

Квантовые технологии сегодня

ЧЕРМОШЕНЦЕВ Дмитрий Александрович,
старший научный сотрудник Лаборатории
квантовой оптики Российского квантового
центра, руководитель группы в «Росатом –
Квантовые технологии», кандидат ф.-м. н.

ВОРОБЬЕВ Александр Константинович,
научный сотрудник Лаборатории квантовой
оптики Российского квантового центра.



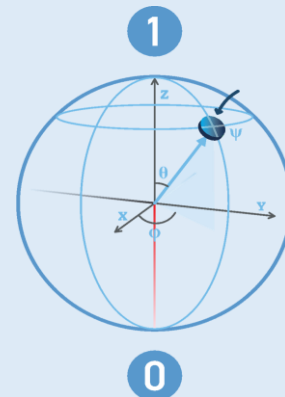
**Инженеры
будущего**



КВАНТОВЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
РОСАТОМ

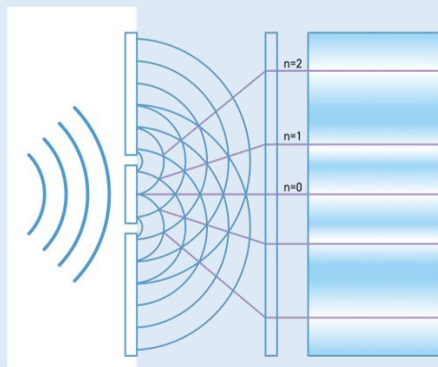


Зарождение квантовой механики: от парадоксов к великим открытиям



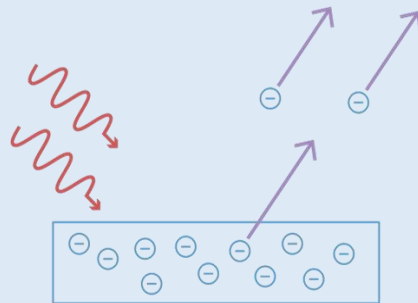
СВЕТ: ЧАСТИЦА ИЛИ ВОЛНА?

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН



Опыты Юнга
(1803 г.)

КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

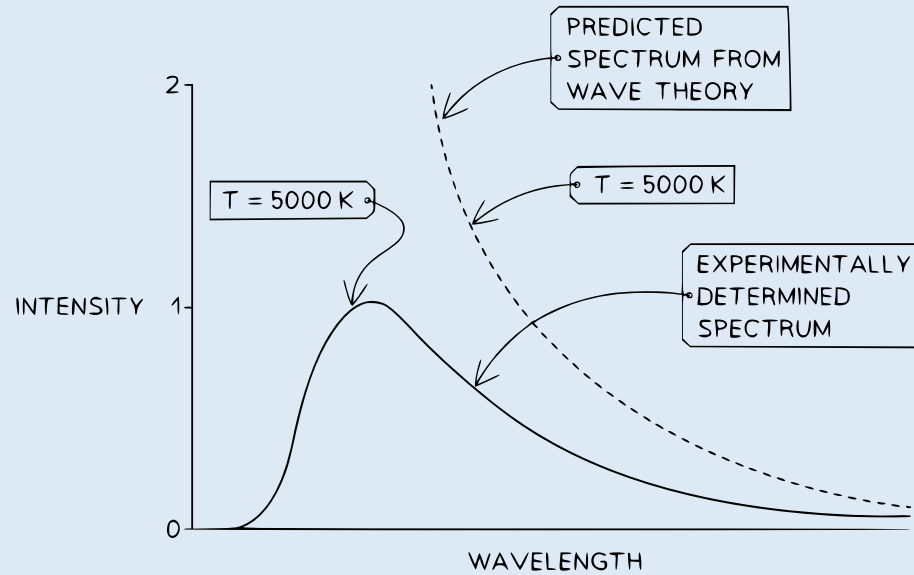


Фотоэффект
(1905 г.)

ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ



Макс Планк



ГИПОТЕЗА МАКСА ПЛАНКА (1900)

Свет излучается не непрерывно, а порциями
(квантами или фотонами)!

Энергия фотона пропорциональна частоте
оптической волны!

$$E = \hbar\omega$$

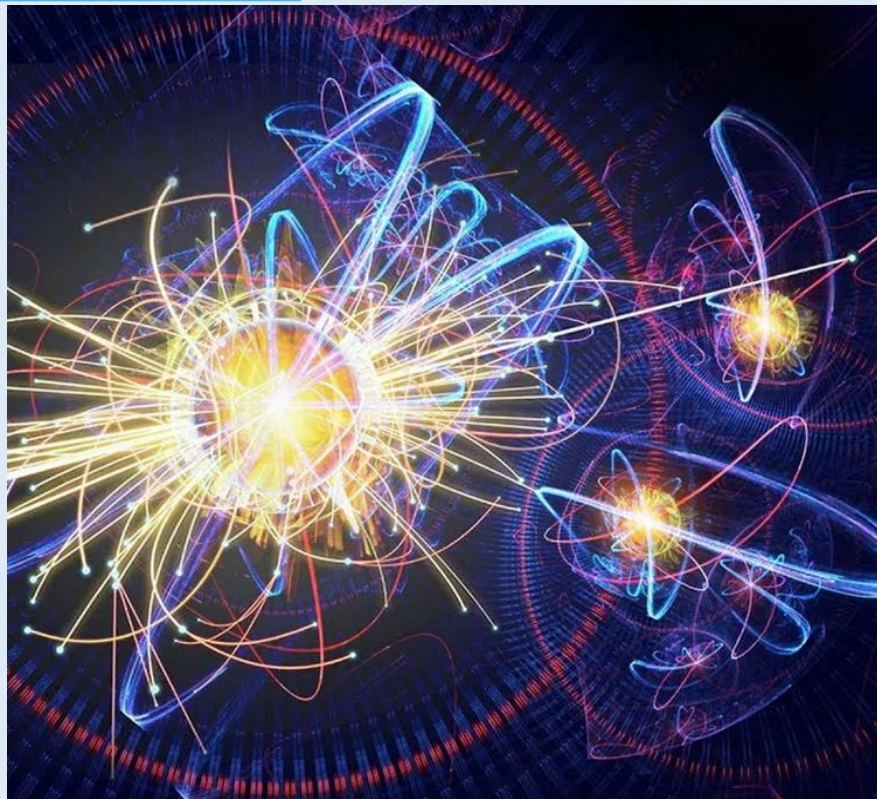
Постоянная Планка,
 $\sim 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Частота оптической
волны, $\sim 10^{16} \text{ s}^{-1}$



В нормальных условиях в наши глаза попадает 10^{12} фотонов в секунду

ЧТО ТАКОЕ “КВАНТ”



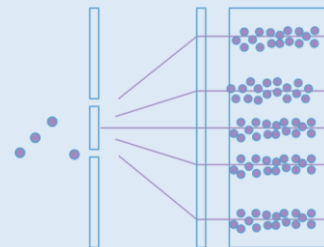
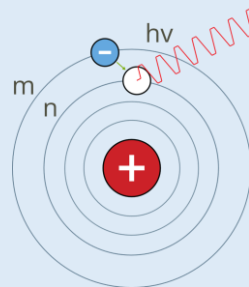
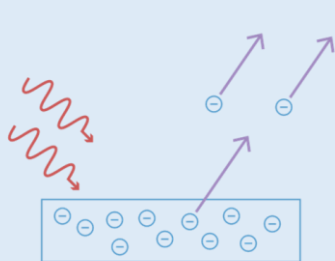
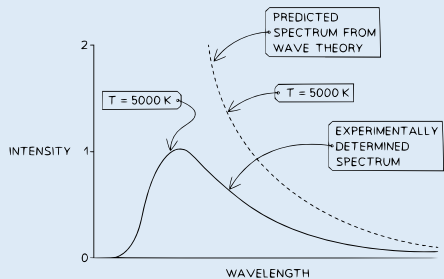
Квант — это неделимая порция некоторой величины в физике (квант света, квант энергии, квант поля, квант движения...)

Величина квантуется — принимает дискретный набор значений

Квантовая механика — это раздел теоретической физики, описывающая физические явления в масштабе атомов и субатомных частиц:

Размер атома водорода 0.05 нм,
масса атома водорода $1.67 \cdot 10^{-24}$ г
энергии движения/столкновения мкК-мК
($0\text{K} = -273.15 \text{ C}$)

ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ



ГИПОТЕЗА
МАКСА ПЛАНКА



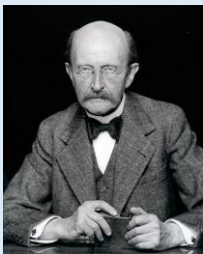
ОБЪЯСНЕНИЕ
ФОТОЭФФЕКТА



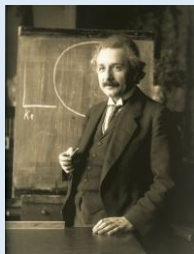
МОДЕЛЬ АТОМА
ВОДОРОДА



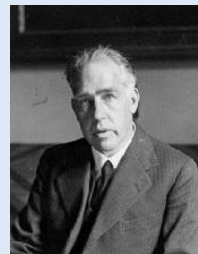
КОРПУСКУЛЯРНО-
ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ



Макс Планк



Альберт Эйнштейн



Нильс Бор



Луи де Бройль

ПЕРВАЯ И ВТОРАЯ КВАНТОВЫЕ РЕВОЛЮЦИИ

**Коллективные квантовые явления:
первая квантовая революция**

**Индивидуальные квантовые системы:
вторая квантовая революция**



Лазер

Флэш-память

Интегральная
схема

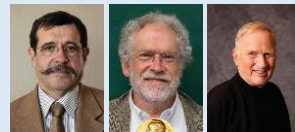
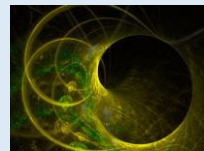
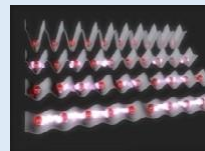
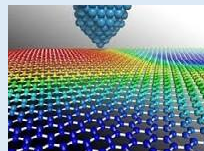
Твердотельный
лазер

Компакт-диск

Графен

Измерение
отдельных
квантовых
систем

Квантовая
запутанность



1954

1980

2000

2000

2010

2012

2014

2016

2022

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ: АТОМЫ, ИОНЫ, ФОТОНЫ, ЭЛЕКТРОНЫ...

1. СУПЕРПОЗИЦИЯ

КЛАССИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА



Орёл ИЛИ решка

Орёл И решка

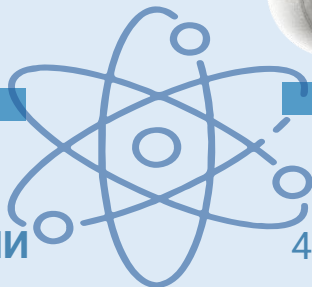
2. ЗАПУТАННОСТЬ

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА



N кубит

2^N состояний



3. ХРУПКОСТЬ / ЭФФЕКТ ДЕКОГЕРЕНЦИИ

НАБЛЮДЕНИЕ ИЛИ ШУМЫ



4. НЕКОПИРУЕМОСТЬ

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Копируй или перехватывай



СУПЕРПОЗИЦИЯ

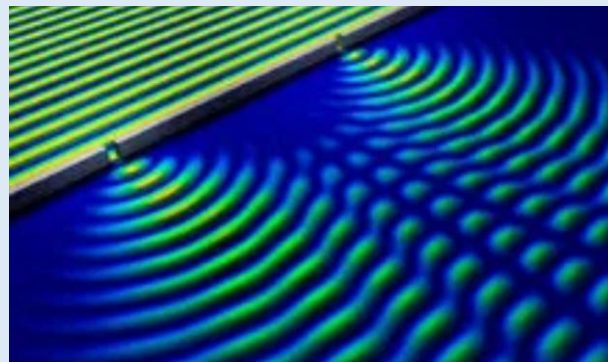
Суперпозиция — это совокупность различных состояний квантовой системы, в которых она как бы находится одновременно.

Квантовая частица может одновременно быть в различных состояниях и в различных точках пространства.

КЛАССИЧЕСКИЙ МИР

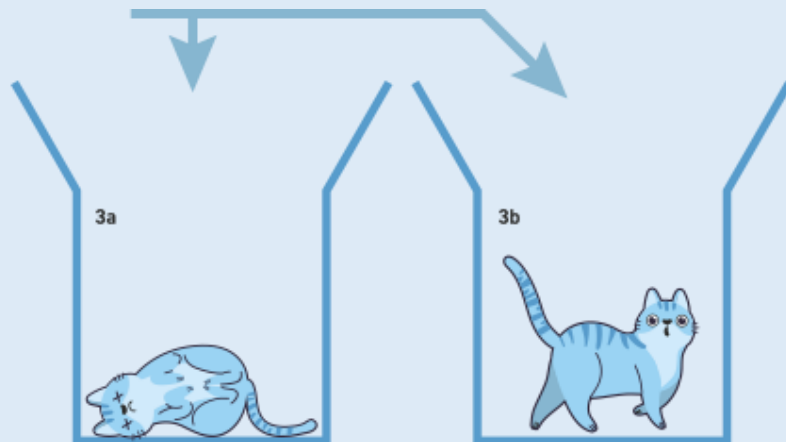


КВАНТОВЫЙ МИР





КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ



ADLEIAYDE

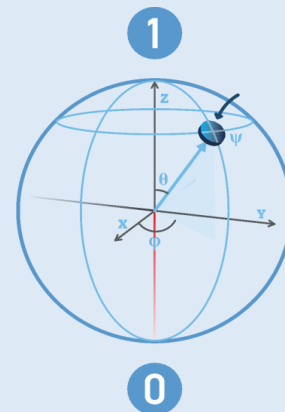


КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ





Квантовые вычисления



КЛАССИЧЕСКИЙ БИТ



НАСТОЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР



СУПЕРКОМПЬЮТЕР



Настольные ПК и суперкомпьютеры имеют общий принцип действия, хотя существенно отличаются по вычислительной мощности.

Квантовые компьютеры отличаются по принципу действия.



ПРИМЕР: ЗАДАЧА ФАКТОРИЗАЦИИ

ЛЮБОЙ КОМПЬЮТЕР
СМОЖЕТ
ПЕРЕМНОЖИТЬ
ПРОСТЫЕ ЧИСЛА

$$3 * 5 = 15$$

ДАЖЕ ЕСЛИ МНОЖИТЕЛИ
СОДЕРЖАТ
БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО ЗНАКОВ

$$15\ 013 * 20\ 071 = 301\ 325\ 923$$

ОДНАКО ДАЖЕ СОВРЕМЕННЫЕ
СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ
НЕ СПОСОБНЫ РЕШИТЬ ОБРАТНУЮ ЗАДАЧУ

$$301\ 325\ 923 = ? * ?$$



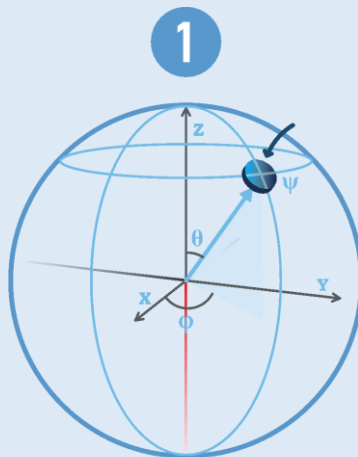
ЧТО ТАКОЕ КУБИТ

КЛАССИЧЕСКИЙ БИТ

- Или «0», или «1»

КВАНТОВЫЙ БИТ

- qubit = **q**uantum **b**it
- Может быть в состоянии суперпозиции $|0\rangle + |1\rangle$.
- **Пример:** атом в суперпозиции основного и возбужденного состояний.



Сфера Блоха

$$| \begin{matrix} \bullet \\ - \end{matrix} \rangle + | \begin{matrix} - \\ \bullet \end{matrix} \rangle$$

ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ

- Содержит всю информацию о состоянии кубита

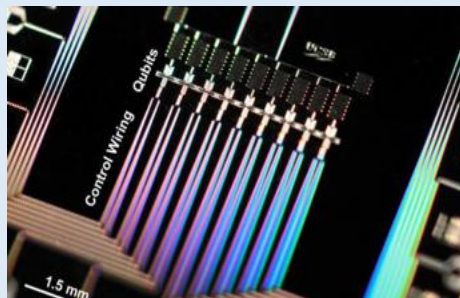
$$\Psi = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Уравнение Шредингера

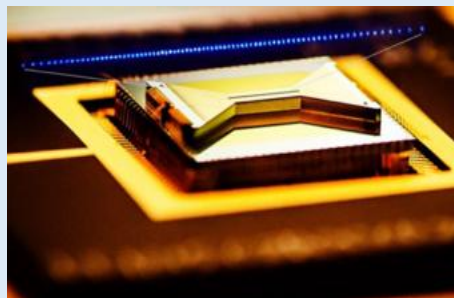
$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$



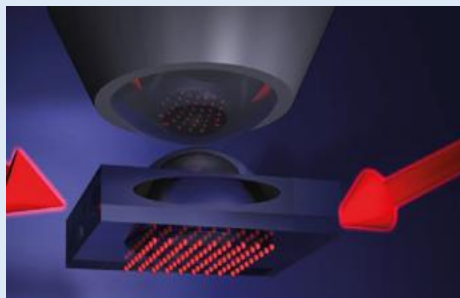
ФИЗИЧЕСКИЕ РЕАЛИЗАЦИИ КУБИТОВ



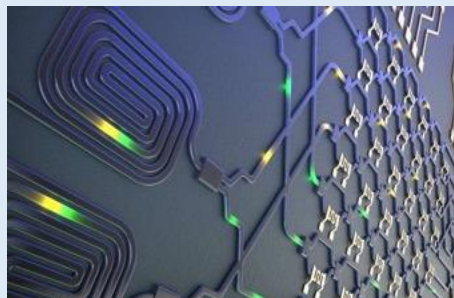
Сверхпроводники



Ионы в ловушке

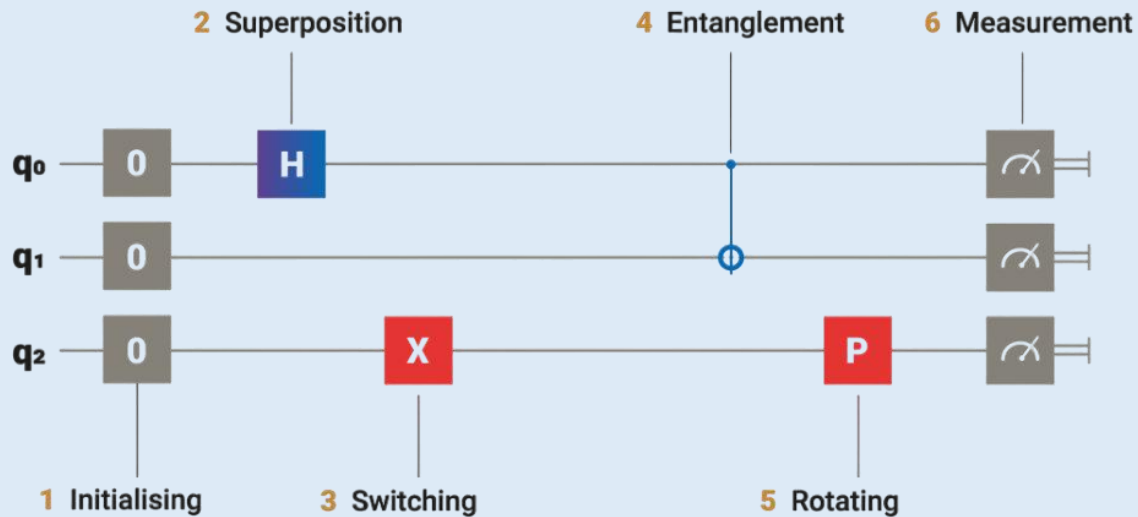


Нейтральные атомы

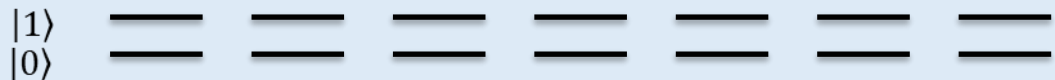


ФОТОНЫ

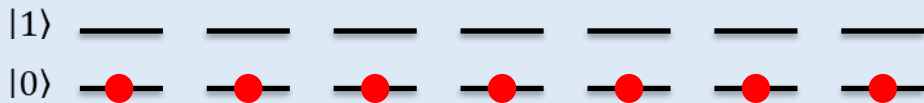
ГЕЙТОВАЯ МОДЕЛЬ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА



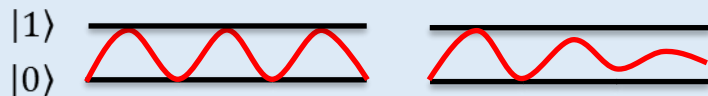
1. Масштабируема система с хорошо охарактеризованными кубитами



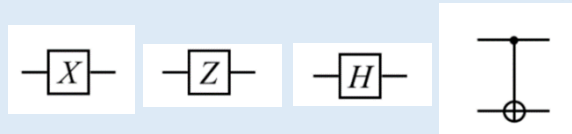
2. Возможность инициализации кубита созданием чистого состояния



3. Низкая декогеренция



4. Универсальный набор гейтов



5. Измерение квантовой системы с высокой точностью



КВАНТОВЫЕ АЛГОРИТМЫ: ПРИМЕНЕНИЯ

ФИНАНСЫ

- > Оценка рисков и кредитный скоринг
- > Оптимизация инвестиционных портфелей
- > Стресс-тестирование и предсказание кризисов

НЕФТЬ И ГАЗ

- > Создание новых технологий переработки углеводородов и новых химических веществ
- > Моделирование нефтяных резервуаров и детальных сейсмических изображений

ЭНЕРГЕТИКА

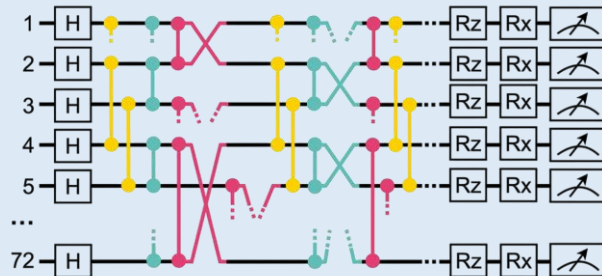
- > Оптимизация распределения электроэнергии, получаемой из различных источников
- > Прогнозная аналитика потребления энергии

ХИМИЯ, ФАРМАЦЕВТИКА И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- > Новые материалы с уникальными свойствами
- > Разработка лекарств и формул

ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА

- > Анализ и прогнозирование состояния Северного морского пути
- > Оптимизация трафика
- > Построение оптимальных маршрутов



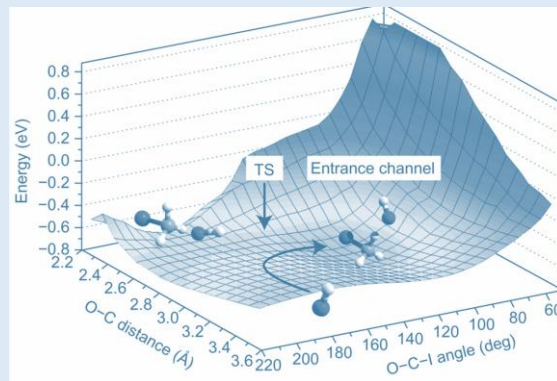
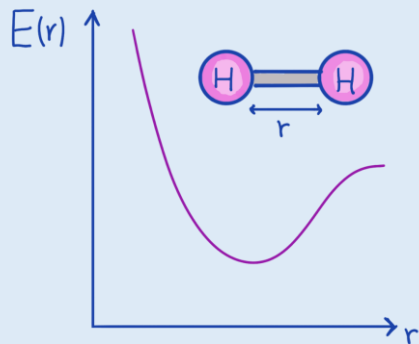
Цель — определить набор маршрутов, который минимизирует общее затраченное время.

У каждого автомобиля есть фиксированные начальная и конечная точки, и затраченное время, пропорциональное количеству автомобилей, использующих маршрут

$$Z_i t_i \rightarrow \min$$



- Молекулярные спектры
- Понимание реакций на атомарном уровне.
- Моделирование столкновений, реакций, формирование молекул.





- СЖАТИЕ ДАННЫХ
- ХЕШИРОВАНИЕ ДАННЫХ
- СОЗДАНИЕ БАР-КОДОВ
- ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ (ВЫДЕЛЕНИЕ ПАМЯТИ ПОД ХРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ В КОМПЬЮТЕРЕ)
- КРИПТОГРАФИЯ

$$301\ 325\ 923 = ? * ?$$

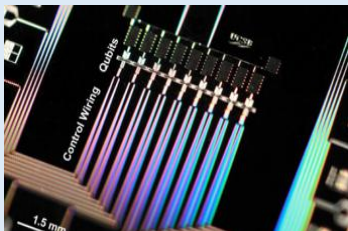


АЛГОРИТМ ШОРА

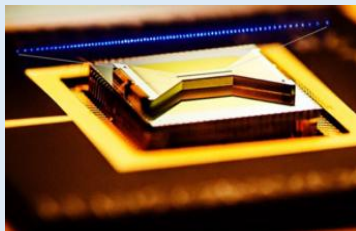
- Современная асимметричная криптография базируется на сложности решения определенного класса математических задач, например, факторизации (разложение числа на простые множители)
- На данный момент неизвестен эффективный алгоритм решения такой задачи, поэтому злоумышленнику требуется много времени для взлома криптографического ключа
- В 1995 году Питер Шор предложил алгоритм для задач факторизации и дискретного логарифмирования за полиномиальное время для квантового компьютера
- Число 15 было разложено на множители 3 и 5 при помощи квантового компьютера с 7 кубитами



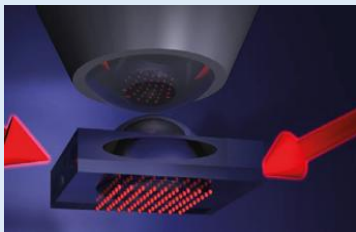
Питер Шор



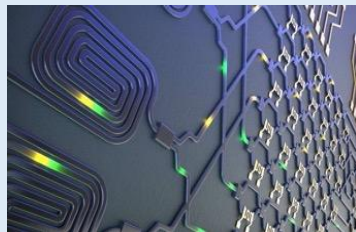
Сверхпроводники



Ионы в ловушке



Нейтральные атомы



ФОТОНЫ

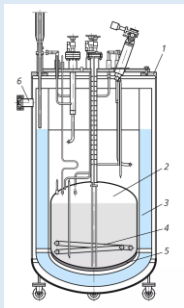
- Сверхпроводниковые кубиты (Google, IBM, Rigetti, D-Wave, Microsoft, Росатом-МИСИС-РКЦ-ИФТТ-МФТИ-МГТУ и др.)
- Ультрахолодные атомы в оптических потенциалах (Harvard university – ColQuanta, Ecole Polytechnique – Pascal, МГУ, РКЦ и др.)
- Ионы в оптических ловушках (Univeristy of Maryland – IonQ, AQT, ФИАН-РКЦ и др.)
- Оптические кубиты (PsiQuantum, Xanadu, МГУМГТУ им. Баумана, РКЦ и др.)

КАКИЕ ИОНЫ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ

Иттербий $^{171}\text{Yb}^+$

Кальций $^{40}\text{Ca}^+$

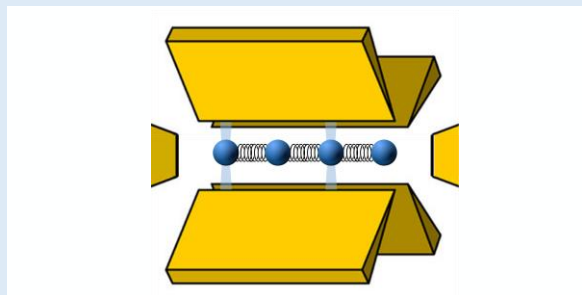
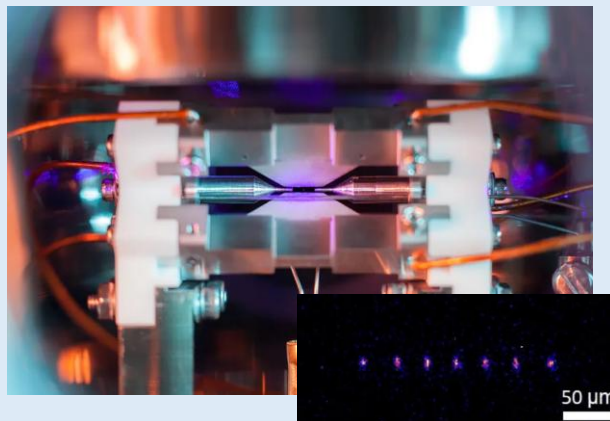
ОХЛАЖДЕНИЕ ДО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР



Тепловые колебания ионов приводят к декогеренции. Необходимо охлаждение до низких температур $\Delta E \gg k_B T$.

Температура в криостате $T \sim 1$ К.

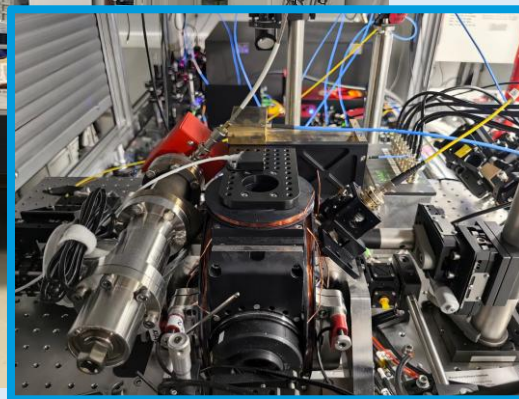
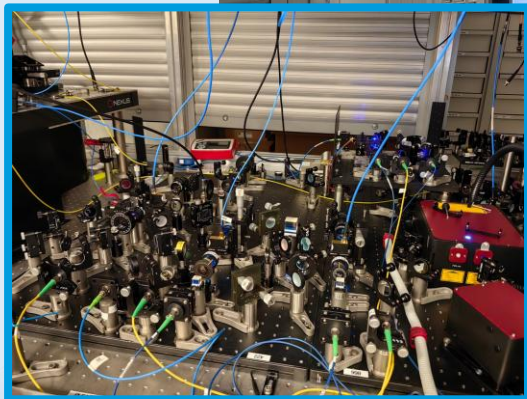
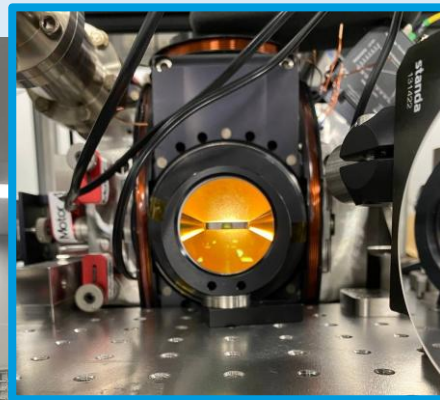
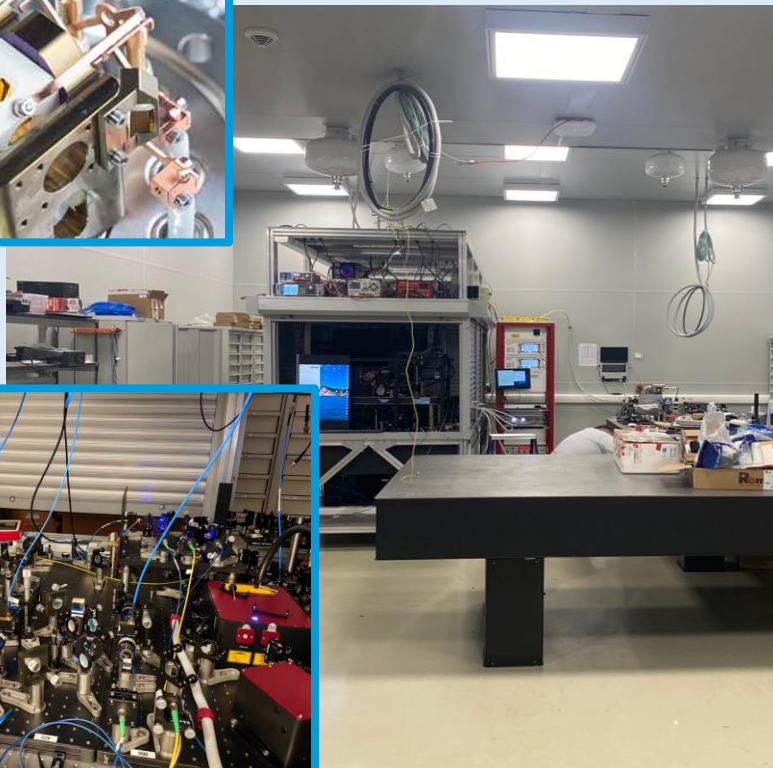
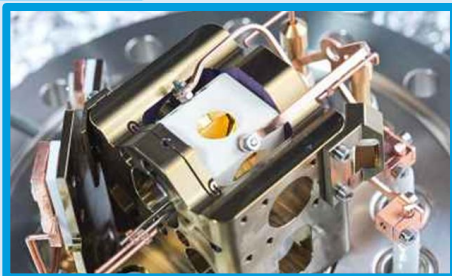
ИОННАЯ ЛОВУШКА



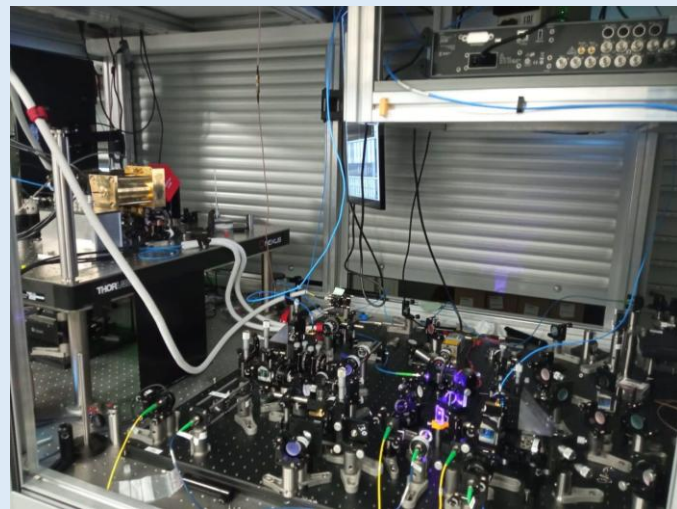
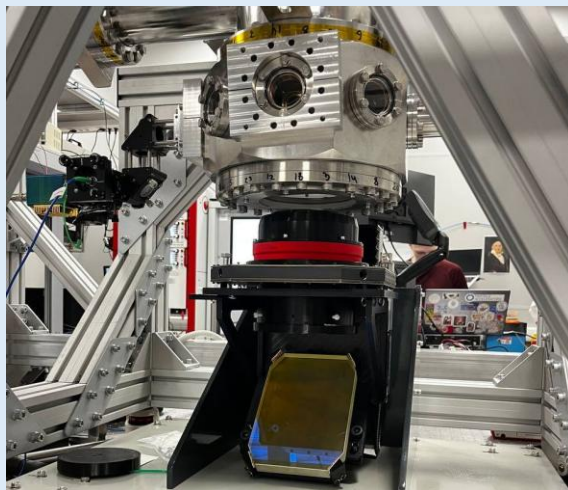
ВЫЗОВЫ

- Увеличение количества ионов в линейной цепочке.
- Повышение качества квантовых операций.
- Переход к планарным ловушкам.

КОМПЬЮТЕР НА ИОНАХ $^{171}\text{Yb}^+$ – ФИАН ИМ. ЛЕБЕДЕВА



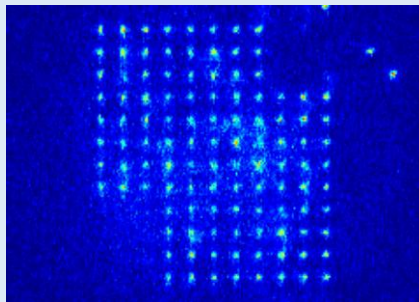
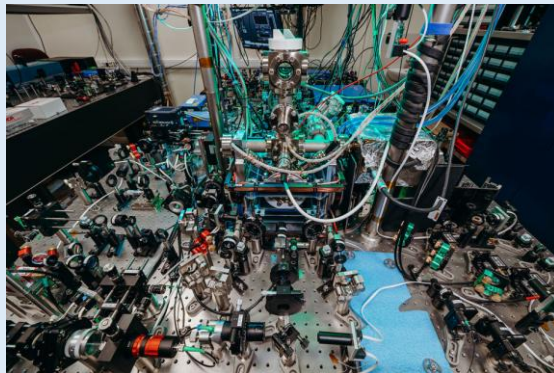
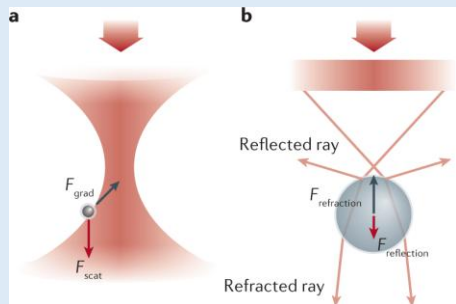
КОМПЬЮТЕР НА ИОНАХ $^{40}\text{Ca}^+$ РОССИЙСКИЙ КВАНТОВЫЙ ЦЕНТР



КАКИЕ АТОМЫ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ

Рубидий ^{87}Rb

ОПТИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ
ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ АТОМОВ

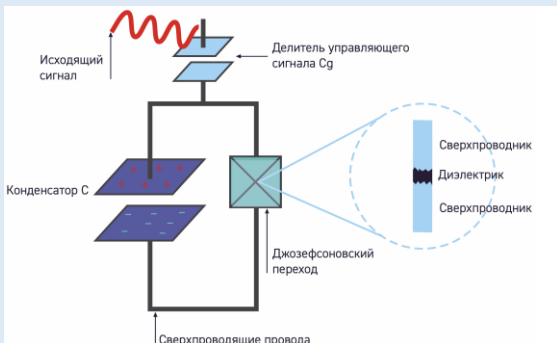
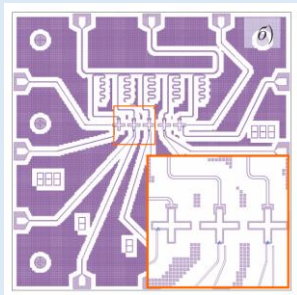


ВЫЗОВЫ

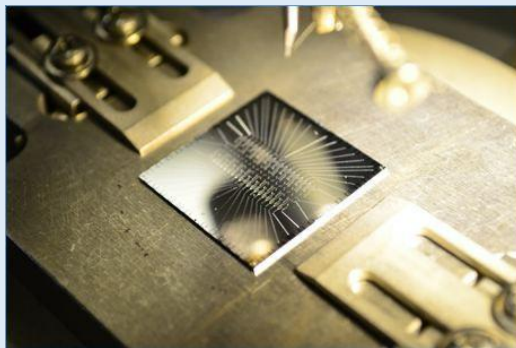
- Увеличение количества атомов в оптической решетке.
- Повышение качества квантовых операций.

КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ НА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КУБИТАХ – МФТИ И МИСИС

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ КУБИТЫ - ТРАНСМОНЫ

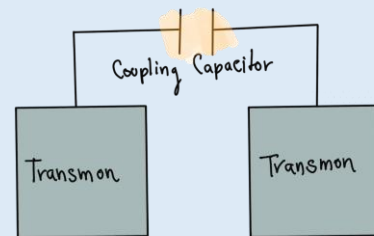


СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ЧИП

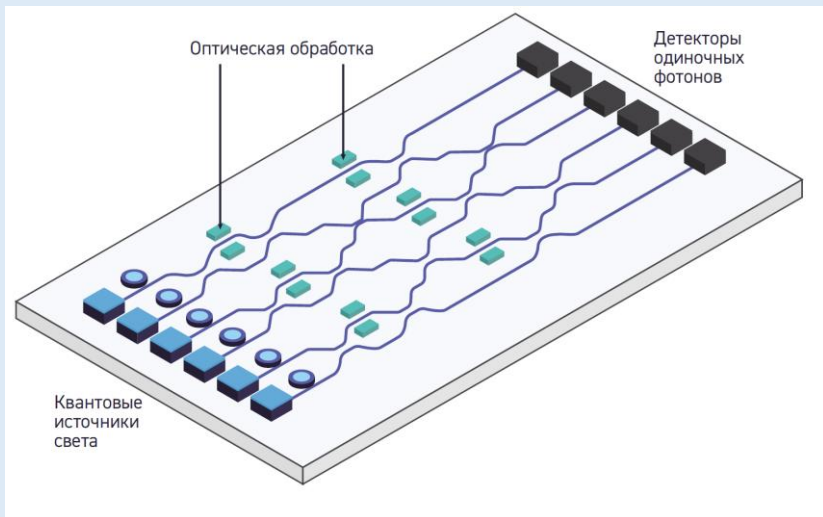


ВЫЗОВЫ

- Усовершенствование технологии производства идентичных кубитов.
- Повышение качества взаимодействия между кубитами на чипе.

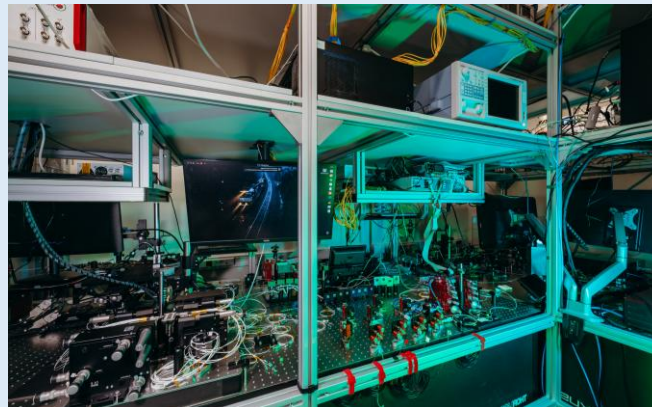


ФОТОННЫЕ ЧИПЫ



ВЫЗОВЫ

- Создание источников одиночных фотонов.
- Разработка детекторов одиночных фотонов.
- Снижение оптических потерь в материалах.





НАЦИОНАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ ПРОГРАММЫ В МИРЕ

2014–2017



Квантовая программа в рамках 13-го пятилетнего плана (Китай)
2016–2020 \$1B
\$10B на строительство Квантовой лаборатории



Национальная программа исследований в области квантовых технологий (Австрия)
2017–2020 €32M
2021–2025 €107M



Национальная программа по квантовым технологиям (Великобритания)
2014–2024 £1B



Грантовые программы фондов NSERC, CFI, CIFAR, CFREF общей стоимостью около \$1B (Канада)

2018



Национальная квантовая инициатива (США)
2018–2023 \$1.2B



Quantum Flagship (Евросоюз)
2018–2027 €1B



Квантовая инженерная программа (Сингапур)
2018–2023 \$25M



Национальная квантовая программа (Швеция)
2018–2027 \$152M



МEXT — Программа Quantum Leap Flagship (Япония)
2018–2027 \$280M



Национальная квантовая программа (Германия)
2018–2022 €650M
2021–2028 €2B

2019



5-летний план развития квантовых технологий (Южная Корея)
2019–2023 \$40M



Quantum Delta (Нидерланды)
2019–2027 €615M

2020



Дорожные карты по развитию квантовых вычислений (Россия)
(2020–2024) 23.7 млрд руб и квантовых коммуникаций
(2020–2024) 16.8 млрд руб



Инициатива по квантовым технологиям (Индия)
2020–2024 \$1.12B



Квантовая программа (Тайвань)
2021–2025 \$282M



Квантовые технологии (Финляндия)
2020–2024 \$20.7M



Грантовое финансирование (Австралия) 2017–2020 \$70M
В 2020 г. принята дорожная карта развития квантовых вычислений.

2021



Национальная квантовая программа (Франция)
2021–2025 €1.8B



Национальная квантовая программа "Quantum Spain"
2021–2025, € 22M

2022

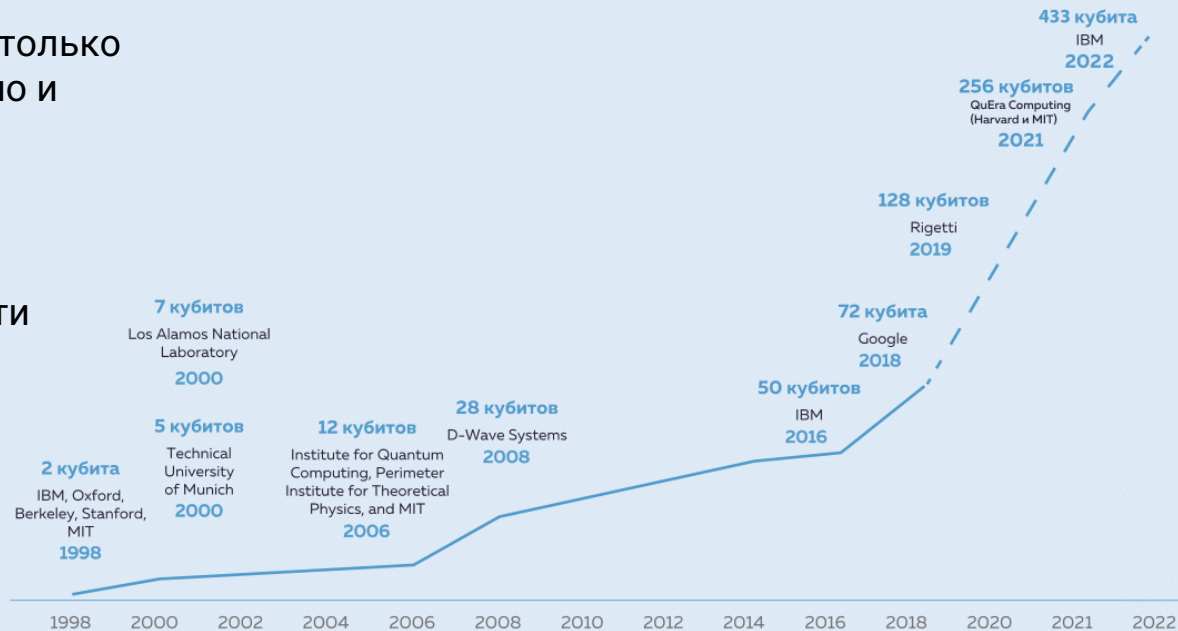
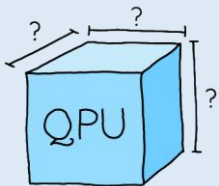


Национальная квантовая программа (Дания)
2022–2025, \$220M

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

Масштабирование это не только про количество кубитов, но и про контроль!

Квантовый объем – характеристика вычислительной мощности квантовых компьютеров.





ПЕРВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ИНДУСТРИИ



Volkswagen намерена задействовать квантовые компьютеры для решения следующих задач:

- Исследование структуры новых материалов (например, в аккумуляторных батареях для электромобилей)
- Развитие искусственного интеллекта для беспилотных машин
- Разработка систем управления автомобильным трафиком на городских улицах



AIRBUS

Разработчикам предлагается решать следующие задачи:

- Оптимизация расходов топлива при взлете
- Вычислительная гидрогазодинамика
- Квантовые нейронные сети для решения уравнений в частных производных
- Оптимизация формы крыла самолета
- Оптимизация багажной загрузки самолета





ДОРОЖНАЯ КАРТА «КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ» В РОССИИ

Цели

| | | | |
|-------------|---|---|-----------------------------|
| 2024 | Квантовый вычислитель на 50–100 кубитов | Лабораторная инфраструктура | Квантовое ПО и алгоритмы |
| 2030 | Универсальный квантовый компьютер | Промышленное производство квантовых устройств | Коммерциализация технологий |



НАУЧНАЯ
ИНФРАСТРУКТУРА



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ
ЭКОСИСТЕМА

Направления

Развитие технологий

Оборудование, аппаратные комплексы, ПО, алгоритмы

Развитие экосистемы

Компонентная база, образование, стартапы, международное сотрудничество, совместные лаборатории, мероприятия



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
СУВЕРЕНИТЕТ



МЕЖДУНАРОДНОЕ
СОТРУДНИЧЕСТВО

2024

Построить прототип квантового компьютера

2030

Квантовый компьютер экономически эффективен (решает полезные задачи)



ДОРОЖНАЯ КАРТА «КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ» В РОССИИ

ДОРОЖНАЯ КАРТА «КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ»

В рамках Национальной программы «Цифровая экономика» была утверждена ДК по Квантовым Вычислениям с бюджетом 23,6 млрд руб. Дорожная Карта была подготовлена командой РКЦ.

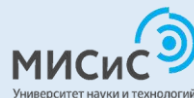
Госкорпорация «Росатом» отвечает за реализацию ДК «Квантовые вычисления».

РКЦ — главный исполнитель работ по ДК.

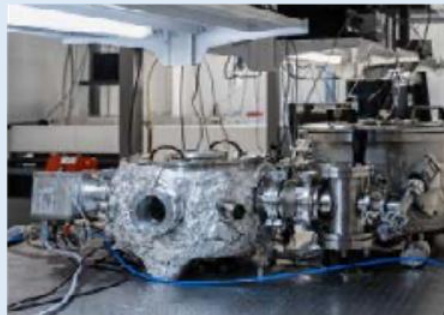
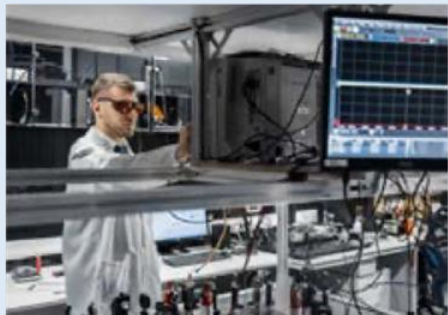


РКЦ

Российский
Квантовый
Центр



15 ЛАБОРАТОРИЙ В СКОЛКОВО, МФТИ, НИТУ «МИСИС», ФИАН, ИФТТ РАН





Инженеры
будущего

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ПЛАТФОРМ

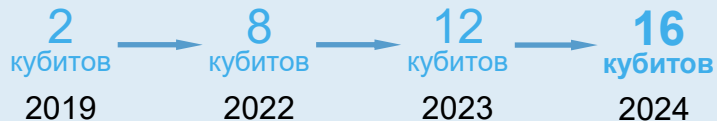
ИОНЫ



УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ АТОМЫ



СВЕРХПРОВОДНИКИ



ФОТОНЫ





Квантовая метрология



Азотные примеси в алмазе, могут быть использованы для магнитометрии сверхвысокого разрешения

- Поиск полезных ископаемых
- Предсказание землетрясений
- Сверхточные медицинские инструменты
- Интерфейс мозг-компьютер



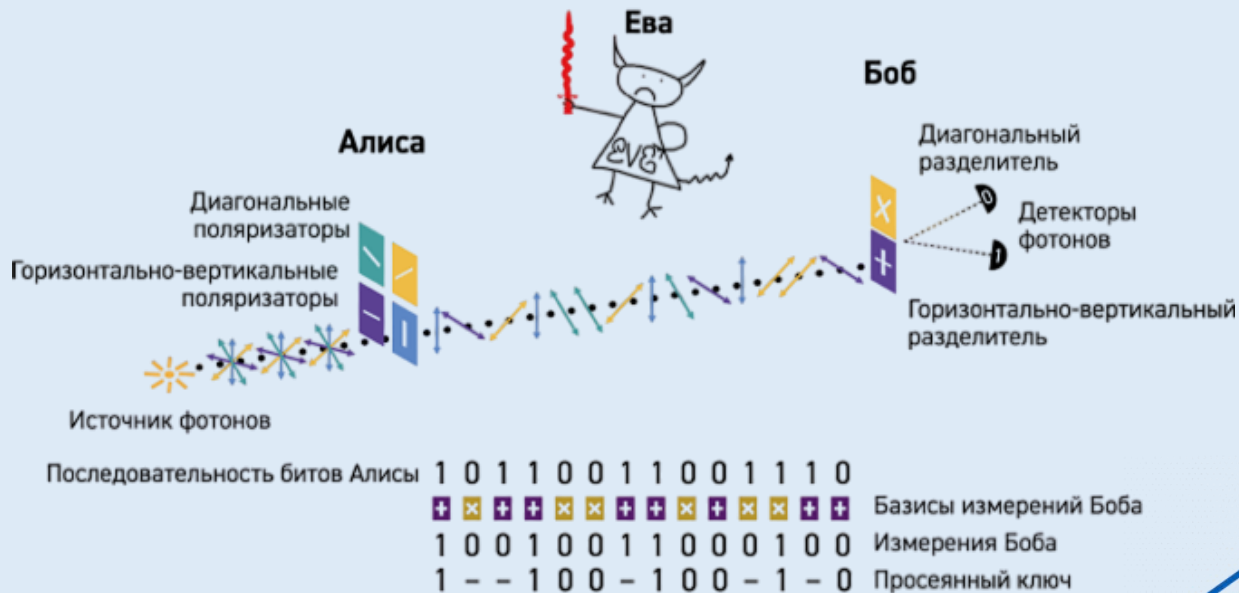


Квантовые коммуникации

ГДЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ: КВАНТОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ

Если кто-то вторгается в канал связи, пользователи сразу это обнаруживают.

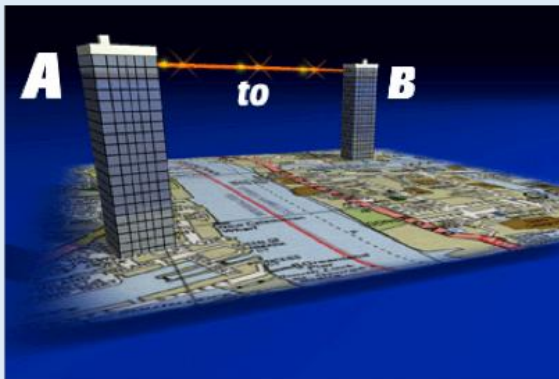
Соответственно, нельзя незаметно осуществлять перехват данных.





ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

- Сервер может быть подключен к существующим каналам связи



ЧЕРЕЗ ОТКРЫТОЕ ПРОСТРАНСТВО

- Может устанавливаться на мобильные платформы
- Партнеры должны быть непосредственно видны друг другу
- Чувствительность к погодным условиям



ЧЕРЕЗ СПУТНИК

- Квантовое распределение ключей между наземной станцией и спутником на орбите
- Движение спутника позволяет осуществлять обмен ключами между любыми двумя точками на Земле



Протяженность самой масштабной квантовой сети с использованием двух спутников более 4600 км.



«Квантовый спутник». Продемонстрировано: криптография более 1200 км, телепортация более 500 км.

К квантовой сети подключены 12 банков, компания Alibaba.

Коммерческие квантовые сети используются для решения бизнес-задач финансового сектора, в энергетике, гос. секторе.



ПЕРВАЯ В РОССИИ КВАНТОВО-ЗАЩИЩЕННАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ



Впервые в России продемонстрирована квантово-защищенная передача данных на протяженных городских сетях, встроенных в действующую банковскую инфраструктуру, со значительным потерями и спайками (25 км) между офисами Сбербанка

ПЛАНИРУЕТСЯ РЕАЛИЗОВАТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ



Защищенная конференц-связь



Защищенный документооборот



Квантовый блокчейн



Б. Андроновский переулок

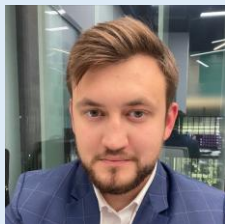


Квантовый VPN-тоннель, 25 км

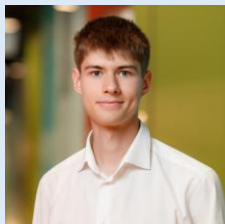


Ул. Вавилова

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



ЧЕРМОШЕНЦЕВ Дмитрий Александрович, старший научный сотрудник Лаборатории квантовой оптики Российского квантового центра, руководитель группы в «Росатом — Квантовые технологии», кандидат ф.-м. н.



ВОРОБЬЕВ Александр Константинович, научный сотрудник Лаборатории квантовой оптики Российского квантового центра.

