

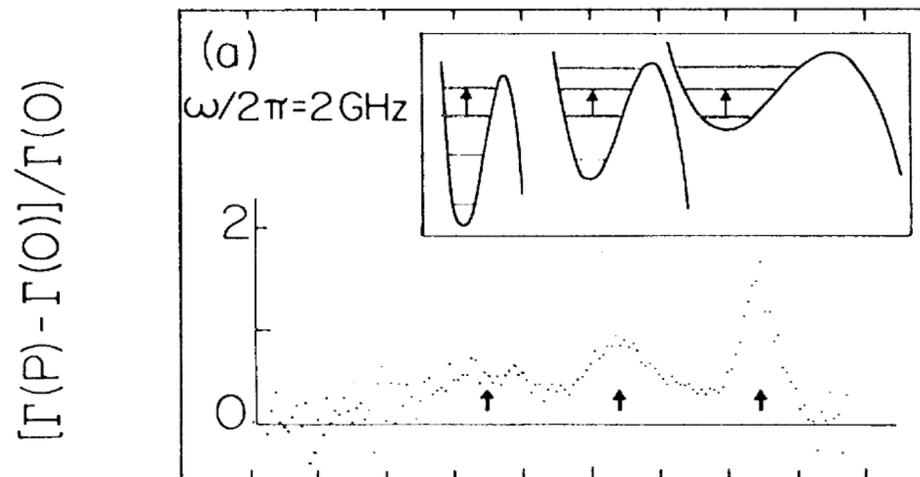
Сверхпроводниковые квантовые системы: Нобелевская премия по физике 2015 года

Астафьев Олег Владимирович

Сколковский институт науки и технологий
Московский физико-технический институт

Нобелевская премия по физике 2025

- 1) Macroscopic quantum mechanical tunnelling → **Quantum phase slip** and
- 2) Energy quantisation in an electric circuit → **Two-level quantum system**



John M. Martinis, Michel H. Devoret, John Clarke,

Energy Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current Biased Josephson Junction, Phys. Rev. Lett., 55 (1985).

Один из факторов – бум в разработке и инвестировании в квантовые процессоры

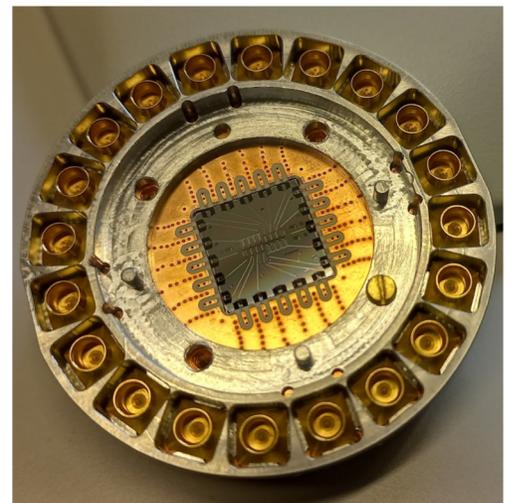
План

- Сверхпроводимость и эффект Джозефсона
- За что дана Нобелевская премия
- Сверхпроводниковый зарядовый кубит
- Сверхпроводниковые квантовые системы (искусственные атомы)

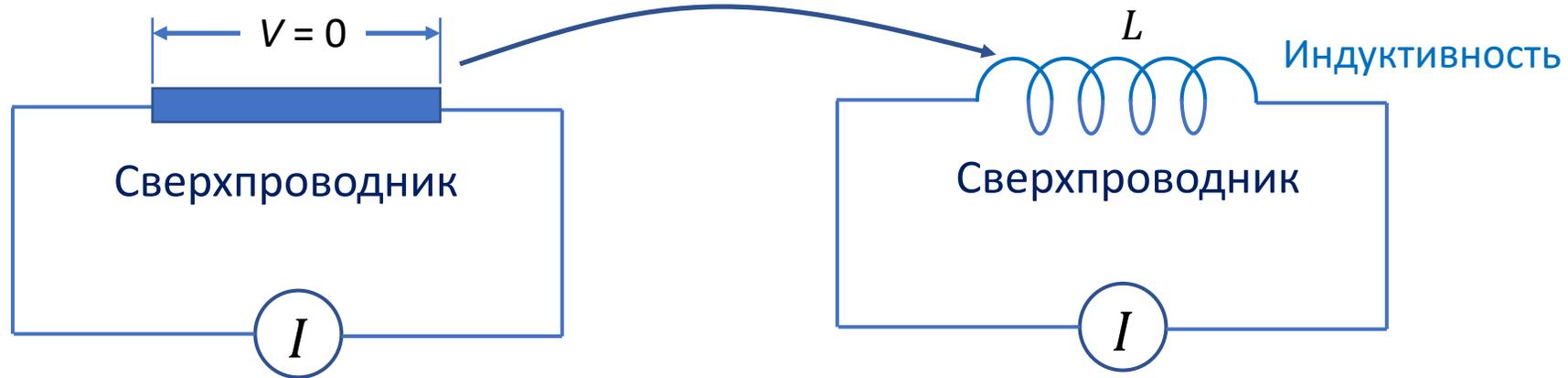
- Сверхпроводниковые квантовые системы – интересный объект исследований, с перспективами выходящими далеко за пределы квантовых вычислений
- Все направления имеют прямое отношение к теме Нобелевской премии 2025 года

Лаборатория Сверхпроводниковых квантовых технологий (СКТ), Сколтех Лаборатория Искусственных квантовых систем (ИКС), МФТИ

- Основана в 2015 (TOP-100)
- ~30 сотрудников/студентов
- Сверхпроводниковые квантовые технологии
- Физика сверхпроводниковых квантовых систем
- Квантовая оптика на чипе
- Квантовая акустика
- Фундаментальные физические явления сверхпроводимости
- Квантовые процессоры



Сверхпроводимость



В состоянии сверхпроводимости: $R = 0$

- Квант заряда – куперовская пара (бозон): $Q_0 = 2e$
- Конденсат куперовских пар

$$R = \frac{V}{I} = 0$$

$$L \neq 0$$

Магнитный поток:

$$\Phi = LI$$

Напряжение:

$$V = \dot{\Phi}$$

Магнитный поток (интеграл напряжения):

$$\Phi = \int_0^T V(t) dt$$

В динамике напряжение ненулевое:

$$\frac{\partial I}{\partial t} \neq 0 \Rightarrow \frac{\partial(LI)}{\partial t} = \dot{\Phi}$$

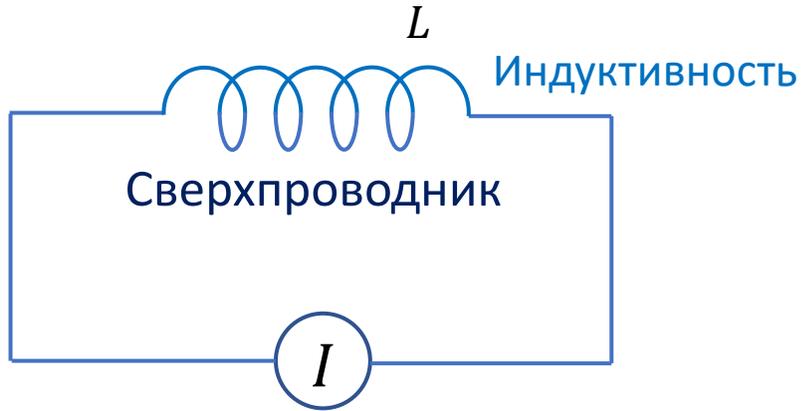
Энергия запасённая в индуктивности:

$$U = \int_0^T I(t)V(t)dt = \int_0^T I \frac{d\Phi}{dt} dt = \int_0^{\Phi(T)} Id\Phi$$

$$\Phi = LI \rightarrow \begin{cases} \frac{LI^2}{2} \\ \frac{\Phi^2}{2L} \end{cases}$$

Normal metal		Superconductor
$I = \frac{V}{R}$	$V \rightarrow \Phi$ $R \rightarrow L$	$I = \frac{\Phi}{L}$

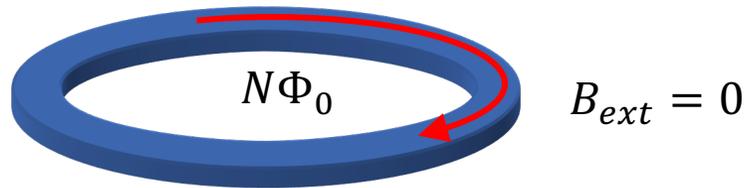
Квантование магнитного потока и сверхпроводящая фаза



Магнитный поток Φ :

- интеграл напряжения
- величина, характеризующая смещение сверхпроводника

В сверхпроводящем колечке можно добавить/убрать целое число квантов магнитного потока Φ_0



$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$

Сверхпроводящая фаза φ : $\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\Phi}{\Phi_0}$

Волновая функция: $\Psi \sim e^{i\varphi(x)}$

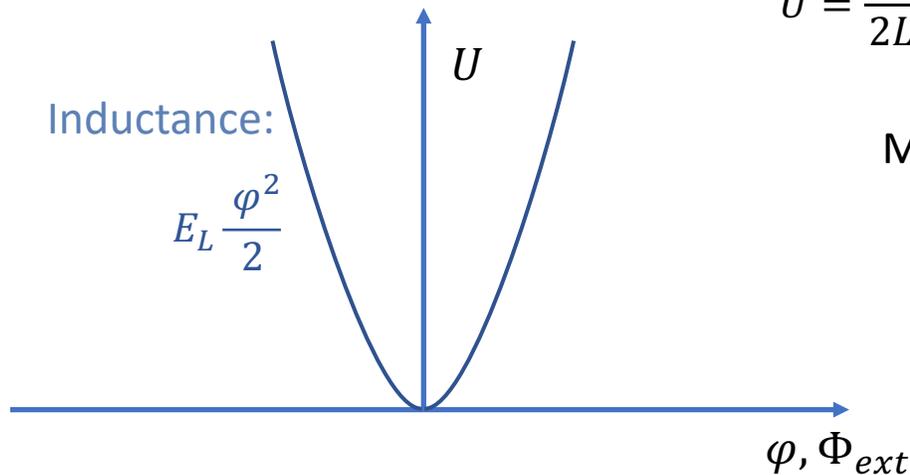
$$I = \frac{\Phi}{L} = \frac{\Phi_0}{2\pi L} \varphi = I_L \varphi$$

Энергия индуктивности:

$$U = \frac{\Phi^2}{2L} = \left(\frac{\Phi_0}{2\pi}\right)^2 \frac{\varphi^2}{2L} = E_L \frac{\varphi^2}{2}$$

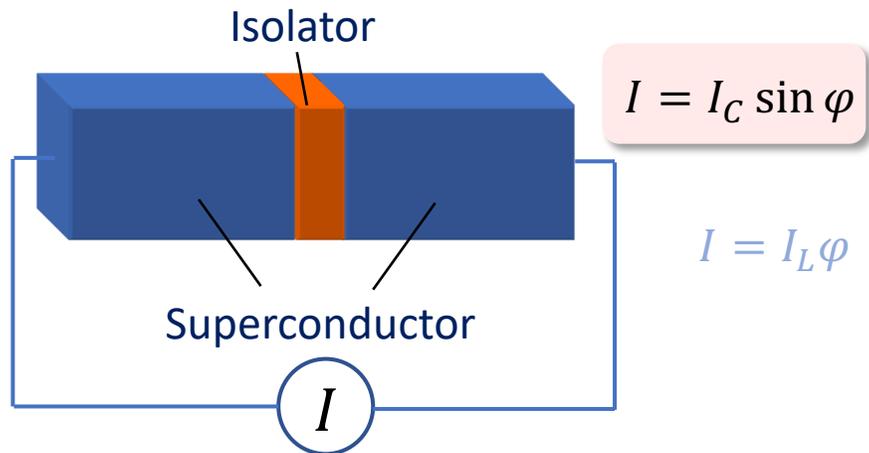
Магнитная энергия:

$$E_L = \frac{\Phi_0^2}{2\pi} I_L$$

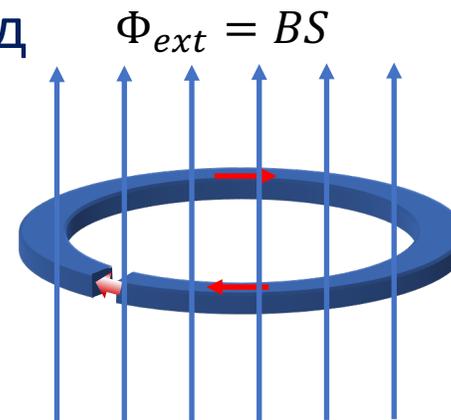


$$\Phi = N\Phi_0 + \Phi_{ext}$$

Джозефсоновский переход



Josephson junction is a tunnel junction for Cooper pairs

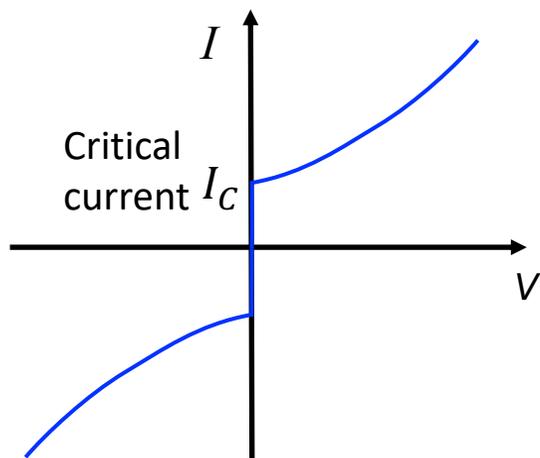
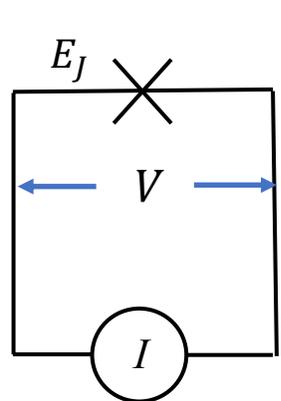


Непрерывная величина:

$$\varphi = \frac{2\pi\Phi_{ext}}{\Phi_0}$$

Energy stored in the Josephson (tunnel) junction:

$$U = \int_0^\Phi I d\Phi = \int_0^\Phi I_C \sin \varphi \frac{\Phi_0}{2\pi} d\varphi = E_J (1 - \cos \varphi)$$

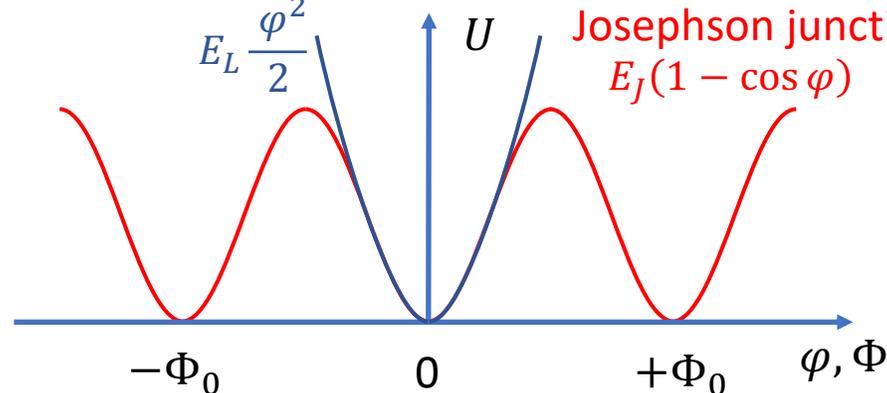


$$E_L = \left(\frac{\Phi_0}{2\pi}\right) I_L$$

$$E_J = \left(\frac{\Phi_0}{2\pi}\right) I_C$$

Inductance:

$$E_L \frac{\varphi^2}{2}$$



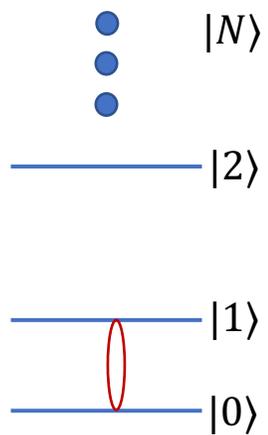
Потенциал стиральной доски (Washboard potential)

Стиральная доска



Квантование энергии в джозефсоновских переходах и квантовое проскальзывание фазы

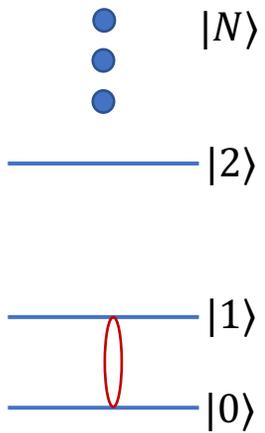
Атом
Уровни энергии
неэквидистантные



Квантование энергии в джозефсоновских переходах и квантовое проскальзывание фазы

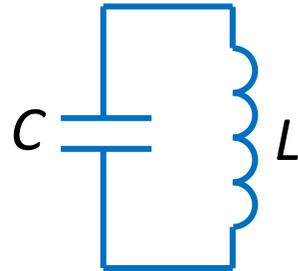
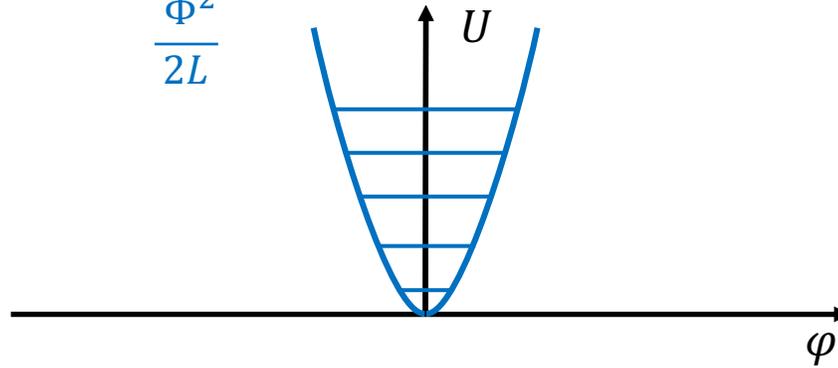
Гармонический осциллятор

Атом
Уровни энергии
неэквидистантные



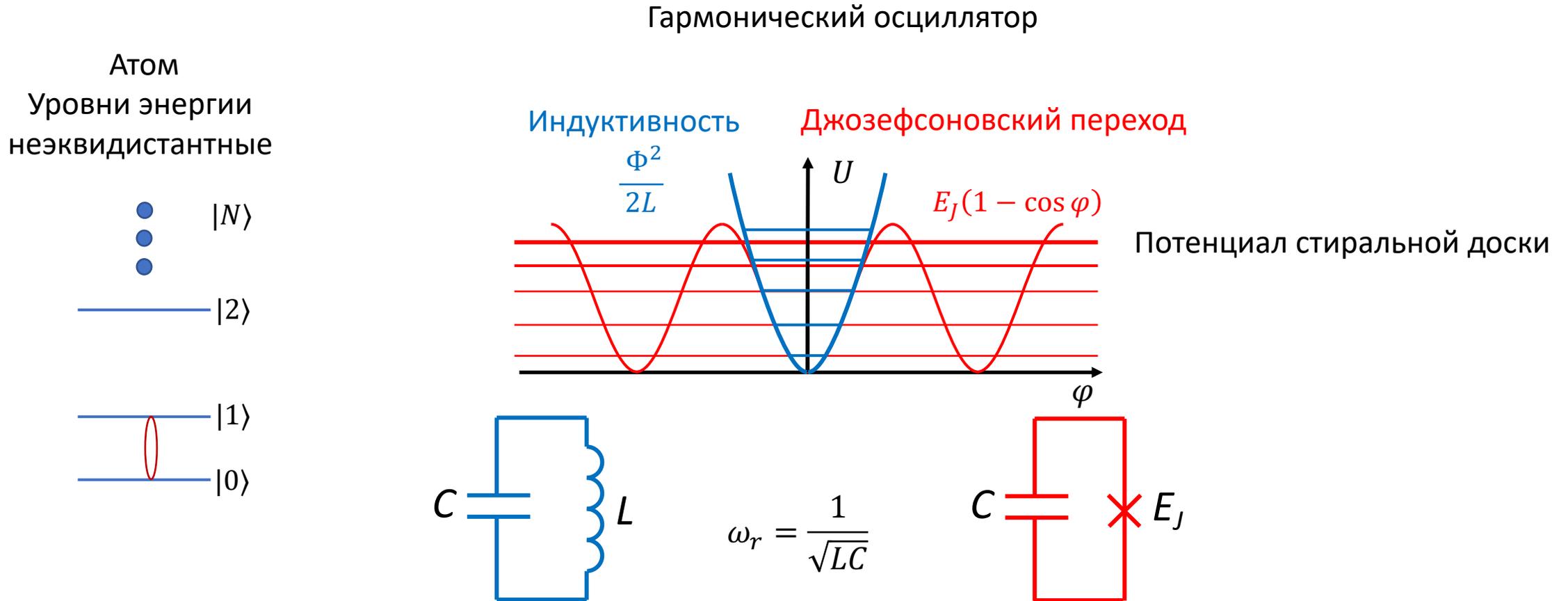
Индуктивность

$$\frac{\Phi^2}{2L}$$



$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

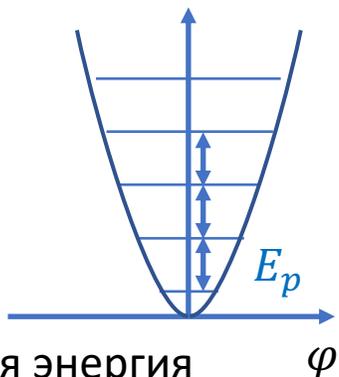
Квантование энергии в джозефсоновских переходах и квантовое проскальзывание фазы



Большой джозефсоновский переход ($\hbar\omega_r \ll E_J$) ведёт себя как гармонический осциллятор

Гармонический осциллятор

Гармонический потенциал



Плазменная энергия

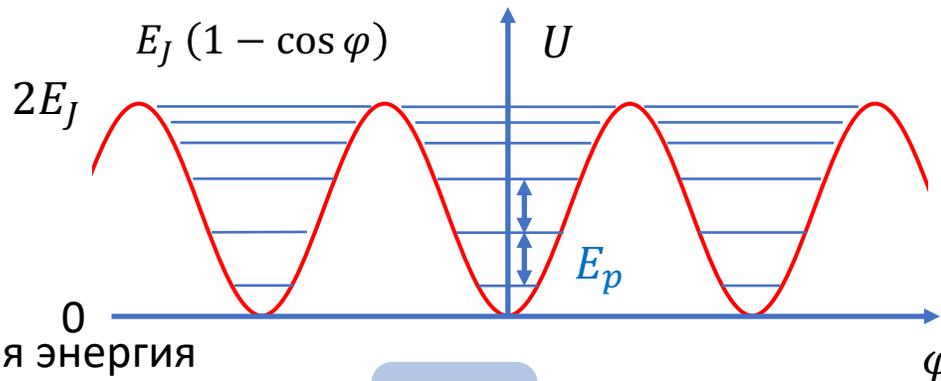
$$E_p = \frac{\hbar}{\sqrt{LC}} = \sqrt{E_L E_C^*}$$

$$E_L = \frac{\Phi_0^2}{4\pi^2 L} = \frac{\hbar^2}{Q_0 L}$$

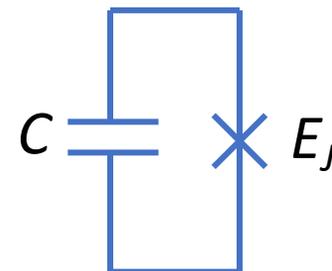
Зарядовая энергия

$$E_C^* = \frac{Q_0^2}{C}$$

Потенциал стиральной доски (washboard potential)

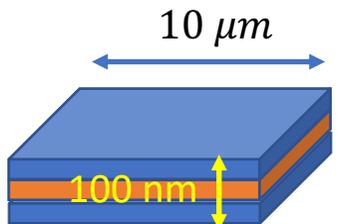


$$E_p = \sqrt{E_J E_C^*}$$



Большой джозефсоновский переход ($E_J \gg E_p$) ведёт себя как гармонический осциллятор

Phys. Rev. Lett., 55 (1985):



Metal
Insulator $\sim 2 \text{ nm}$
Metal

$$C \approx 5 \times 10^{-12} \text{ F} \quad \frac{E_C^*}{h} = \frac{Q_0^2}{Ch} = \frac{1}{R_Q C} \approx 3 \times 10^7 \text{ Hz}$$

$$I_C = 30 \mu\text{A} \quad \frac{E_J}{h} \approx 1.5 \times 10^{13} \text{ Hz} \quad 10^6!$$

$$\sim 10 \times 10 \mu\text{m}^2 \quad \frac{E_p}{h} = \frac{\sqrt{E_J E_C^*}}{h} \approx 2 \times 10^{10} \text{ Hz}$$

$$\sim 10^{12} \text{ atoms}$$

$$T = 28 \text{ mK} \quad \frac{k_B T}{h} \approx 10^9 \text{ Hz} \quad \frac{E_p}{k_B} \approx 1 \text{ K}$$

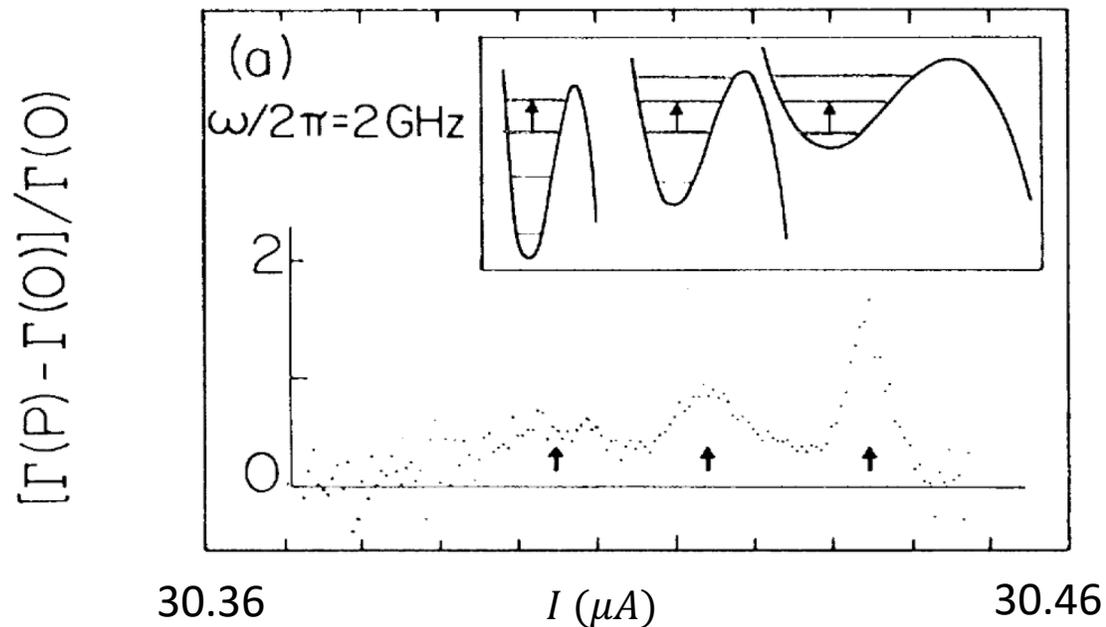
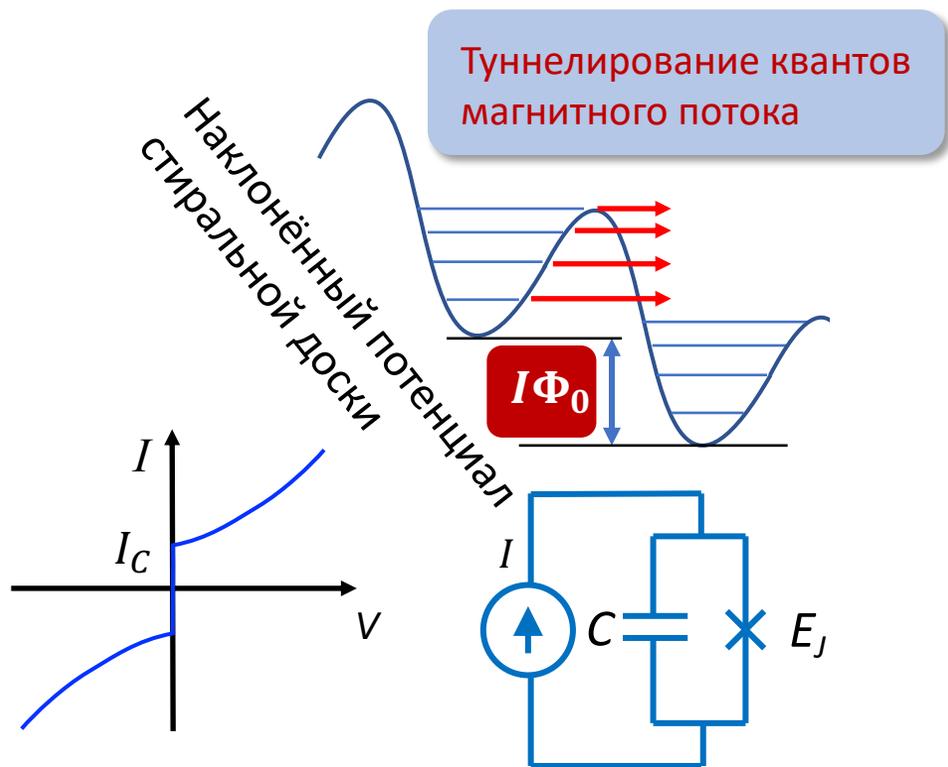
$$\frac{E_J}{E_p} \sim 10^3$$



Классическая система!
Квантовая механика не нужна?

Негармонический осциллятор

- Квантовая система: агармонизм
- Квантовое проскальзывание фазы



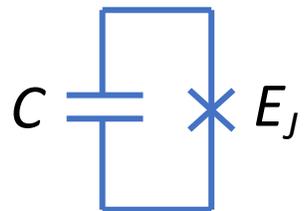
John M. Martinis, Michel H. Devoret, John Clarke,
Energy Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current Biased Josephson Junction, Phys. Rev. Lett., 55 (1985).

- Джозефсоновский эффект: туннелирование куперовских пар
- MQT (QPS): туннелирование квантов магнитного потока

Не джозефсоновский эффект!

Yu. M. Ivanchenko, L.A. Zil'berman, Soviet Physics JETP, 28 (6), 1969
Big contribution to the theory of small JJs: K. Likharev, D. Averin, A. Zorin

Режимы работы



Зарядовая энергия:

$$E_C^* = \frac{Q_0^2}{C}$$

Плазменная энергия:

$$E_p = \sqrt{E_C^* E_J}$$

Рабочие энергии:

$$h \times 2 \text{ GHz} < \hbar \omega < h \times 10 \text{ GHz}$$

	До ~ 1990 года Размеры перехода $\geq 5 \mu m$	После 1990 года Размеры перехода $\leq 100 \text{ nm}$	
Режим	Гармонический осциллятор: $E_C \ll E_J$ $E_p \ll E_J$	Ангармонический осциллятор: $E_C \sim E_J$ $E_p \sim E_J$	Сильно нелинейный режим: $E_C \gg E_J$
Уровни энергии			
Площадь перехода	$10 \times 10 \mu m^2$	$1 \times 1 \mu m^2$	$0.1 \times 0.1 \mu m^2$
Ёмкость	$C \approx 5 \times 10^{-12} \text{ F}$	$C \approx 5 \times 10^{-14} \text{ F}$	$C \approx 5 \times 10^{-16} \text{ F}$
Энергия	$\frac{E_C^*}{h} = \frac{Q_0^2}{Ch} = \frac{1}{R_Q C} \approx 3 \times 10^7 \text{ Hz}$	$\frac{E_C^*}{h} \approx 3 \times 10^9 \text{ Hz}$	$\frac{E_C^*}{h} \approx 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$

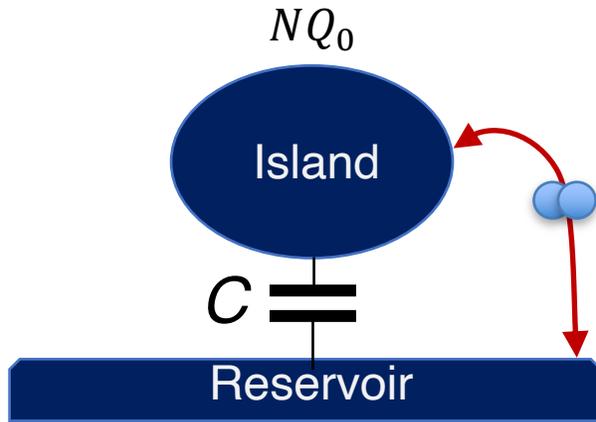
Зарядовый кубит: Первая демонстрация контроля квантовых состояний

Контроль состояний в квантовой системе: $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$?

————— $|1\rangle$

————— $|0\rangle$

The Josephson Charge qubit (two-level system)



Potential energy of the island:

$$U = \frac{Q^2}{2C}$$

Charge is quantized: $Q_0 = 2e$

Charging energy: $E_C = \frac{Q_0^2}{2C}$

$$E_N = \frac{(NQ_0)^2}{2C} = E_C N^2$$

$$9E_C \text{ ————— } |3\rangle$$

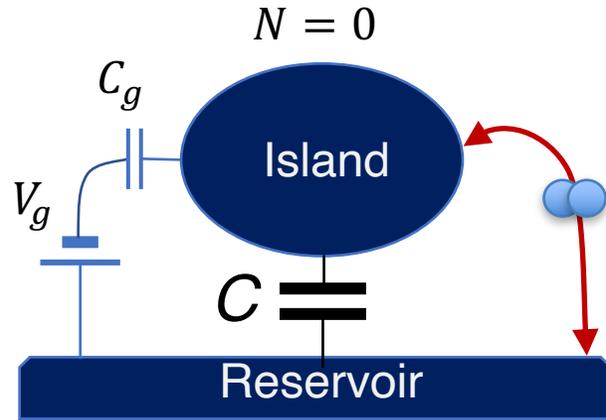
$$4E_C \text{ ————— } |2\rangle$$

$$E_C \text{ ————— } |1\rangle$$

$$0 \text{ ————— } |0\rangle$$

$$\frac{Q_0^2}{2C} \gg k_B T$$

The Josephson Charge qubit (two-level system)



Potential energy of the island:

$$U = \frac{(V_g C_g)^2}{2C}$$

Charge is quantized: $Q_0 = 2e$

Charging energy: $E_C = \frac{Q_0^2}{2C}$

$$E_N = \frac{(NQ_0)^2}{2C} = E_C N^2$$

Induced charge: $n = \frac{V_g C_g}{Q_0}$

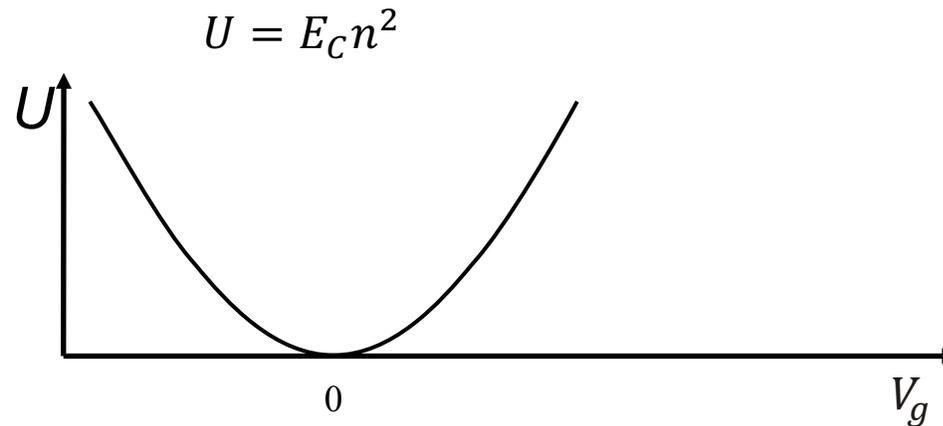
$9E_C$ ——— |3⟩

$4E_C$ ——— |2⟩

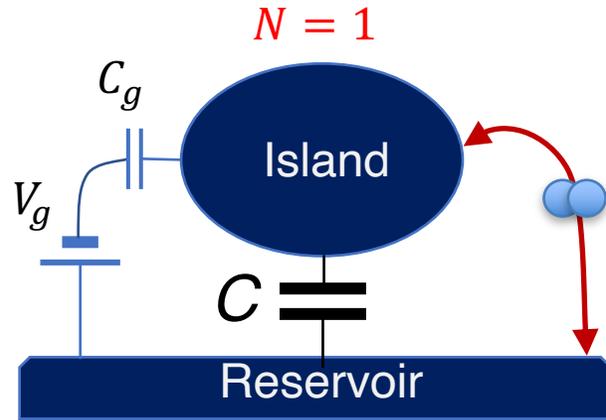
E_C ——— |1⟩

0 ——— |0⟩

$\frac{Q_0^2}{2C} \gg k_B T$



The Josephson Charge qubit (two-level system)



Potential energy of the island:

$$U = \frac{(Q_0 - nQ_0)^2}{2C}$$

Charge is quantized: $Q_0 = 2e$

Charging energy: $E_C = \frac{Q_0^2}{2C}$

$$E_N = \frac{(NQ_0)^2}{2C} = E_C N^2$$

Induced charge: $n = \frac{V_g C_g}{Q_0}$

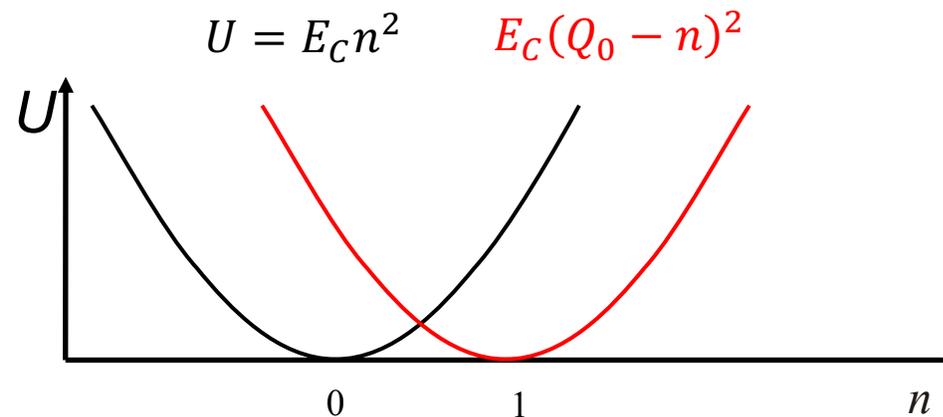
$9E_C$ ——— |3⟩

$4E_C$ ——— |2⟩

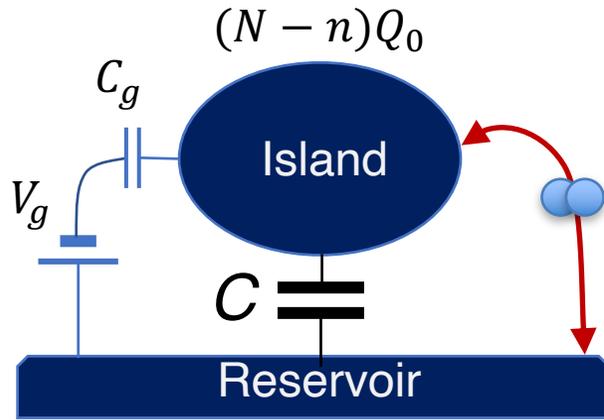
E_C ——— |1⟩

0 ——— |0⟩

$\frac{Q_0^2}{2C} \gg k_B T$



The Josephson Charge qubit (two-level system)



Potential energy of the island:

$$U = \frac{Q^2}{2C}$$

Charge is quantized: $Q_0 = 2e$

Charging energy: $E_C = \frac{Q_0^2}{2C}$

$$E_N = \frac{(NQ_0)^2}{2C} = E_C N^2$$

$$E_N = E_C (N - n)^2 \quad \text{Induced charge: } n = \frac{V_g C_g}{Q_0}$$

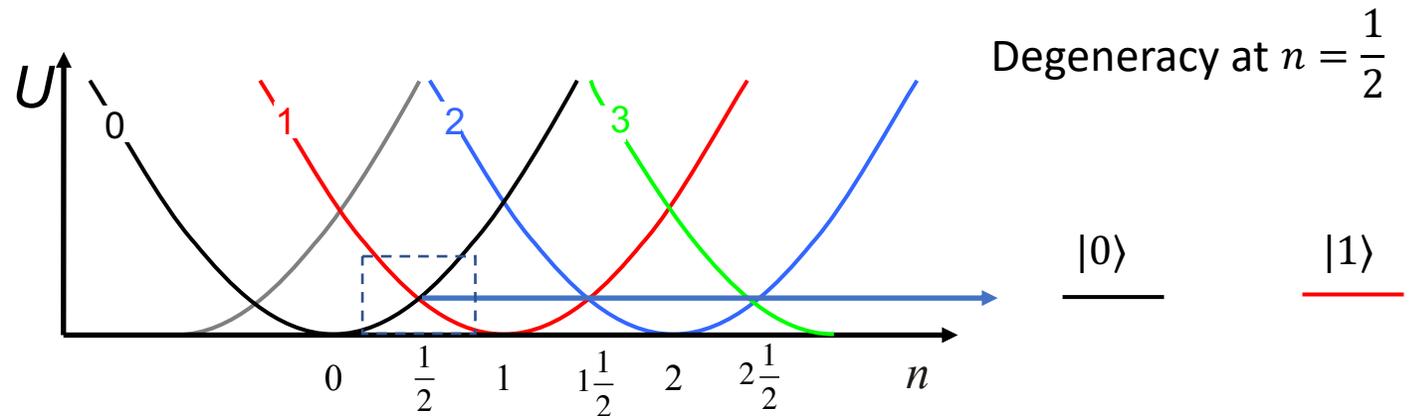
$$9E_C \text{ --- } |3\rangle$$

$$4E_C \text{ --- } |2\rangle$$

$$E_C \text{ --- } |1\rangle$$

$$0 \text{ --- } |0\rangle$$

$$\frac{Q_0^2}{2C} \gg k_B T$$

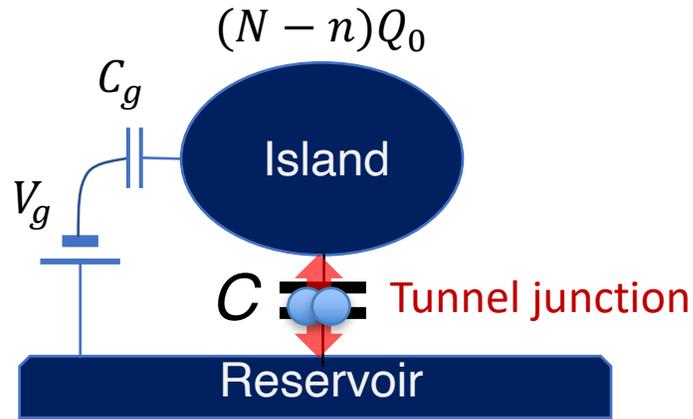


Degeneracy at $n = \frac{1}{2}$

|0>

|1>

The Josephson Charge qubit (two-level system)



Potential energy of the island:

$$U = \frac{Q^2}{2C}$$

Charge is quantized: $Q_0 = 2e$

Charging energy: $E_C = \frac{Q_0^2}{2C}$

$$H = \frac{\varepsilon(n)}{2} \sigma_z + \frac{E_J}{2} \sigma_x$$

$$E_N = \frac{(NQ_0)^2}{2C} = E_C N^2$$

$$E_N = E_C (N - n)^2$$

Induced charge: $n = \frac{V_g C_g}{Q_0}$

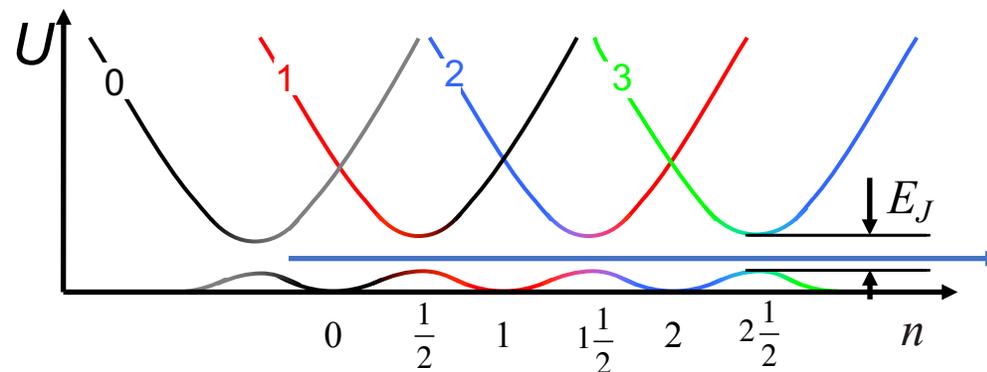
$$9E_C \text{ --- } |3\rangle$$

$$4E_C \text{ --- } |2\rangle$$

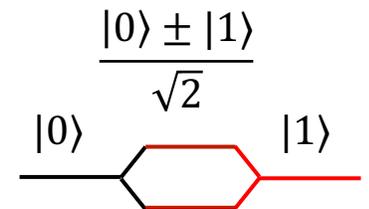
$$E_C \text{ --- } |1\rangle$$

$$0 \text{ --- } |0\rangle$$

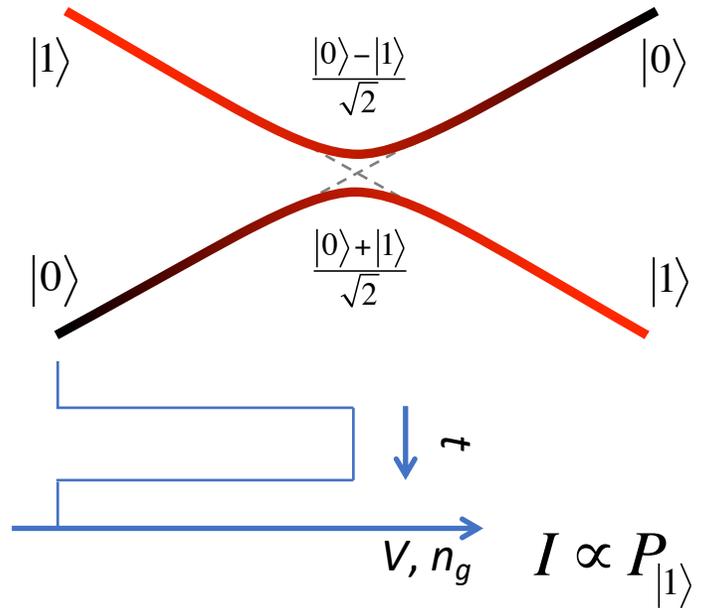
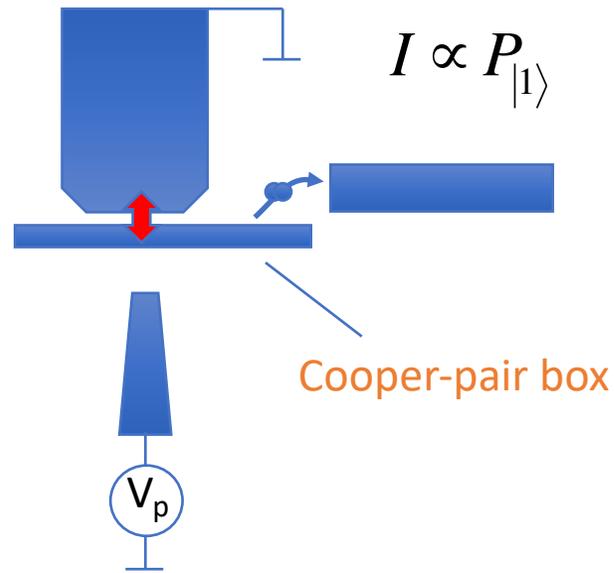
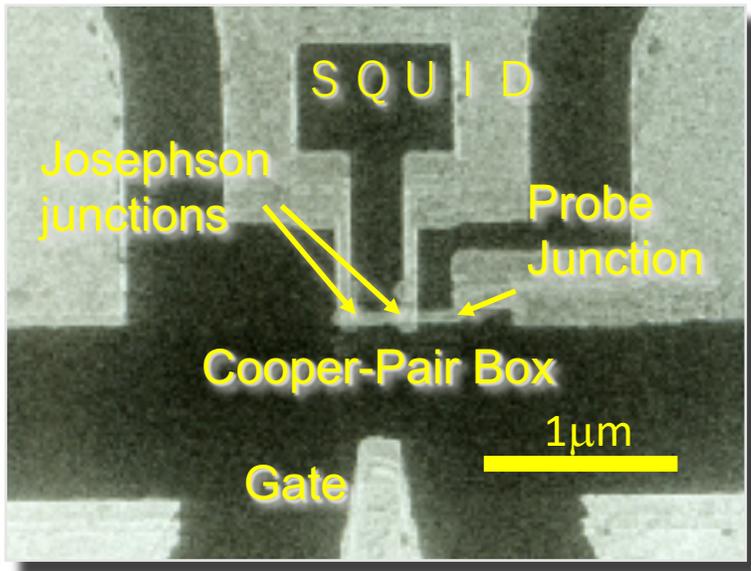
$$\frac{Q_0^2}{2C} \gg k_B T$$



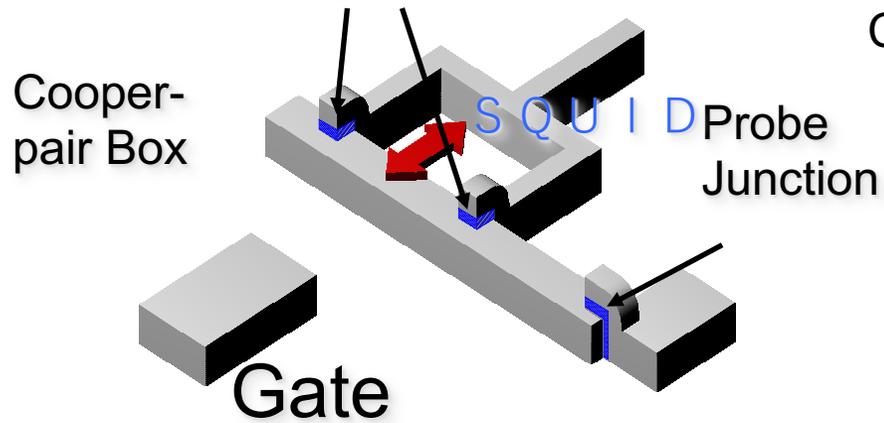
Degeneracy at $n = \frac{1}{2}$



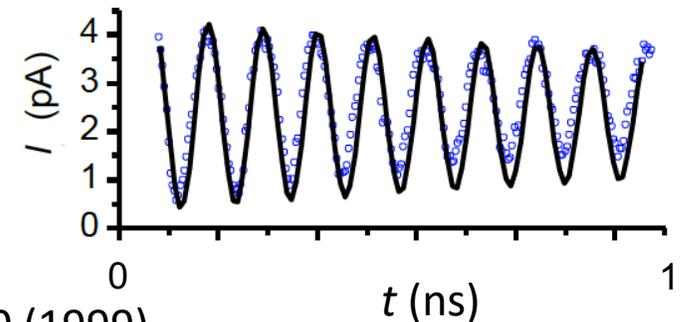
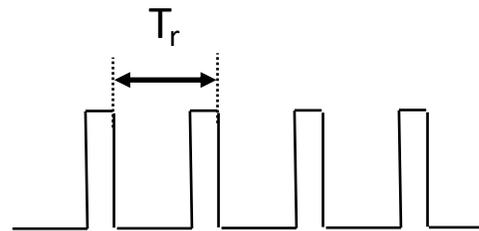
First qubit demonstration: Quantum state control and manipulation



Al/AIO_x/Al tunnel junctions



Control-pulse sequence



Квантовая механика электрической цепи

Mass



Position: x Velocity: \dot{x}

Momentum: p Kinetic energy:

$$p = m\dot{x} \qquad T = \frac{m\dot{x}^2}{2}$$

Mass: m

Momentum operator:

$$\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

Commutation relations:

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$$

Inductance



Charge: Q Current: $I = \dot{Q}$

Magnetic Flux: Φ Kinetic energy:

$$\Phi = LI = L\dot{Q} \qquad T = \frac{L\dot{Q}^2}{2}$$

Mass: L

Momentum operator:

$$\hat{\Phi} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial Q}$$

Commutation relations:

$$[\hat{Q}, \hat{\Phi}] = i\hbar$$

$$Q \leftrightarrow x \quad \Phi \leftrightarrow p \quad L \leftrightarrow m$$

Capacitance



Magnetic Flux: Φ Voltage: $V = \dot{\Phi}$

Charge: Q Kinetic energy:

$$Q = CV = -C\dot{\Phi} \qquad T = \frac{C\dot{\Phi}^2}{2}$$

Mass: C

Momentum operator:

$$\hat{Q} = +i\hbar \frac{\partial}{\partial \Phi}$$

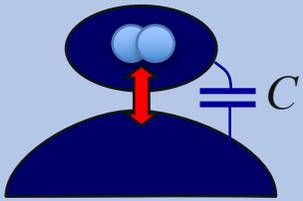
Commutation relations:

$$[\hat{\Phi}, \hat{Q}] = -i\hbar$$

$$\Phi \leftrightarrow x \quad Q \leftrightarrow p \quad C \leftrightarrow m$$

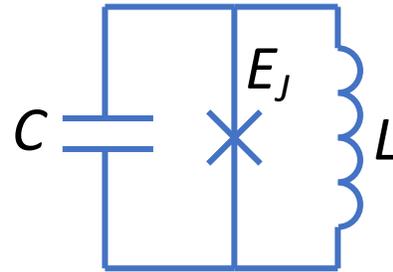
Сверхпроводниковые квантовые системы

Квантование заряда ($Q_0 = 2e$)

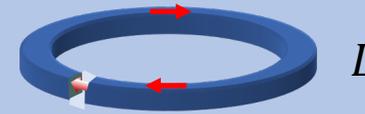


$$E_N = \frac{(NQ_0)^2}{2C}$$

$\frac{Q_0^2}{2C} \gg kT \Rightarrow C \ll 10^{-14}F$



Квантование магнитного потока ($\Phi_0 = \frac{h}{2e}$)



$$E_N = \frac{(N\Phi_0)^2}{2L}$$

Гамильтониан

$$H = \frac{\hat{Q}^2}{2C} + U(\Phi) \rightarrow -E_J \cos \varphi_J + E_L \varphi_L^2$$

$\varphi_{L,J}(\Phi)$

Зарядовая энергия:

$$E_C = \frac{Q_0^2}{2C}$$

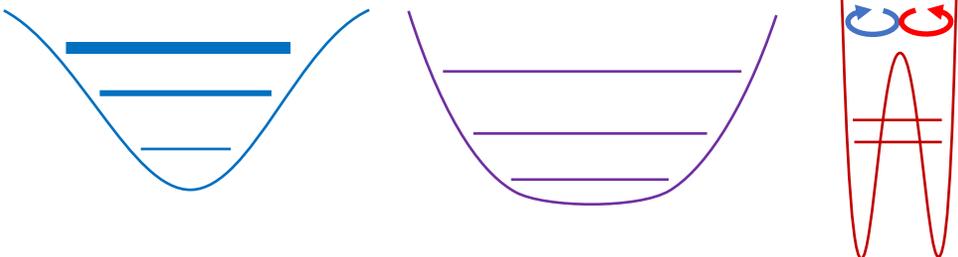
Магнитная энергия:

$$E_L = \frac{\Phi_0^2}{2(2\pi)^2 L}$$

Джозефсоновская энергия:

$$E_J$$

Examples of potentials and quantization



- Заряд Q и магнитный поток Φ – две квантово-механических переменных
- Квантование заряда и магнитного потока
- Куперовская пара ($Q_0 = 2e$) – элементарный заряд в сверхпроводниках
- Джозефсоновский переход – туннельный переход для куппероских пар
- Условия для квантового режима: $(E_C, E_L) \gg k_B T$

Аппаратная база сверхпроводниковых квантовых технологий

Нанотехнология

- Электронно-лучевая литография
- Напылительная установка для формирования джозефсоновских переходов
- ...

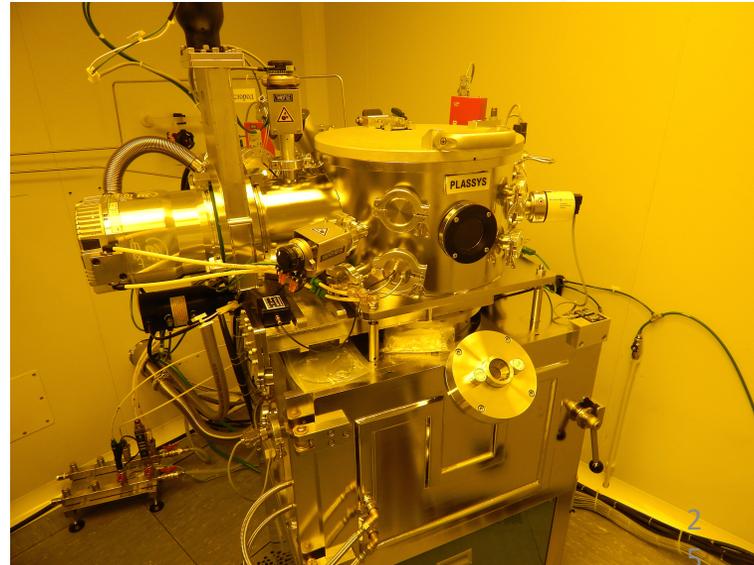
Электронно-лучевой литограф



Криогеника

Безгелиевый криостат
растворения
 $T \sim 10$ мК

Напыление дж-ских переходов



Измерения

- СВЧ генераторы
- Анализаторы цепей > 20 ГГц
- Спектральные анализаторы > 20 ГГц
- Сверхбыстрая цифровая электроника

Экспериментальная установка



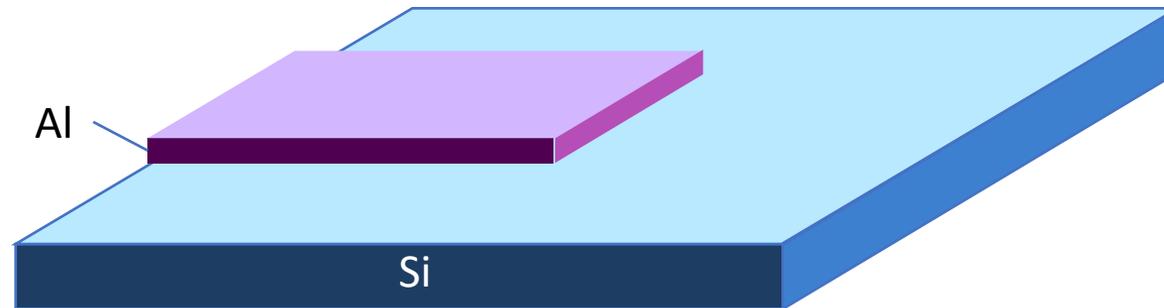
Изготовление джозефсоновских переходов

1. Чистая кремниевая подложка



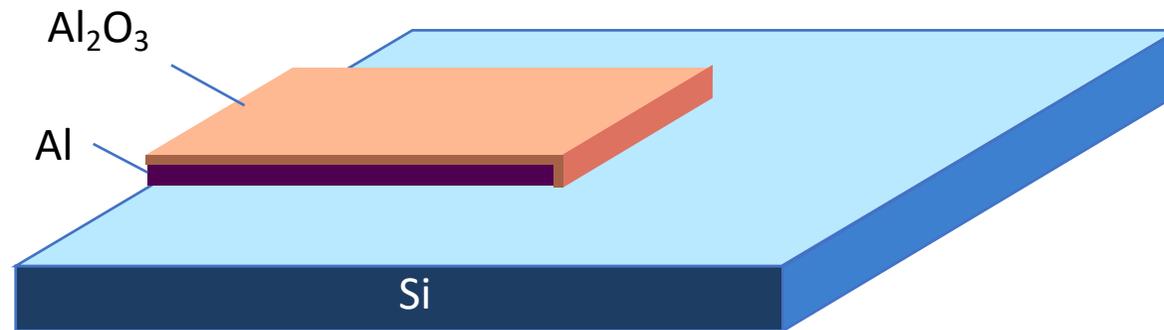
Изготовление джозефсоновских переходов

1. Чистая кремниевая подложка
2. Напыление плёнки алюминия



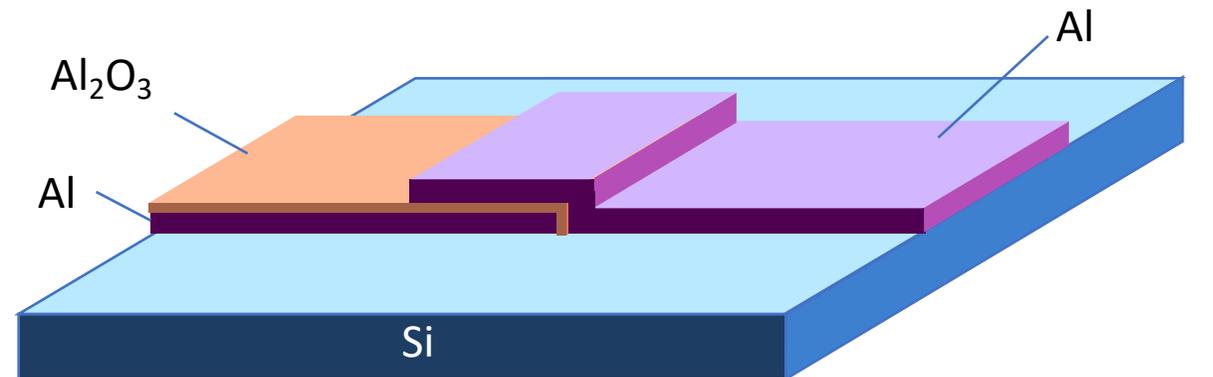
Изготовление джозефсоновских переходов

1. Чистая кремниевая подложка
2. Напыление плёнки алюминия
3. Окисление

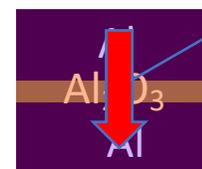


Изготовление джозефсоновских переходов

1. Чистая кремниевая подложка
2. Напыление плёнки алюминия
3. Окисление
4. Напыление верхнего слоя алюминия



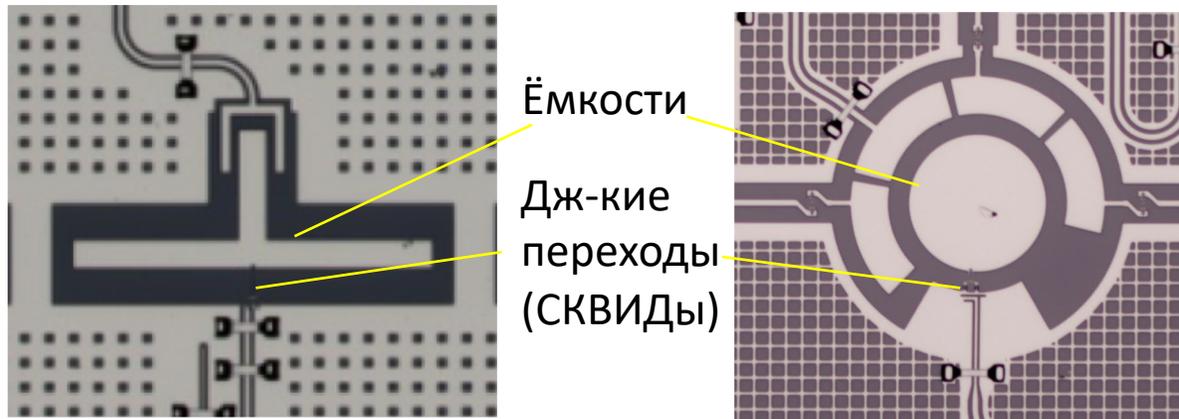
Вид сбоку



Tunneling Current

Некоторые сверхпроводниковые кубиты изготовленные в ЦКП МФТИ

Шунтированный зарядовый кубит в квантовых процессорах



5-20 мкс

5-20 мкс

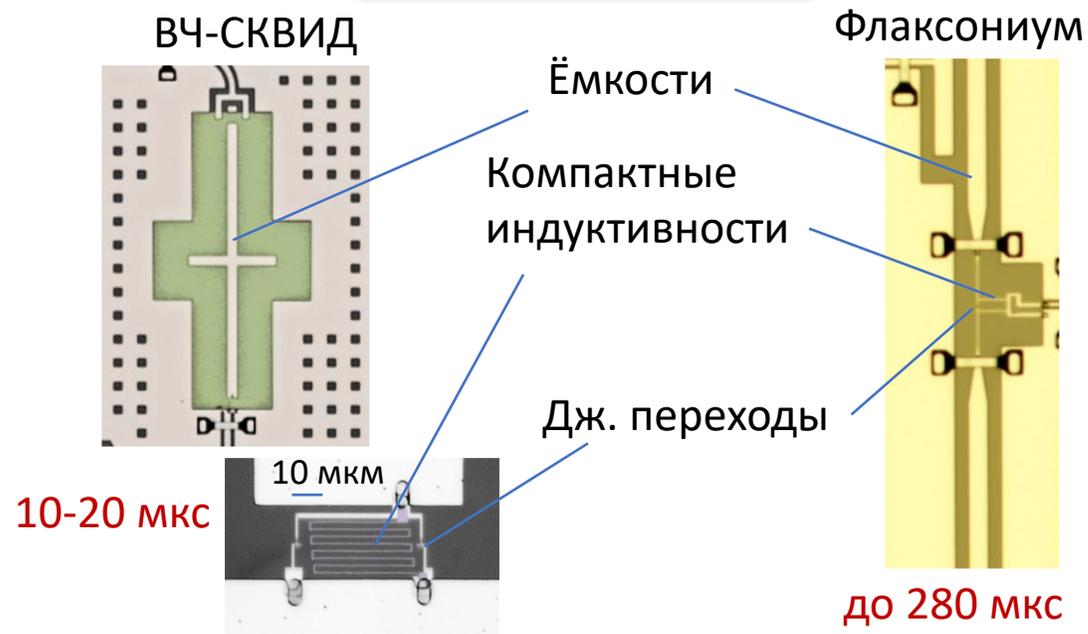
Преимущества

- Относительная простота
- Достаточно большие времена когерентности
- Хорошая воспроизводимость

Недостатки

- Малый ангармонизм
- Ограничение по параметрам

Потоковые кубиты



10-20 мкс

до 280 мкс

Преимущества

- Большая возможность для оптимизации
- Большие времена когерентности
- Любой ангармонизм и форма потенциала

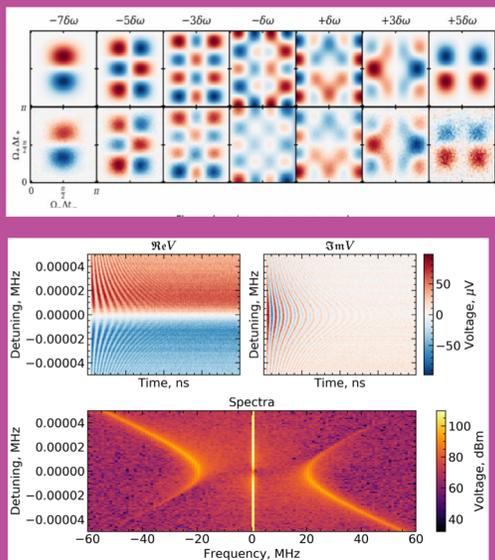
Возможные недостатки

- Содержит больше элементов (индуктивность)
- Сложнее воспроизводить (разброс энергий)

Направления исследований

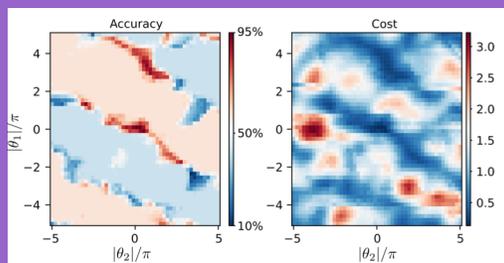
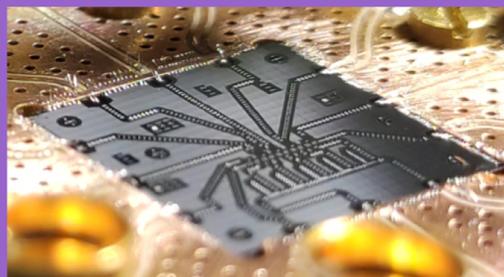
СВЧ квантовая оптика

- Открытые квантовые системы
- Квантовое смешение
- Неклассический «свет»
- Лазерный эффект на ИА
- Источники СВЧ фотнов
- Счетчики СВЧ фотонов



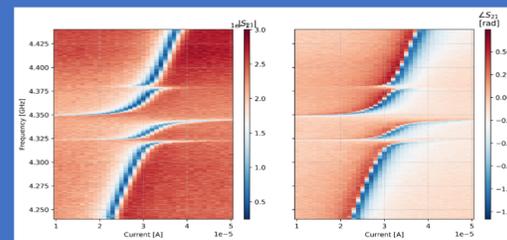
Квантовые вычисления

- Технология изготовления больших квантовых систем
- Квантовые процессоры
- Квант. машинное обучение



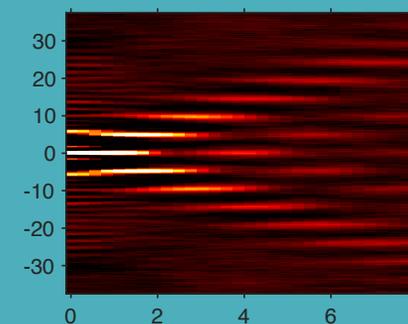
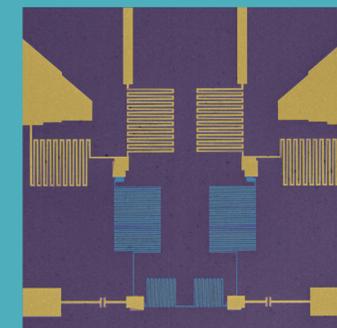
Квантовая акустика

- Связь ИА с акустическим резонатором в кв. режиме
- Фононные кристаллы
- SASER: Акустический лазер



Когерентное квантовое проскальзывание фаз CQPS

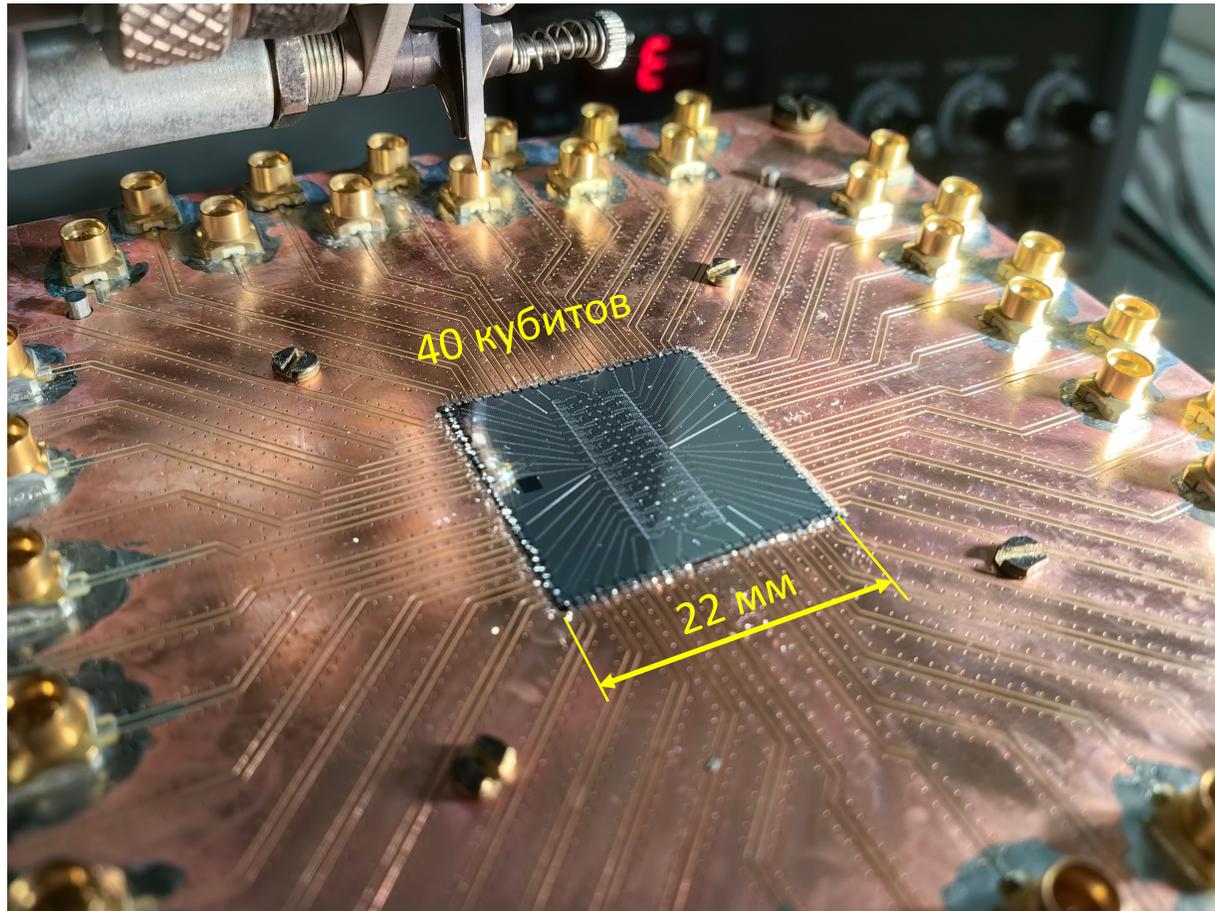
- CQPS кубит
- Эффект Ааронова-Кашера
- Нестационарный CQPS
- Квантовый эталон тока



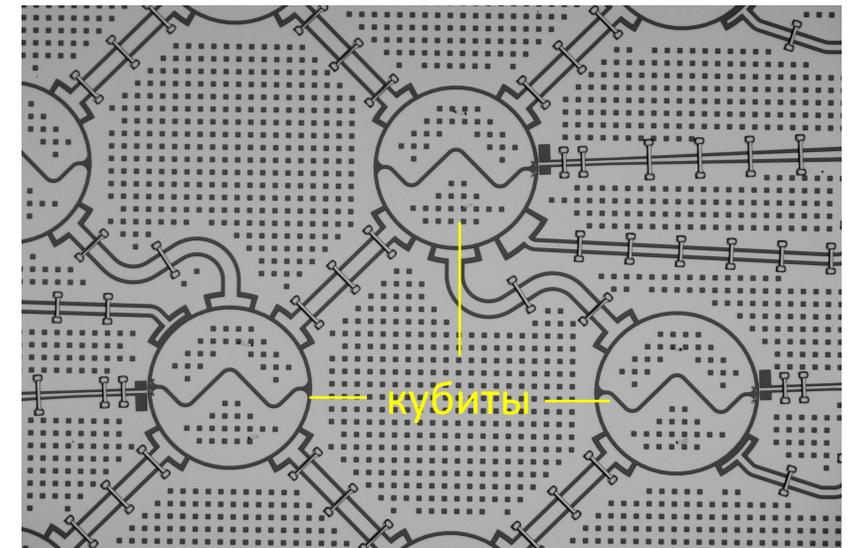
Квантовый процессор 40Q



+ Частный инвестор



Фрагмент схемы
(алюминиевая структура на кремниевой подложке)



500 μm

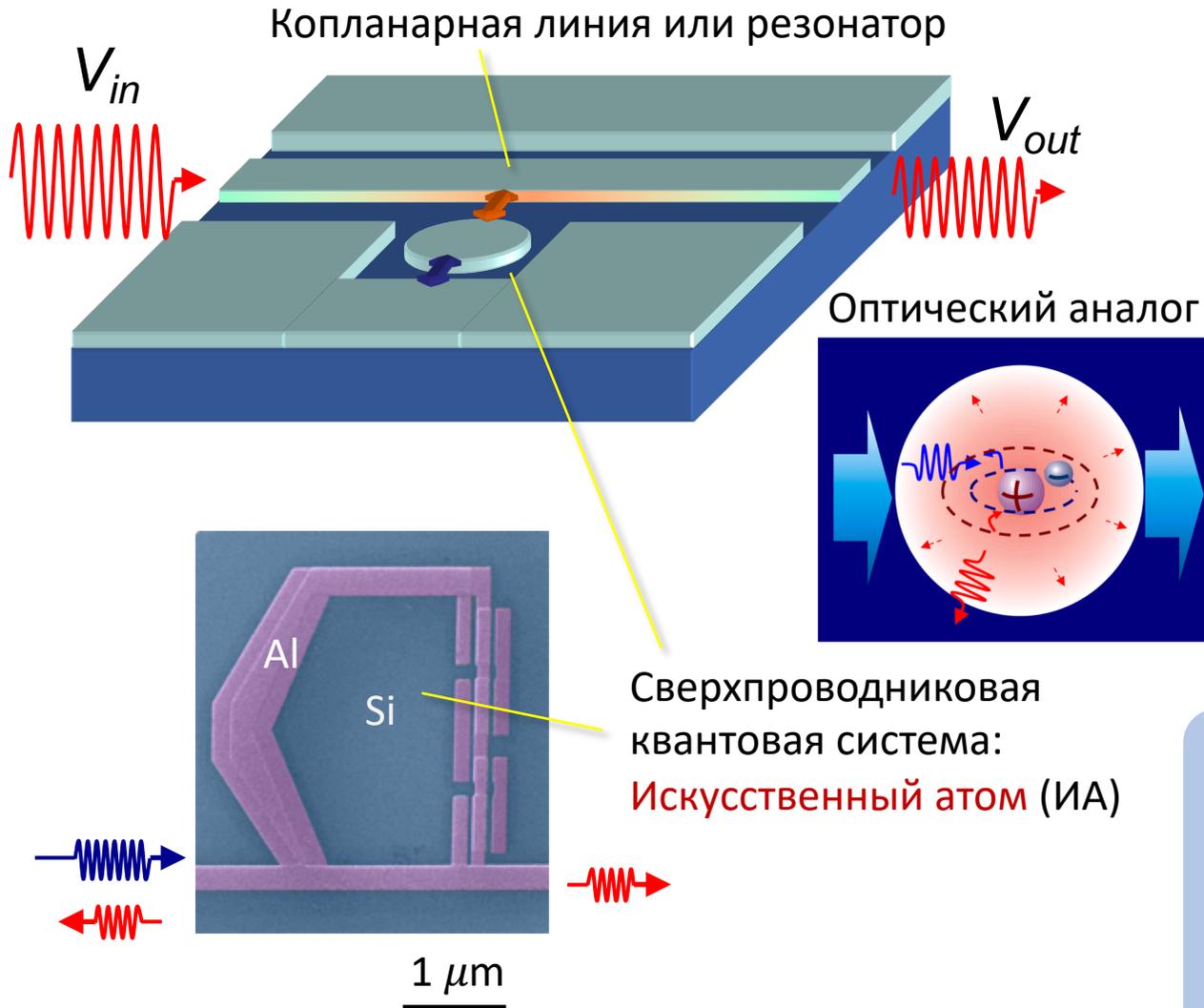
$$T_1 = 10 - 30 \text{ мкс}$$

Квантовая оптика на сверхпроводниковых квантовых системах

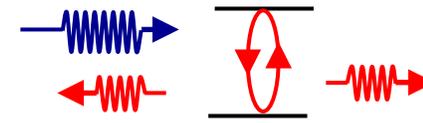
Большая область для исследований!

Квантовая оптика в СВЧ диапазоне 1 – 10 ГГц

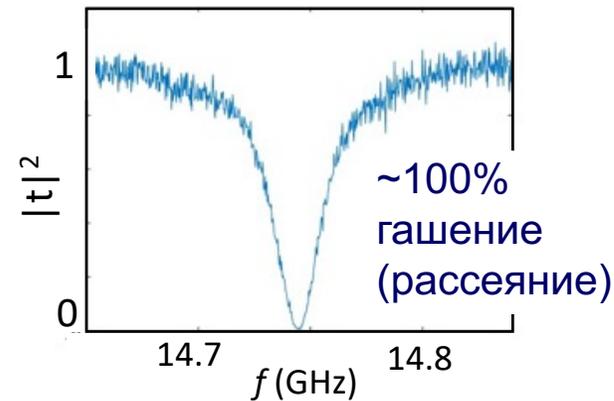
Резонансная флюоресценция



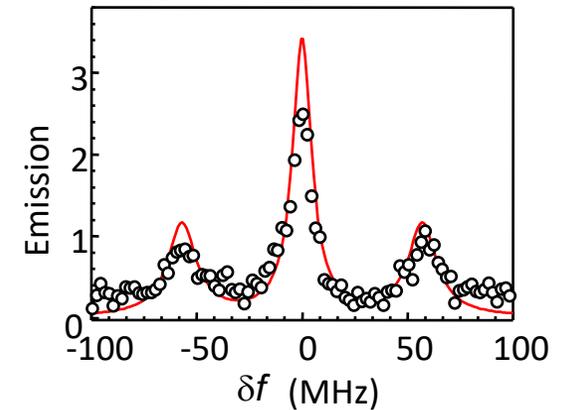
Рассеяние излучения на одиночной квантовой системе – искусственном атоме (ИА)



Прохождение: упругое рассеяние



Неупругое рассеяние

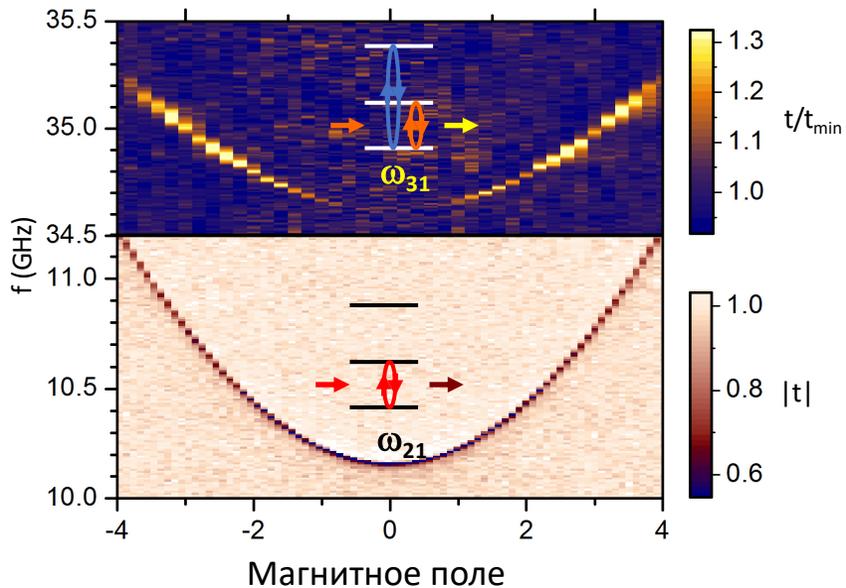


- **Физически сильная связь:** $g > \Gamma$
(безызлучательная релаксация подавлена)
- Оцифровка сигнала $V_{out}(t)$ в реальном времени
- Одновременное детектирование трёх проекций:
поле и энергия ($V e^{i\omega t} \rightarrow \langle \sigma^\pm \rangle$; $\langle |V|^2 \rangle \rightarrow \langle \sigma_z \rangle$)

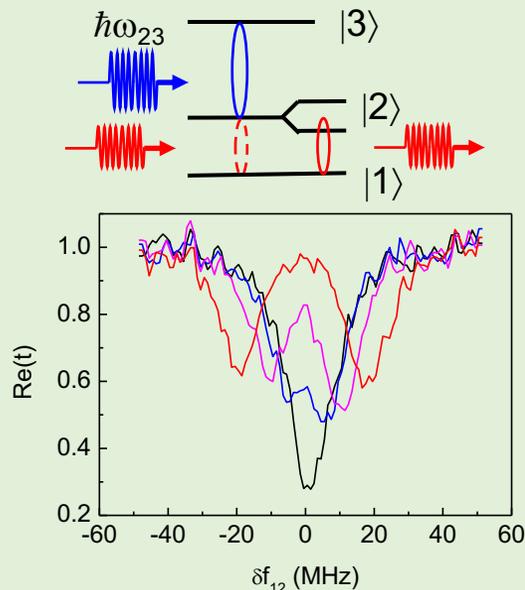
Квантовая оптика в СВЧ диапазоне

Взаимодействие одиночной квантовой системы (искусственного атома) с полем

3-ёх уровневая система:
спектроскопия искусственного атома (ИА)

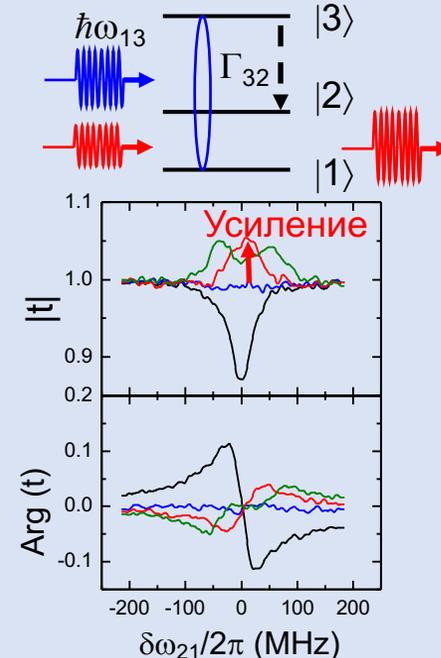


Электромагнитно-индуцированная
прозрачность (EIT)



Phys. Rev. Lett 104, 193601 (2010)

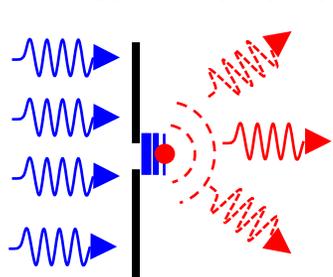
Квантовый усилитель на ИА



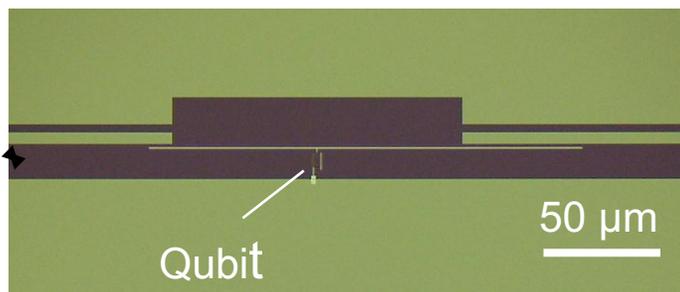
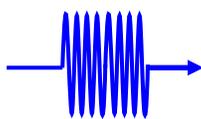
Phys. Rev. Lett 104, 183603 (2010)

Перестраиваемый источник фотонов по требованию

Оптический аналог



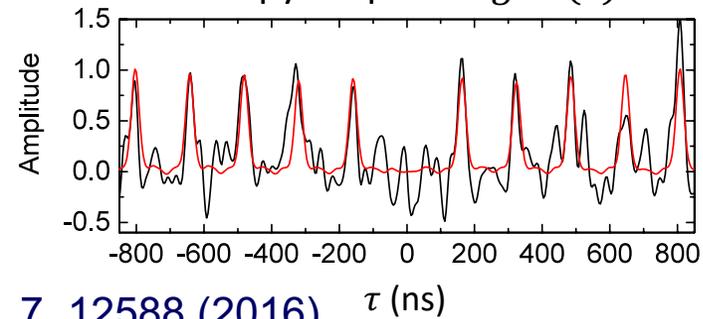
Excitation



photon



Антигруппировка: $g^{(2)}(\tau)$



Nat. Comm. 7, 12588 (2016) τ (ns)

Эффект когерентного квантового проскальзывания фазы в сверхпроводниках

Квантовая метрология: квантовый эталон тока

Nature **484**, 355-358 (2012)

Nature Physics **14**, 590–594 (2018)

Nature **608**, 45–49 (2022)

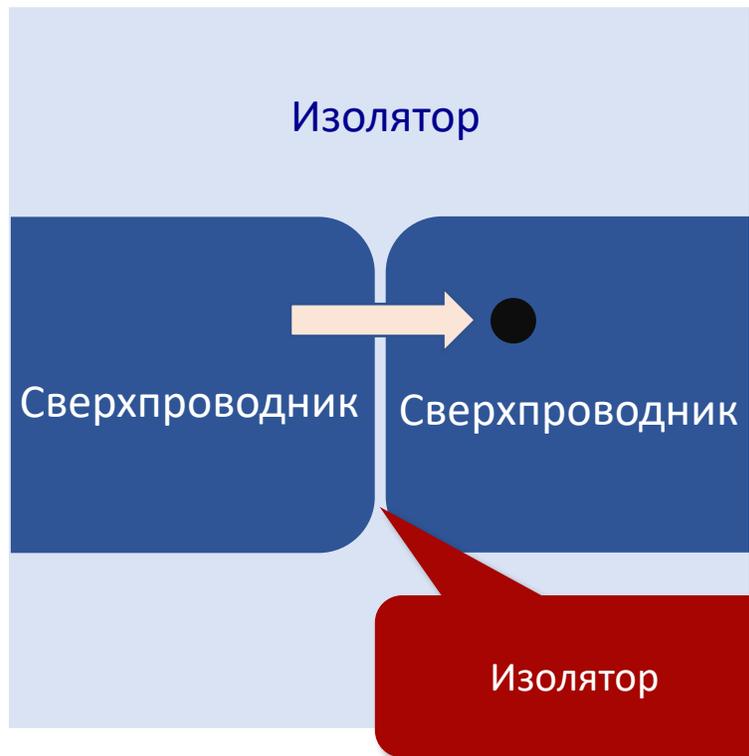


CQPS – Coherent Quantum Phase-Slip Effect

Джозефсоновский эффект и дуальность CQPS эффекта

Джозефсоновский эффект

Туннелирование куперовских пар



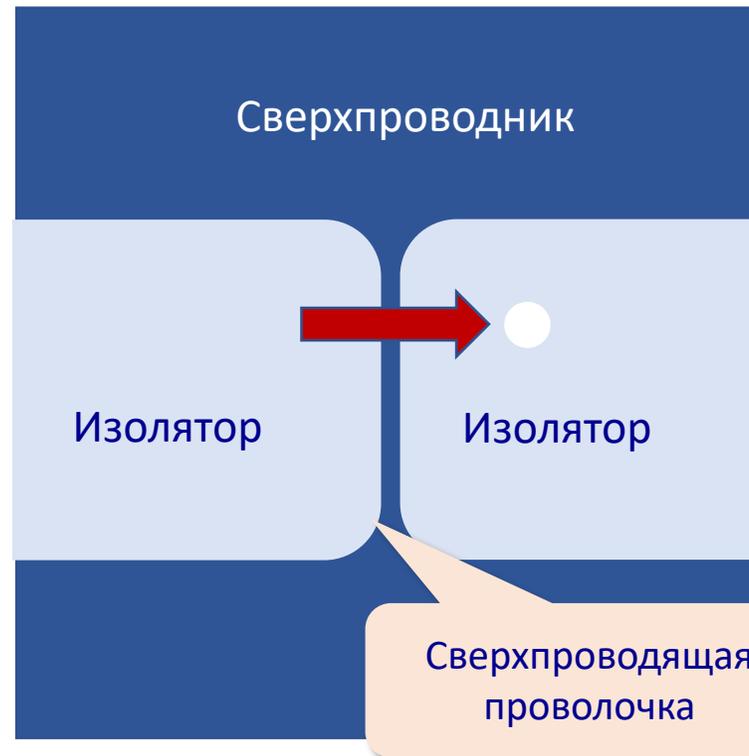
$$E_J = \frac{\Phi_0 I_c}{2\pi}$$

$$I = \dot{Q}$$

Дуальность:
 $\Phi \Leftrightarrow Q$

Когерентное квантовое проскальзывание фаз

Туннелирование квантов магнитного потока



$$E_S = \frac{Q_0 V_c}{2\pi}$$

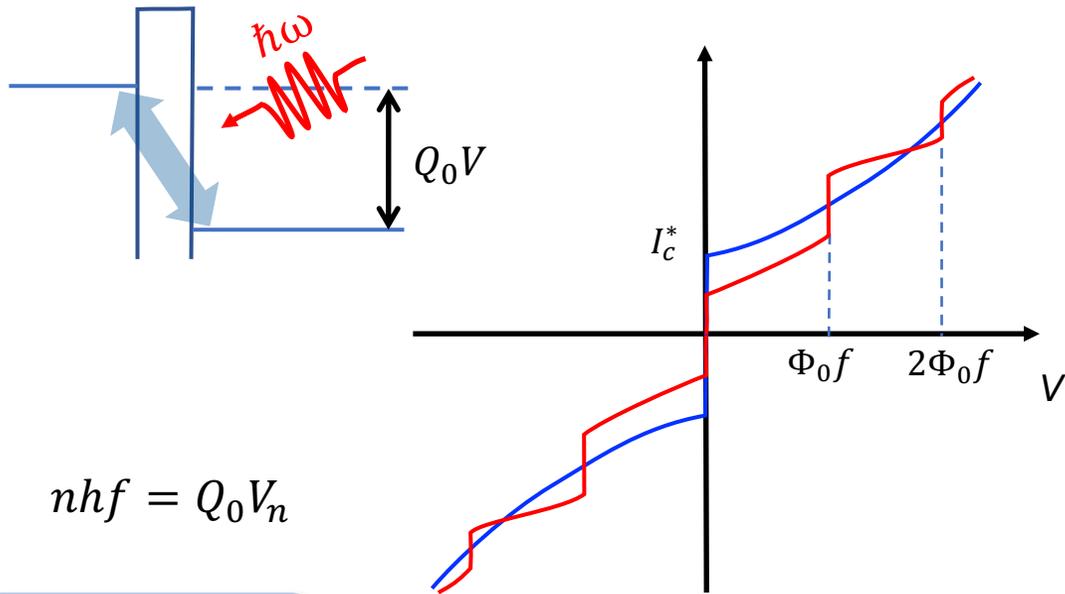
$$V = \dot{\Phi}$$

Фаза и магнитный поток:
 $\varphi = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}$

Duality between the ac Josephson effect and ac CQPS

ac Josephson effect

Photon assisted Cooper-pair tunneling

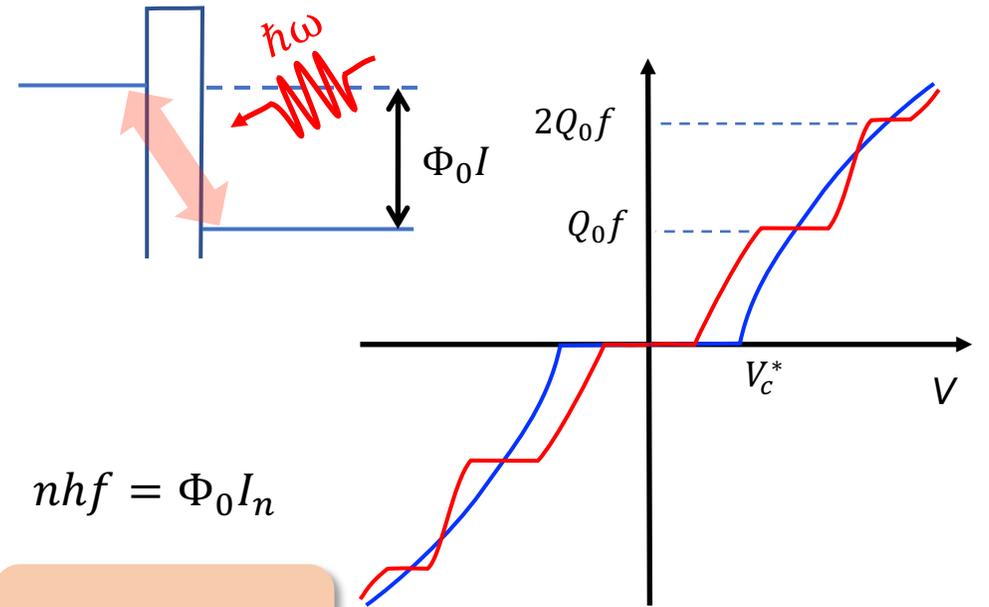


$$nhf = Q_0 V_n$$

$$V_n = n\Phi_0 f$$

ac CQPS effect

Photon assisted vortex tunneling

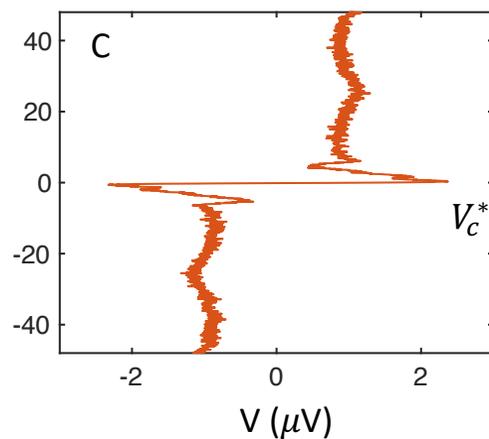
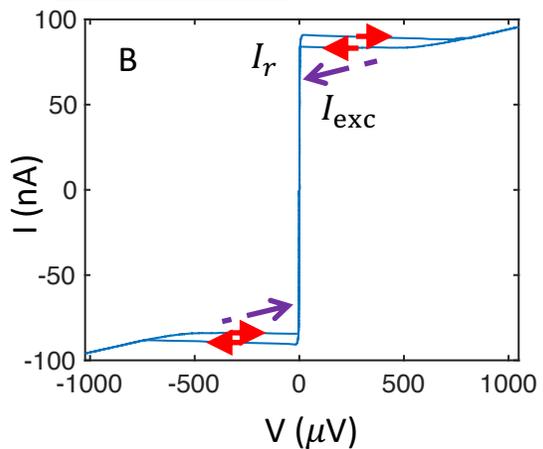
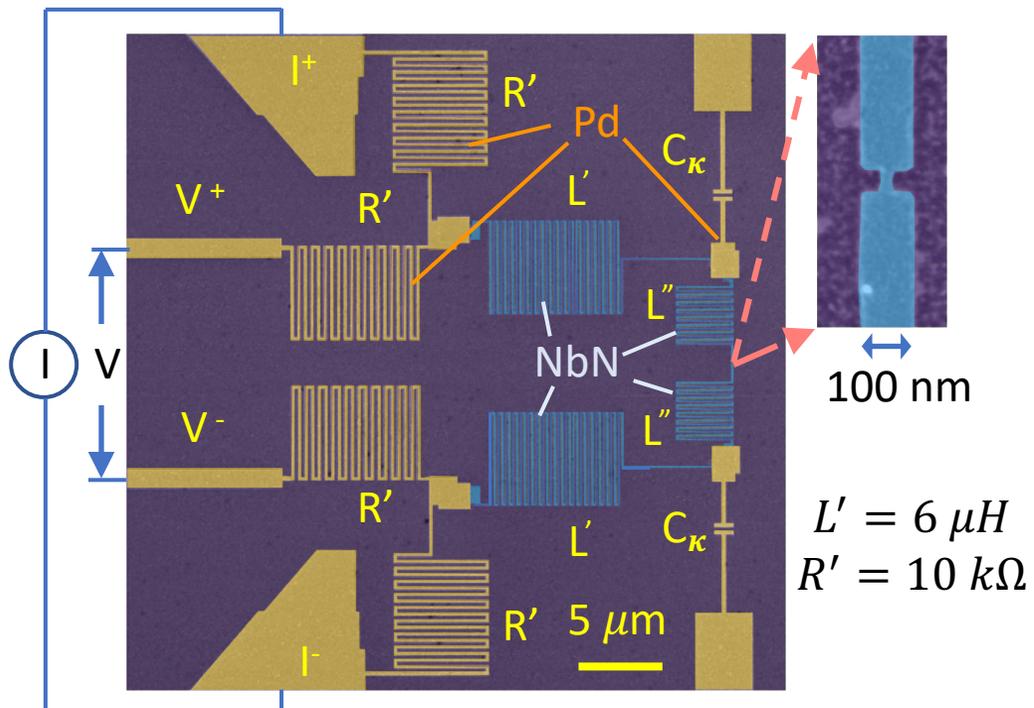


$$nhf = \Phi_0 I_n$$

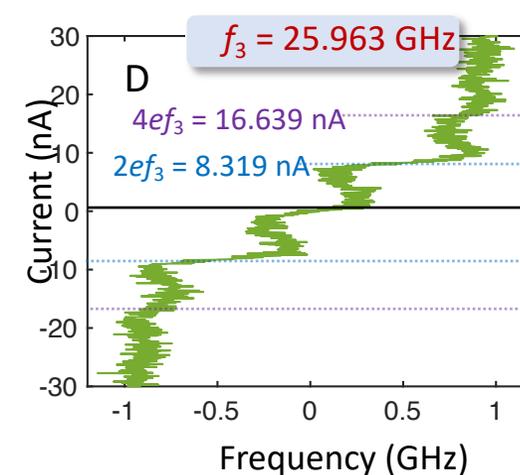
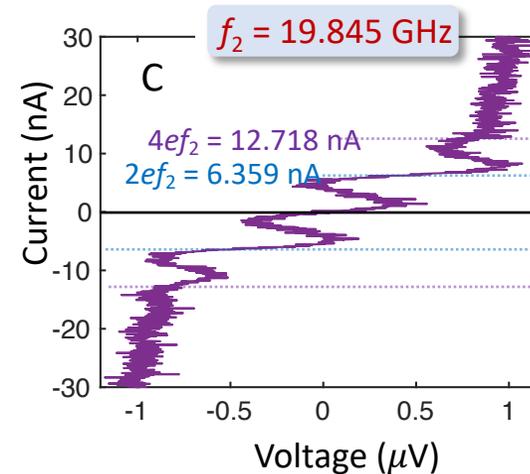
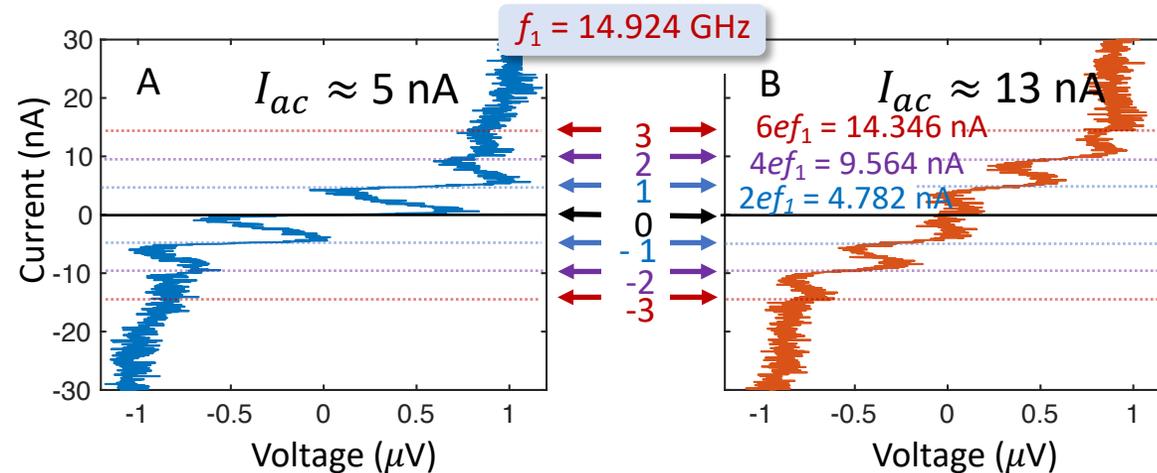
$$I_n = nQ_0 f$$

Нестационарный эффект когерентного квантового проскальзывания фазы

Устройство и измерения по постоянному току



Вольт-амперные характеристики под СВЧ



Блокада сосуществует с видимым сверхтоком

Квантовая метрология: эталон тока

Josephson effect \Leftrightarrow Coherent Quantum Phase slip Effect

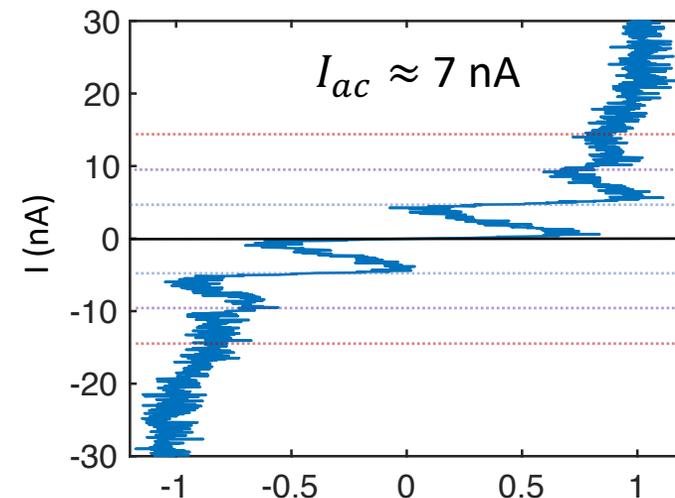
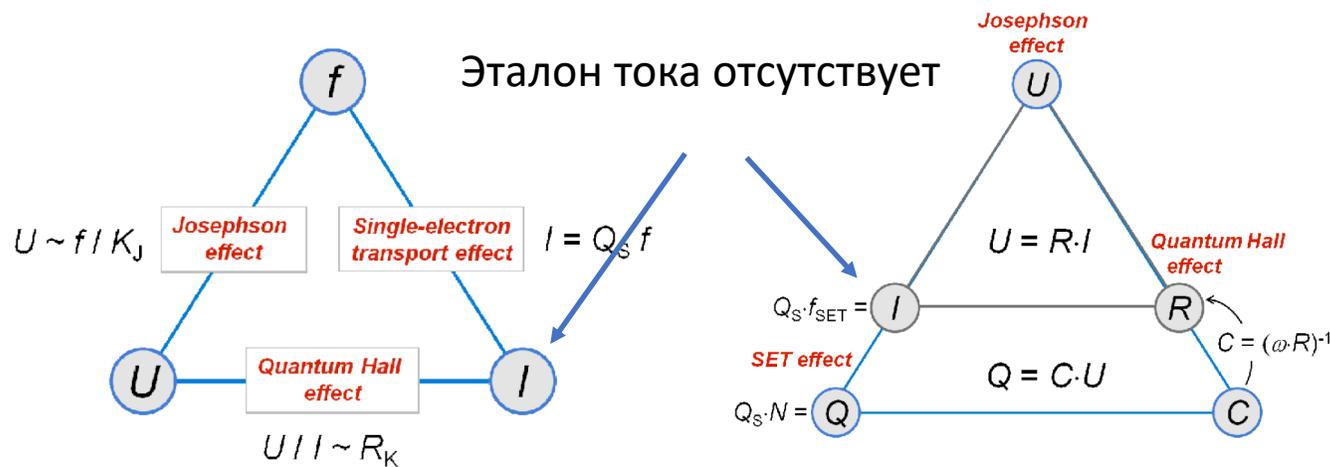
Ступеньки Шапиро:
Эталон напряжения $V_n = n\Phi_0 f$

Квантовый Холл (ступеньки сопротивления)
Эталон сопротивления $R_n = n \frac{h}{e^2}$

Перевернутые ступеньки Шапиро:
Эталон тока: $I_n = nQ_0 f$

$$Q_0 = 2e$$

Метрологический треугольник



Заключение

- Джозефсоновские переходы являются базовыми элементами для создания сверхпроводящих квантовых систем и искусственных атомов
- Сверхпроводящие квантовые системы – мощный инструмент для ряда фундаментальных направлений исследований: квантовой оптики, квантовой акустики, сенсорики, мезоскопической физики
- Эффект когерентного квантового проскальзывания фаз в джозефсоновских переходах важен для квантовой метрологии