

Квантово-оптические технологии для сенсорики и вычислений

Н.Н. Колачевский

Развитие квантовых технологий в мире

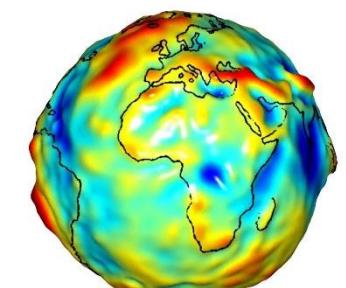
- Европа, Флагманская программа (Quantum technology flagship – QTF), 1 млрд. евро на 10 лет
- Великобритания, Национальная программа развития квантовых технологий, £270 млн. на 5 лет
- США, программа «Национальная квантовая инициатива», 1.275 млрд. евро на 5 лет
- Китай, Национальная квантовая лаборатория,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



www.glonass-iac.ru



www.jpl.nasa.gov



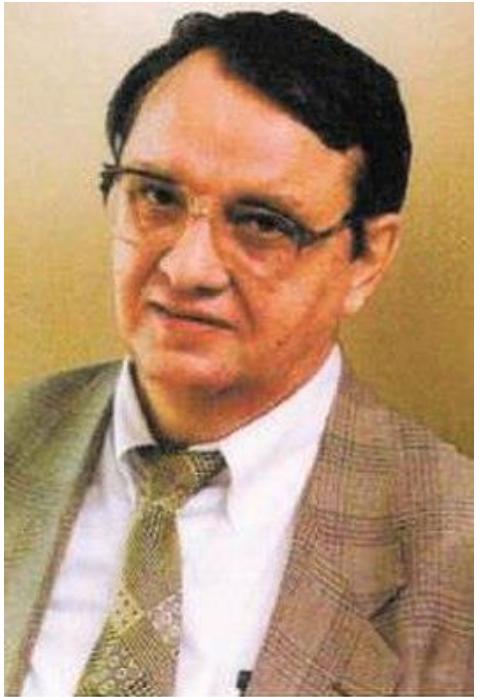
www.microsemi.com

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

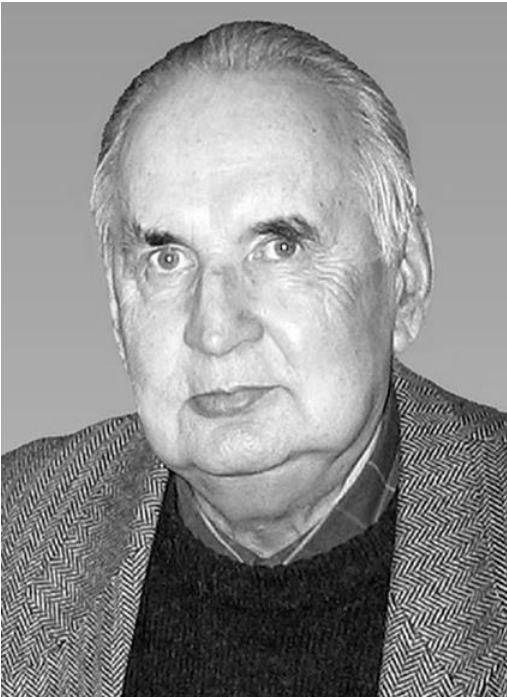
Измеряемые величины

- 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. Собельман
атомная спектроскопия
ФИАН



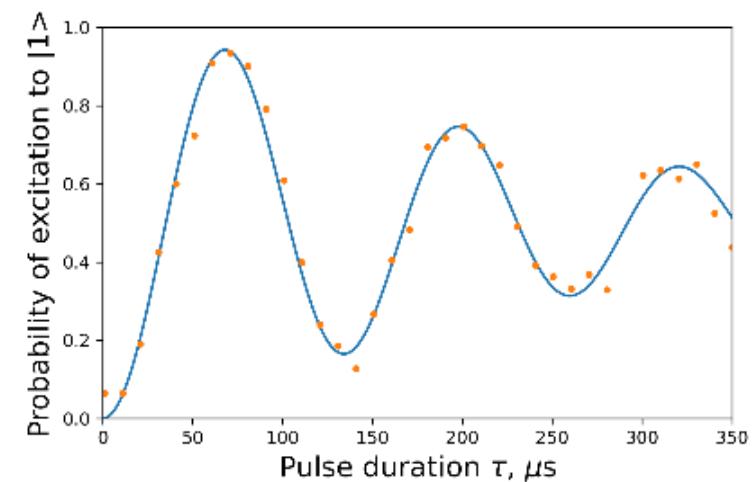
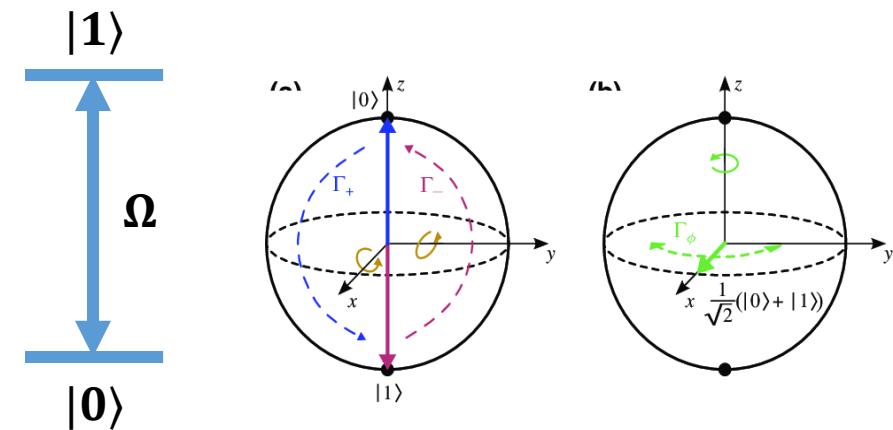
В.П. Чеботаев
лазерная спектроскопия
сверхвысокого разрешения
ИЛФ СО РАН



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

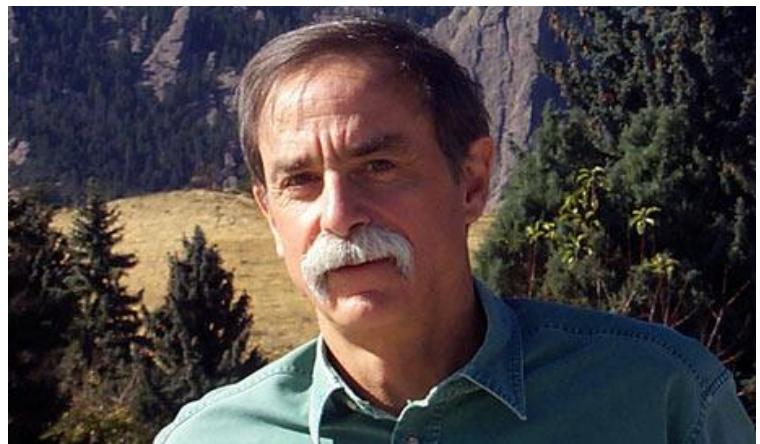


Прорывы на рубеже XXI века

- 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)



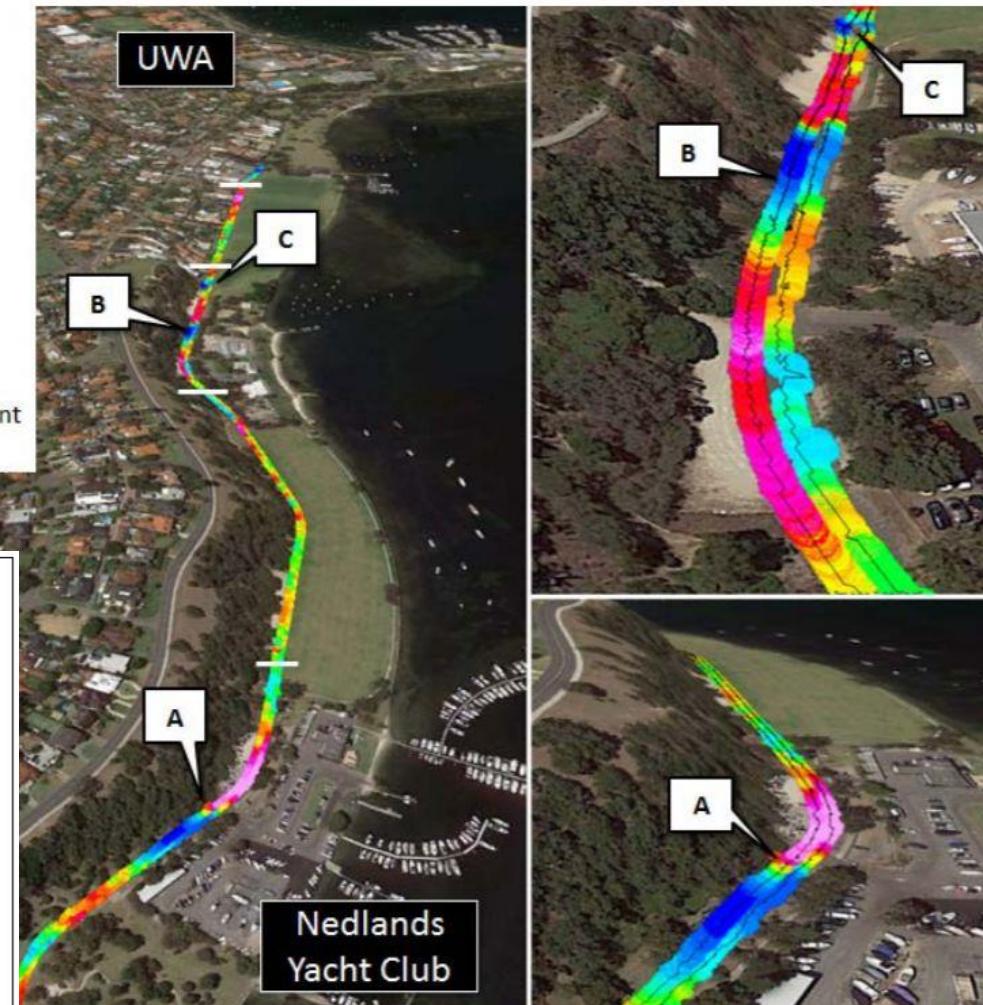
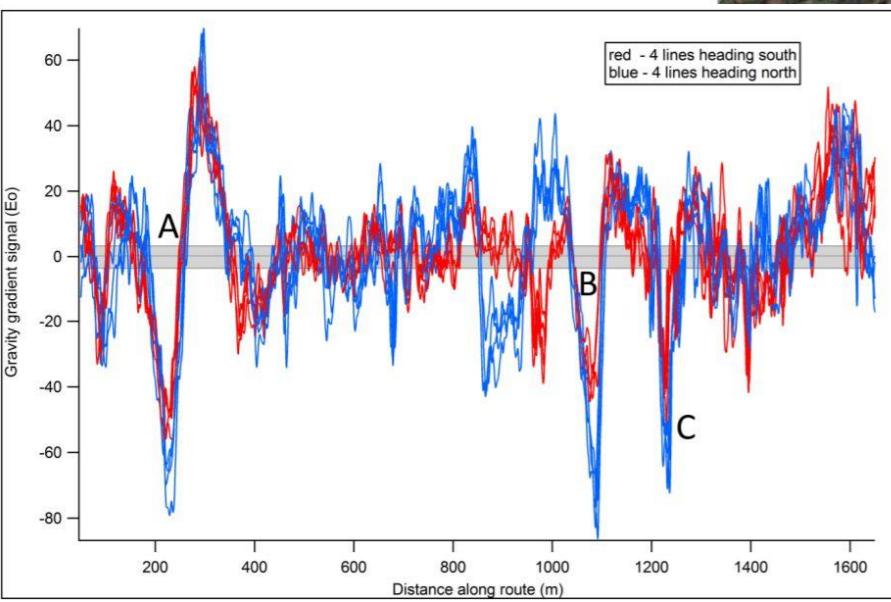
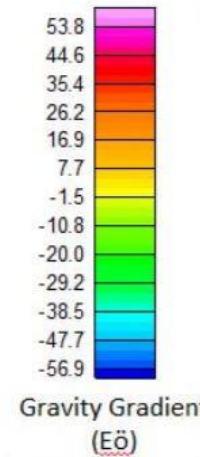
Дж. Холл и Т. Хэнш



Д. Вайндланд

Гравиметрия

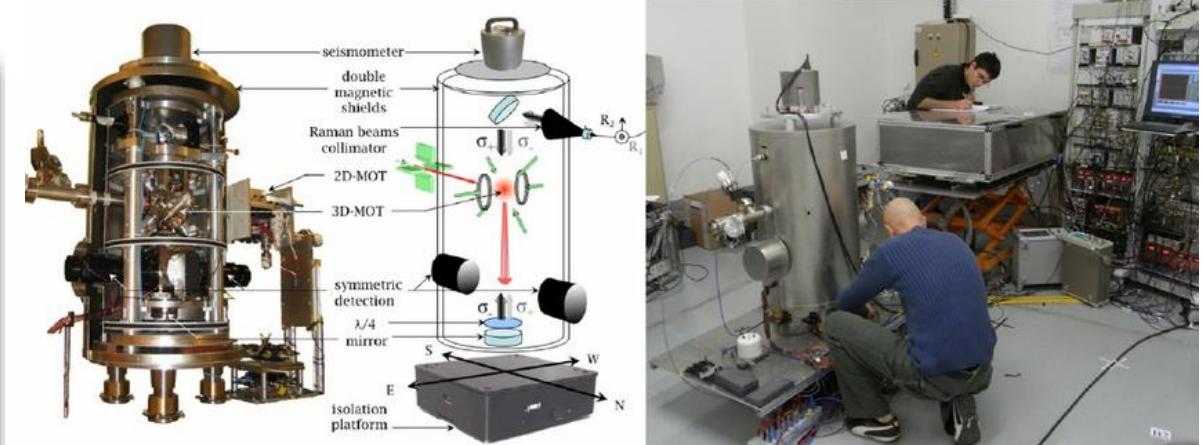
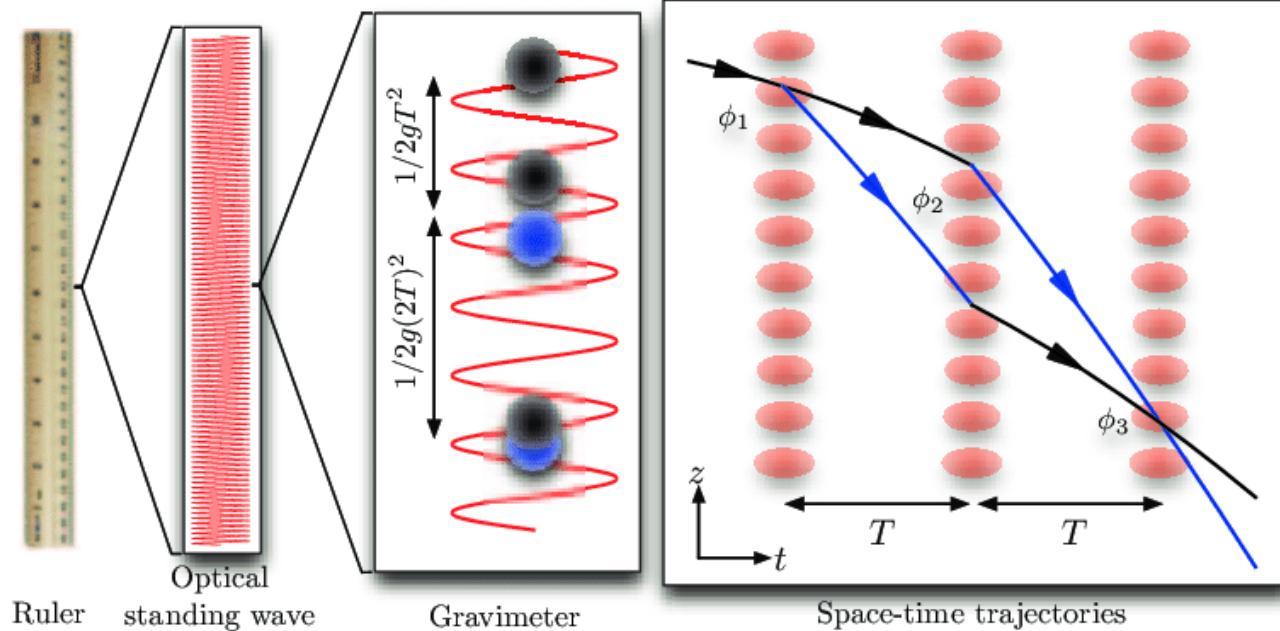
- Навигация по гравитационному полю Земли
- Баллистика
- Геологоразведка



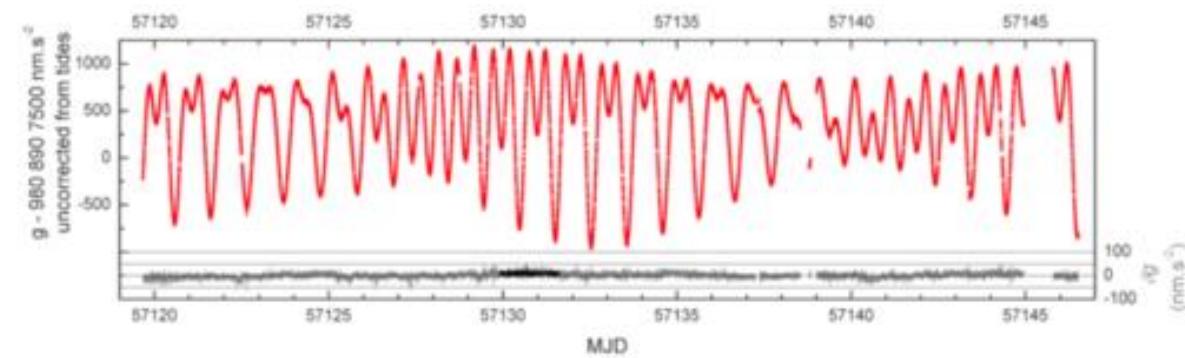
Шумы 15 этвеш/0.5 Гц

Гравиметры и градиометры на холодных атомах

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



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



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

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

Магнитометрия

Лучшие показатели:

Чувствительность

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

Пространственное разрешение 10 мм

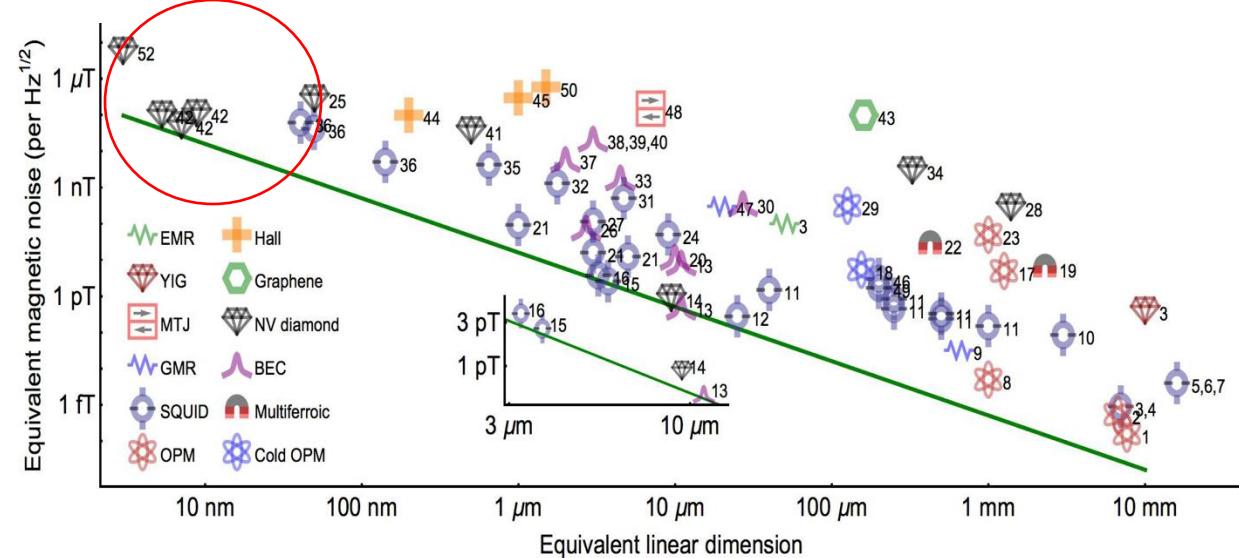
Перспективная область:

Пространственное разрешение $\approx 1\text{-}100\text{ нм}$

(+совместимость с биологическими объектами)

На данный момент единственная
перспективная система это NV центр
в алмазе

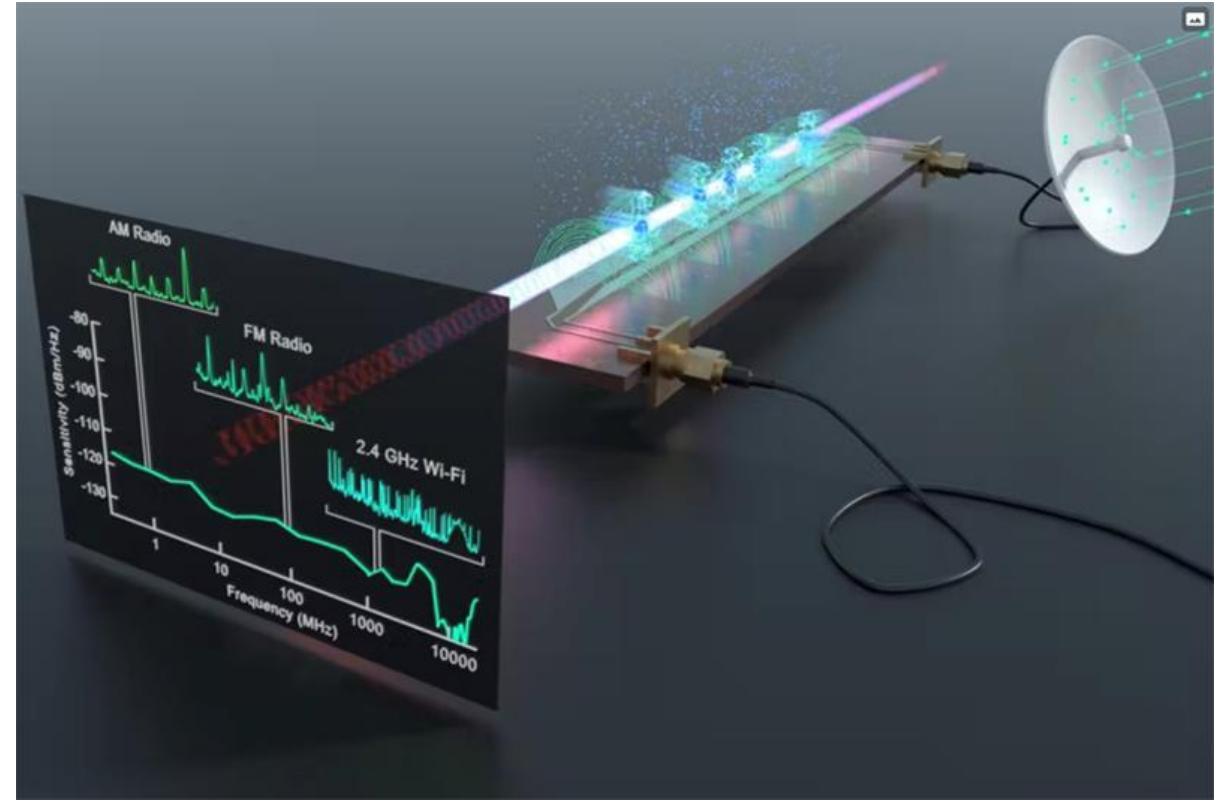
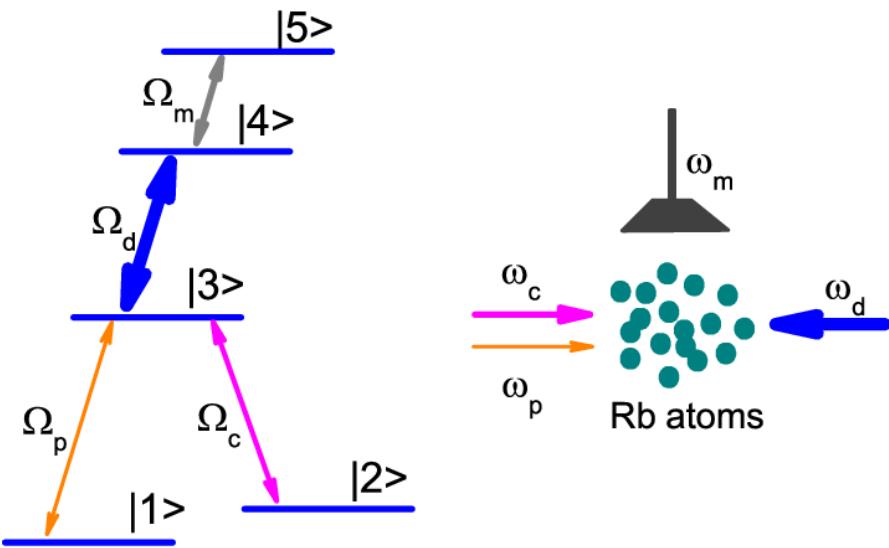
Необходимы работы по улучшению чувствительности
NV-магнитометров



<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



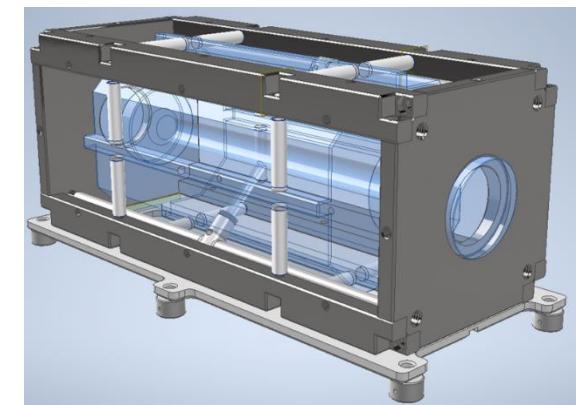
Малогабаритные
стандарты



Оптические стандарты
(транспортируемые,
бортовые) + гравиметрия



Компактные
ФСОЧ



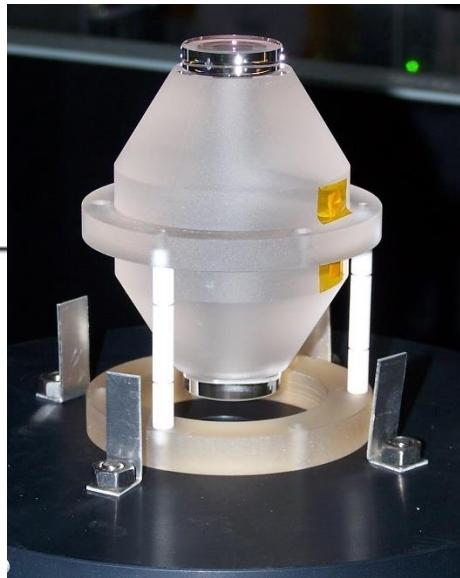
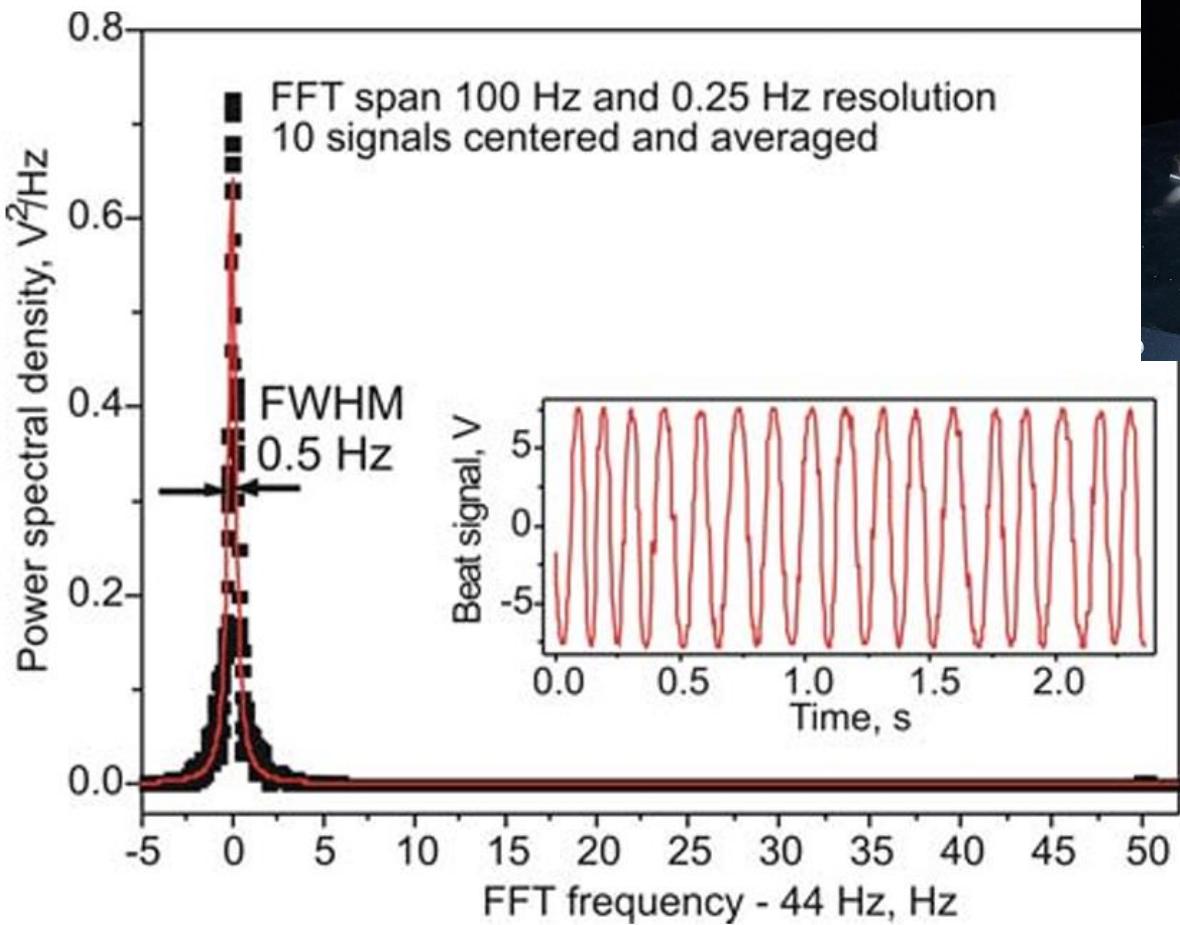
Ультрастабильные
лазеры

Перспективные решения

Представленные в России направления:

- Квантовые сенсоры в области времени, частоты и дальномерии
- 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
- Спинtronные 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



Вертикальный
резонатор УЛЕ



B. Kemmerle и T. Hänsch (2010)

Локализация технологии

- Создано новое поколение лазерных систем со стабилизацией по внешнему высокодобротному 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

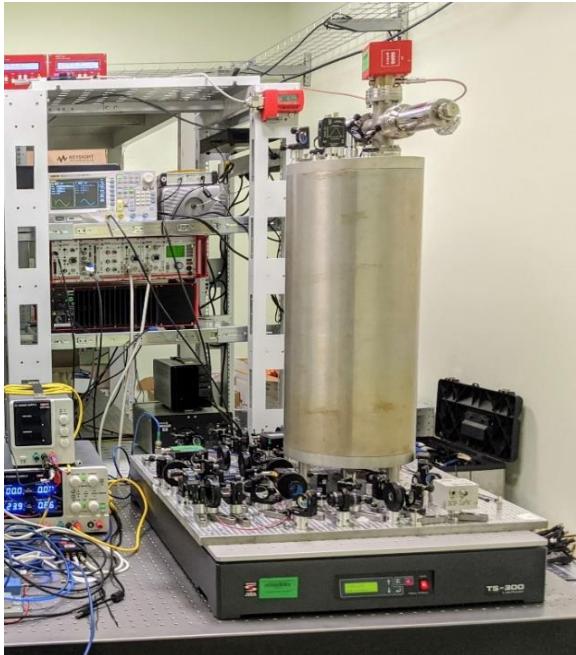


Программа ГЛОНАСС 2012-2020

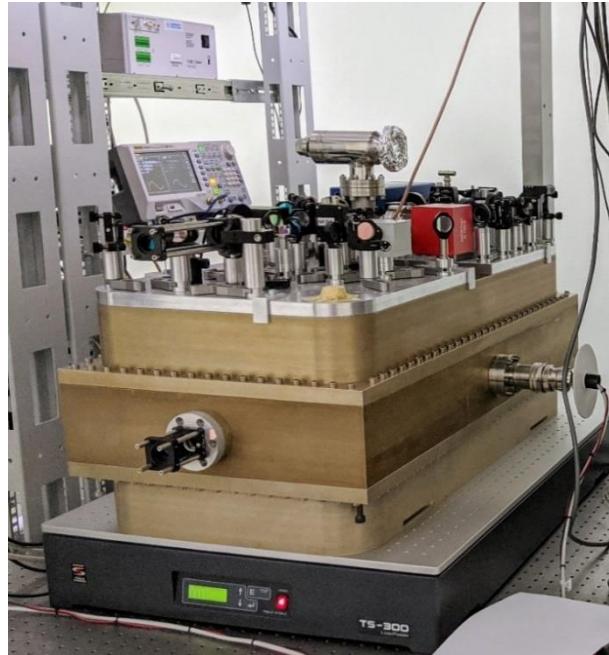
Оптические стандарты частоты на атомах стронция

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

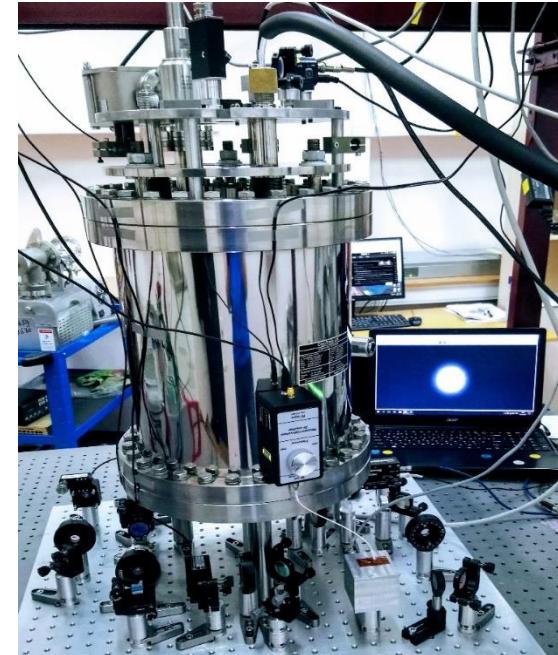
7 ультрастабильных лазерных систем ФИАН встроены в опытные образцы



Лазерная система №1
возбуждения часового
перехода 698 нм



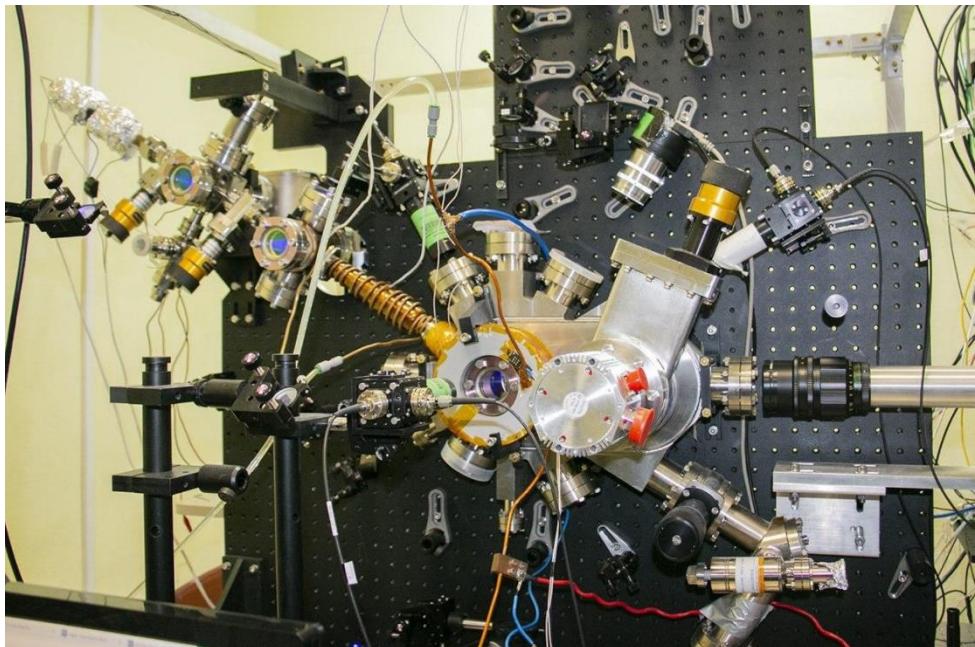
Лазерная система №2
возбуждения часового
перехода 698 нм



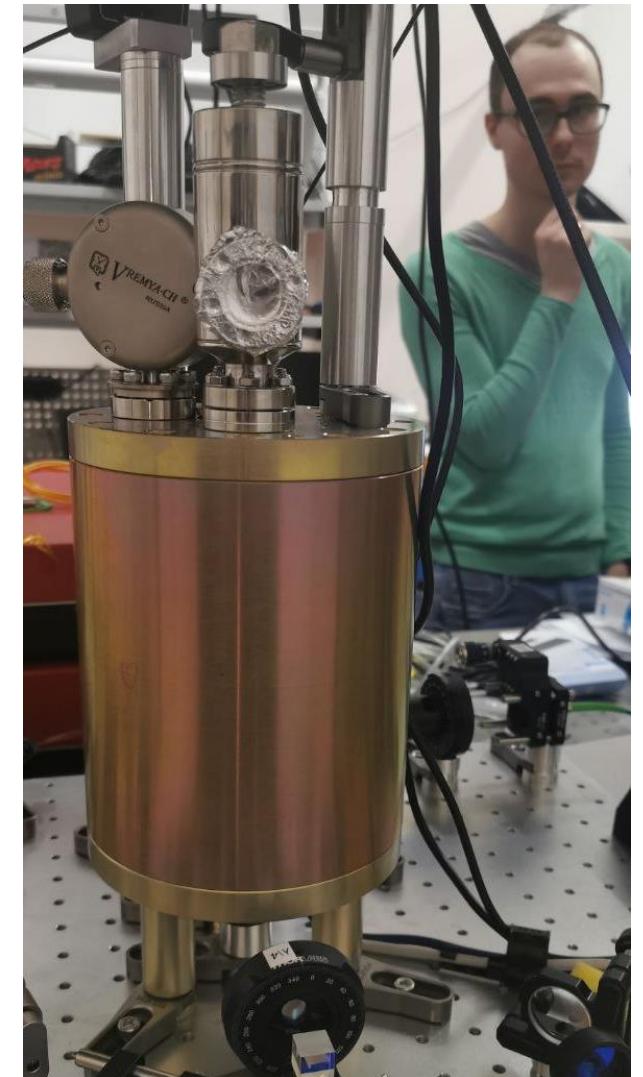
Криогенные опорные лазерные
системы №№3.4.
1550 нм

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

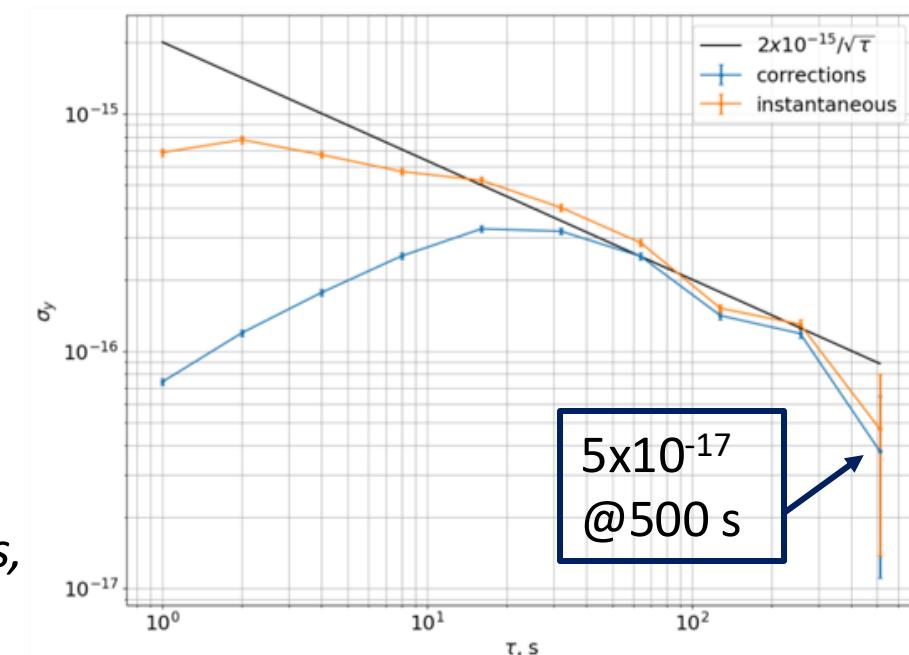
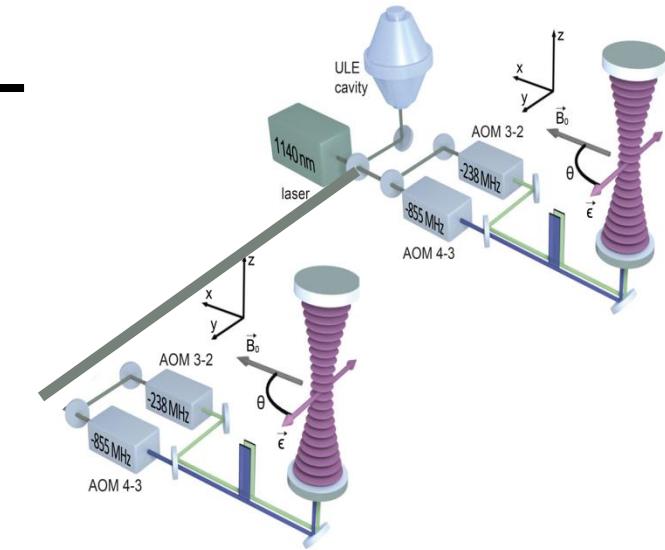


Фундаментальная база

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-мК 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” PTB, 2×10^{-17}



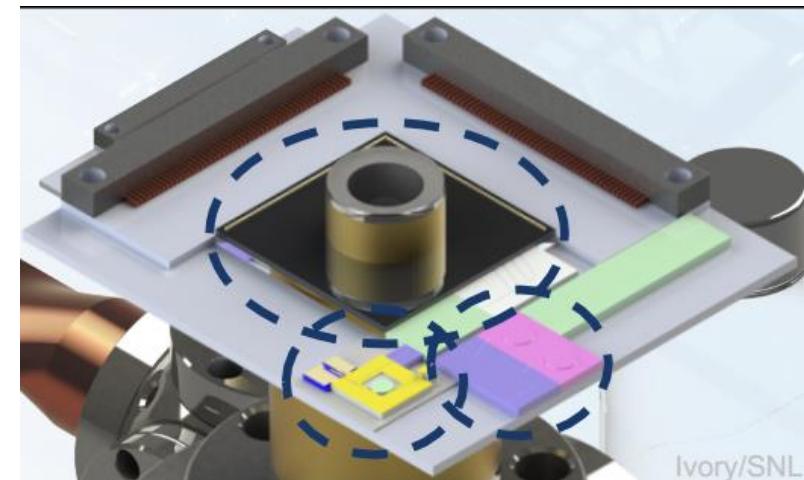
S. Ritter et al, “Opticlock: Transportable and easy-to-operate optical single ion clock”, EFTF 2021

Бортовой ФСОЧ
Проект FOKUS (Германия)



Успешные суборбитальные
запуски 2016, 2018 гг

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



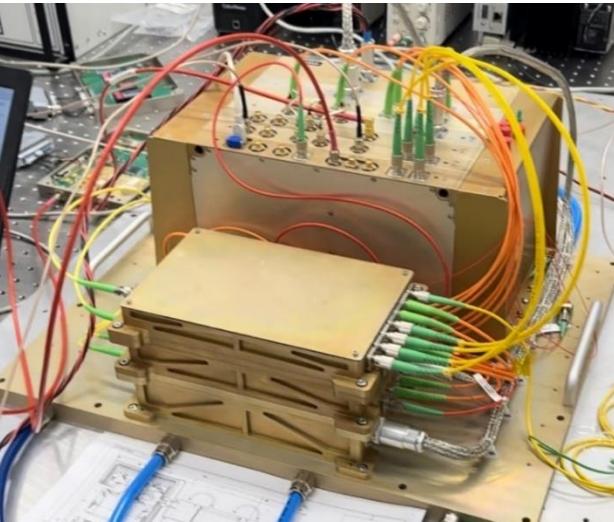
- Объем – 0,5 литра
- Потребляемая мощность 10 Вт
- Относительная нестабильность $< 1 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau}$
- Широкое использование технологий интегральной фотоники

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 спектроскопы среднего масштаба (литр)
- Волоконные оптические гребенки (Авеста)



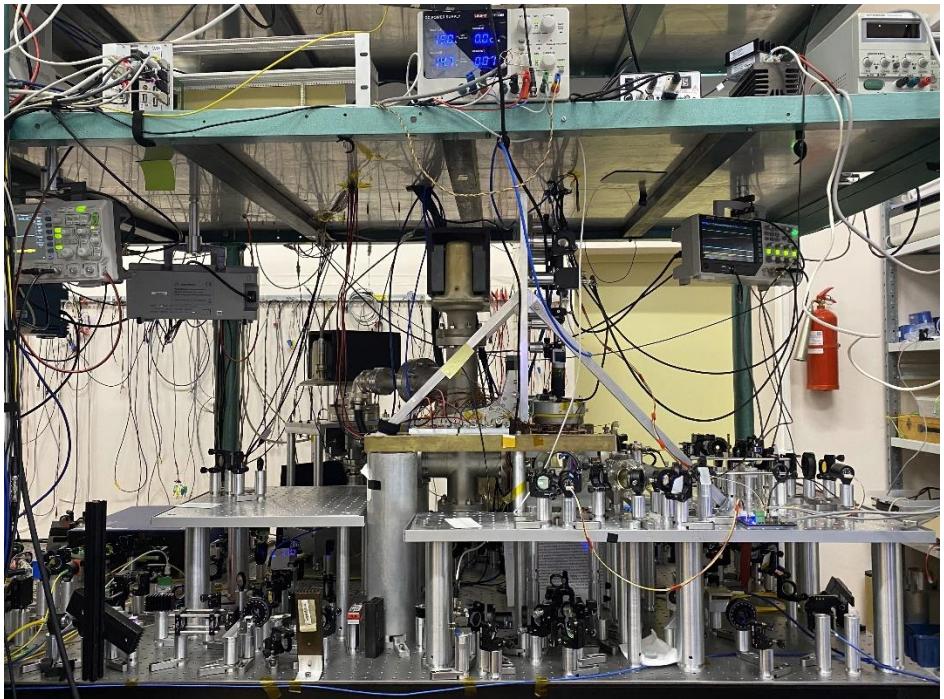
*K. Khabarova et al., Toward a New Generation of Compact Transportable Yb+ Optical Clocks
Symmetry 2022, 14(10), 2023*

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**

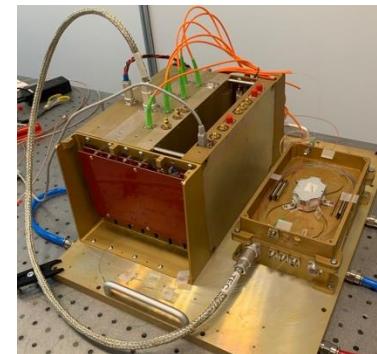
Модульная структура



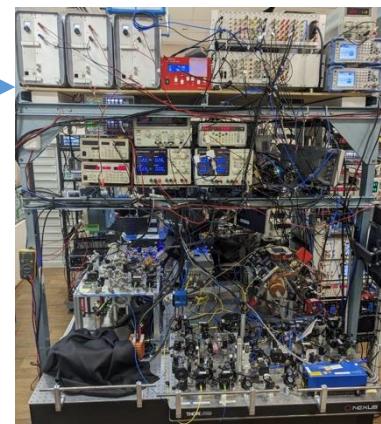
Ультрастабильная лазерная система для БСУ

Масса – менее **15 кг**

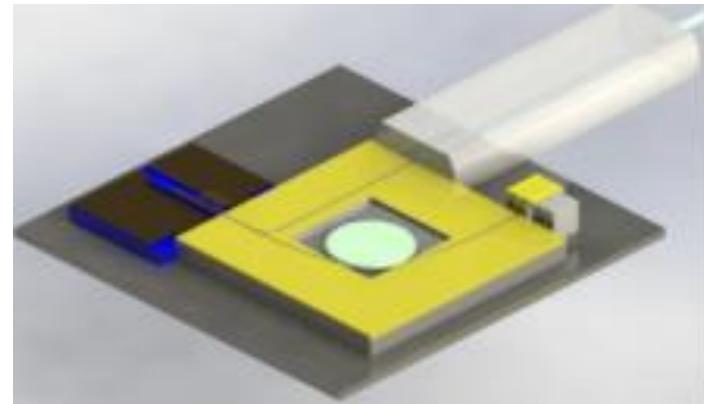
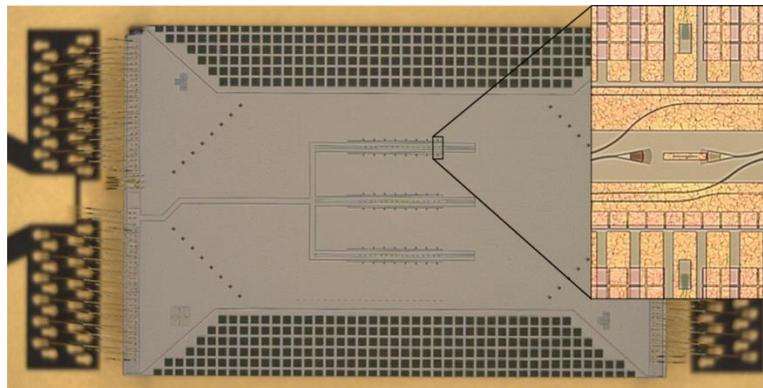
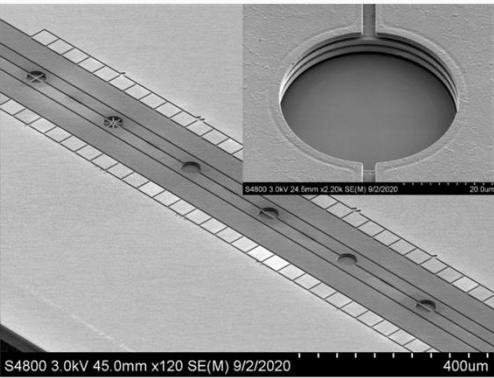
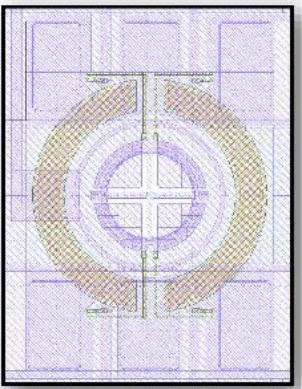
Объем – менее **0,03 м³**



Ионный квантовый компьютер



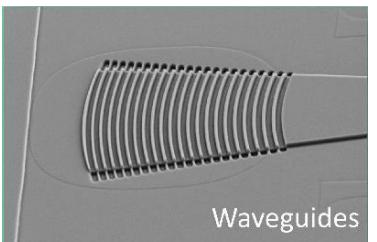
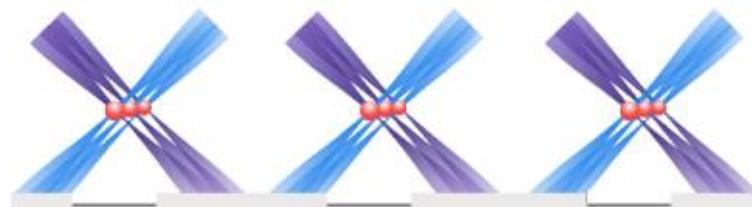
Технологии интегральной фотоники



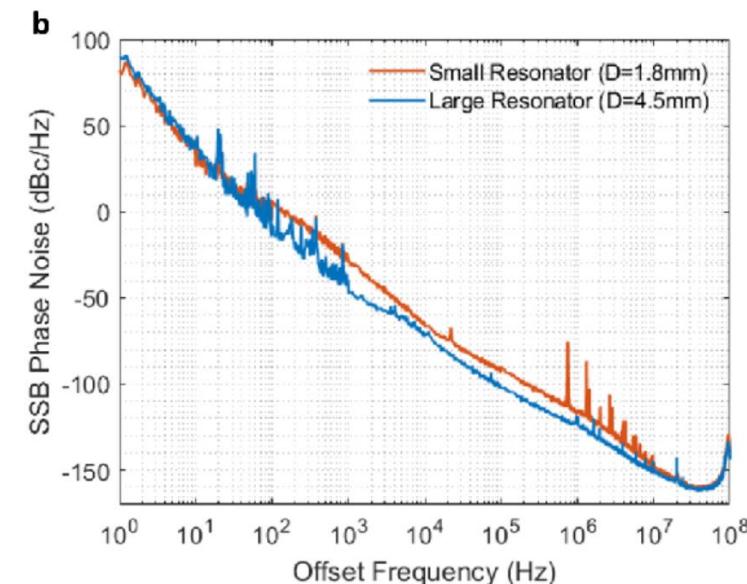
- Кремниевые фотодиоды интегрированные в планарную ионную ловушку
- эффективность детектирования одиночного фотона 20% (с просветлением 47%)

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

- Ультраузкие лазеры на галерее шепчуящих мод
- 871 нм, 10 Гц ширина по Лоренцевскому фиту

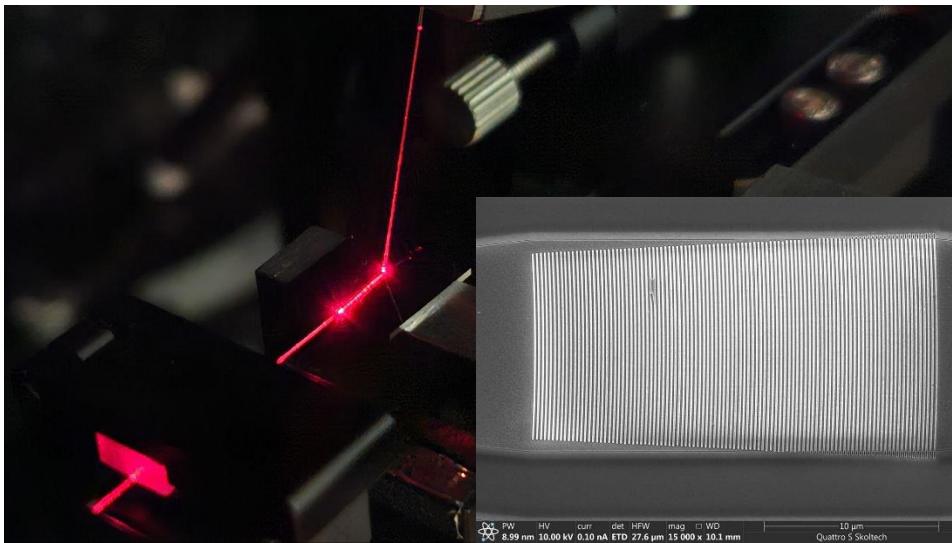


- Решетки переменного шага и ширины для фокусировки излучения над плоскостью ловушки
- Получены оптические структуры на все необходимые длины волн, интегрированы в ионную ловушку



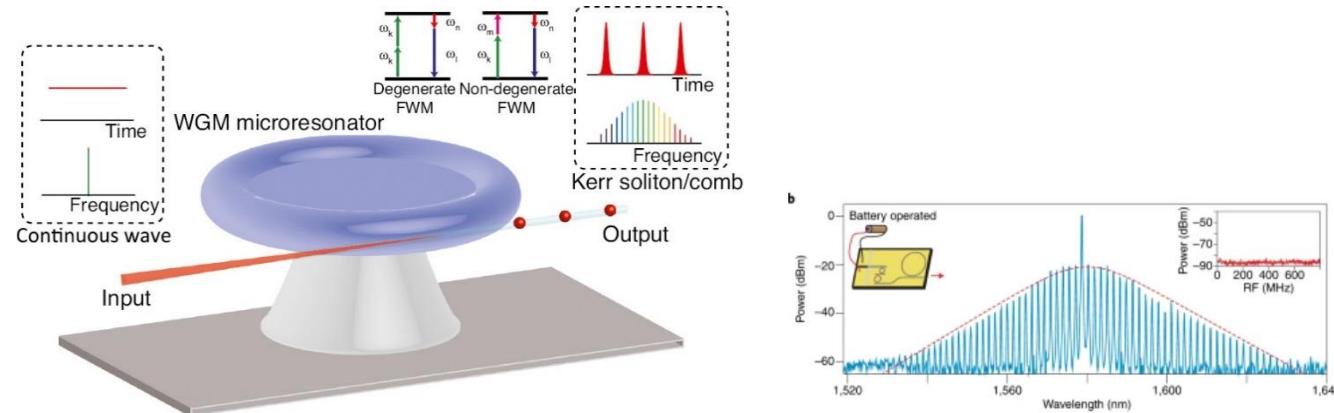
Интегральная фотоника для стандартов частоты и вычислений

Управление излучением (Сколтех – АО РКС)

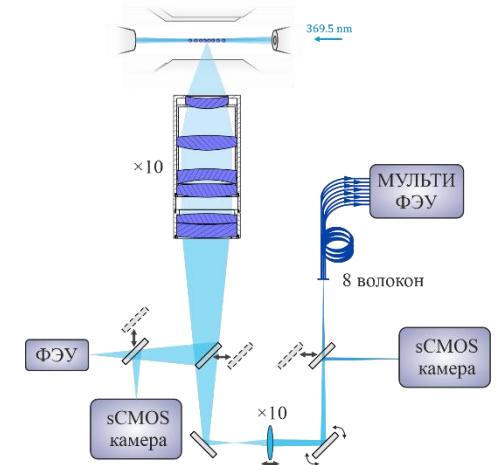
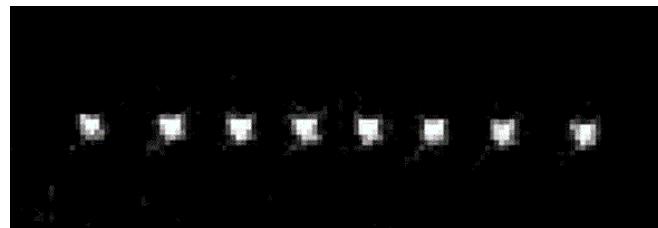


- Планарная решетка для вывода и фокусировки излучения 935 нм
- Аналог Sandia
- (Si_3N_4) технология
- Система управления и адресации ионом

Объемные резонаторы на галерее шепчущих мод (РКЦ)



Индивидуальное управление массивами ионов (ФИАН)

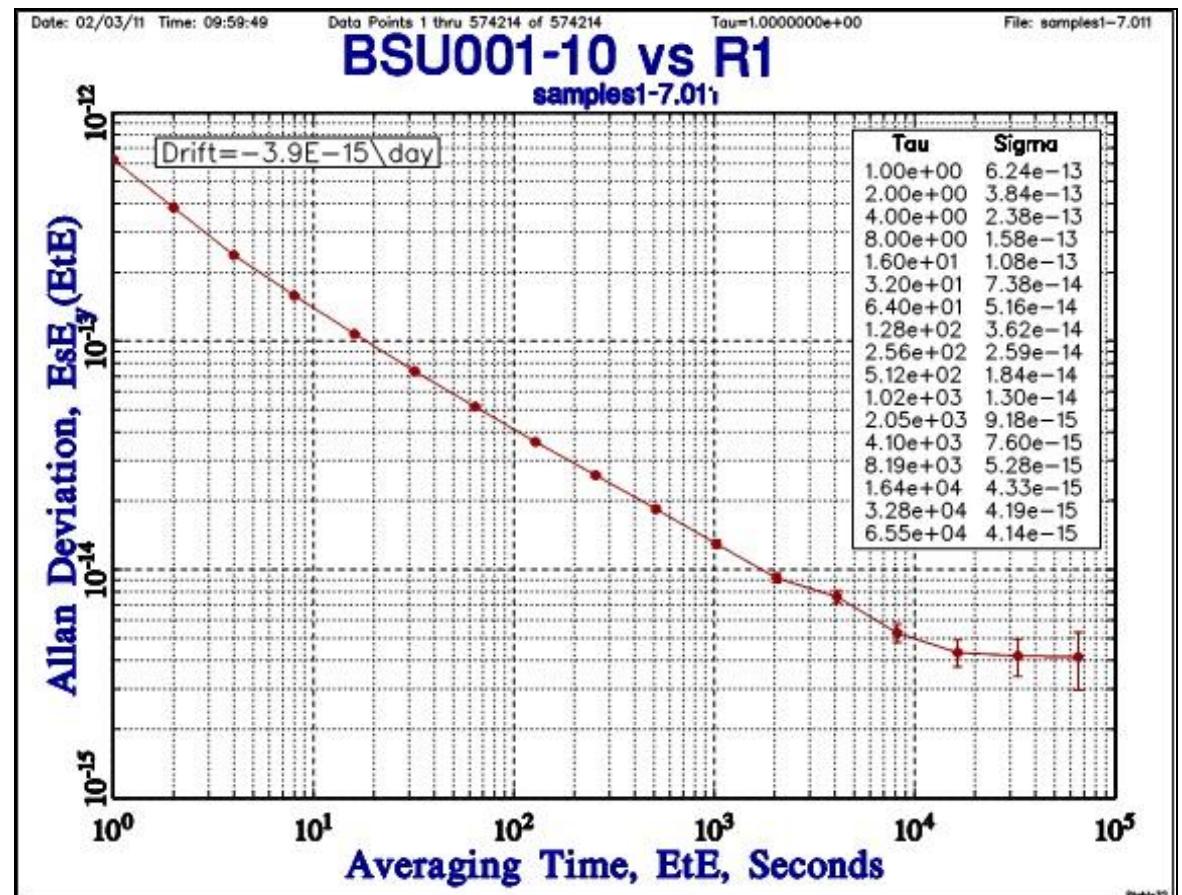


Водородные мазеры для ГЛОНАСС и GALILEO

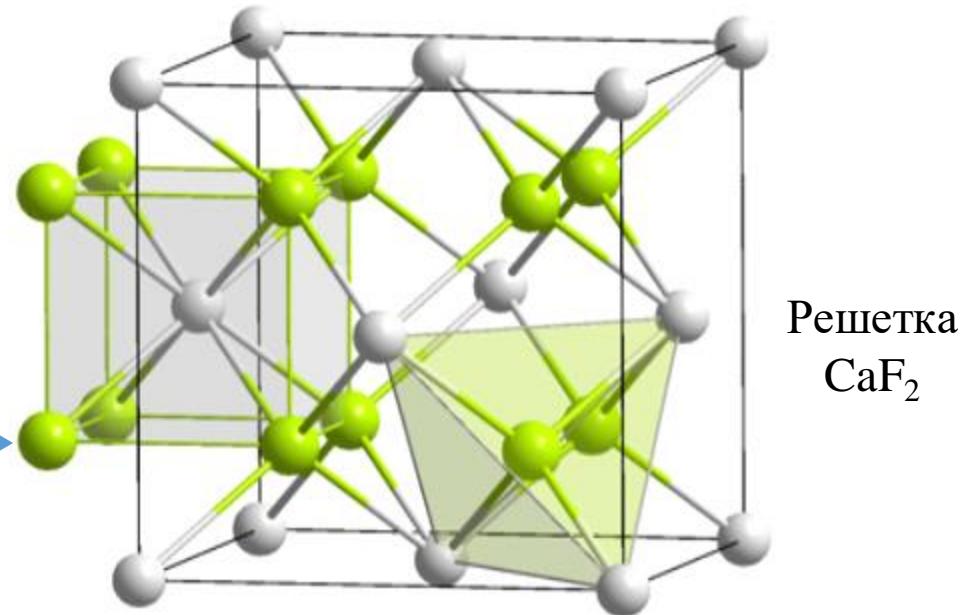
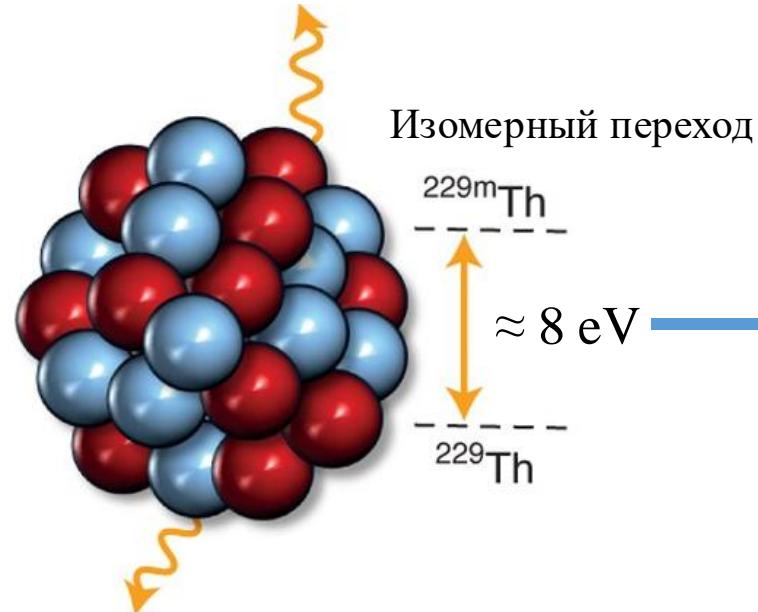


- Вес 16 кг
- Нестабильность частоты $<10^{-14}$ за 10000 с – 1 сут
- лучше 1 нс /сут

Пассивный водородный мазер
“ВРЕМЯ-Ч”



Перспективы: ядерный переход в Th-229



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

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

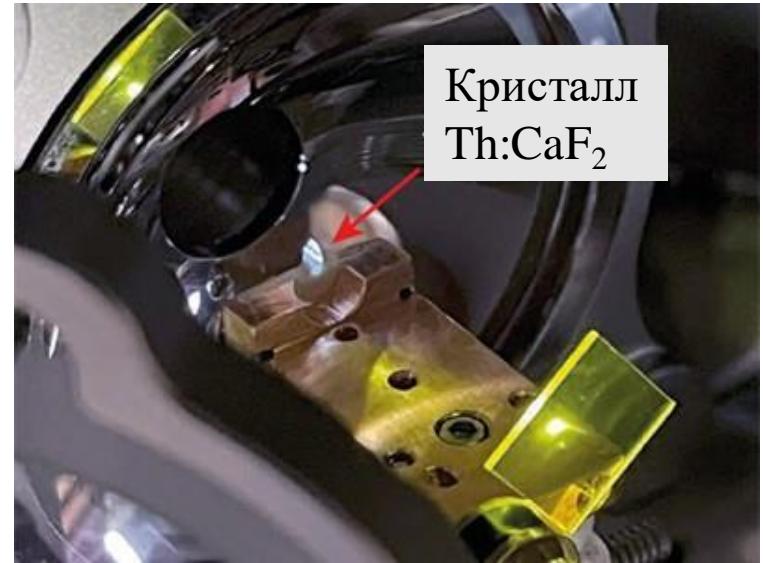
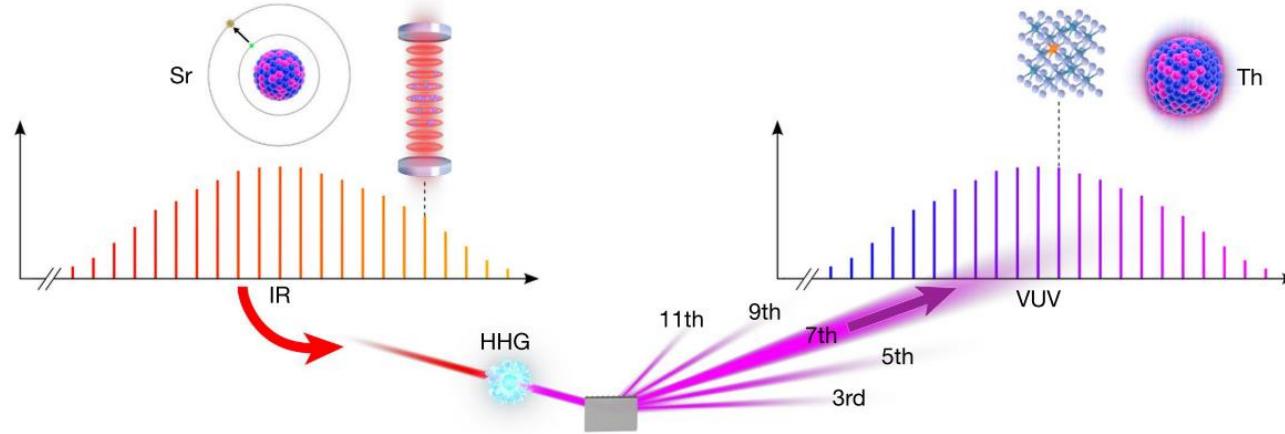
Лазерное возбуждение ядра тория

nature

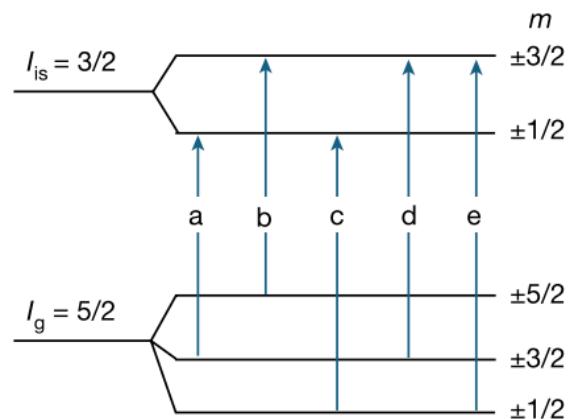
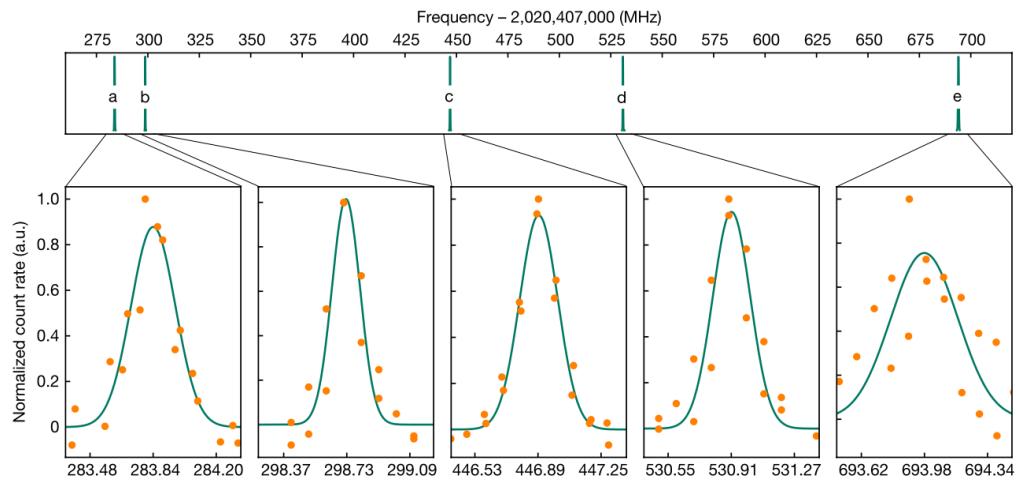
Frequency ratio of the 229m Th nuclear isomeric transition and the 87 Sr atomic clock

Chuankun Zhang, Tian Ooi, Jacob S. Higgins, Jack F. Doyle, Lars von der Wense, Kjeld Beeks, Adrian Leitner, Georgy A. Kazakov, Peng Li, Peter G. Thirolf, Thorsten Schumm & Jun Ye

Nature 633, 63–70 (2024) | Cite this



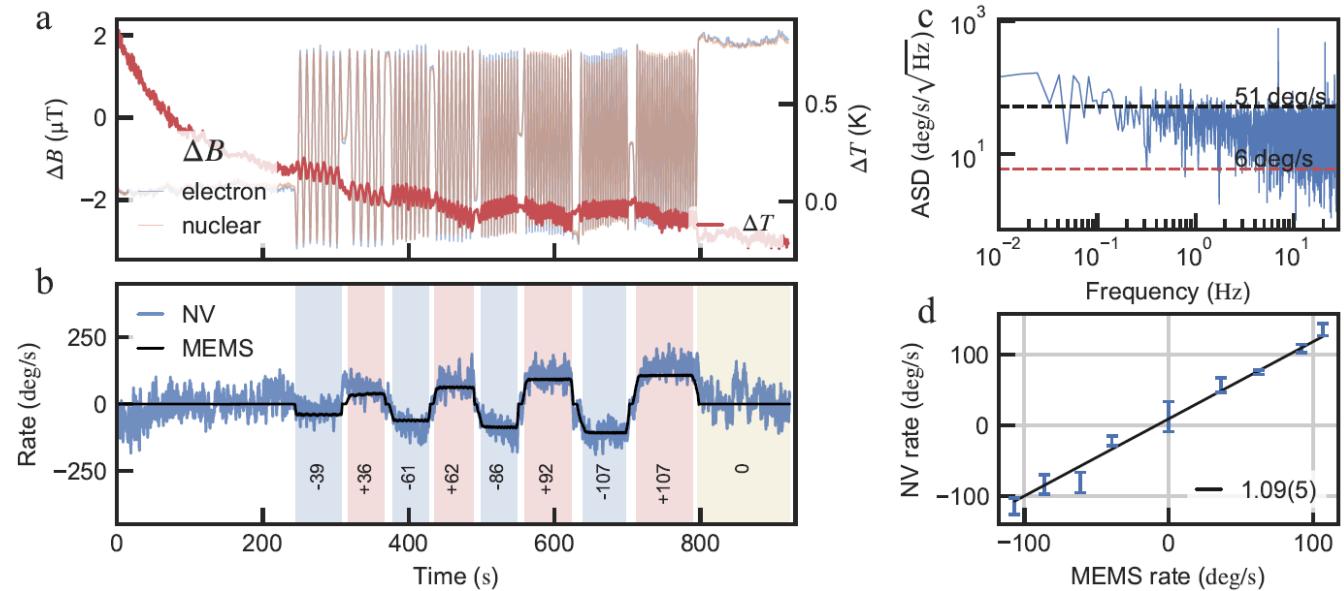
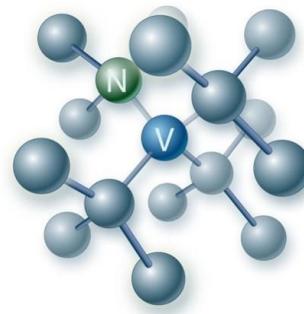
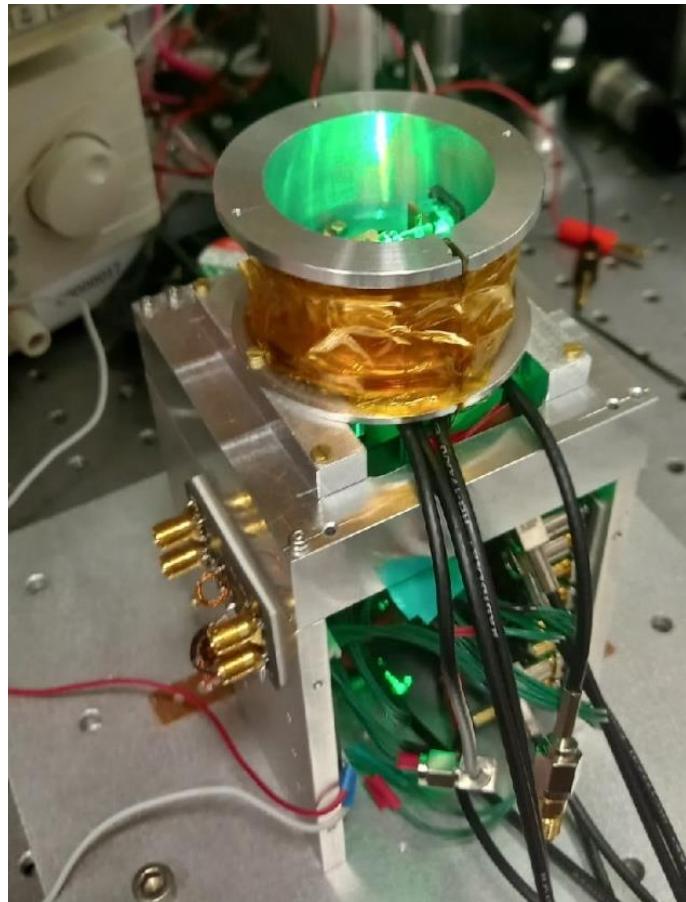
Квадрупольная структура ядерного перехода



- 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: $\phi 6 \times 8$ см
- Спектральная чувствительность 100 град/ $\sqrt{\text{час}}$

Перспективные сенсоры на NV центрах в алмазе: магнитометр



Тип: векторный магнитометр

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

Энергопотребление – 15 Вт

Частота выдачи измерений – 300 Гц

Масса < 700 г

Объем < 400 см³

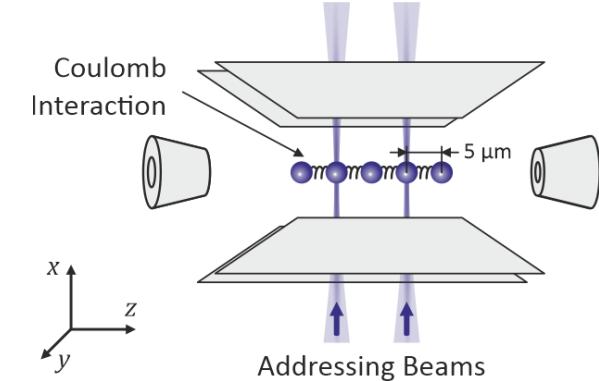
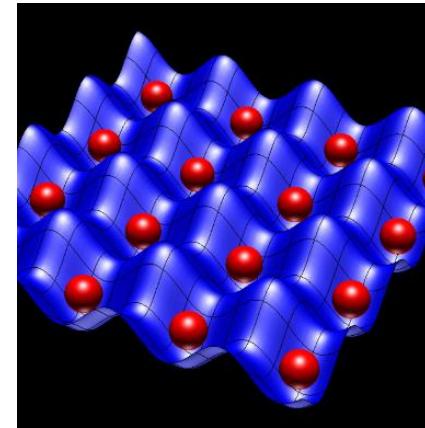
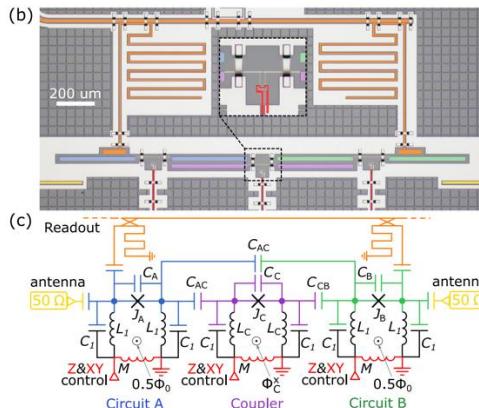
С макетом проводились полевые испытания по обнаружению металлических объектов



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 – в коллективном состоянии многих электронов

Фотоны

Атомы

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

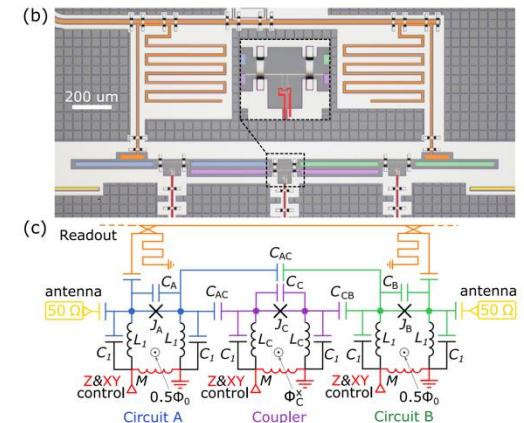
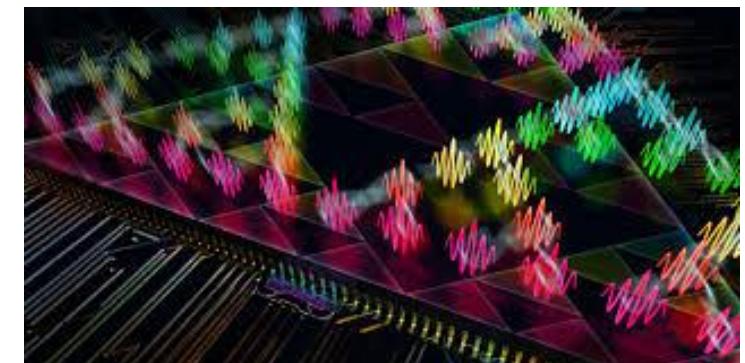
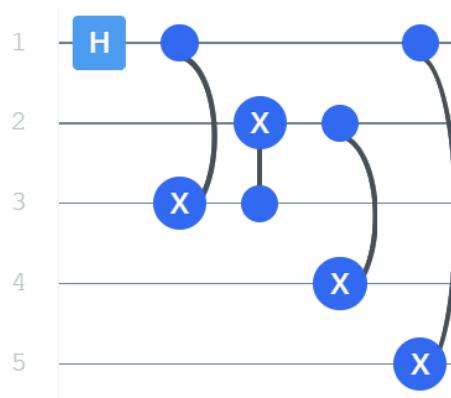
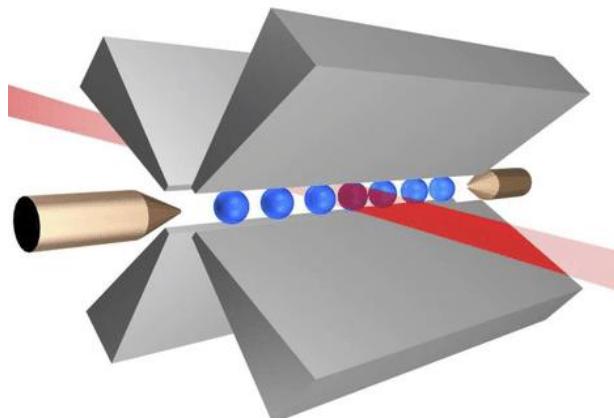
Полупроводники

Ионы

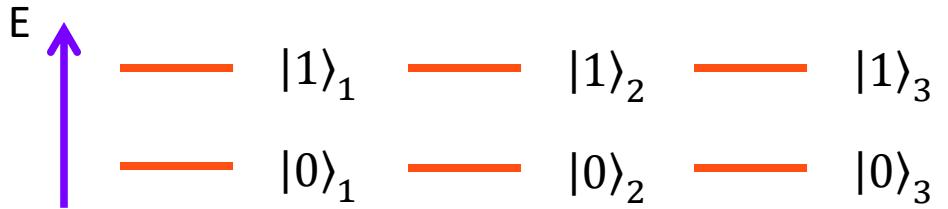
- Ионы в электромагнитных ловушках
- Кубит – в электронных состояниях иона
- Двухкубитная операция – через кулоновское взаимодействие

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



Ключевое свойство – запутанность

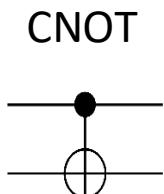
Нет запутанности

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

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

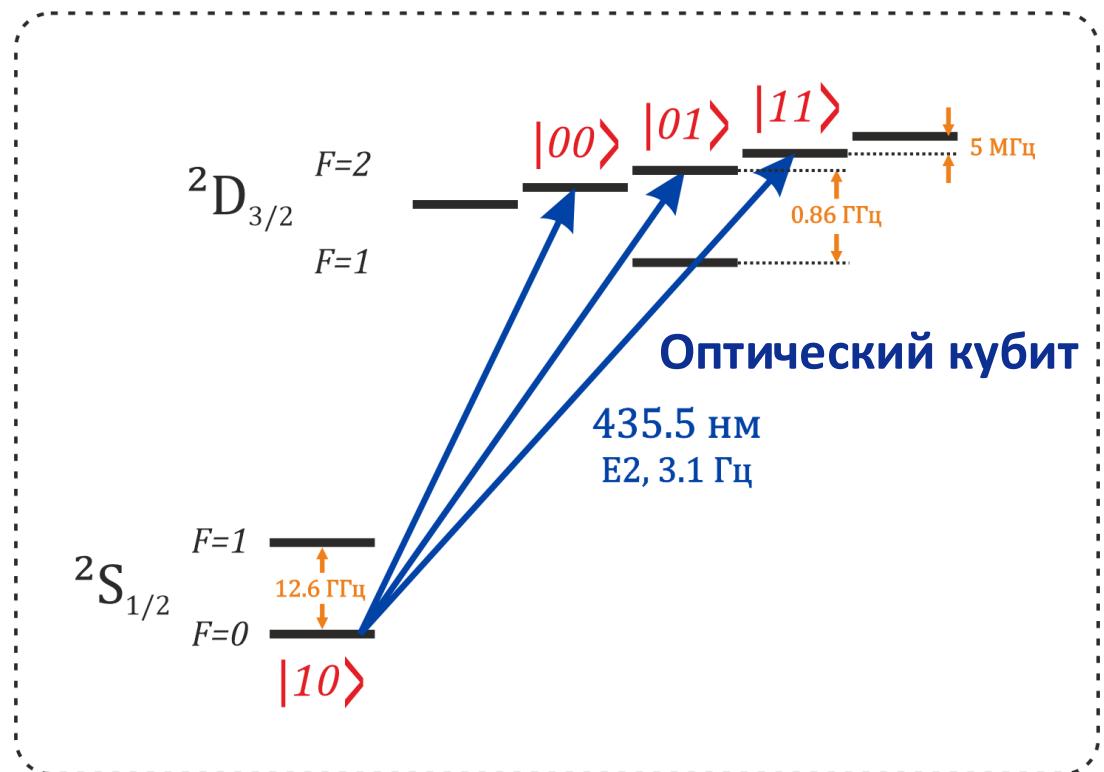


$$\begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |00\rangle \\ |01\rangle &\rightarrow |01\rangle \\ |10\rangle &\rightarrow |11\rangle \\ |11\rangle &\rightarrow |10\rangle \end{aligned}$$

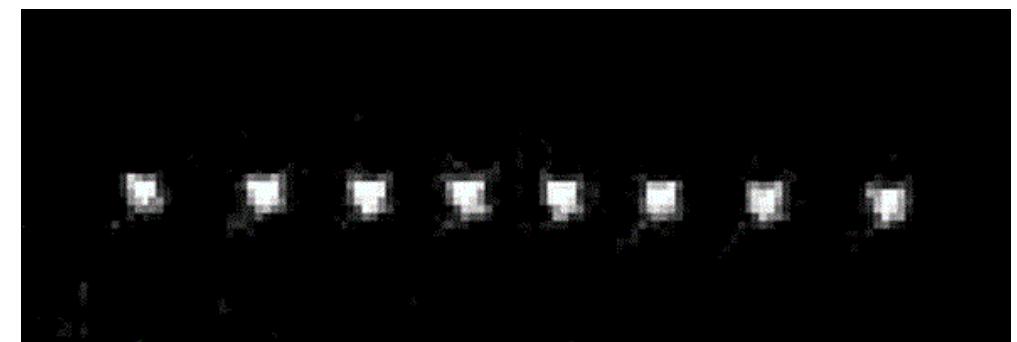
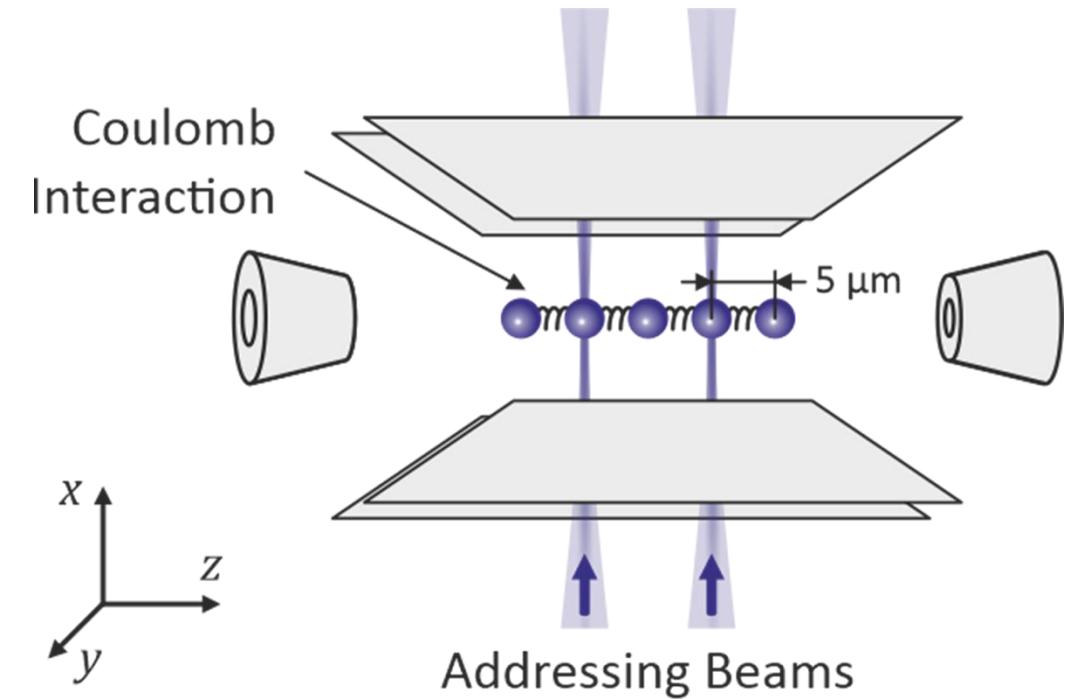
Области применения

- 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)

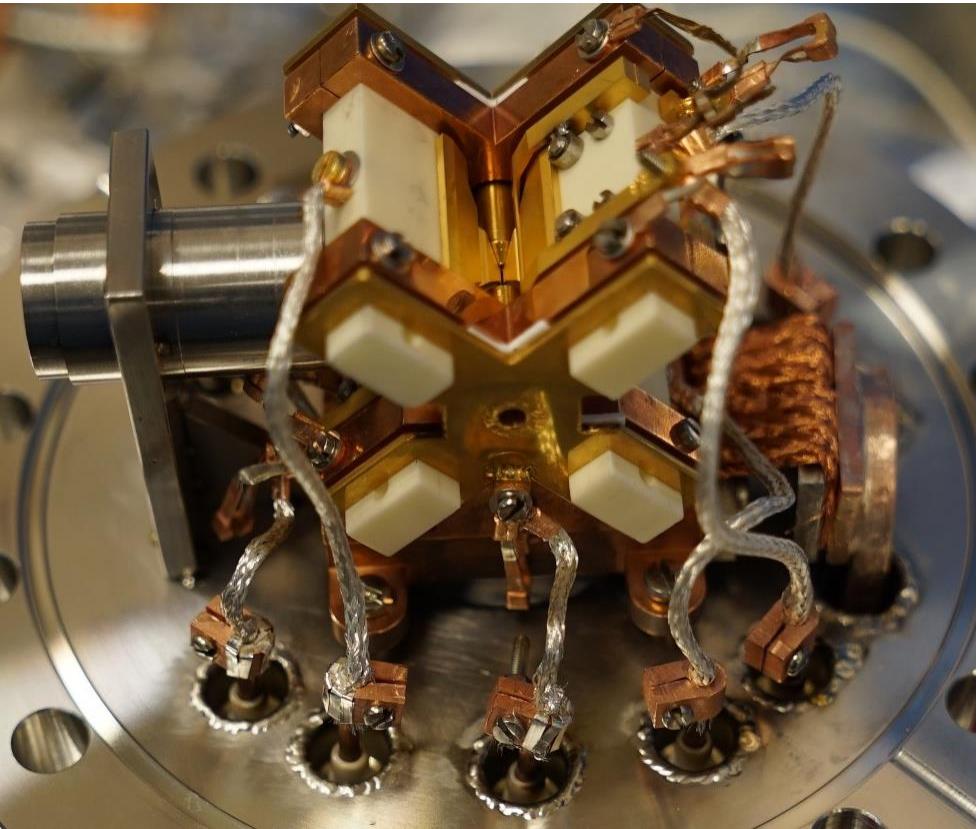


Ион $^{171}\text{Yb}^+$



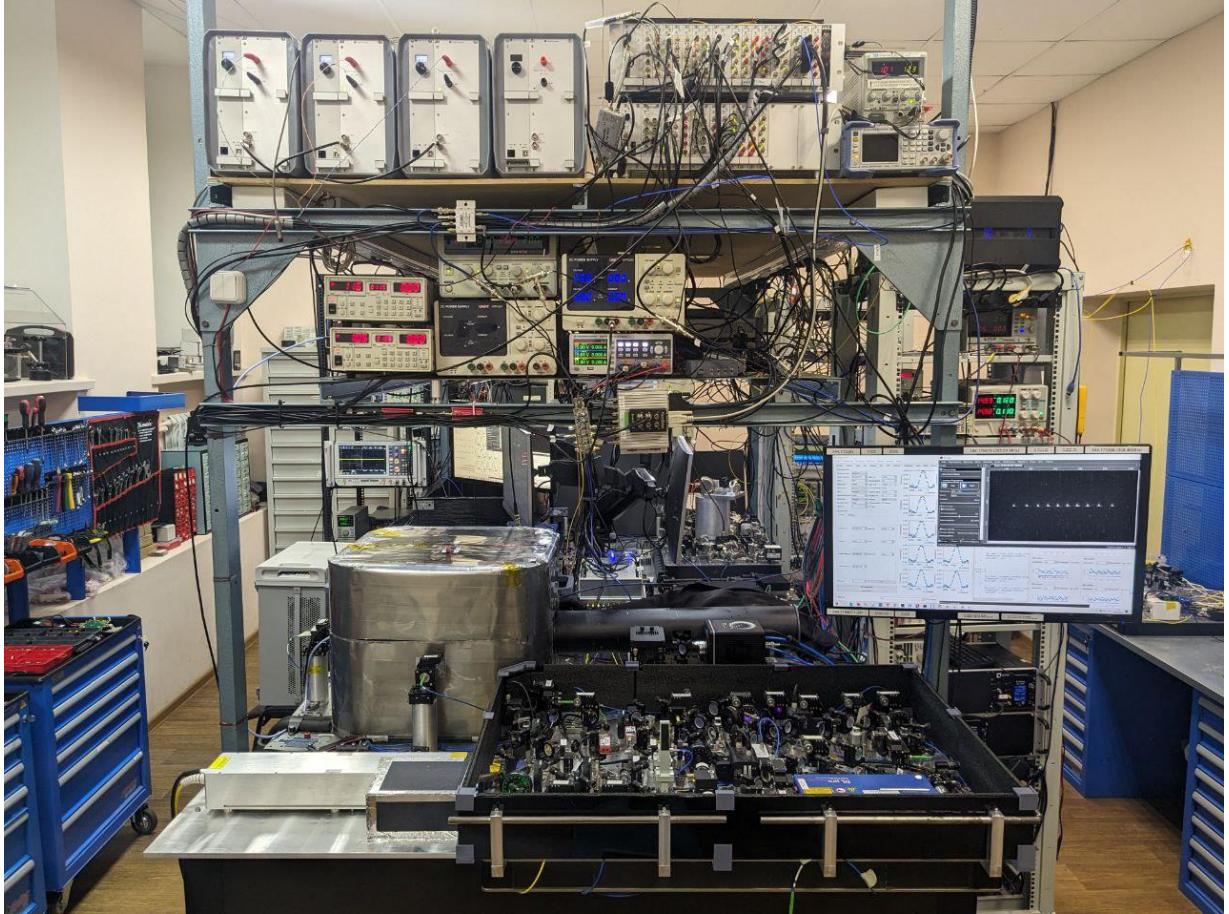
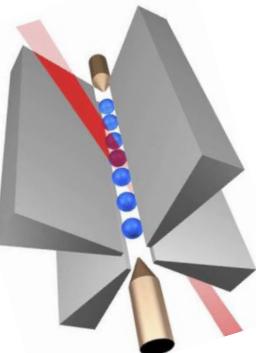
- Aksenov et al., *Realizing quantum gates with optically addressable $^{171}\text{Yb}^+$ ion qudits*, *Phys. Rev. A* 107, 052612 (2023)
- Nikolaeva A. S., Kiktenko E. O., Fedorov A. K. *Universal quantum computing with qubits embedded in trapped-ion qudits*, *Phys. Rev. A* 109, 022615 (2024)

Ионный вычислитель ФИАН-РКЦ



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



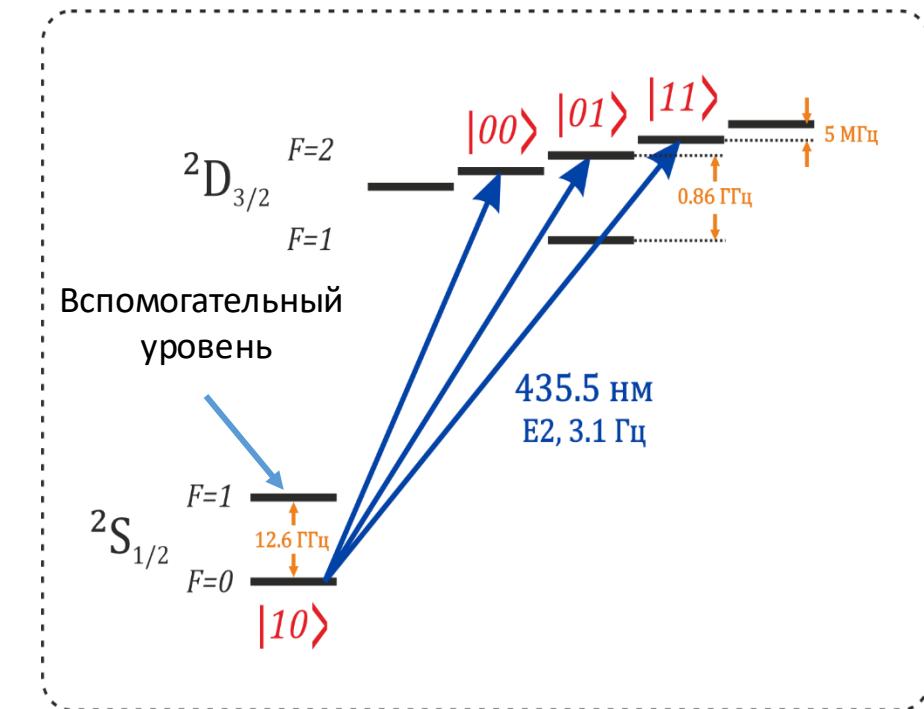
Ионный квантовый вычислитель



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 (куквартов), 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



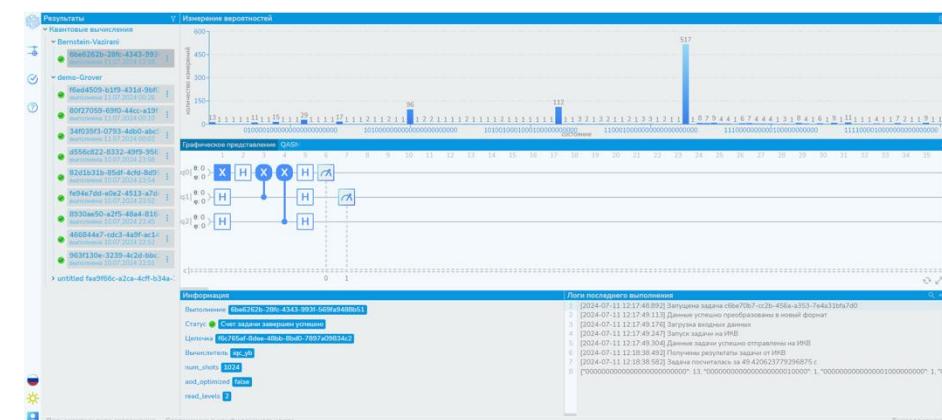
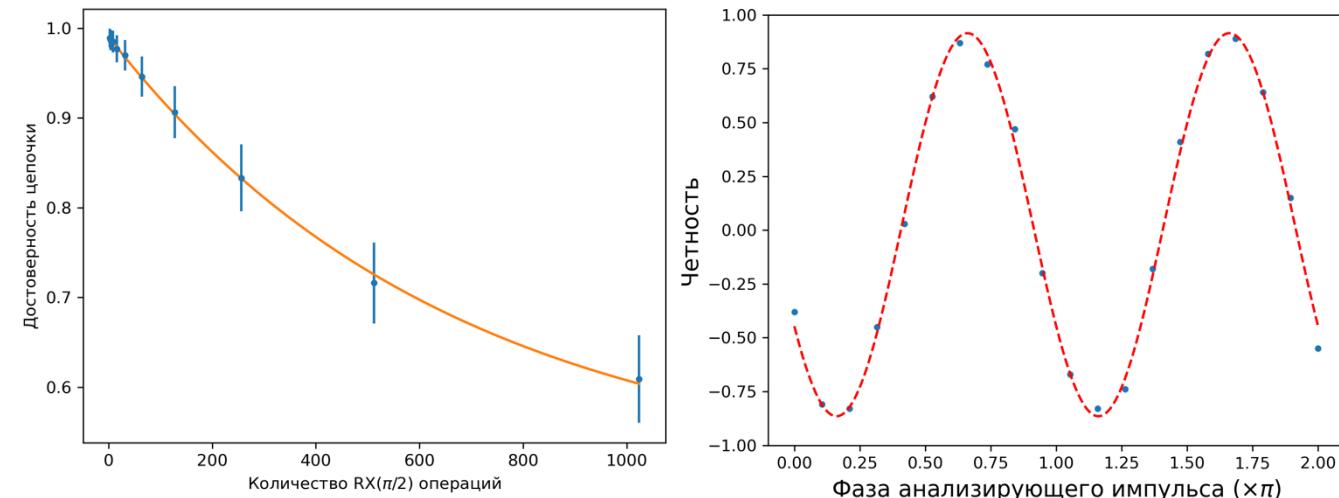
$^{171}\text{Yb}^+$



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

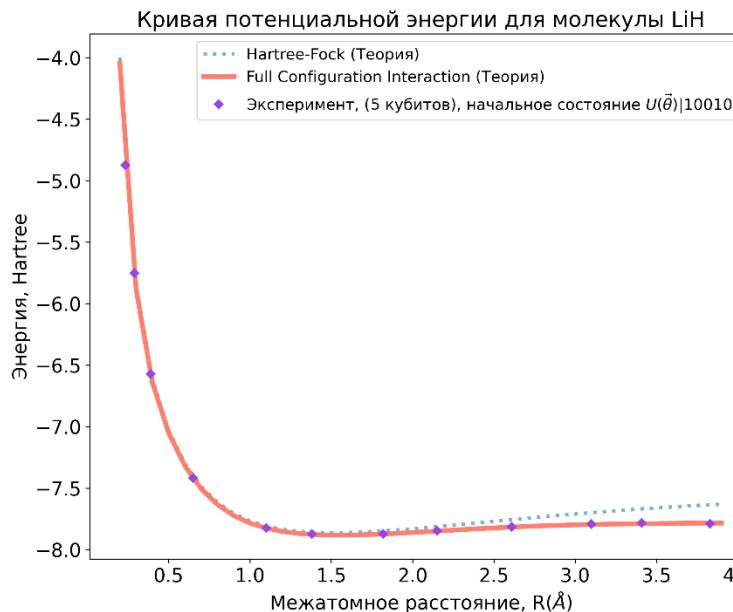
Результаты:

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



Исследованные алгоритмы

Квантовая химия

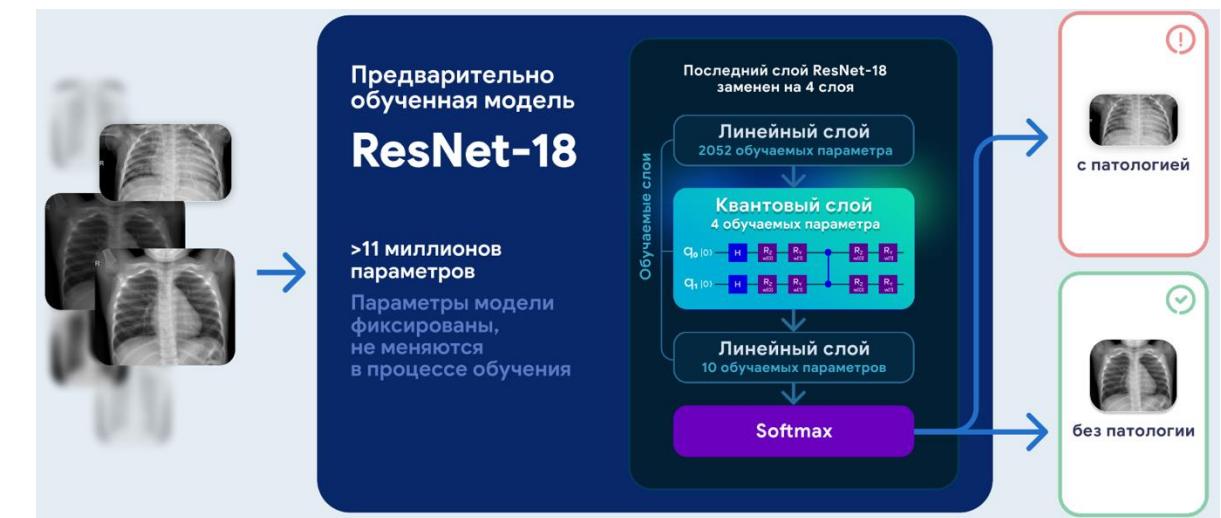
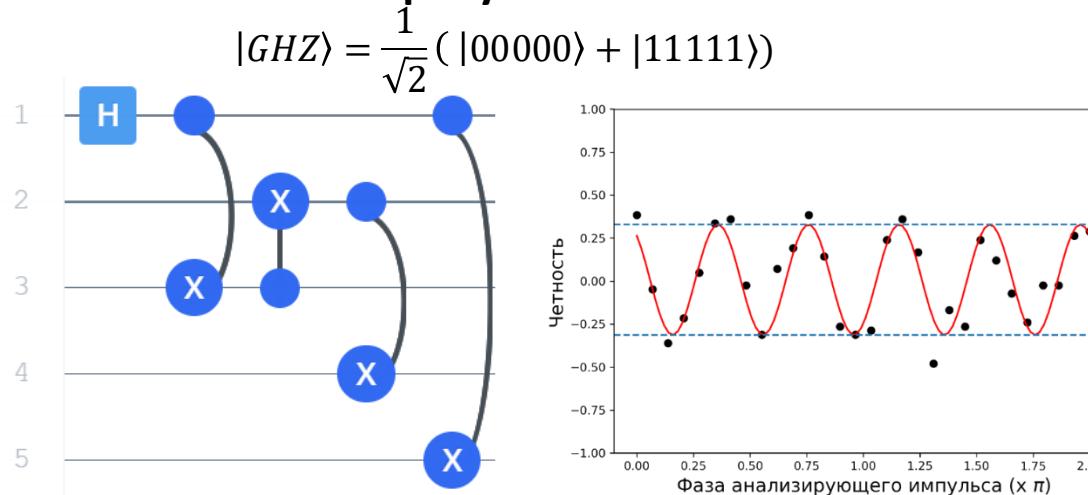


Фокусировка на задачах, наиболее полно использующих преимущества платформы: высокое качество операций, полная связность

Квантовое машинное обучение

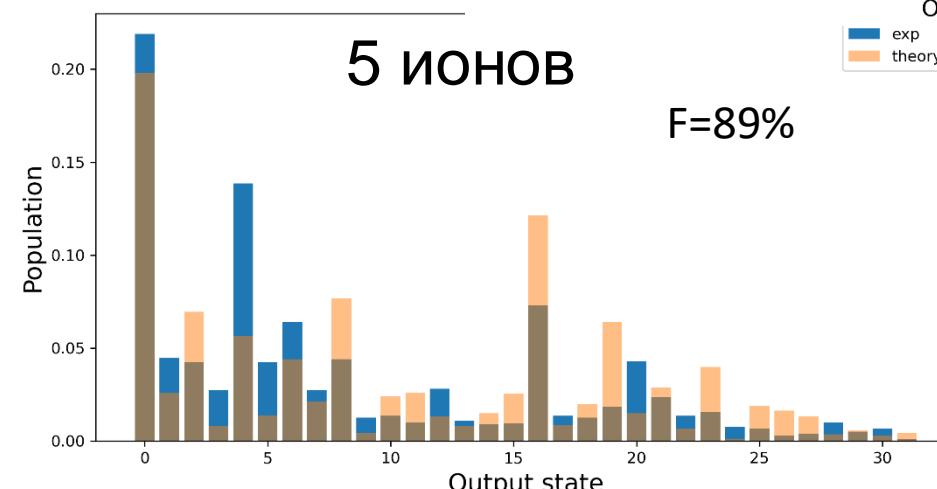
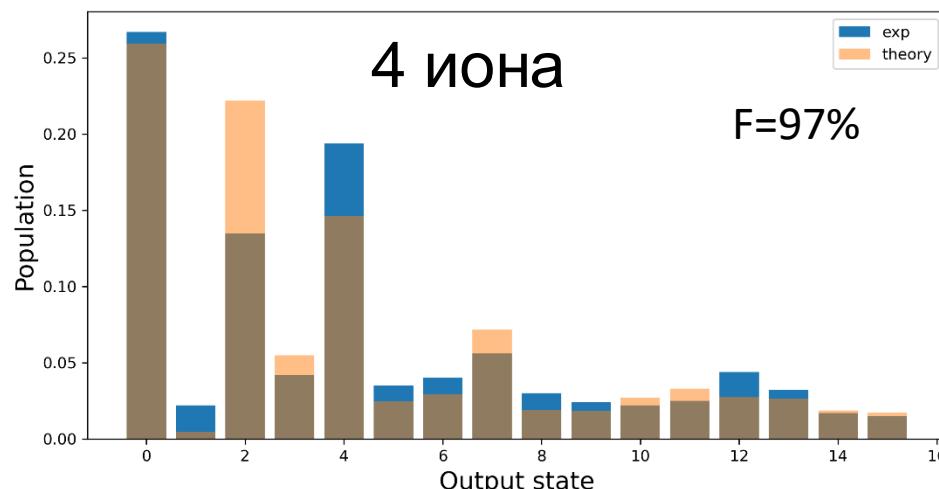
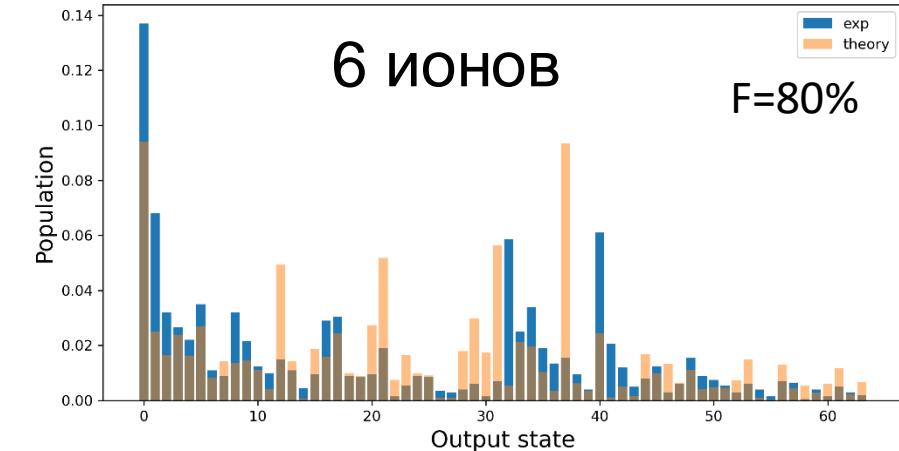
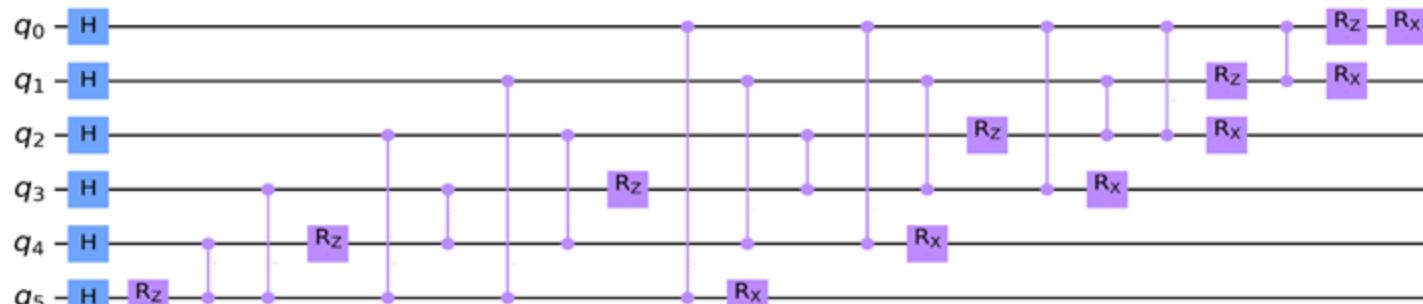


Полностью перепутанное GHZ состояния

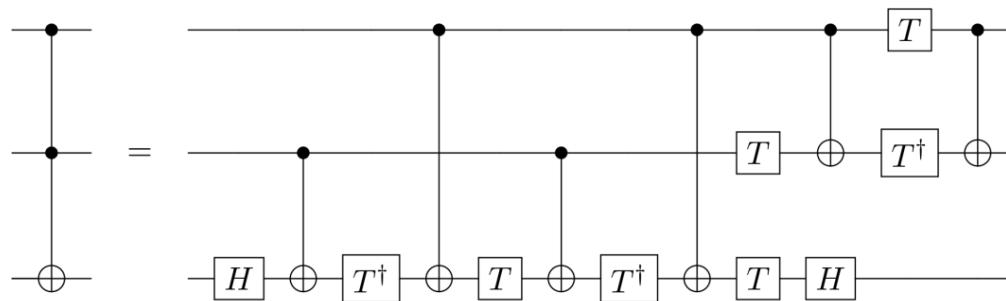


Алгоритм приближенной оптимизации

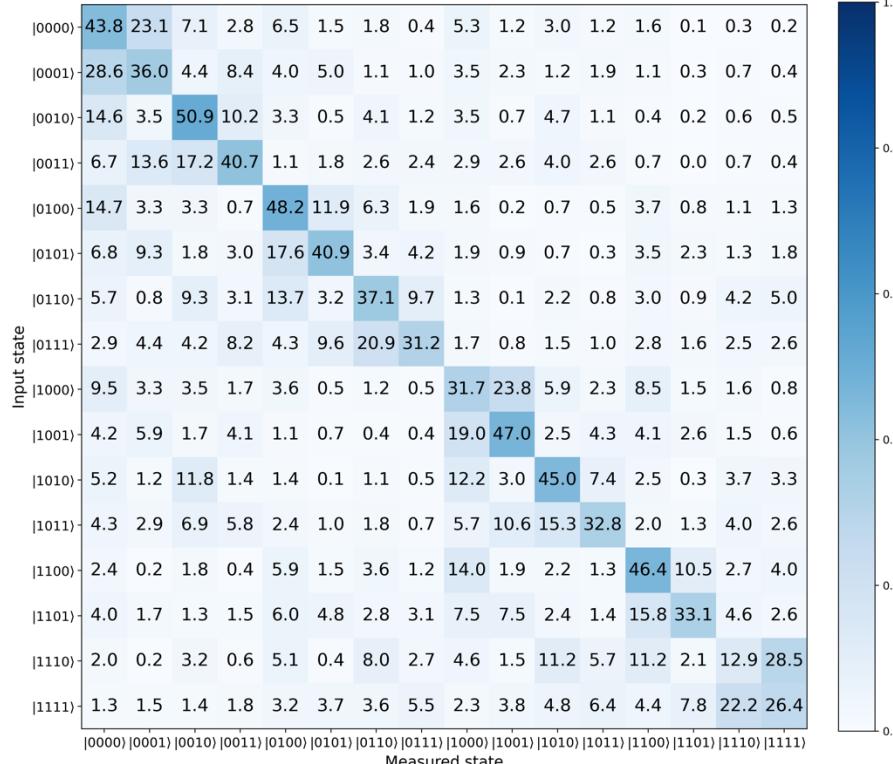
- Выполнен алгоритм Шнорра, включая квантовую часть fpQAOA (квантовый алгоритм приближенной оптимизации с фиксированными параметрами)
- Число $1591=37 \times 43$ разложено на простые множители с использованием 6 ионов из 10
- 15 двухкубитных операций с произвольными углами, полная связность



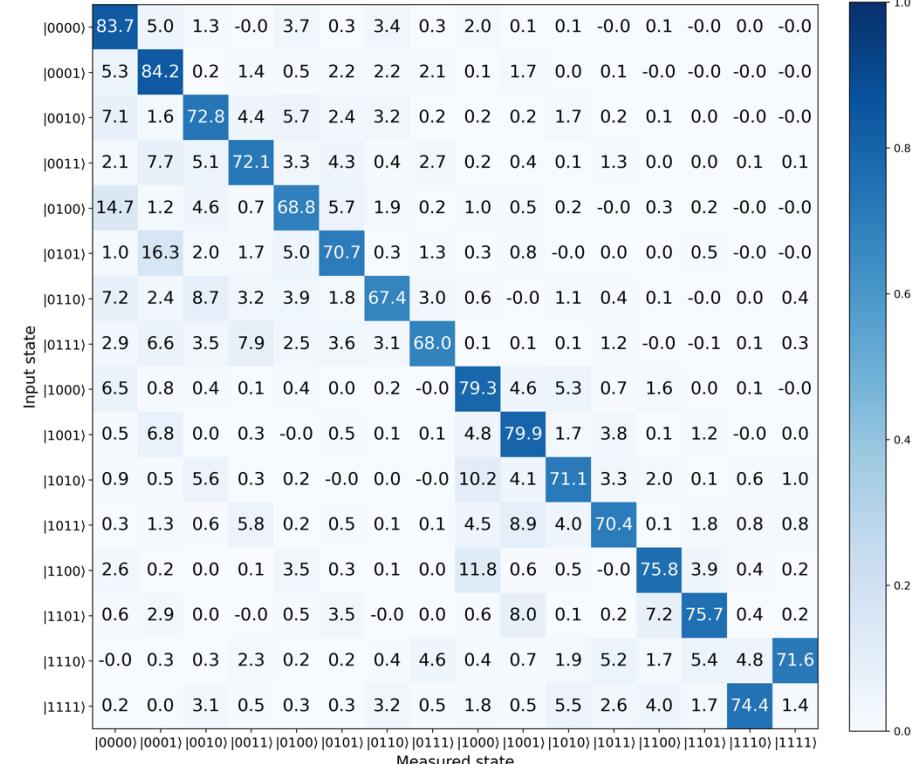
Коррекция ошибок – гейт Тоффоли



Кубитная реализация (4 кубита) $F = 39\%$



Кубитная реализация (4 кубита) $F = 74\%$

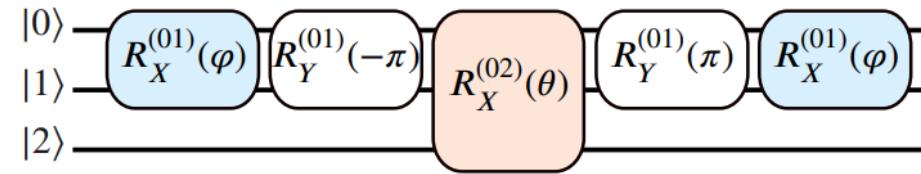


Моделирование гамильтонианов

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

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

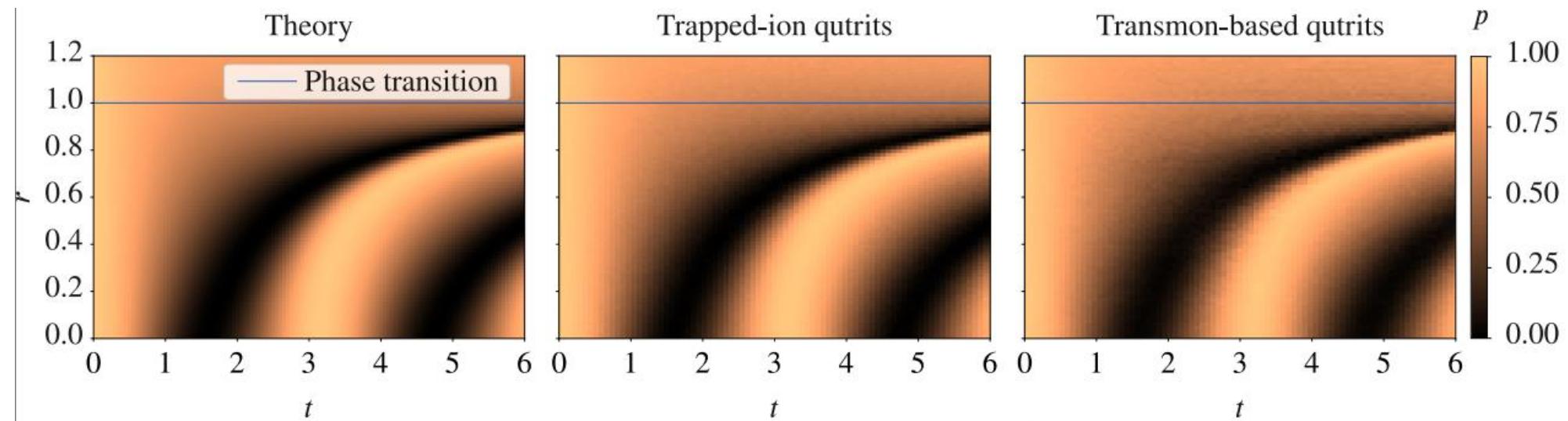
$r < 1$: PT-symmetry unbroken
 $r > 1$: PT-symmetry broken



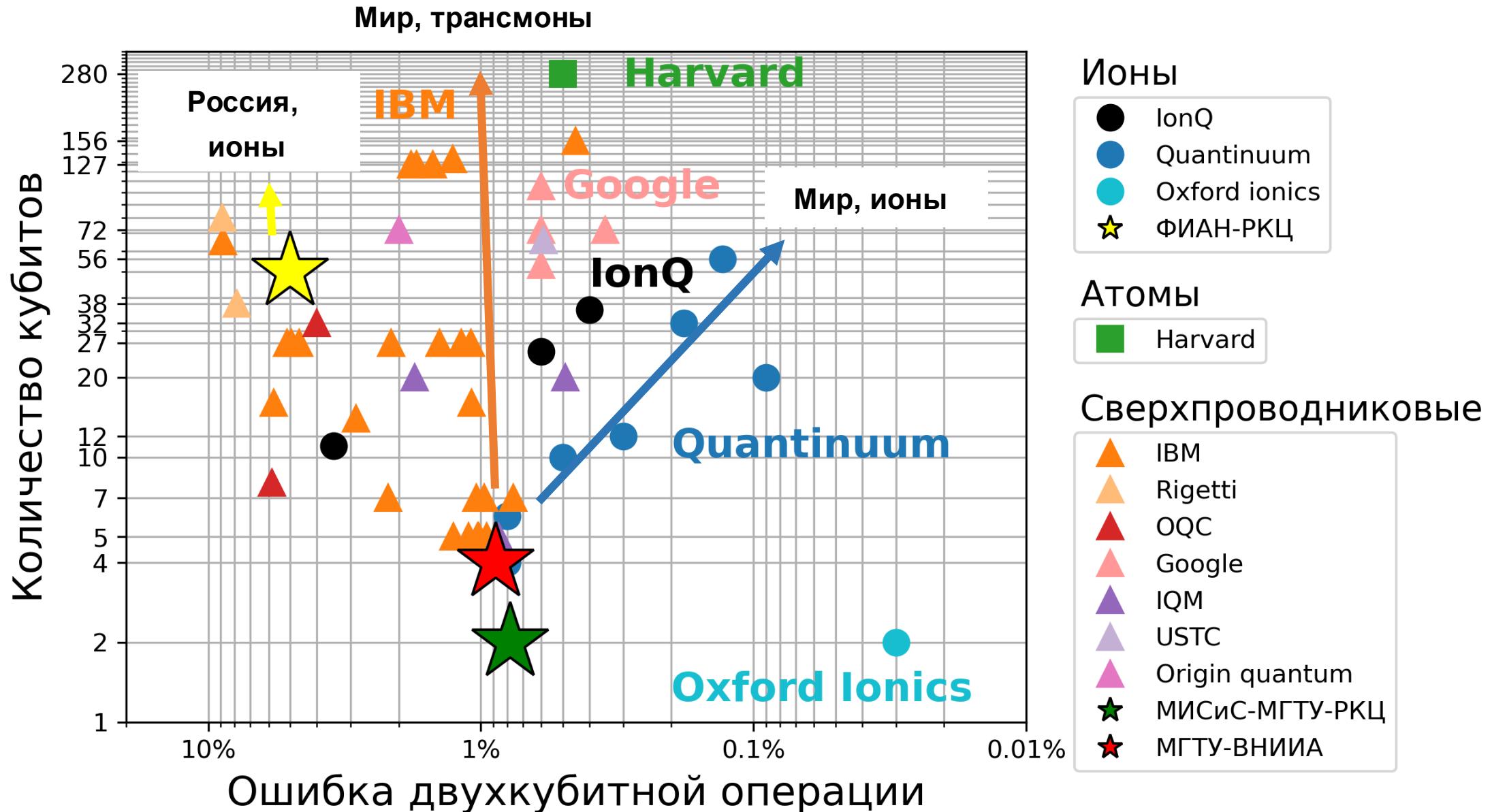
$$\sigma_{\pm}(t) = \frac{1}{|h|} \left(\sqrt{|1 - r^2 \cos^2(ht)|} \pm |r \sin(ht)| \right)$$

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

Параметры гамильтониана r, t кодируются в φ, Θ



Количество кубитов 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 кутритов).
- GHZ состояние (5 ионов).

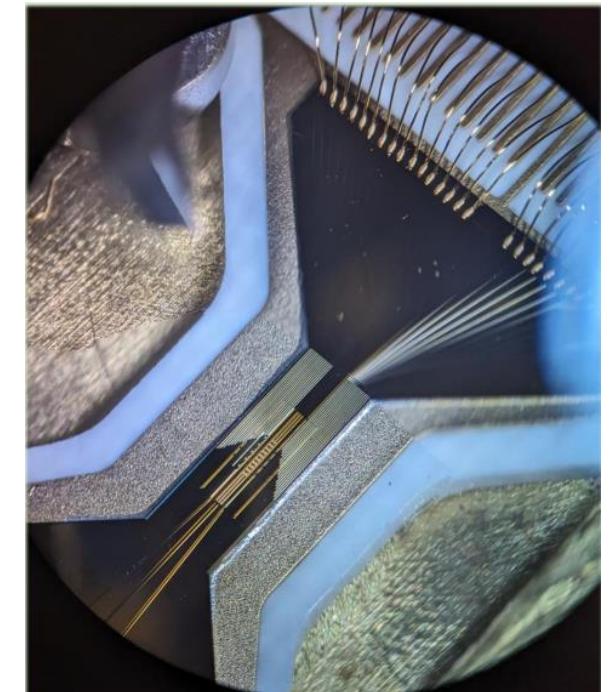


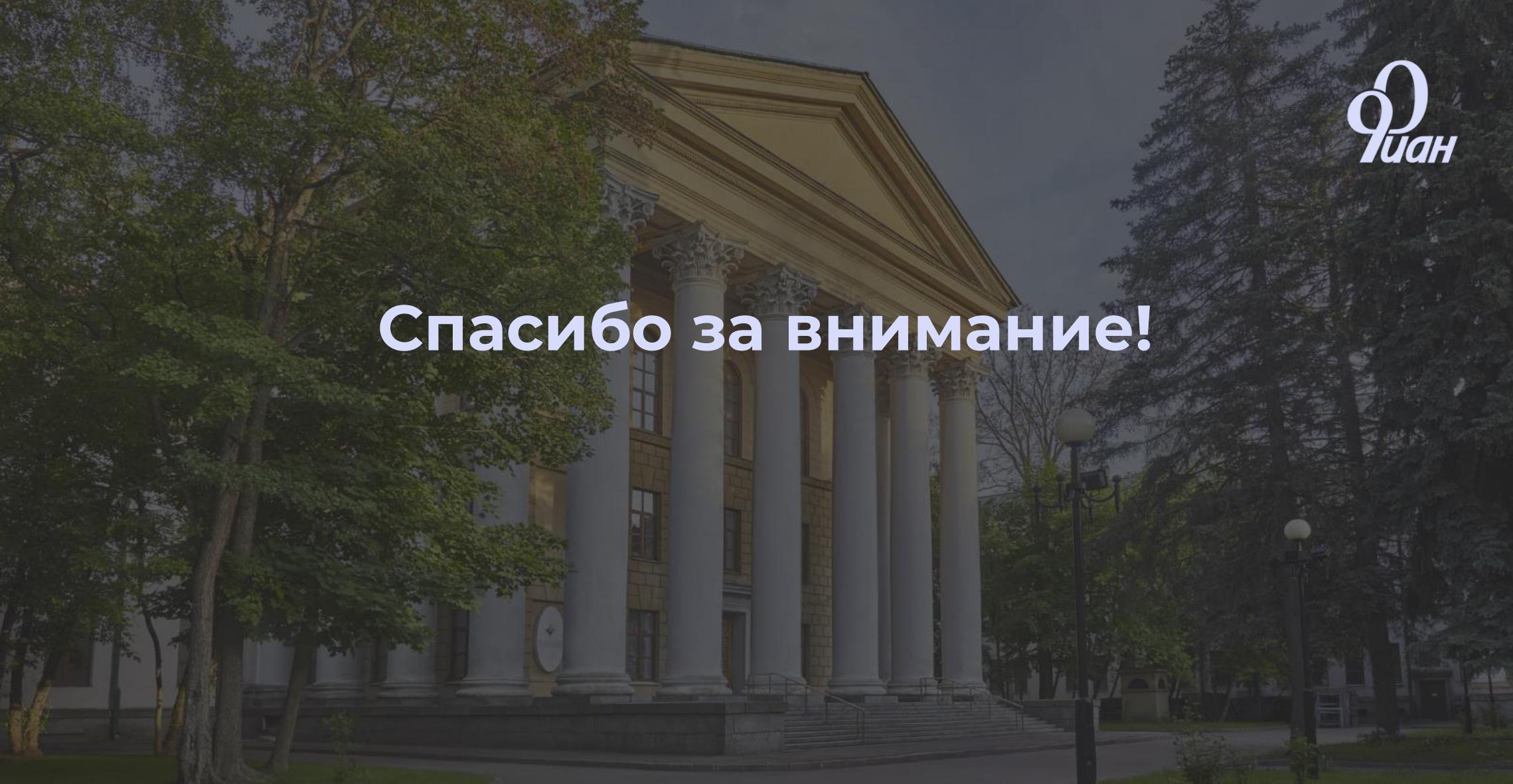
Запуск алгоритма квантовой химии.
Июль 2023 года

Горизонт 2030 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





Фан

Спасибо за внимание!