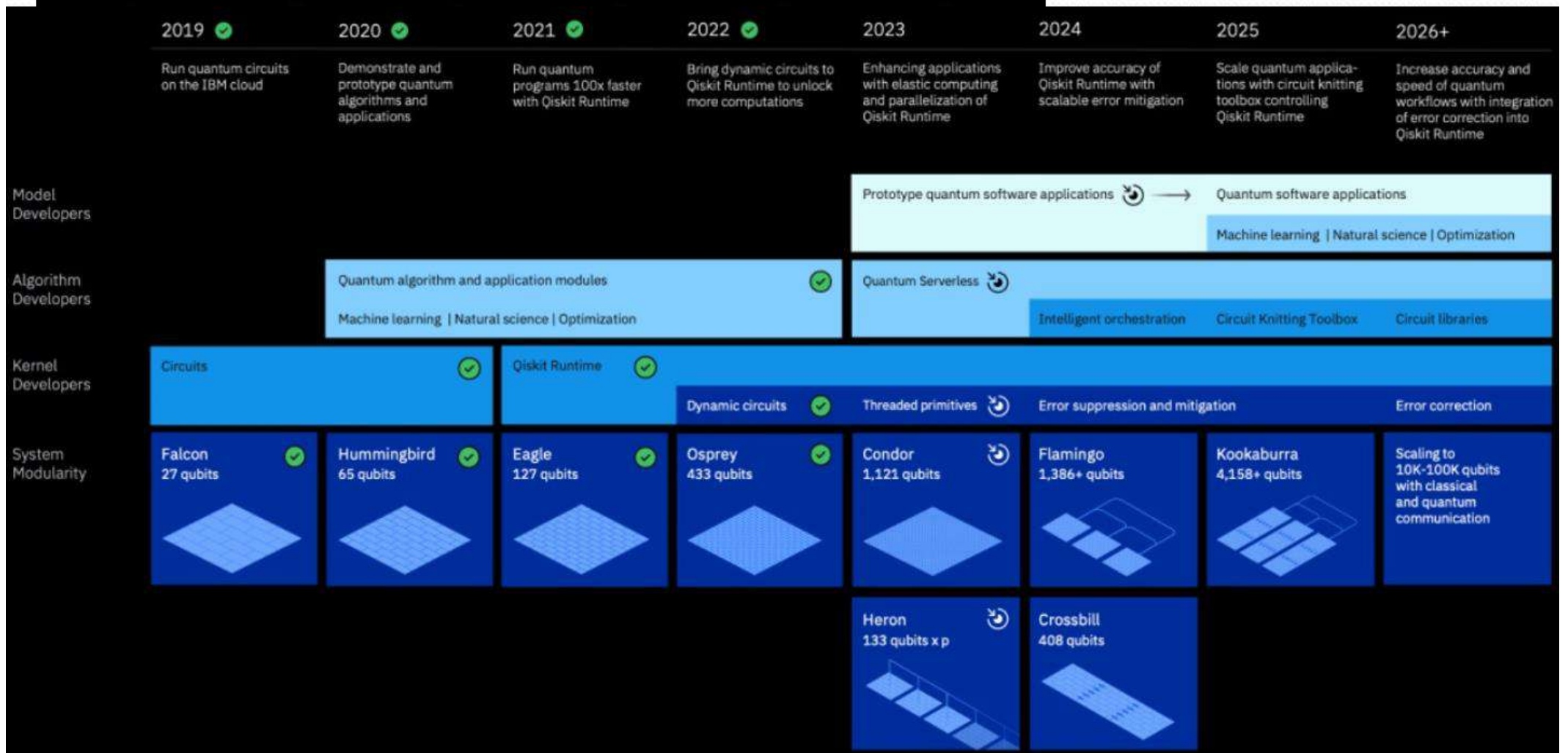


Квантовые компьютеры: процессоры IBM

Scaling IBM Quantum technology



IBM Q System One (Released)		(In development)		Next family of IBM Quantum systems	
2019	2020	2021	2022	2023	and beyond
27 qubits <i>Falcon</i>	65 qubits <i>Hummingbird</i>	127 qubits <i>Eagle</i>	433 qubits <i>Osprey</i>	1,121 qubits <i>Condor</i>	Path to 1 million qubits and beyond <i>Large scale systems</i>



Квантовые компьютеры: облачный интерфейс IBM

2016: первый квантовый компьютер в облаке.

"Дорожная карта" IBM по оборудованию лежит в основе более масштабной миссии: разработать полнофункциональный квантовый компьютер, развертываемый через облако, который может программировать любой человек по всему миру.



Источник: IBM

Квантовые компьютеры: облачный интерфейс IBM

IBM (2019):

2016

Quantum Computing on IBM Quantum Cloud Services

Gates



Operations

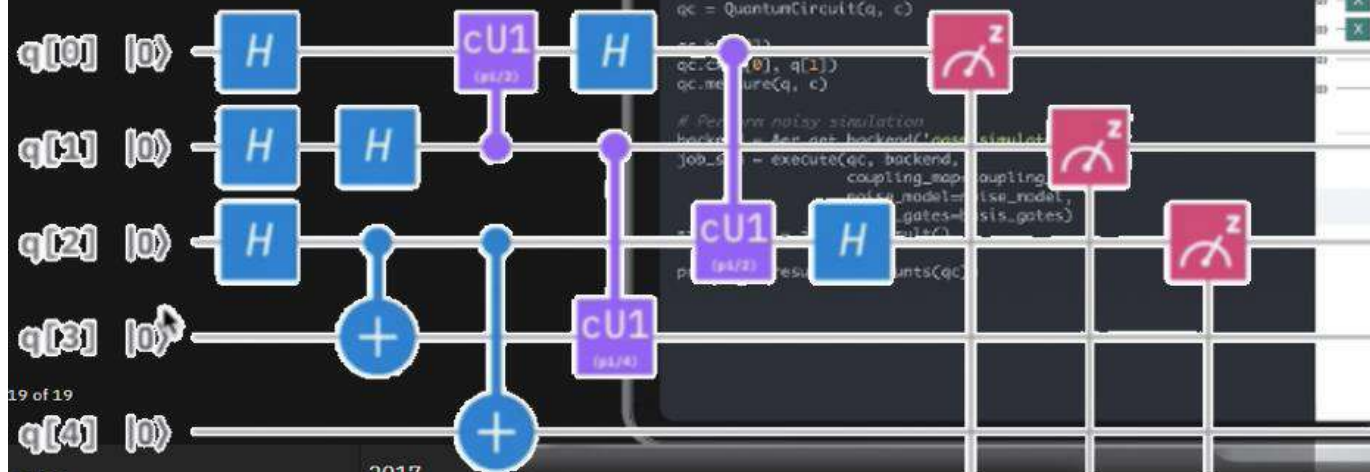
14 of 19



Subroutines

+ Add

Launch of IBM Q System One

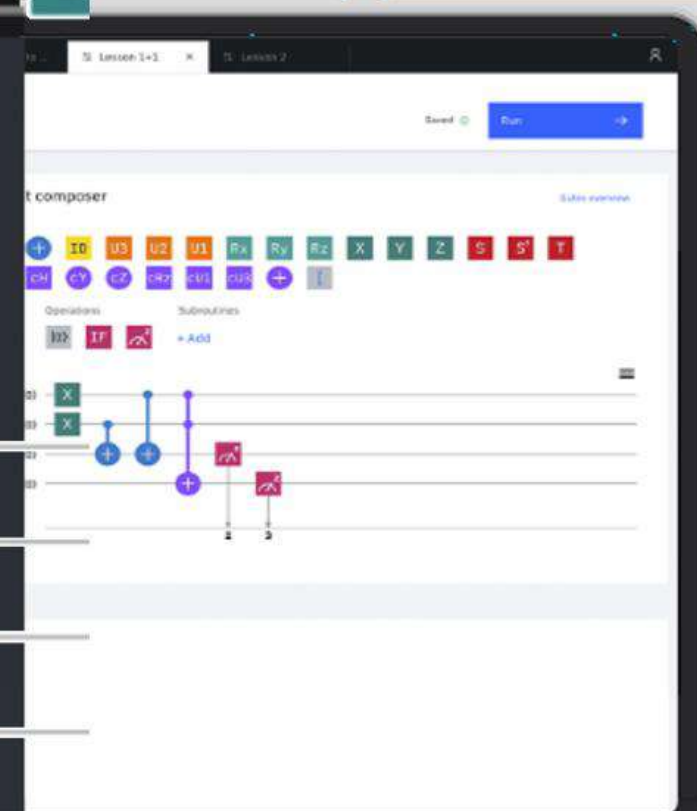
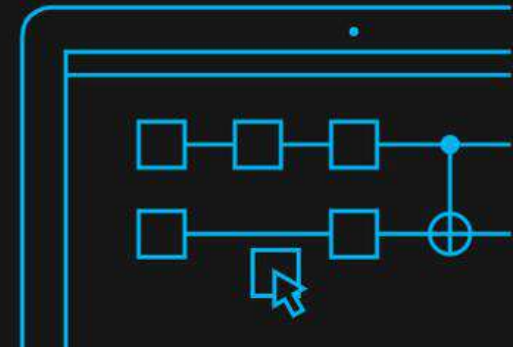


19 of 19

2016

2017
March

IBM scientists build the IBM Q Experience, a first-of-a-kind quantum computing platform delivered via the IBM Cloud and accessible by desktop or mobile devices. It enables users to run experiments on IBM's quantum processor, work with individual qubits, and explore tutorials and simulations of the wondrous possibilities of quantum computing.



Квантовые компьютеры: облачный интерфейс IBM

Open Plan

via IBM Quantum platform

Free

Sign up for IBM Quantum



About this plan

Run your quantum circuits for free on real quantum systems. Sign up to get an API token and take advantage of [feature-rich tools](#).

Best for

Educators, new learners, and developers who do not need to execute larger workloads.

Available systems

- ✓ 7-qubit and 5-qubit QPUs
- ✓ Simulators



Pay-As-You-Go Plan

via IBM Cloud

\$1.60 USD / second

Sign up on IBM Cloud



About this plan

Access our more advanced systems with [Qiskit Runtime](#) on an as-needed basis, paying only for the time you use.

Best for

Startups, researchers, and developers who periodically execute large workloads and require access to powerful quantum systems.

Available systems

- ✓ 27-qubit Falcon systems
- ✓ Simulators



Premium Plan

Contact us for pricing

Contact IBM Quantum



About this plan

Access our most powerful systems, as well as exploratory systems, with shorter wait times and hands-on service. Create and execute quantum programs at scale with [Qiskit Runtime](#).

Best for

Industry and academic clients who require unfettered access to our most powerful systems — including exploratory systems — and enterprise-level support.

Available systems

- ✓ 433-qubit Osprey systems (coming soon)
- ✓ 127-qubit Eagle systems
- ✓ 27-qubit Falcon systems
- ✓ Exploratory systems
- ✓ Simulators



Квантовые компьютеры: облачный интерфейс

Qiskit - проект с открытым исходным кодом, направленный на внедрение квантовых вычислений. Использование Python.

Квантовое оборудование: облачные сервисы, которые позволяют пользователям выполнять квантовые программы на специализированном оборудовании, использующем квантово-механические явления для квантовых вычислений.

AQT обеспечивает доступ к квантовым устройствам с ионами кальция в ловушке.

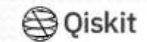
IBM Quantum предлагает как открытый, так и премиум-доступ к широкому спектру квантовых систем. Все квантовые системы, развернутые IBM Quantum, основаны на технологии сверхпроводящих кубитов, поскольку контроль и масштабируемость этой технологии прокладывают четкий путь к достижению квантовых преимуществ с помощью этих систем.

IonQ предлагает доступ к квантовым компьютерам на основе ионов иттербия с высокой точностью работы преобразователя, длительным временем когерентности.

IQM предлагает доступ к квантовым системам на основе сверхпроводящих кубитов, основанным на модели преобразователей.

Quantinuum предоставляет доступ к системам с захваченными ионами иттербия с высокоточными, полностью подключенными кубитами и возможностью выполнения измерений в середине цепи.

Rigetti предлагает доступ к универсальным машинам в модели преобразователей, основанным на перестраиваемых сверхпроводящих кубитах.



Английский

Languages

English

Bengali

French

German

Japanese

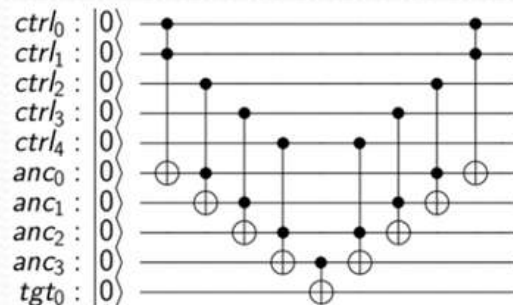
Korean

Portuguese

Spanish

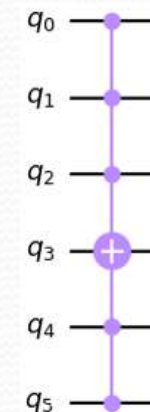
Tamil

Формирование мультиуправляемого CNOT:

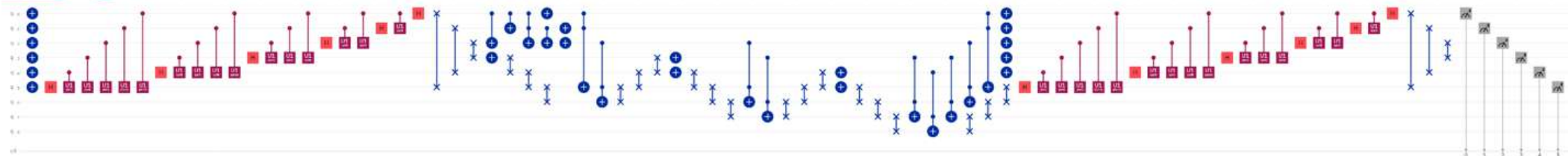


```
from qiskit.circuit.library import MCXGate
gate = MCXGate(5)
from qiskit import QuantumCircuit
circuit = QuantumCircuit(6)
circuit.append(gate, [0, 1, 4, 2, 3, 5])
circuit.draw('mpl')
```

Источник: qiskit.org



Квантовые компьютеры: эксперименты



Details

5.1s

Total completion time

ibmq_qasm_simulator

System

Sent from [FT_6QBef](#)

Created on Mar 21, 2022 9:02 PM

Sent to queue Mar 21, 2022 9:02 PM

Provider ibm-q/open/main

Run mode fairshare

of shots 4096

of circuits 1

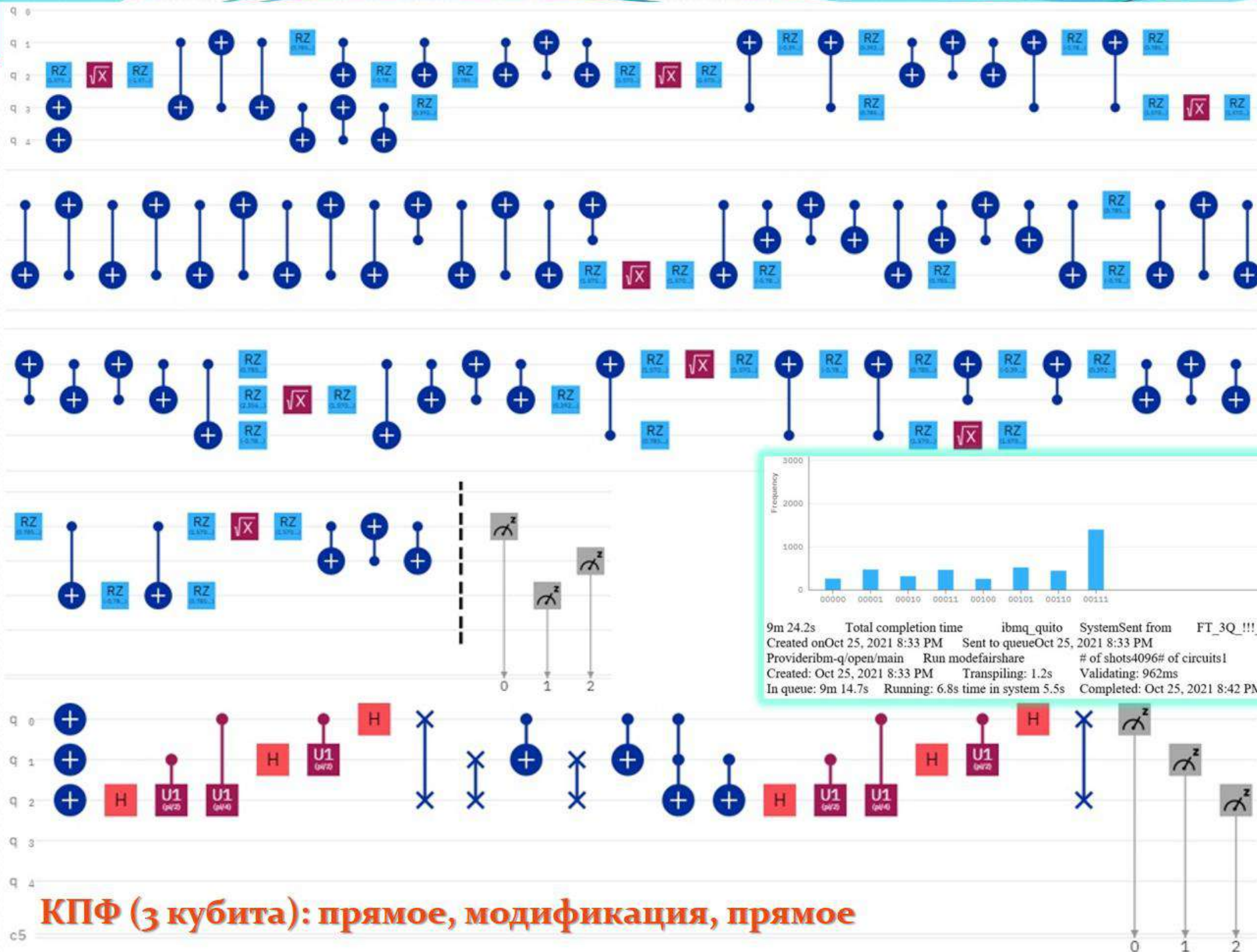
Status Timeline

- ✓ Created: Mar 21, 2022 9:02 PM
- ✓ Transpiling: 903ms
- ✓ Validating: 1.2s
- ✓ In queue: 1.5s
- ✓ Running: 1.1s
time in system 19ms
- ✓ Completed: Mar 21, 2022 9:02 PM

Histogram

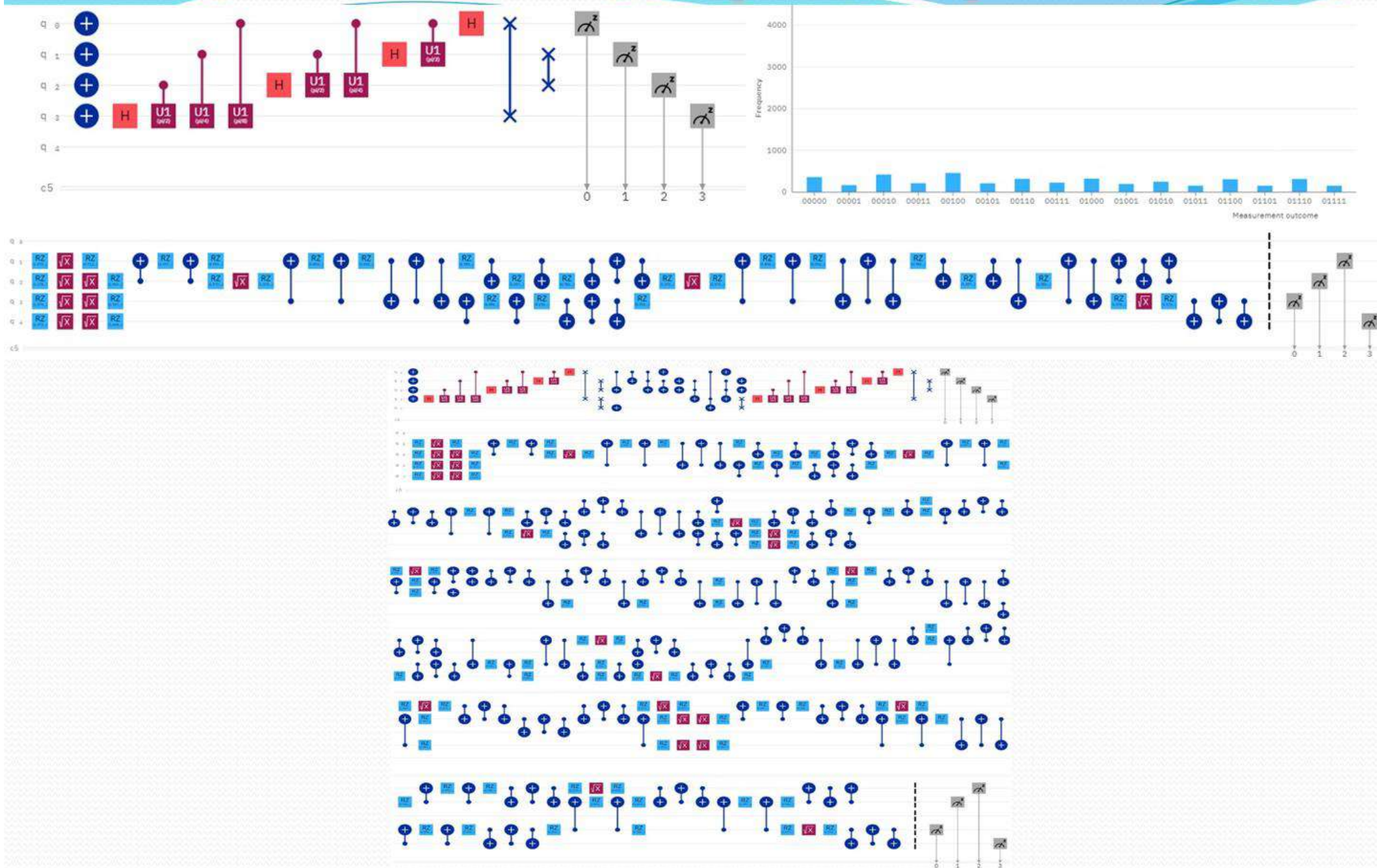


Квантовые компьютеры: эксперименты



КПФ (3 кубита): прямое, модификация, прямое

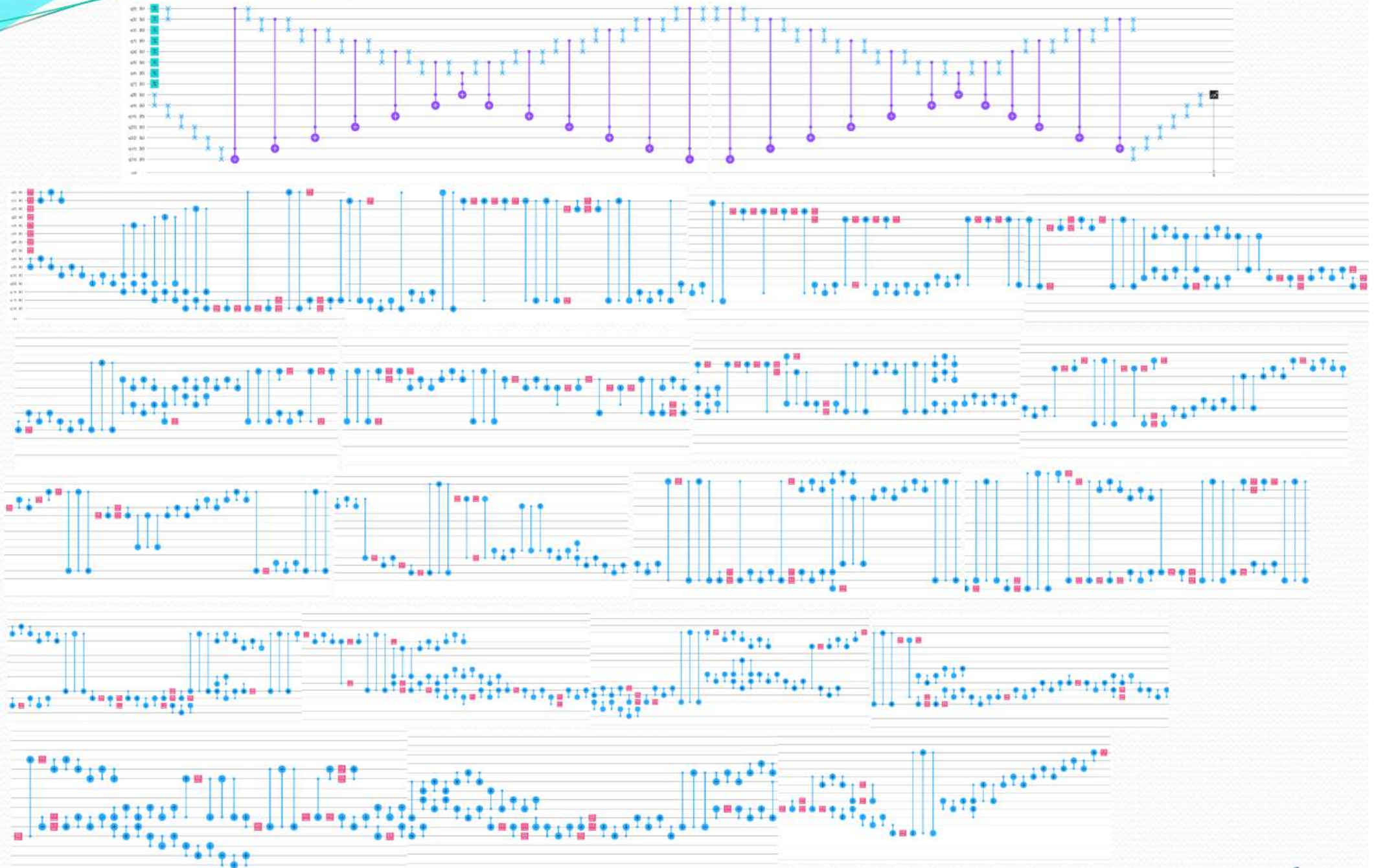
Квантовые компьютеры: эксперименты



КПФ (4 кубита): прямое, модификация, прямое

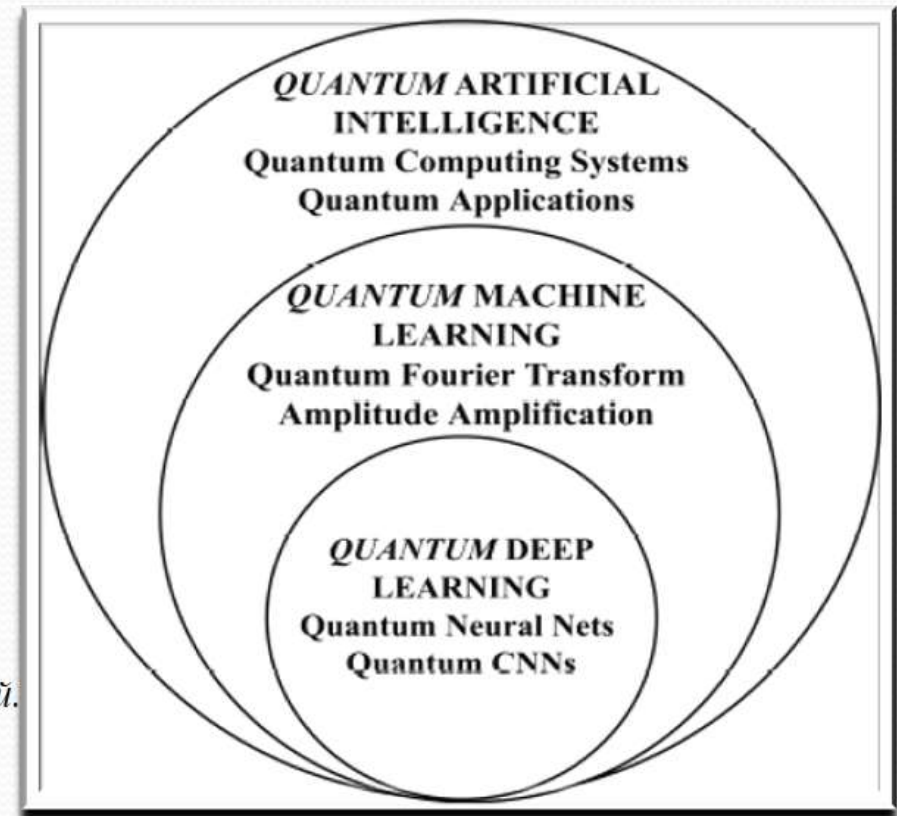
Квантовые компьютеры: эксперименты

Квантовая цепь (15 кубит)



Полезные сведения

Представители Departments of Physics и Computer Science (Baylor University, USA) утверждают, что взаимосвязь между классическим искусственным интеллектом, машинным обучением и глубоким обучением находится в прямой зависимости от квантового искусственного интеллекта, который включает в себя квантовые вычислительные системы в целом, квантовое машинное обучение, которое включает квантовые преобразования Фурье, амплитудное усиление, алгоритмы и квантовое глубокое обучение, включающее квантовые нейронные сети, квантовые сверточные нейронные сети и другие концепции. На рисунке показаны симбиотические зависимости между вышеупомянутыми областями знаний.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !!!