

# Исследование сверхпроводящих потоковых кубитов



Федоров Г. Научный руководитель: Шульга К. (Рязанов В.В.)

1 апреля 2015 г.

## 1 Теоретические сведения

- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Энергетический спектр Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором

## 2 Экспериментальные методы

- Установка
- Техника измерений

## 3 Результаты

- Спектры
- Наблюдение квазипересечения уровней
- Нелинейные эффекты

## 1 Теоретические сведения

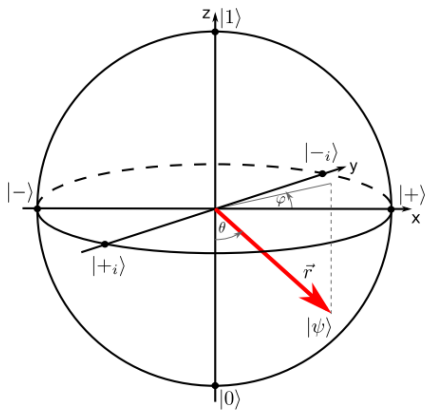
- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Энергетический спектр Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором

## 2 Экспериментальные методы

- Установка
- Техника измерений

## 3 Результаты

- Спектры
- Наблюдение квазипересечения уровней
- Нелинейные эффекты



Сфера Блоха

Состояние классического бита:

0 или 1

Состояние квантового бита:

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, \quad a, b \in \mathbb{C}$$

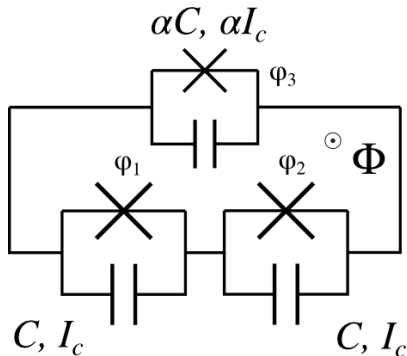
Степени свободы:

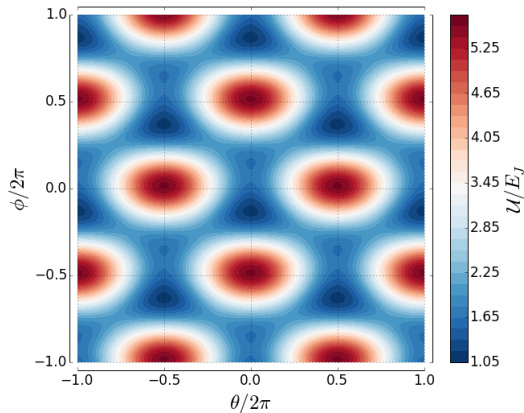
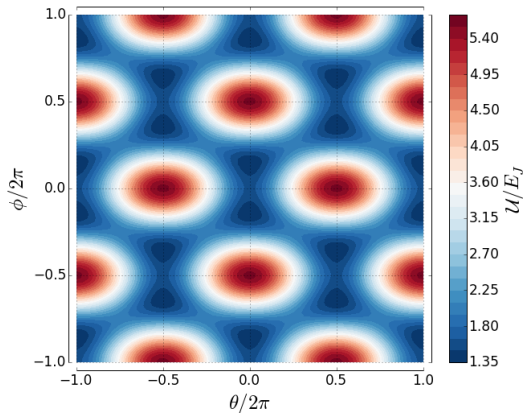
$$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} - \varphi_1 - \varphi_2 \text{ (квантование } \Phi, \varphi_3 \text{ зависима от первых двух)}$$

Энергия одного перехода:

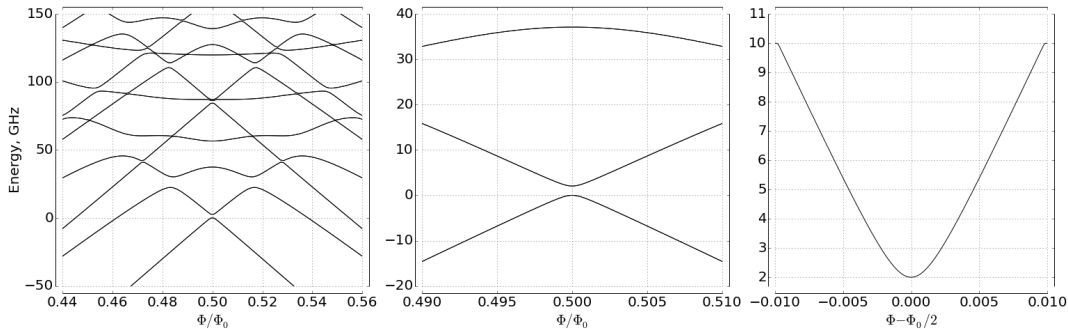
$$E_i = E_J(1 - \cos \varphi_i) + \frac{\hbar^2}{4E_C} \dot{\varphi}_i^2,$$

$$E_J = \frac{\hbar}{2e} I_c, \quad E_C = \frac{(2e)^2}{2C}$$



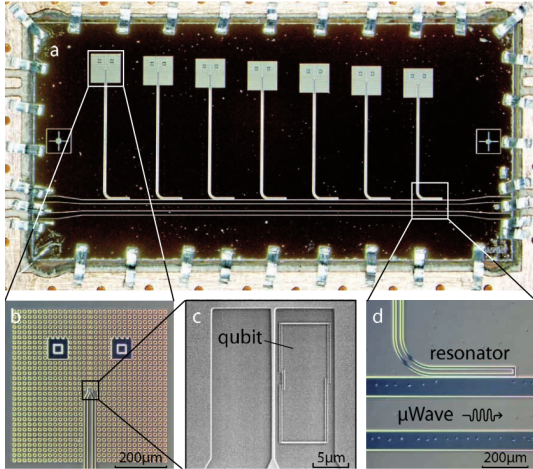


$$U = E_J \left[ 2 + \alpha - 2 \cos(\phi) \cos(\theta) - \alpha \cos \left( 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} - 2\phi \right) \right], \phi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}, \theta = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$$



$$\hat{\mathcal{H}} = \frac{\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_z + \frac{\delta}{2} \hat{\sigma}_x, \quad E_1 - E_0 = \sqrt{\varepsilon^2 + \delta^2} - \text{гипербола по } \delta$$

$$|0\rangle_{\Phi_0/2} = (1 \ 0)^T, \quad |1\rangle_{\Phi_0/2} = (0 \ 1)^T, \quad \delta \propto \Phi - \Phi_0/2$$



Ситуация при  $\Phi = \Phi_0/2$ :

$$\hat{\mathcal{H}} = \hat{\mathcal{H}}_q + \hat{\mathcal{H}}_r + \hat{\mathcal{H}}_i,$$

$$\hat{\mathcal{H}}_q = \frac{\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_z = \frac{\hbar \omega_q}{2} \hat{\sigma}_z,$$

$$\hat{\mathcal{H}}_r = \hbar \omega_r \hat{a}^\dagger \hat{a},$$

$$\hat{\mathcal{H}}_i = \begin{cases} g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \hat{\sigma}_x = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a})(\hat{\sigma}^+ + \hat{\sigma}^-) \\ g(\hat{a} \hat{\sigma}^- + \hat{a} \hat{\sigma}^+) \end{cases}, \text{ в приближении}$$

– модель Джайнса-Каммингса



## 1 Теоретические сведения

- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Энергетический спектр Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором

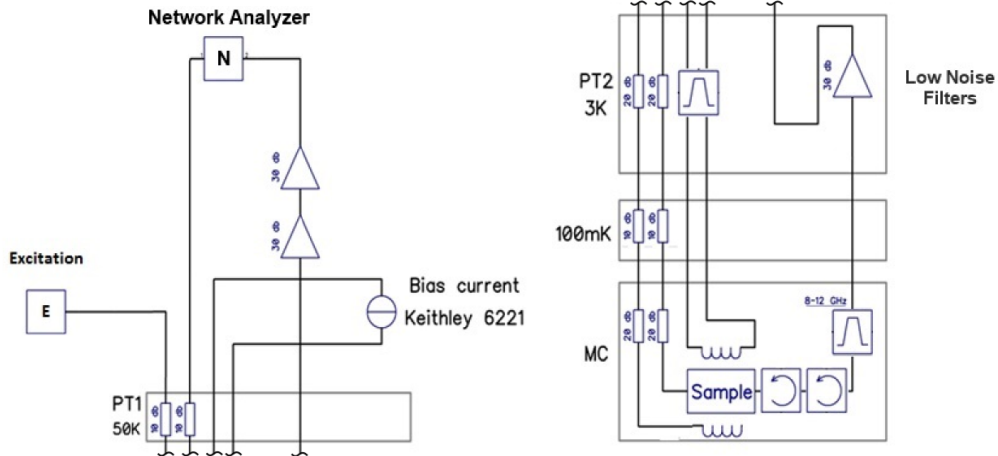
## 2 Экспериментальные методы

- Установка
- Техника измерений

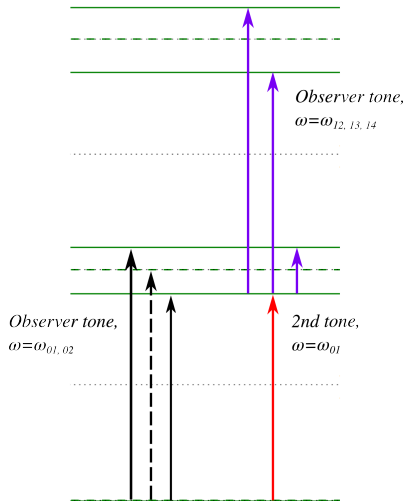
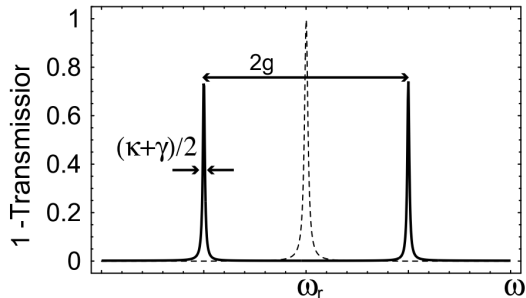
## 3 Результаты

- Спектры
- Наблюдение квазипересечения уровней
- Нелинейные эффекты

Взаимодействие с образцом внутри криостата:



В эксперименте фактически наблюдаются сдвиги или расщепления частот поглощения:



## 1 Теоретические сведения

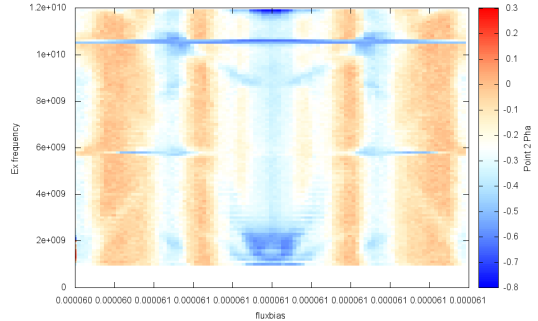
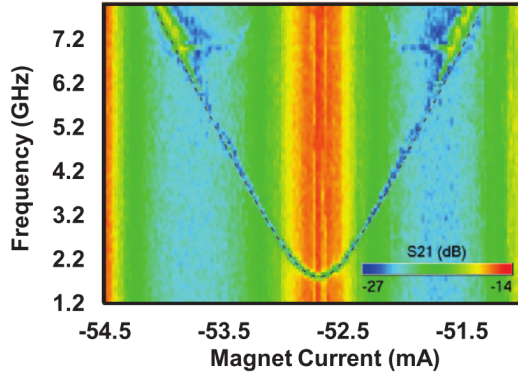
- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Энергетический спектр Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором

## 2 Экспериментальные методы

- Установка
- Техника измерений

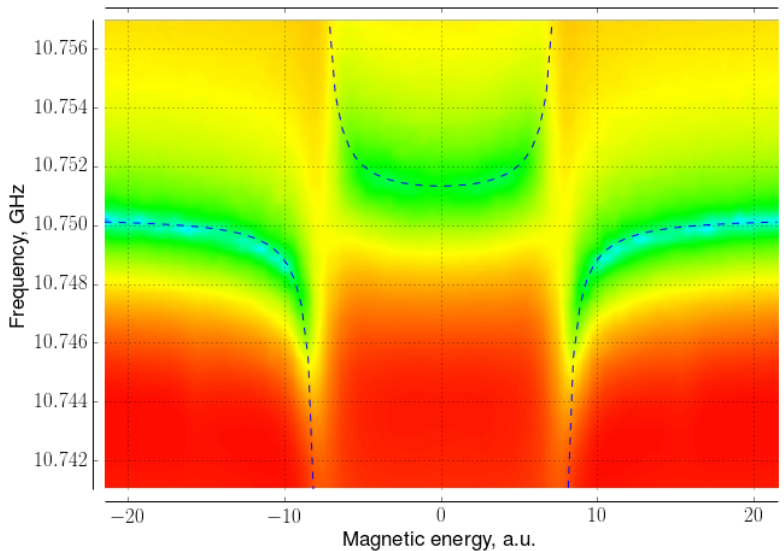
## 3 Результаты

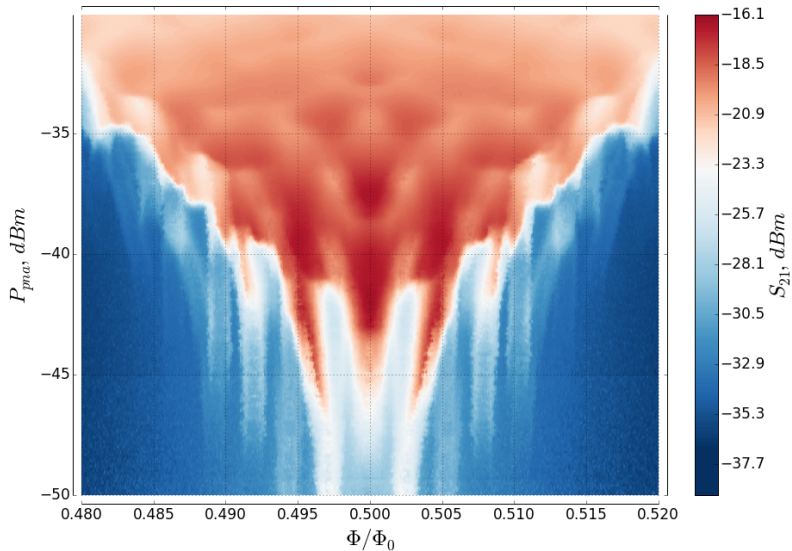
- Спектры
- Наблюдение квазипересечения уровней
- Нелинейные эффекты



Гиперболическая зависимость от  $\delta \propto \Phi - \Phi_0/2$ :

$$\hbar\omega_{01} = \sqrt{\varepsilon^2 + \delta^2}$$





Теория Г.-Л. и уравнения Джозефсона:

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{n_s}{2}} e^{i\theta(\mathbf{r})}$$

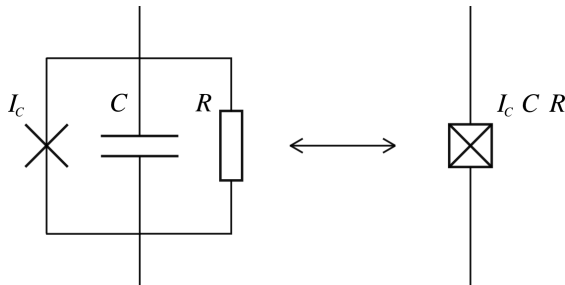
$$I_s = I_c \sin \varphi, \quad \hbar \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 2eV$$

$$E = E_J(1 - \cos \varphi) + \frac{\hbar^2}{4E_C} \dot{\varphi}^2,$$

$$E_J = \frac{\hbar}{2e} I_c, \quad E_C = \frac{(2e)^2}{2C}$$

Разность фаз на берегах контакта:

$$\Delta\theta = \varphi$$



RSCJ-модель



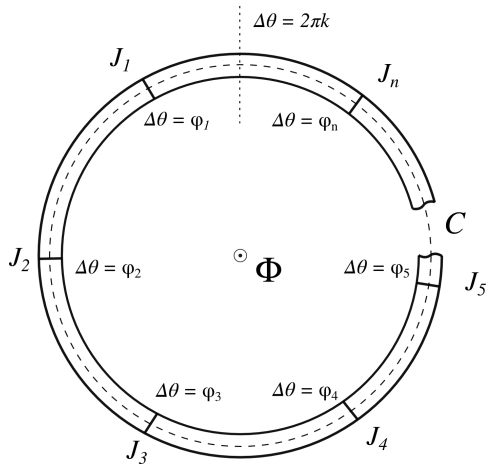
Квантование магнитного потока:

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{n_s}{2}} e^{i\theta(\mathbf{r})}$$

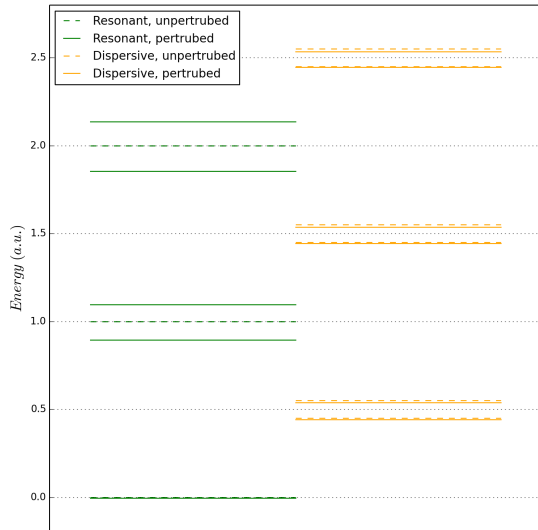
$$\mathbf{j}_s = \frac{1}{\Lambda} \left( \frac{\Phi_0}{2\pi} \nabla \theta(\mathbf{r}) - \mathbf{A} \right)$$

$$\sum_i \varphi_n = 2\pi \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} - k \right), \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}$$



Numerical solution



Numerical solution with RWA

