



M. V. Lomonosov
Moscow State
University



Квантовые технологии: что происходит в России и в мире

Сергей Кулик

*Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова*

*Центр квантовых технологий, физический факультет,
кафедра квантовой электроники
(sergei.kulik@physics.msu.ru)*



MSU
Quantum
Technologies
Center

Нелинейные волны – 2022
08.11.2022

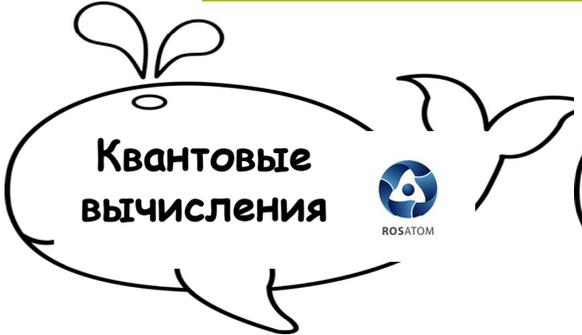


КВАНТОВАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Quantum Information Science

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: три кита

Quantum Technologies


 Квантовые
 вычисления




 Квантовая
 связь

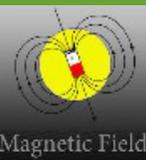



 Квантовые
 сенсоры



Ионы и нейтральные атомы в ловушках

Оптоволоконные каналы

Сенсоры электрических и магнитных полей
 

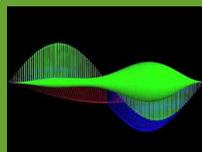
Линейно-оптические вычисления (фотонные чипы)

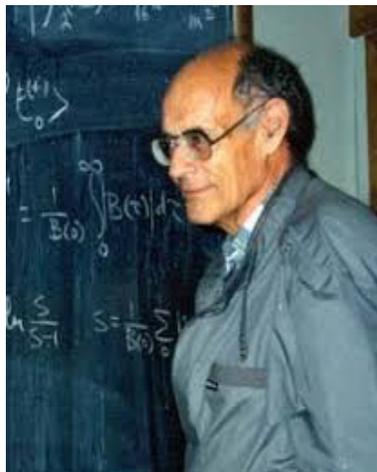
Атмосферные/космические каналы: мобильные и стационарные

Часы, гравиметры, гироскопы
 

Сверхпроводниковые кубиты

Квантовая память, квантовые интерфейсы...

Квантовая метрология
 



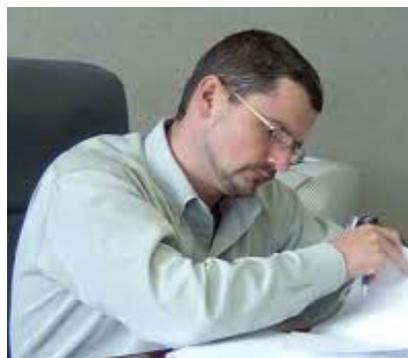
Д.Н.Клышко
Квантовая
оптики



Л.В.Келдыш
Взаимодействие
излучения с веществом



В.Б.Брагинский
Квантовые измерения



Константин Лихарев
Одноэлектронные
устройства

ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ И ПЕРСПЕКТИВЫ



Цель, мотивация: понять, как фундаментальные законы квантовой физики могут способствовать улучшению технологий приема, передачи и обработки информации.

Решение: использование квантовых технологий

Инструментарий: квантовые биты и суперпозиции;
квантовый параллелизм,
непрерывные квантовые переменные;
перепутывание как новый ресурс и т.д.

Примеры: кубиты вместо классических битов

$|\Psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle$ (двухуровневая система) либо "0" либо "1" (trigger)

$|\Psi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |0_1\rangle|1_2\rangle + |1_1\rangle|0_2\rangle \}$ перепутанное состояние нет аналогов

Что такое квантовый компьютер?

1. Это физическое устройство, выполняющее логические операции над квантовыми состояниями путем унитарных преобразований (т.е. сохраняющих энергию), не нарушающих квантовые суперпозиции в процессе вычислений.
 2. Это физический компьютер, работа которого:
 - основана на уникальных свойствах квантовой физики;
 - принципиально отличается от практически всех существующих компьютеров (которые в совокупности называются классическими)

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: QUANTUM COMPUTING



Проблема 1 - уменьшение размеров интегральных схем, т.е. отдельных элементов. Нанотехнологии.

Естественный предел здесь - характерный масштаб атома, когда вступают в силу законы микромира, т.е. квантовой механики.

Проблема 2 – уменьшение доли рассеиваемой энергии. Логически обратимые операции - те, которые не сопровождаются рассеянием энергии (Ландауэр, 1961г.).

Универсальный квантовый
компьютер



Коды коррекции ошибок
(Quantum Error Correction)

Альтернативы

NISQ
(noisy intermediate-scale quantum)
компьютеры –
прядка сотни кубитов

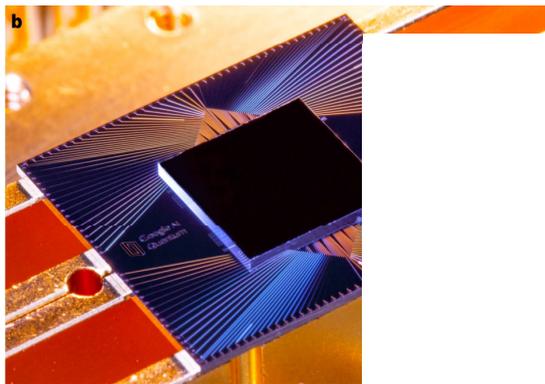
Квантовый отжиг
(quantum annealing)

Сортировка бозонов
(boson sampling)

Квантовые симуляторы

ПРОГРЕСС КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

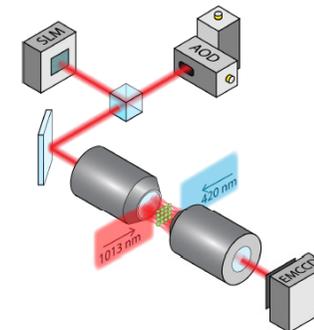
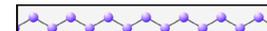
Квантовый компьютер
Google Sycamore



Квантовый компьютер
Jiuzhang 九章算術



Квантовый симулятор Aquila из
Гарварда <https://www.quera.com/aquila>



\$210M



\$119M



\$66M



\$50M

- **53** сверхпроводя кубита
- Универсально программируется.
- Формально показано квантовое превосходство в **2019** году

- Гос. программы США: \$20 млрд, Китай \$12 млрд, ЕС €3 млрд.

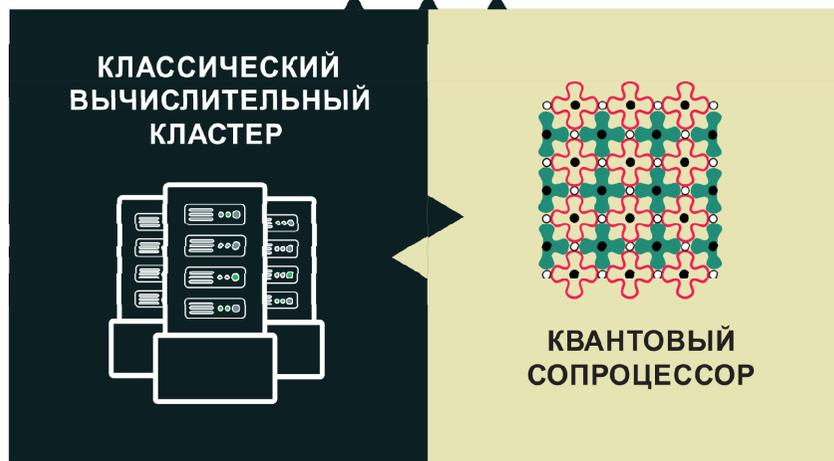
Source: cbinsights.com

итерации
 цифровой контроль
 итами

СВОДНАЯ ДИАГРАММА ОСНОВНЫХ РАЗРАБОТЧИКОВ И ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ



СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ КВАНТОВЫЙ СОПРОЦЕССОР



Квантовый отжиг



ПРИМЕНЕНИЕ
глобальная оптимизация

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ
ограниченная

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ
ограниченная



Noisy Intermediate-Scale Quantum

NISQ устройство



ПРИМЕНЕНИЕ
квантовая химия
наука о материалах
глобальная оптимизация
задачи сэмплинга
квантовая динамика



УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ
частичная

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ
высокая?



Универсальный квантовый компьютер



ПРИМЕНЕНИЕ
защищенные вычисления
машинное обучение
криптография
квантовая химия
наука о материалах
глобальная оптимизация
задачи сэмплинга
квантовая динамика
задачи поиска

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ
полная, математически обоснованное ускорение

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ
очень высокая



Сегодня обозначена возможность использования квантового компьютера для решения практически значимых задач

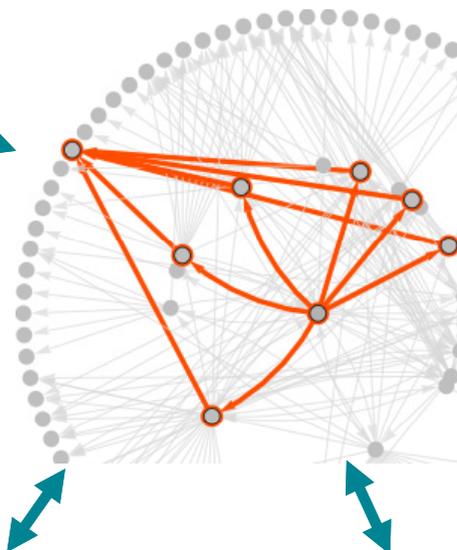
КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: практически значимые задачи

Странствующий коммивояжёр

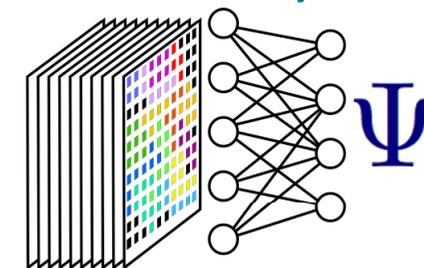


NP сложные задачи

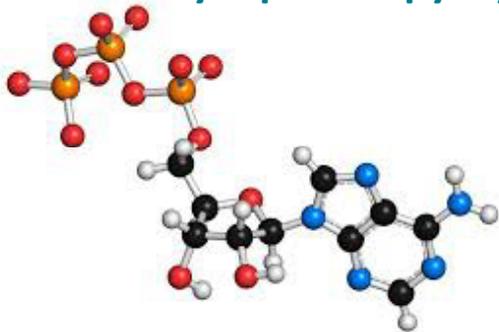
Комбинаторная оптимизация



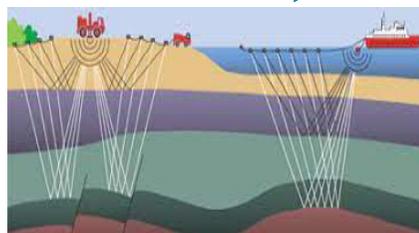
Машинное обучение



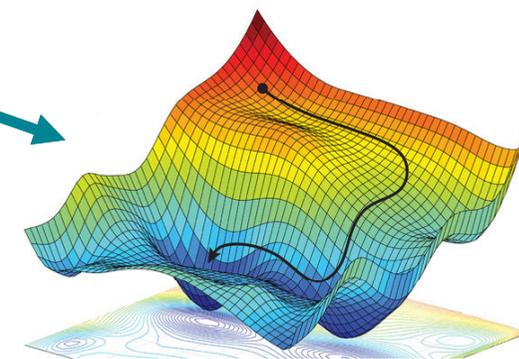
Молекулярная структура



«Сейсмика»



Глобальная оптимизация



Геологоразведка





В БЛИЖНЕСРОЧНОЙ, СРЕДНЕСРОЧНОЙ И ДОЛГОСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВАХ

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

По данным Boston Consulting Group



Задача	Полезно для...	Отраслевые приложения
Комбинаторная оптимизация	Минимизация или максимизация целевой функции, например, поиск наиболее эффективных ресурсов или поиск самого короткого расстояния между точками (задача странствующего коммивояжера)	<ul style="list-style-type: none"> • Оптимизация сети (например, для авиалиний, такси) • Оптимизация цепочек поставок и/или логистики • Оптимизация финансовых сервисов
Решение систем дифференциальных уравнений	Моделирование поведения сложных систем, (например, уравнение Навье-Стокса в гидродинамике)	<ul style="list-style-type: none"> • Моделирование гидродинамики для дизайна - автомобильной и авиационной техники; • Моделирование медицинских приложений (например, анализ кровотока); • Молекулярное моделирование новых материалов и/или лекарств
Решение систем линейных уравнений	Задачи машинного обучения с использованием матрицы диагонализации (например в задаче кластеризации)	<ul style="list-style-type: none"> • Управление рисками в финансовой сфере • Классификация последовательностей ДНК • Маркетинг и сегментация клиентов
Задача факторизации	Криптография и компьютерная безопасность, (например, RSA)	<ul style="list-style-type: none"> • Дешифрование и/или взлом кода

СРАВНЕНИЕ МЕЖДУ РАЗНЫМИ ПЛАТФОРМАМИ



P.N. Lebedev
Physical Institute

	Ионы	Нейтральные атомы	Сверхпроводники	Фотоны
Масштабируемость	Симуляторы - 53 кубита 1D-2D Вычислители - 11 кубит (попарно связанных) [1,2]	Симуляторы – 51 кубит 1D-3D [5]	Вычислители - 72 кубита 1D-2D [9]	100 кубитов
Время когерентности	До 10 мин [3]	До 7 с [6]	До 320 мкс [10]	«бесконечное»
Время срабатывания гейта	От 1 мкс	400 нс	10 нс	Менее 1 нс
Fidelity (достоверность)	99.996% один кубит [4] 99.9% два кубита [4]	99.6% один кубит [7] 97.4% два кубита [8]	99.92 % один кубит [11] 99.4% два кубита [11]	99,9 один кубит 99,9 два кубита*
R-фактор	До 10⁹	До 10⁷	До 10⁴	«бесконечное»

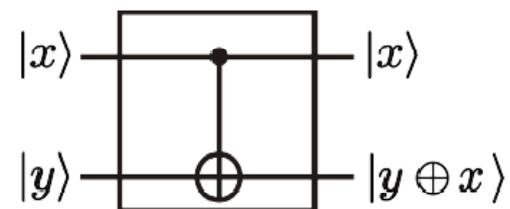
* Вероятностная модель – 10%

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ:



Универсальный набор гейтов¹

- ▶ Arbitrary single qubit gates
(H,S,T set is sufficient)
- ▶ Entangling two-qubit gate - for
example, a CNOT



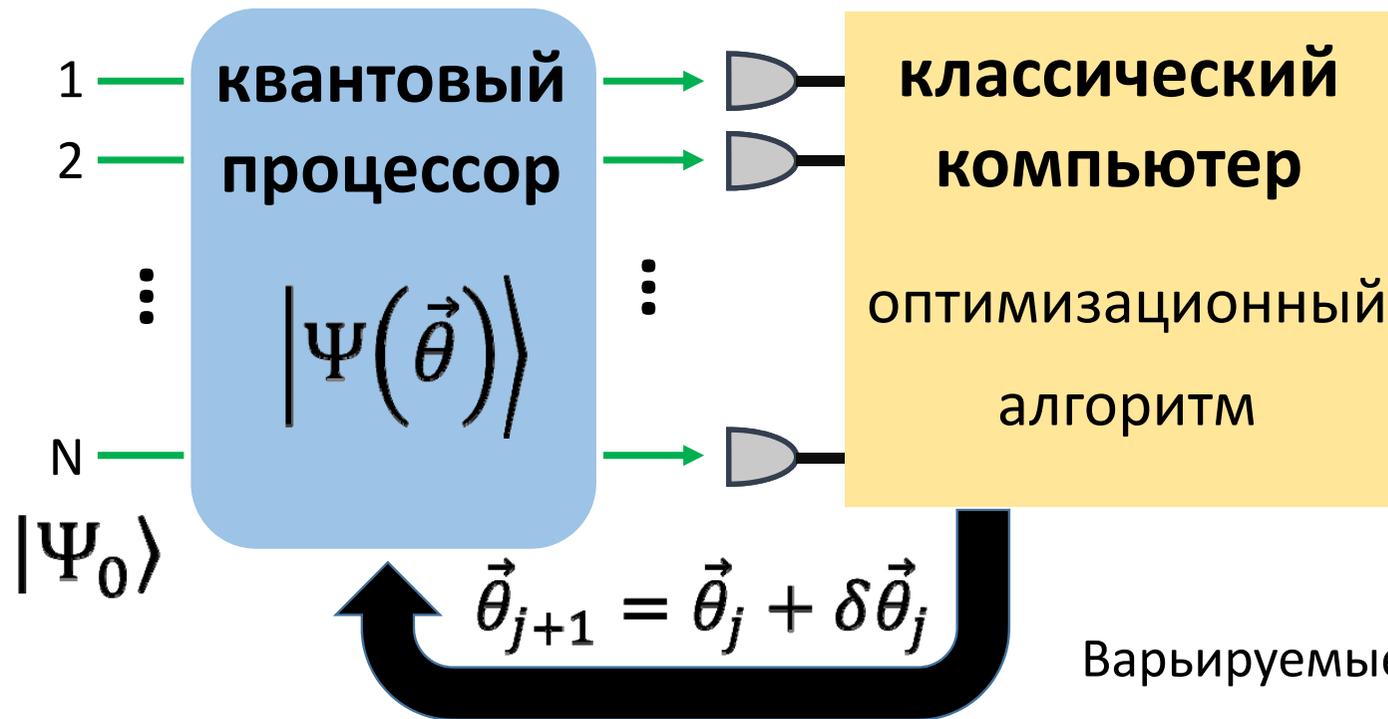
¹A.Barenco, *et al.*, Elementary gates for quantum computation, Phys. Rev. A **52**, 3457 (1995)

Линейно-оптические вычисления: вариационный алгоритм (VQE)



измерения кубитов

Глобальный минимума гамильтониана:



$$E(\vec{\theta}) = \frac{\langle \Psi(\vec{\theta}) | \hat{H} | \Psi(\vec{\theta}) \rangle}{\langle \Psi(\vec{\theta}) | \Psi(\vec{\theta}) \rangle},$$

Варьируемые параметры: $\vec{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_p)$

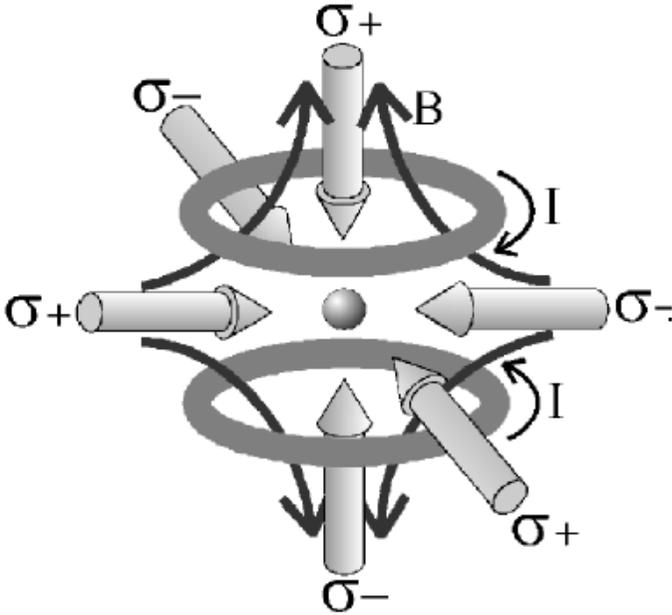


Критерии Ди Винченцо:

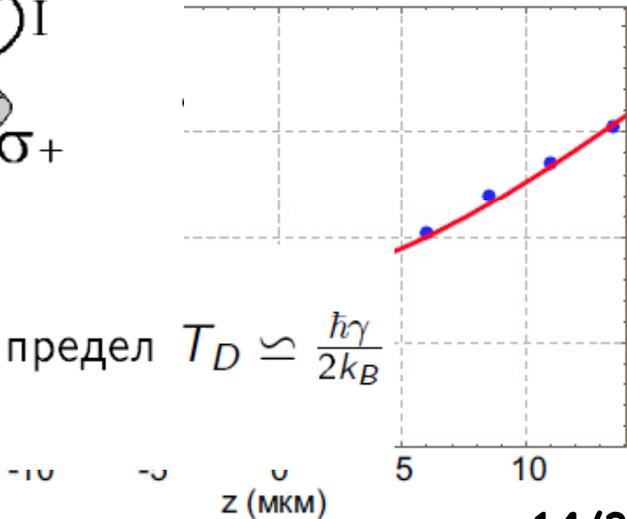
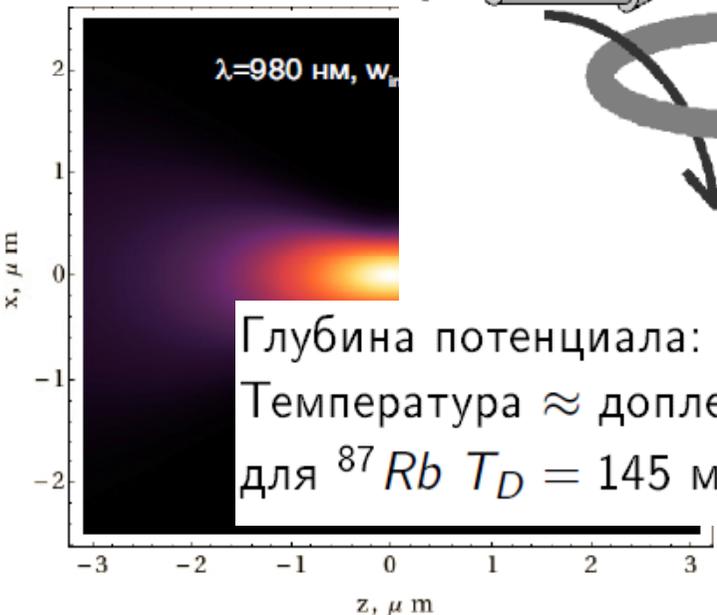
- **масштабируемость;**
- **надежная инициализация;**
- **большие времена декогеренции (релаксации)
по сравнению с временем срабатывания
отдельных гейтов;**
- **возможность манипуляций;**
- **передача и считывание состояний кубитов**

ВЫЧИСЛЕНИЯ НА НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМАХ: ХАРАКТЕРНЫЕ МАСШТАБЫ

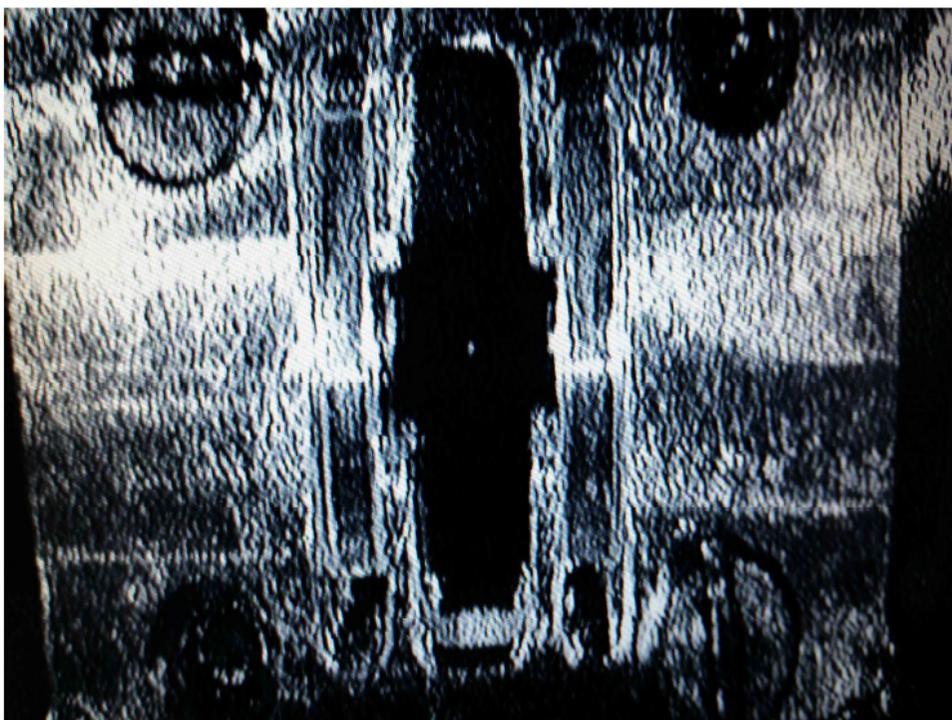
- ▶ Диодный лазер
- ▶ Фокусировка
- ▶ Глубина потенциала



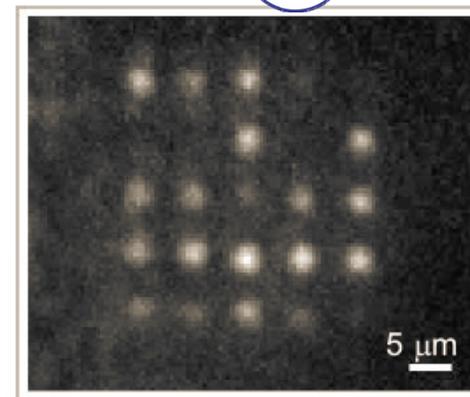
мощность 30 мВт
 диаметр 3.1 мм
 лазерное охлаждение



ВЫЧИСЛЕНИЯ НА НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМАХ: РЕГИСТРЫ

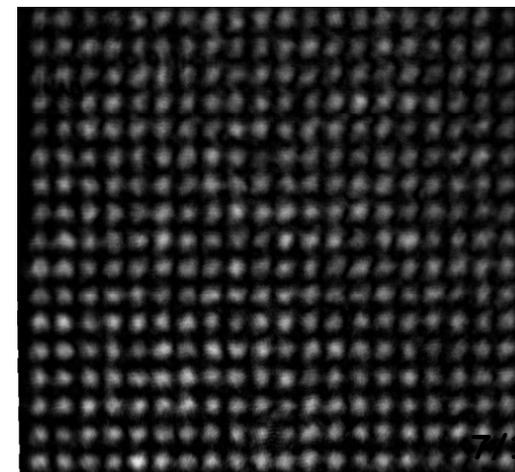


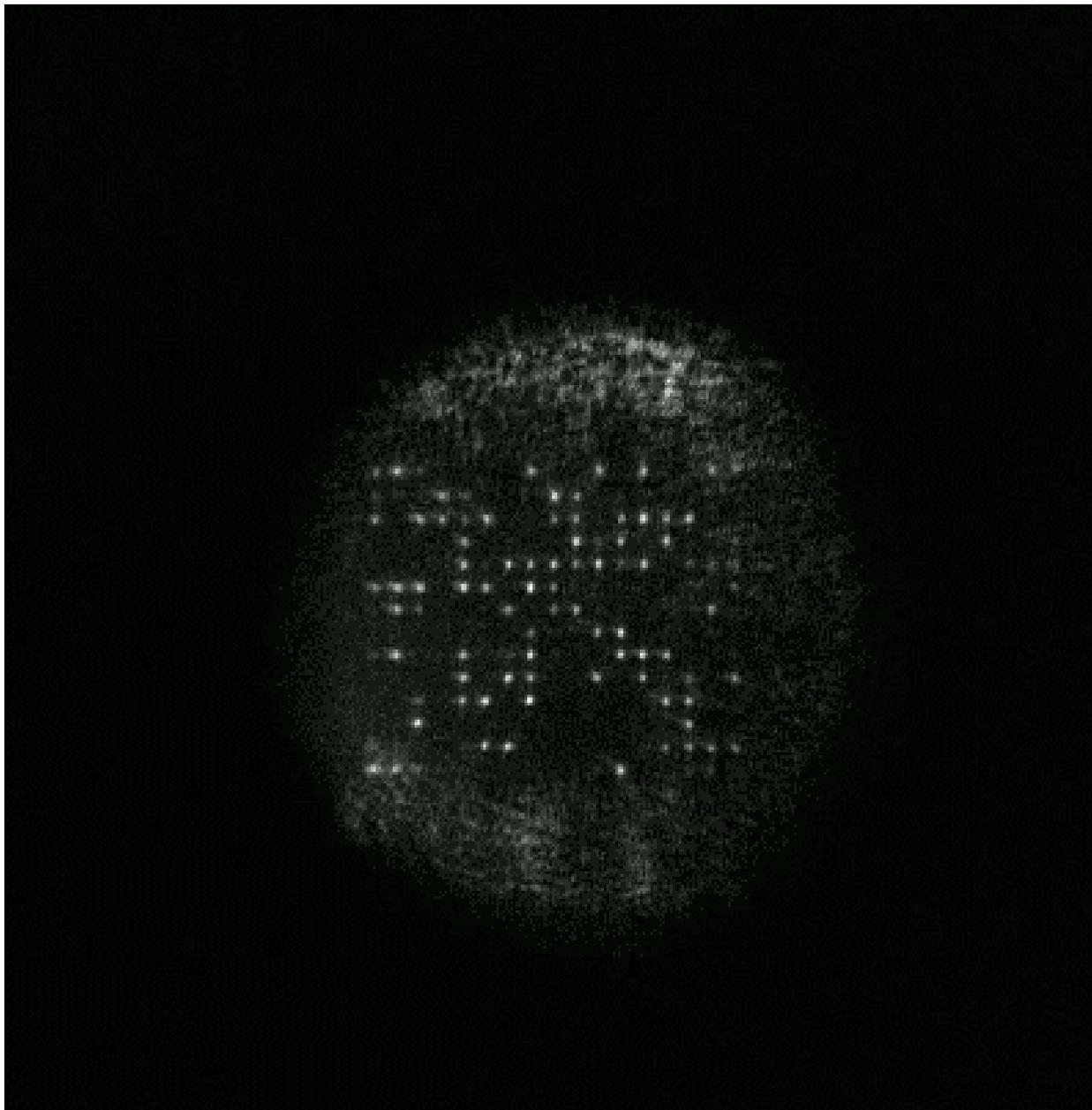
Экспериментальный комплекс по охлаждению, удержанию и оптическому мониторингу одиночных атомов в дипольной микроловушке



Время удержания в ловушке
одиночного атома рубидия
около 100 с.

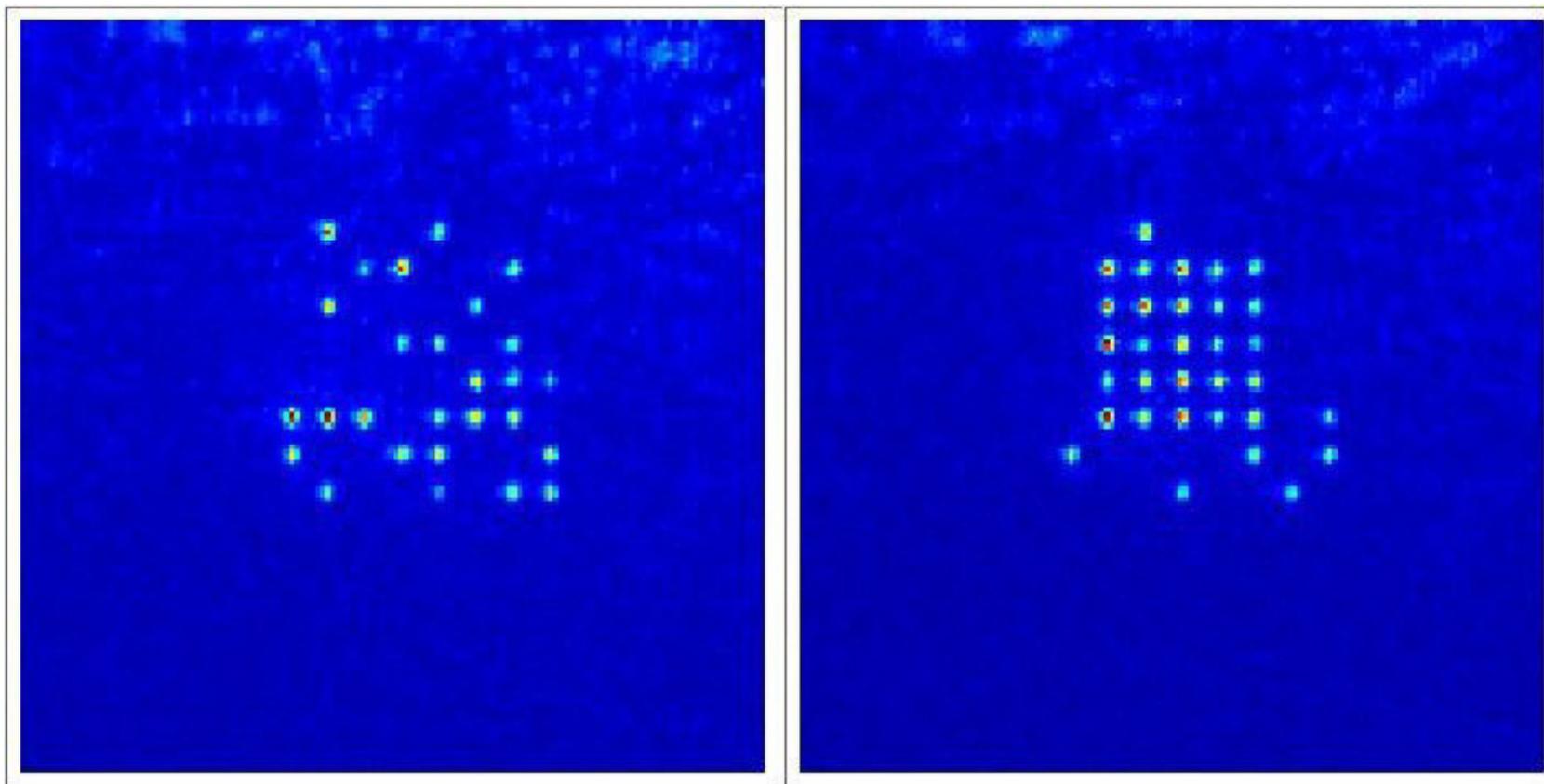
Создание квантовых регистров
для задач квантовой симуляции
и квантовых вычислений





25 мкм

ВЫЧИСЛЕНИЯ НА НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМАХ: РАЗУПОРЯДОЧЕННЫЕ И УПОРЯДОЧЕННЫЕ РЕГИСТРЫ

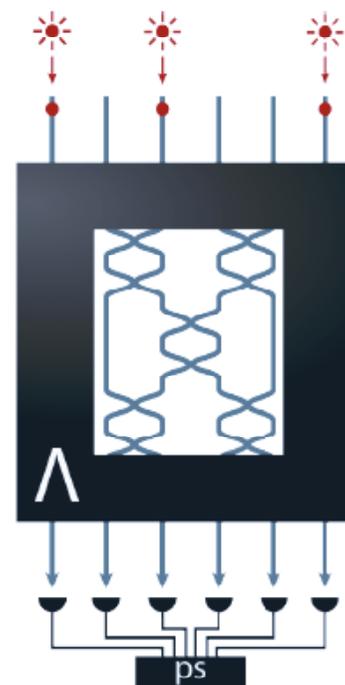


ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ФОТОННЫХ ЧИПАХ



Основные блоки:

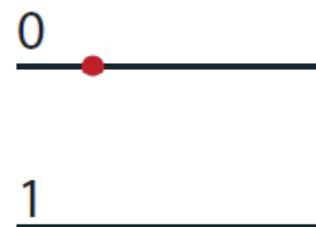
-  Однофотонный (N-фотонный) источник;
-  Линейные преобразования (интерферометры);
-  Однофотонные (N-фотонные) приемники.



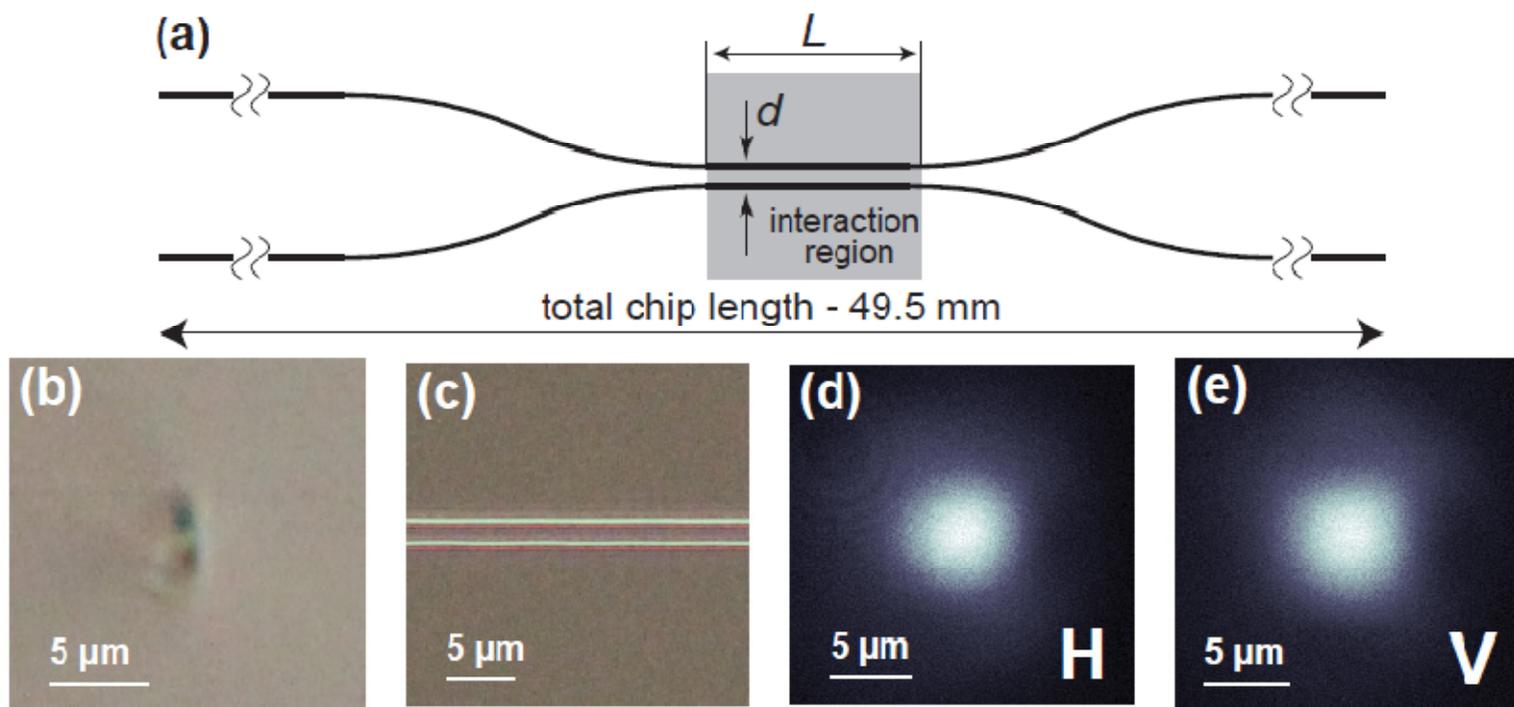
Dual-rail qubit encoding

$$|10\rangle = |0\rangle$$

$$|01\rangle = |1\rangle$$



ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ФОТОННЫХ ЧИПАХ: СВЕТОДЕЛИТЕЛЬ

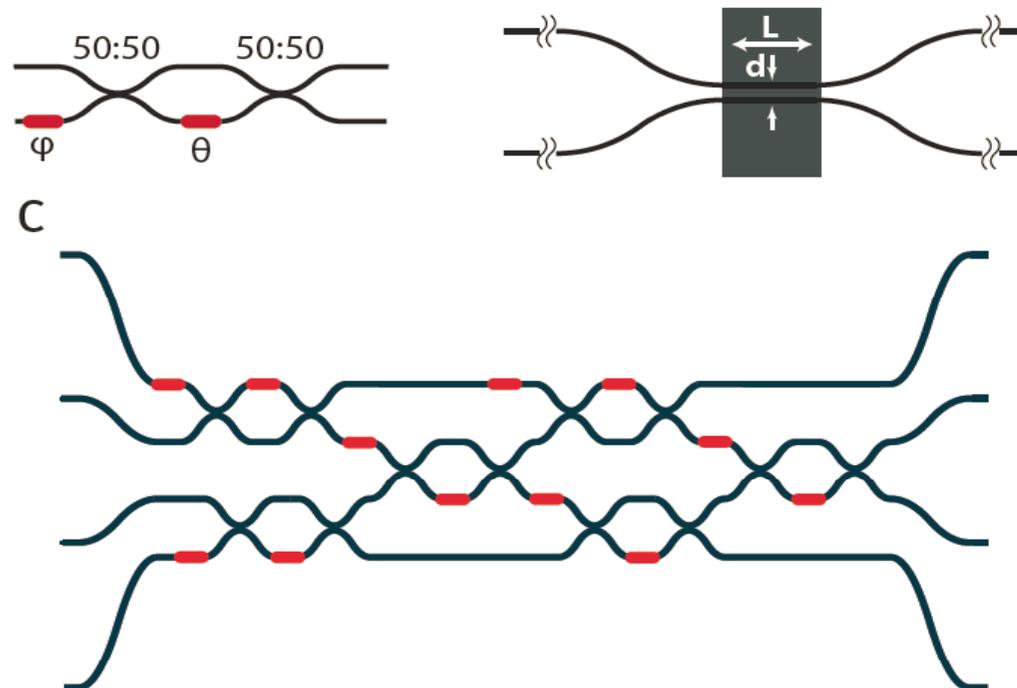


I.V.Dyakonov et al. Opt. Lett. **42**, 4231 (2017)

ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ФОТОННЫХ ЧИПАХ: ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

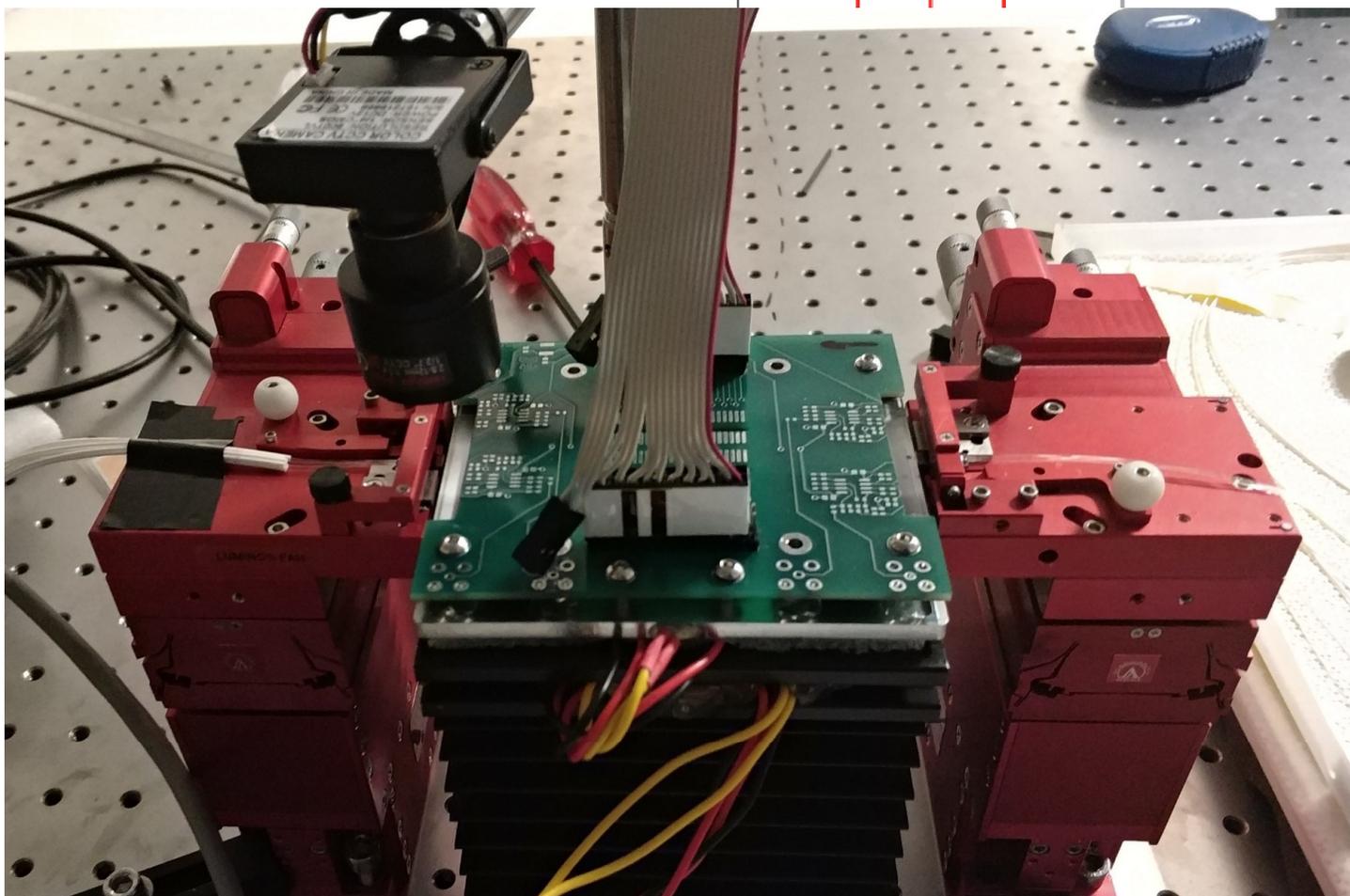


Произвольное преобразование 4X4

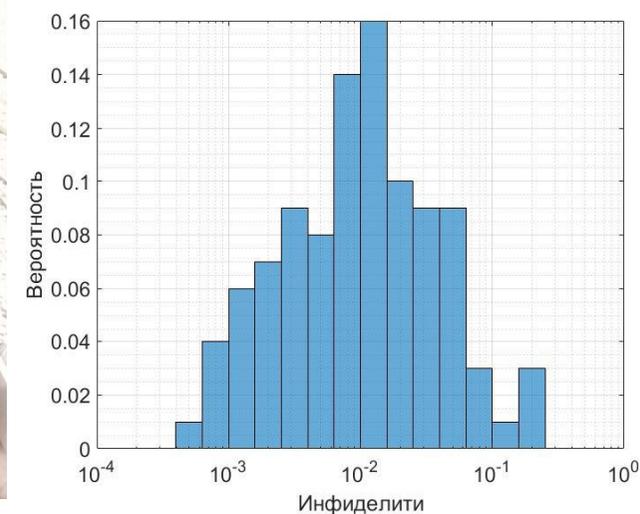


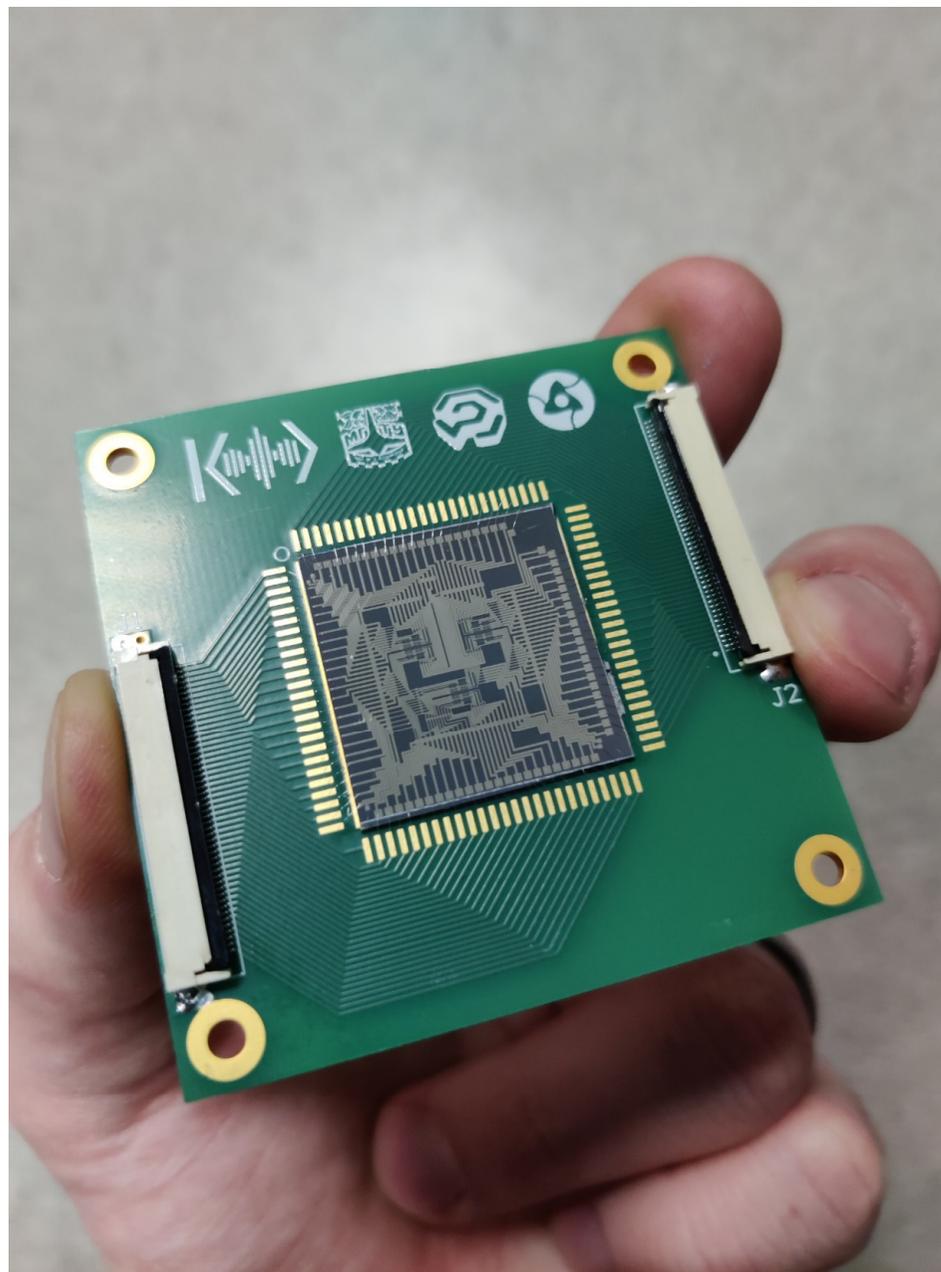
Восьмиканальный программируемый интерферометр (56 термоэлементов)

Сборка реконфигурируемого чипа



Точность реализации
унитарных преобразований 98%





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

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ : ВЫВОДЫ



- Число кубитов и качество логических операций в квантовых вычислителях стабильно растёт
- Квантовое вычислительное превосходство уже продемонстрировано
- Есть основания полагать, что даже небольшие NISQ устройства могут дать преимущество в практически важных задачах
- Квантовые алгоритмы в целом и в приложении оптимизационным задачам в частности – активно развивающаяся область



Волоконно-оптические
системы

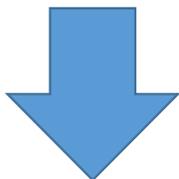
**ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ НА
ПРИНЦИПИАЛЬНО ИНОМ
УРОВНЕ**

Квантовые интерфейсы
Квантовая память

Квантовая коммуникация – область науки и техники по передаче информации между удаленными пользователями посредством квантовых состояний

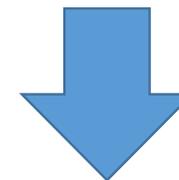


Технологии связи без использования
распределения перепутывания
(*entanglement distribution*)

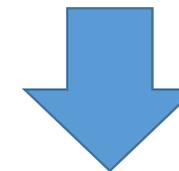


Квантовое распределение ключей
(quantum key distribution)*

Технологии связи с использованием
распределения перепутывания
(*entanglement distribution*)



Квантовые сети
(quantum networks)



Квантовый интернет
(quantum internet)

***“U.S. Department of Defense’s (DoD’s) Defense Science Board has publicly concluded that “QKD has not been implemented with sufficient capability or security to be deployed for DoD mission use”**

(Defense Science Board, “Applications of Quantum Technologies

КВАНТОВАЯ СВЯЗЬ: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МИРОВЫХ РАЗРАБОТОК



1. Волоконно-оптические линии связи:

- шифрование квантовыми ключами данных, передаваемых по магистральным линиям связи;
- создание локальных защищенных сетей с электронным документооборотом;
- создание крупномасштабных сетевых структур через доверенные узлы.

2. Атмосферно-космические каналы связи:

- распределение квантовых ключей между мобильными и стационарными объектами;
- распределение ключей между низкоорбитальными спутниками и наземными объектами;
- распределение ключей между низко- и высокоорбитальными спутниками;
- создание глобальных квантовых сетей, охватывающих значительные территории.

КВАНТОВАЯ СВЯЗЬ: ТРИ КРУПНЫХ ПРОЕКТА В МГУ



1. Квантовый шифратор 10G



МОСКВА, 11 апр 2017 — TADVISER.

«На базе технологии, созданной в рамках проекта Фонда перспективных исследований Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова и ОАО ИнфоТеКС разработают высокопроизводительный шифратор с квантовым каналом распределения криптографических ключей».

2. «Квантовый телефон»



МОСКВА, 13 дек 2017 — РИА Новости.

«Ученые из Московского государственного университета создали и проверили на практике линию телефонной связи, защищенную от прослушивания системой квантового шифрования, сообщает пресс-служба вуза».

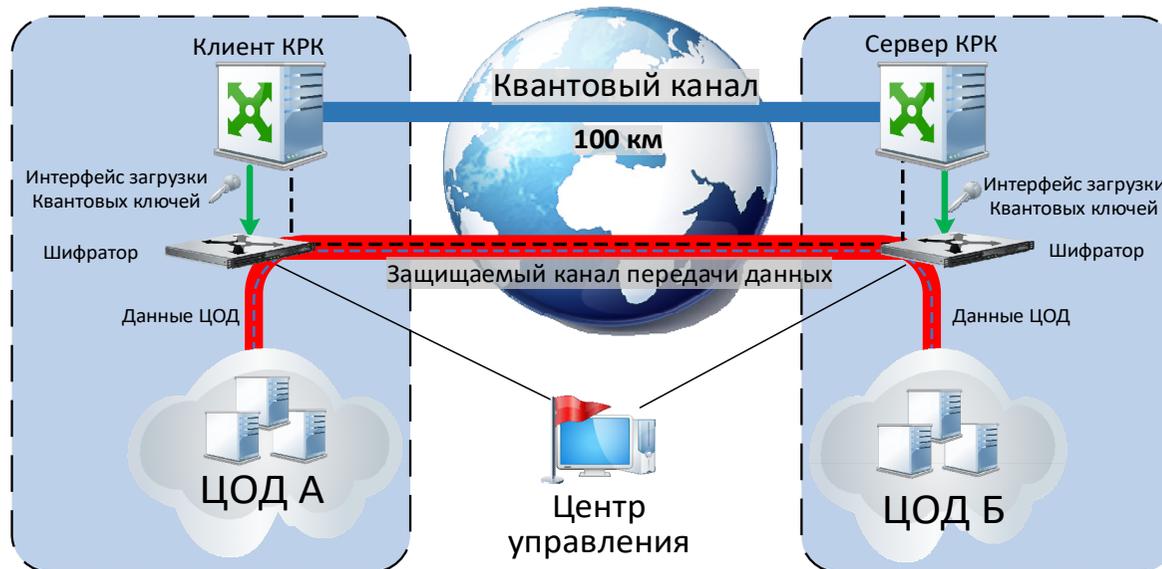
3. Квантовая космическая связь

Проект ФПИ «Звезда» - совместно с РКК Энергия, РЯЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров)

VIPNET QUANDOR



Комплекс квантово-криптографической аппаратуры защиты информации, состоящий из 10G шифратора канального уровня (L2) и оборудования квантового распределения ключей (КРК)



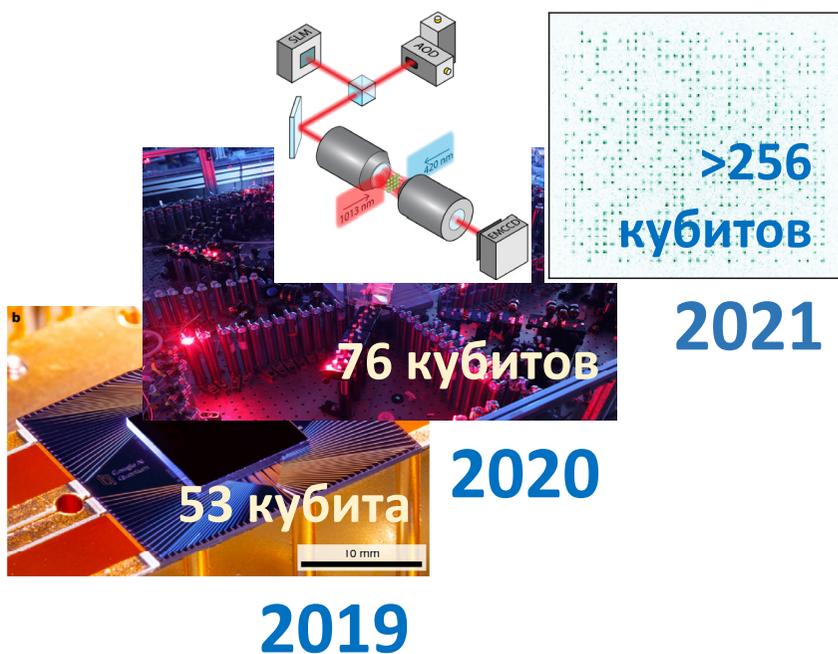
- ✓ скорость шифрования по ГОСТ 34.12-2015 «Кузнечик»:
 - 20 Гбит/с дуплекс
- ✓ имитозащита
- ✓ задержка ~15 мкс

- ✓ длина линии квантовой связи 100 км
- ✓ воздушное охлаждение
- ✓ автоматический режим работы

КВАНТОВЫЙ ТЕЛЕФОН



Прогресс технологий квантовых вычислений



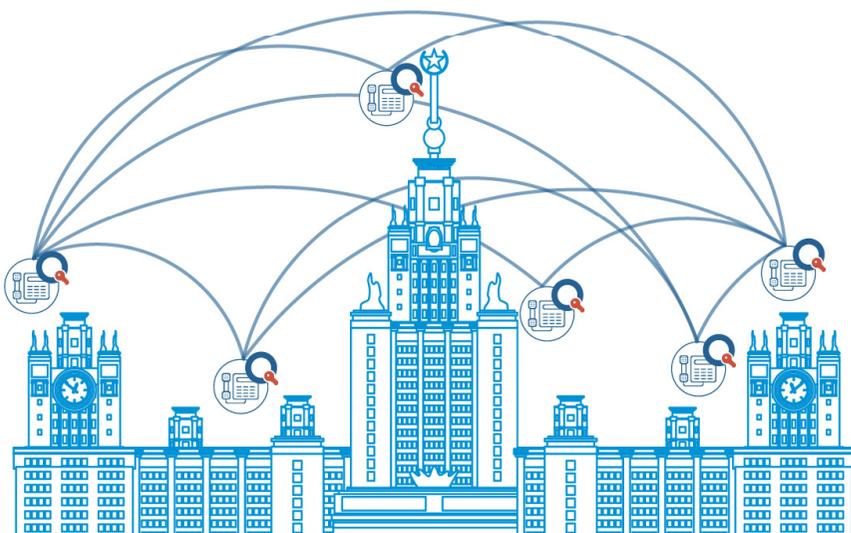
- Угроза создания эффективного квантового компьютера становится всё более реальной
- Стандарты постквантовой криптографии запаздывают, её свойства мало изучены, эксплуатационные характеристики низкие
- Необходимость продления срока использования уязвимых для квантового компьютера криптографических систем (TLS, PKI) – очевидная реальность
- Квантовое распределение ключей и сети на его основе – гарантия защиты от атак на уязвимые криптографические системы в критической информационной инфраструктуре (КИИ)
- Отсутствие рисков, связанных с человеческим фактором – одно из наиболее привлекательных свойств квантовых коммуникаций с экономической точки зрения уже сегодня

Ключевые проекты: Университетская квантовая сеть



infotecs

ViPNet QSS



ViPNet QSS — совместная разработка ИнфоТеКС и Центра квантовых технологий физфака МГУ имени М.В.Ломоносова.

Университетская квантовая сеть:

- Пять квантовых устройств
- Открытый проект – есть желающие подключиться
- Двадцать абонентских терминалов
- Длина каналов квантово-защищенной связи в рамках проекта достигла 50 км
- **Серийное оборудование производства ИнфоТеКС. Имеется сертификат ФСБ.**
- Перспектива интеграции с магистральными сетями

Перспективы развития УКС в рамках дорожной карты РЖД



Дорожная карта ОАО РЖД по развитию квантовых коммуникаций

- Строительство магистральных сетей с КРК – до 7000 км
- Реализованный участок  Санкт-Петербург – Москва
- Восточный вектор 
- Южный вектор 
- Внутригородские сети КРК в ДК не включены

РАЗВИТИЕ СЕТИ КРК НА ОСНОВЕ ФЕДЕРАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НИКС



Образование – научное и инженерное

- Вузовское образование от бакалавра до аспиранта
- Дополнительное образование и переподготовка кадров предприятий

Наука – платформа для развития квантовых технологий

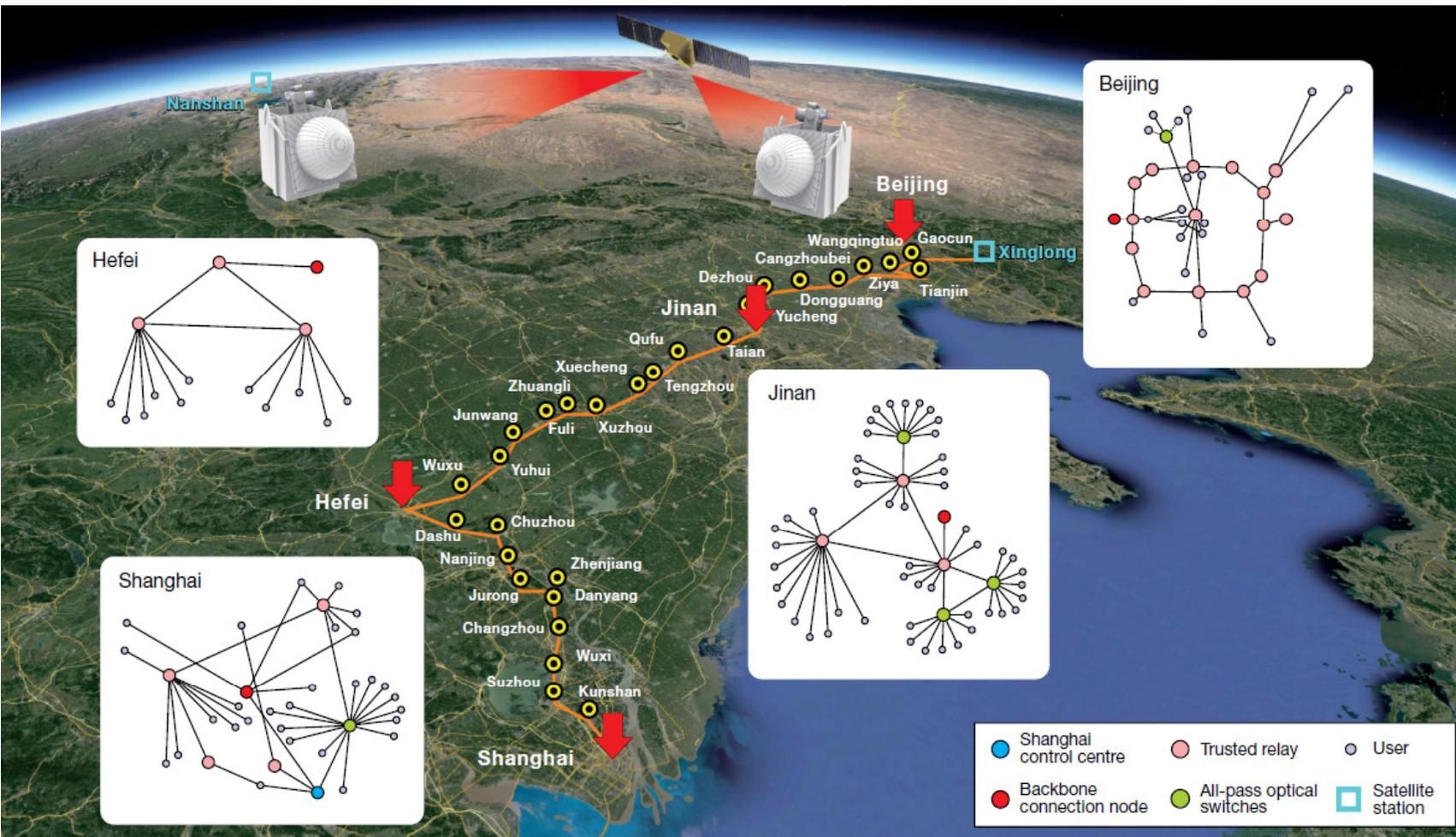
- Развитие и исследование элементов сети – доверенные узлы, квантовая память, атмосферные и спутниковые участки
- Доступ ко всем квантовым активам в стране – квантовые симуляторы, вычислители, квантовые стенды
- Обкатка технических решений для российских стандартов в области квантовых технологий

Индустриальные пилоты – реальные сценарии использования

- ГОСТ VPN с КРК в контуре НИКС
- ЦОД – (резервный) ЦОД
- ЦОД – суперкомпьютер для передачи и распределения вычислений
- Реализация системы хранения цифровых активов
- Конфиденциальная голосовая связь и мессенджер



Защита распределенных сетей – мировые сценарии



Квантовая сеть Китая

- 22 узла магистральной линии
- 400 сегментов
- 2 спутника
- 4800 км общая протяженность
- 157 потребителей

Защита распределенных сетей – русские продуктовые решения: совместные разработки ЦКТ и ИнфоТеКС



Магистральный узел квантовой сети (ViPNet МУКС)

- Алиса и Боб в одном корпусе
- Подключение шифраторов



Клиентский узел квантовой сети (ViPNet КУКС)

- Подключение к ViPNet РУКС
- Подключение шифраторов



Распределительный узел квантовой сети (ViPNet РУКС) – центр «звезды»

- Управление оптическим коммутатором
- Подключение к ViPNet МУКС
- Подключение ViPNet КУКС

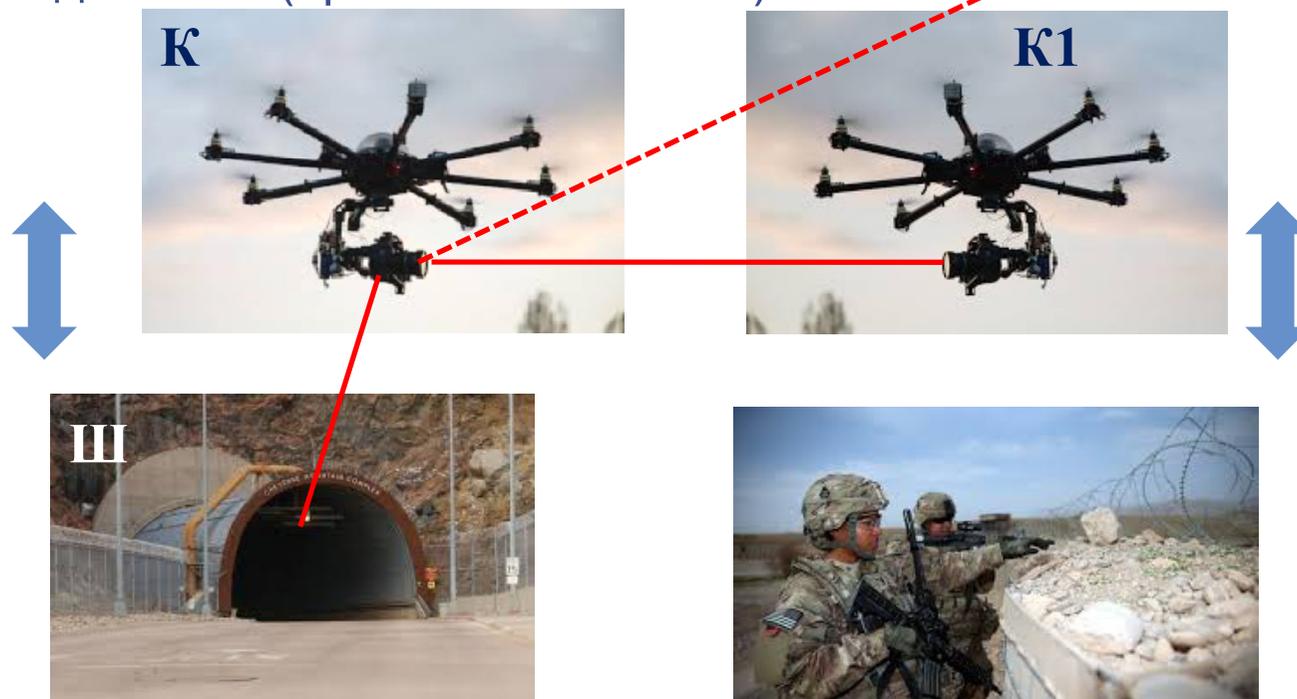


КВАНТОВАЯ АТМОСФЕРНАЯ СВЯЗЬ: ПРОЕКТЫ



Распределение ключей между стационарным объектом (Ш) и мобильными летательными аппаратами (К1, К2, К3...) через мобильный летательный аппарат (К).

ПРОТОКОЛ: на перепутанных парах фотонов
Расстояние до 100 м (проект 2019-2020гг)



КВАНТОВАЯ СВЯЗЬ: ТРЕБОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРА



**Системы, разработанные и созданные в МГУ
содержат все требуемые составляющие:**

- 1) Поддержка автоматического режима работы без участия оператора.**
- 2) Физический генератор (квантовый) истинно случайных последовательностей.**
- 2) Протоколы с доказуемой криптографической стойкостью.**
- 3) Исправление ошибок в первичных ключах.**
- 4) Сжатие очищенных ключей – усиление секретности универсальными хеш-функциями.**
- 5) Конечный продукт работы – общий секретный ключ.**

КВАНТОВЫЕ СЕНСОРЫ: ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ



Что это?	Квантовые сенсоры - это высокоточные инструменты, основанные на квантовых системах.
Зачем?	Предполагается, что квантовые сенсоры будут иметь характеристики намного превышающие имеющиеся у классических аналогов
Основные характеристики	Чувствительность (минимальное значение регистрируемого сигнала), пространственное и временное разрешение, рабочий диапазон измеряемых значений, время отклика или анализа, относительная воспроизводимость (например, частоты в стандартах времени), энергопотребление, габариты, сложность обслуживания, срок службы, стоимость производства и эксплуатации
Решение проблемы	Использование квантовых технологий
Инструментарий	Квантовые состояния света и вещества: взаимодействие между ними. Суперпозиции, запутывание и квантовые измерения.
Где и кому это нужно	ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА, МЕДИЦИНА, НАВИГАЦИЯ И ТРАНСПОРТ и др.

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ

основа для использования их при построении чувствительных сенсоров.

Квантовый объект – кубит – **зонд** для измерения физических свойств взаимодействующих систем.

СУПЕРПОЗИЦИИ

(квантовая когерентность):

волновые функции квантовых объектов представляют собой линейную комбинацию базисных состояний

$$|\Psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle$$

ЗАПУТЫВАНИЕ:

квантовое состояние составной системы определено лучше, чем состояния подсистем

$$|\Psi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |0_1\rangle|1_2\rangle + |1_1\rangle|0_2\rangle \}$$

ИЗМЕРЕНИЕ:

измерение приводит к вероятностным исходам классических состояний

$$P_m = \langle \Psi | M_m^\dagger M_m | \Psi \rangle.$$

$$E_m = M_m^\dagger M_m, \quad \sum_m E_m = I$$

ПРИМЕНЕНИЕ: ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА, МЕДИЦИНА, НАВИГАЦИЯ И ТРАНСПОРТ и др.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВАНТОВЫХ СЕНСОРОВ



I. Использование квантового объекта (зонда) для измерения физической величины (классической или квантовой). Квантовый объект характеризуется квантованной структурой энергетических уровней – электронные, магнитные, колебательные состояния сверхпроводящих или спиновых кубитов, нейтральных атомов или ионов.



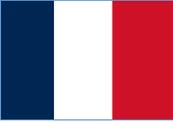
II. Использование квантовой когерентности (например, в виде пространственной или временной суперпозиции) для измерения физической величины.

III. Использование свойства запутанности для улучшения чувствительности измерений, т.е. с более высокой точностью/чувствительностью, чем это имеет место при классических измерениях.

КРИТЕРИИ ПРИМЕНИМОСТИ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ КАК СЕНСОРА

1. Квантовая система имеет дискретные уровни энергии. В частности - двухуровневая система (или ансамбль двухуровневых систем) с нижним и верхним уровнями $|0\rangle$ и $|1\rangle$, разделенных энергией перехода $E = \hbar\omega$
2. Должна иметься возможность приготовления (инициализации) квантовой системы в известных состояниях и выполнения операции считывания (измерения) этих состояний.
3. Квантовой системой можно когерентно манипулировать - обычно с помощью полей, зависящих от времени. Это условие не является строго обязательным для всех протоколов; примеры, выходящие за рамки этого критерия - измерение времен релаксации.
4. Квантовая система взаимодействует с соответствующей физическим объектом $V(t)$, например электрическим или магнитным полем. Взаимодействие количественно оценивается параметром вида $\gamma = \partial^q E / \partial V^q$, который связывает изменения энергии перехода E_k с изменением внешнего параметра $V(t)$. В большинстве ситуаций связь либо линейная ($q = 1$), либо квадратичная ($q = 2$). Взаимодействие с $V(t)$ приводит к сдвигу энергетических уровней квантовой системы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ В МИРЕ

Страна	Объем затрат на исследования и разработки
Европейский союз 	~37 млн евро/44 млн долл. (2018-2021): Integrated Quantum Clock, MetaboliQs, macQsimal, ASTERIQS
Канада 	50 млн долл. (2014-2020): Quantum Photonics Sensing and Security (QPSS) R&D program
Германия 	530 млн долл./450 млн евро (2021-2030)
Франция 	250 млн евро/294,4 млн долл. (2021-2025)
Великобритания 	94 млн фунтов стерлингов/110,9 млн долл. (2019-2024)
США 	11 млн долл. (2021-2023)
Китай 	0,15 млн долл. (2015)
Япония 	200 млн долл. (2018-2030)

ПУБЛИКАЦИИ: РЕЙТИНГ СТРАН 2018-2020

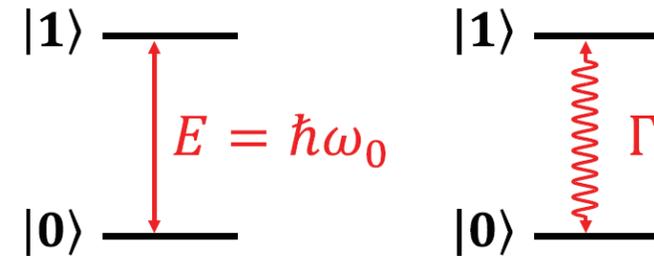


Рейтинг стран по числу публикаций в научных журналах, индексируемых в Scopus в 2018-2020 гг. по ВТН «Квантовые сенсоры», ед.
Источник: НИУ ВШЭ, 2021.

Физическая система/тип	Кубит	Измеряемая величина	Хар. частота	Инициализация	Чтение
Нейтральные атомы					
Атомный пар II-III	Атомный спин	Магнитное поле, Вращение, Частота/Время	DC-10ГГц	Оптическая	Оптическое
Холодные атомы II-III	Атомный спин	Магнитное поле, Ускорение, Частота/Время	DC-10ГГц	Оптическая	Оптическое
Ионы в ловушках					
II-III	Долгоживущее электронное состояние, Колебательная мода	Электрическое поле, Сила, Вращение, Частота/Время	МГц	Оптическая	Оптическое
			ТГц	Оптическая	Оптическая
Ридберговские атомы					
II-III	Ридберговские состояния	Электрическое поле	DC, ГГц	Оптическая	Оптическое
Твердотельные спины (ансамбли)					
ЯМР-сенсоры II	Ядерный спин	Магнитное поле	DC	Температурная	Pick-up coil
NV-сенсоры (ансамбли) II	Электронный спин	Магнитное поле, Электрическое поле, Температура, Давление, Вращение	DC-ГГц	Оптическая	Оптическое
Твердотельные спины (одиночные спины)					
P донор в Si II	Электронный спин	Магнитное поле	DC-ГГц	Термическая	Электрическая
Полупроводниковые квантовые точки I-II	Электронный спин	Магнитное поле	DC-ГГц	Электрическая, Оптико-электрическая, Оптическая	
Одиночный NV-центр II	Электронный спин	Магнитное поле, Электрическое поле, Температура, Давление, Вращение	DC-ГГц	Оптическая	Оптическое
Сверхпроводящие цепи					
SQUID I-II	Ток сверхпроводимости	Магнитное поле	DC-10ГГц	Термическая	Электрическая
Потоковый кубит II	Циркуляционный ток	Магнитное поле	DC-10ГГц	Термическая	Электрическая
Зарядовый кубит II	Зарядовые соб. состояния	Магнитное поле	DC-10ГГц	Термическая	Электрическое
Элементарные частицы					
Мюон II	Мюонный спин	Магнитное поле	DC	Радиоактивный распад	Радиоактивный распад
Нейтрон II	Ядерный спин	Магнитное поле, Гравитация	DC	Брэгговское рассеяние	Брэгговское рассеяние
Другие сенсоры					
Одноэлектронный транзистор I	Зарядовые соб. состояния	Электрическое поле	DC-100 МГц	Термическая	Электрическое
Оптомеханика I	Фононы	Сила, ускорение, Масса, Магнитное поле	кГц-МГц	Термическая	Оптическое
Интерферометр II-III	Фотоны, Атомы, Молекулы	Смещение, Показатель преломления			

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

«Внутренняя чувствительность» $\propto \frac{1}{\gamma\sqrt{T_\chi}}$
 - минимальный регистрируемый
 сигнал в единицу времени



γ - параметр взаимодействия;

Сенсор основан на изменении или энергии E , либо скорости Γ перехода

T_χ - время релаксации системы

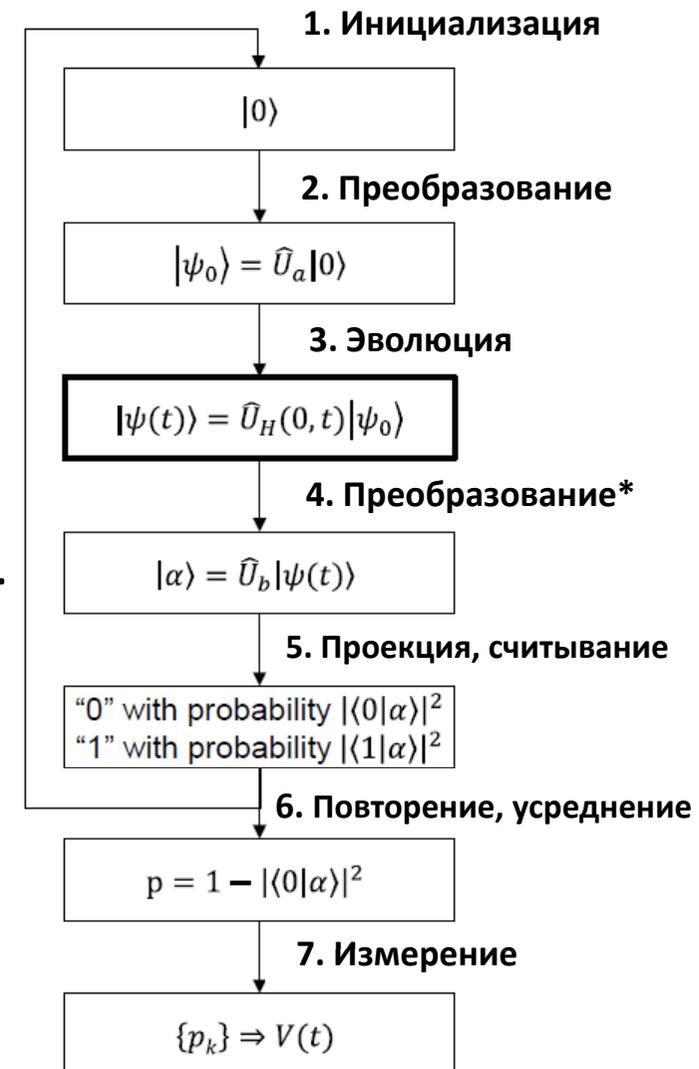
Для оптимизации чувствительности необходимо, чтобы параметр γ был достаточно большим (например путем выбора соответствующей физической системы в качестве сенсора), а время релаксации T_χ - достаточно долгим.

ПРОТОКОЛ РАБОТЫ КВАНТОВОГО СЕНСОРА

1. Инициализация в известном базисном состоянии $|0\rangle$
2. Преобразование к желаемому начальному состоянию $|\psi_0\rangle$
3. Эволюция под действием гамильтониана за время t .

$$|\psi(t)\rangle = \hat{U}_H(0, t)|\psi_0\rangle = c_0|\psi_0\rangle + c_1|\psi_1\rangle$$
4. Преобразование в суперпозицию наблюдаемых состояний.

$$|\alpha\rangle = \hat{U}_b|\psi(t)\rangle = c'_0|0'\rangle + c'_1|1'\rangle$$
5. Чтение (измерение) конечного состояния (POVM) по схеме Бернулли p' и $1-p'$.
6. Повторение циклов в 1-5 N раз для оценки вероятности p .
7. Измерение вероятности перехода p как функции времени для оценки величины сигнала V .



ПЕРЕЧЕНЬ/ГРУППЫ СЕНСОРОВ



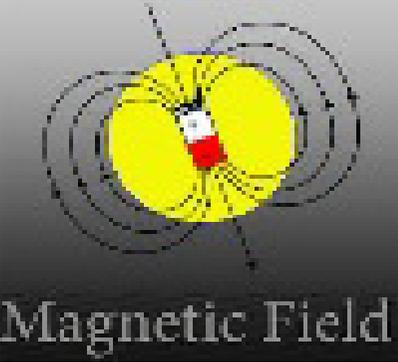
Группа сенсоров	сенсоры	Оценка ГОТОВНОСТИ
Часы, гравиметры, градиометры	Атомный гравиметр 	2023
	Атомный градиометр	2024
	Компактный гироскоп	2024
	Компактная универсальная ультрастабильная лазерная система для опроса оптических стандартов частоты	2022
	Мобильный волоконный фемтосекундный синтезатор оптических частот	2022
	Малогабаритный квантовый стандарт частоты	2022
	Компактные атомные часы 	2021



 - НИР на 2020 год

ПЕРЕЧЕНЬ/ГРУППЫ СЕНСОРОВ

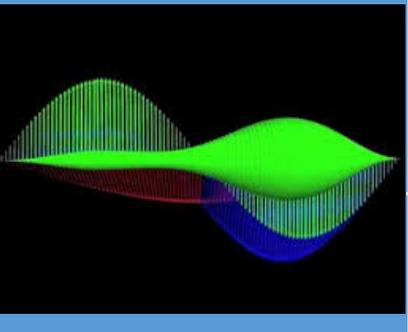


Группа сенсоров	Сенсоры	Оценка готовности
Сенсоры электрического и магнитного поля 	Квантовые биосенсоры, работающие на квантовом уровне чувствительности	2022
	Квантовый магнитометр	2022
	Локальный сенсор электрического поля	2020
	Локальный сенсор химических реакций 	2022
	Локальный зонд магнитного поля для биоманнитных измерений	2021

 - НИР на 2020 год

ПЕРЕЧЕНЬ/ГРУППЫ СЕНСОРОВ



Группа сенсоров	Сенсоры	Оценка готовности
Квантовая метрология	Генератор случайных чисел	2021
	Полупроводниковый счетчик фотонов в ближнем ИК-диапазоне	2023
	Однофотонный детектор видимого и ближнего ИК-диапазонов	2023
	Матричный фотоэлектронный умножитель	2022
	Безэталонный измеритель квантовой эффективности фотодетекторов	2022
	Маркерный сенсор на квантовых точках для диагностики биологических, вирусных и бактериальных элементов	2021
	Маркерный сенсор на квантовых точках для обнаружения химических и особо опасных веществ	2022

 - НИР на 2020 год



ВЫВОДЫ

- 1. В области квантовых вычислений**, речь идет о создании в ближайшие 5 лет среднemasштабных вычислителей, способных продемонстрировать «квантовое преимущество» перед классическими суперкомпьютерами в ряде задач.
- 2. В области квантовых коммуникаций**, речь идет о создании разветвленных сетевых структур управления потоками информации, космической квантовой связи и предоставлении операторами целого спектра услуг по защите информации.
- 3. В области квантовой сенсорики**, речь идет о разработке и внедрении чувствительных малогабаритных устройств для использования в навигации, геологоразведке, медицине и др.
- 4. В организационном плане** имеются существенные заделы в нескольких коллективах: - именно здесь должны концентрироваться передовые научные разработки в области квантовых технологий

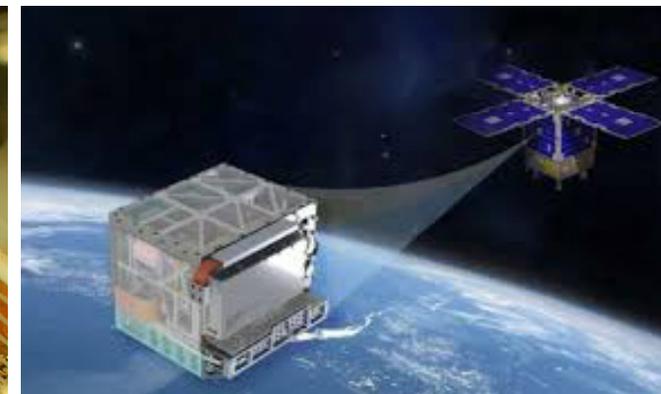
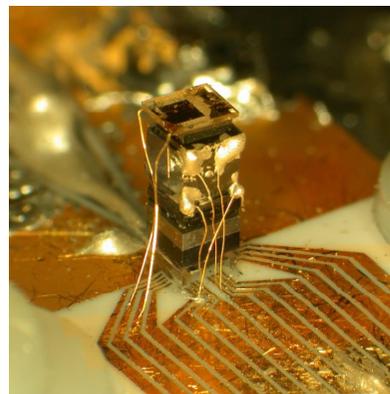


КОМПАКТНЫЕ АТОМНЫЕ ЧАСЫ

Характеристики	Единицы	2020	2021	2022	2023	2024	2030
Кратковременная нестабильность частоты, за 1 сек	Ед.	Разработка	Разработка	3×10^{-11}	1.2×10^{-11}	8×10^{-12}	1×10^{-12}
Долговременная нестабильность частоты, за 1 сутки	Ед.			5×10^{-12}	1×10^{-12}	5×10^{-13}	1×10^{-13}
Объем	см ³			60	50	40	15

Применение: **НАВИГАЦИЯ**

- навигационные приемники;
- базовые станции систем дифференциальной коррекции и др.



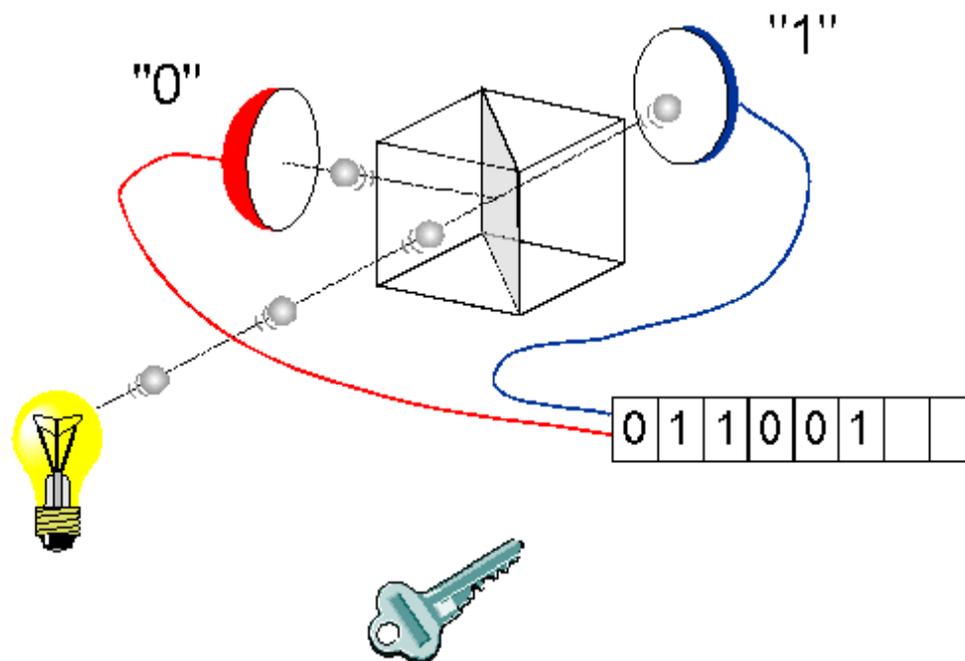
Характеристики	Единицы	2020	2021	2022	2023	2024	2030
Скорость генерации случайных чисел	Мб/с	200	300	1000	1000	1000	10 000
Габаритные размеры	см ³	25	20	20	20	20	20

Применение: **КРИПТОГРАФИЯ**

для использования в классических и квантовых системах шифрования



Квантовый генератор случайных чисел



Принцип действия генератора:

- детектирование ослабленного света однофотонным приемником;
- устранение корреляций, вызванных инертностью детектора;
- обработка полученной пуассоновской статистики;
- экстракция несмещенной последовательности независимых битов.

Основные требования к квантовому генератору случайных чисел:

- использование случайных процессов квантовой природы;
- детерминистический алгоритм экстракции, гарантирующий независимость/несмещенность выходных значений;
- использование матрицы однофотонных детекторов повышения скорости генерации и надежности;
- простота реализации;
- компактное исполнение с использованием доступных компонентов (SiPM – заложен в Дорожной карте).

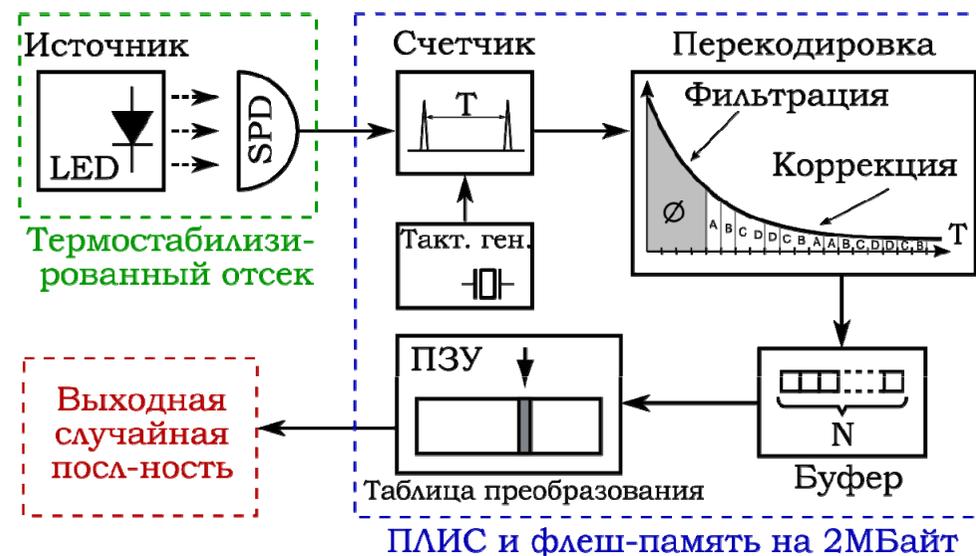
Источниками случайности являются:

- пуассоновская статистика когерентного излучения;
- процесс детектирования отдельных фотонов в непрерывном потоке света.

Измеряется длительность временных интервалов между зарегистрированными фотонами – это случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону.

Полученная последовательность преобразуется в строку случайных битов.

Блок-схема генератора (до 200 Мб/с):



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАВИННЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР (СЧЕТЧИК ФОТОНОВ) В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ



Характеристики	Единицы	2020	2021	2022	2023	2024	2030
Спектральный диапазон	нм	1300-1550	1300-1550	1300-1550	1300-1550	1300-1550	1300-1550
Вероятность регистрации одиночного фотона в гейгеровском режиме	%	10	15	20	30	35	50
Частота темновых импульсов в гейгеровском режиме при температуре -60°C	кГц	50	20	10	10	10	5
Временное разрешение	пс	200	100	50	20	10	5
Обратное напряжение пробоя	В	70	60	60	60	60	50
Рабочая температура	К	200-250	200-250	200-250	200-250	200-250	200-250

Применение: **КРИПТОГРАФИЯ**

- для использования в системах
 квантовой коммуникации на основе
 ВОЛС



АТОМНЫЙ ГРАВИМЕТР

Характеристики	Единицы	2020	2021	2022	2023	2024	2030
Точность	мкГал	Разработка	Разработка	Разработка	10	5	0.5
Чувствительность	мкГал/Гц ^{1/2}	Разработка	Разработка	Разработка	50	30	3

Характеристики	Единицы	Значение
Точность	мкГал	несколько
Чувствительность	мкГал/Гц ^{1/2}	50
		5
		2
		1
Оперативность измерения	мин	-
		1.5
		10
		40
Стабильность	мкГал	Не более 1





МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ПРИКАЗ

«12» февраля 2018 г. Москва № 125

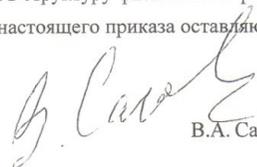
О создании Центра квантовых технологий

В целях выполнения проекта по сквозной технологии «Квантовые технологии» с Фондом поддержки проектов Национальной технологической инициативы по результатам конкурсного отбора на государственную поддержку центров Национальной технологической инициативы

приказываю:

1. Создать структурное подразделение МГУ на физическом факультете – Центр квантовых технологий (далее – Центр) согласно п.15 Правил предоставления субсидии из федерального бюджета на оказание государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы (постановление Правительства Российской Федерации от 16 октября 2017 г. № 1251).
2. Назначить руководителем Центра декана физического факультета профессора Н.Н. Сысоева.
3. Создать Наблюдательный совет Центра под моим руководством. Н.Н. Сысоеву внести предложения по составу Наблюдательного совета Центра.
4. Н.Н. Сысоеву организовать работу Центра в соответствии с условиями предоставления финансирования, разработать необходимую для функционирования Центра организационно-распорядительную документацию, в том числе: представить проект положения о Центре, внести предложения по научному руководителю Центра, подготовить предложения о внесении соответствующих изменений в структуру физического факультета.
5. Контроль за исполнением настоящего приказа оставляю за собой.

Ректор
Московского университета
академик


В.А. Садовничий



итета создан
ий»
нной поддержки
ологий РФ



приказо
-для осуще
ком

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Реализация ключевых комплексных **научно-исследовательских** и **опытно-конструкторских** проектов

Обеспечение правовой охраны, управления правами и защиты как полученных Центром РИД, так и РИД, переданных ему в управление.

Разработка и реализация основных **образовательных программ высшего образования**, направленных на формирование компетенций, необходимых для выполнения ключевых НИ и ОК проектов (1) и коммерциализации полученных РИД

Развитие информационной инфраструктуры, а также инфраструктуры научной, научно-технической и инновационной деятельности для обеспечения реализации дорожных карт НТИ

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ЦЕЛИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ

В научно-техническом направлении: преодоление технологических разрывов в области квантовых технологий – между научными разработками в области среднемасштабных квантовых компьютеров и созданием соответствующей элементной базы.

В коммерческом направлении: – вывод на глобальный рынок трех типов продуктов:

- 1) **10G-шифратор на основе квантового распределения ключей** – для использования в магистральных оптоволоконных линиях связи (между ЦОДами);
- 2) **среднемасштабные квантовые компьютеры на основе нейтральных атомов** в микродипольной ловушке и **фотонных чипов** с возможностью удаленного сетевого доступа для решения тестовых задач на основе квантовых алгоритмов;
- 3) **высокоскоростные малогабаритные квантовые генераторы случайных чисел** – для использования в широком спектре криптографической аппаратуры.

В образовательном направлении:

запуск трех образовательных программ, ориентированных на подготовку специалистов широкого профиля в области прикладных квантовых технологий;
запуск системы **дополнительного образования** для повышения квалификации работников технологических предприятий, заинтересованных во внедрении квантовых технологий;
запуск системы **онлайн образования** по квантовым технологиям для максимально широкого круга слушателей, включая **практикум**.

ЧЛЕНЫ КОНСОРЦИУМА:




- Санкт-Петербургский государственный университет;
- МГТУ имени Н.Э.Баумана;
- МИЭТ;
- ТУСУР;
- ЮУрГУ; МИФИ;
- СГУ; «Кванториум»; Учебный Центр ИнфоТеКС

9

ОБРАЗОВАНИЕ



- Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»;
- Институт физики полупроводников имени А.В.Ржанова СО РАН;
- Институт физики твердого тела РАН;
- Институт общей физики РАН;
- Физико-технологический институт РАН.

5

НАУКА



- АО «Концерн «Автоматика»;
- ООО НТП «Криптософт» (г. Пенза);
- АО Авеста; ЗАО ЮЛ-ком Медиа; ЕТМ-фотоника
- ОАО «Информационные технологии и коммуникационные системы».

6

ПРОИЗВОДСТВО
КОММЕРЦИАЛИЗАЦИЯ



- «Ассоциация защиты информации»
- НКО «Иннопрактика»; Издательский дом «Электроника»

ПРАВОВАЯ ЗАЩИТА, ТРАНСФЕР Т-ИИ

3



- ВНИИА имени Н.Л.Духова (ГК «Росатом»)

ПОТРЕБИТЕЛЬ

1



ОБРАЗОВАНИЕ

преимущества

вовлеченность в образовательный процесс
нескольких факультетов МГУ:

- физического 
- вычислительной математики и кибернетики,
 **ВМК МГУ** Факультет вычислительной математики и кибернетики
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
- механико-математического 

планируется открытие трех специализированных магистерских программ, он-лайн практикума и программ дополнительного образования:

«инженерный уклон»



базовая часть
вариативная часть



«алгоритмический уклон»

«КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ И КВАНТОВАЯ СВЯЗЬ»;

«КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ»;

«КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

**Программы дополнительного образования:
курсы повышения квалификации**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

УДОСТОВЕРЕНИЕ
о повышении квалификации

ПКМГУ № 015153

Удостоверение является документом установленного образца

Регистрационный номер 0318a9007
Дата выдачи 28 февраля 2018 г.
Город Москва

Настоящее удостоверение подтверждает, что _____
(фамилия, имя, отчество)
проходил(а) обучение в Московском государственном университете
имени М.В.Ломоносова на (в) Физическом факультете
(наименование структурного подразделения)
по программе «Квантовая обработка информации и
квантовые технологии»
(наименование программы повышения квалификации, тема семинара)
в объеме 68 часов
с «21» ноября 2017 г. по «13» февраля 2018 г.
Решение аттестационной комиссии от «12» февраля 2018 г.

Ректор Московского университета М.П.
Секретарь
аттестационной комиссии

Онлайн-курсы ЦКТ

реализуются Центром развития электронных образовательных ресурсов МГУ на платформе «Открытое образование» <https://openedu.ru>, начиная с весеннего семестра 2019 года.

По итогам обучения, в случае успешной аттестации, выдаётся сертификат об освоении курса, который может быть засчитан студентами в части освоения образовательной программы вуза.

Для сотрудников и преподавателей вуза, имеющих высшее образование, предусмотрен дополнительный модуль повышения квалификации по методике преподавания в данной предметной области.

Любые вопросы по онлайн-курсам вы можете задать по электронной почте

education@quantum.msu.ru

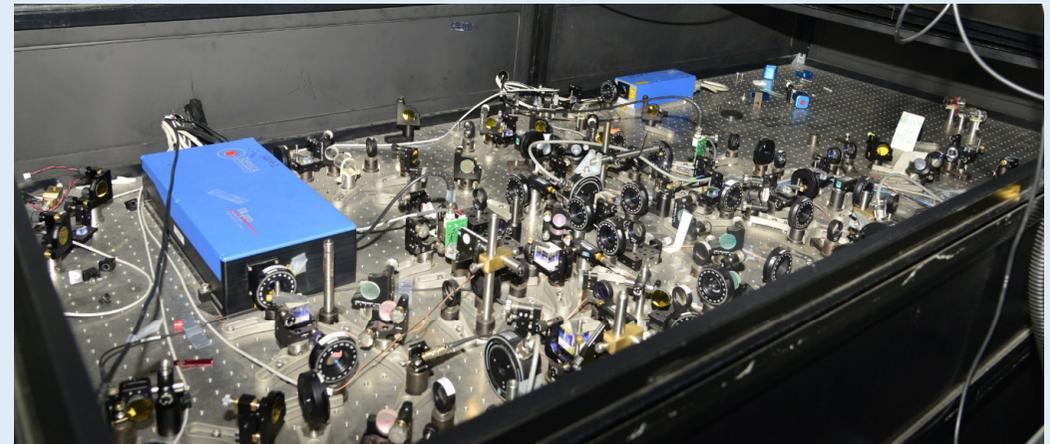
Поляризационная оптика

1. Поляризация света
2. Поляризационные элементы
3. Томография поляризационного кубита
4. Протоколы квантовой криптографии
5. Томография однокубитного квантового процесса

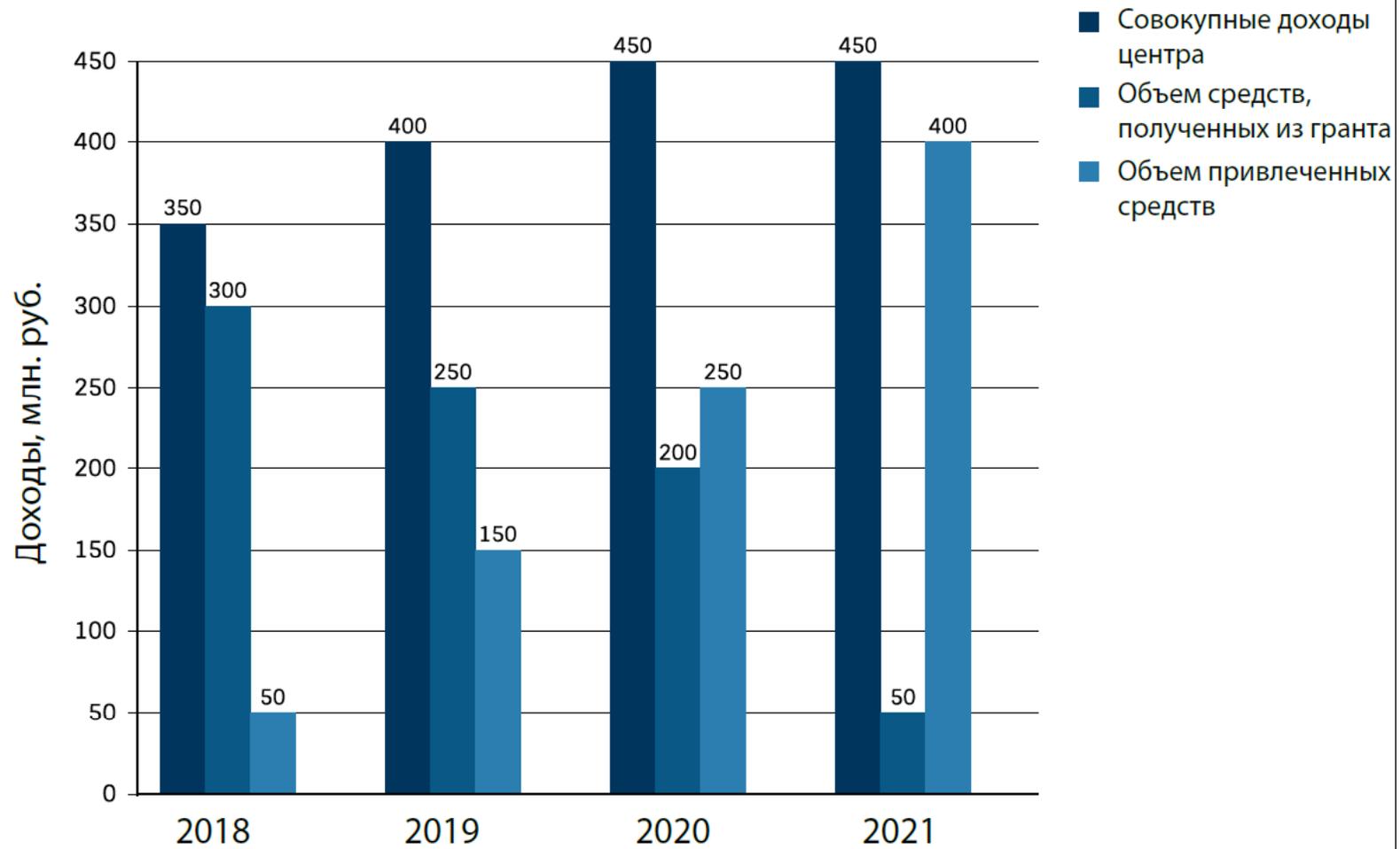


Квантовая оптика

1. Спонтанное параметрическое рассеяние
2. Неравенства Белла
3. Томография квантовых состояний
4. Квантовое распределение ключа
5. Квантовый генератор случайных чисел
6. Статистика фотонов
7. Провал Мандела
8. Гомодинное детектирование



СТРУКТУРА ДОХОДОВ ЦЕНТРА



ПОДДЕРЖКА И КООПЕРАЦИЯ



Исследования и разработки в области квантовых технологий проводятся в нескольких университетах, институтах РАН и коммерческих организациях.

Индустриальную и организационную поддержку обеспечивают государственные корпорации Росатом, Ростех и ОАО «РЖД».



P.N. Lebedev
Physical Institute

