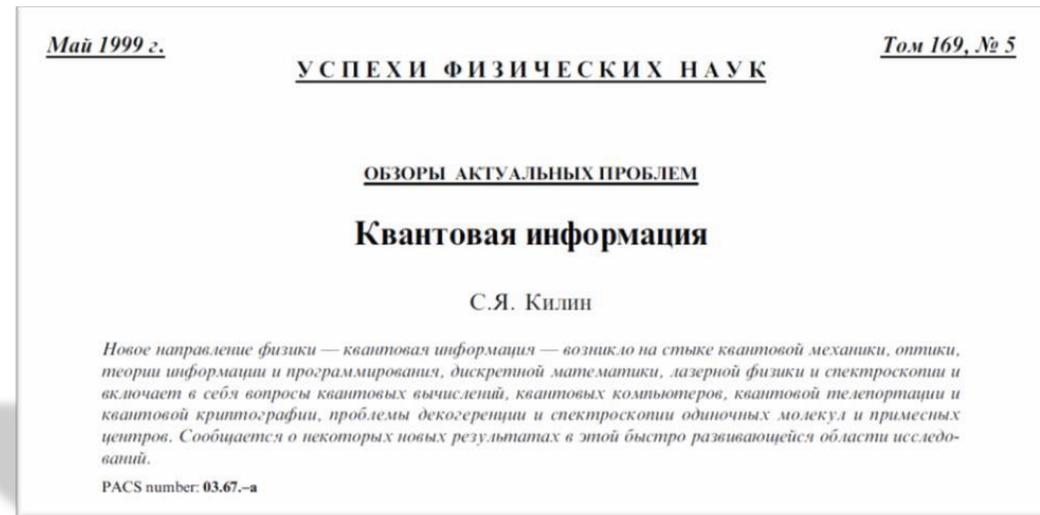
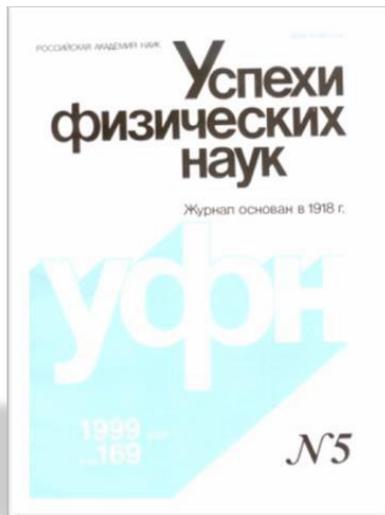


КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР: НАСТОЯЩЕЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

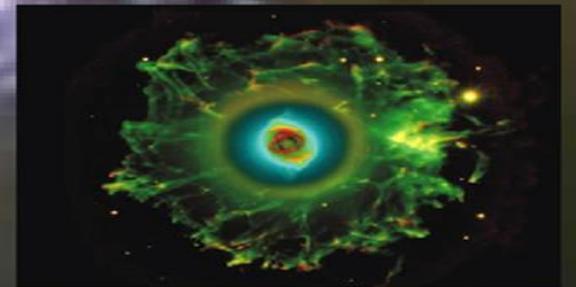
Как научная идея, опередившая время, стала локомотивом новых технологий, породив при этом ажиотаж, хайп и сверхрекламу

Килин С.Я.



Что нового 25 лет спустя?

Why quantum information?



MEMORY & THE UNIVERSE

200 bits

All numbers
 2^{200}

= Number
of atoms
in the Universe

Strong limits for classical memory

Size of the chips

Principally new ideas

QUANTUM COMPUTERS

QUANTUM RESOURCES IN NATURE

Chemical reactions

in nature

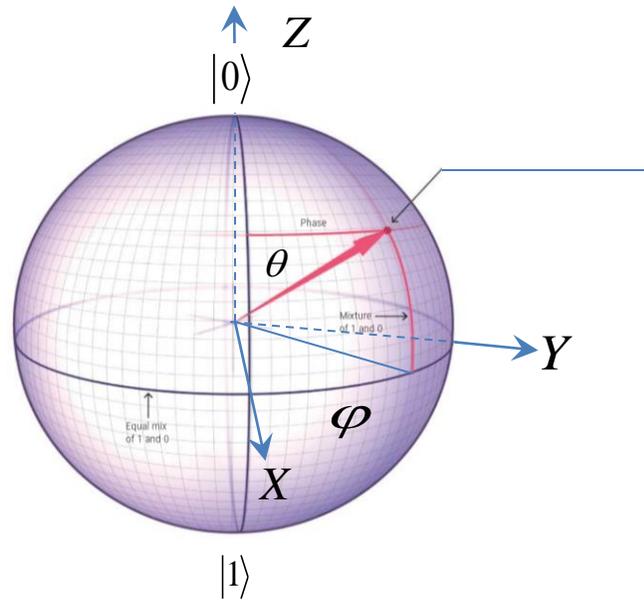
Femtosecond scale

Classical
computation

Days
with unsatisfactory
outputs

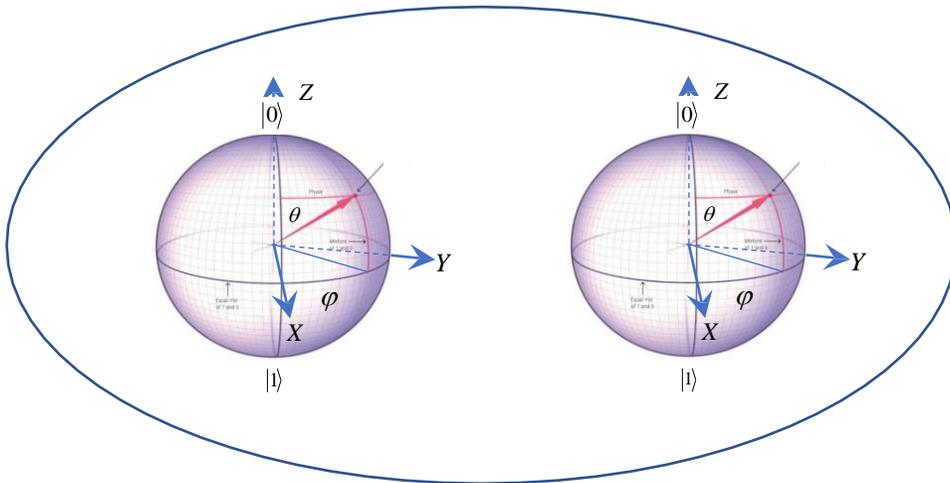
PROBLEM:

TO TOUCH AND TO HARNESS QUANTUM WORLD
COHERENTLY



$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$



$$|\Psi^\pm\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A |1\rangle_B \pm |1\rangle_A |0\rangle_B)$$

$$|\Phi^\pm\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A |0\rangle_B \pm |1\rangle_A |1\rangle_B)$$

Состояния Белла

14 мая 2014 г.



MPQIT 27 мая 2024 г

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР

Универсальный квантовый компьютер - устройство, которое может выполнять любую унитарную операцию U , переводящее регистр *кюбитов** из одного состояния в другое в гильбертовом пространстве

$$U|\psi\rangle = |\psi'\rangle.$$

Любая операция U может быть эффективно скомпилирована из конечного набора элементарных гейтов. Пример универсального набора гейтов:

$$\{U\} = \{X, Z, Y, H, \text{CNOT}, T\}, \text{ где } T = \text{diag}(1, e^{i\pi/4}).$$

Квантовый параллелизм - основное преимущество КК над обычными цифровыми (регистр из N идеальных кюбитов $\Rightarrow 2^N$ состояний, достижимых за N операций)

$$H|0\rangle = (|0\rangle + |1\rangle) / \sqrt{2}$$
$$|x\rangle = H^{\otimes N} |0\rangle_1 |0\rangle_2 \cdots |0\rangle_N = (|0\rangle + |1\rangle)_1 (|0\rangle + |1\rangle)_2 \cdots (|0\rangle + |1\rangle)_N / \sqrt{2^N} = \frac{1}{\sqrt{2^N}} \sum_{n=0}^{2^N-1} |n\rangle$$

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР: АЛГОРИТМЫ

Алгоритм Шора (1994)

RSA ???

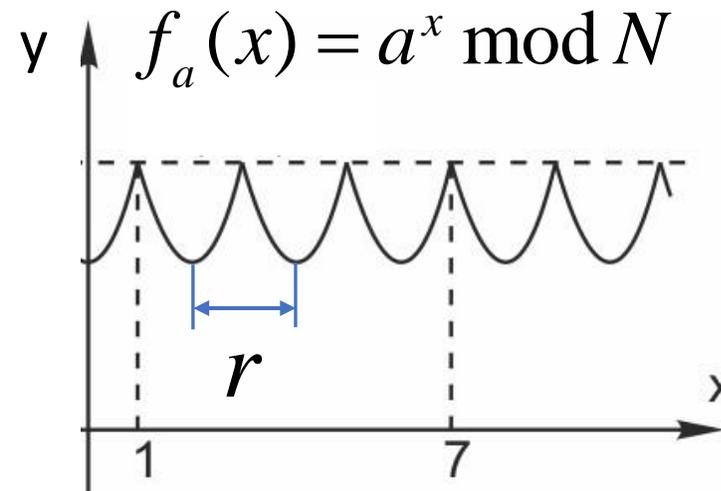
Факторизовать большое число N за полиномиальное время от $\log N$

$$U_f |x\rangle |y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^N}} \sum_{n=0}^{2^N-1} U_f |n\rangle |y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^N}} \sum_{n=0}^{2^N-1} |n\rangle |f(n)\rangle$$



Алгоритм Гровера (1996)

$$O(\sqrt{N})$$



УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР

Что такое полезный квантовый компьютер:

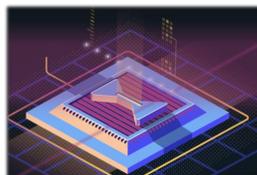
<i>Универсальный:</i>	<i>не ограничивается одним классом задач.</i>
<i>Точный:</i>	<i>вероятность ошибки на выходе может быть сколь угодно малой.</i>
<i>Масштабируемый:</i>	<i>требования к ресурсам не растут экспоненциально с уменьшением целевой вероятности ошибки.</i>

АРХИТЕКТУРА УНИВЕРСАЛЬНОГО КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

Крупномасштабный УКК должен связать воедино миллионы или даже миллиарды кубитов. Есть два подхода к созданию такого устройства.

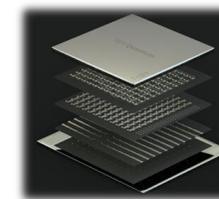
Первый подход - **однородная архитектура**, где каждый кубит напрямую соединен со своими соседями, технически привлекателен, но он плохо масштабируется.

В зависимости от платформы, может потребоваться множество управляющих лазеров или микроволн, направленных на одну физическую область, или очень большой криостат, вмещающий все кубиты.



Альтернативный подход - **модулярная архитектура**, где квантовый компьютер формируется из множества небольших модулей, каждый состоит только из (относительно) небольшого числа кубитов.

Эти модули необходимо связать вместе с выполнять межмодульные шлюзы между удаленными кубитами с помощью (A) физического перемещения кубитов между модулями (Shuttling для ионных платформ), или (B) с помощью **телепортации** состояний кубитов компьютера.

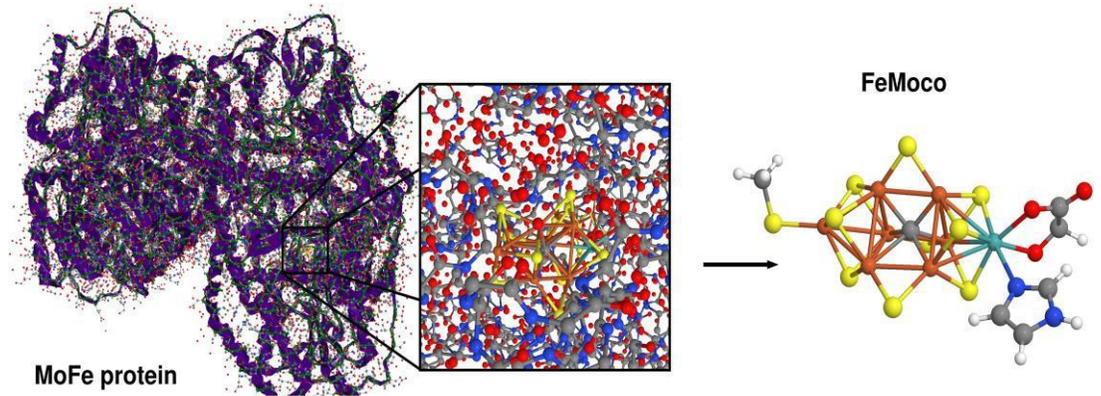


КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР: РОСТ ВНИМАНИЯ К ПРИЛОЖЕНИЯМ (не только факторизация):

- Законы вычислений разные (\sqrt{N})
- Квантовая химия: имея всего 200 безошибочных идеальных кубитов, квантовый компьютер может разгадать биологическую фиксацию азота.

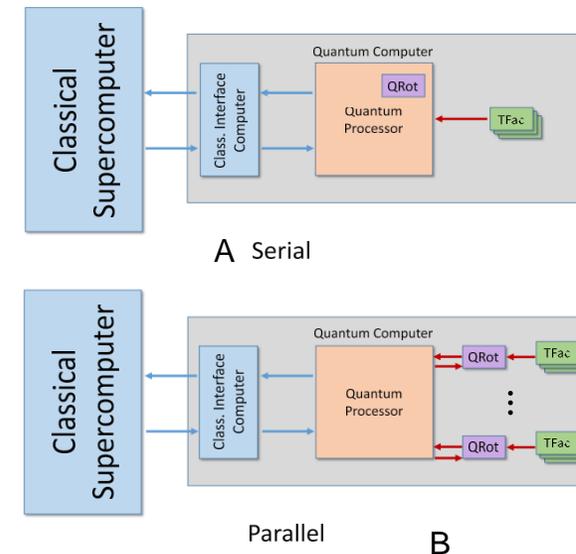
(В настоящее время процесс Гебера-Боша получения аммиака потребляет 2% мирового годового запаса энергии.)

- Задачи оптимизации
- Машинное обучение
- Финансы
- Безопасность функционирования АЭС
- Quantum Zoo [math.nist.gov/quantum/zoo]: разнообразие алгоритмов...)



<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1619152114>

Квантовый сопроцессор

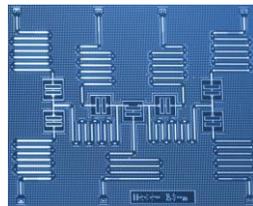
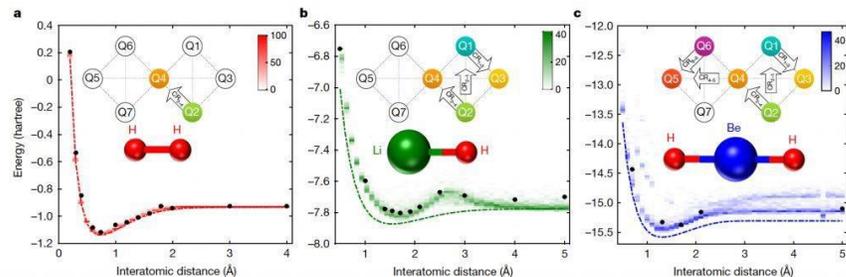


КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР: РОСТ ВНИМАНИЯ К ПРИЛОЖЕНИЯМ (не только факторизация):

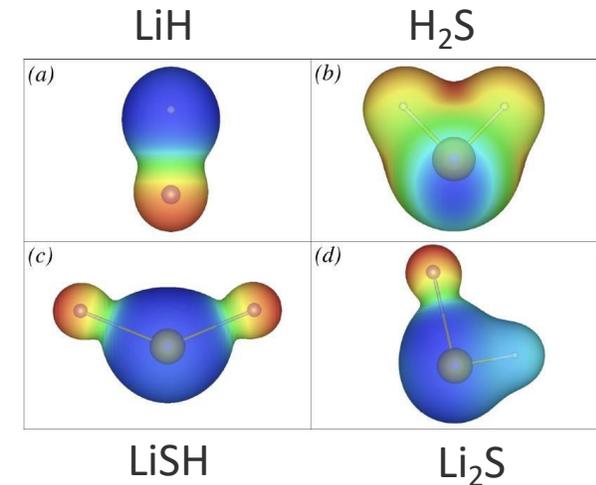
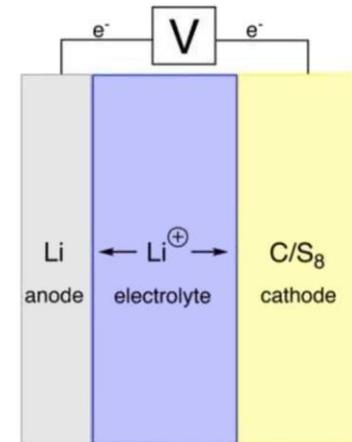
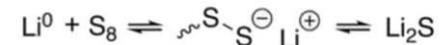
- *Exact diagonalization (or FCI, full configuration interaction) comprise around 22 electrons and 22 orbitals, the size of an active space in the pentacene molecule – 9 days on supercomputer.*

- *Lithium hydride (LiH), hydrogen sulfide (H₂S), lithium hydrogen sulfide (LiSH), and the desired product, lithium sulfide (Li₂S).*

- IBM Q Valencia – 5-21 qubits



ЛИТИЙ-СЕРНЫЕ БАТАРЕИ



Kandala, *et al.* *Nature* **549**, 242–246 (2017)

(Arxiv.org/pdf/2001.01120.pdf, 2021)

Создание квантовых компьютеров – сложная, многоаспектная задача:

- Квантовая хрупкость. Квантовая информация хрупка по своей природе. Декогеренция, растущая с увеличением числа перепутанных кубитов.*
- Новые научные и технические вызовы. Физика и физики, плюс инженеры* – занимают ключевые позиции в разработке КК.*
- КК - принципиально вероятностные устройства.*



Manufacturer	Name/codename/designation	Architecture	Layout	Fidelity (%)	Qubits (physical)	Release date	Quantum volume
Atom Computing	N/A	Neutral atoms in optical lattices			1180 ^{[6][7]}	October 2023	
IBM	IBM Condor ^{[16][6]}	Superconducting	N/A	N/A	1121 ^[15]	December 2023	
CAS	Xiaohong ^[64]	Superconducting	N/A	N/A	504 ^[64]	2024	
IBM	IBM Osprey ^{[6][7]}	Superconducting	N/A	N/A	433 ^[15]	November 2022	
Xanadu	Borealis ^[62]	Photonics (Continuous-variable)	N/A	N/A	216 ^[62]	2022 ^[62]	
M Squared Lasers	Maxwell	Neutral atoms in optical lattices		99.5 (3-qubit gate), 99.1 (4-qubit gate) ^[31]	200 ^[32]	November 2022	
IBM	IBM Heron ^{[16][6]}	Superconducting	N/A	N/A	133	December 2023	
IBM	IBM Eagle	Superconducting	N/A	N/A	127 ^[15]	November 2021	



Manufacturer	Name/codename/designation	Architecture	Layout	Fidelity (%)	Qubits (physical)	Release date	Quantum volume
Quantinuum	H1-1 ^[42]	Trapped ion	15x15 (Circuit Size)	99.996 (1 qubit) 99.914 (2 qubit)	20	2022	1,048,576 ^[43]
Quantinuum	H2 ^[40]	Trapped ion	Racetrack, All-to-All	99.997 (1 qubit) 99.8 (2 qubit)	32	May 9, 2023	65,536 ^[41]
Quantinuum	H1-2 ^[42]	Trapped ion	All-to-All ^[20]	99.996 (1 qubit) 99.7 (2 qubit)	12	2022	4096 ^[44]
IBM	IBM Kolkata	Superconducting		N/A	27		128
IBM	IBM Montreal ^[18]	Superconducting	Falcon r4 ^[20]	N/A	27		128 ^[20]
IBM	IBM Mumbai ^[18]	Superconducting	Falcon r5.1 ^[20]	N/A	27		128 ^[20]
Alpine Quantum Technologies	PINE System ^[2]	Trapped ion			24 ^[3]	June 7, 2021	128 ^[4]



Manufacturer	Name/Codename/ Designation	Architecture	Layout	Fidelity (%)	Qubits	Release date
D-Wave	D-Wave One (Rainier)	Superconducting	$C_4 =$ Chimera(4,4,4) ^[66] = 4x4 $K_{4,4}$	N/A	128	May 11, 2011
D-Wave	D-Wave Two	Superconducting	$C_8 =$ Chimera(8,8,4) ^[66] = 8x8 $K_{4,4}$	N/A	512	2013
D-Wave	D-Wave 2X	Superconducting	$C_{12} =$ Chimera(12,12,4) ^[6] $\text{[6]} = 12 \times 12 K_{4,4}$	N/A	1152	2015
D-Wave	D-Wave 2000Q	Superconducting	$C_{16} =$ Chimera(16,16,4) ^[6] $\text{[6]} = 16 \times 16 K_{4,4}$	N/A	2048	2017
D-Wave	D-Wave Advantage	Superconducting	Pegasus P_{16} ^[67]	N/A	5760	2020
D-Wave	D-Wave Advantage ^{[68][69][70][71]} ₂	Superconducting ^[68] _[69]	Zephyr Z_{15} ^{[71][72]}	N/A	7000+ ^{[68][69][70][71][72]} 1	Late 2024 either 2025 ^{[68][69][70][71]}

Основная проблема создания УКК:

ошибки при выполнении гейтов

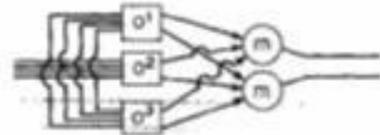


FIGURE 25

Image: Wikipedia "John von Neumann"

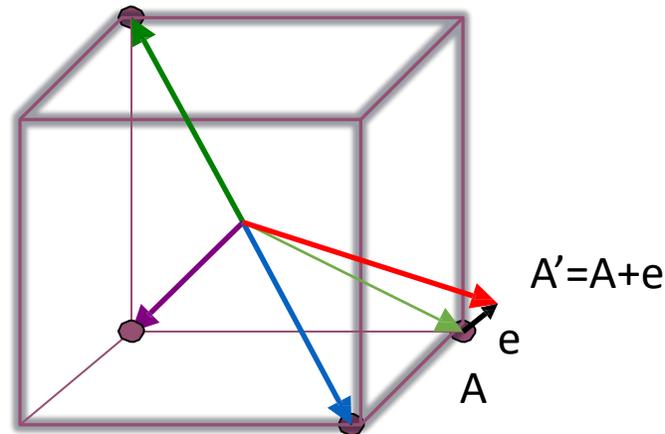
Идея -- классические коды, исправляющие ошибки, в обычных компьютерах.

Умное кодирование

$d=2t+1$ – кодовое расстояние

t – количество исправляемых бит

Увеличение размера кода →
биты данных + избыточные биты



Квантовые коды, исправляющие ошибки

Ошибки → переворот кубита (Z) & изменение фазы (X)

Квантовые коды, исправляющие ошибки (коды Шора, CSS (Калдербанк, Шор и Стин) коды, коды Стаина, стабилизационные коды, топологические коды (Китаев), поверхностные коды, ...) → логические кубиты → неконтролируемое распространение ошибки по кубитам схемы → необходимость введения дополнительных кубитов (потеря масштабируемости).



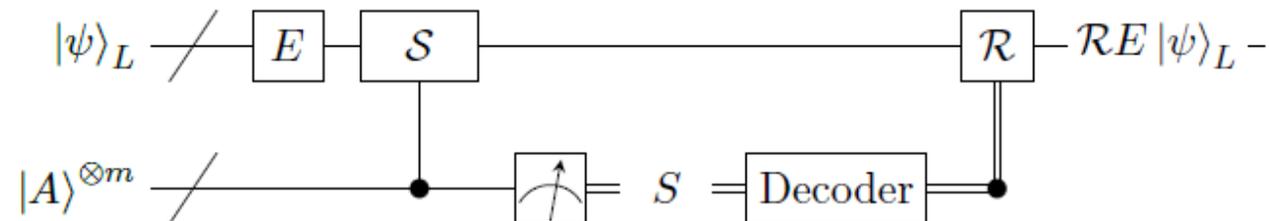
$[[n,k,d]]$ – стабилизационный код

n – число физических кубитов кода

$n-k=m$ – число избыточных кубитов кода*

Конкатенация ->

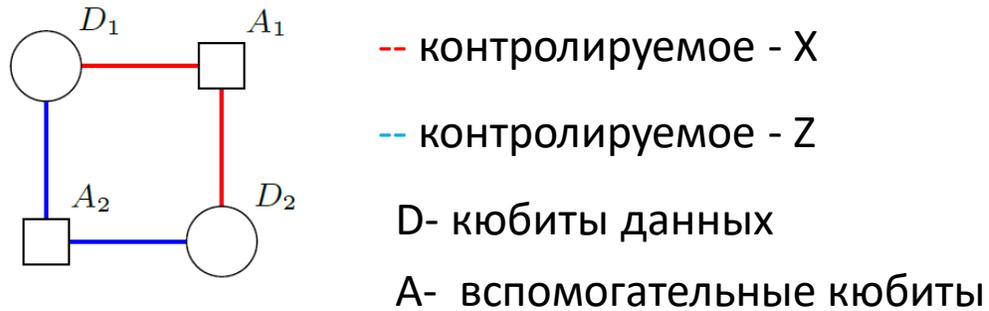
$[[9,1,3]]$ код Шора



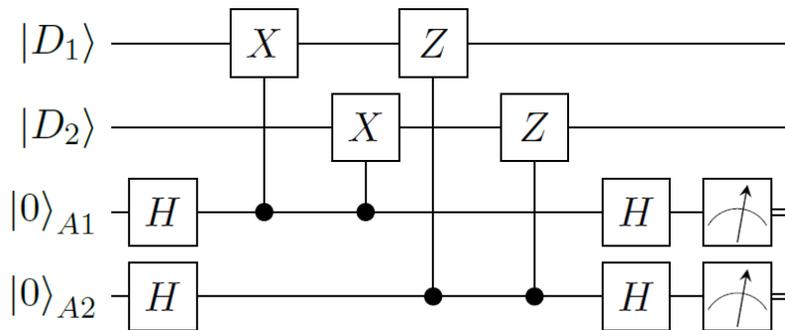
Общая процедура исправления ошибок
для одного цикла $[[n; k; d \geq 3]]$ – стабилизационного кода

Поверхностные коды

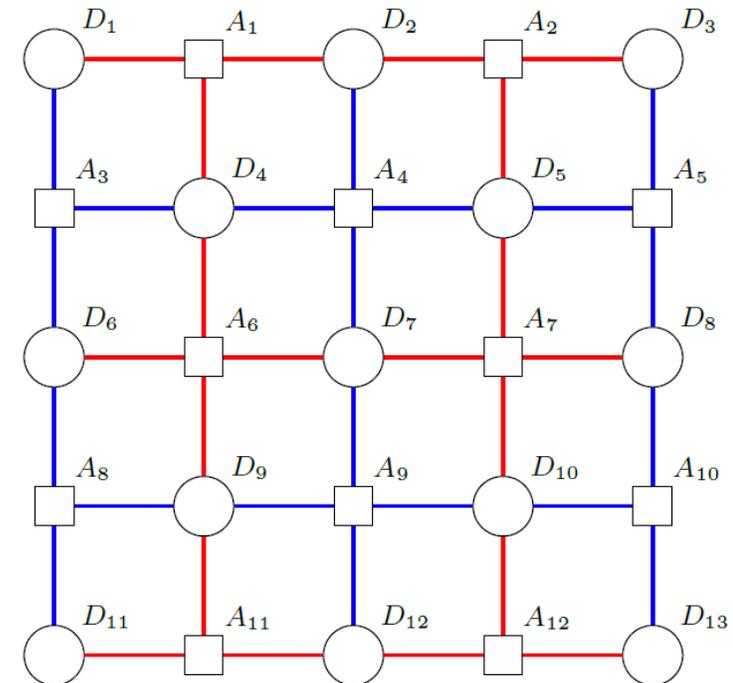
Графическое представление
фундаментального блока ПК



Эквивалентная квантовая цепь



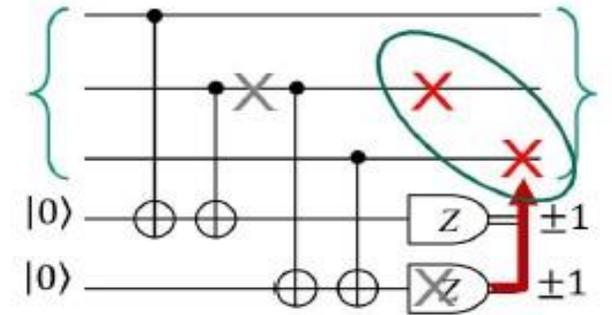
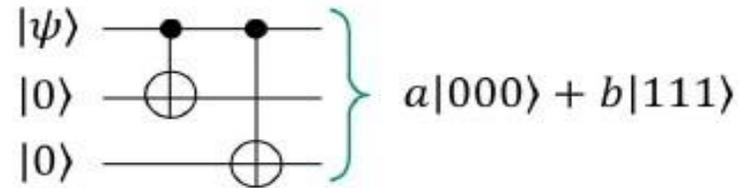
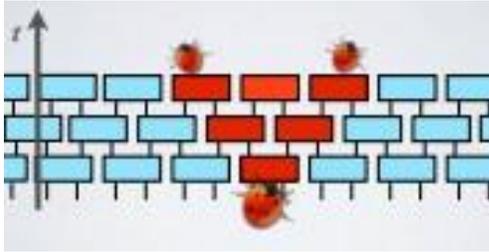
Код $[[13, 1, 3]]$ - наименьший поверхностный код, способный обнаруживать и исправлять ошибки за один прогон.



Связь между соседними кубитами

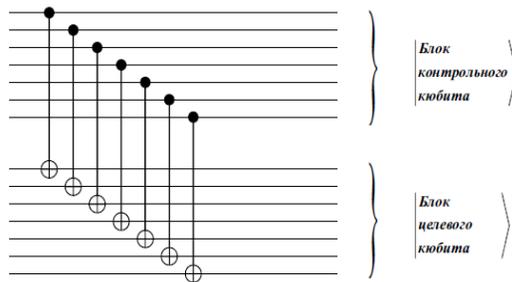
Надежное вычисление с ненадежными гейтами

Распространение ошибок при выполнении логических операций

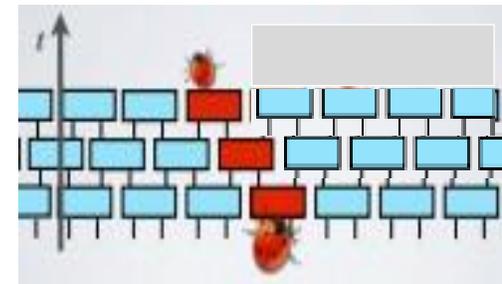


Устойчивые к ошибкам гейты (трансверсальные гейты).

Подмножества универсального набора гейтов $\{U\}$ являются трансверсальными.



Трансверсальная CNOT-операция над двумя логическими кубитами в 7-ми кубитном коде Стаина.



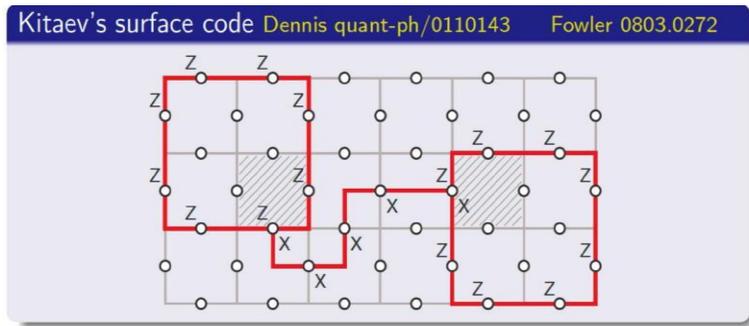
No-go теорема (Eastin B, Knill E., 2009):

Полный универсальный набор гейтов $\{U\}$ не является трансверсальным.

Квантовая пороговая теорема

(Aharonov D, Ben-Or M.; Kitaev A.; E. Knill, R. Laflamme, and W. H. Zurek):

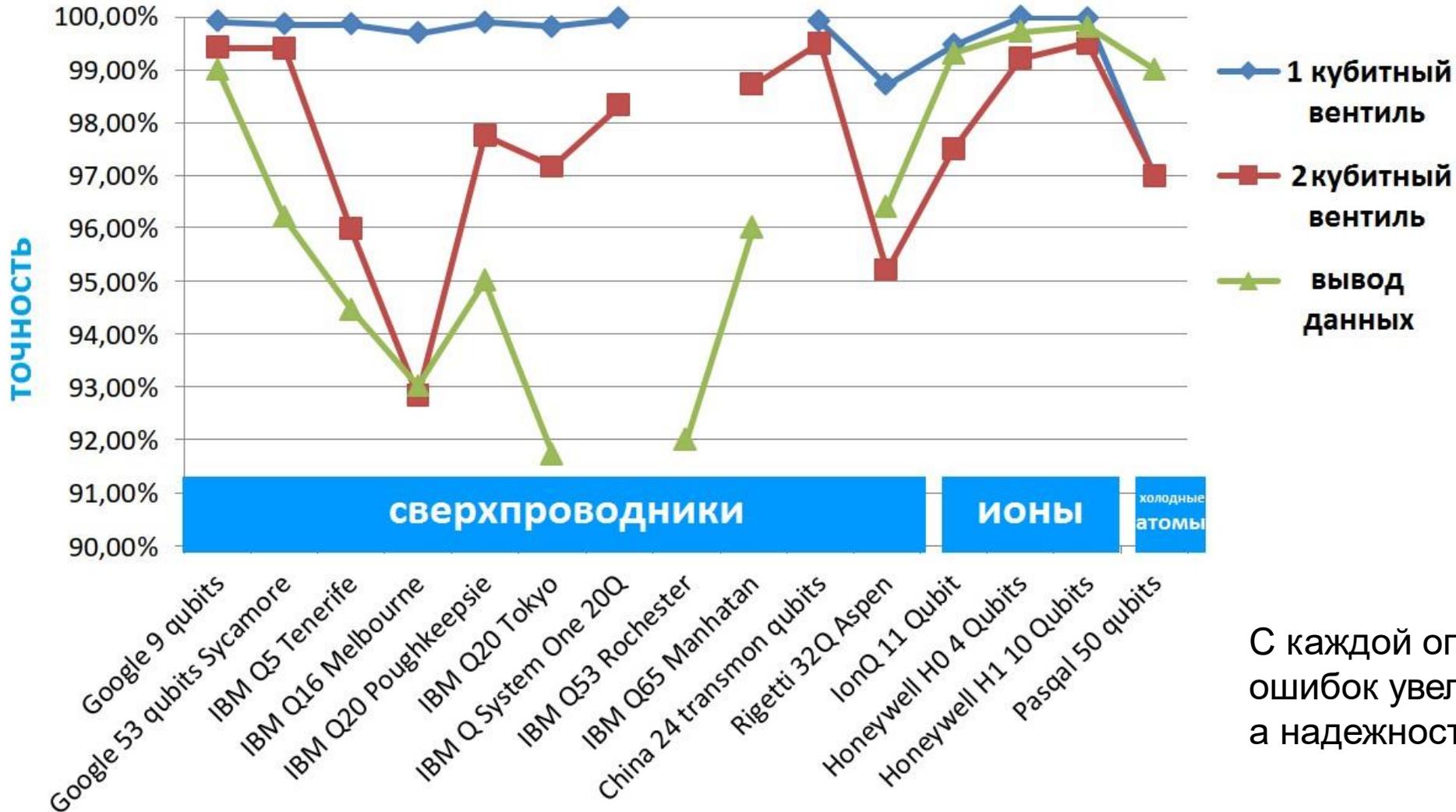
$QBER = p_{th} (p/p_{th})^{2^L}$ Квантовый компьютер с коэффициентом физических ошибок p ниже определенного порога p_{th} может, применяя схемы квантовой коррекции ошибок, подавить коэффициент логических ошибок до сколь угодно низкого уровня.



Текущие оценки устанавливают порог для **поверхностного** кода порядка 1%, хотя оценки сильно различаются и их трудно вычислить из-за экспоненциальной сложности моделирования больших квантовых систем. При вероятности деполяризационной ошибки 0,1% поверхностный код потребует приблизительно 1000-10 000 физических кубитов на логический кубит данных (~166 миллионов физических кубитов для факторизации числа в 1000 бит).



Сравнение точности одиночных квантовых операций и точности при выводе данных



С каждой операцией количество ошибок увеличивается, а надежность снижается!

Открытые области исследований устойчивых к ошибкам квантовых вычислений

1. Множество различных протоколов исправления ошибок, каждый с различной скоростью ошибок, порогом и требованиями к ресурсам.
2. Для любого кода существует множество различных способов отказоустойчивого исправления ошибок (методов для извлечения синдрома ошибки).
3. Множество различных способов отказоустойчивой реализации кодированных гейтов.
4. Для устройств с ограниченными ресурсами понадобится набор экспериментов и протоколы характеристики, которые выходят за рамки проверки концепции, но также дают знания о работе более крупных процессоров.

Для небольших приложений на устройствах NISQ реализованы способы уменьшения скорости ошибок (например, Scaled Time Method Quant-ph / 1803.03326) без использования кодов исправляющих ошибки. Эти методы, однако ограничены конкретными небольшими приложениями. Исключение нефизических состояний из гильбертового пространства.

Теорема Готтесмана-Книлла

Сравнение классических и квантовых вычислений

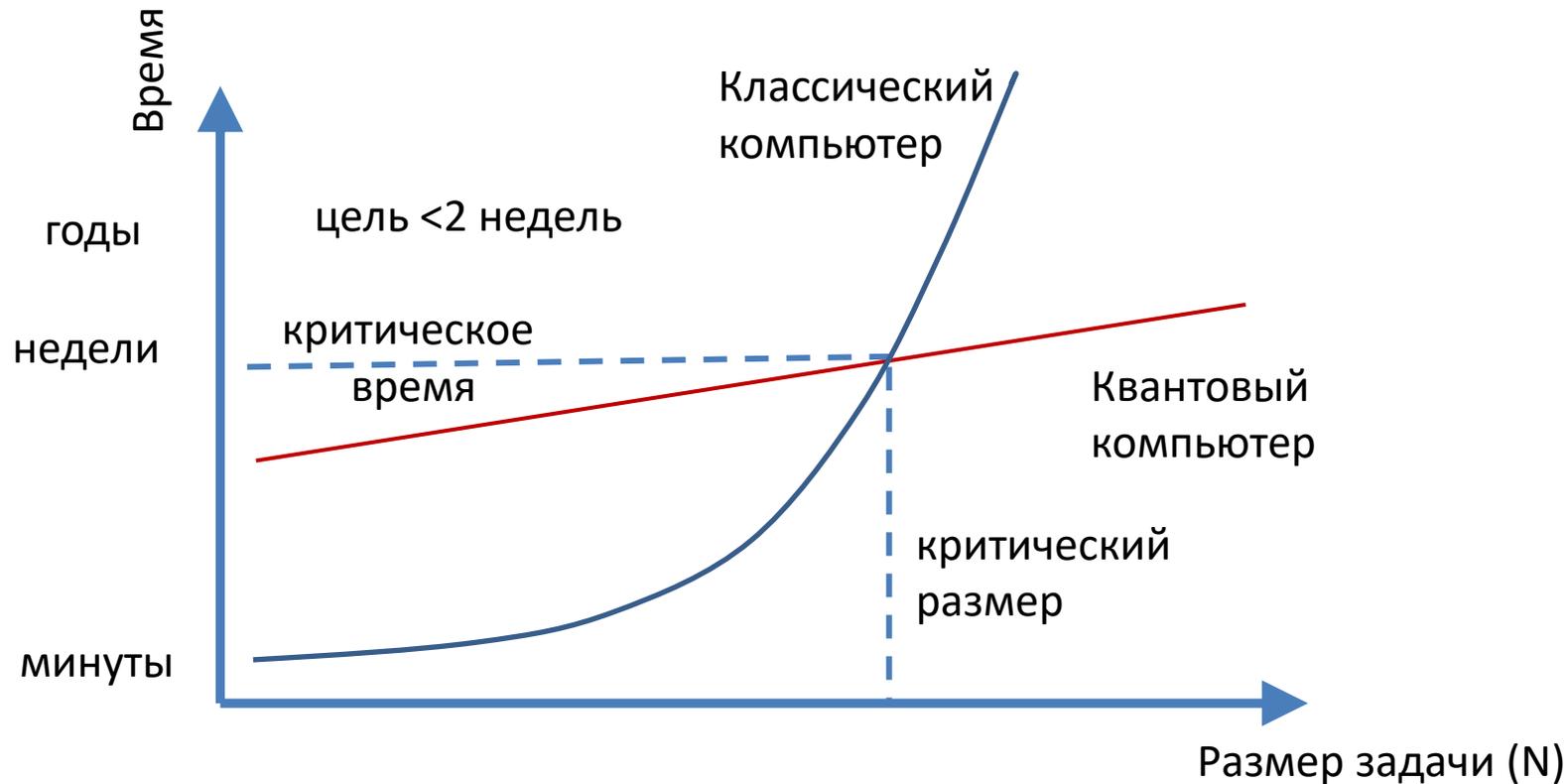
Клиффордовские гейты $X, Z, Y, H, CNOT$ → эмулируются

Неклиффордовский гейт T → не эмулируется

Квантово- вдохновленные алгоритмы

Реальность достижения практически значимого квантового ускорения

?



«Квантовое превосходство»

СКОЛЬКО НАДО КЮБИТОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ, НЕДОСТУПНЫХ ОБЫЧНЫМ КОМПЬЮТЕРАМ?

Можно смоделировать квантовый компьютер на обычном. Количество моделируемых кубитов ограничены памятью компьютера, а не его вычислительная мощность. Самый большой суперкомпьютер сегодня имеет ~ 10 Петабайт памяти, что позволяет имитировать ~ 48 кубит.

Любой квантовый компьютер с более чем примерно 50 кубит невозможно смоделировать на обычном компьютере.



Эти кубиты **не обязательно должны быть корректируемыми**. Можно использовать физические кубиты, которые достаточно хороши для выполнения тысяч операций раньше, чем возникает ошибка. Однако такая машина не масштабируется и может выполнять только **короткие алгоритмы**. Тем не менее, такой квантовый компьютер нельзя смоделировать на обычном, поэтому он может показать квантовое превосходство и может оказаться полезным для некоторых приложений.

Квантовый Объем , число эффективно используемых кубитов ?

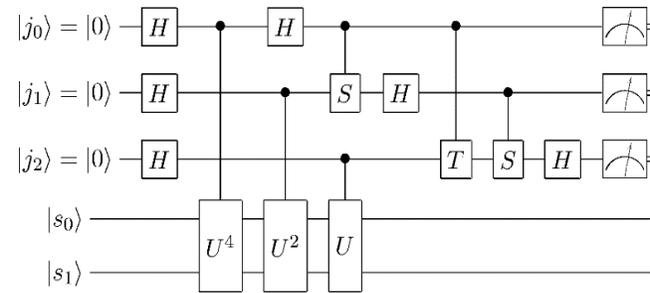
Протокол **Квантового Объема** определяет самую большую **квадратную** квантовую цепь - такую, в которой ширина и глубина равны – и которая может быть запущена на данном квантовом устройстве. Определяет как велико пространство состояний, доступное данному КК.

Ширина квантовой цепи (circuit width)

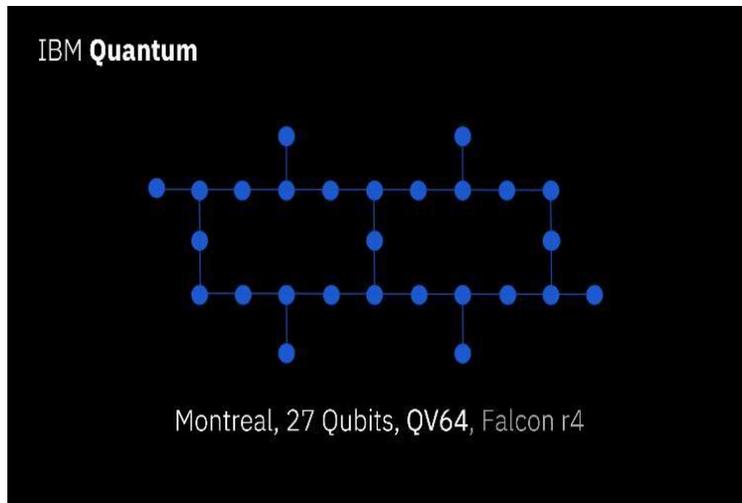
– количество используемых кубитов

Глубина квантовой цепи (circuit depth)

- максимальное число операций



Глубина данной цепи равна 7. Регистр 3 имеет 5 гейтов, но 2-й (управляемый-U) не может быть выполнен до тех пор, пока не будут выполнены и контролируемые - U^4 и U^2 , что добавляет 2 шага. Контролируемый T может быть выполнен одновременно с H. Следовательно, глубина цепи равна 7. S гейт обозначает $Z^{1/2}$



= 6 кубитов

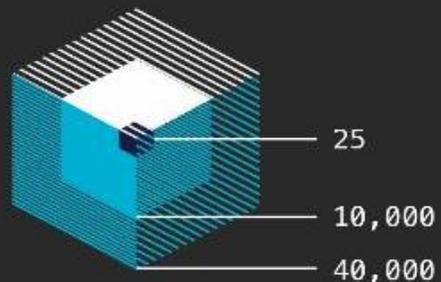
Квантовый Объем= $2^6 = 64$

Протокол нахождения КО

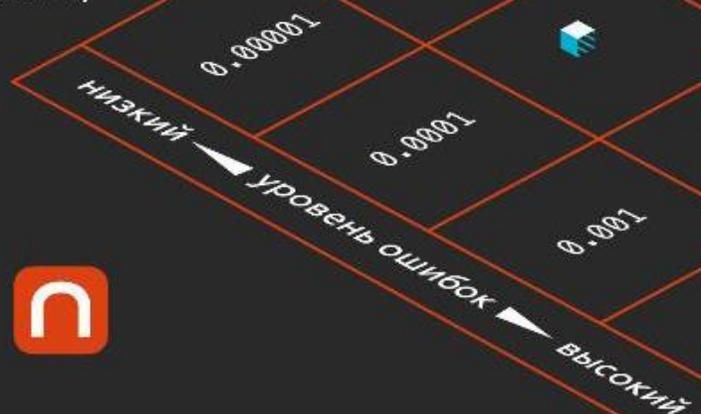
1. Многократно запускаете случайную 2х-кубитную схему глубины два, с проверкой теста – наиболее вероятные строки возникают с вероятностью $> 2/3$ и с доверительным интервалом более 97,725%.
2. Повтор с тремя кубитами на третьей глубине, четырьмя кубитами на четвертой глубине, и.т.д до невыполнения теста.

Квантовый объем

Квантовый объем — объем куба, пропорциональный возможным полезным квантовым вычислениям



Квантовый объем по уровню ошибок (ось y) и числу кубитов (ось x)



Добавлено кубитов: **0**
Снижение уровня ошибок: **10x**
Увеличение квантового объема: **24x**

Снижения количества ошибок позволит создать более мощный квантовый компьютер

Увеличение числа кубитов не приводит к улучшению квантового компьютера при высоком уровне ошибок

Добавлено кубитов: **100**
Снижение уровня ошибок: **0**
Увеличение квантового объема: **0**



Development Roadmap

IBM Quantum

2019

2020

2021

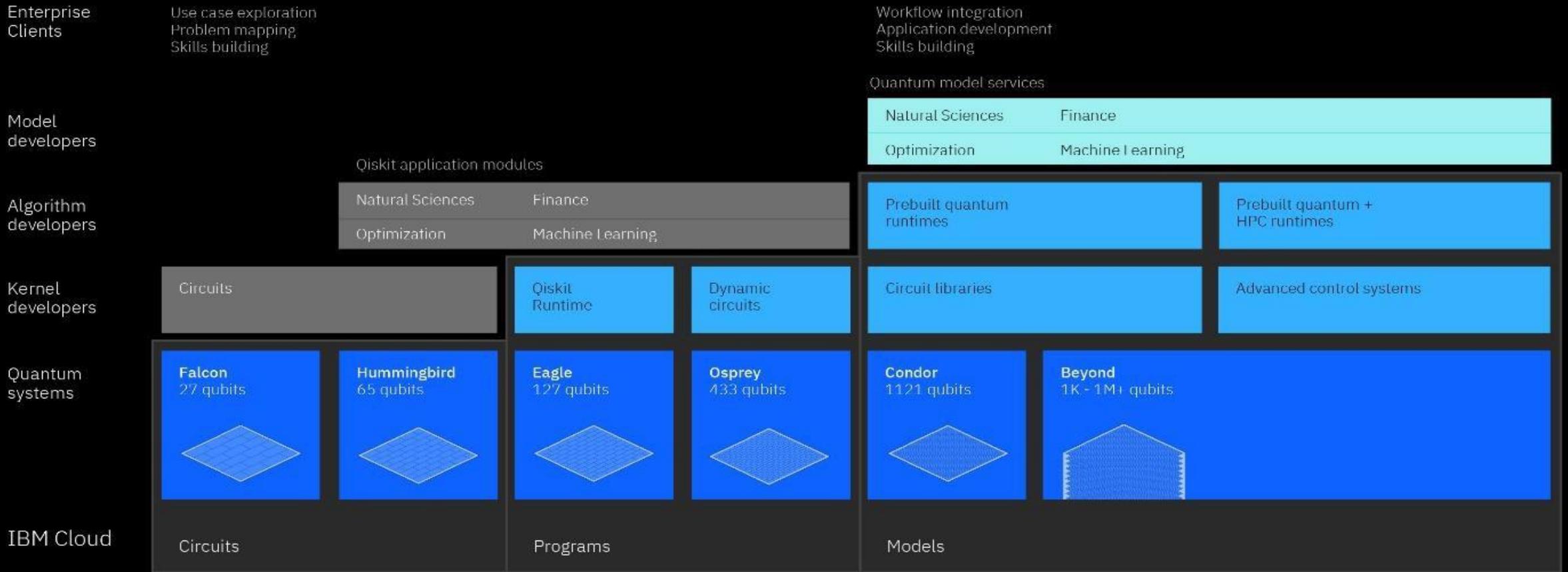
2022

2023

2024

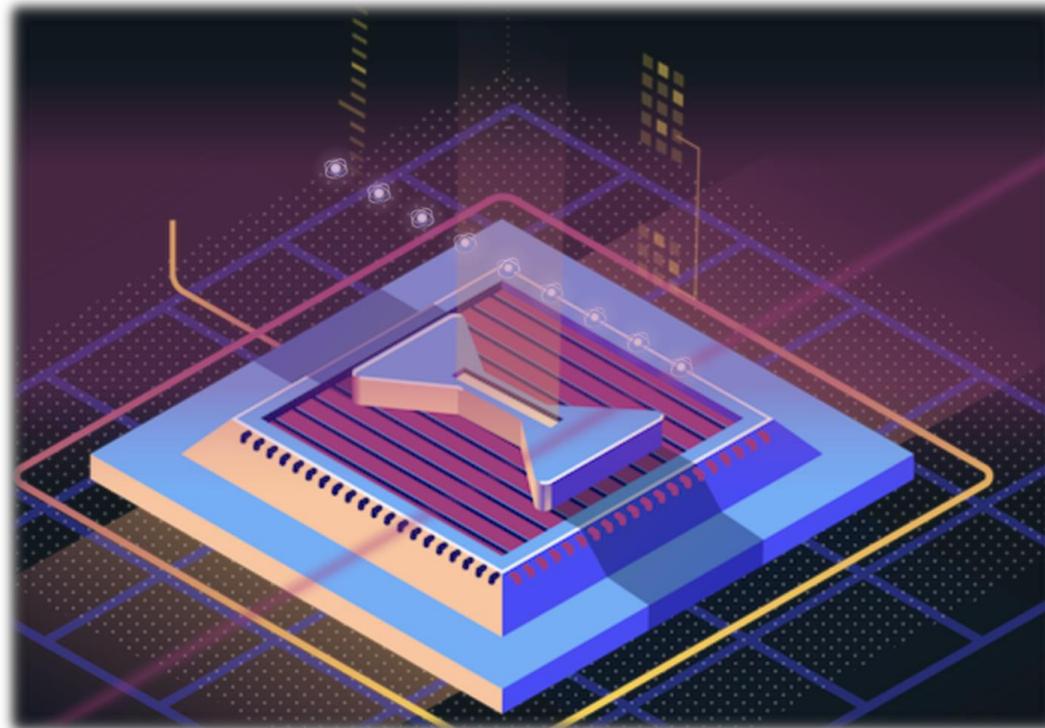
2025

2026+



Реализации кубитов: платформы КК

ИОНЫ



“wiring problem” -> 2D,3D

arXiv:2403.00756v1 [quant-ph] 1 Mar 2024



Aria An #AQ 23,
23 qubit quantum computer
171Yb⁺



Quantinuum System Model H1, Powered by Honeywell,
20 qubit quantum computer,
171Yb⁺

Trapped ions exhibiting QV several orders of magnitude higher superconducting systems

Реализации кубитов: платформы КК

ФОТОНЫ

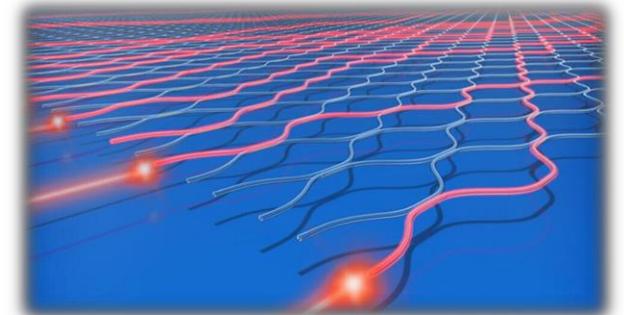


Цзючжан (九章)

100 qubit a non-universal quantum computer

2020 – boson sampling (вычисление перманента матрицы) за 200 секунд

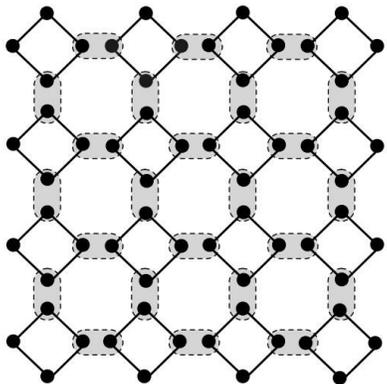
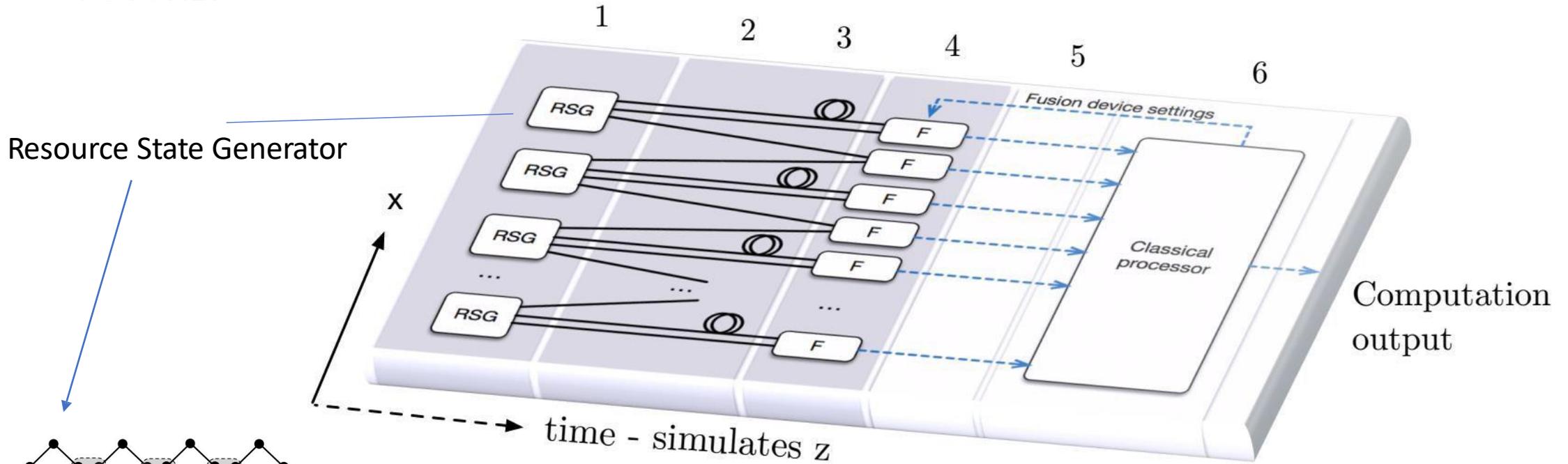
Суперкомпьютер -- 1,5 миллиарда лет



FUSION BASED QUANTUM COMPUTATION ARCHITECTURE

ФОТОНЫ

Universal quantum computer

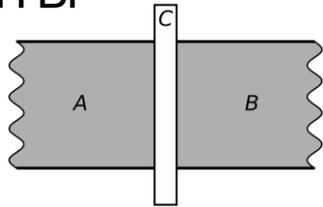


Ψ PsiQuantum

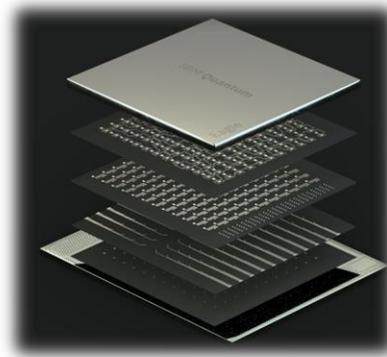
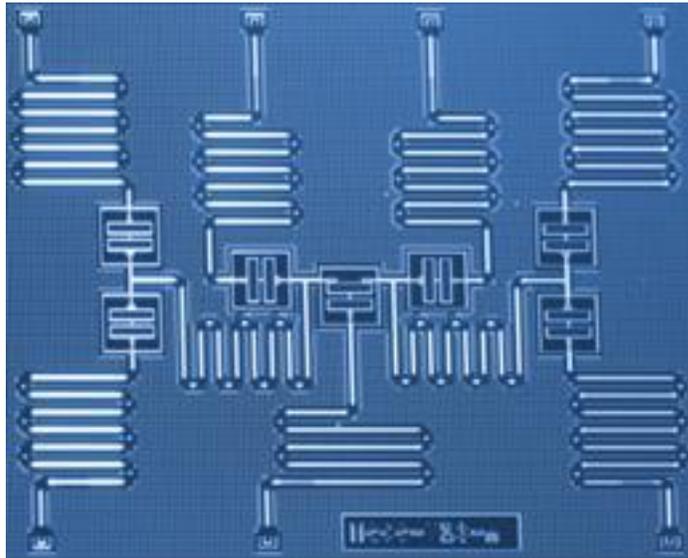
arxiv.org/pdf/2101.09310.pdf

Реализации кубитов: платформы КК

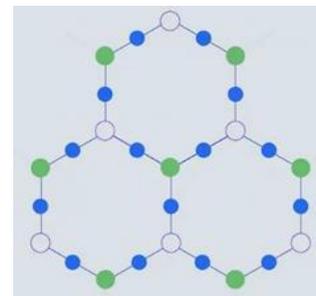
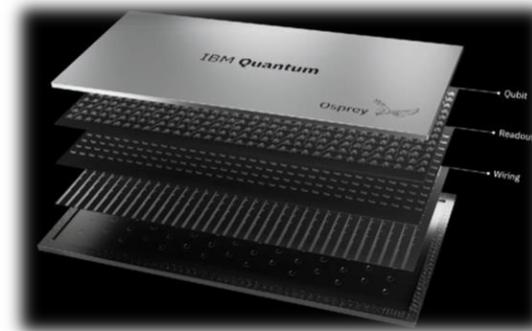
СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ
КУБИТЫ



Контакт Джозефсона



127-кубитовый квантовый
процессор *Eagle* (2021)

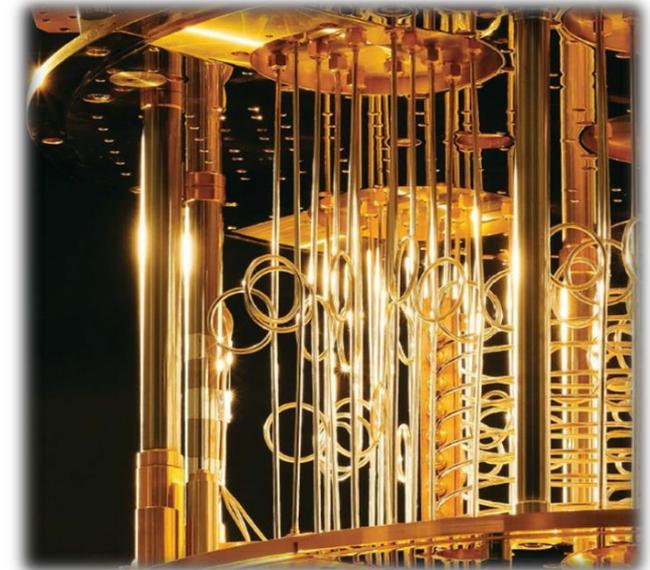


Архитектура
heavy-hex lattice



433-кубитовый квантовый
процессор *Osprey*
(10.11.2022)

1121-кубитовый квантовый
процессор *Condor*
(12.2023)



Azure Quantum

Get to know the world's first full-stack,
open cloud quantum computing ecosystem

Реализации кубитов

NV ЦЕНТРЫ В АЛМАЗЕ



QUANTUM BRILLIANCE



DIATOPE



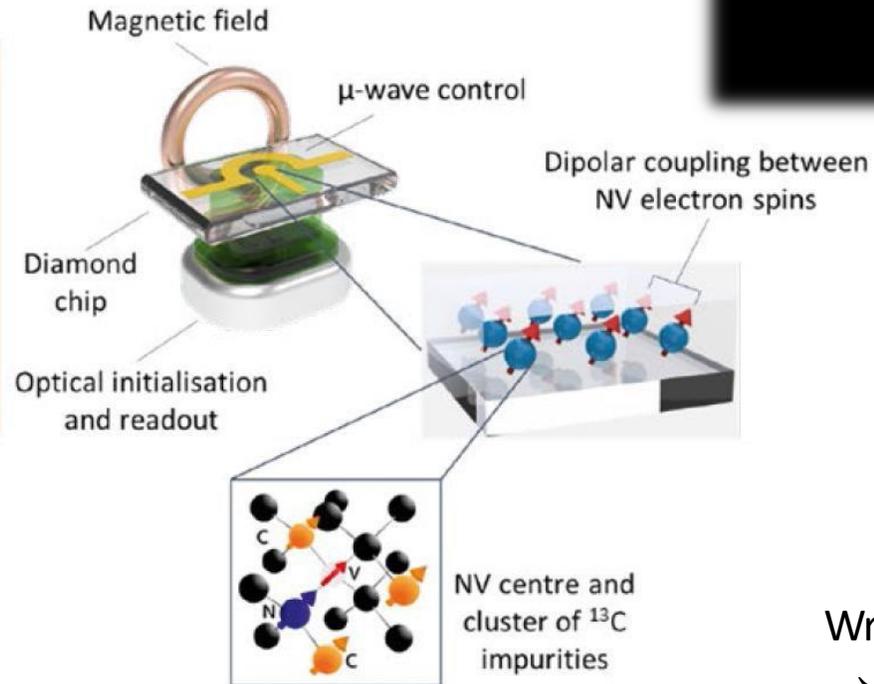
QUANTUM DIAMOND TECH



NVISION

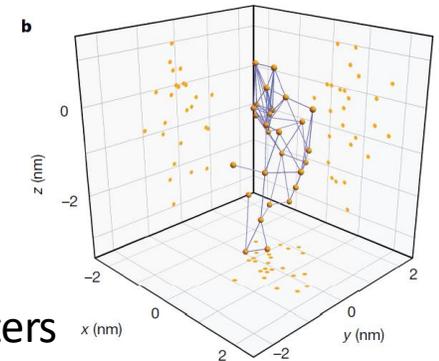


ELEMENT SIX



Wrachtrup, Kilin, Nizovtsev, 01

→ WKN paper: ^{13}C nuclear spins, Q memory & Q registers



Временной масштаб прогресса ?



1171 физический кубит ("Condor" 2023 г.)
 ≈ 1 логический кубит
 поверхностного кода с
 коррекцией ошибок

B. Eastin Tutorial (<http://www.qecl4.ethz.ch/abstracts.html>)

Квантовая химия	~ 150-200 корректируемых (идеальных) кубит
Квантовый сопроцессор	Любое число кубит
Разделение секретов	Долгоживущие кубиты
Машинное обучение	Несколько сотен кубит

Задачи для NISQ

Квантовые оптимизаторы

Квантовый отжиг

Устойчивые к помехам квантовые схемы

Квантовое глубокое обучение

Квантовая инверсия матриц

Квантовые рекомендательные системы *

Квантовое полуопределенное программирование

Квантовое моделирование (цифровое и аналоговое)

Квантовые игры

Noisy Intermediate-Scale Quantum technology

* Имеем m клиентов и n продуктов,

P - $m \times n$ **матрица предпочтений** ($P_{ai} = 1$, если покупателю нравится продукт i и $P_{ai} = 0$, если не нравится). На практике $m \approx 10^8$ пользователей и $n \approx 10^6$ продуктов, но **ранг k** матрицы P **невелик**, $k \approx 100$ (результат ограниченного количества типов клиентов) следовательно, как только мы узнаем некоторые предпочтения нового клиента, мы сможем точно порекомендовать другие товары, которые понравятся покупателю.

Цель -- рекомендовать покупателю продукт, который вероятно, будет ему нравится, основываясь на ограниченном знании предпочтений этого клиента и других клиентов.

$$O(\text{poly}(k)\text{polylog}(mn)) \rightarrow \text{poly}(mn)$$

КВАНТОВЫЙ

КЛАССИЧЕСКИЙ

J. Preskill, Quantum computing in the NISQ era and beyond, arXiv:1801.00862v3

АДИАБАТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

1. В отличие от квантового компьютера на основе цепей (ЦКК), адиабатические квантовые компьютеры (АКК) выполняет очень специфический вид вычислений, но чрезвычайно полезный: **оптимизацию.**

2. АКК используется для поиска набора переменных, который минимизирует некоторые функции с несколькими переменными, и **считается**, что он может делать это быстрее, чем обычный компьютер, хотя **математика, лежащая в основе этого, на данный момент не совсем ясна.**

3. Любое стандартное квантовое вычисление в принципе может быть выполнено с помощью АКК, и наоборот, но **доказательство не показывает простого пути перехода от одной системы к другой.**

Квантовый отжиг

($T_{INT} \neq 0$)

$$H_{\text{Ising}} = - \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z - \sum_i h_i \sigma_i^z$$

$$H(t) = -A(t) \sum_i \sigma_i^x + B(t) H_{\text{Ising}}$$

$A(t) \downarrow$

$B(t) \uparrow$

NP $\mathcal{O}(\exp(cN^a))$

Q Annealing: c, a



АДИАБАТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: ОТКРЫТЫЕ ВОПРОСЫ

а) **Исправление ошибок** - в отличие от ЦКК, неизвестно, как выполнять исправление ошибок в АКК.

б) **Проблема энергетической щели**. Основная концепция физики адиабатических квантовых вычислений заключается в том, что когда параметры системы медленно меняются, система остается в основном состоянии новой системы. Количественная оценка «насколько медленно» обратно пропорциональна «энергетической щели между основным и первым возбужденным состоянием». Величина энергетической щели не совсем понятна теоретически и зависит от конкретной проблемы.

Щель уменьшается с увеличением размера системы → время вычислений увеличивается. Таким образом, АКК ограничен размером задач, которые он может решить.

Идеальный АКК должен работать при чрезвычайно низкой температуре, чтобы тепловые флуктуации не могли перекрыть энергетическую щель. АКК, работающий при конечной температуре, коммерчески доступен сегодня. Он предоставляет платформу для понимания этих ограничений и научных достижений.

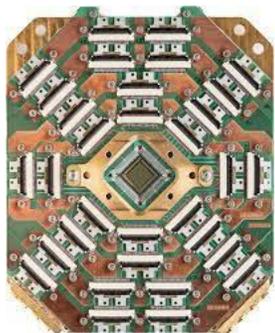
$$\frac{d \log(B(t))}{dt} \sim \frac{1}{\Delta E_g}$$

$$\Delta E_g \sim 1/N$$

$$\Delta E_g \gg kT$$

АДИАБАТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: РЕАЛИЗАЦИЯ

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КУБИТЫ



2000Q,
D-Wave Advantage
2000 or 5000 qubit
a non-universal quantum
computer

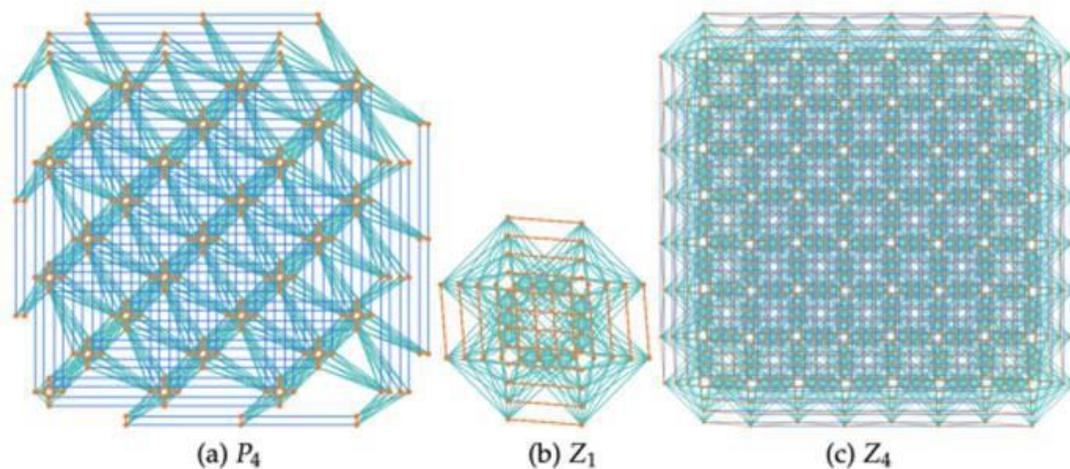


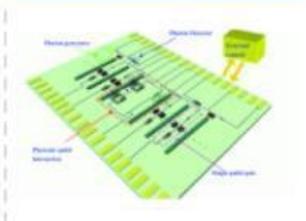
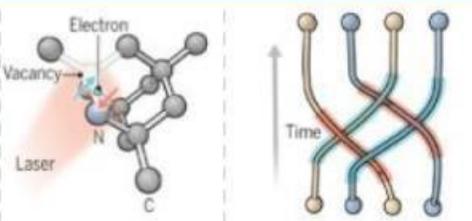
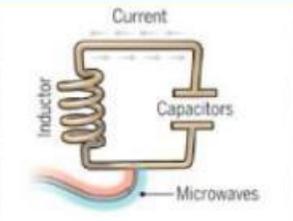
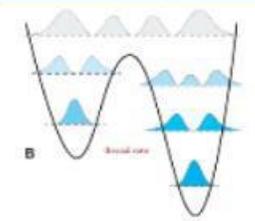
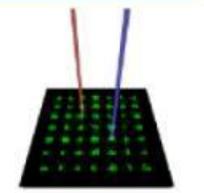
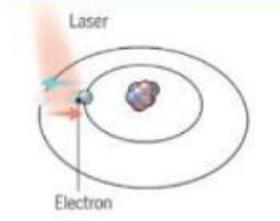
Figure 1: Comparison of Pegasus and Zephyr connection topologies. (a) A Pegasus P_4 graph contains 264 qubits. (b) A Zephyr Z_1 contains 32 qubits and four unit cells that share several couplers. (c) A Zephyr Z_4 graph contains 576 qubits.



СВОДНАЯ ДИАГРАММА ОСНОВНЫХ РАЗРАБОТЧИКОВ И ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

АТОМЫ | электроны *сверхпроводниковые контуры и управляемые спины* | ФОТОНЫ

производители

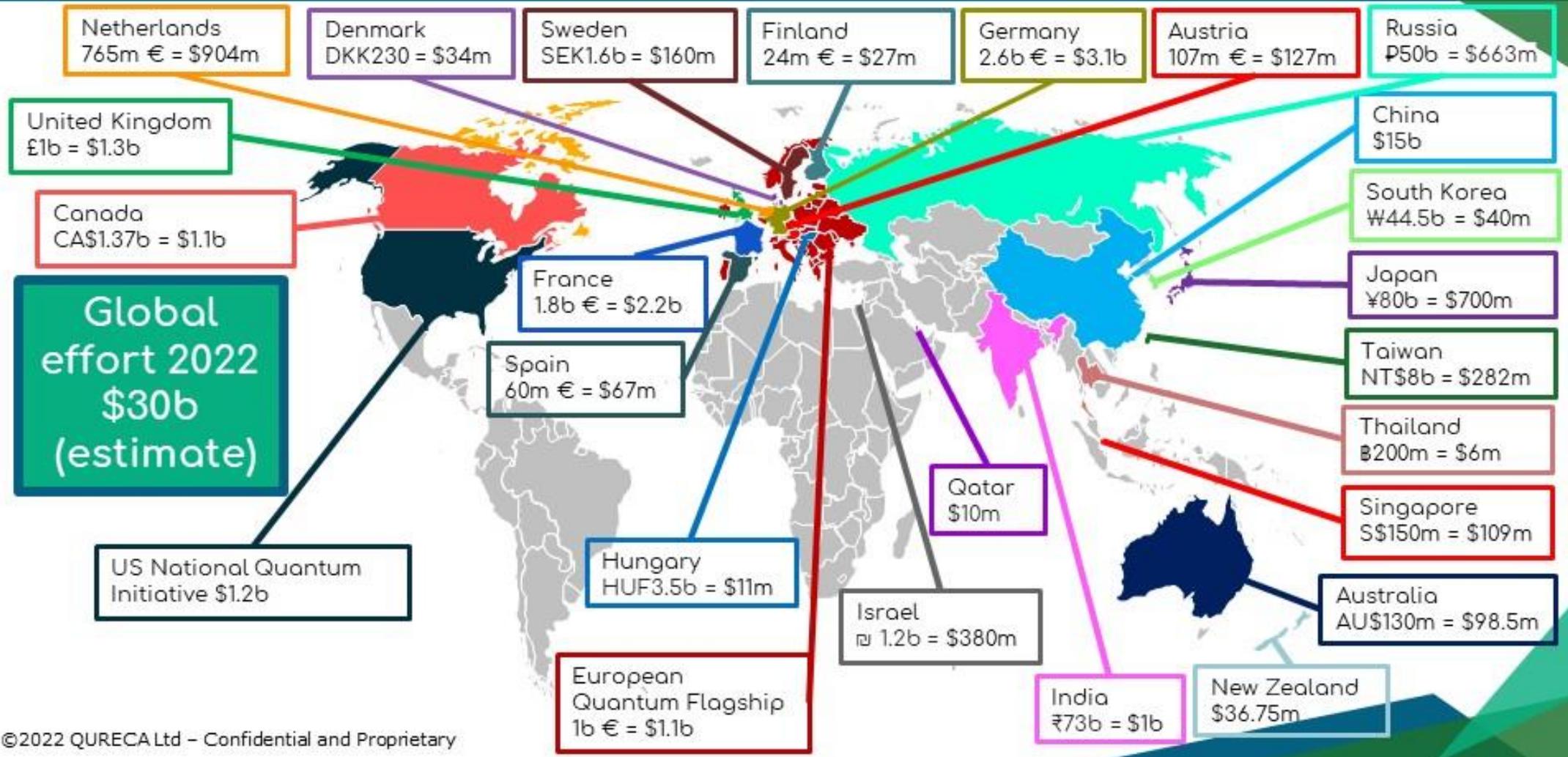


лаборатории

(*) non exhaustive inventory, missing Chinese labs among others

IMPQIT 27 мая 2024 г

ОЦЕНКА МИРОВОГО РЫНКА КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (2022 – 2027)



©2022 QURECA Ltd – Confidential and Proprietary

McKinsey
& Company

Quantum Technology Monitor

April 2023

CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY
Any use of this material without specific permission
of McKinsey & Company is strictly prohibited

MPQIT 27 мая 2024 г



The quantum technology ecosystem in 2023

Summary of Quantum Technology Monitor findings



Quantum computing
\$9B–\$93B
 estimated market size by 2040

\$5.4B invested as of Dec 2022
223 start-ups as of Dec 2022



\$34B total government investment announced



Quantum communications

\$1B–\$7B

estimated market size by 2040
\$1.0B invested as of Dec 2022
72 start-ups as of Dec 2022



Quantum sensing

\$1B–\$6B

estimated market size by 2040
\$0.4B invested as of Dec 2022
23 start-ups as of Dec 2022

Potential economic value from quantum computing

\$620B–\$1,270B

across four industries by 2035: chemicals, life sciences, finance, and automotive³

Quantum-capable talent



50

QT master's degree programs



180

universities with QT research groups

Scientific progress



1,589

QT-related patents granted in 2022



44,155

QT-related publications in 2022

¹ The potential 2040 market size is a sum of the upper ranges across quantum computing, quantum communications, and quantum sensing.

² Total includes 32 companies that do two or more quantum technologies simultaneously.

³ Economic value is defined as the additional revenue and saved costs that the application of quantum computing can unlock. These four industries are the most likely to realize this value earlier than other industries; therefore, they are examined in more depth.

Executive summary

Investment and ecosystem

- Total annual QT start-up investment hit a new high (\$2.35 billion), though growth was only 1% YoY
- About two-thirds, or 68 percent, of all QT start-up investments since 2001 occurred in 2021 and 2022
- With 350 start-ups in the QT ecosystem, **the rate of start-up creation slowed and has not kept pace with investments**, indicating that investments are going into established start-ups rather than toward new ideas; information that Series A and B start-ups have attracted particular attention in 2022 supports that statement
- 2022 was a year of big deals: four of the ten biggest QT investment deals since 2001 were closed in 2022: SandboxAQ (\$500 million), Rigetti (\$345 million in a SPAC deal), D-Wave (\$300 million in a SPAC deal), and Origin Quantum (\$149 million)
- Public investments continue: the United States, the European Union, and Canada committed an additional \$1.8 billion, \$1.2 billion, and \$0.1 billion, respectively

Research and technology progress

- The 2022 Nobel Prize in Physics was awarded to quantum-entanglement pioneers Alain Aspect, John Clauser, and Anton Zeilinger
- IBM unveiled the Osprey (433 qubits) and updated its road map to develop a 4,000+ qubit processor in 2025
- Xanadu demonstrated quantum advantage for GBS¹ using its photonic quantum computer
- **Patent issuance and publishing dropped** in 2022, potentially indicating that **the easiest challenges have already been addressed**; 1,589 QT-related patents were granted in 2022, 61 percent less than in 2021, and 44,155 QT-related papers were published in 2022, 5 percent less than 2021

Potential economic value

- Our updated analysis for 2023 shows that the four industries likely to see the earliest economic impact from quantum computing—**automotive, chemicals, financial services, and life sciences**—stand to potentially gain up to \$1.3 trillion in value by 2035.
- The update of the value potential comes from a reassessment of the potential economic value of QC use cases in the financial services industry, which has grown to between \$394 billion and \$700 billion. Corporate banking, risk, and cybersecurity offer the most valuable use cases.

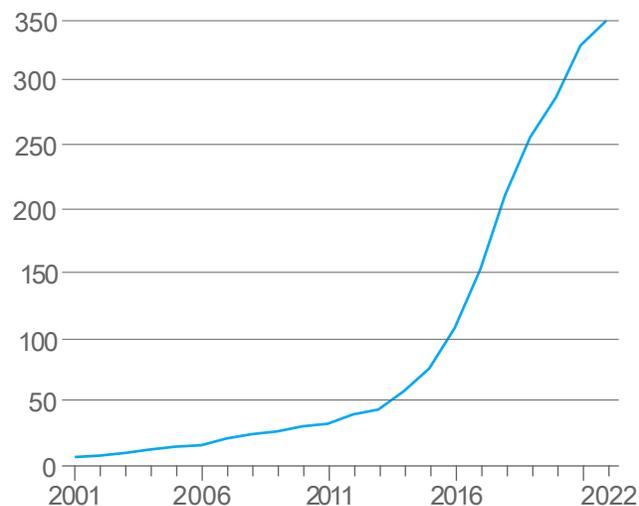
Quantum talent

- **The talent gap for QT jobs narrowed**, yet remains wide; approximately one in two jobs remained vacant in 2022, compared to one in three in 2021
- The number of universities offering official master's degrees in QT nearly doubled in 2022, from 29 to 50

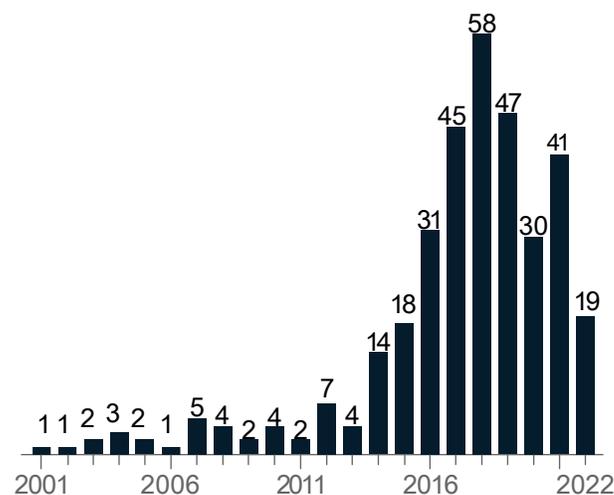
¹ Gaussian boson sampling: a probability-distribution-sampling problem; quantum advantage has previously been demonstrated for this problem by Google and researchers from the Chinese Academy of Sciences.

Despite record investment, the **rate** of QT start-up creation **slowed** in 2022.

Cumulative number of QT start-ups founded



Number of QT start-ups founded per year



Potential hypotheses on the causes of the slowdown:

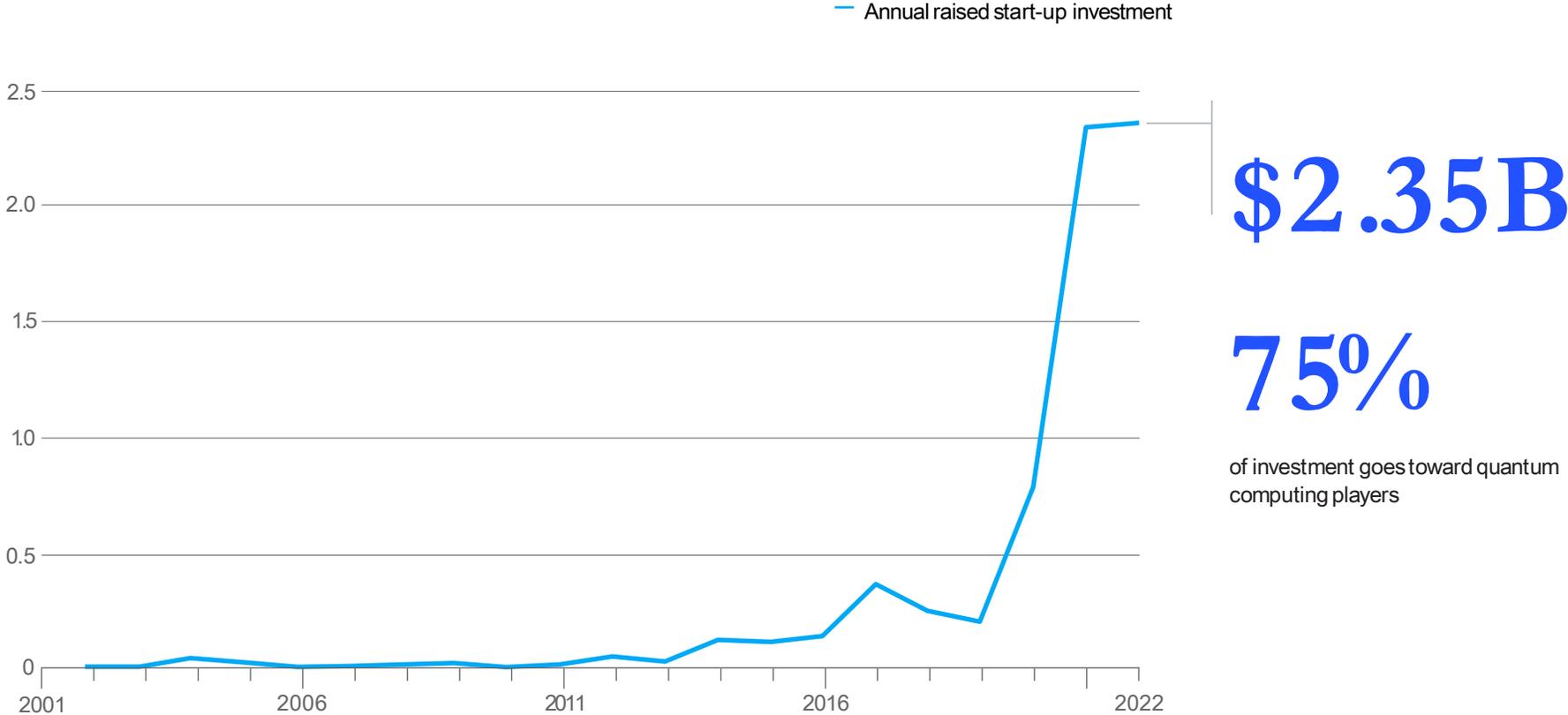
- Lack of talent: Most experienced specialists (generally academics with research focus in QT) already work in a start-up
- Few working use cases: Application start-up creation is limited because working use cases are very limited or not sufficiently developed for commercial implementation (eg, in QS)
- Investor trends: Investors prefer to invest in scale-ups and later-stage start-ups, limiting capital for a company that is just starting

80%

of start-ups founded in past 3 years are in QC space

Total annual **QT start-up investment** hit the highest level of all-time, though it grew only **1 percent year over year**.

Volume of raised investment in the indicated year,¹\$ billion



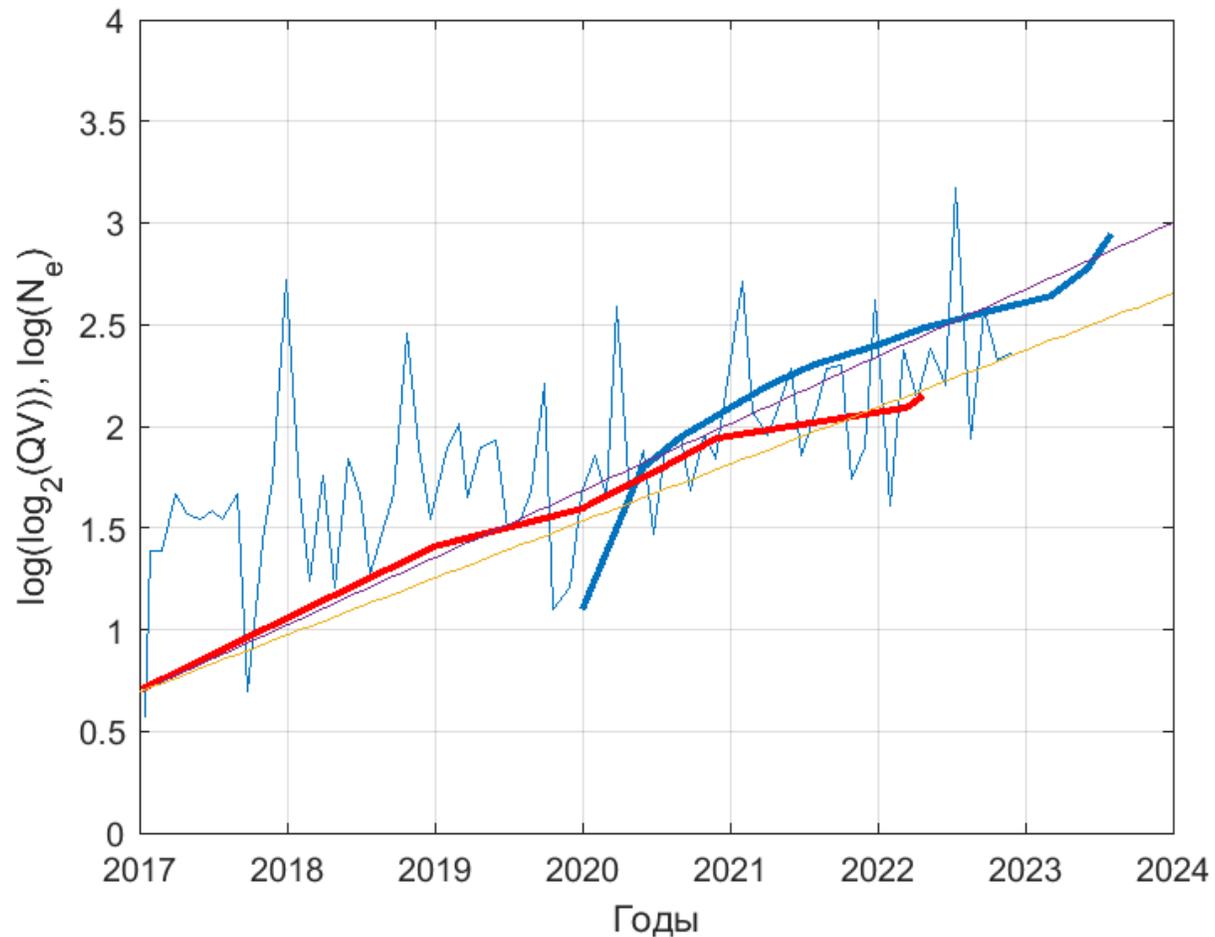
¹Based on public investment data recorded in PitchBook; actual investment is likely higher.

Source: PitchBook

ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ СРОКИ СОЗДАНИЯ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ ОТ ЛИДИРУЮЩИХ КОМПАНИЙ

№	компания	Тип кубита	Срок создания КвК
1	IBM	сверхпроводники	Сегодня: 127 кубитов ✦ Начало 2022: 433 кубитов "Osprey"; ✦ Конец 2023 - 1121 кубитов "Condor"
3	Google	сверхпроводники	Квантовый компьютер с кодами коррекции ошибок, способный выполнять полезные вычисления, будет построен к 2029г.
4	IONQ	ионы	Прогнозируемый квантовый объем - 4 млн. 2023 год – демонстрация полномасштабного квантового превосходства. 2028 год – 1024 алгоритмических кубита
4	Honeywell	ионы	2021г. -квантовый объем 1024 ✦
5	PsiQuantum	фотоны	2025г. - 1 млн. кубитов, 1000 логических кубитов
6	Xanadu	фотоны	1 млн. кубитов с исправлением ошибок (срок не указан)
7	Pascal	Нейтральные атомы (Rb)	1000 физических кубитов (без сроков)
8	QuERA	Нейтральные атомы	2021 г.- 256-512 физических кубитов ✦ 2022 г. - полностью программируемый КвК с 64 кубитами (✦ симулятор) 2024 – полностью программируемый КвК с 1024 кубитами.
9	D-Wave	Гибридная платформа: квантовый отжиг и сверхпроводниковые кубиты	2023-2024гг – 7000 кубитов

ArXiv:[quant-ph] → Количество доступных кубитов



Ichikawa T. [и др.]. A comprehensive survey on quantum computer usage: How many qubits are employed for what purposes? — 2023. — arXiv: 2307.16130 [quant-ph].

НАУКА, ПРОГРЕСС И РЕКЛАМА: МЕНЬШЕ ХАЙПА* !

Только сейчас использование КК начинает входить в наш мир. Общество заинтересовано в новых ярких возможностях.

Имея идею невероятного прогресса с помощью КК в бизнесе, с **”легкой” спекулятивной популяризацией** КК(на многих сайтах и выступлениях описывают технологию КК как достижимую и прорывную для всех сфер), мы можем получить эффект доткомов.

Эти новые и необычные технологии не оставят в стороне инвесторов и спекулянтов. Но чрезмерная популярность может сыграть злую шутку как **эффект доткомов** 90 х годах в США.

«Квантовое превосходство» !

*Хайп (от англ. *hype* — «шумиха») — агрессивная и навязчивая реклама, целью которой является формирование предпочтений потребителя. Название происходит от слова, означающего надувательство, обман или трюк для привлечения внимания.

Хайп используется в контексте истерии, когда происходит сильный всплеск интереса к ранее непримечательному объекту или событию. Хайп создаётся целенаправленно, базируясь на настоящих интересах аудитории, на которую он рассчитан. Социальными последствиями нового подхода к рекламе становятся смещение интересов общества к пассивному потреблению, исчезновение естественно сформированных

Как слово **blockchain** в названии компании в 2016-18 годах провоцировало панически скупки, так и слова **quantum** будет заставлять трейдеров покупать акции. В результате - очередной пузырь.

массовых предпочтений, угнетение способности к самостоятельному анализу, трата денег на товары и услуги, не являющиеся необходимыми, в том числе превышающие финансовые возможности людей



ВЫВОДЫ

Создание универсального КК – слишком сложная задача, чтобы увидеть план ее реализации с точными датами в настоящее время.

На первый план выходят задачи создания КК небольших масштабов (NISQ) – ускорителей вычислений, работающих совместно с суперкомпьютерами.

Получаемые при этом результаты следует анализировать и рассматривать в контексте их важности для реализации УКК.

Стоимость современного КК заведомо велика даже для очень крупных компаний. Естественной бизнес-моделью использования КК является облачная модель.

Задача создания УКК -- исключительно наукоемкая и решается по законам науки. Рыночными инструментами ускорить решение невозможно.

Прогресс технологий на пути создания УКК – может самый важный результат, полученный за последние 20 лет истории освоения квантового мира.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



НЕПРЕРЫВНО ИЗМЕНЯТЬСЯ



ЦЕНТР «КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ИНФОРМАТИКА»

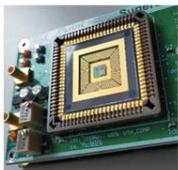
Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси проводит исследования в области квантовой оптики, квантовой коммуникации и квантовой сенсорики

пр. Независимости, 68-2, к. 1, комн. 486,
220072, Минск, Беларусь
тел. +375 17 2708613,
+375 17 2708442,
факс +375 17 2708879 (с пометкой «для ЦКОКИ»)
E-mail: kilin at dragon.bas-net.by

ДОСТИЖЕНИЯ
И
РАЗРАБОТКИ



Детекторы одиночных фотонов фирмы idQuantique



Высокоскоростная время разрешающая матрица SuperEllen из $32 \times 32 = 1024$ лавинных детекторов одиночных фотонов с собственной оцифровкой времени отсчета



Быстродействующий цифровой осциллограф Tektronix MSD064-BW4 с полосой 4 ГГц и частотой выборок до 25 ГГц



Анализатор оптического спектра 771A-NIR-APC



Сканирующий ближнеполевой оптический микроскоп



Схема квантового процессора на основе NV центров в алмазе и ядерных спинов изотопа ^{13}C , 2001 г. (совместно с университетом Штутгарта)



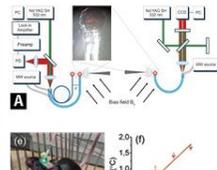
Первая в СНГ оптоволоконная линия квантового распределения ключа на основе кодирования фотонов во временные окна (time-bin coding) 50 км, 2007 г.



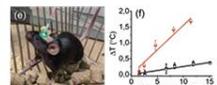
Оптоэлектронный искусственный нейрон, на основе оптоэлектронной пары «вертикально-излучающий лазер – однофотонный лавинный фотодиод» – воспроизводит свойства биологических нейронов



Квантово-оптические генераторы случайных чисел на одиночных фотонах, используемые в криптографических системах для обеспечения информационной безопасности



Квантовые сенсоры на основе примесных центров в алмазе, год?? (совместно с МГУ)



Квантовый сенсор высокочувствительной векторной градиентометрии магнитного поля на основе NV центров в алмазе (А). Квантовый оптоэлектронный сенсор температуры мозга на основе микрокристалла алмаза с центрами окраски германий-вакансия (GeV) (Б).



Квантовая криптография на одиночных фотонах

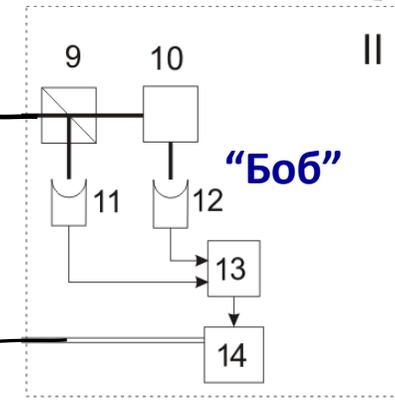
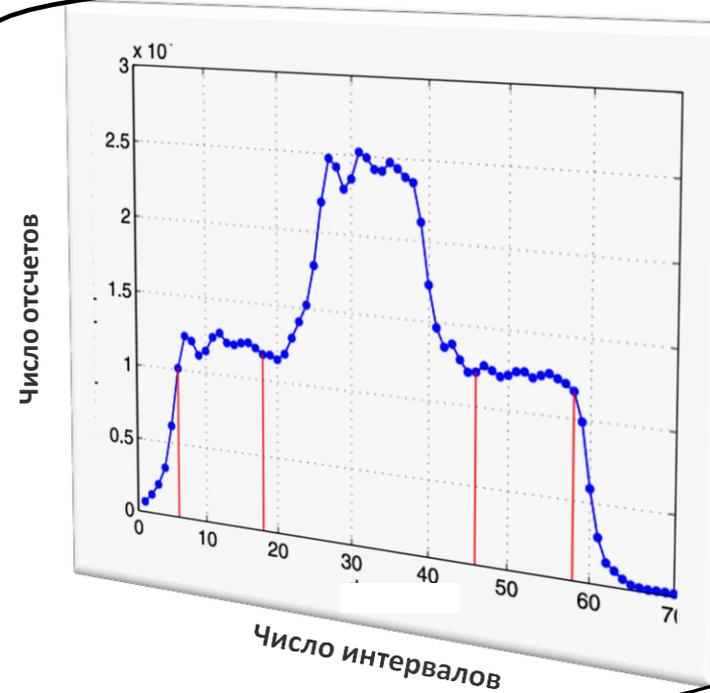
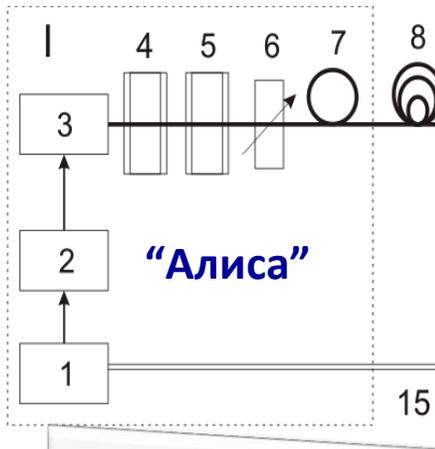
Центр квантовой оптики и квантовой информатики,
Институт физики имени Б.И.Степанова НАН Беларуси



FIRST QKD SYSTEM IN BELARUS - 2007

- 1– ПЭВМ «Алиса»;
- 2– генератор TTL-импульсов;
- 3 – п/п лазер (VCSEL);
- 4, 5, 6 – аттенюаторы 20, 30 dB;
- 7,8 – оптическое волокно;

МАСШТАБИРОВАНИЕ !!! \$



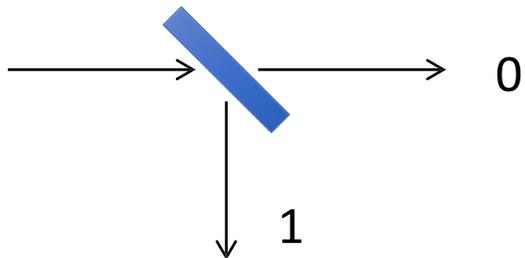
- 9 – делитель пучка;
- 10 – интерферометр;
- 11,12 – детекторы одиночных фотонов;
- 13 – АЦП;
- 14 – ПЭВМ «Боб»;
- 15 - классический канал связи.



QAUNTUM TRUE RANDOM NUMBER GENERATOR



SINGLE PHOTON RNG



Источник энтропии

VCSEL P-Film PD

- VCSEL лазер 850nm
- Поляризационная пленка 850 нм
- Детектор 10 нс, 2.75x2.75 mm²

Thermoelectric cooling VCSEL holder

DETECTION TIME RANDOMNESS



Спецификация

- Вывод данных: Ethernet 1Gbit
- Скорость: до 600Мбит
- Питание: ~220В
- Габариты: 20 см x 25 см x 5 см
- ПЛИС Altera Cyclone IV

Батарей тестов

- ENT-tests (<http://www.fourmilab.ch/random>)
- NIST (NIST Special publication 800-22 Revision 1, 2008)
- DieHard (<http://www.csis.hku.hk/~diehard/>)

Результат

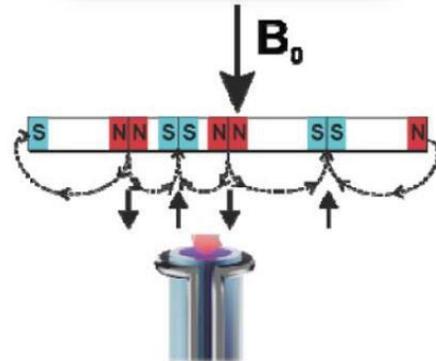
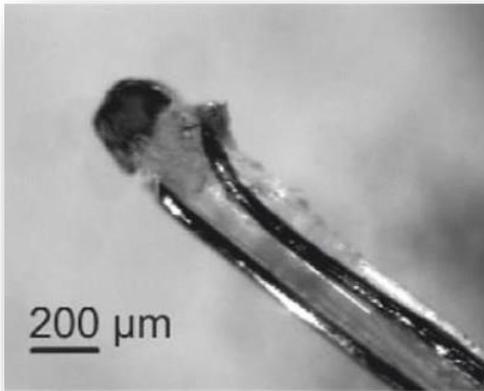
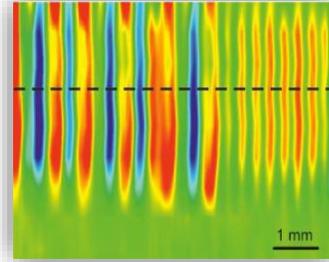
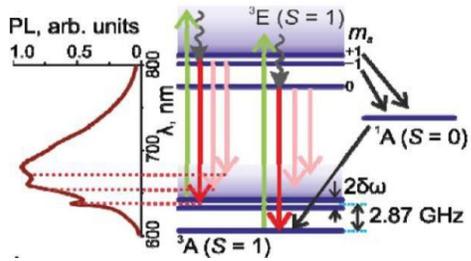
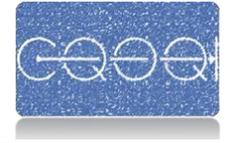
Все тесты успешно пройдены

Встроенное исполнение





NV CENTERS IN DIAMOND AS SENSORS



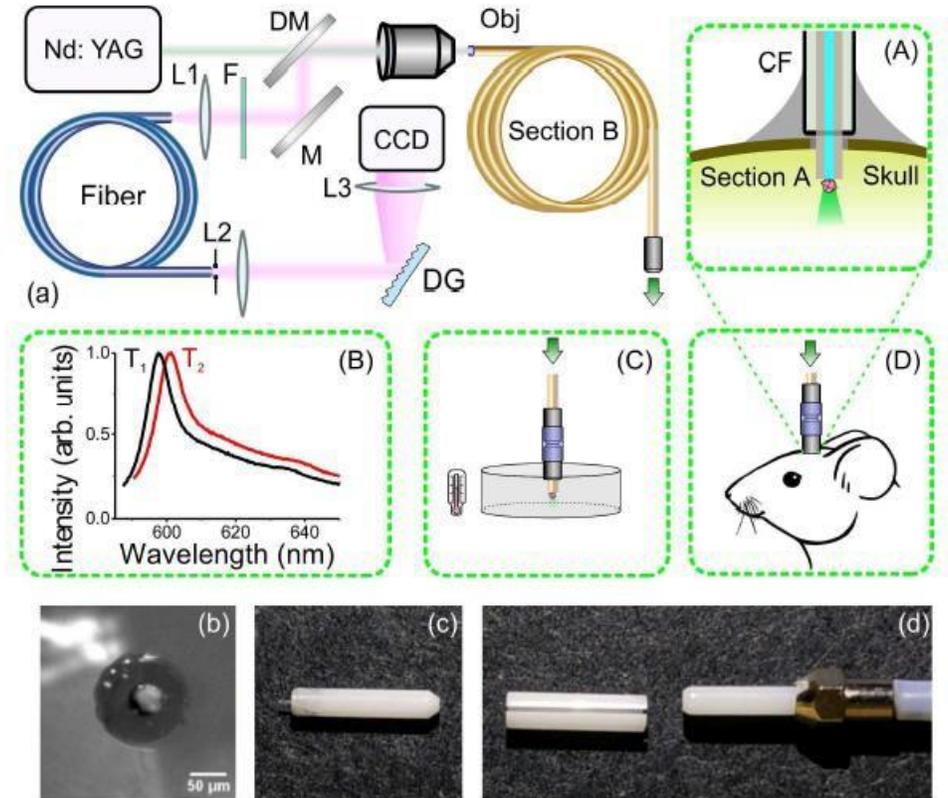
The sensitivity of magnetic field measurements

$$\eta \approx 300 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$$

$$\rightarrow 10 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$$

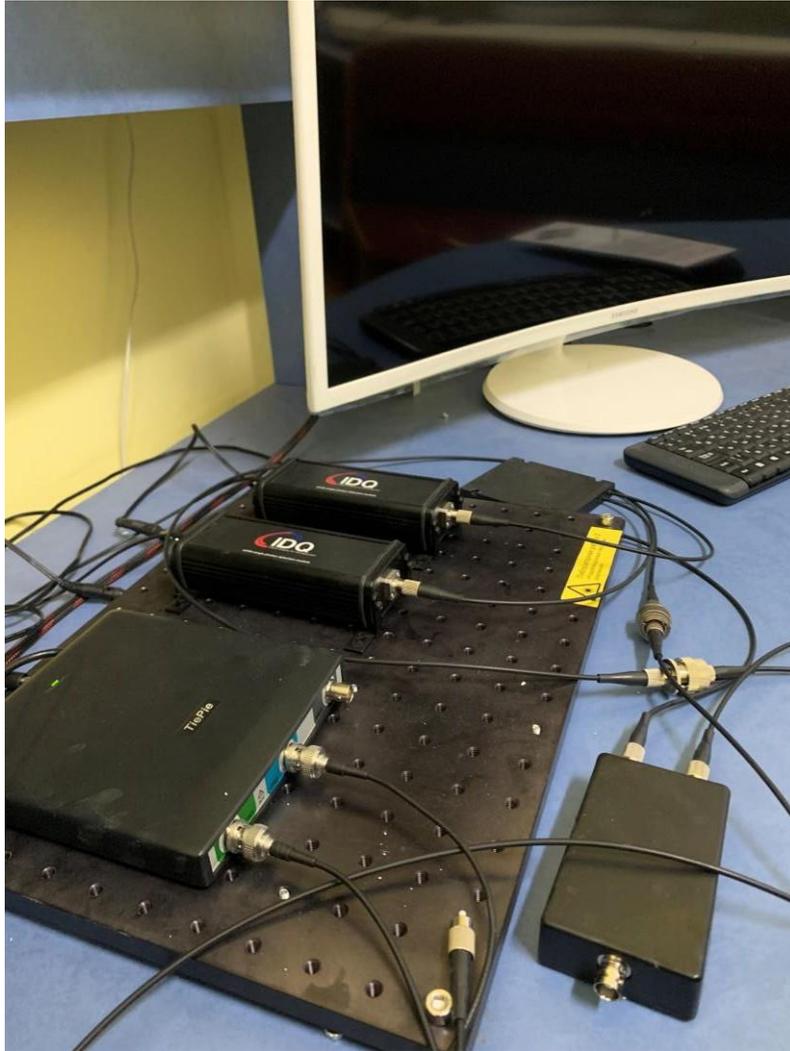
FIBER-OPTIC MAGNETIC-FIELD IMAGING

Vol. 41, No. 9 / May 1 2016 / Optics Letters



ALL-OPTICAL BRAIN THERMOMETRY IN FREELY MOVING ANIMALS

ACS Photonics 2020, 7, 12, 3353- 3360



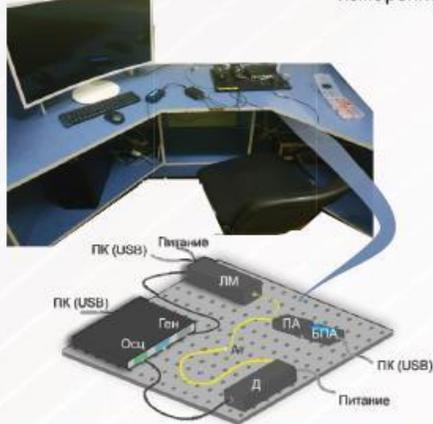
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

В рамках данной серии работ студенты учатся работать с детекторами одиночных фотонов, цифровыми аттенюаторами, лазерными источниками, и управлять ими используя пакет MATLAB.

1. Основы квантовых измерений

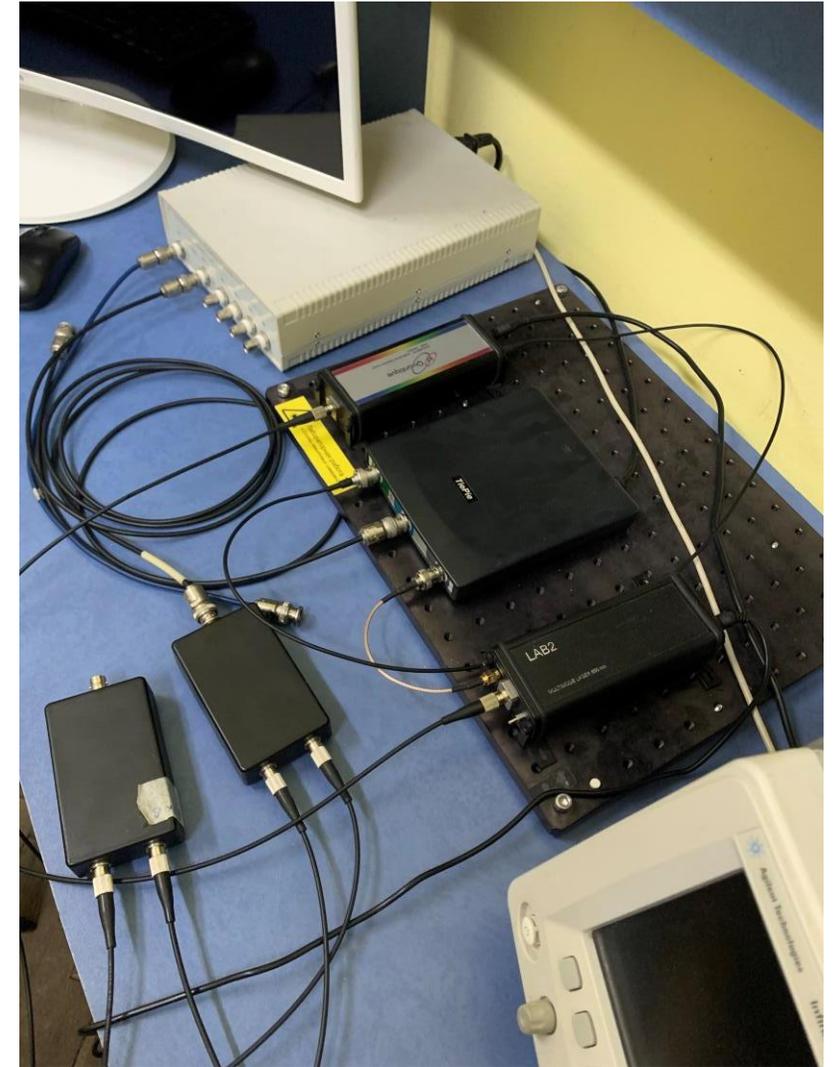
Определение параметров детектора одиночных фотонов: частоты темновых отсчётов и послеимпульсов, мёртвого времени.

Генерация случайных бит на основе квантовых измерений.



Комплектация 1-й лабораторной работы

- Экспериментальный стенд:
- Лазерный модуль - ЛМ
- Детектор одиночных фотонов - Д
- USB-осциллокол и генератор - Осц+Ген
- Цифровой управляемый аттенюатор - ПА+БПА
- Волокно в кевларовой оболочке
- Набор аттенюаторов
- Компьютер - ПК





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!