



РОСАТОМ



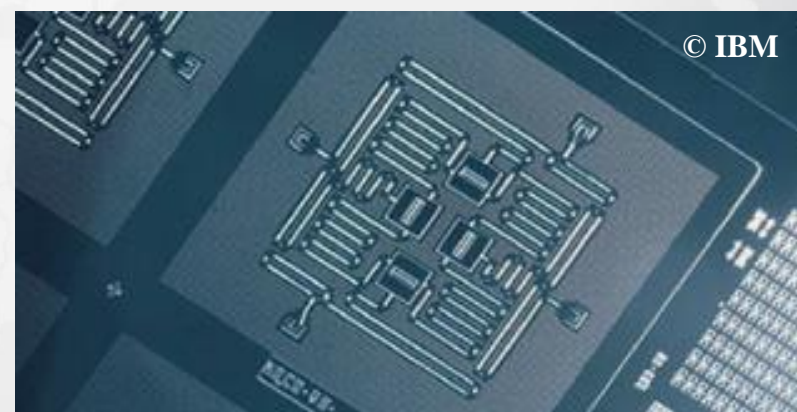
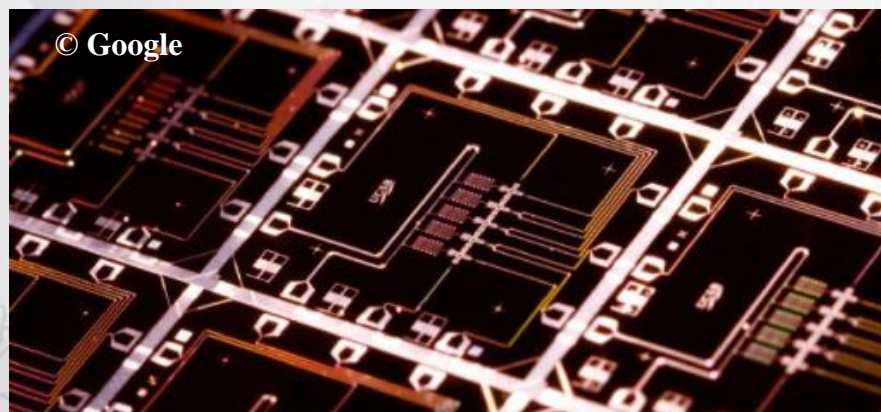
ФОНД  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

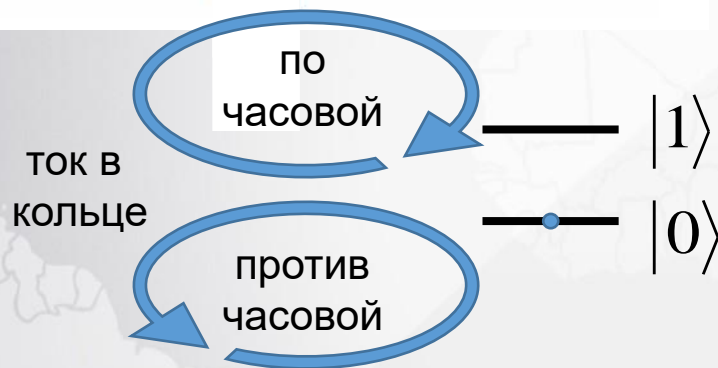
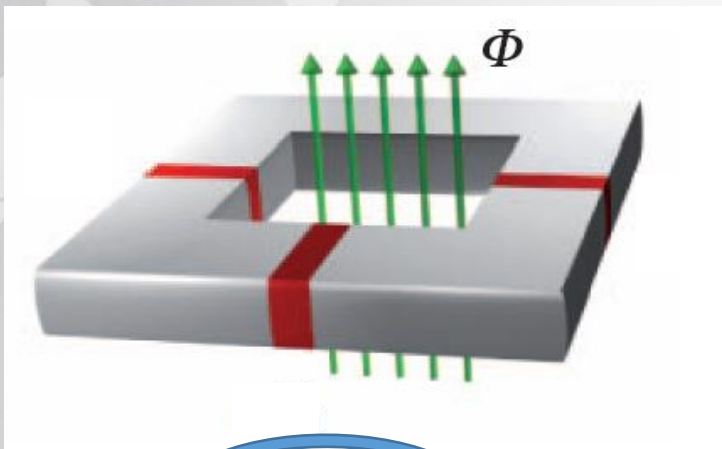


Минобрнауки  
России

# Развитие квантовых вычислений в России на основе сверхпроводящих кубитов

д.ф.-м.н., проф. **Рязанов Валерий Владимирович**  
руководитель проекта Фонда Перспективных Исследований  
зав. Лабораторией сверхпроводимости ИФТТ РАН  
ФГУП «ВНИИА», Росатом (головная организация проекта ФПИ)





Искусственный двух-  
уровневый атом,  
аналогичный частице  
со спином  $\frac{1}{2}$

- Вычислительная система, основанная на использовании законов микромира (квантовой механики).
- Эффективен для специфических проблем – прежде всего задач перебора, поиска в базах данных, для которых разработаны специальные (квантовые) алгоритмы.
- Может быть основан на реальных атомах, ионах, фотонах, других микрообъектах. Трудности масштабирования.
- Сверхпроводящий квантовый компьютер основан на «искусственных атомах» - сверхпроводящих схемах с субмикронными элементами, проявляющими макроскопические квантовые свойства – квантовую когерентность.

-**Квантовые алгоритмы** обеспечивают одновременное рассмотрение *всех* возможных вариантов решения (квантовый параллелизм), а не последовательный перебор вариантов, как в обычном компьютере.

Отсюда – радикальное ускорение для такого типа задач.

## Практические задачи для квантовых компьютеров

### **Универсальные квантовые компьютеры**

факторизация (алгоритм Шора)

поиск в базе данных (алгоритм Гровера и др.)

квантовая химия

расчет новых материалов...

### **Адиабатические компьютеры, устройства квантового отжига**

задачи оптимизации

машинное обучение (combinatorial optimization problems)

искусственный интеллект ...

### **Аналоговые квантовые компьютеры (симуляторы)**

моделирование квантовых систем

фотосинтез и лекарства

квантовый "Лего"...



## Государственная корпорация по атомной энергии (Росатом)

Использование в квантовом моделировании в интересах материаловедения



## Логистические компании (РЖД)

Использование результатов решения задач оптимизации с помощью многокубитных устройств



## IT компании

Реализация квантовых алгоритмов для кодирования и «взлома» криптографических систем



## Силловые структуры РФ

Использование результатов для обеспечения защиты информации



# ТИПЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КУБИТОВ



РОСАТОМ

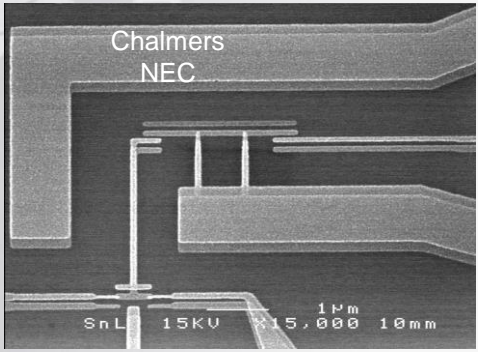


ФОНД ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

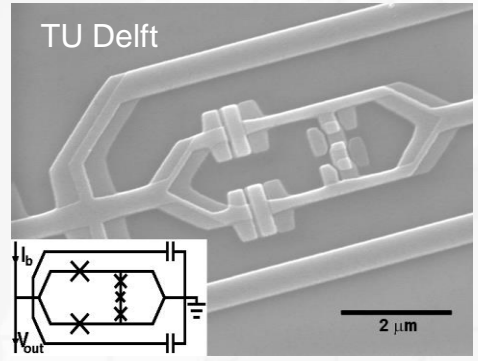


Минобрнауки России

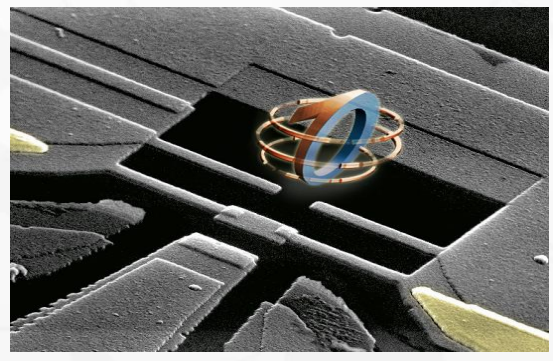
зарядовый 1999



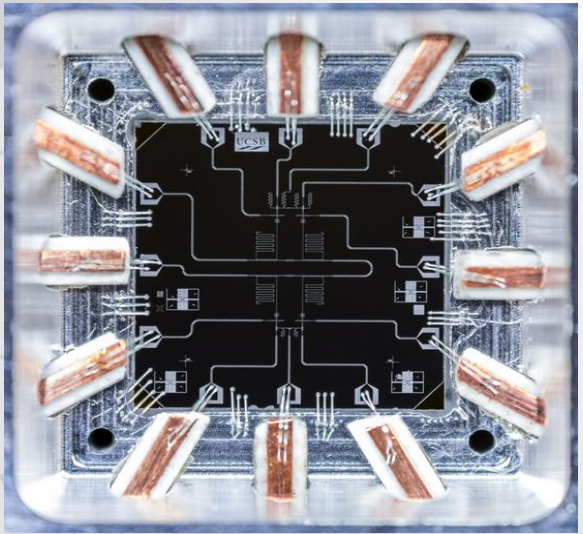
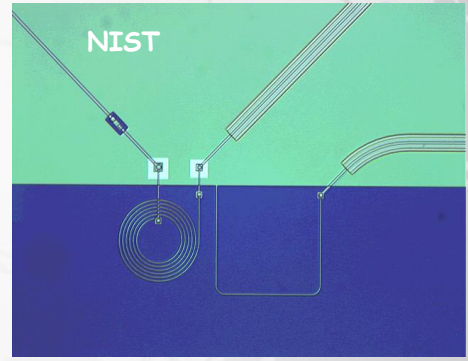
поточковый 2002



заряд/поток 2004



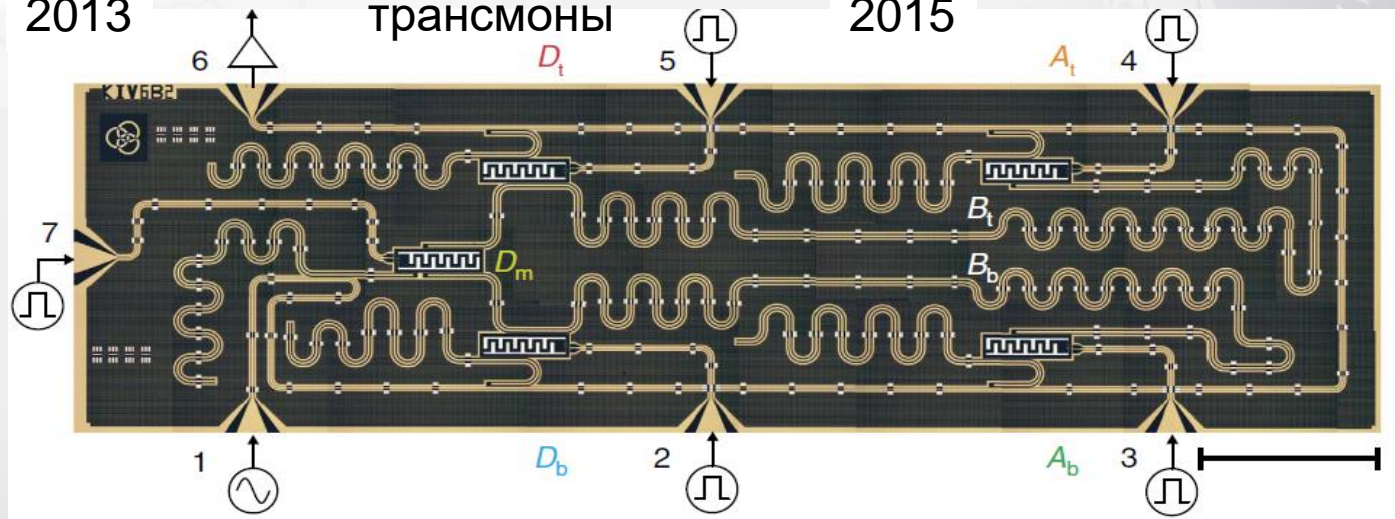
фазовый 2004



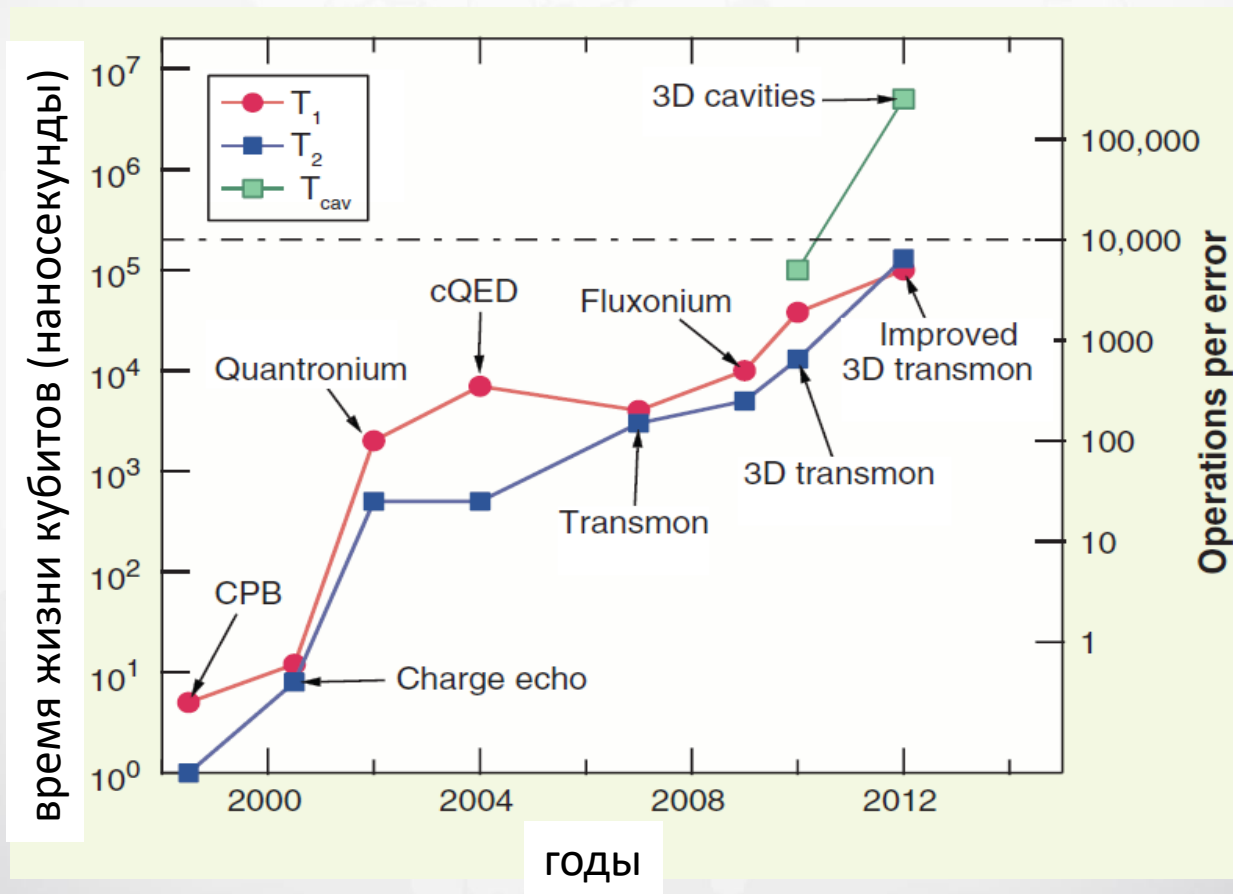
2013

трансмоны

2015

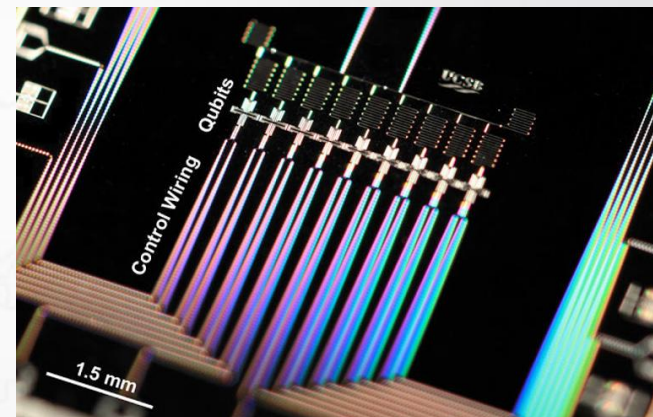
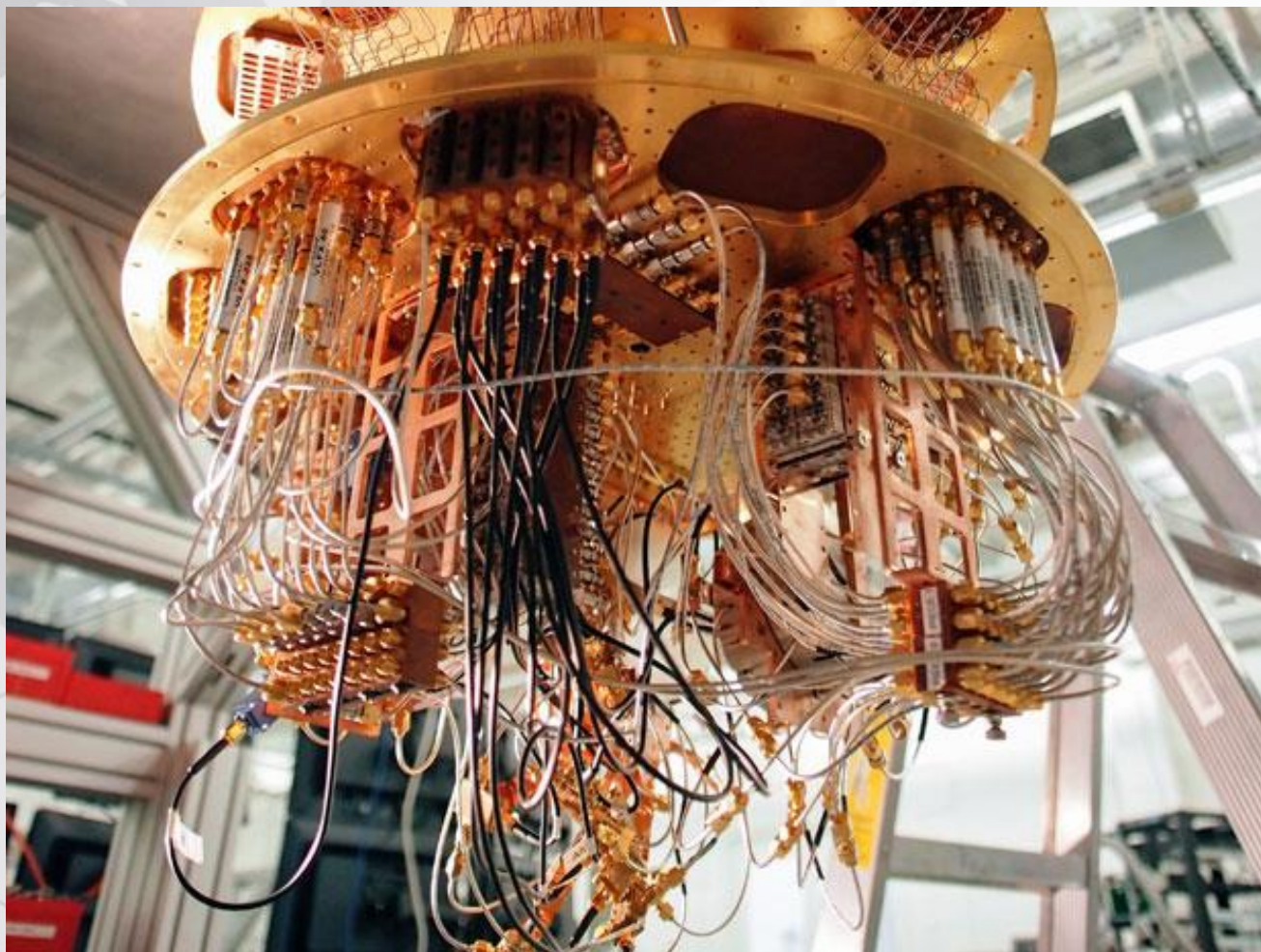


## Время жизни (когерентности) кубитов: «закон Мура» для сверхпроводников



M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, *Science* **339**, 1169 (2013)





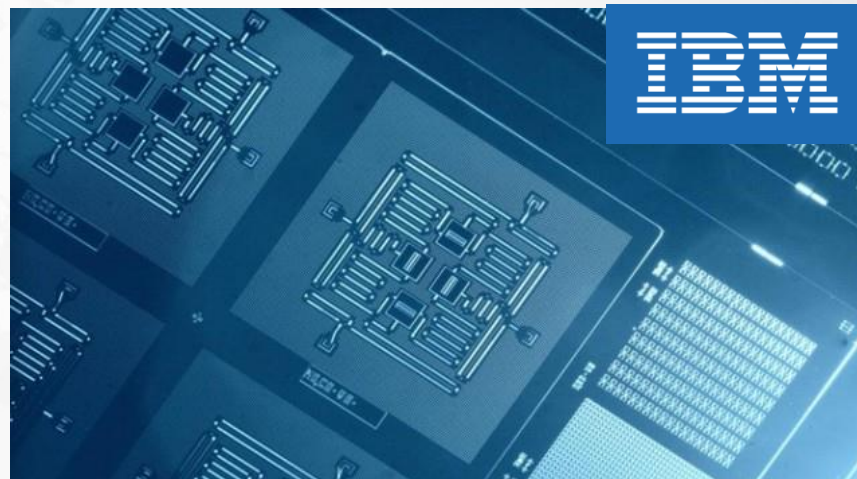
9 кубитов  
Google  
(2015)

Google

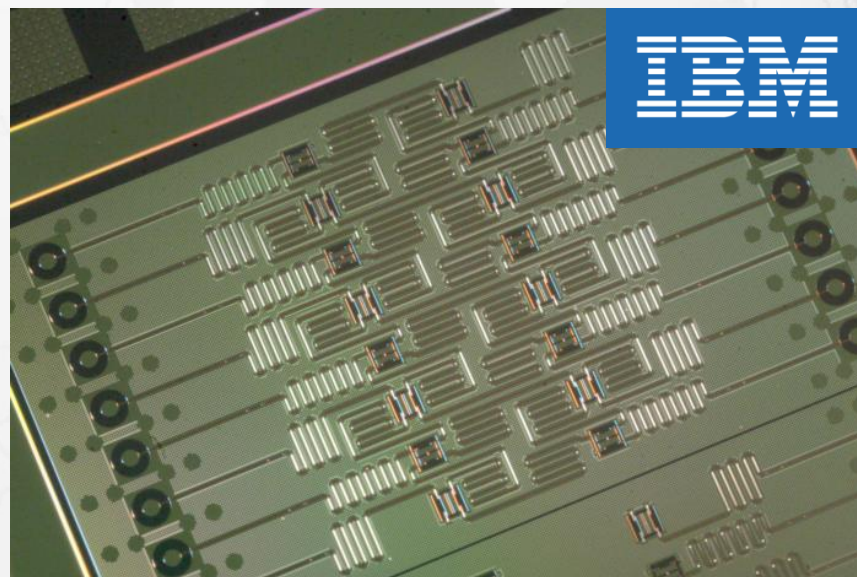
John  
Martinis

Google в начале 2018 г. представил квантовый процессор на 72 сверхпроводящих кубитах. Цель - продемонстрировать "квантовое превосходство".

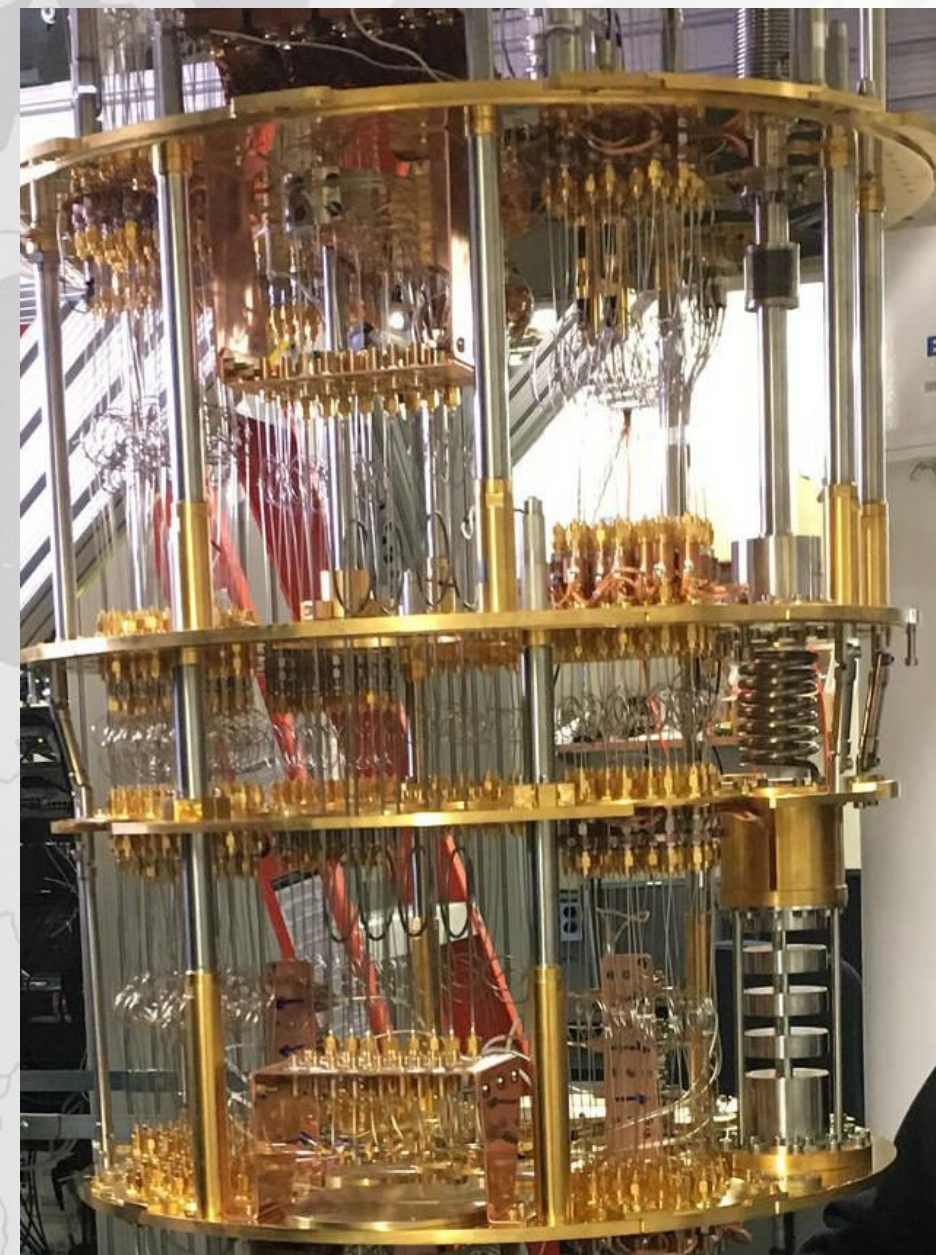




5-кубитый процессор IBM (2015)



16-кубитый процессор IBM (2017)





Начало: 2013-2015 гг.

июль 2013 г.

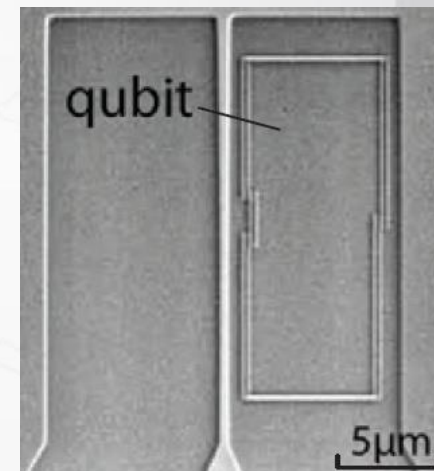
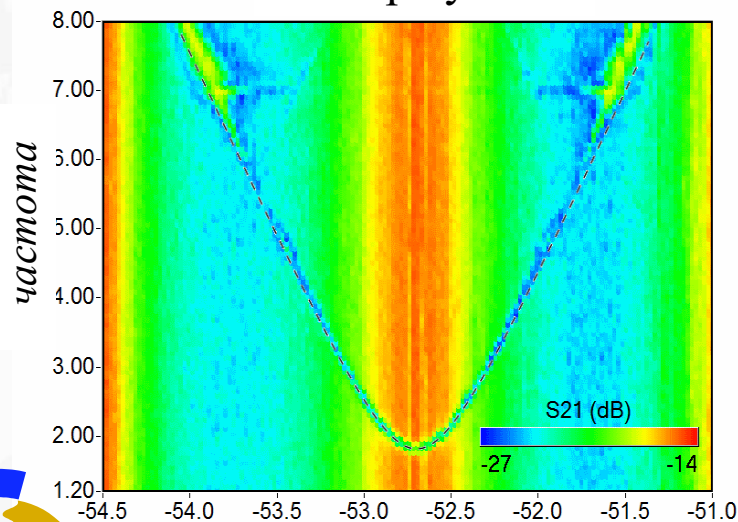
Первый кубит,  
измеренный в России,  
МИСиС и РКЦ



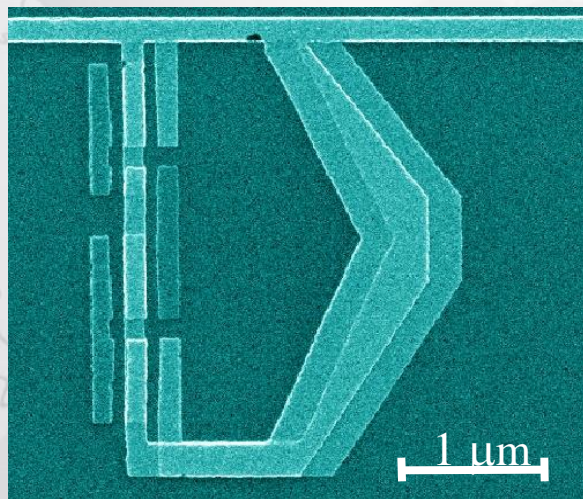
Кубит изготовлен в  
Германии



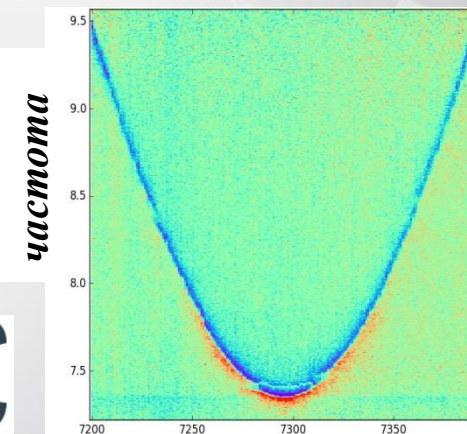
спектр кубита



магнитный поток



май 2015 г.  
первый кубит,  
изготовленный  
в России



магнитный поток



## Цели проекта (2016-2019 гг)

- изготовление «аналоговых» многокубитных систем (квантовых симуляторов) и демонстрация возможности моделирования задач материаловедения, связанных с моделями Изинга для магнитных материалов и моделями Хаббарда для сильно-коррелированных электронных систем;
- реализация универсального набора квантовых гейтов
- реализация алгоритма Гровера или другого простейшего квантового алгоритма, демонстрация возможности быстрого решения задач перебора и оптимизации.

## 2020-2025 гг.

- Реализация многокубитных квантовых вычислительных систем с «квантовым превосходством» над классическими вычислительными системами

### Участники проекта

ФГУП «ВНИИА» (государственный заказчик)  
НИТУ «МИСиС»,  
МФТИ,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
НГТУ (Новосибирск)  
Российский квантовый центр  
ИФТТ РАН.



## ФГУП «ВНИИА»

Теория когерентных систем, квантовые алгоритмы и технология

### МФТИ

Нанотехнология и измерения кубитов и др. квантовых схем

### ФГУП «ВНИИА» - МГТУ им.Баумана

Головной  
технологический центр  
проекта,  
изготовление  
кубитных схем

### МИСиС

Измерения кубитов и  
многокубитных схем в  
резонаторах  
(в том числе 3D)

### РКЦ и ИФТТ РАН

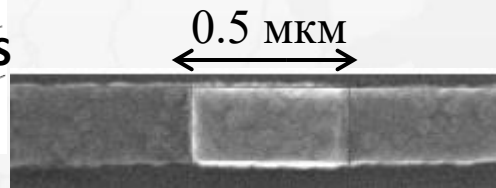
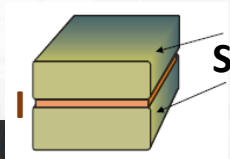
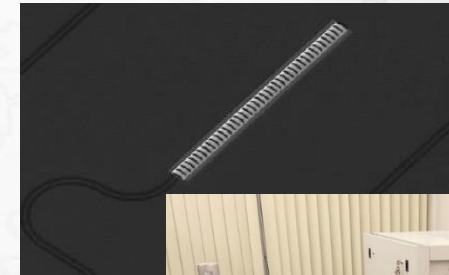
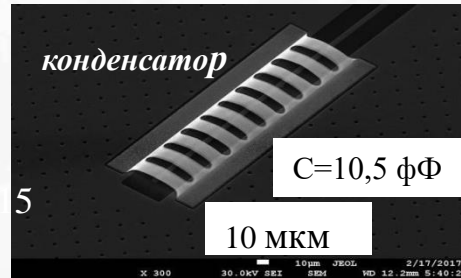
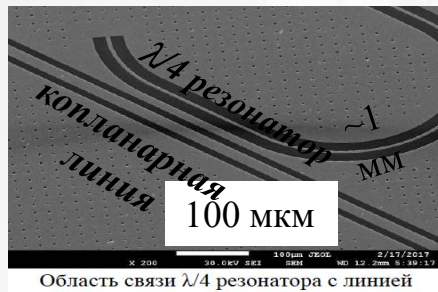
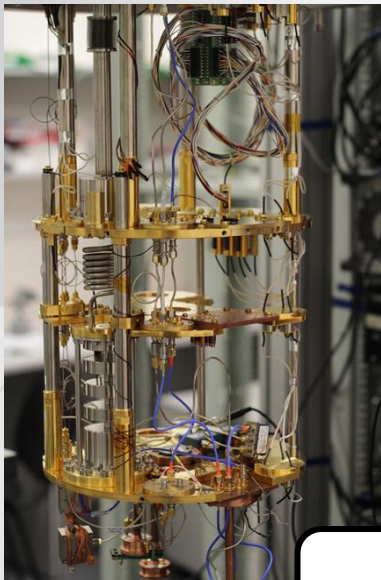
Технология и  
измерения кубитов,  
теория квантовых  
схем

Общее число сотрудников : **около 100**,  
из них около 30 человек на полной  
занятости.

### Новосибирский ГТУ

Разработка  
низкотемпературной  
и др. электроники,  
измерения

# Разработка методик изготовления субмикронных джозефсоновских переходов $Al-AlO_x-Al$ и высокочастотных СВЧ структур.



ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАСОК

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУННЕЛЬНЫХ  
ПЕРЕХОДОВ

НАПЫЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЯ

ИФТТ И РКЦ



МФТИ



# Развитие импульсных СВЧ- методик микроволновых манипуляций и контроля состояния одиночных кубитов

Кубит – это кольцо из сверхпроводника с одним или несколькими джозефсоновскими переходами

С точки зрения квантовой механики, кубит – это рукотворная модель атома, с состояниями  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$

*классический бит*



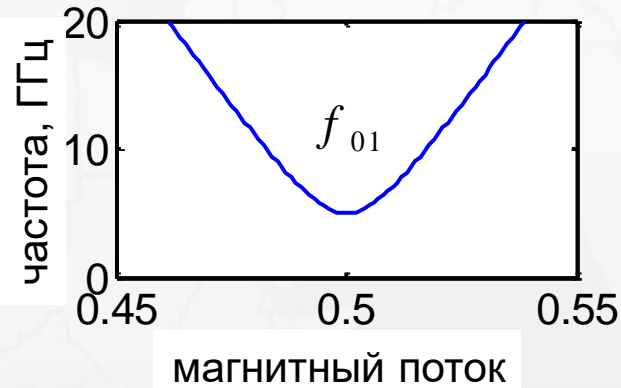
*кубит*

*волновая функция*

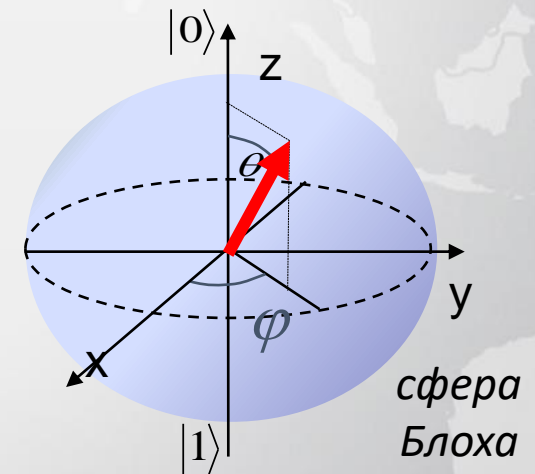
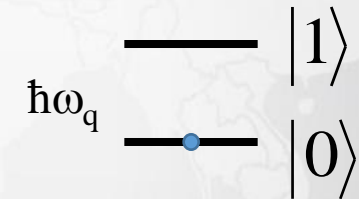
$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

суперпозиция состояний

спектр кубита



двух-уровневый атом



# Считывание состояний одиночных кубитов

Основа метода *дисперсионного считывания*  
**Дисперсионный сдвиг частоты резонатора при  
 изменении состояния кубита:**

$$\Delta\omega_r = \pm \frac{\tilde{g}}{\omega_q - \omega_r}$$

$\tilde{g}$  - эффективная связь резонатора и кубита;

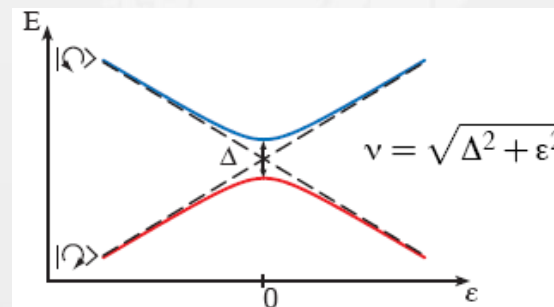
$\omega_q = \nu/\hbar$  - частота кубита;

$\omega_r$  - исходная резонансная частота резонатора .

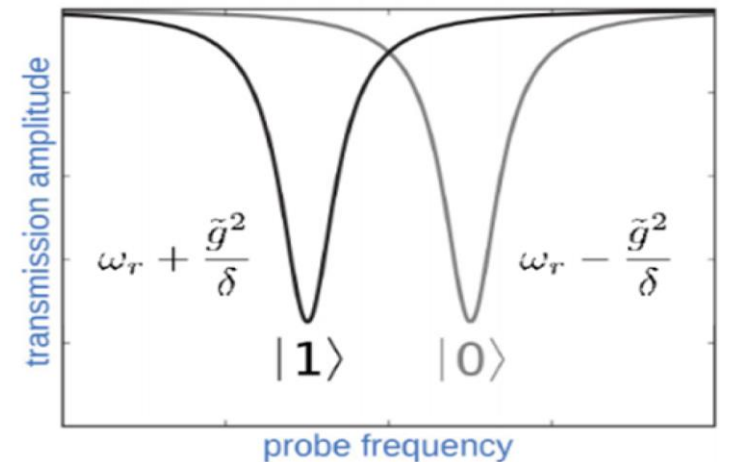
$I_p$  - ток в кольце кубита;

$\Phi$  - магнитный поток  
 через кубит;

$\Phi_0$  - квант магнитного  
 потока.



$$\varepsilon = 2I_p * (\Phi - \Phi_0/2)$$



Считывается проекция  
 состояния кубита  
 на ось z



## Времена когерентности кубитов

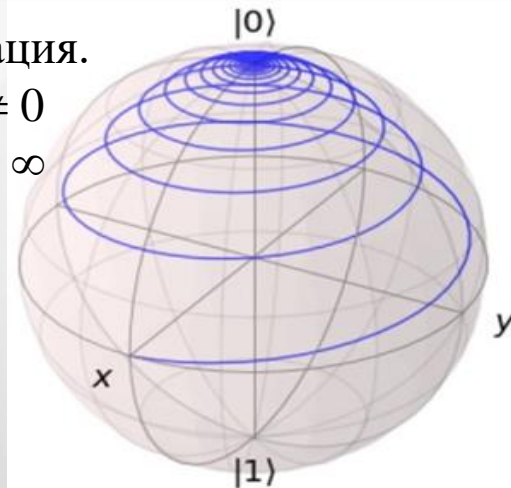
### Релаксация и Дефазировка

- Время релаксации  $T_1$ : время возврата состояния кубита из возбуждённого к равновесному. Обусловлено наличием примесных двухуровневых систем, имеющих спектральную плотность на частоте кубита.
- Время свободной прецессии  $T_2^*$ : характерный период дефазировки состояния кубита в плоскости  $xu$  на сфере Блоха. Обусловлено наличием механизмов, влияющих на частоту кубита, *необратимых и обратимых* (тем или иным образом связанных с самим измерением).
- Время дефазировки  $T_2$ : характерный период *необратимой* дефазировки состояния кубита в плоскости  $xu$ , связанное с процессами шумового характера.

Релаксация.

$$1/T_1 \neq 0$$

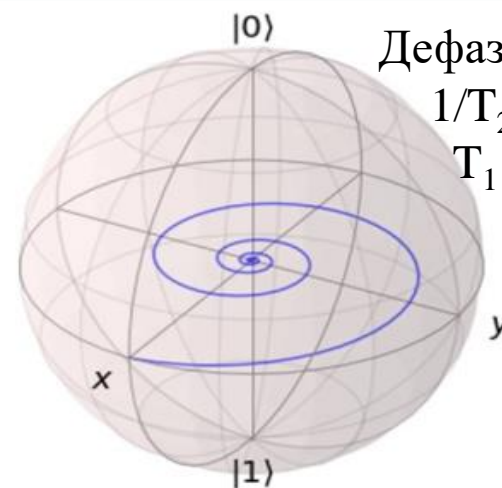
$$T_2^* = \infty$$



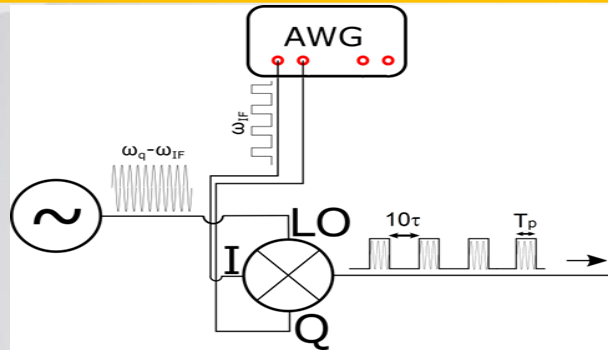
Дефазировка.

$$1/T_2^* \neq 0$$

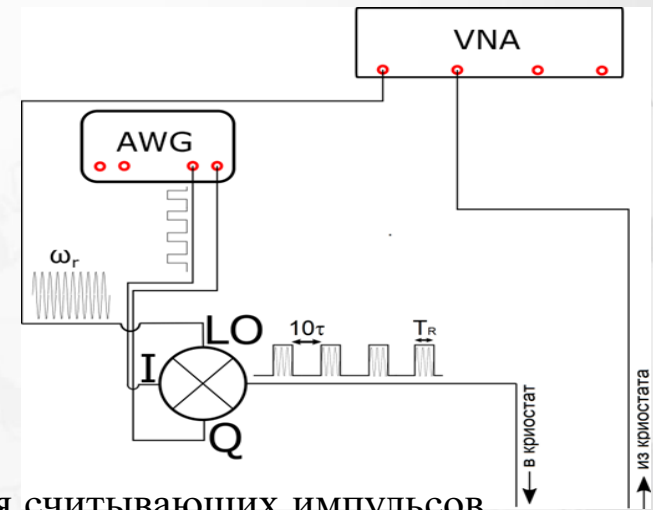
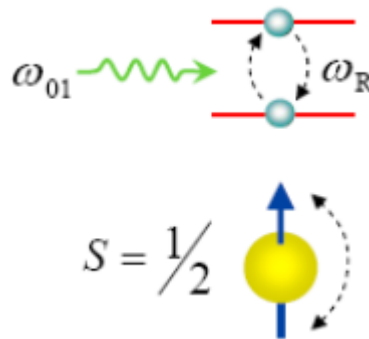
$$T_1 = \infty$$



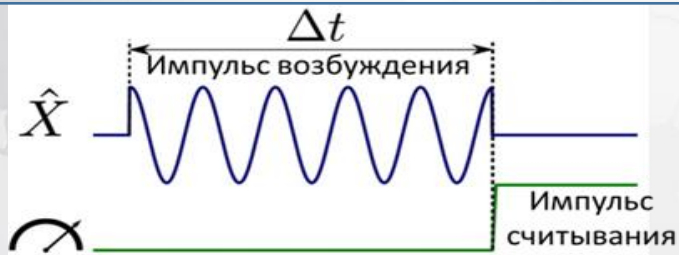
## Измерение осцилляций Раби



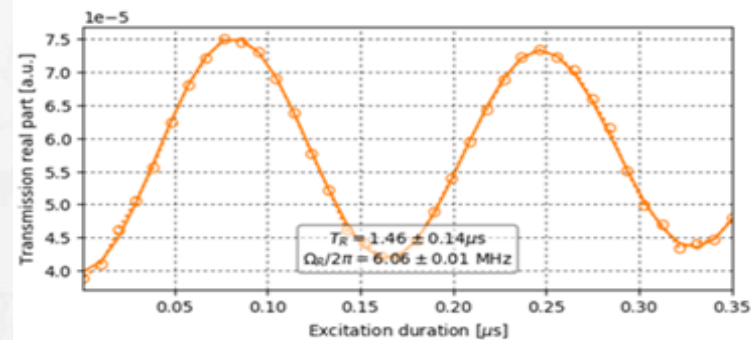
Генерация возбуждающих импульсов.



Генерация считывающих импульсов.



Импульсная последовательность для наблюдения Раби-осцилляций.

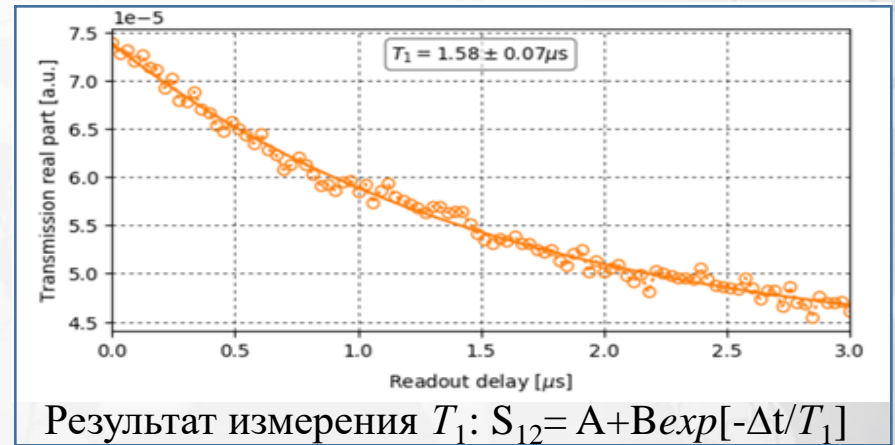
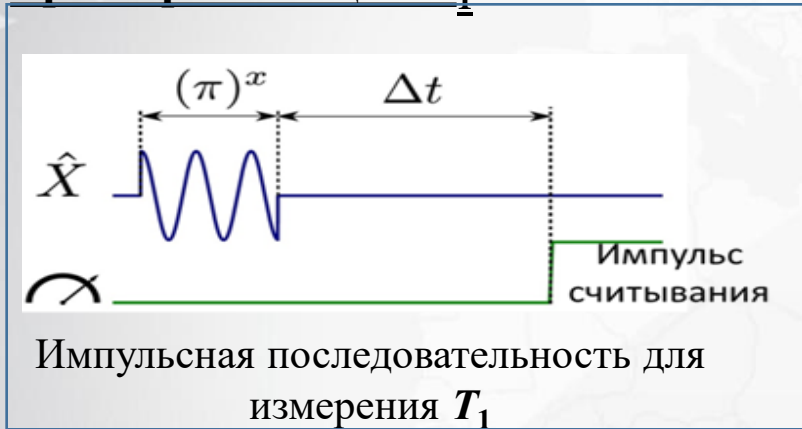


Раби-осцилляции

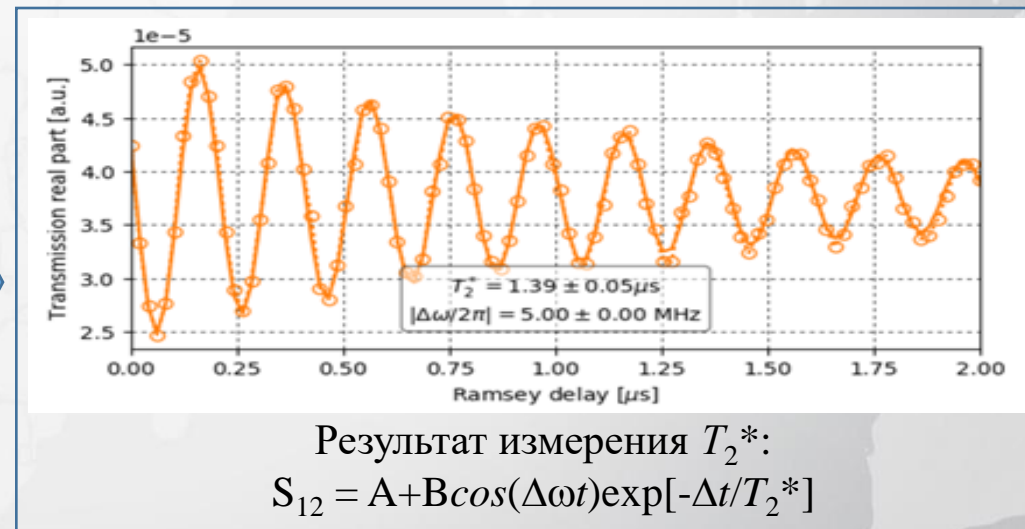
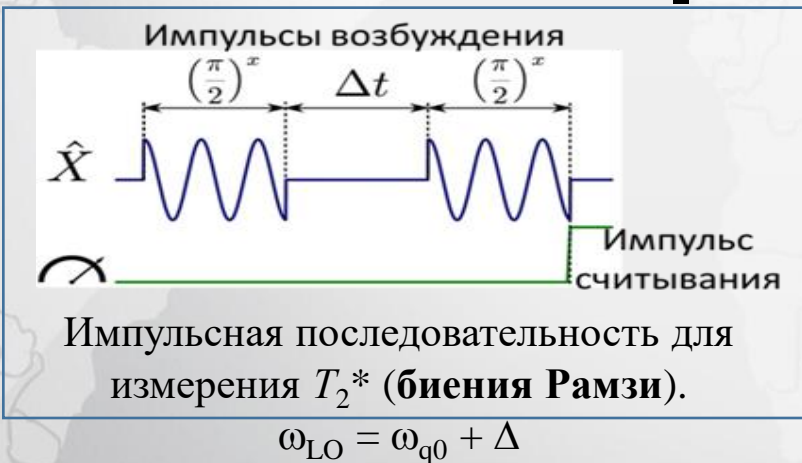
**Результат выполнения:** Определение длительности  $\pi$ ,  $\pi/2$  - импульсов

# Методики измерений времени релаксации и времени свободной прецессии

## Время релаксации $T_1$

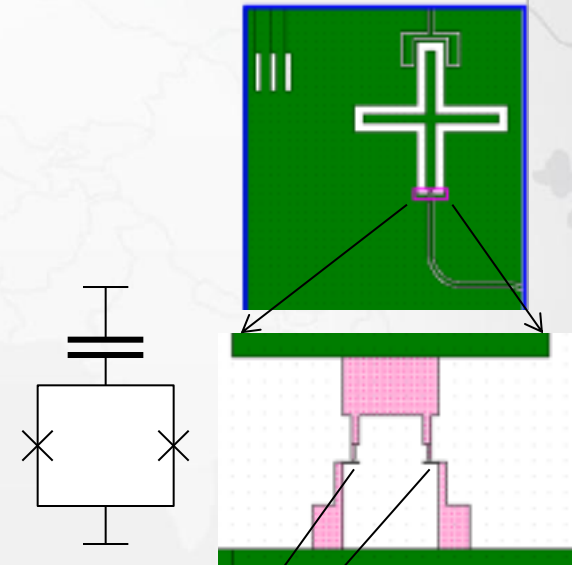
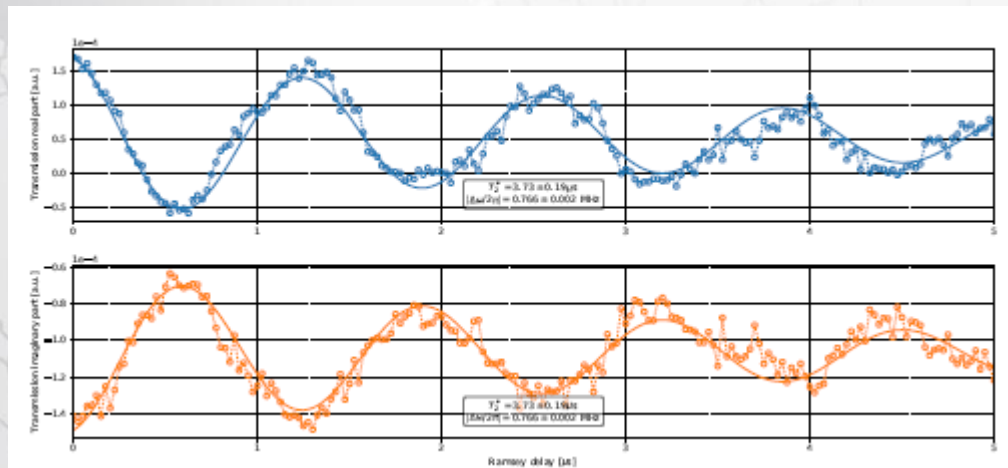
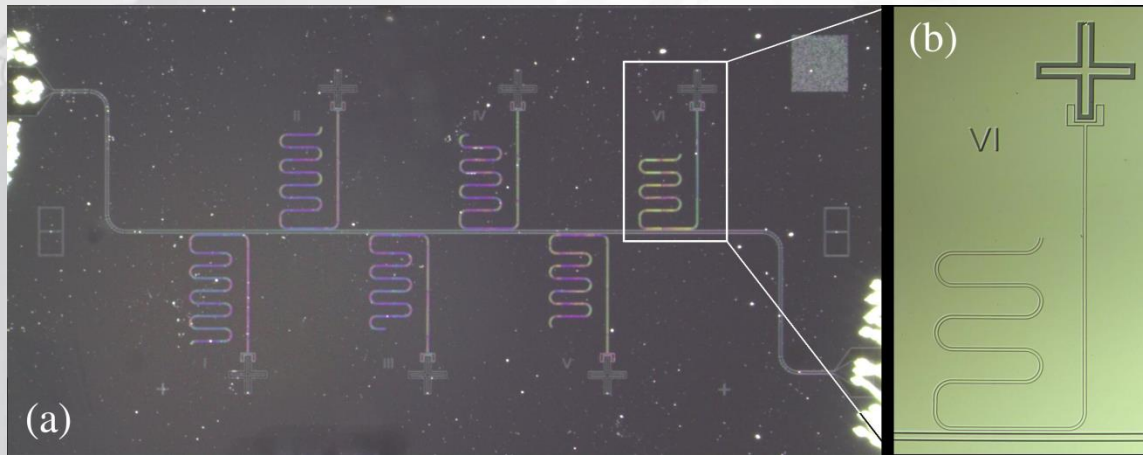


## Время свободной прецессии $T_2^*$





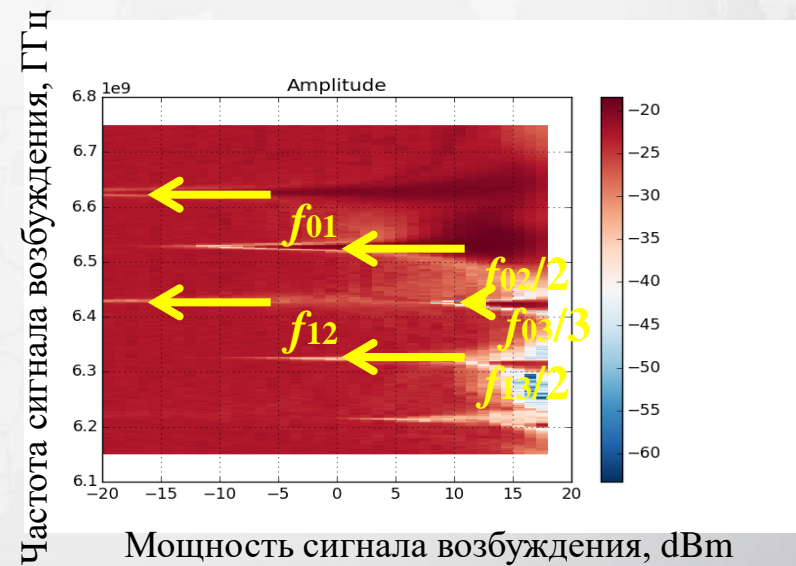
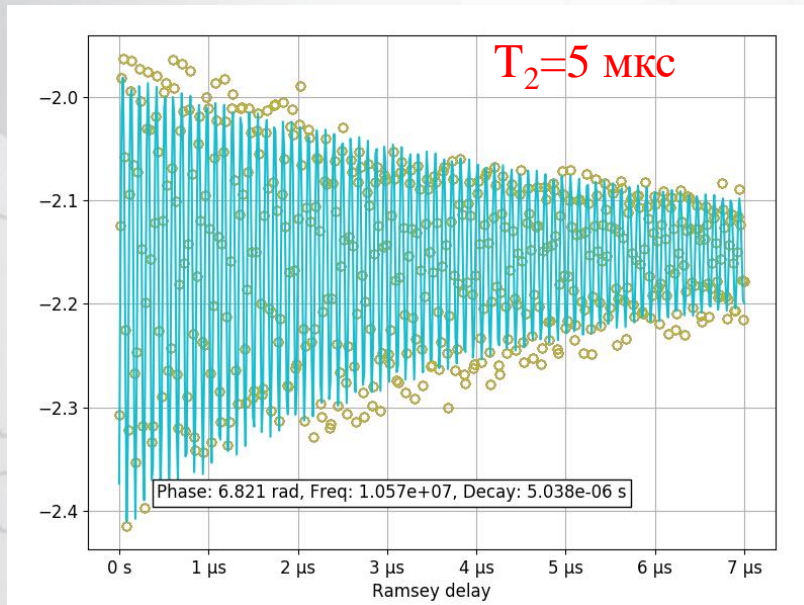
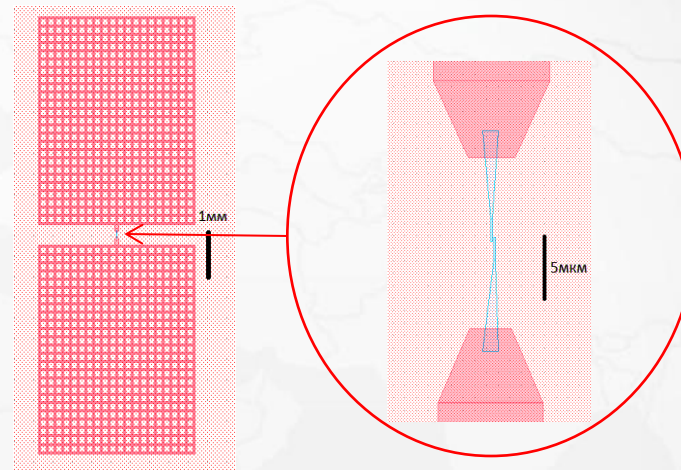
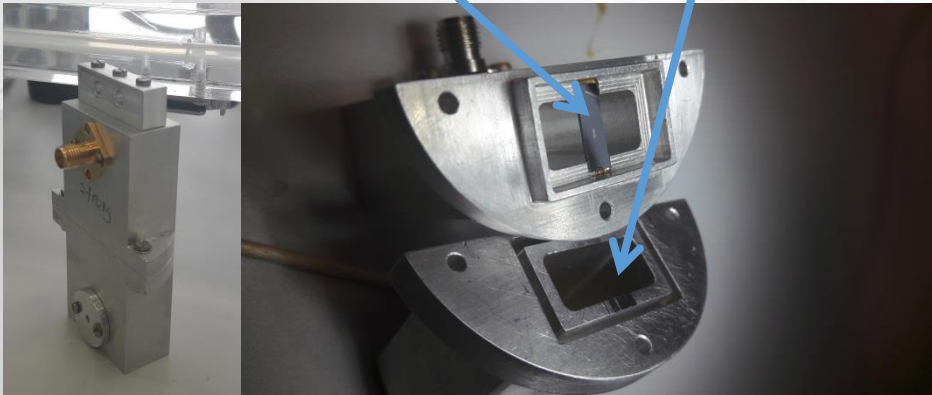
## Зарядовый кубит (х-мон)



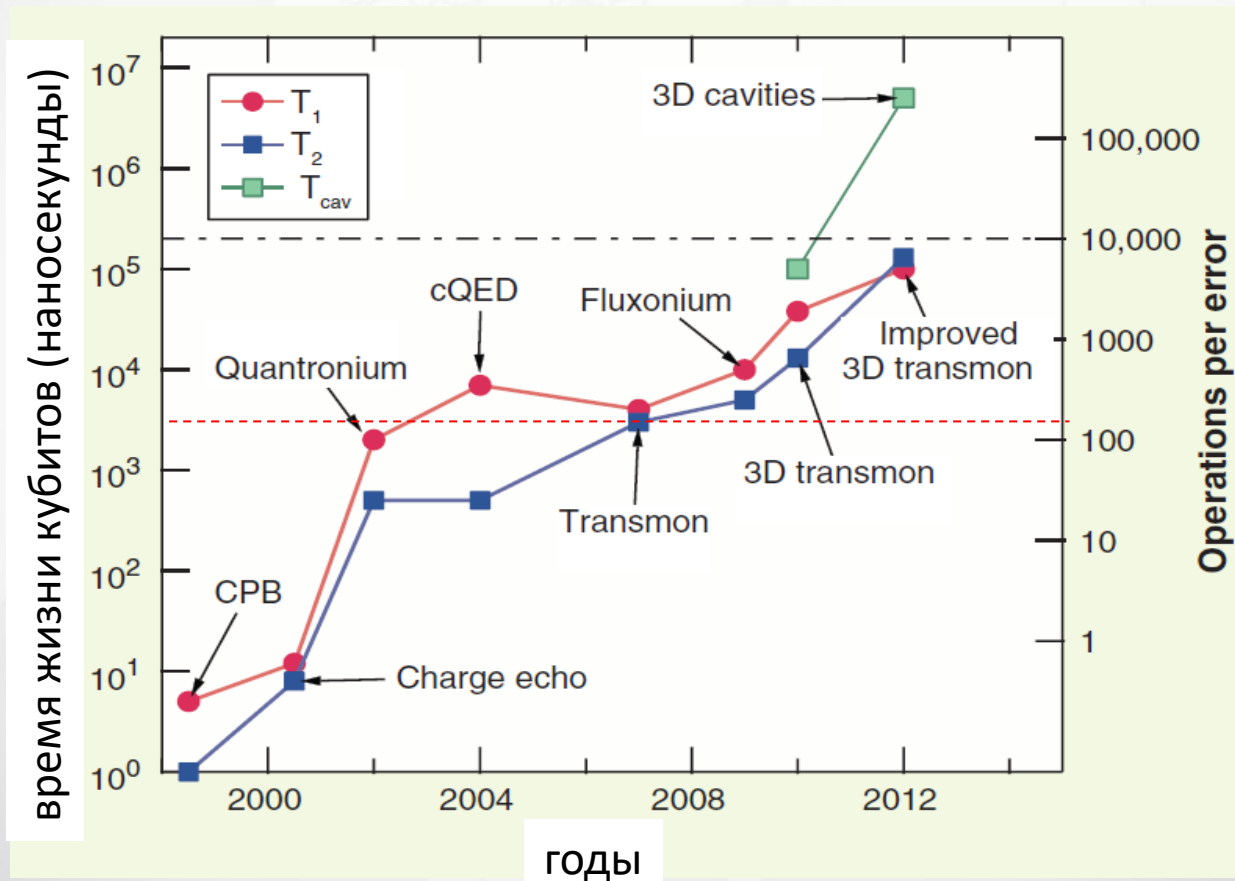
джозефсоновские  
переходы

осцилляции Рамзи  
 $g(t) = A + B \sin(\omega_{\text{Ramsey}} t + \phi) e^{-t/T_2}$ ,  
 $T_2 = 3.73 \pm 0.19$  мкс.

## Трансмон в 3D полости



## Время жизни (когерентного процесса) кубитов: «закон Мура» для сверхпроводников



M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, *Science* **339**, 1169 (2013)



## Реализация однокубитных квантовых вентилей

Логические операции с кубитами называются *квантовыми гейтами (вентилями)*

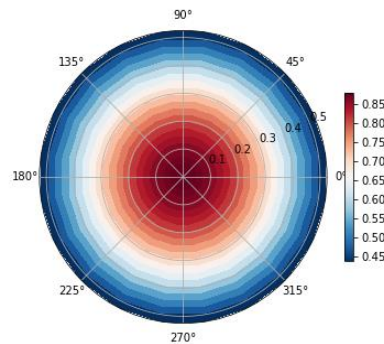
**Квантовый вентиль NOT** переводит  $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  в  $|\Psi'\rangle = \beta|0\rangle + \alpha|1\rangle$

$$x \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad x \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix}, \quad \text{Например, } +x|0\rangle = |1\rangle$$

Сверхпроводящий зарядовый кубит с временем когерентности  $T_2 = 2.14 \pm 0.14$  мкс.

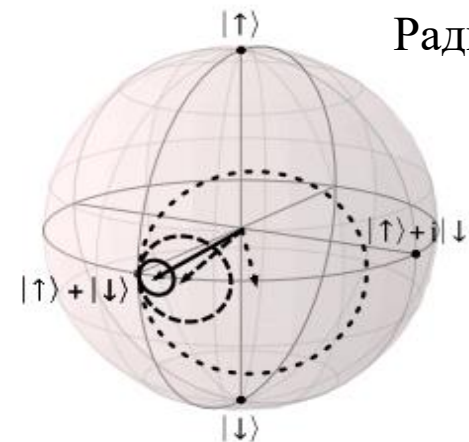
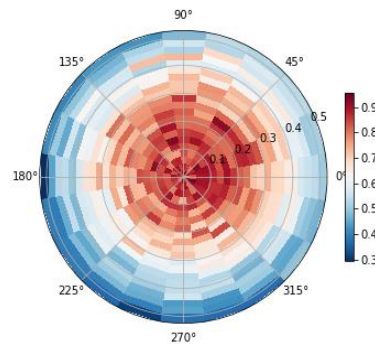
**Реализация гейта NOT** ( $+x|0\rangle = |1\rangle$ )

МОДЕЛЬ

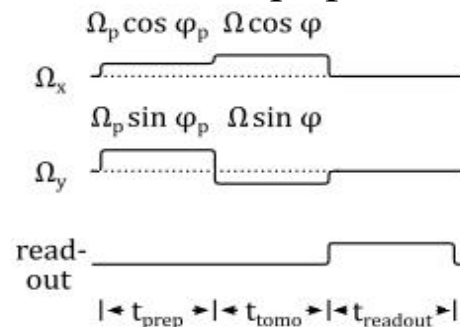


Fidelity is: 0.974

ЭКСПЕРИМЕНТ

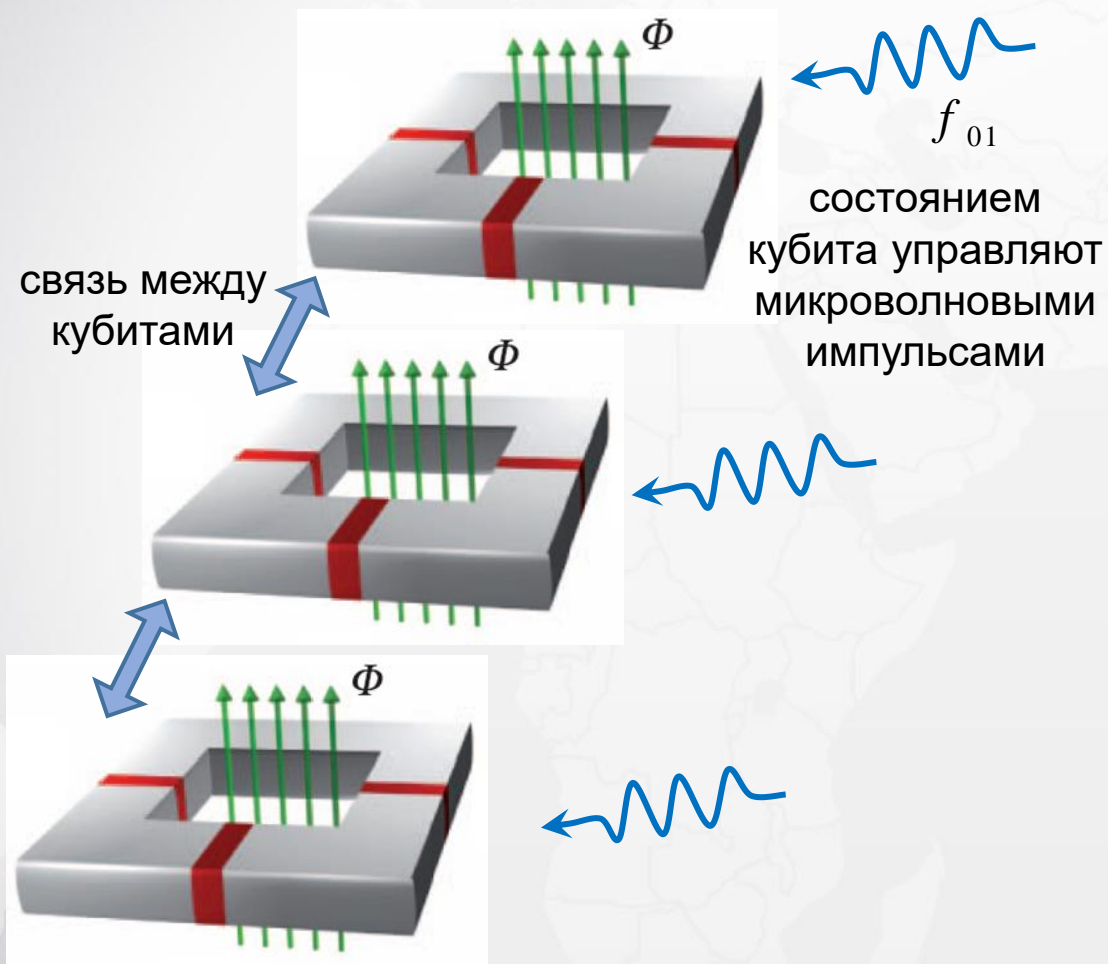


Радиальная томография

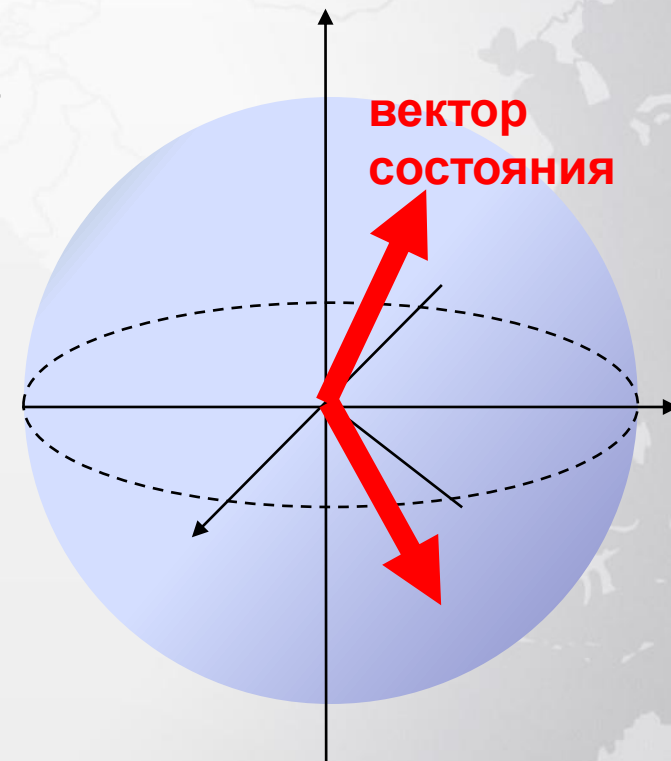


**Точность однокубитной операции – 97%.**

## Двухкубитные гейты и цепочки кубитов



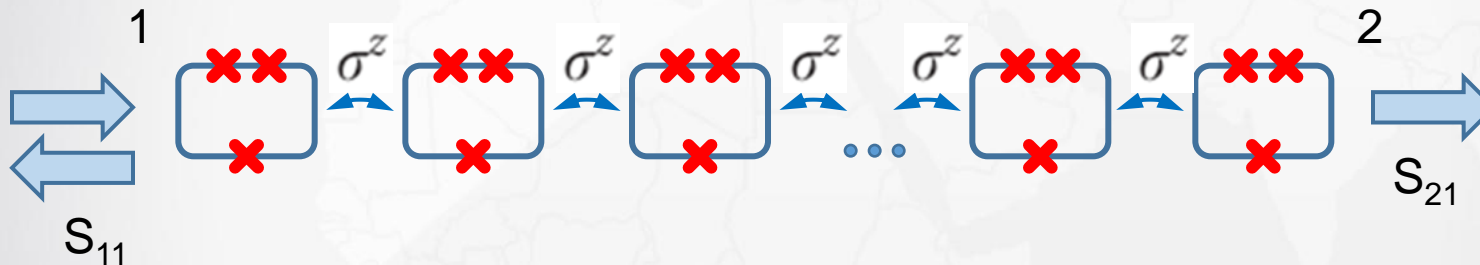
$2^N$  – координатное пространство, где  $N$  – число кубитов



Динамические квантовые симуляторы для моделирования задач материаловедения

## Квантовый симулятор динамики цепочки спинов: 1D цепочка Изинга

$$\mathcal{H}_P = \sum_{i=1}^N h_i \sigma_i^z + \sum_{i,j=1}^N J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z$$



### Измерения:

микроволновая спектроскопия (спектр цепочки)

- прохождение  $S_{21}$
- отражение  $S_{11}$

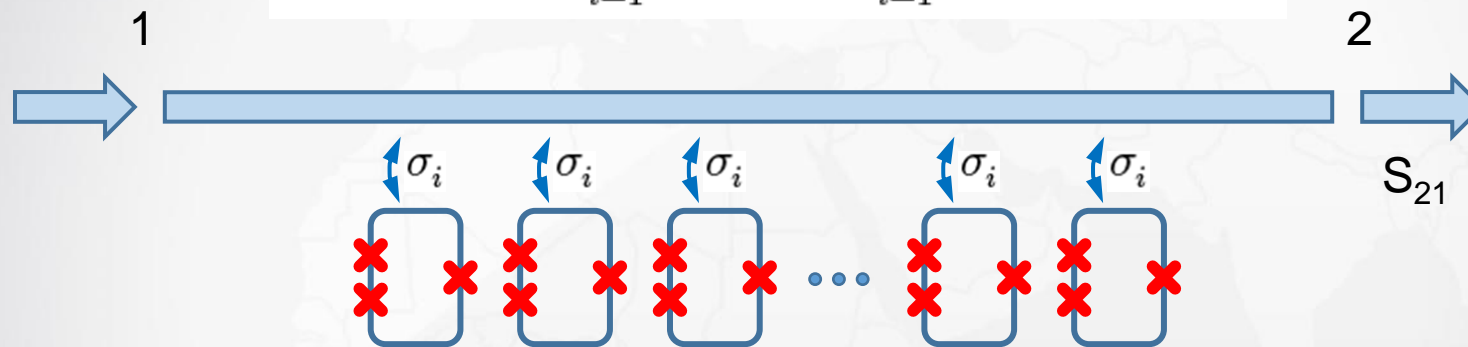
импульсные измерения (динамика, релаксация)

- многофотонные
- однофотонные



## Квантовая память массива спинов: модель Дике

$$H = \omega_r a^+ a + \sum_{i=1}^N \epsilon_i \sigma_i^+ \sigma_i^- + \sum_{i=1}^N g_i (\sigma_i^+ a + a^+ \sigma_i^-)$$



### Измерения:

микроволновые измерения (2 тона)

- дисперсионная спектроскопия
- синхронизация кубитов

импульсные измерения (динамика)

- хранение импульса и последующее считывание
- фотонное «эхо»
- рефокусировка

## Разработка квантовых компьютеров на сверхпроводниках

### США

*Google* (~ 150 M\$)

*IBM Yorktown* (~ 100 M\$)

*Intel* (~ 100 M\$)

*Rigetti* (~ 70 M\$)

Microsoft (~ 50 M\$)

University of California

Yale University

MIT Lincoln Laboratory

*BBN Raytheon*

*Lockheed-Martin, NASA*

### Канада

*D-Wave Systems* (~ 350 M\$)

The Quantum Computing Company™

### Европа

EU Quantum Flagship (~ 50 M\$)

*IBM Zürich*

CEA, TU Delft, ETHZ

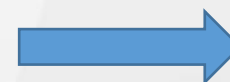
Chalmers, KIT, TU Munich

### Япония

2 национальных проекта 2016-2021 (~ 40 M\$)

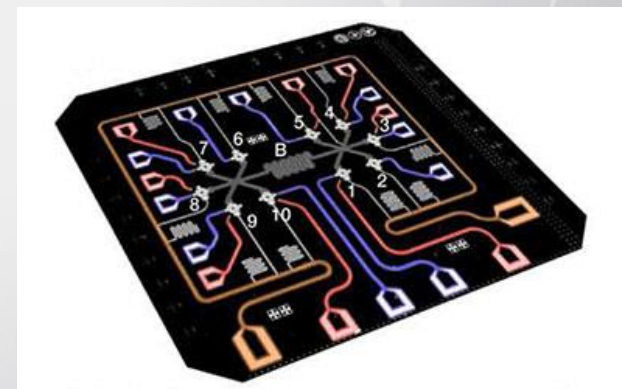
### Китай

UST Hefei: 10 кубитов (~ 50 M\$)



### Россия

"Лиман" - ФПИ, Росатом, МОН (~ 13 M\$)





РОСАТОМ



ФОНД  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ



Минобрнауки  
России

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**