

Квантово-оптические технологии для сенсорики и вычислений

Н.Н. Колачевский

Развитие квантовых технологий в мире

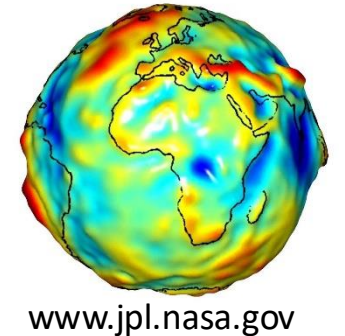
- Европа, Флагманская программа (Quantum technology flagship – QTF), 1 млрд. евро на 10 лет
- Великобритания, Национальная программа развития квантовых технологий, £270 млн. на 5 лет
- США, программа «Национальная квантовая инициатива», 1.275 млрд. евро на 5 лет
- Китай, Национальная квантовая лаборатория, 10 млрд. Евро
- Разработки ведутся крупнейшими корпорациями (Honeywell, Google, Sandia и пр), научными центрами (NIST, JILA, PTB, LNE-SYRTE, FEMTO-ST), поддержаны фондами (DARPA)



Квантовая сенсорика

- Навигация и позиционирование
положение транспорта, самолетов, спутников;
беспилотные летательные аппараты, беспилотный транспорт
удаленное строительство
- Удаленная синхронизация процессов
сверхплотная передача данных
интерферометрия со сверхдлинной базой
- Гравиметрия
поиск полезных ископаемых, природопользование
навигация по гравитационному полю
- Измерение магнитного и электрического поля

* квантовые сенсоры достигают высокой чувствительности, в том числе благодаря использованию свойств квантовых систем: суперпозиция, перепутанность, сжатие.



Измеряемые величины

- время и частота
- магнитные и электрические поля
- гравитационное поле
- вращение и ускорение
- температура
- механические напряжения
- концентрации примесей
- спектральный анализ
- детектирование одиночных фотонов
-

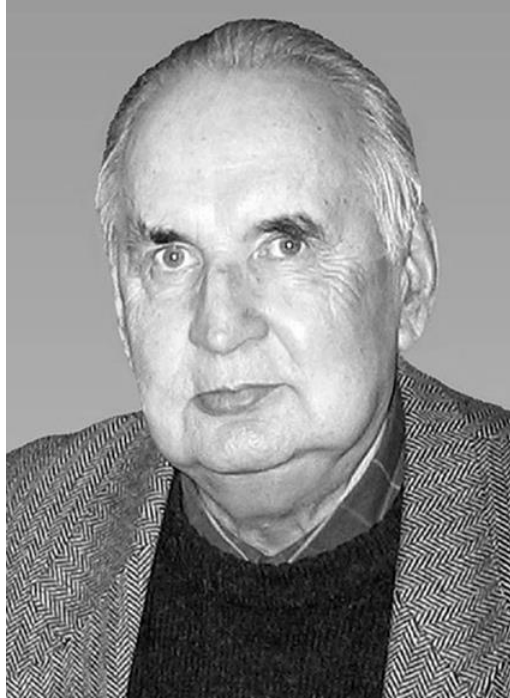


Пионерские работы в области лазерной спектроскопии сверхвысокого разрешения и лазерного охлаждения атомов



В.С. Летохов

пионерские работы
по лазерной физике
ФИАН-ИСАН



И.И. Собоelman

атомная спектроскопия

ФИАН



В.П. Чеботаев

лазерная спектроскопия
сверхвысокого разрешения
ИЛФ СО РАН

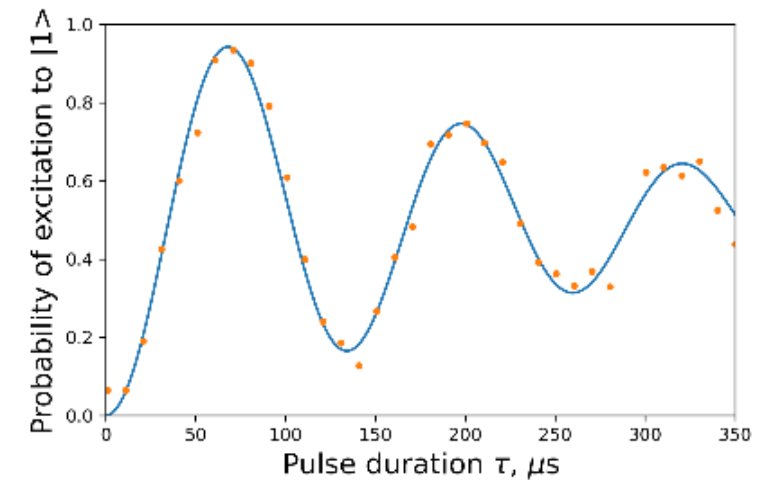
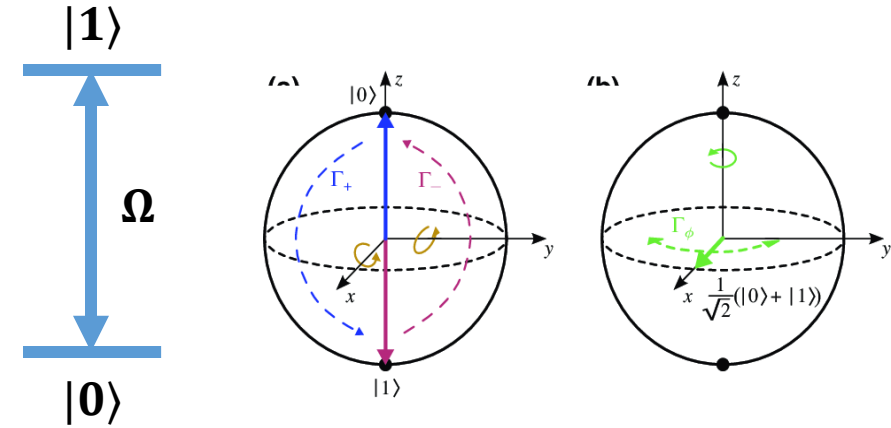


С.Н. Багаев

оптические стандарты
частоты
ИЛФ СО РАН

Цель: прецизионное управление квантовой системой

- Большое время когерентности атомной системы
 - подавление тепловых эффектов (движения)
 - минимизация воздействия внешних полей
- Качественные подготовка и измерение состояний
- Индивидуальная адресация
- Большое время когерентности возбуждающего поля, прецизионное управление
- Прецизионное измерение частоты возбуждающего поля

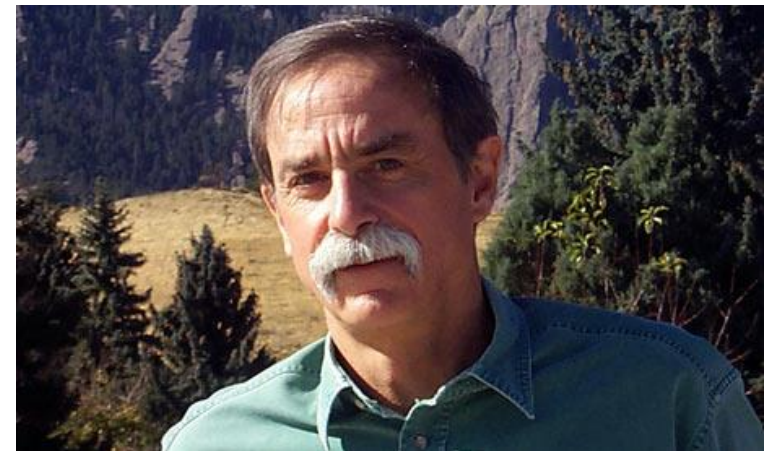


Прорывы на рубеже XXI века

- лазерное охлаждение
(1997, нобелевская премия)
- оптические решетки, магическая длина волны
(2003)
- фемтосекундный синтезатор оптических частот
(2005, нобелевская премия)
- управление индивидуальными квантовыми системами
(2012, нобелевская премия)
- ультрастабильные лазеры
(2008)



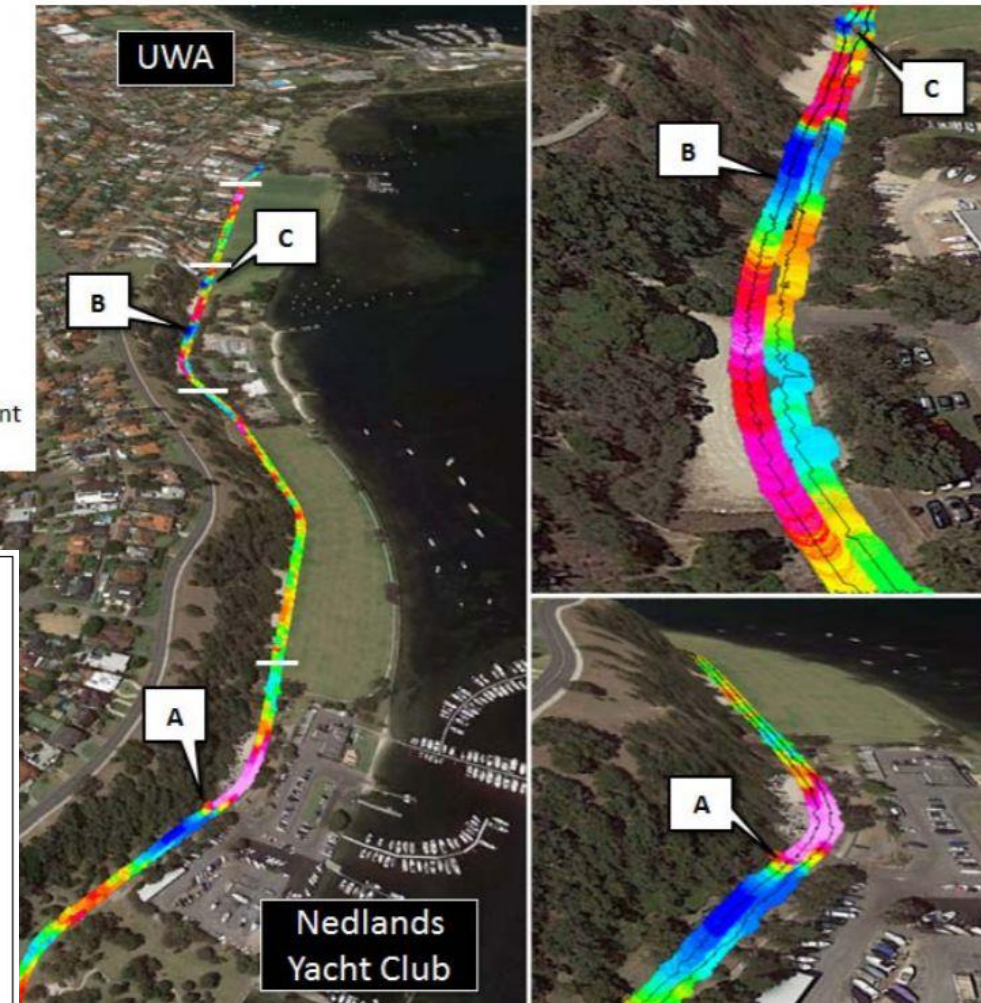
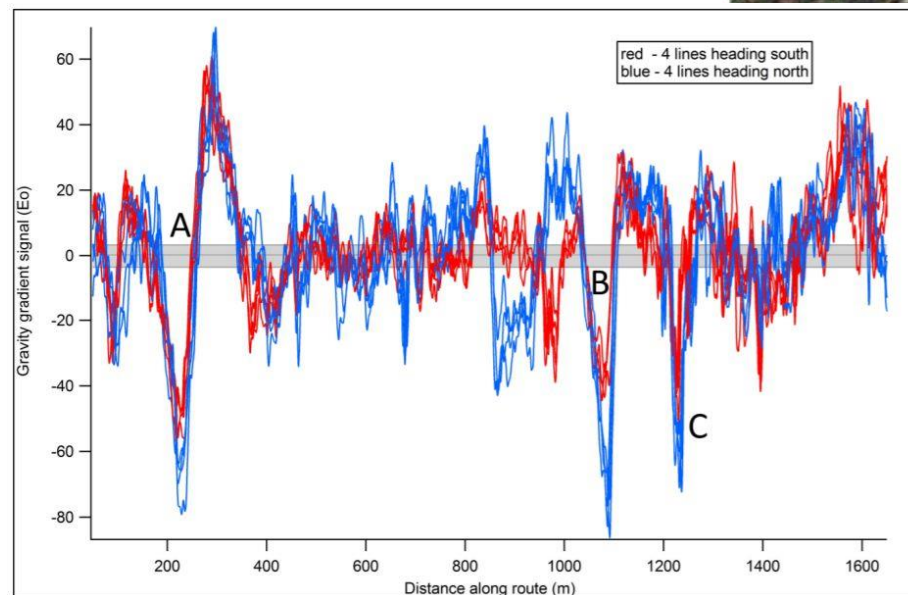
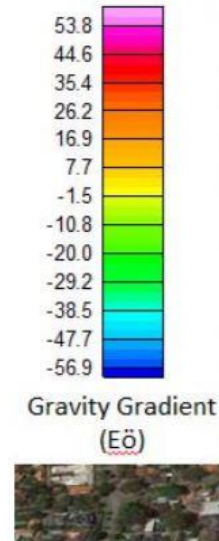
Дж. Холл и Т. Хэнш



Д. Вайндланд

Гравиметрия

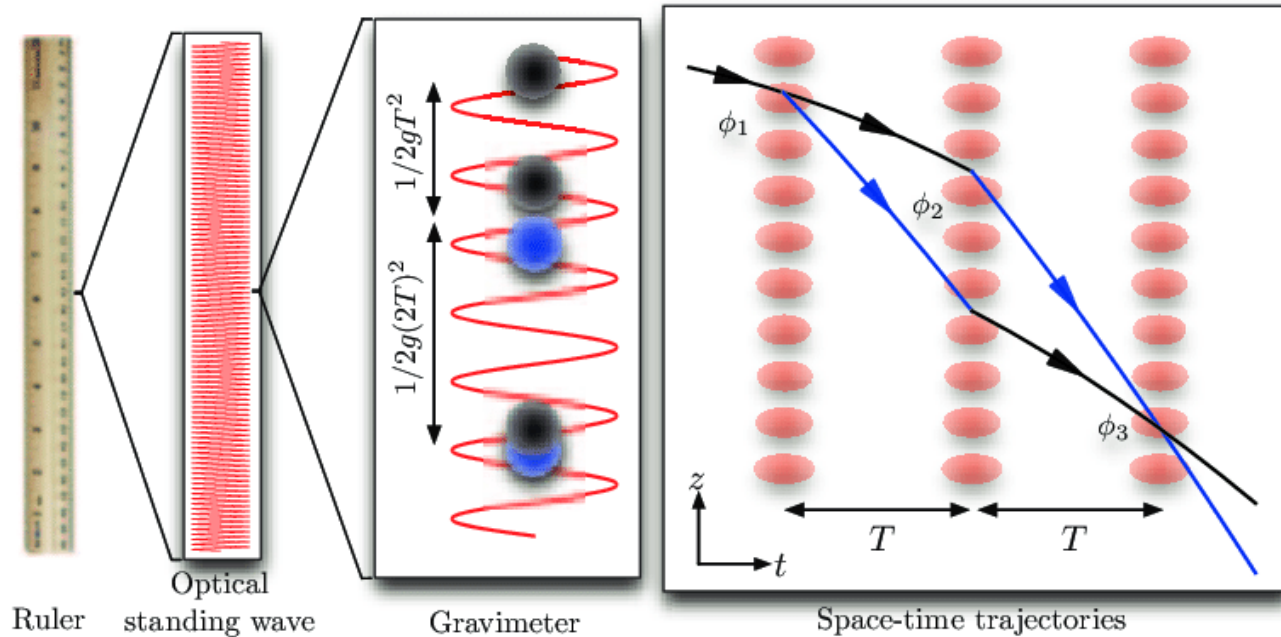
- Навигация по гравитационному полю Земли
- Баллистика
- Геологоразведка



Шумы 15 этвеш/0.5 Гц

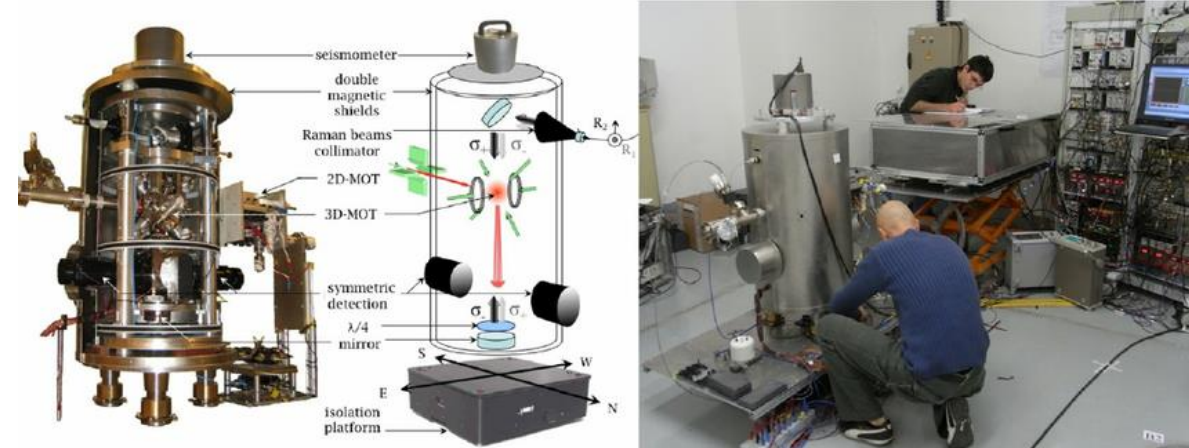
Гравиметры и градиометры на холодных атомах

Используется интерференция волновых пакетов, что обеспечивает высокую чувствительность к фазовым сдвигам

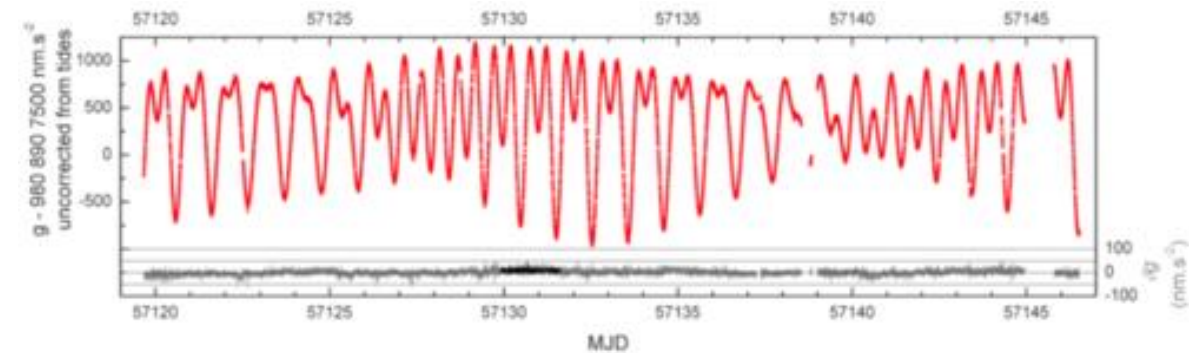


$$\lambda = h/p = h/mv$$

$$\Delta\phi = k_{eff} g T^2$$



США, Германия, Англия, Франция, Австралия....



Магнитометрия

Лучшие показатели:

Чувствительность

СКВИДы и атомные магнитометры $\approx 1 \text{ фТ}$

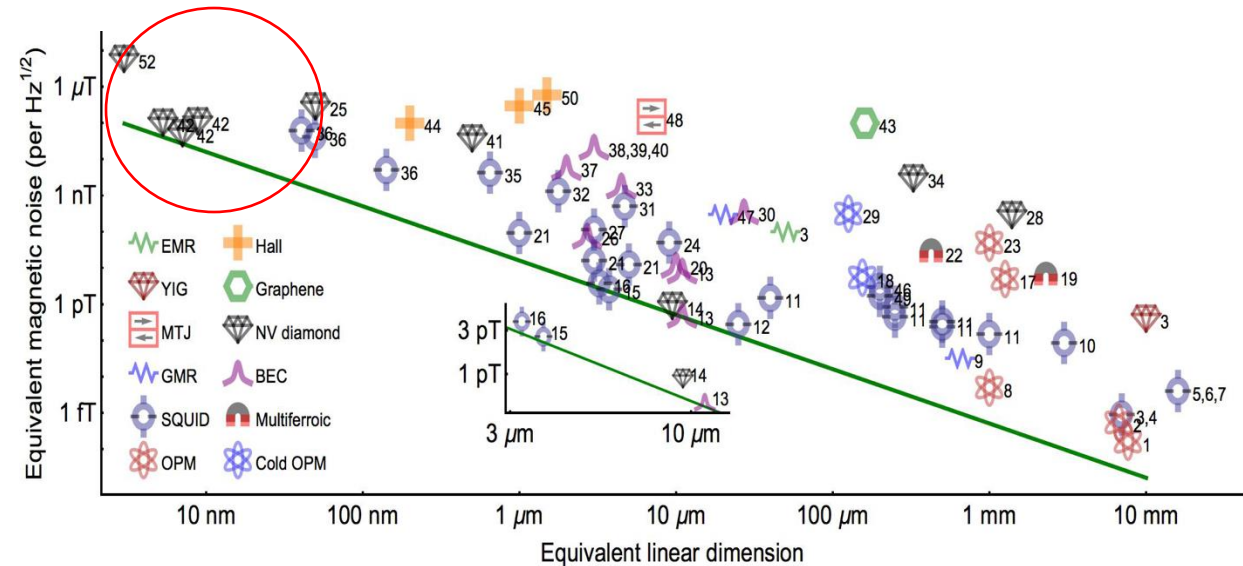
Пространственное разрешение 10 мм

Перспективная область:

Пространственное разрешение $\approx 1\text{-}100 \text{ нм}$
(+совместимость с биологическими объектами)

На данные момент единственная
перспективная система это NV центр
в алмазе

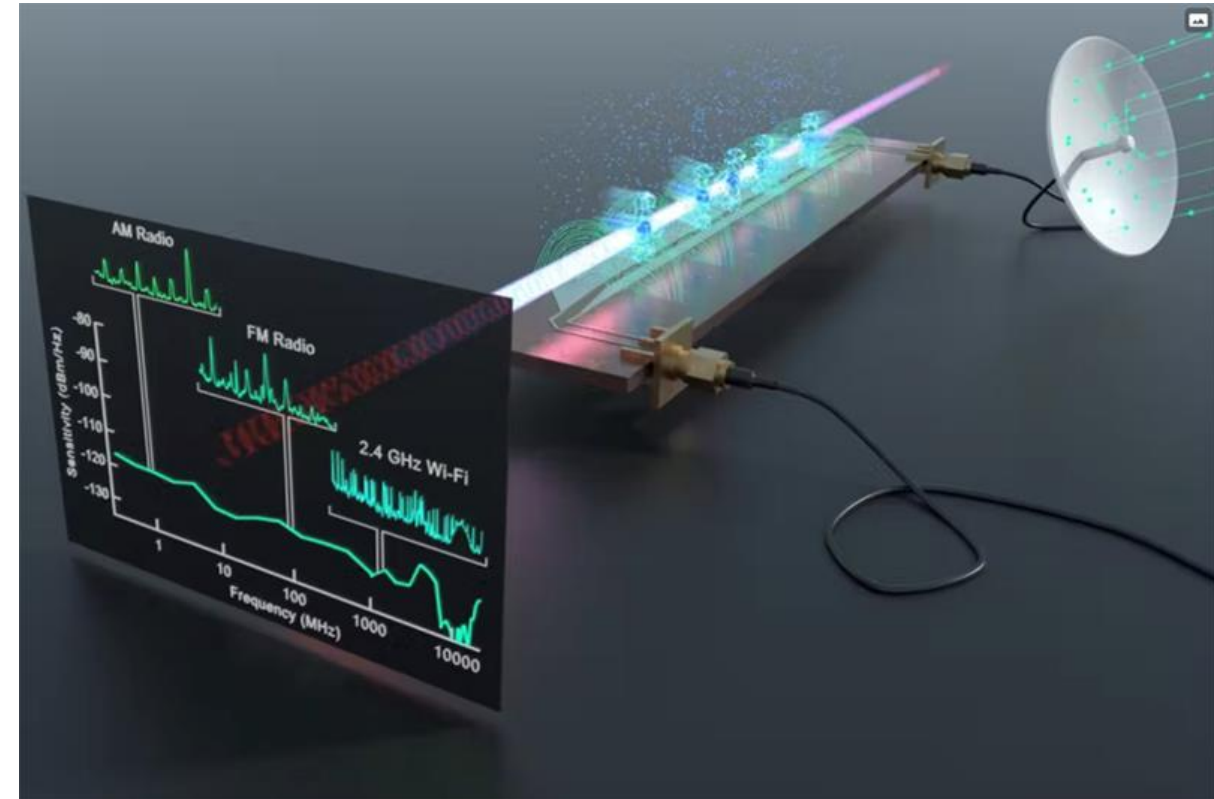
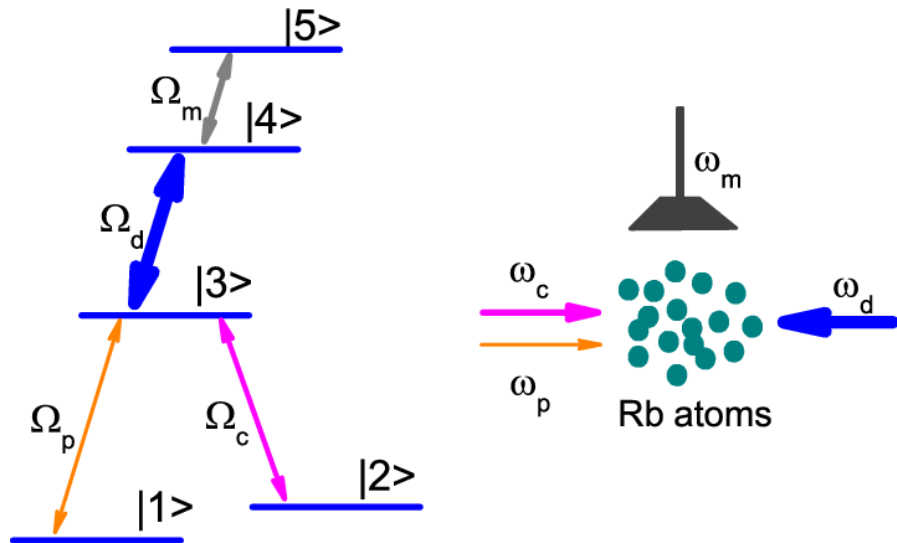
Необходимы работы по улучшению чувствительности
NV-магнитометров



<http://mitchellgroup.icfo.es/mg/s.pdf>

Сенсоры электрического поля до 300 ГГц

Атомы в ридберговских (высоковозбужденных) состояниях являются чувствительными сенсорами электрических полей в диапазоне 0-300 ГГц



Перспективная система на ридберговских атомах для регистрации слабых ЭМ полей в различных диапазонах

Развитие технологий стандартов частоты



Миниатюрные КПН часы



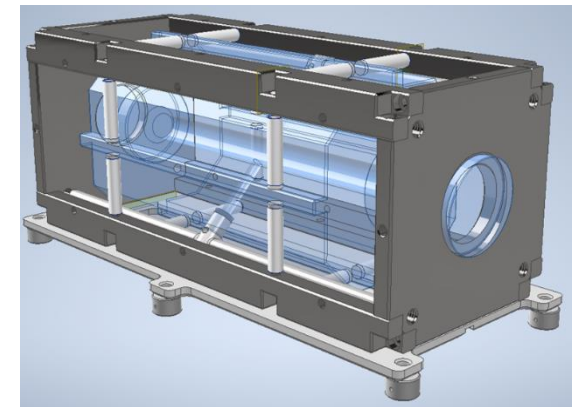
Малогобаритные стандарты



Оптические стандарты (транспортируемые, бортовые) + гравиметрия



Компактные ФСОЧ



Ультростабильные лазеры

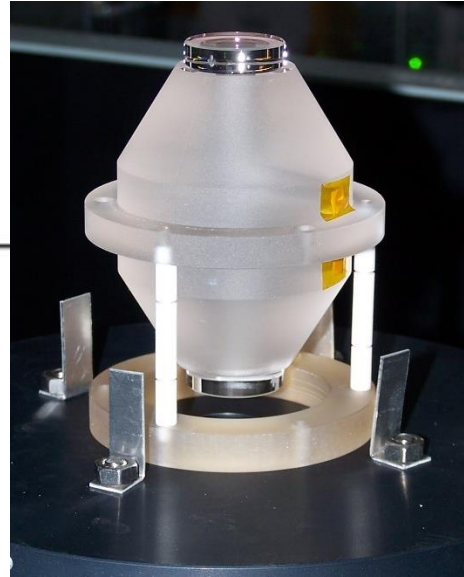
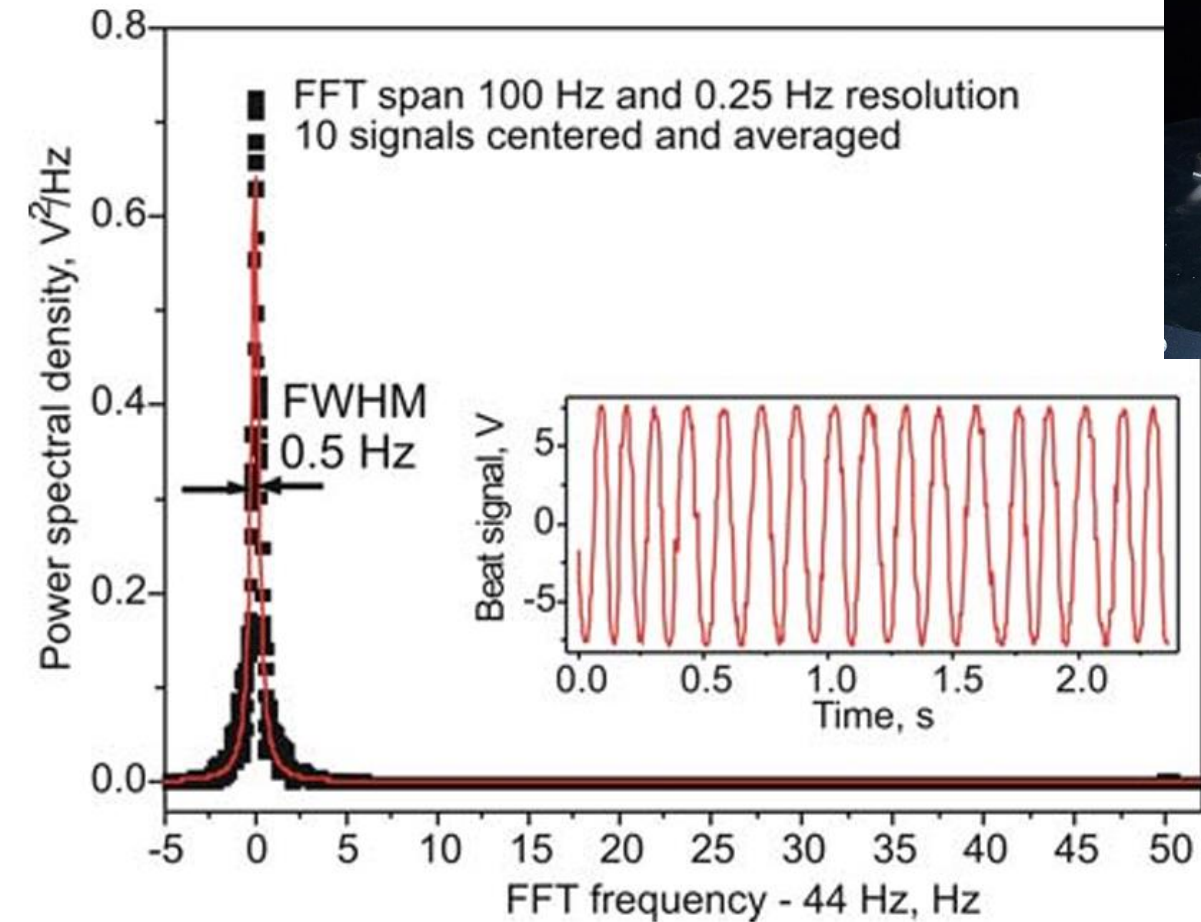
Перспективные решения

Представленные в России направления:

- Квантовые сенсоры в области времени, частоты и дальнометрии
- Средства измерения времени и частоты в СВЧ и оптическом диапазонах
- Квантовые абсолютные гравиметры, вертикальные и горизонтальные градиентометры, технологии атомной интерферометрии
- Квантовые абсолютные магнитометры и магнитные градиентометры
- Средства измерения напряженности СВЧ поля (до 300 ГГц)
- Локальные сенсоры магнитного, электрического полей и температуры на центрах окраски
- Датчики электромагнитных полей на основе когерентных состояний спинов в магнитоупорядоченных средах
- Спинтронные сенсоры
- Гироскопы на ансамблях спинов в твердом теле
- Твердотельные фотоумножители
- Спектрограф (электронный нос) с использованием двойной оптической гребенки из микрорезонаторов



Лазеры с субгерцевой шириной спектральной линии



J. Alnis, A. Matveev, N. Kolachevsky, Th. Udem, and T. W. Hänsch, "Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Pérot cavities", Phys. Rev. A 77, 053809 (2008)

Локализация технологии

- Создано новое поколение лазерных систем со стабилизацией по внешнему высокочастотному резонатору (более 20 систем на разные длины волн)
- Прикладные и фундаментальные задачи: стандарты частоты, передача сигналов, дальнометрия, гравиметрия, вычисления
- Относительная нестабильность порядка 10^{-15} на интервале 1-10 секунд

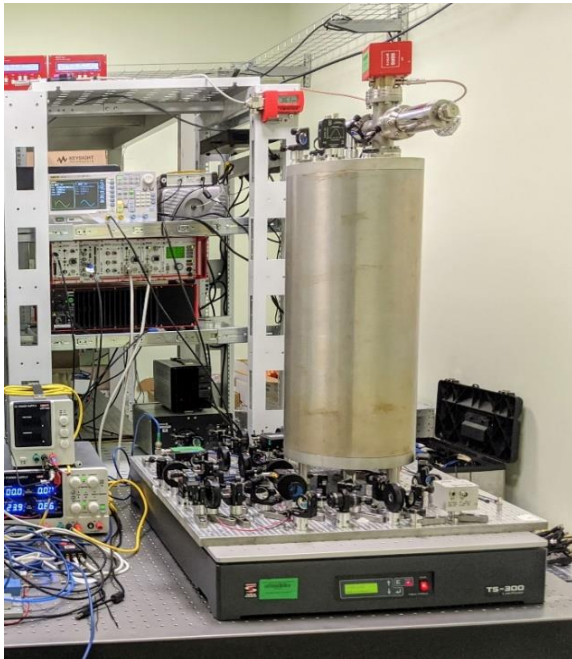


Программа ГЛОНАСС 2012-2020

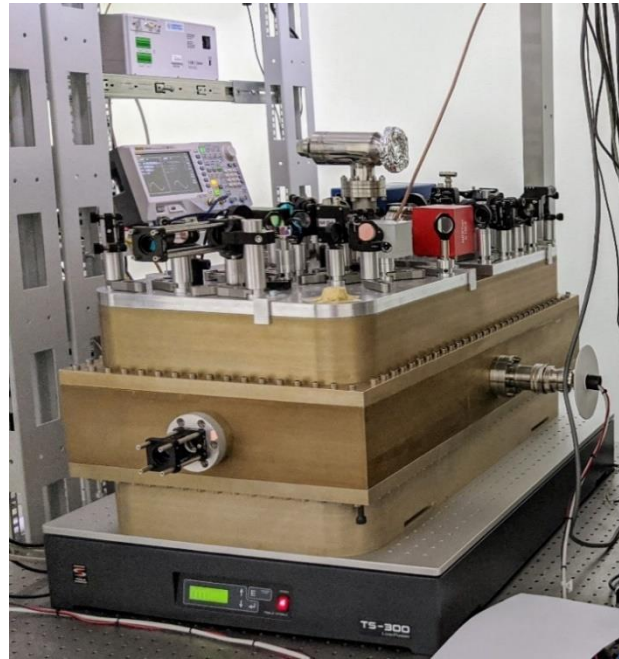
Оптические стандарты частоты на атомах стронция

Создание опытных образцов стандартов частоты на Sr-87, $\Delta f/f < 10^{-17}$ (ВНИИФТРИ)

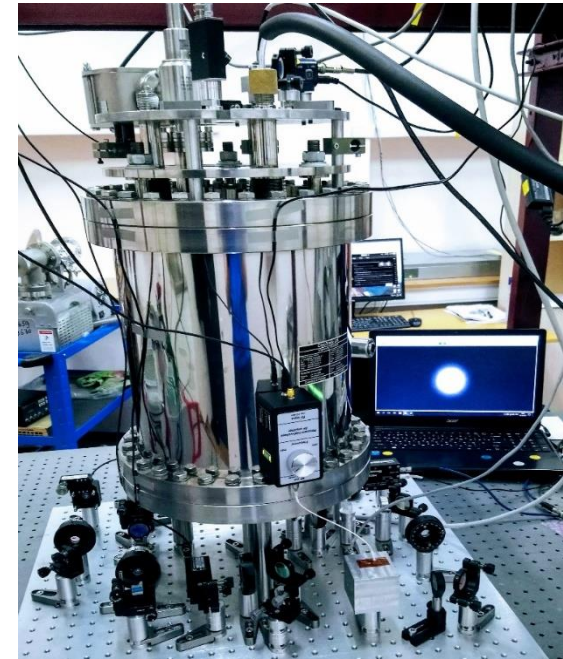
7 ультрастабильных лазерных систем ФИАН встроены в опытные образцы



*Лазерная система №1
возбуждения часового
перехода 698 нм*



*Лазерная система №2
возбуждения часового
перехода 698 нм*

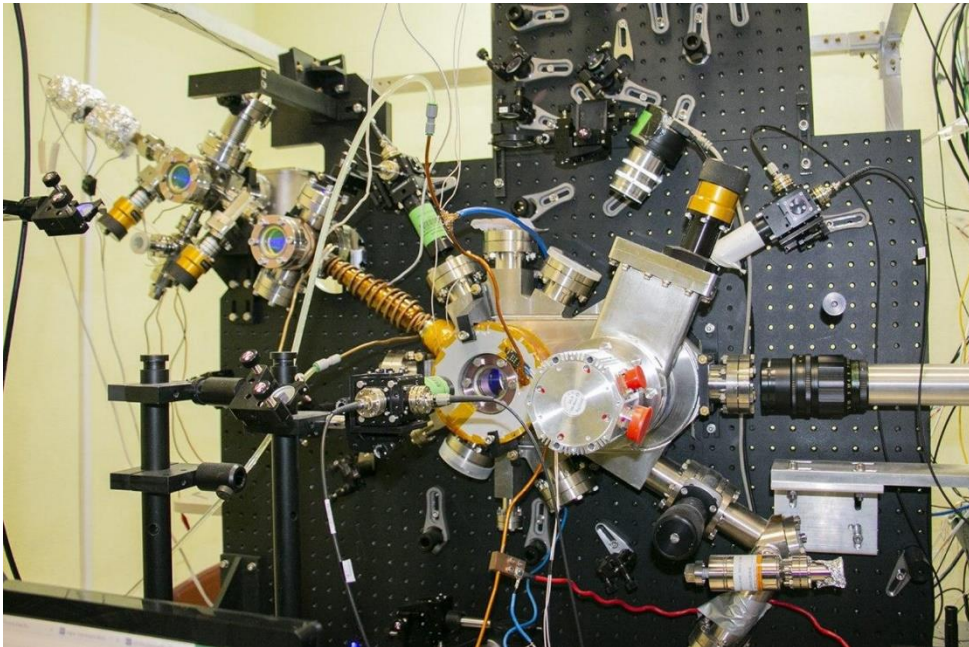


*Криогенные опорные лазерные
системы №№3.4.
1550 нм*

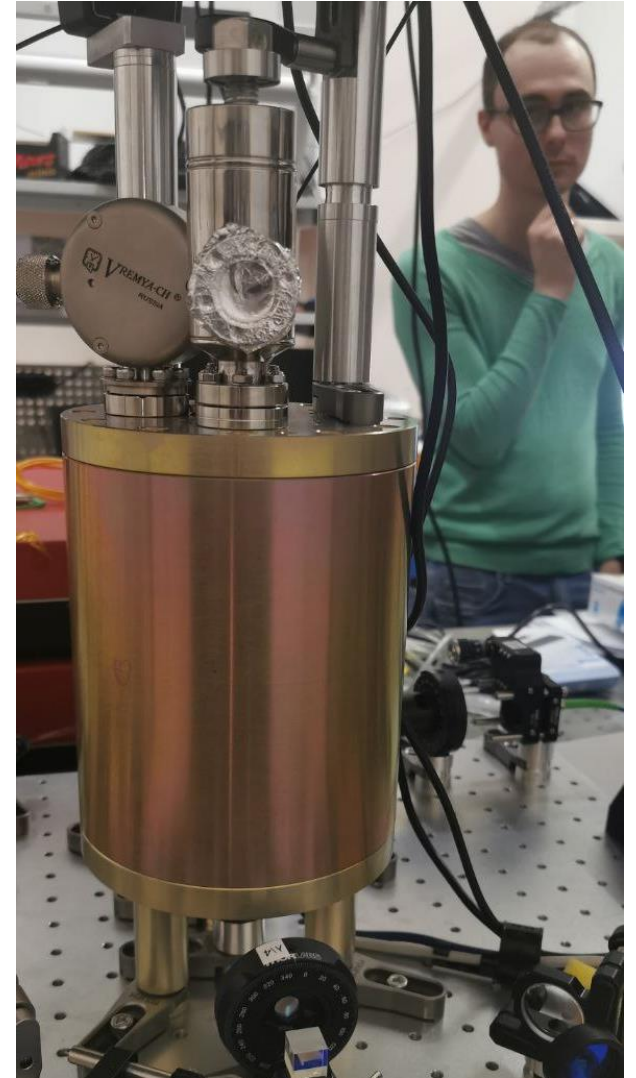
N. O. Zhadnov, K. S. Kudeyarov, D. S. Kryuchkov, G. A. Vishnyakova, K. Yu. Khabarova, and N. N. Kolachevsky, 48 -cm-long room-temperature cavities in vertical and horizontal orientations for Sr optical clock Applied Optics 60 (29), 9151-9159

Результаты (наземный сегмент)

- Оптический стандарт на атомах стронция включен в состав первичного эталона ГЭТ-1
- Относительная погрешность эталона снижена до 10^{-17}
- Вклад России в формирование шкалы всемирного времени достиг $>20\%$ (BIPM)



*Оптический стандарт частоты
на стронции, ВНИИФТРИ*

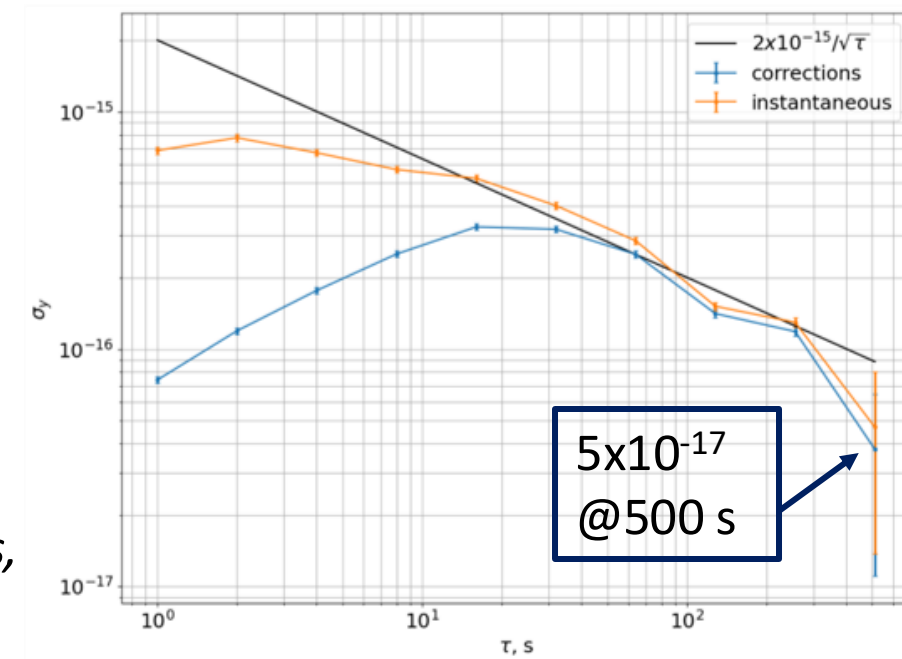
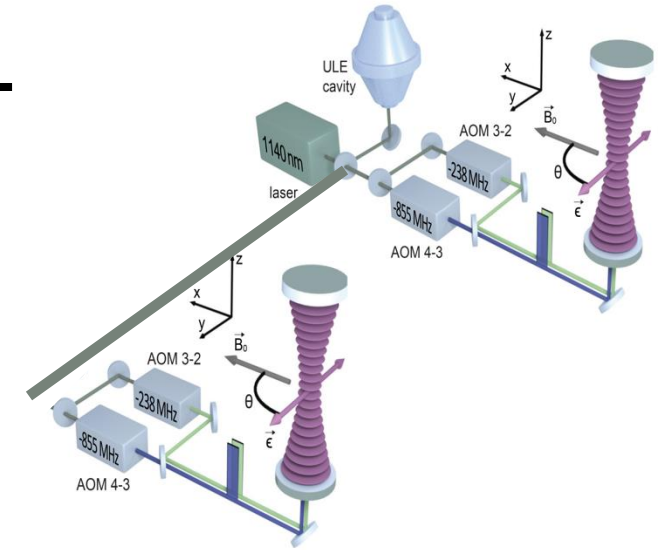


Фундаментальная база

Исследования оптических часов на атомах тулия

- Подавление сдвигов от теплового излучения
- Одновременный опрос часовых переходов и подавление зеемановского сдвига
- Компактные системы без замедлителя
- Часы с непрерывным опросом
- Достижение суб-мкК температур

20 публикаций в ведущих журналах с 2020 г (Nature Communications, Phys Rev A., Optics Express, УФН, Radiative Transfer, Atoms, JETP Lett)



Сличение двух оптических часов
на атомах тулия

Вызов: транспортируемые и бортовые системы

Транспортируемые ионные часы

“Opticlock” РТВ, 2×10^{-17}



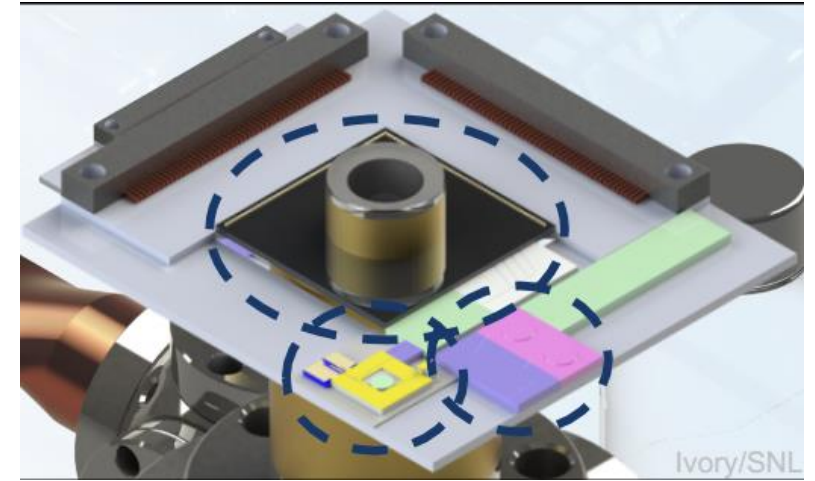
S. Ritter et al, “Opticlock: Transportable and easy-to-operate optical single ion clock”, EFTF 2021

Бортовой ФСОЧ Проект FOKUS (Германия)



Успешные суборбитальные
запуски 2016, 2018 гг

Сверхкомпактные оптические часы (Sandia-2023, проект “TicToc”)



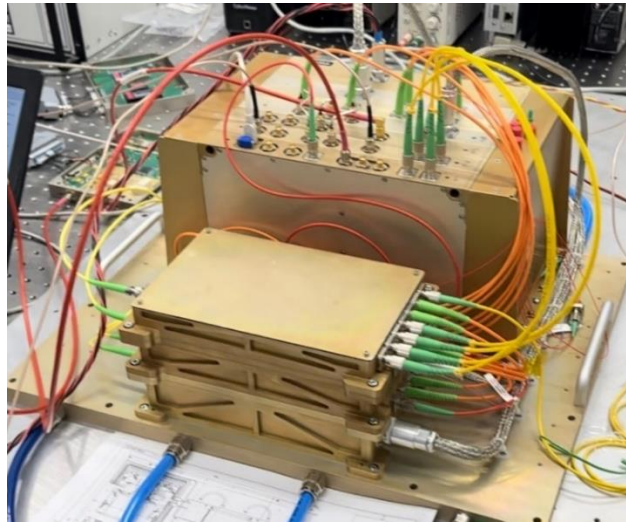
- Объем – 0,5 литра
- Потребляемая мощность 10 Вт
- Относительная нестабильность
 $< 1 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau}$
- Широкое использование технологий
интегральной фотоники

Проект ИБИС (РКС, ФИАН + кооперация)

Транспортируемые оптические часы на одиночном ионе Yb+ и волоконные фемтосекундные гребенки



- 5×10^{-16} отн. нестабильность @ 24 ч.
- 300 кг вес
- 1 м³ объем
- 1 ГГц выход
- Компактные оптические системы
- Модульная электроника
- Ионные спектрометры среднего масштаба (литр)
- Волоконные оптические гребенки (Авеста)

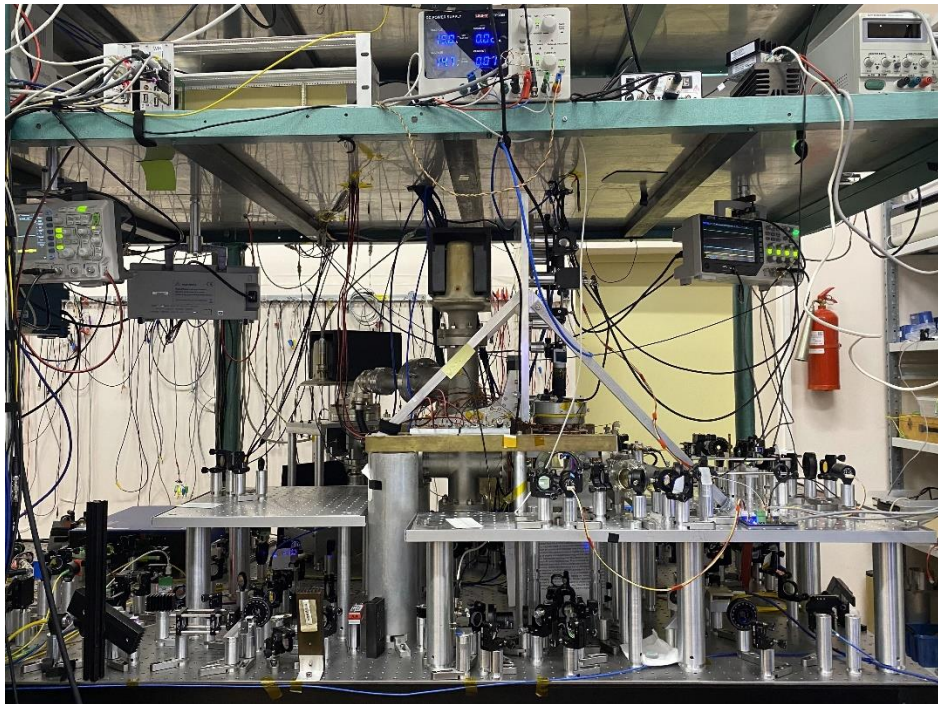


*K. Khabarova et al., Toward a New Generation of Compact Transportable Yb+ Optical Clocks
Symmetry 2022, 14(10), 2023*

От лабораторных систем к следующим поколениям

Лабораторные атомные оптические часы

Размер: оптический стол 2x3 м
нетранспортируемые



Транспортируемые оптические ионные часы

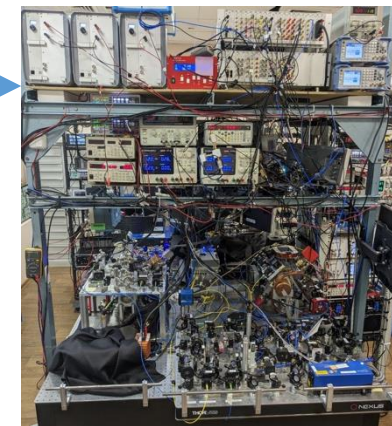
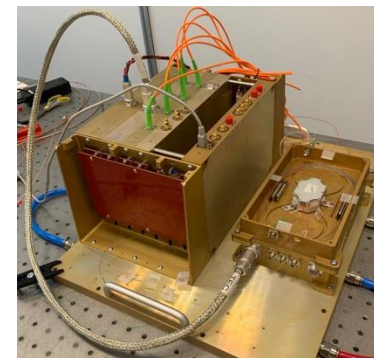
Масса – менее 300 кг
Объем – менее 1 м³

Модульная структура



Ультрастабильная лазерная система для БСУ

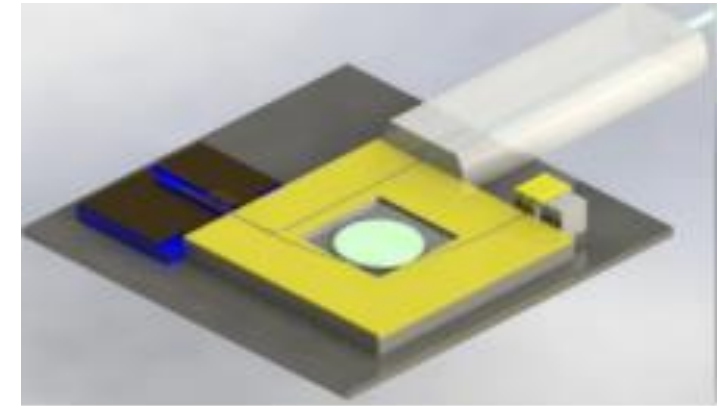
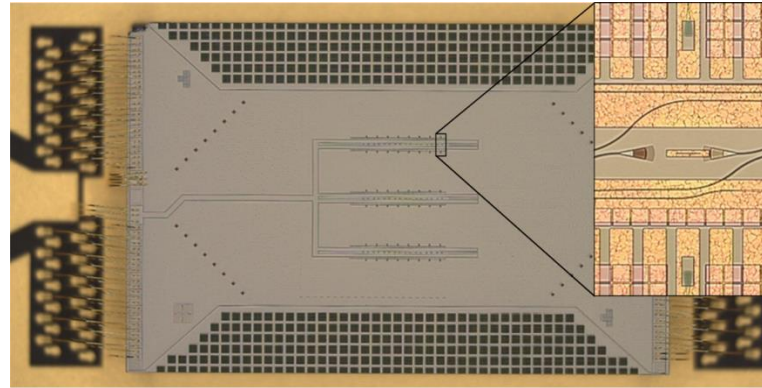
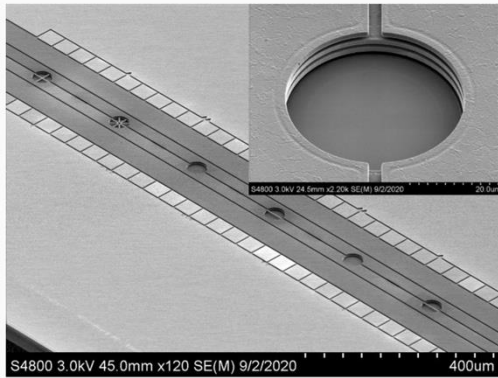
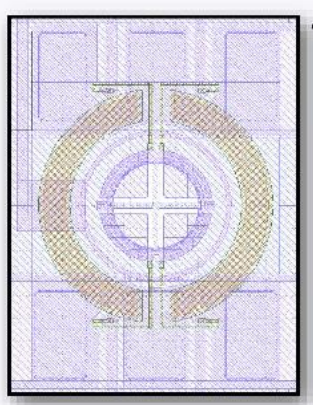
Масса – менее 15 кг
Объем – менее 0,03 м³



Ионный
квантовый
компьютер

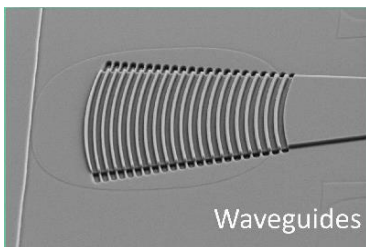
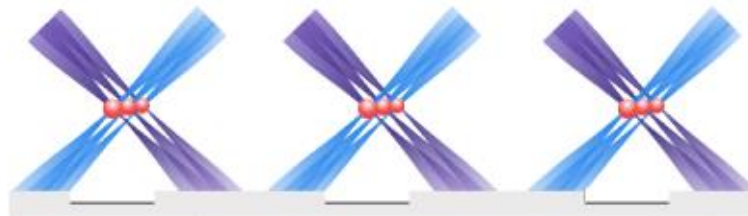


Технологии интегральной фотоники



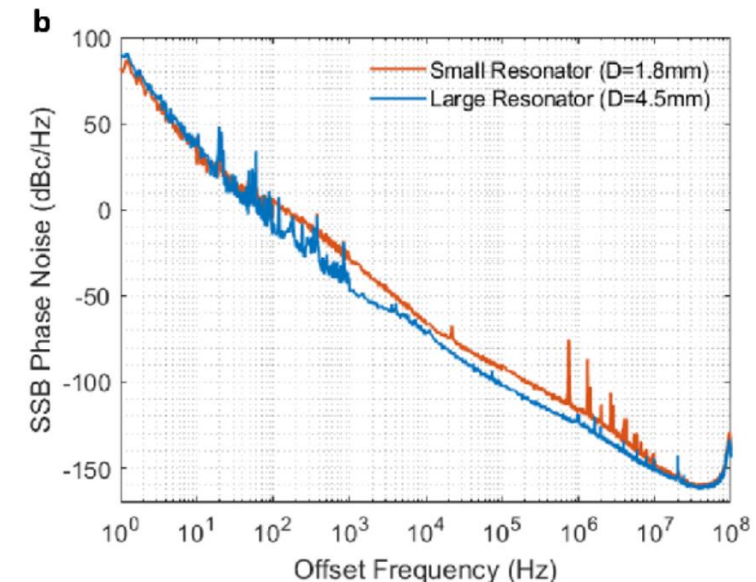
- Кремниевые фотодиоды интегрированные в планарную ионную ловушку
- эффективность детектирования одиночного фотона 20% (с просветлением 47%)

- Мультиионные планарные ловушки, управление
- Интегрированные волноводы
 - SiN – для 935, 760 нм
 - AlO – для 369 и 399 нм



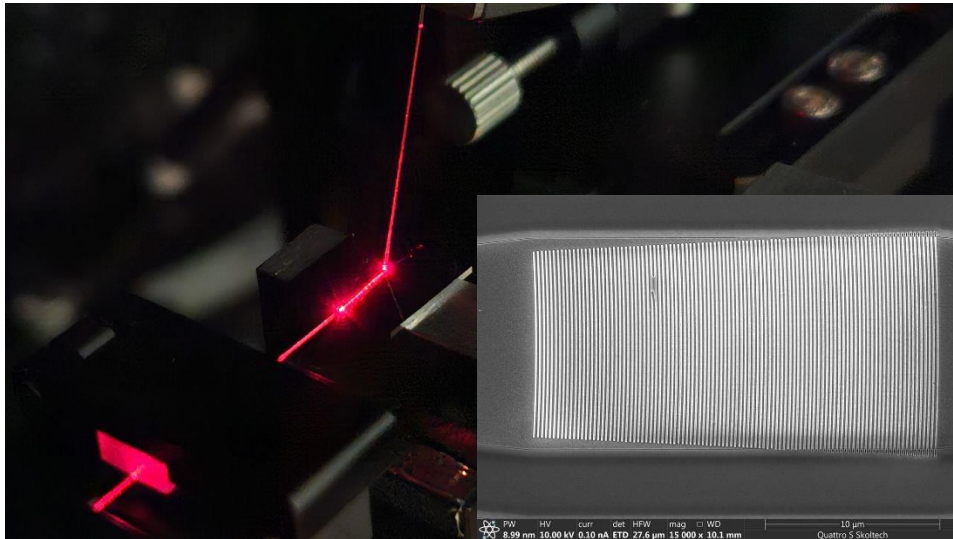
- Решетки переменного шага и ширины для фокусировки излучения над плоскостью ловушки
- Получены оптические структуры на все необходимые длины волн, интегрированы в ионную ловушку

- Ультразвукие лазеры на галерее шепчущих мод
- 871 нм, 10 Гц ширина по Лоренцевскому фиту



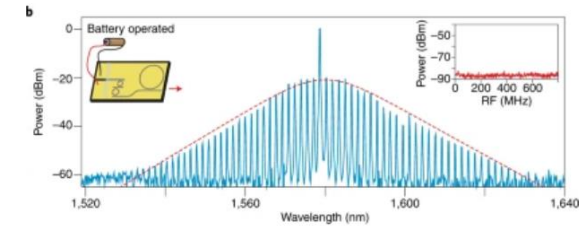
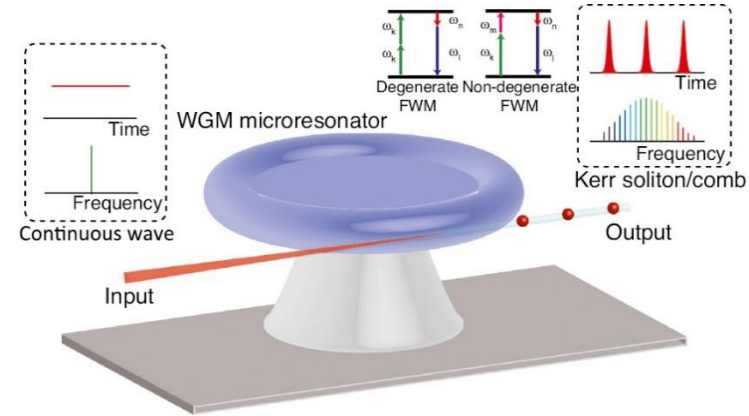
Интегральная фотоника для стандартов частоты и вычислений

Управление излучением (Сколтех – АО РКС)

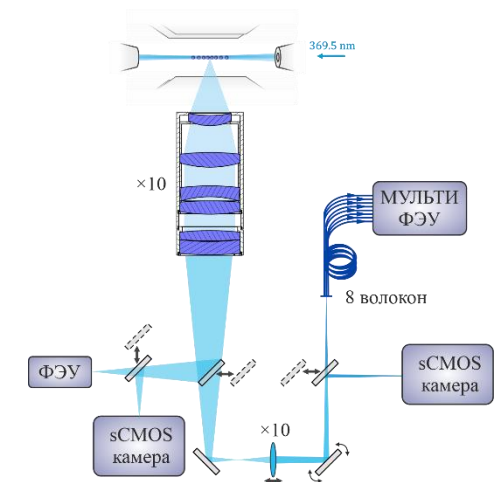
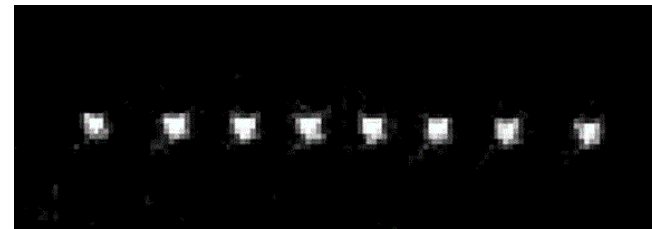


- Планарная решетка для вывода и фокусировки излучения 935 нм
- Аналог Sandia
- (Si_3N_4) технология
- Система управления и адресации ионом

Объемные резонаторы на галерее шепчущих мод (РКЦ)



Индивидуальное управление массивами ионов (ФИАН)

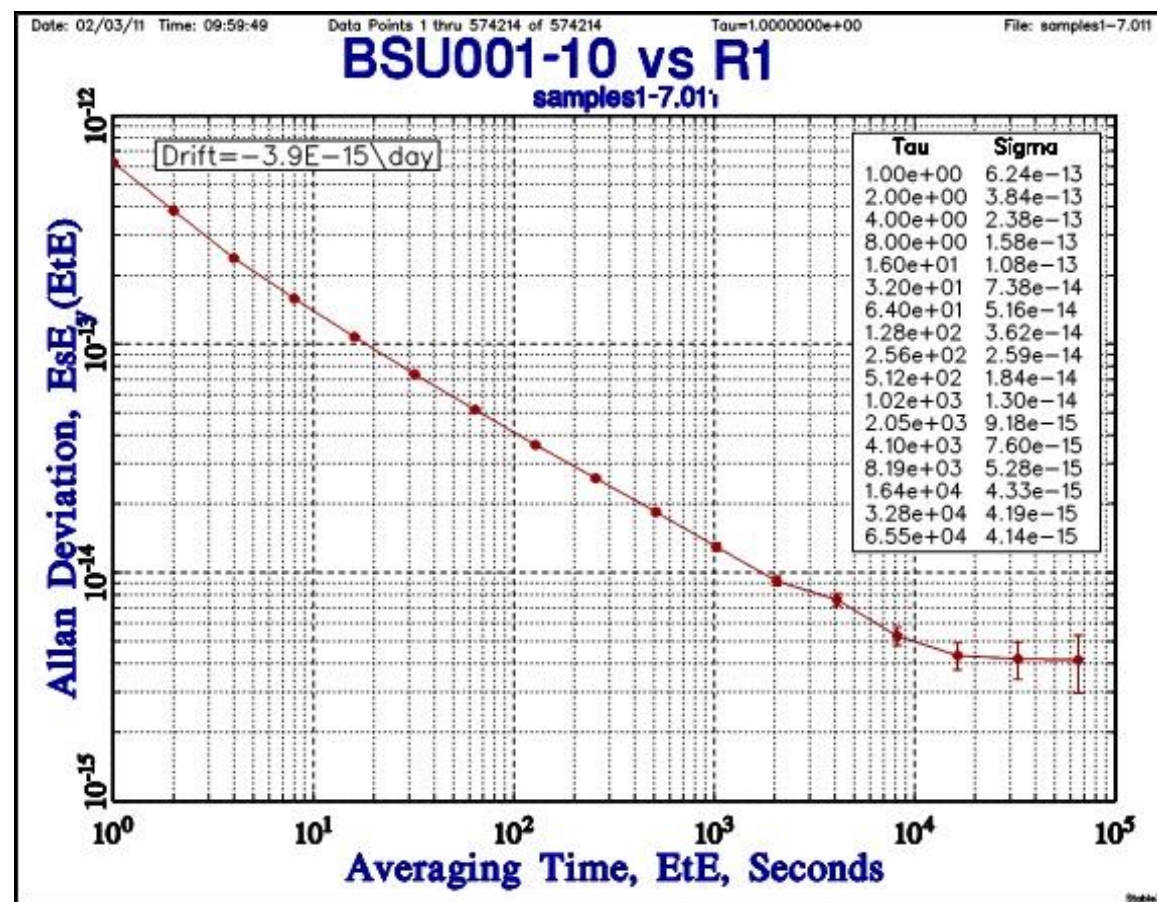


Водородные мазеры для ГЛОНАСС и GALILEO

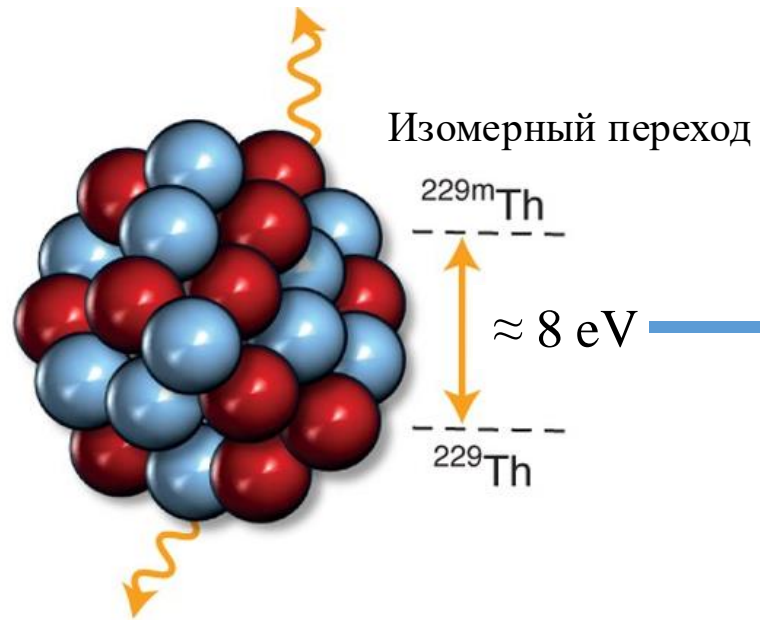


Пассивный водородный мазер “ВРЕМЯ-Ч”

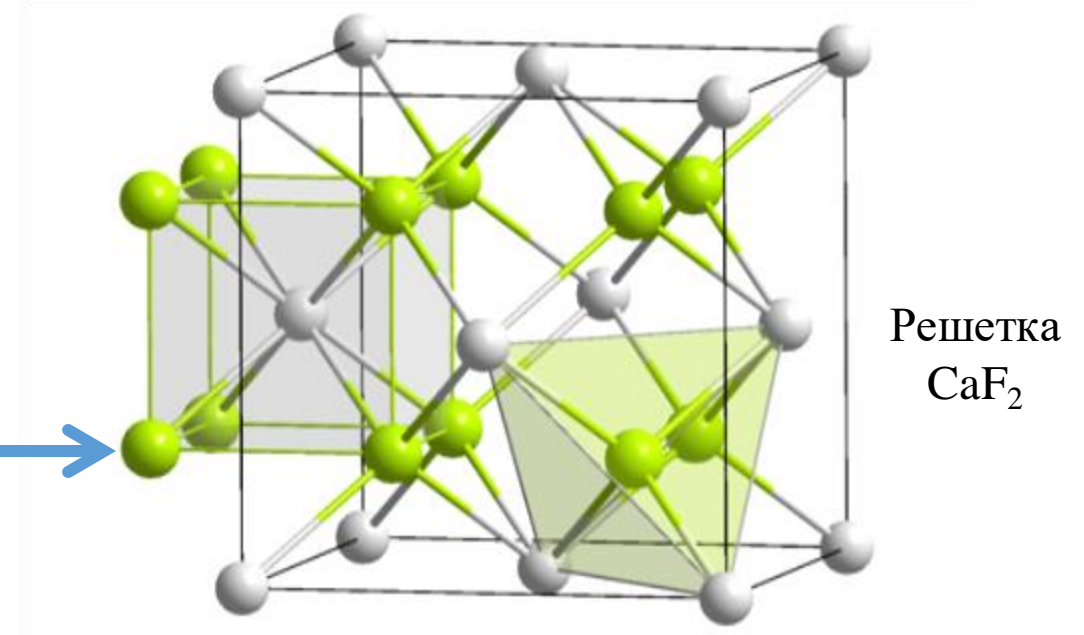
- Вес 16 кг
- Нестабильность частоты $<10^{-14}$ за 10000 с – 1 сут
- лучше 1 нс /сут



Перспективы: ядерный переход в Th-229



Ядро характеризуется малыми значениями электрических и магнитных моментов и экранировано электронной оболочкой от внешних полей



Высокая стабильность и точность ядерных часов сохраняется даже в случае, когда атомы имплантируются в решётку некоторого кристалла +

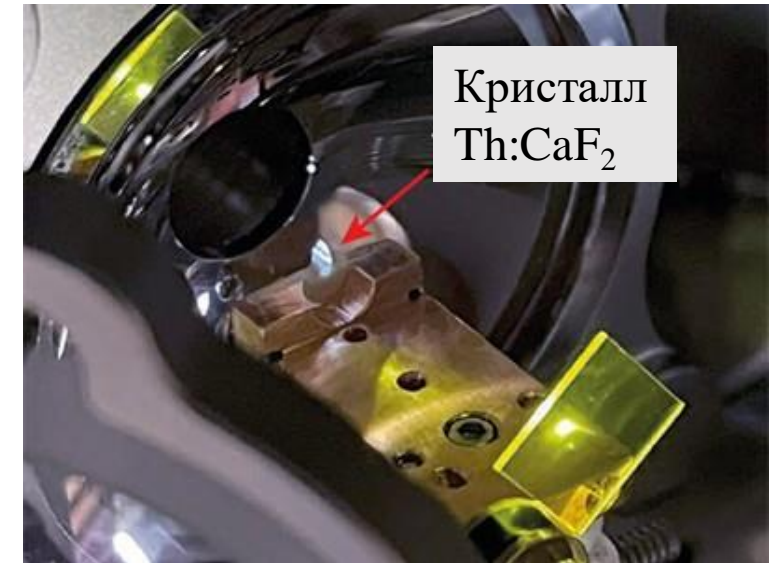
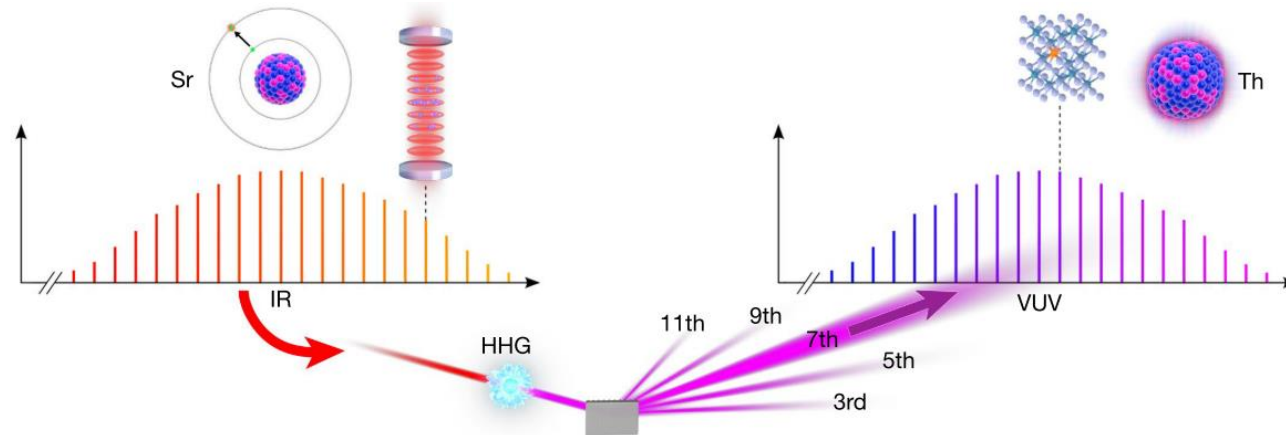
- Возможность Мёссбауэровской спектроскопии
- Компактность часовой мишени $\sim 1 \text{ мм}^3$
- Большое число опрашиваемых атомов: $10^4 - 10^7 \text{ в } \lambda^3$

Лазерное возбуждение ядра тория

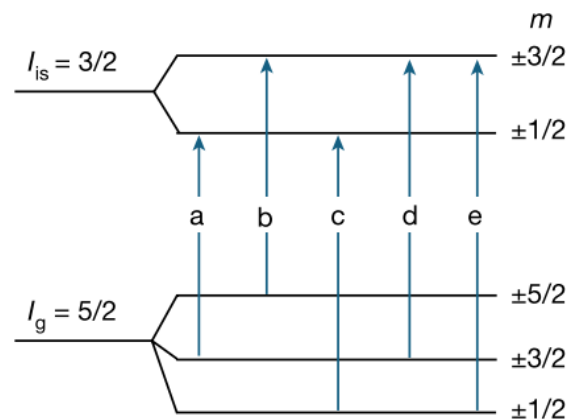
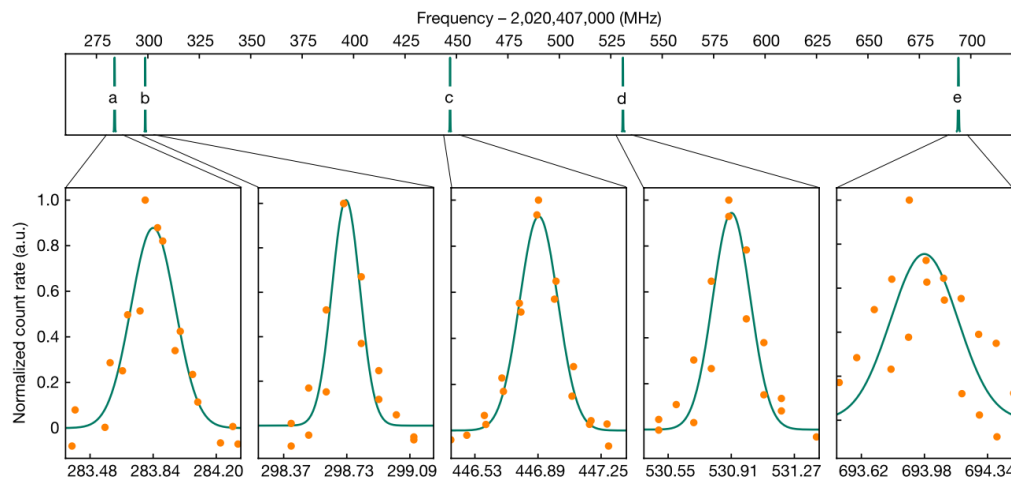
nature

Frequency ratio of the $^{229\text{m}}\text{Th}$ nuclear isomeric transition and the ^{87}Sr atomic clock

[Chuanqun Zhang](#), [Tian Ooi](#), [Jacob S. Higgins](#), [Jack F. Doyle](#), [Lars von der Wense](#), [Kjeld Beeks](#), [Adrian Leitner](#), [Georgiy A. Kazakov](#), [Peng Li](#), [Peter G. Thirolf](#), [Thorsten Schumm](#) & [Jun Ye](#)
Nature **633**, 63–70 (2024) | [Cite this article](#)



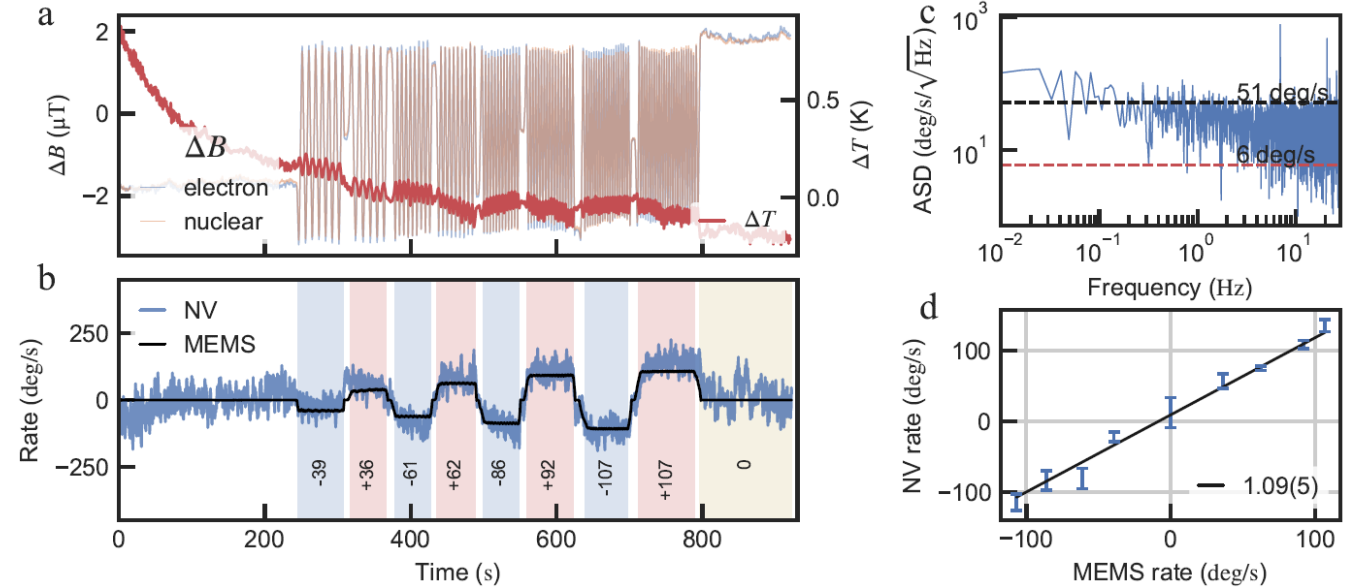
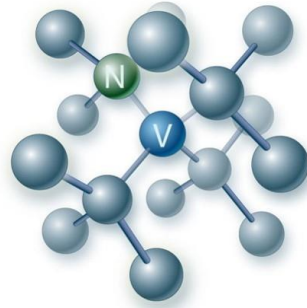
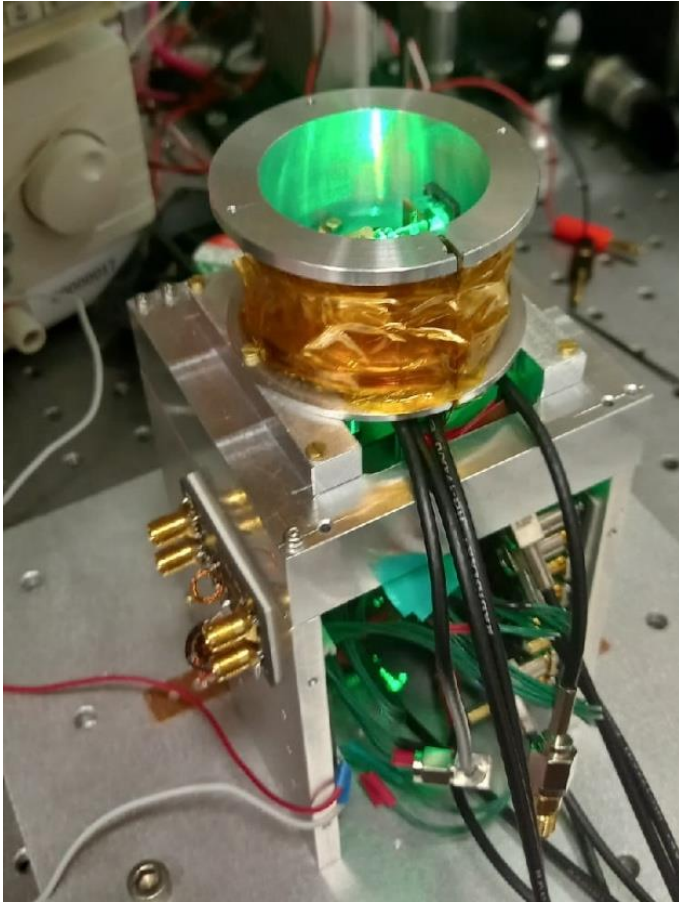
Квадрупольная структура ядерного перехода



- Измерено время жизни изомерного состояния в кристалле (641 с)
- Измерены квадрупольный момент ядра и градиент поля решетки
- Измерено отношение частот часовых переходов в тории и в стронции

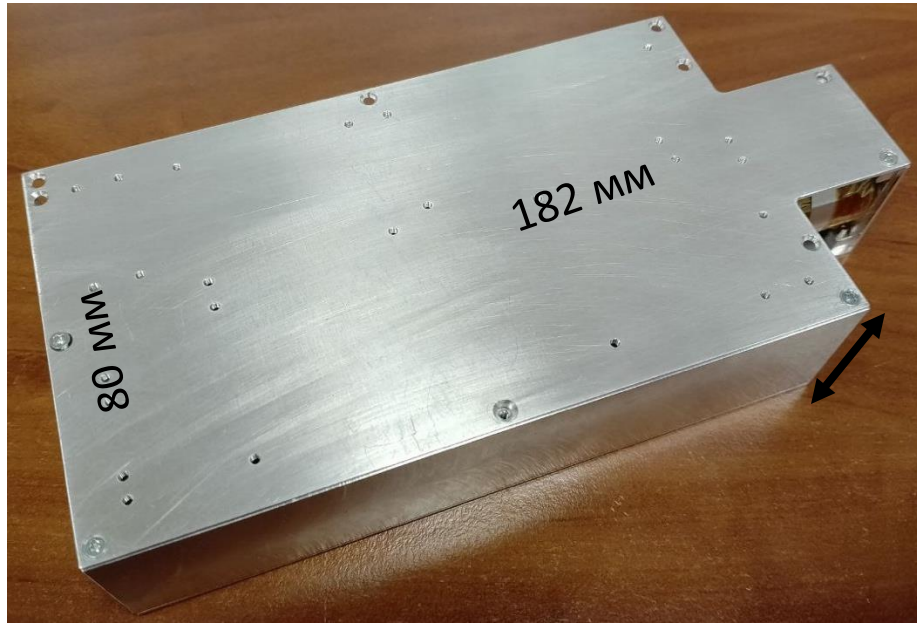
Перспективные сенсоры на NV центрах в алмазе: гироскоп

Перспективные спиновые гироскопы (ФИАН)



- электроника занимает размеры порядка 3-х листов А4
- Размеры чувствительного элемента+оптики: $\varnothing 6 \times 8$ см
- Спектральная чувствительность 100 град/ $\sqrt{\text{час}}$

Перспективные сенсоры на NV центрах в алмазе: магнетометр



Тип: векторный магнитометр

Чувствительность – $40 \text{ нТ/Гц}^{0.5}$

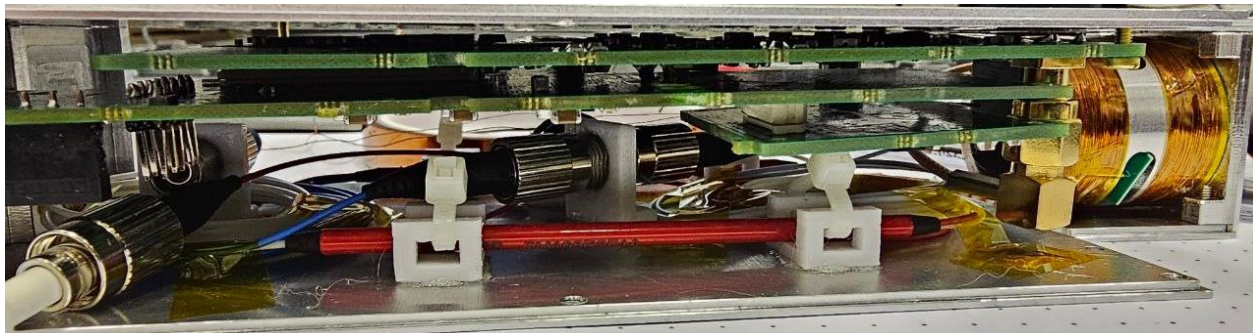
Энергопотребление – 15 Вт

Частота выдачи измерений – 300 Гц

Масса < 700 г

Объем < 400 см^3

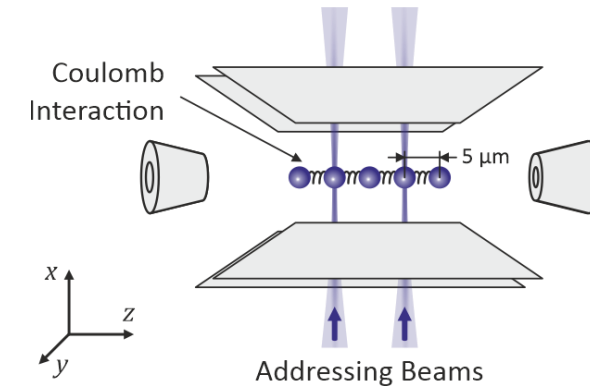
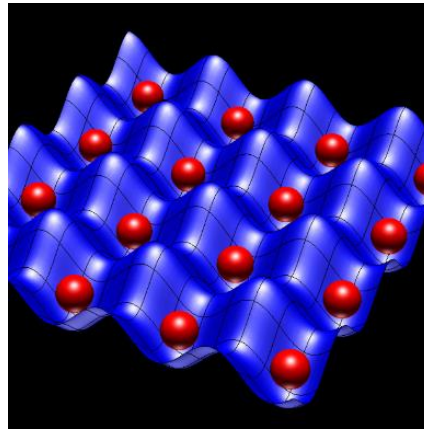
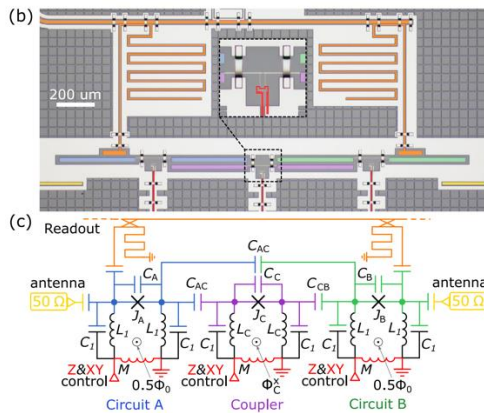
С макетом проводились полевые испытания по обнаружению металлических объектов



Дорожная карта “Квантовые вычисления” 2020-2024

50-кубитный квантовый вычислитель

Создание многокубитных квантовых вычислителей, выполнение квантовых алгоритмов
(Госкорпорация “РОСАТОМ”)



Сверхпроводники

- Сверхпроводящая электрическая цепь в криостате
- Кубит – коллективном состоянии многих электронов

Фотоны

Атомы

- Атомы в оптической решетке
- Кубит – в электронных состояниях атома
- Двухкубитная операция – через ридберговские состояния атома

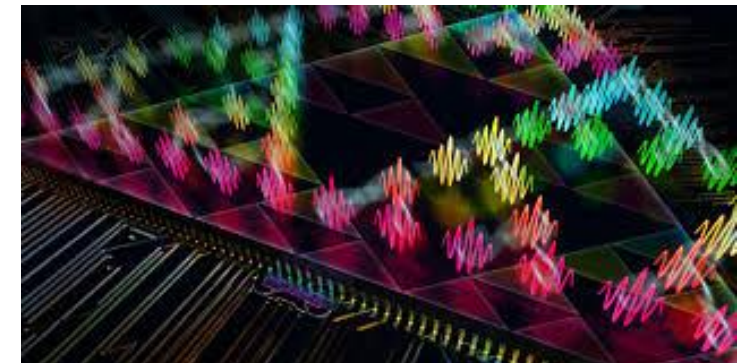
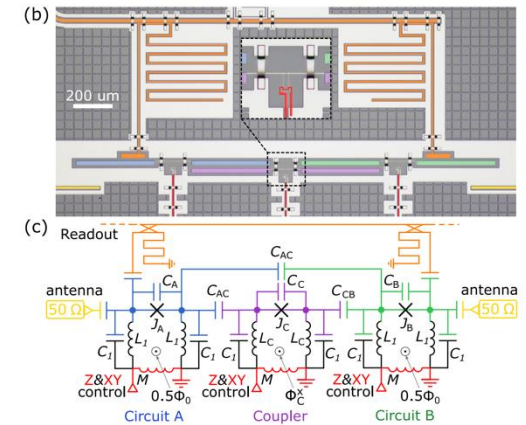
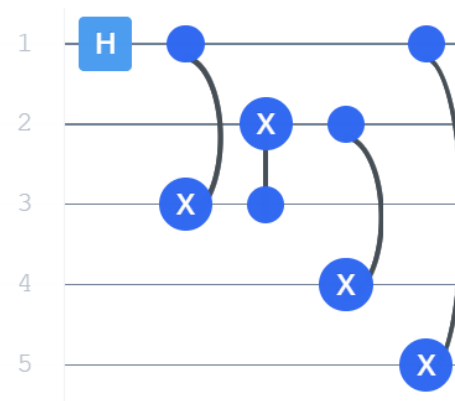
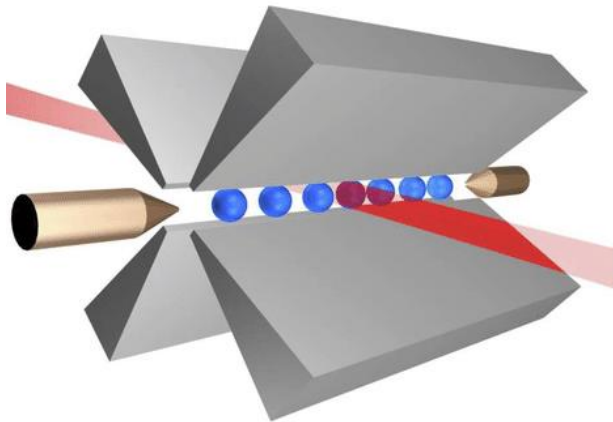
Полупроводники

Ионы

- Ионы в электромагнитных ловушках
- Кубит – в электронных состояниях иона
- Двухкубитная операция – через кулоновское взаимодействие

Квантовые и фотонные вычисления

- разработка новых физических платформ для ускорения специализированных алгоритмов и снижения энергопотребления
- ожидаемое преимущество в полезных задачах распознавания, квадратичной оптимизации, квантовой химии, шифрования



Квантовые vs классические вычисления



РОСАТОМ



Ключевое свойство— запутанность

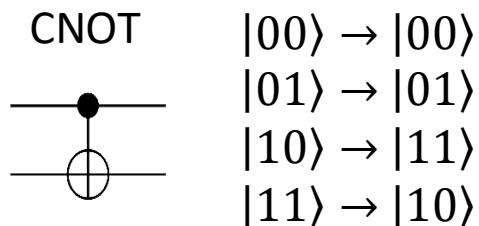
Нет запутанности

$$\alpha_1|0\rangle_1 + \beta_1|1\rangle_1 + \alpha_2|0\rangle_2 + \beta_2|1\rangle_2 + \alpha_3|0\rangle_3 + \beta_3|1\rangle_3 - 2^N \text{ чисел}$$

Есть запутанность

$$\alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{011}|011\rangle + \\ + \alpha_{100}|100\rangle + \alpha_{110}|110\rangle + \alpha_{101}|101\rangle + \alpha_{111}|111\rangle - 2^N \text{ чисел}$$

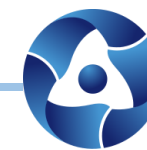
Двухкубитные операции
генерируют запутанность



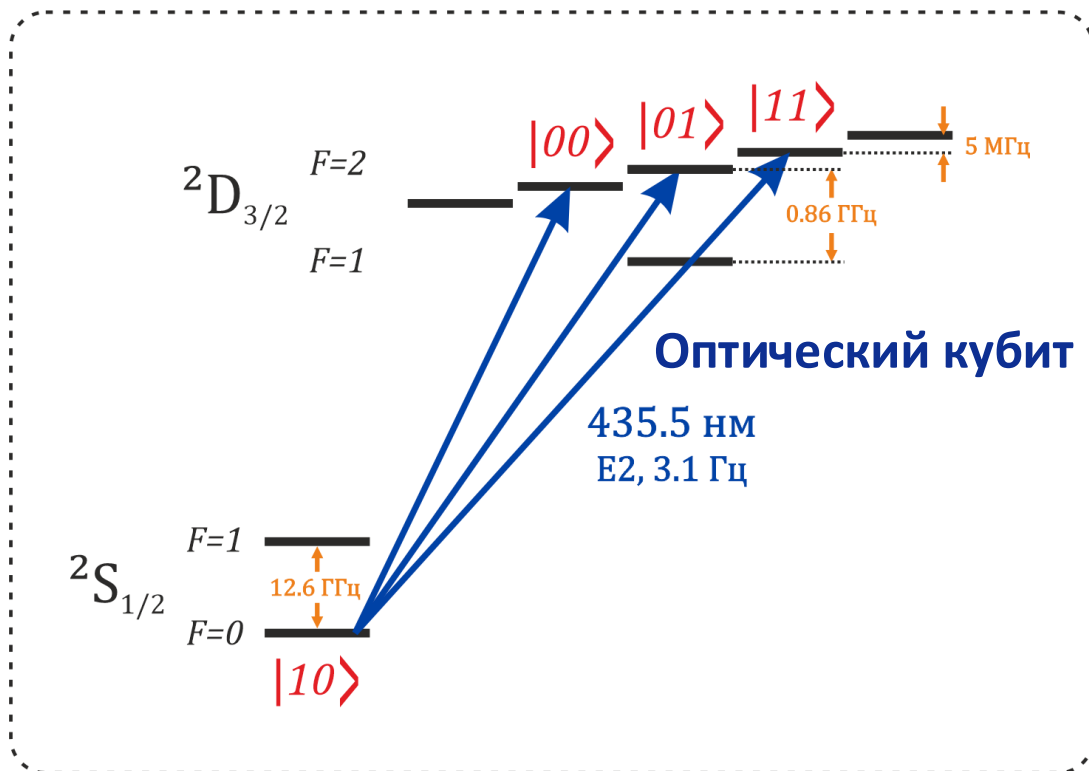
Области применения

- Взлом классической криптографии
- Синтез новых химических соединений/лекарств
- Решение логистических задач
- Моделирование динамики сложных систем
- Моделирование физических процессов
- Машинное обучение, искусственный интеллект

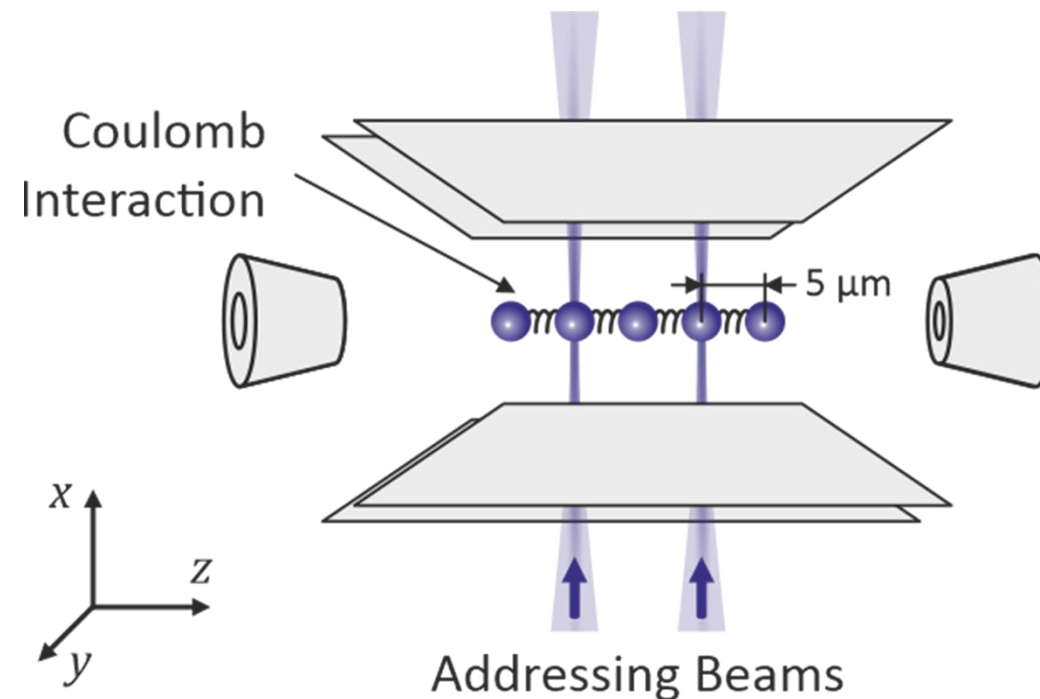
Кодировка – оптический переход (кубит)



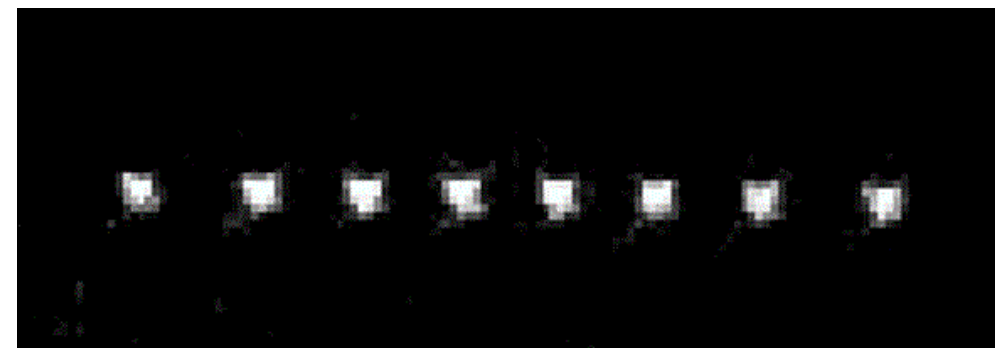
РОСАТОМ

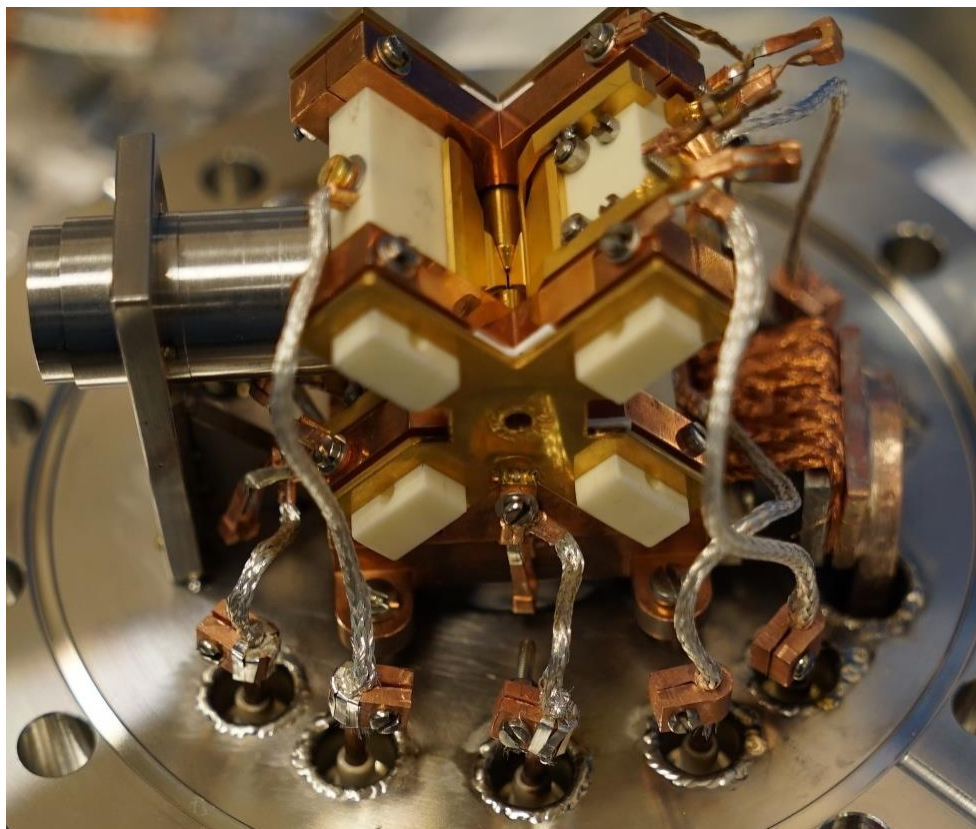


Ион $^{171}\text{Yb}^+$



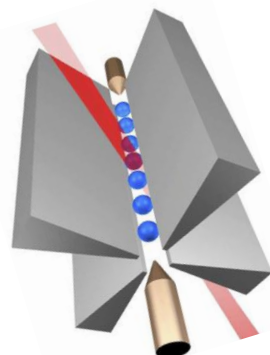
- Aksenov et al., Realizing quantum gates with optically addressable $^{171}\text{Yb}^+$ ion qubits, *Phys. Rev. A* 107, 052612 (2023)
- Nikolaeva A. S., Kiktenko E. O., Fedorov A. K. Universal quantum computing with qubits embedded in trapped-ion qubits, *Phys. Rev. A* 109, 022615 (2024)



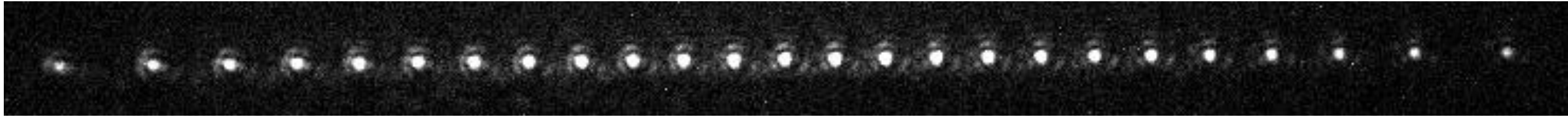


Линейная ловушка Пауля

- $\omega_{\text{rad}} = 2 \pi \times 3.8 \text{ MHz}$
- $\omega_{\text{ax}} = 2 \pi \times 120 \text{ kHz}$
- внутривакуумная оптика
- охлаждение



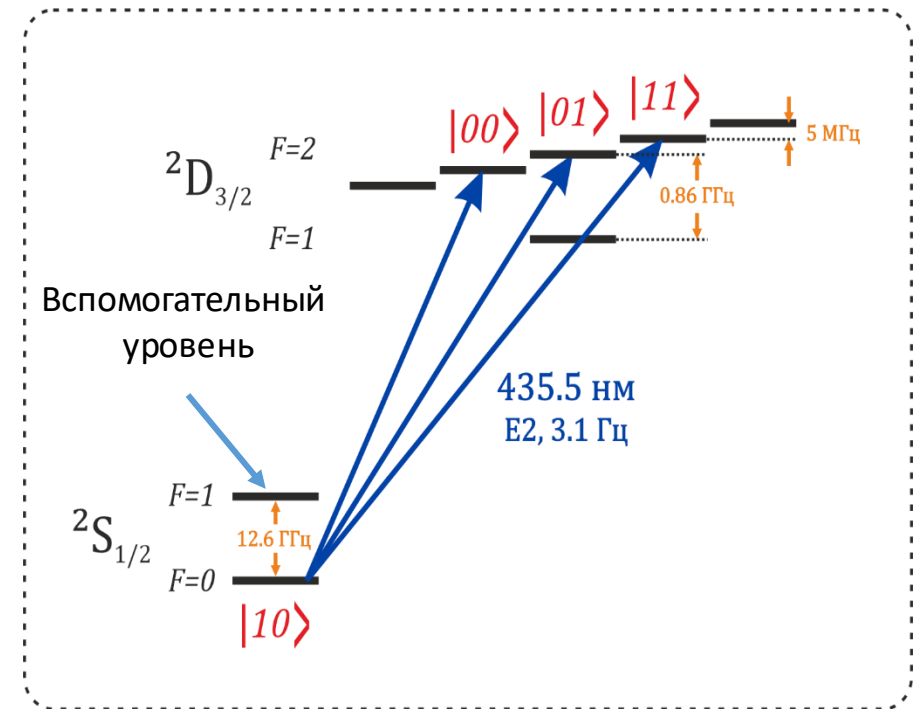
Ионный квантовый вычислитель



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

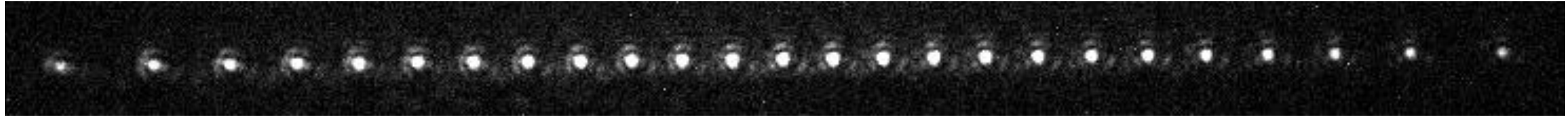
25 ионов (квартов), каждый из которых кодирует по 2 кубита

- Индивидуальная адресация и считывание каждого иона
- Полный универсальный набор однокудитных и двухкудитных операций
- Полная связность
- Возможность использования дополнительных уровней-анцилл для оптимизации квантовых алгоритмов
- Совместимость с прототипом облачной платформы



$^{171}\text{Yb}^+$

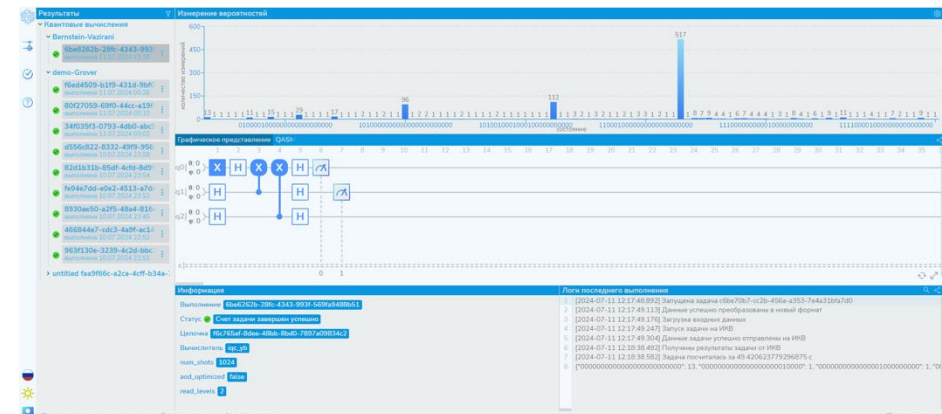
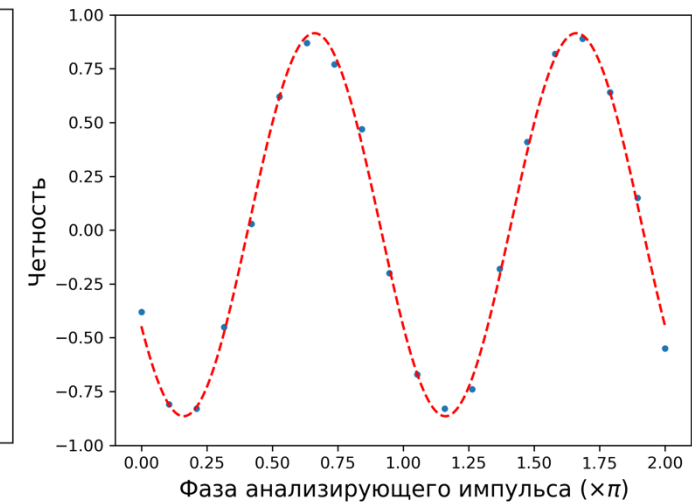
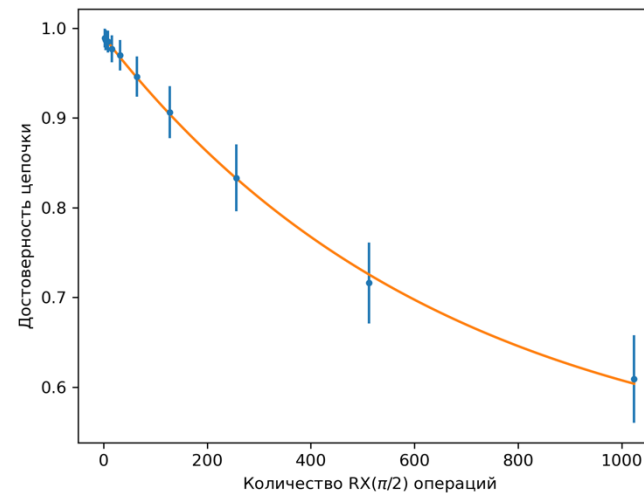
Демонстрация 50-кубитного вычислителя (2024 г)



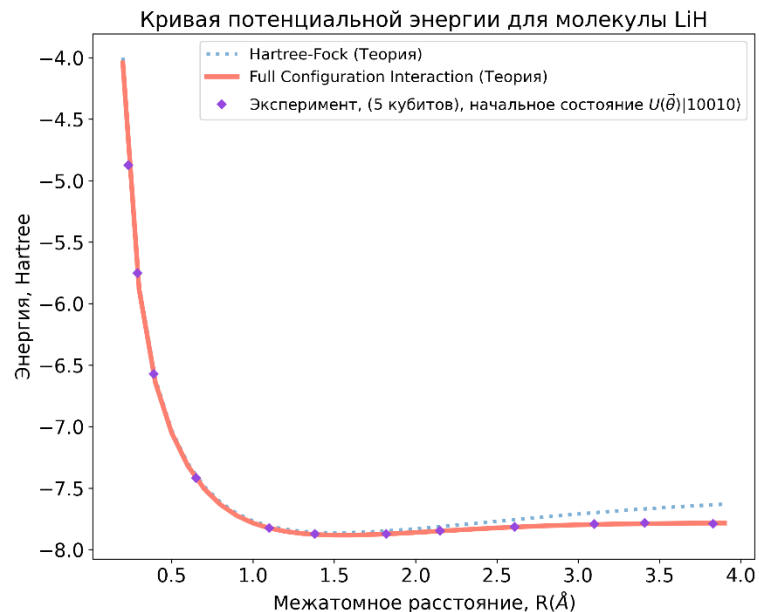
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

Результаты:

- $F_{1Q} = 99.85\%$ (рандомизированный бенчмаркинг)
- $F_{2Q} > 90\%$ (достоверность подготовки состояния Белла)
- Запуск бенчмаркингowych алгоритмов (алгоритм Бернштейна-Вазирани, алгоритм Гровера)



Квантовая химия



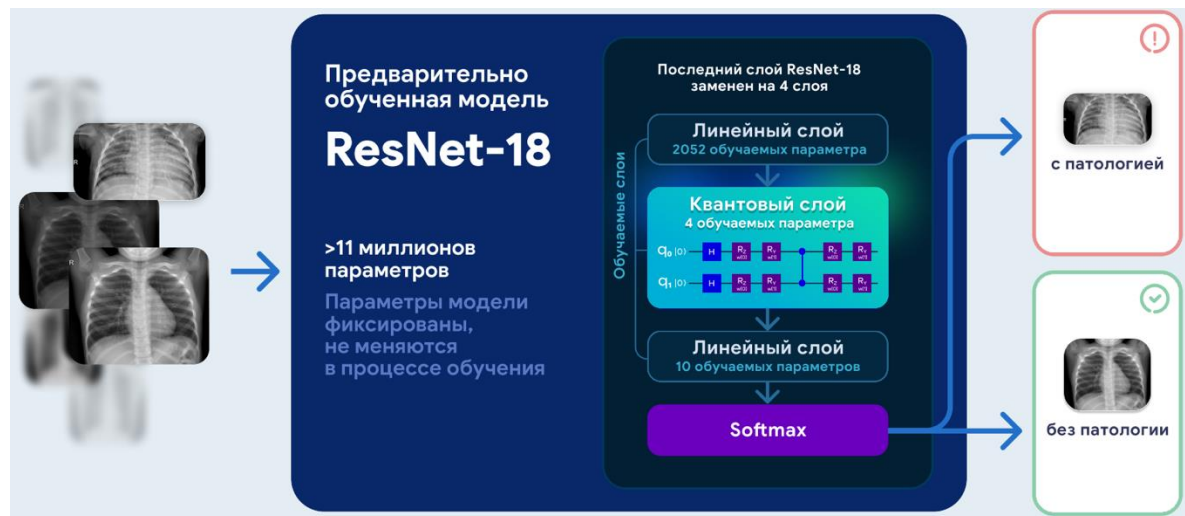
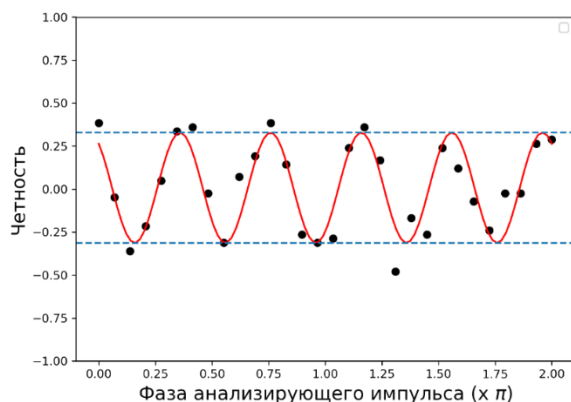
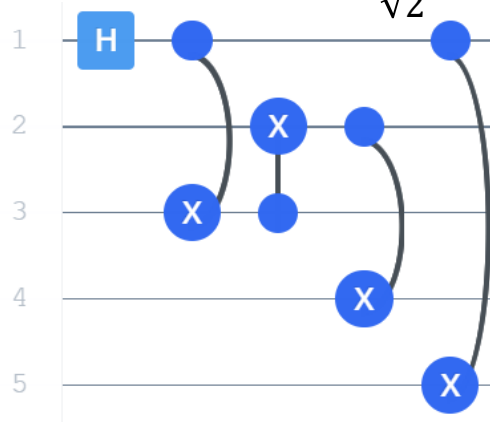
Фокусировка на задачах, наиболее полно использующих преимущества платформы: высокое качество операций, полная связность

Квантовое машинное обучение

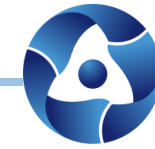


Полностью перепутанное GHZ состояние

$$|GHZ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00000\rangle + |11111\rangle)$$



Алгоритм приближенной оптимизации

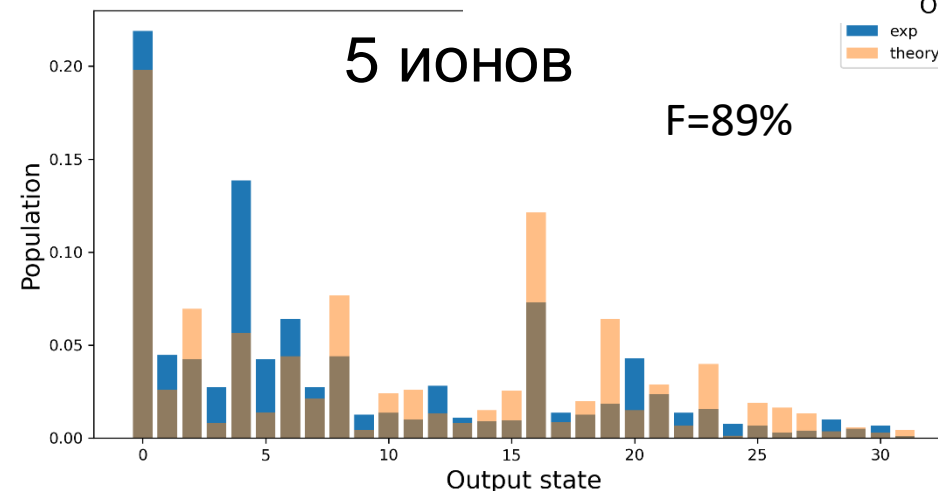
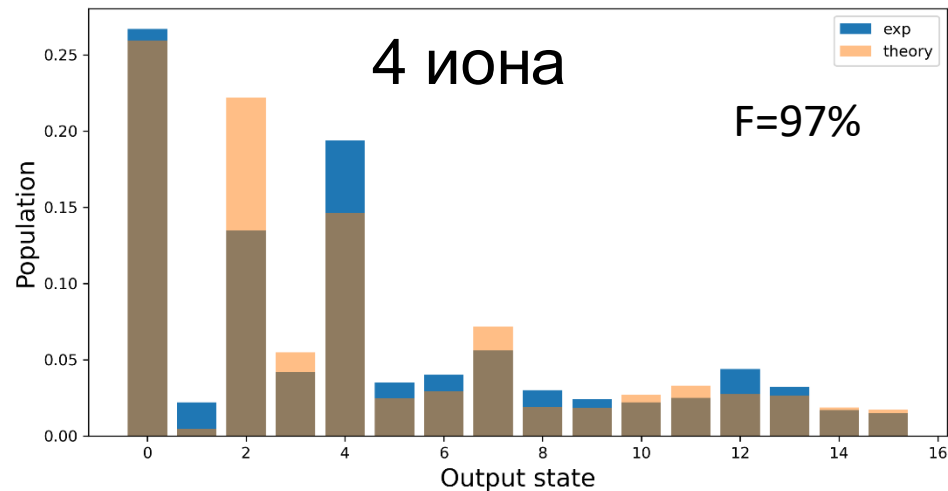
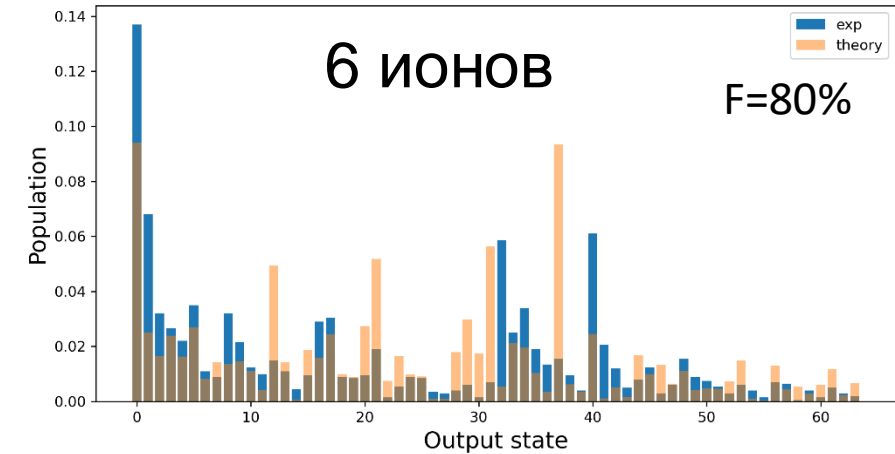
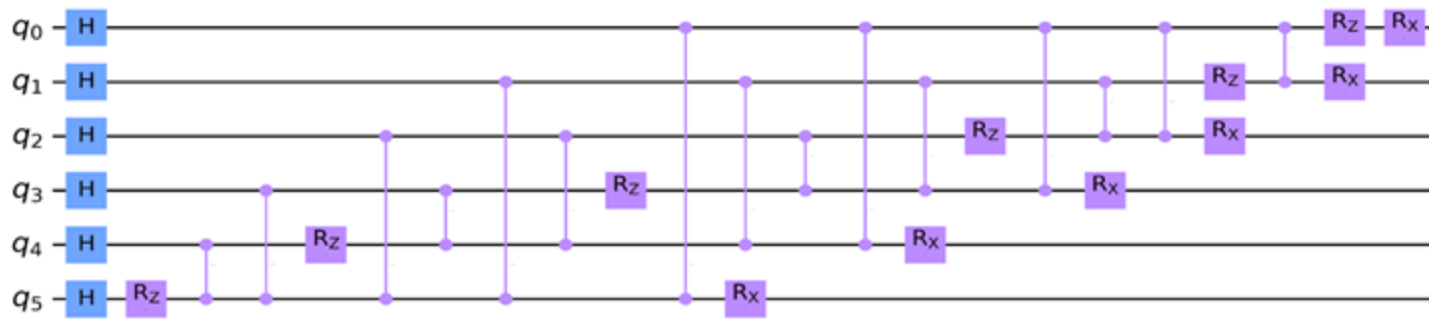


РОСАТОМ

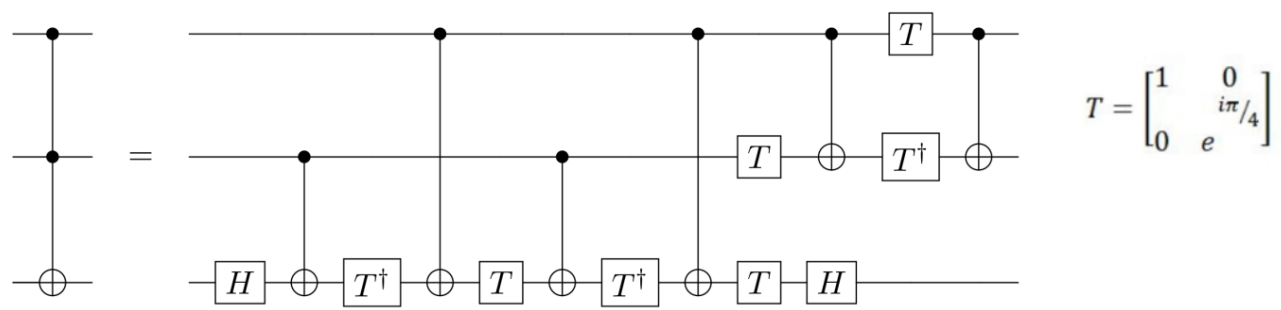


1934 2024

- Выполнен алгоритм Шнорра, включая квантовую часть frQAOA (квантовый алгоритм приближенной оптимизации с фиксированными параметрами)
- Число $1591=37 \times 43$ разложено на простые множители с использованием 6 ионов из 10
- 15 двухкубитных операций с произвольными углами, полная связность



Коррекция ошибок – гейт Тоффоли

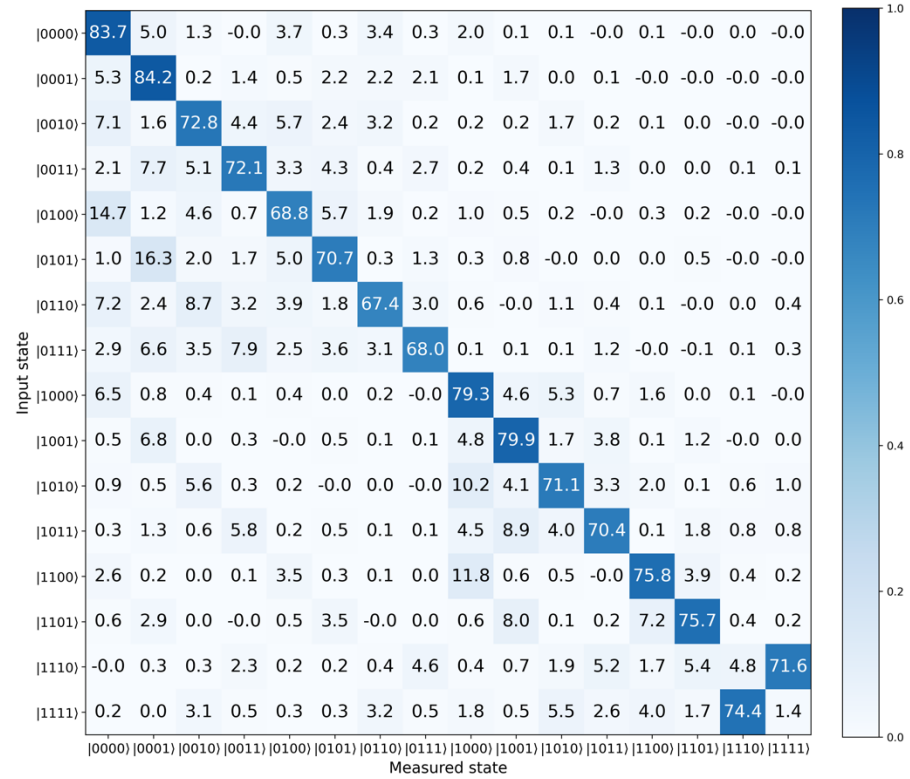


N	3	4	5	6
2Q	6	14	36	92

Кубитная реализация (4 кубита) F = 39%



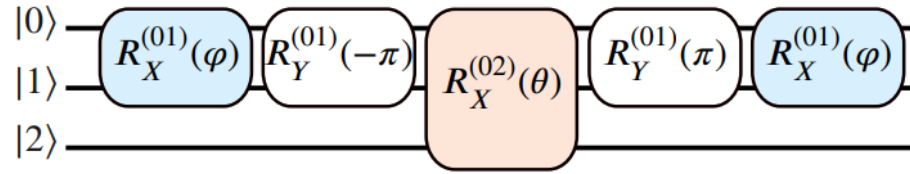
Кудитная реализация (4 кубита) F = 74%



$$H = \sigma_x + ir\sigma_z = \begin{pmatrix} ir & 1 \\ 1 & -ir \end{pmatrix}$$

$$h_{\pm} = \pm h, h = \sqrt{1 - r^2}$$

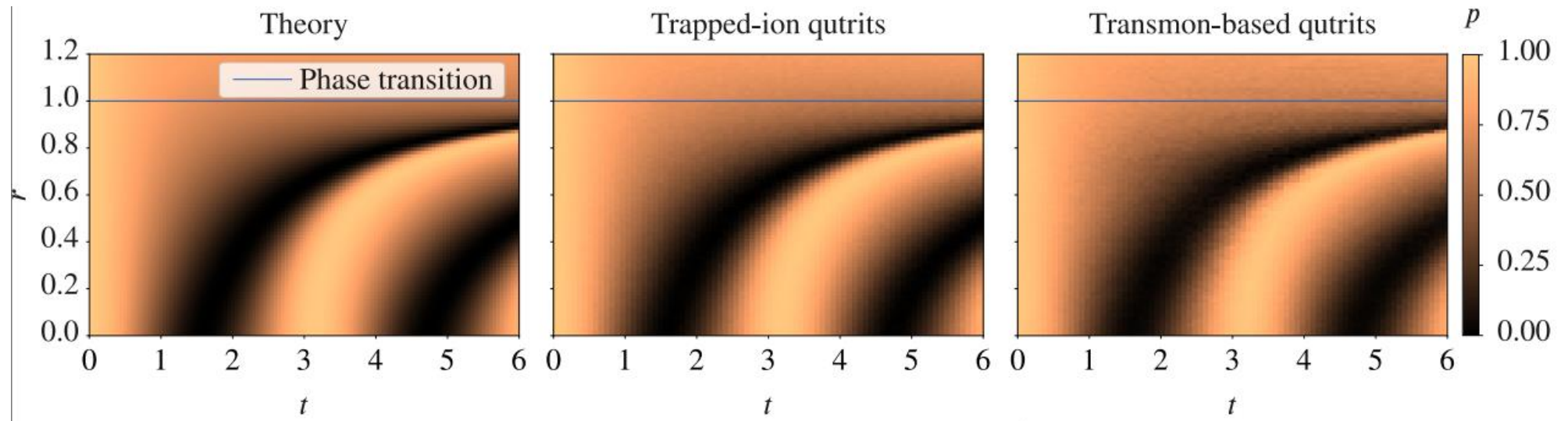
$r < 1$: PT-symmetry unbroken
 $r > 1$: PT-symmetry broken



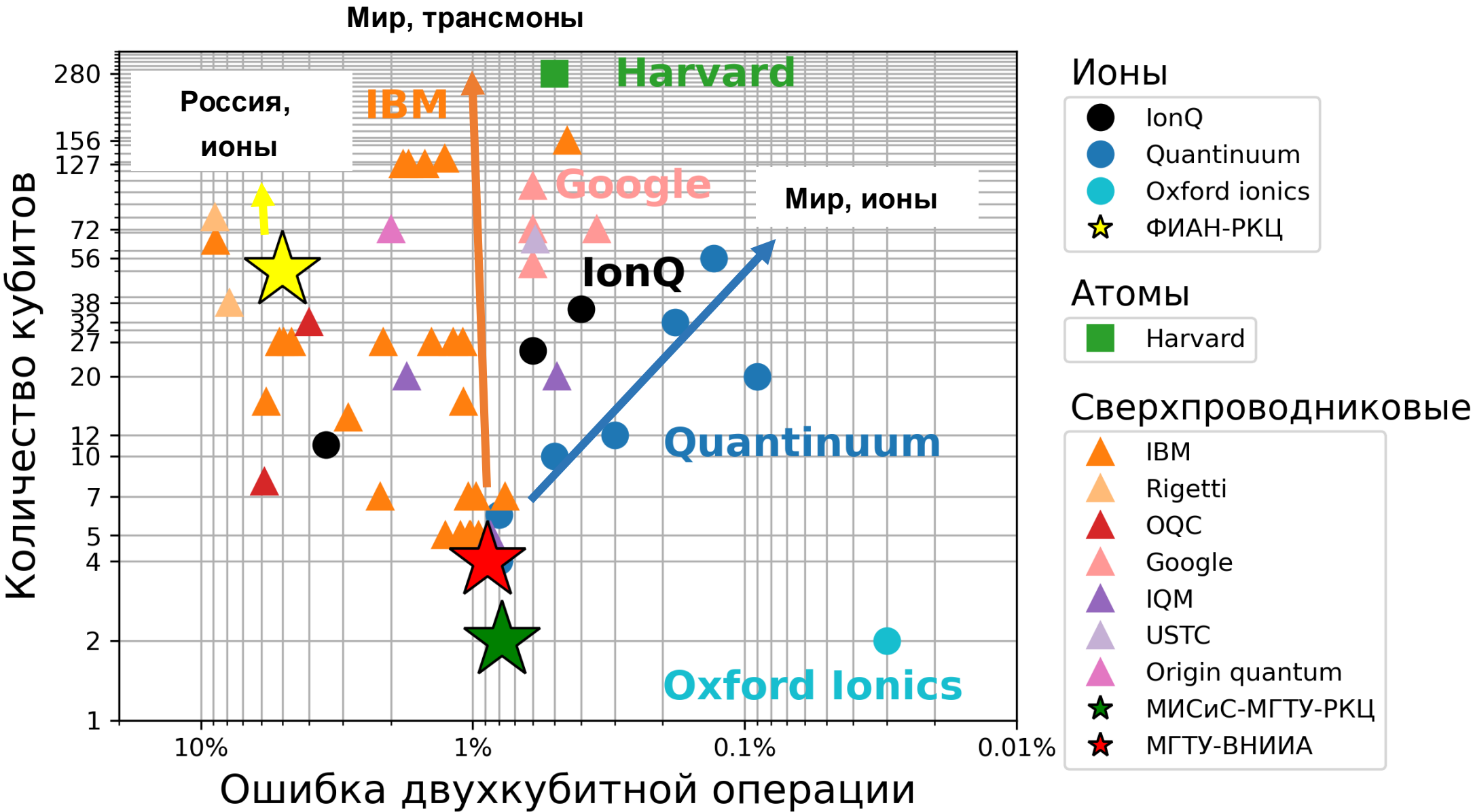
$$\sigma_{\pm}(t) = \frac{1}{|h|} \left(\sqrt{|1 - r^2 \cos^2(ht)|} \pm |r \sin(ht)| \right)$$

$$\varphi(r, t) = \arctan \frac{\tan(ht)}{h}, \quad \theta(r, t) = -2 \arccos \frac{\sigma_-}{\sigma_+}$$

Параметры гамильтониана r, t кодируются в φ, θ



Количество кубит vs достоверность



Проведены алгоритмы:

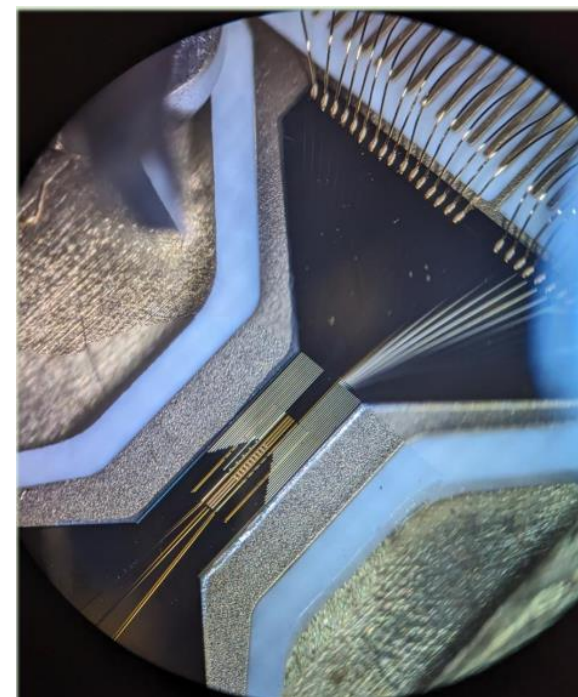
- Гровера (3 кубита).
- Берштейна-Вазирани (5 кубит).
- Моделирования молекул гидрида лития (5 кубит) и водорода.
- Распознавание рукописных цифр (4 кубита).
- Распознавание патологий на флюорограммах легких (2 кубита).
- Разложение на простые множители (числа 1591 методом Шнорра (6 кубит)).
- Симуляции РТ-симметрий (5 кубит в параллели).
- Многокубитные гейты Тоффоли (до 6 кубитов).
- GHZ состояние (5 ионов).



Запуск алгоритма квантовой химии.
Июль 2023 года

- Квантовые компьютеры будут использоваться для решения практически значимых задач и моделирования физических процессов
- Квантовые вычислители будут использоваться в качестве сопроцессора для выполнения специализированных операций
- Будет использоваться (эффективно) несколько сотен кубит, $F(2Q) > 99.99\%$
- Алгоритмы на логических кубитах
- Лидеров квантовой гонки будет определять освоение и применение технологий микроэлектроники

Планарная ионная ловушка ФИАН





Спасибо за внимание!