

**Разработки Казанского квантового центра КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева  
в области квантовых коммуникаций и квантовой памяти  
директор проф. С.А.Моисеев**

- 1. Специалистами Казанского квантового центра КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева совместно с Университетом ИТМО (г. Санкт-Петербург) в сотрудничестве с ОАО Таттелеком впервые в России реализованы:**
  - **Четырех-узловая квантовая сеть в городе Казань (2017 г);**
  - **Квантовая магистраль между городами Казань и Чистополь с расстоянием 160 км (рекордным для квантовых коммуникаций в естественных условиях).**

*Продемонстрированная технология открывает реальные перспективы для создания высокозащищенных городских квантовых сетей и квантовых коммуникаций между городами России.*

- 2. Теоретически и экспериментально разработаны оптические и микроволновые схемы квантовой памяти.**
  - **Теоретически предложен и экспериментально реализована оптическая квантовая память с наибольшей в России квантовой эффективностью, квантовая память актуальна для разработки оптического квантового репитера, необходимого для квантовых коммуникаций на большие расстояния (сотни и тысячи километров).**
  - **Впервые продемонстрирована широкополосная микроволновая память, создание которой необходимо для универсального квантового компьютера со сверхпроводящими кубитами.**

# Квантовые коммуникации

Зав. лаб. Практической квантовой криптографии, к.т.н. А.В.Глейм

## Актуальность

### Проблемы существующих методов защиты информации:

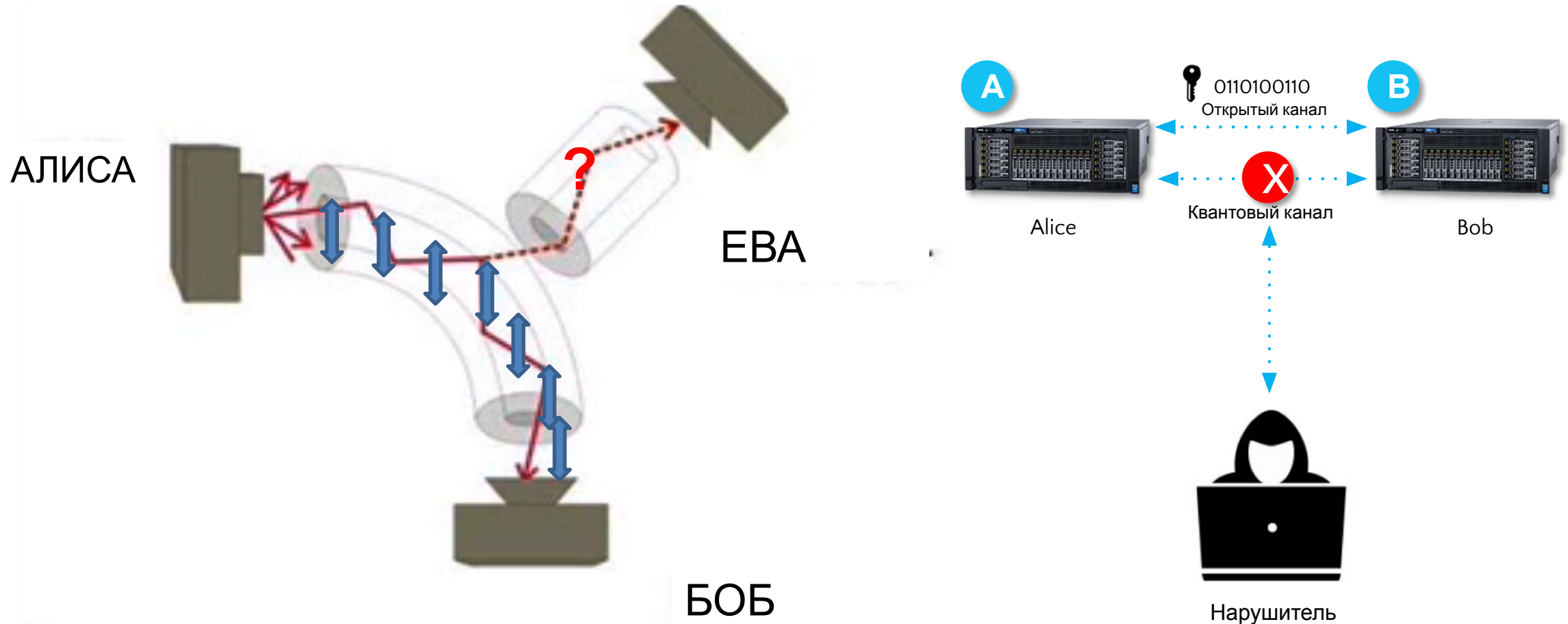
- В 2010 ключ RSA 768 bit был декодирован [1]
- Увеличение длины ключей перегружает инфраструктуру
- Квантовое превосходство достигнуто в 2017 году. Сообщается о создании квантового процессора на 512 кубит в 2013 году [2]



Крупнейший дата-центр АНБ  
(и третий по размеру среди всех дата-центров в мире)

**Предназначен для взлома закодированных данных**

# Принципы защищенной передачи данных на основе технологии квантовой коммуникации



**Невозможно «прослушать»  
или взломать в силу физических законов**

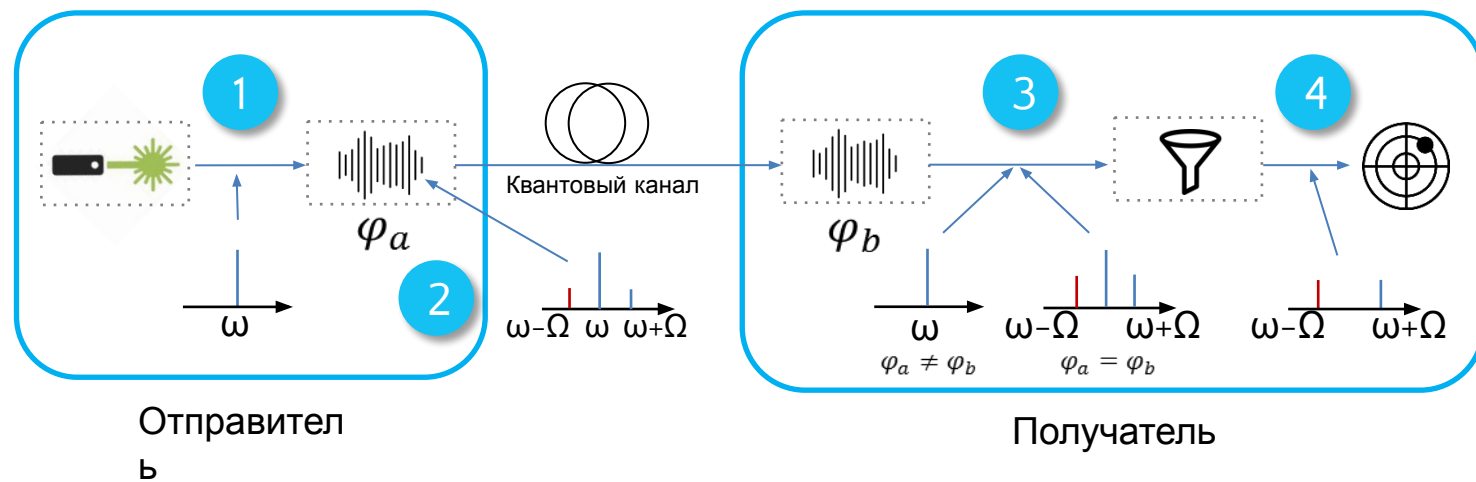
# Инфраструктуры квантовых коммуникаций в мире

Крупнейшие многоузловые квантовые сети созданы в США (разработка Управления перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA)), Европе (SEQOQC), Японии (Сеть Токио, разработчик – компания Toshiba), Китае и Австралии.

- 1 Западно-Американский
- 2 Восточно-Американский
- 3 Европейский
- 4 Британский
- 5 Китайский
- 6 Японский
- 7 Австралийский

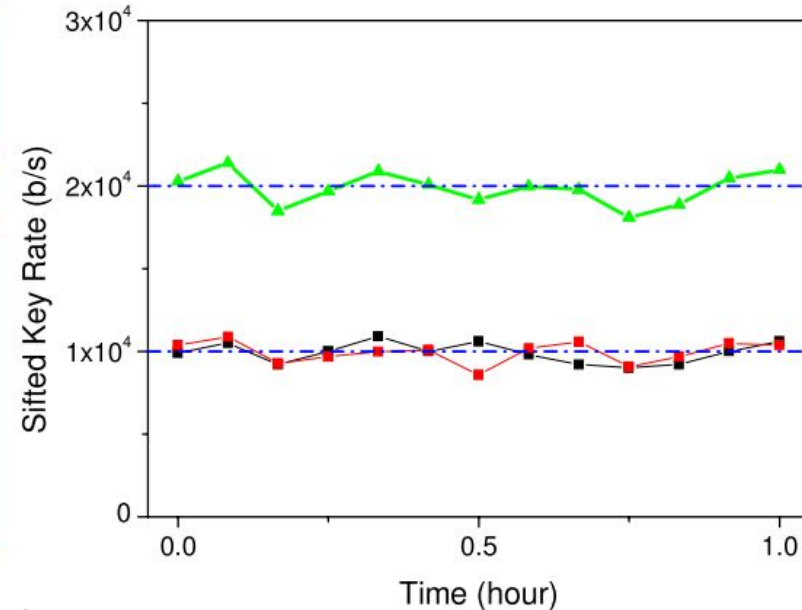
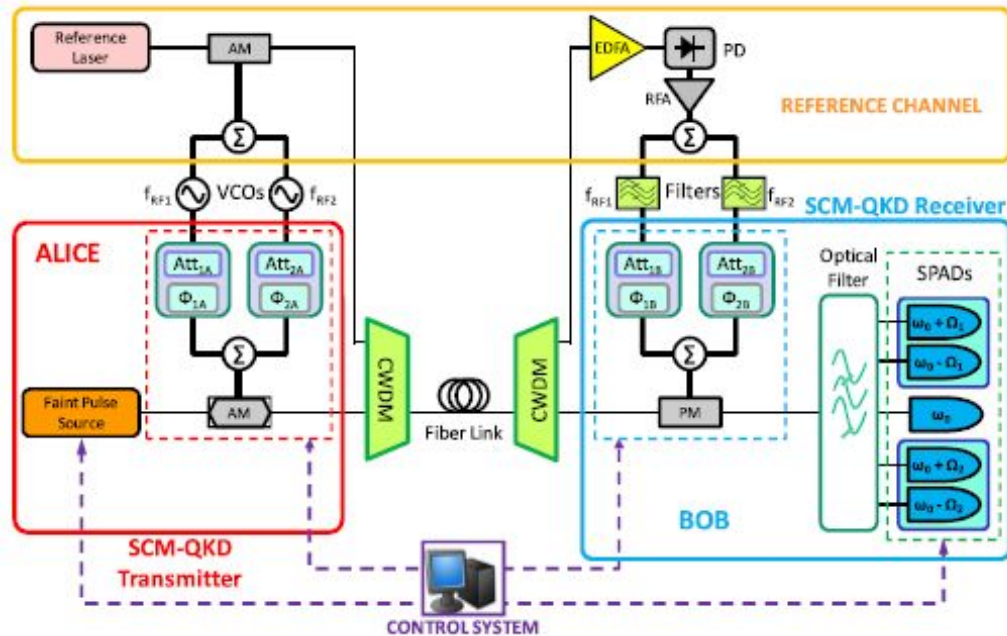


- 1 Лазер генерирует непрерывный сигнал, характеризуемый несущей частотой (длиной волны).
  - 2 В результате фазовой модуляции в спектре сгенерированного сигнала появляются две боковые частоты ( $\omega - \Omega$ ;  $\omega + \Omega$ ), характеризующиеся фазой модулирующего сигнала отправителя -  $\varphi_a$ , которая выбирается случайным образом из заранее заданных состояний в двух неортогональных базисах. Мощность сигнала боковых частот соответствует энергии единичного фотона.
- Ключевые преимущества:



1. **Высокая эффективность использования пропускной способности волоконно-оптической линии связи**
2. **Предельные расстояния между узлами до 250 км**
3. **Высокая устойчивость к воздействию на линию связи**
4. **Возможность построения масштабируемых (локальных, городских, магистральных) квантовых коммуникационных сетей**
5. **На основе протоколов с доказанной секретностью**

# Мультиплексирование боковых частот (2012, 2013)



- $F = 1$  MHz, 1557.30 nm,  $\Omega_1 = 10$  ГГц,  $\Omega_2 = 15$  ГГц,  $\mu = 1$  L = 11 km 10 Kbit/s
- Продемонстрирована возможность повышения спектральной эффективности использования канала до 40% [1]
- 40 квантовых и 4 классических канала переданы одновременно [2]

1. J. Mora, A. Ruiz-Alba, W. Amaya, A. Martínez, V. García-Muñoz, D. Calvo, and J. Capmany, "Experimental demonstration of subcarrier multiplexed quantum key distribution system," Opt. Lett. 37(11), 2031–2033 (2012)
2. J. Mora, W. Amaya, A. Ruiz-Alba, A. Martinez, D. Calvo, V. Garcia Mu-noz, and J. Capmany, Opt. Express 20, 16358 (2012).

## Прогресс в разработке систем КРК на боковых частотах

- WDM-синхронизация на средних дистанциях (40 км) [1]
- Мультиплексирование на боковых частотах [2-6]
- Протокол с состояниями-ловушками [8]
- BB84 с сильным опорным пучком [4-7]
- Параметры скорость: 20 кбит/с на 40 км [1,3]
- Предложено использовать КРКБЧ в открытом пространстве [9]

[1] O. Guerreau, J.-M. Merolla et al. //IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 9(6), 15331540 (2003)

[2] A. Ortigosa-Blanch, J. Capmany // Phys. Rev. A 73, 024305, (2006).

[3] J. Mora, A. Ruiz-Alba, J. Capmany et al. // Opt. Lett. 37, 2031-2033 (2012).

[4] J. Capmany // Opt.Express 17(8), 6457-6464 (2009).

[5] J. Capmany, C.R. Fernandez-Pousa // J. Lightwave Technol. 29(20), 3061-3069 (2011).

[6] J. Mora, W. Amaya et al. // Opt.Express 15(7) (2012).

[7] O. Guerreau, F. J. Malassenet, S. W. McLaughlin, J.-M. Merolla // IEEE Photon. Technol. Lett. 17(8), 1755 - 1757 (2005).

[8] S. Bhattacharya and P. Kumar // J. Opt. Soc. Am. B 30, 782-787 (2013)

[9] J. Cussey, M. Bloch et al. Integrated Direct-Modulation Based Quantum Cryptography System (2003)

# Сравнение существующих в мире технологий

							
	 Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева ITMO UNIVERSITY	 МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА	 RQC Russian Quantum Center	 id Quantique	 QASKY	 TOSHIBA	 NEC
	до 230 км	до 32 км	до 30 км	до 100 км	до 100 км	до 100 км	до 25 км
	до 100 кбит/с	нет данных	до 1,5 Кбит/с	до 30 Кбит/с	до 400 Кбит/с	до 1 Мбит/с	до 150 Кбит/с
	<p>Наш подход</p> <p>Коммерческие системы квантовых коммуникаций по ВОЛС</p>						



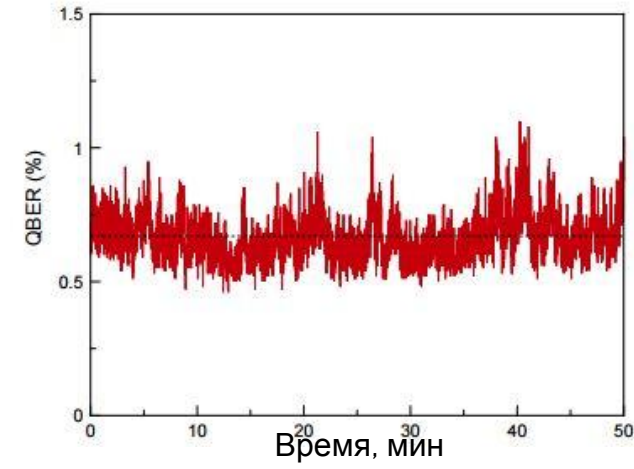
# Испытательный полигон системы ККБЧ в г. С-Петербург

Участок между корпусами Университета ИТМО на Биржевой линии В.О., д.16 и Кадетской линии В.О., д.3Б  
Санкт-Петербург, 2014-2016



Схема участка сети между корпусами  
Университета ИТМО на Биржевой линии В.О.,  
д.16 и Кадетской линии В.О., д.3Б<sup>6</sup>

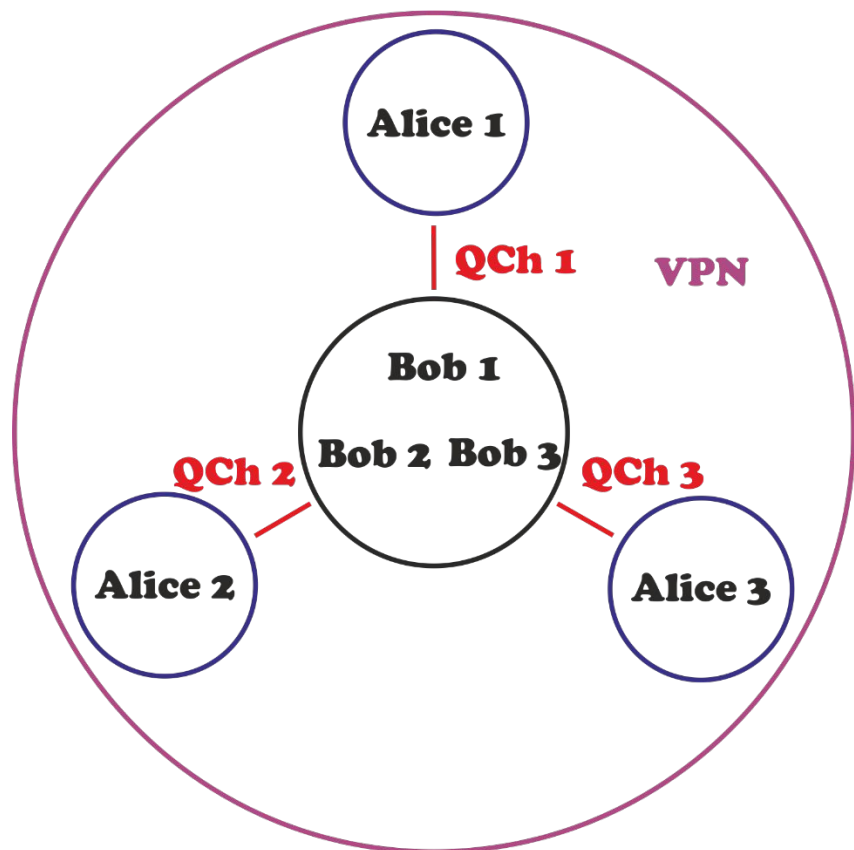
<sup>6</sup>Глейм, А.В. Квантовая коммуникация на боковых частотах со скоростью 1 Мбит/с в городской сети / А.В. Глейм, В.И. Егоров, В.В. Чистяков, С.В. Смирнов, О.И. Банник, Н.В. Булдаков, А.А. Гайдаш, А.В. Козубов, А.Б. Васильев, С.М. Кынев, С.Э. Хоружников, С.А. Козлов, В.Н. Васильев // Оптический журнал. - 2017. - Т. 84. - № 6. - С. 3-9



## Технические параметры:

- Расстояние: 1 км
- Потери в линии: 1,6 дБ
- Скорость генерации просеянного ключа: 1 Мбит/с
- Скорость генерации секретного ключа: 200 кбит/с
- QBER: 1%
- Тип волокна – Smf-28e
- Длина волны излучения: 1550 нм

# Разработка сетевого решения в г. Казани на оптоволоконных линиях ПАО Таттелеком (2017 г.)



\***QCh - Quantum Channel**

\***VPN - Virtual Private Network**

Рис. логическая схема сети в Казани



Рис. Расположение узлов сети

# Квантовая магистраль Казань-Чистополь

декабрь 2018-январь 2019



- Наиболее протяженная линия квантовой связи без устройств регенерации в действующем волоконно-оптическом кабеле
- Оригинальный подход в области квантовой криптографии
- Возможность построения межрегиональных федеральных сетей
- Доказанная стойкость протокола



# Технические характеристики

- Скорость генерации квантового ключа: до 100 кбит/с
- Частота обновления ключа до 100 раз в секунду
- Скорость передачи данных 1 Гбит/с
- Поддержка протоколов TCP/IP, UDP
- Маршрутизация L2/L3
- Предельные потери в оптическом канале: 39 дБ (230 км)
- Спектральный диапазон C (1530 .. 1565 нм)
- Тип волокна: SMF-28e или аналогичное
- Интерфейс подключения: fc/арс
- Частота импульсов: 100 МГц



# Разработка квантовой памяти для квантового репитера

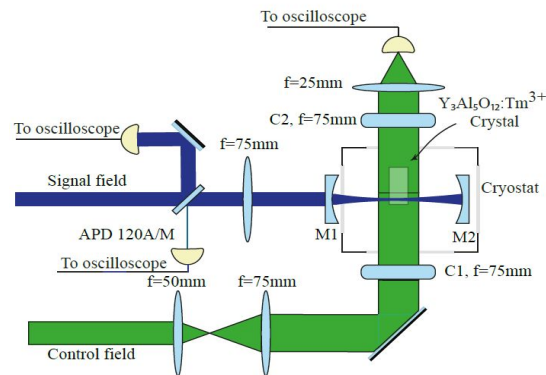
## и для универсального квантового компьютера

Зав. лаб. Квантовой памяти и коммуникаций проф. С.А.Моисеев

### Реализация схемы оптической квантовой памяти на фотонном эхе в резонаторе

M.M. Minnegaliev, K.I. Gerasimov, R.V. Urmancheev, S.A. Moiseev, Quantum memory in the scheme of revival of silenced echo in an optical resonator. Quantum Electronics 48 (10) 898–901 (2018).

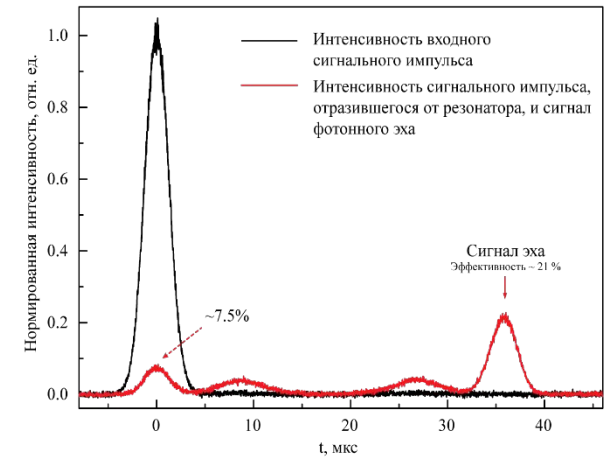
Принципиальная схема экспериментальной установки по оптической квантовой памяти на фотонном эхе в резонаторе



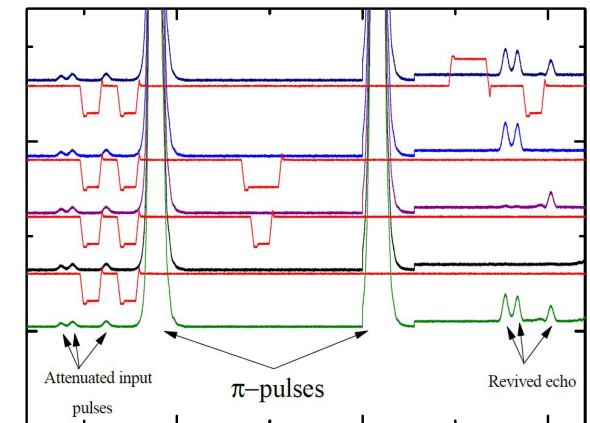
Предложены схемы широкополосной оптической квантовой памяти, позволяющей достигать квантовой эффективности 99 %.

Н.М. Арсланов, С.А.Моисеев, Карты широкополосной квантовой памяти на частотной гребенке атомных линий. Опт. и спектр. (2019, в печати)

Временная диаграмма сигнального светового импульса и его восстановления в сигнале фотонного эха. Квантовая эффективность восстановления = 21 % (рекордный в России результат)



Демонстрация адресной записи и восстановления световых импульсов в схеме оптической квантовой памяти на основе протокола восстановления "спящего" фотонного эха.



# Экспериментальные научные результаты

## 2. Разработка и реализация принципиальной схемы широкополосной микроволновой квантовой памяти для универсального квантового компьютера

S.A. Moiseev, K.I. Gerasimov, R.R. Latypov, N.S. Perminov, K.V. Petrovnin, and O.N. Sherstyukov. "Broadband multi-resonator quantum memory-interface" Scientific Reports V.8, 3982 (2018)

Схема микроволновой квантовой памяти на системе резонаторов

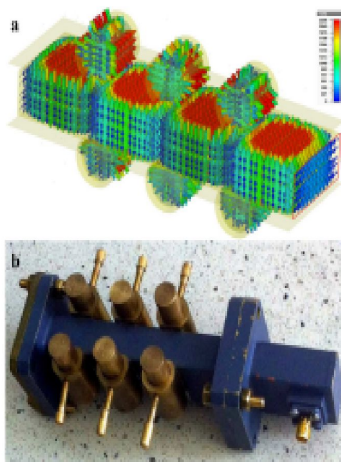


Figure 1. (a) Simulation of the microwave field in the QMI system using the CST Studio Suite 2015 program. The color arrows show the amplitude of the electric field strength in the resonators. (b) Fabricated setup used in our experiments.

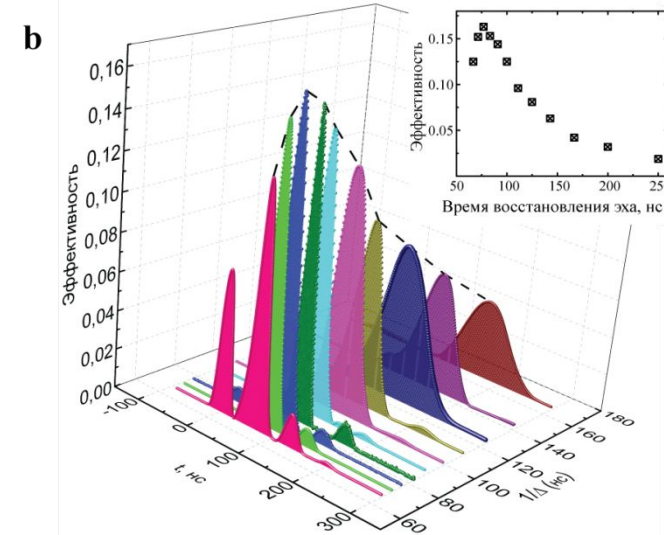
SCIENTIFIC REPORTS

OPEN Broadband multi-resonator quantum memory-interface

S. A. Moiseev, K. I. Gerasimov, R. R. Latypov, N. S. Perminov, K. V. Petrovnin<sup>1,2</sup> & O. N. Sherstyukov

Экспериментальные результаты:  
Временная диаграмма последовательности сигнального импульса (первый) и эхо-сигналов восстановленных  
Квантовая эффективность восстановления = 16 % (рекордный в мире результат для широкополосной микроволновой памяти).

Справка. Разработанная схема перспективна для реализации на ее основе высокоэффективной квантовой памяти для универсального квантового компьютера на сверхпроводящих кубитах



Разработаны схемы суперэффективной многорезонаторной квантовой памяти, позволяющей достигать квантовой эффективности 99.9 %

Спектральное поведение квантовой эффективности >99.9%

SCIENTIFIC REPORTS

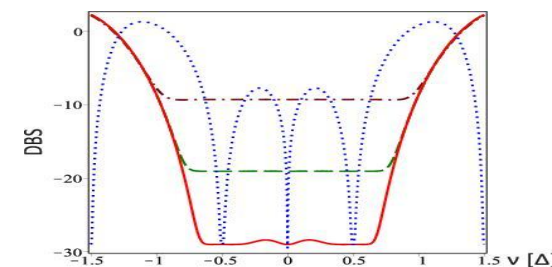
OPEN Spectral-Topological Superefficient Quantum Memory

N. S. Perminov & S. A. Moiseev

In this work, we propose a universal (spectral-topological) approach towards the realization of the

N.S. Perminov, and S. A. Moiseev. Spectral-Topological Superefficient Quantum Memory. Scientific Reports V.9, 1568 (2019).

N.S. Perminov, D. Yu. Tarankova, and S. A. Moiseev. Superefficient cascade multi-resonator quantum memory Laser Phys. Lett. 15, 125203 (2018).



# О квантовой магистрали Казань-Чистополь

декабрь 2018-январь 2019

Реализована городская квантовая сеть и квантовый канал между двумя городами, который является рекордным в мире по расстоянию передачи ключа по сравнению с существующим квантовым коммуникациям, использующим коммерческие волокна, что характеризует высокое качество разрабатываемой в Казани оригинальной квантовой технологии (см. презентацию), которая к тому же открывает возможность работать одновременно с несколькими каналами передачи информации в одном оптическом волокне. Технология прошла проверку в ноябре 2018 года на полигоне Сбербанка России.

## **Справка о возможности применения разработанной технологии**

на сегодняшний день в США, Европе и в Китае существуют междугородние квантовые каналы, однако, длина одного пролёта между узлами, в котором реализуется защита передаваемой информации, не превышает 80-90 км и делает невозможным строительство протяженных магистралей.

В связи с разворачиванием российской программы в области разработки и практического внедрения систем квантовой защиты информации, стартовавшей в декабре 2016 года, разработанная нами квантовая технология генерации ключа перспективна для создания на ее основе защищенных оптоволоконных линий связи в городской среде между многими точками и для создания таких линий между городами.

Реализация квантовых коммуникаций на сверхбольшие расстояния требует разработки квантовых повторителей.