

Динамика потокового кубита, связанного с микроволновым резонатором

Федоров Глеб. Научный руководитель: Рязанов В. В.

21 июня 2015 г.

1 Теоретические сведения

- Гамильтониан Раби
- О приближениях
- Уровни энергии и спектр
- Квазипересечение
- Основное уравнение и теория отклика

2 Экспериментальные методы

- Образец
- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

3 Экспериментальные результаты

- Спектры
- Квазипересечение (пятый кубит)
- Дополнение – первый отечественный кубит

1 Теоретические сведения

- Гамильтониан Раби
- О приближениях
- Уровни энергии и спектр
- Квазипересечение
- Основное уравнение и теория отклика

2 Экспериментальные методы

- Образец
- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

3 Экспериментальные результаты

- Спектры
- Квазипересечение (пятый кубит)
- Дополнение – первый отечественный кубит

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

Из физической модели:

$$\hat{\mathcal{H}}_q = \hat{\mathbb{1}}_r \otimes \left[\frac{\Delta}{2} \hat{\sigma}_x + \frac{\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_z \right]$$

$$\hat{\mathcal{H}}_r = \hbar\omega_r \left(\frac{1}{2} + \hat{a}^\dagger \hat{a} \right) \otimes \hat{\mathbb{1}}_q$$

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes \hat{\sigma}_z$$

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

Из физической модели:

$$\hat{\mathcal{H}}_q = \hat{\mathbb{1}}_r \otimes \left[\frac{\Delta}{2} \hat{\sigma}_x + \frac{\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_z \right]$$

$$\hat{\mathcal{H}}_r = \hbar\omega_r \left(\frac{1}{2} + \hat{a}^\dagger \hat{a} \right) \otimes \hat{\mathbb{1}}_q$$

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes \hat{\sigma}_z$$

$\hat{\sigma}_x$ заменен на $\hat{\sigma}_z$:

$$\hat{\mathcal{H}}_q = \hat{\mathbb{1}}_r \otimes \left[\frac{\Delta}{2} \hat{\sigma}_z + \frac{\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_x \right]$$

$$e^{i\frac{\pi}{4}\hat{\sigma}_y} \Rightarrow$$

$$\hat{\mathcal{H}}_r = \hbar\omega_r \left(\frac{1}{2} + \hat{a}^\dagger \hat{a} \right) \otimes \hat{\mathbb{1}}_q$$

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes \hat{\sigma}_x$$

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

$\hat{\sigma}_x$ заменен на $\hat{\sigma}_z$:

$$\hat{\mathcal{H}}_q = \hat{\mathbb{1}}_r \otimes \left[\frac{\Delta}{2} \hat{\sigma}_z + \frac{\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_x \right]$$

$$\hat{\mathcal{H}}_r = \hbar\omega_r \left(\frac{1}{2} + \hat{a}^\dagger \hat{a} \right) \otimes \hat{\mathbb{1}}_q$$

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes \hat{\sigma}_x$$

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

$\hat{\sigma}_x$ заменен на $\hat{\sigma}_z$:

$$\hat{\mathcal{H}}_q = \hat{\mathbb{1}}_r \otimes \left[\frac{\Delta}{2} \hat{\sigma}_z + \frac{\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_x \right]$$

$$\hat{\mathcal{H}}_r = \hbar\omega_r \left(\frac{1}{2} + \hat{a}^\dagger \hat{a} \right) \otimes \hat{\mathbb{1}}_q$$

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes \hat{\sigma}_x$$

конечная форма:

$$\hat{\mathcal{H}}_q = \hat{\mathbb{1}}_r \otimes \frac{\hbar\omega_q}{2} \hat{\sigma}_z, \quad \omega_q = \sqrt{\Delta^2 + \varepsilon^2}$$

$$e^{i\frac{\theta}{2}\hat{\sigma}_y} \Rightarrow \begin{aligned} \text{tg } \theta &= \frac{\varepsilon}{\Delta} \end{aligned}$$

$$\hat{\mathcal{H}}_r = \hbar\omega_r \left(\frac{1}{2} + \hat{a}^\dagger \hat{a} \right) \otimes \hat{\mathbb{1}}_q$$

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes (\hat{\sigma}_x \sin \theta - \hat{\sigma}_z \cos \theta)$$

Без приближений:

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes (\hat{\sigma}_x \sin \theta - \hat{\sigma}_z \cos \theta)$$

Без приближений:

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes (\hat{\sigma}_x \sin \theta - \hat{\sigma}_z \cos \theta)$$

Стандартный RWA:

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g \sin \theta (\hat{a}^\dagger \otimes \hat{\sigma}^- + \hat{a} \otimes \hat{\sigma}^+) - g \cos \theta (\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes \hat{\sigma}_z$$

Без приближений:

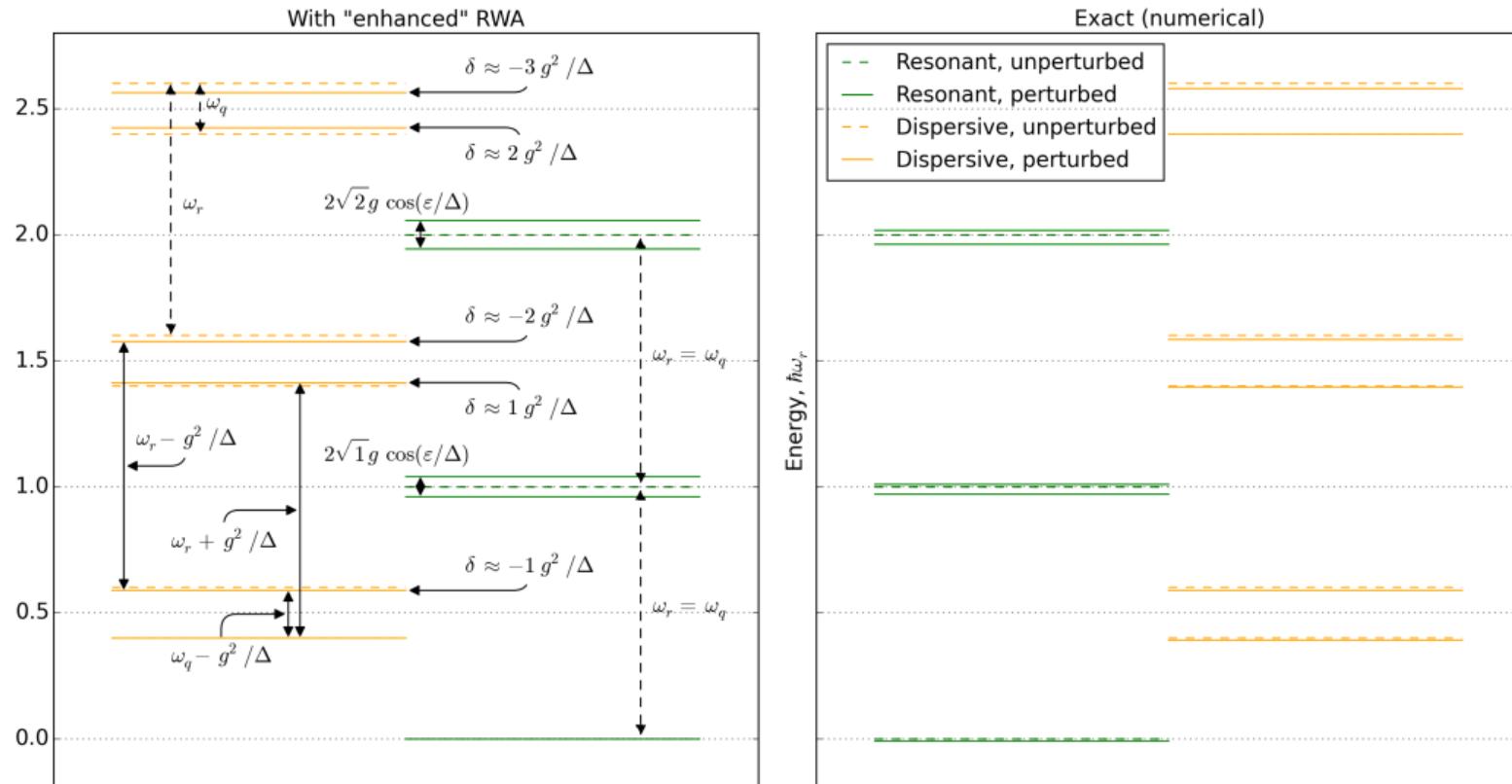
$$\hat{\mathcal{H}}_i = g(\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes (\hat{\sigma}_x \sin \theta - \hat{\sigma}_z \cos \theta)$$

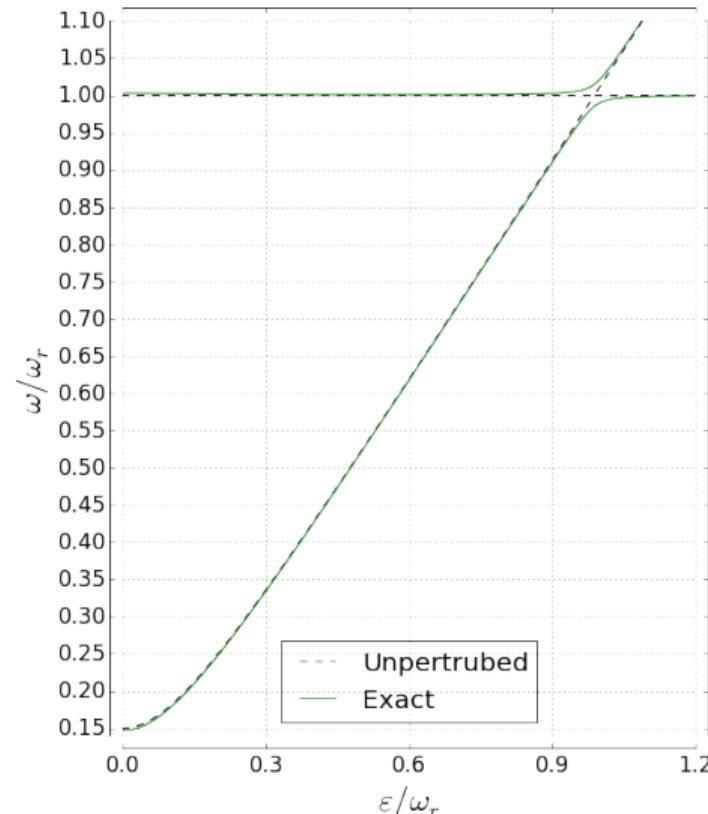
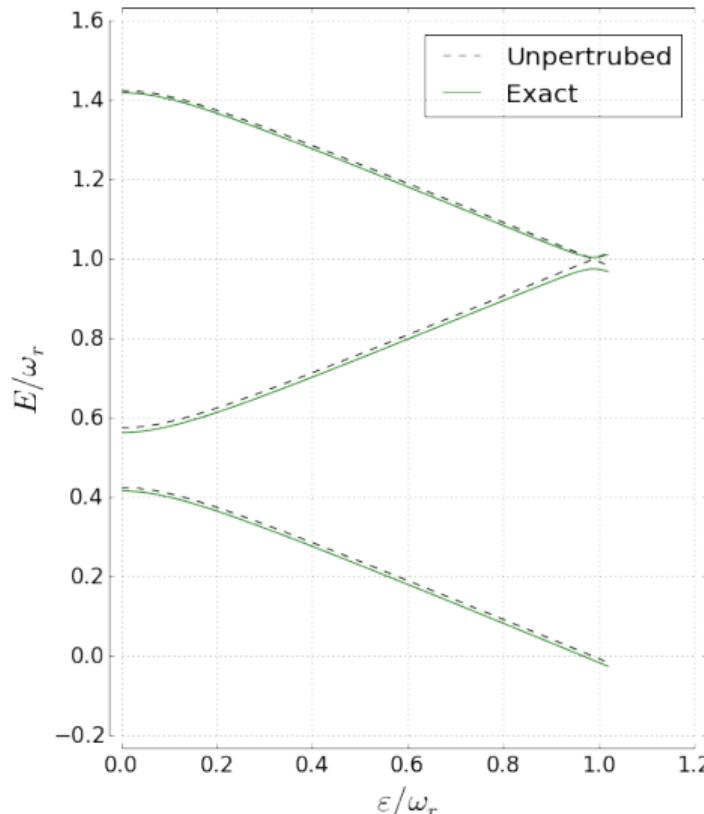
Стандартный RWA:

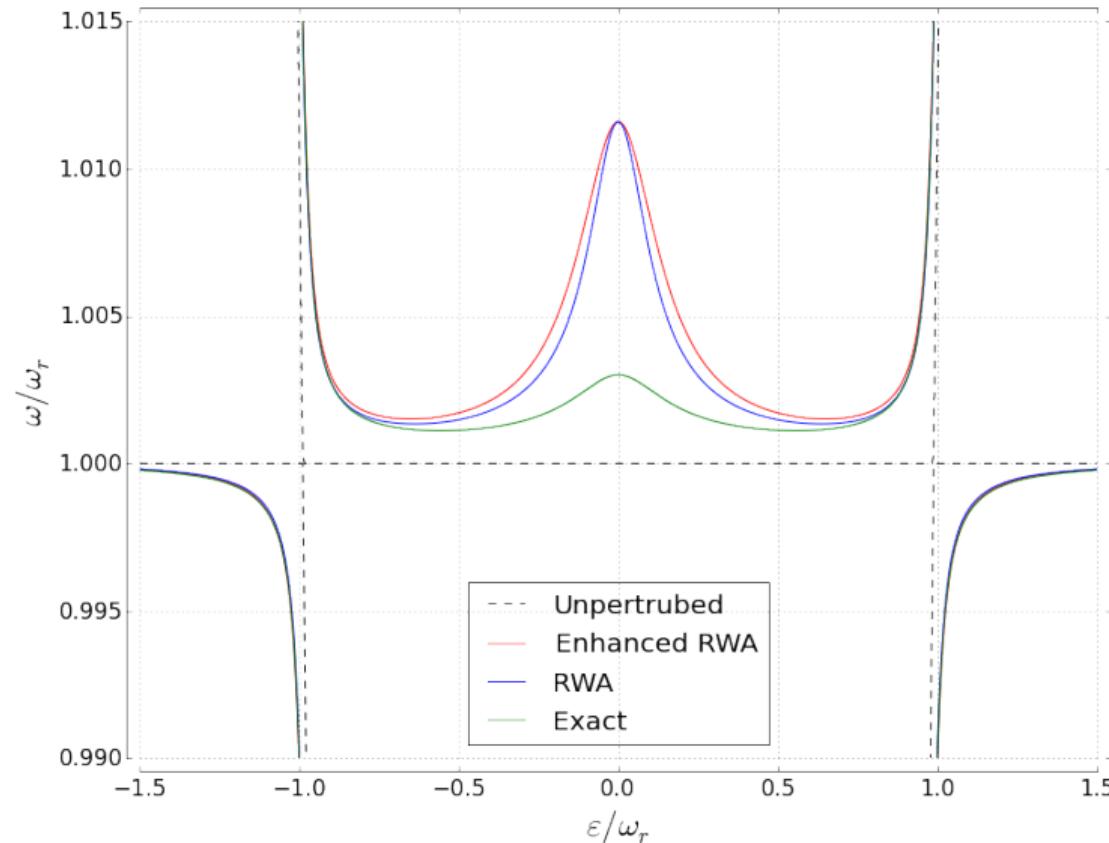
$$\hat{\mathcal{H}}_i = g \sin \theta (\hat{a}^\dagger \otimes \hat{\sigma}^- + \hat{a} \otimes \hat{\sigma}^+) - g \cos \theta (\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes \hat{\sigma}_z$$

Улучшенный RWA:

$$\hat{\mathcal{H}}_i = g \sin \theta (\hat{a}^\dagger \otimes \hat{\sigma}^- + \hat{a} \otimes \hat{\sigma}^+)$$







Основное уравнение форме Линдблада
 $(T \approx 0)$:

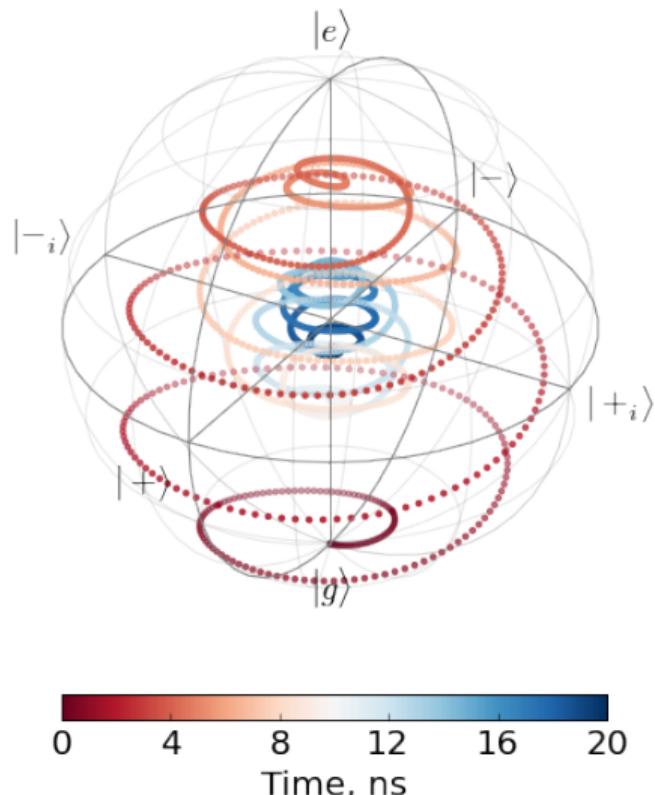
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \hat{\rho}_s = [\hat{\mathcal{H}}_s, \hat{\rho}_s] +$$

$$+ \sum_{k=1}^3 \Gamma_k \left(\hat{O}_k \hat{\rho}_s \hat{O}_k^\dagger - \frac{1}{2} \left\{ \hat{O}_k^\dagger \hat{O}_k, \hat{\rho}_s \right\} \right)$$

$$\hat{O}_1 = \hat{a}, \quad \Gamma_1 = \kappa,$$

$$\hat{O}_2 = \hat{\sigma}^-, \quad \Gamma_2 = \gamma, \quad \hat{O}_3 = \hat{\sigma}_z, \quad \Gamma_3 = \gamma_\phi,$$

$$\hat{\mathcal{H}}_s = \hat{\mathcal{H}}_R + \text{driving}$$



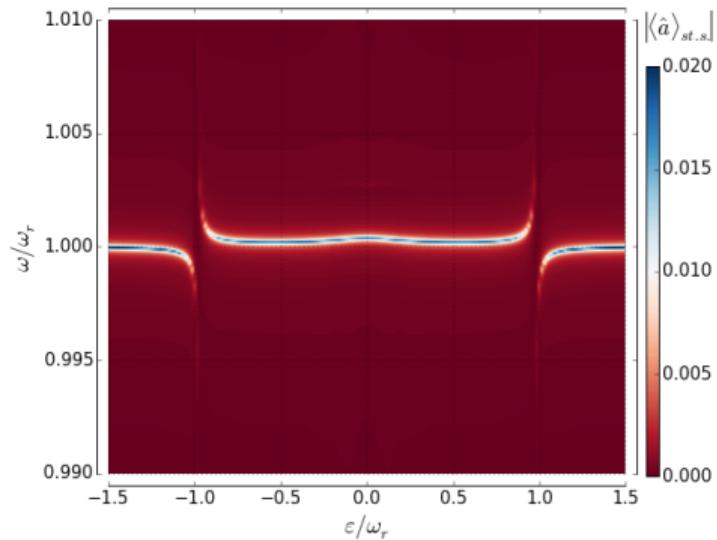
Теория отклика:

$$\hat{\mathcal{H}}_{tot} = \hat{\mathcal{H}}_s + \int d\omega \hbar\omega \hat{b}^\dagger(\omega)\hat{b}(\omega) + \int d\omega [\kappa(\omega)\hat{c}^\dagger\hat{b}(\omega) + \kappa(\omega)\hat{c}\hat{b}^\dagger(\omega)]$$

Уравнение пропускания

$$\hat{b}_{out} = \sqrt{\gamma}\hat{c}, \quad \hat{c} \rightarrow \hat{a} \otimes \hat{\mathbb{1}}_q$$

$$S_{21} \propto Tr [\hat{\rho}_s \hat{a} \otimes \hat{\mathbb{1}}_q]$$



1 Теоретические сведения

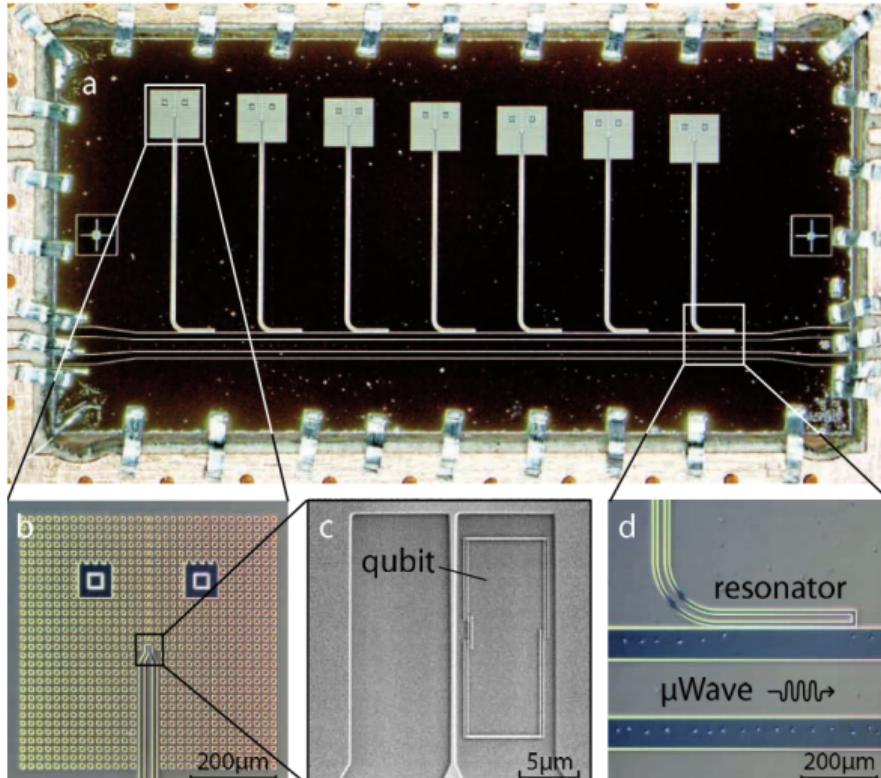
- Гамильтониан Раби
- О приближениях
- Уровни энергии и спектр
- Квазипересечение
- Основное уравнение и теория отклика

2 Экспериментальные методы

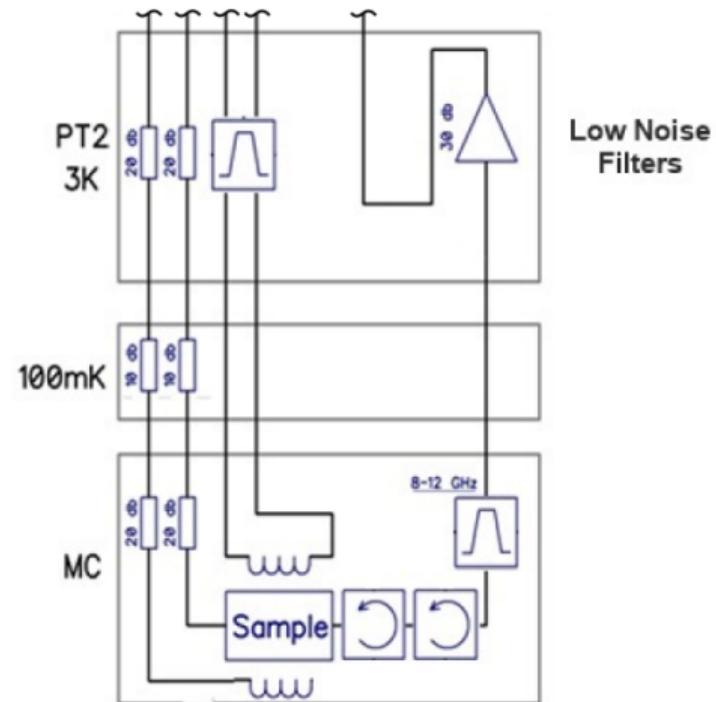
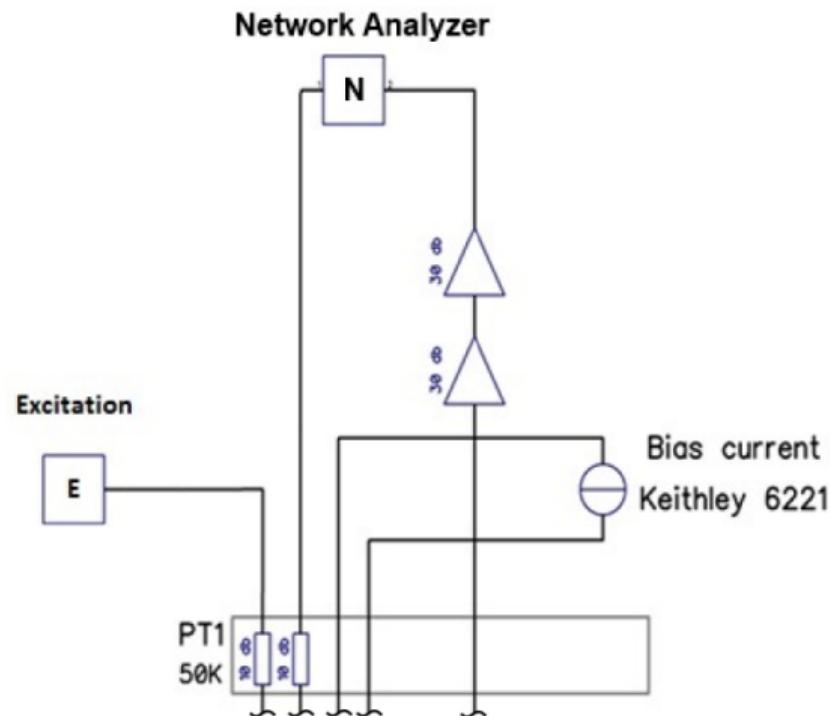
- Образец
- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

3 Экспериментальные результаты

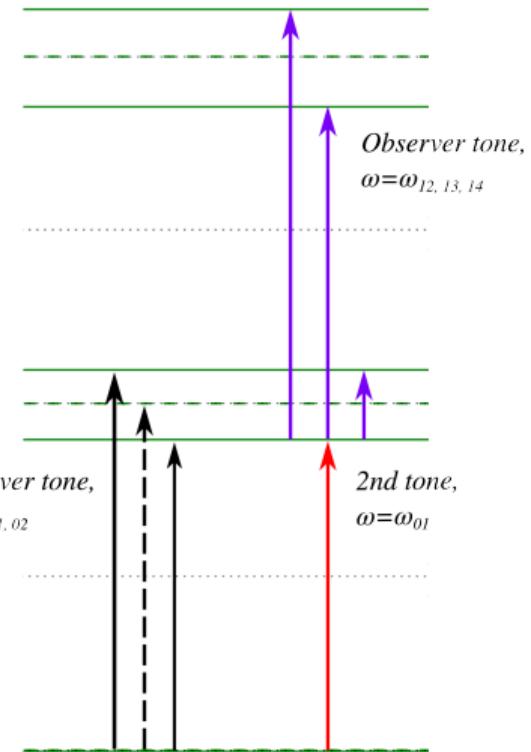
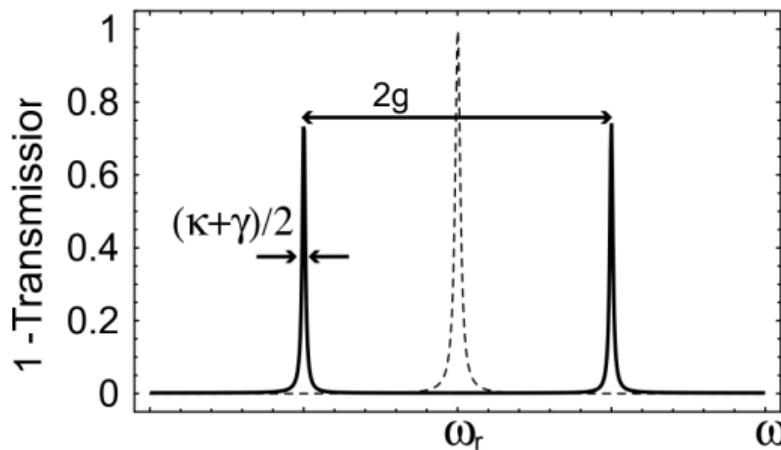
- Спектры
- Квазипересечение (пятый кубит)
- Дополнение – первый отечественный кубит



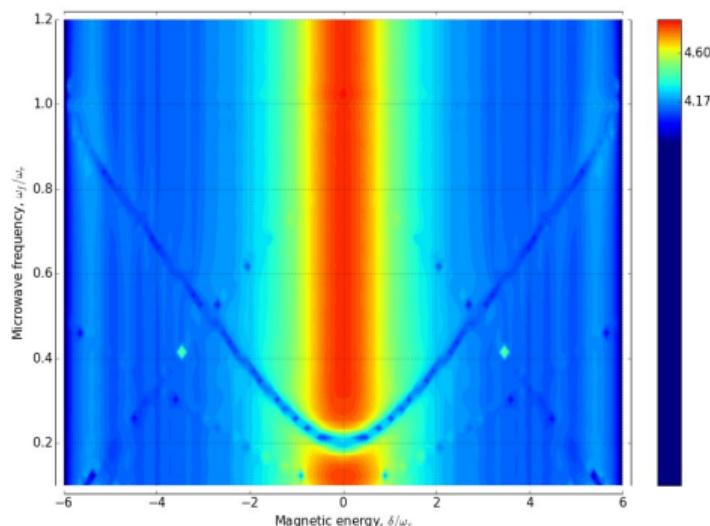
Взаимодействие с образцом внутри криостата:



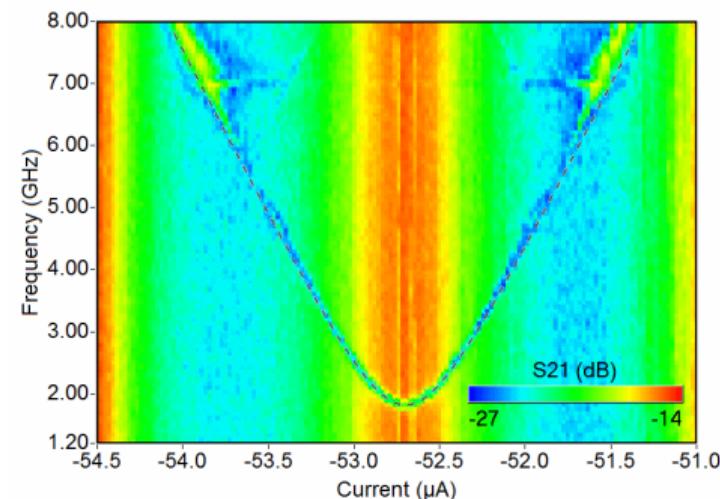
В эксперименте фактически наблюдаются сдвиги или расщепления частот поглощения:



Теория:



Эксперимент:



1 Теоретические сведения

- Гамильтониан Раби
- О приближениях
- Уровни энергии и спектр
- Квазипересечение
- Основное уравнение и теория отклика

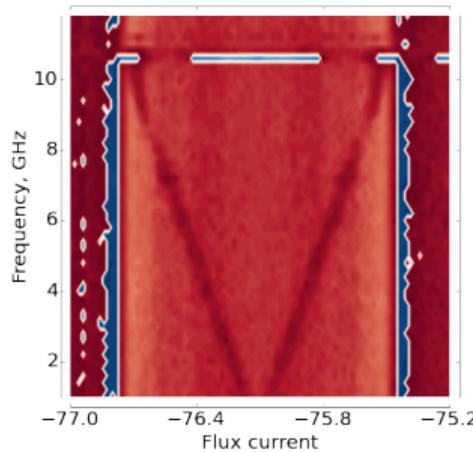
2 Экспериментальные методы

- Образец
- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

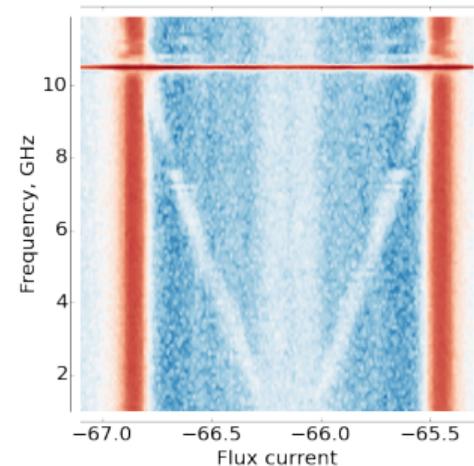
3 Экспериментальные результаты

- Спектры
- Квазипересечение (пятый кубит)
- Дополнение – первый отечественный кубит

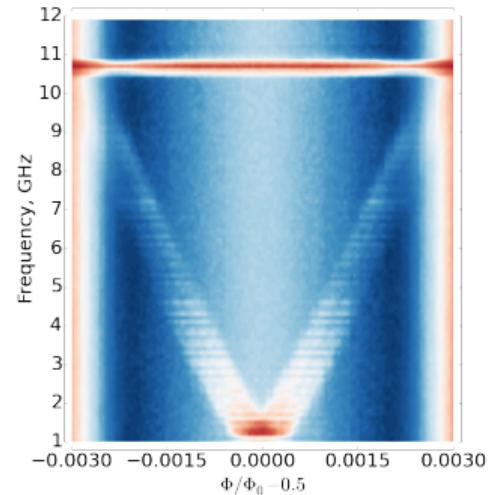
Второй резонатор



Третий резонатор



Пятый резонатор

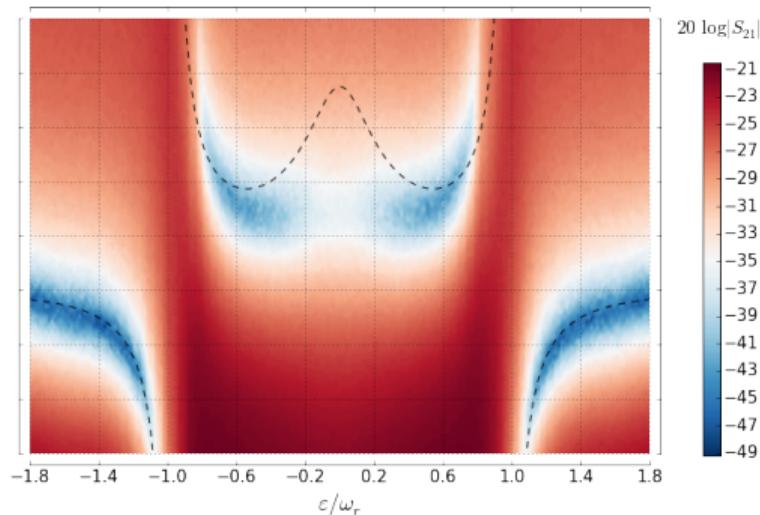
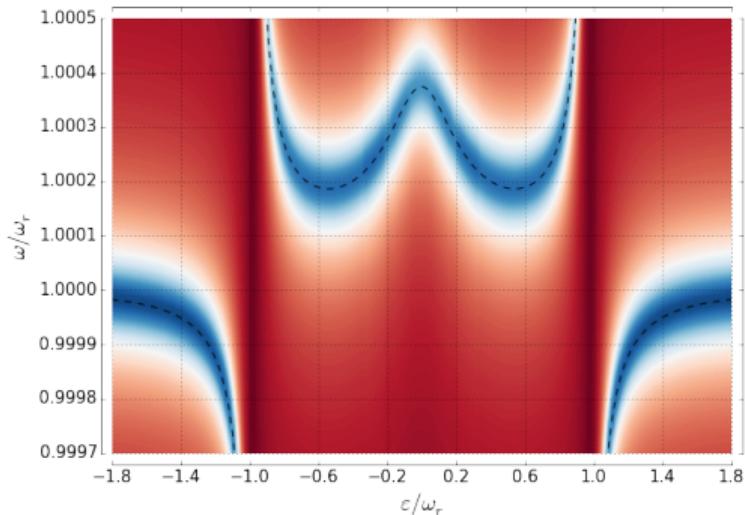


Гиперболическая зависимость от $\varepsilon \propto \Phi - \Phi_0/2$:

$$\hbar\omega_q = \sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^2}$$

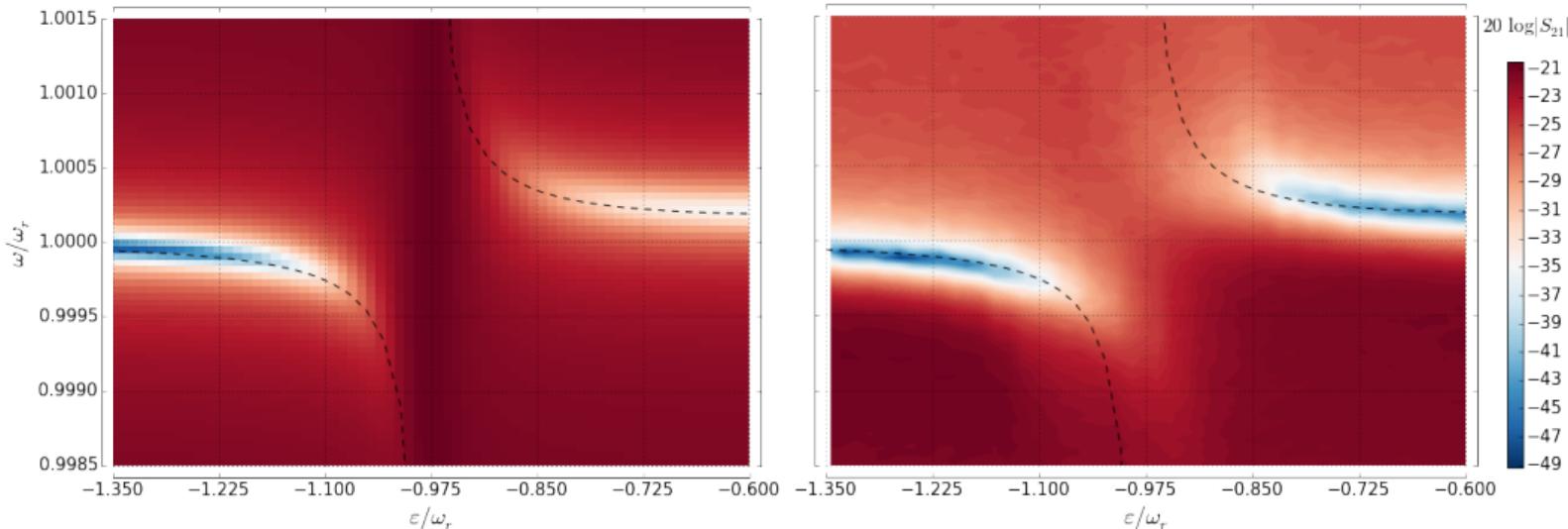
Квазипересечение (пятый кубит)

Экспериментальные результаты



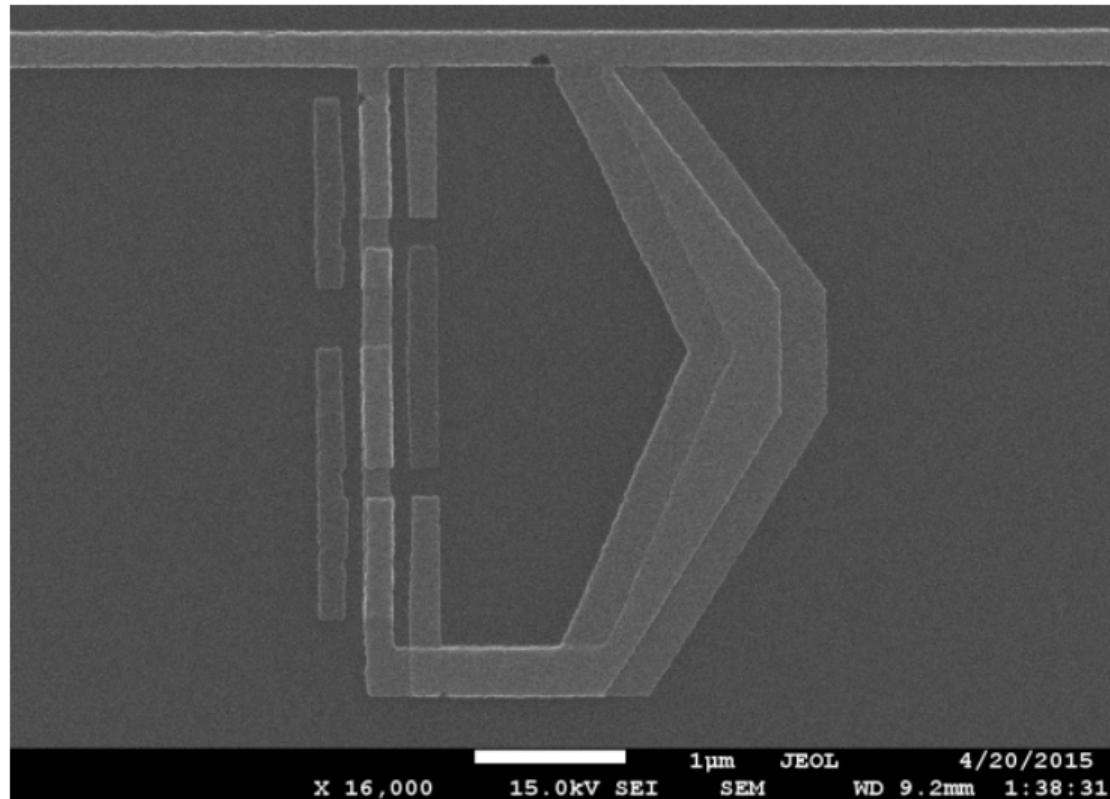
Квазипересечение (пятый кубит)

Экспериментальные результаты



Дополнение – первый отечественный кубит

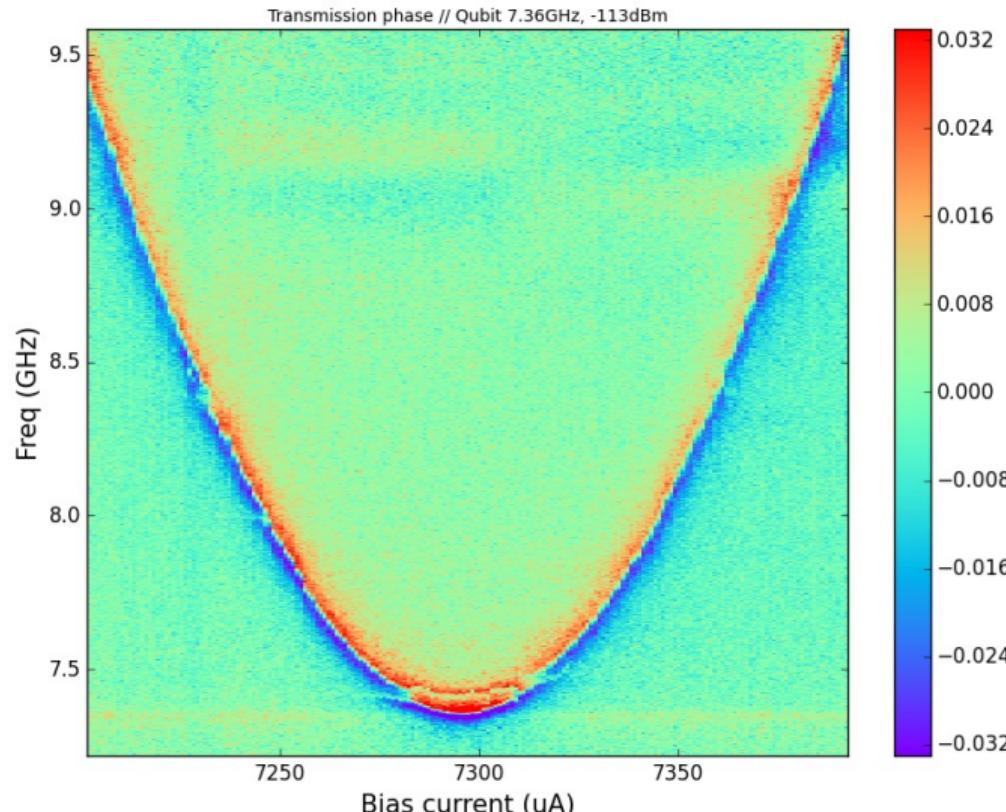
Экспериментальные результаты



X 16,000 15.0kV SEI 1µm JEOL 4/20/2015
SEM WD 9.2mm 1:38:31

Дополнение – первый отечественный кубит

Экспериментальные результаты



Теория Г.-Л. и уравнения Джозефсона:

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

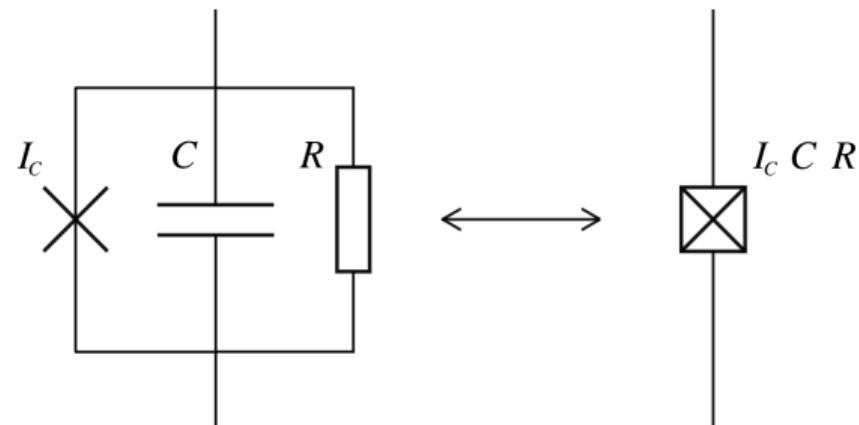
$$I_s = I_c \sin \varphi, \quad \hbar \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 2eV$$

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

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

Разность фаз на берегах контакта:

$$\Delta\theta = \varphi$$



RSCJ-модель

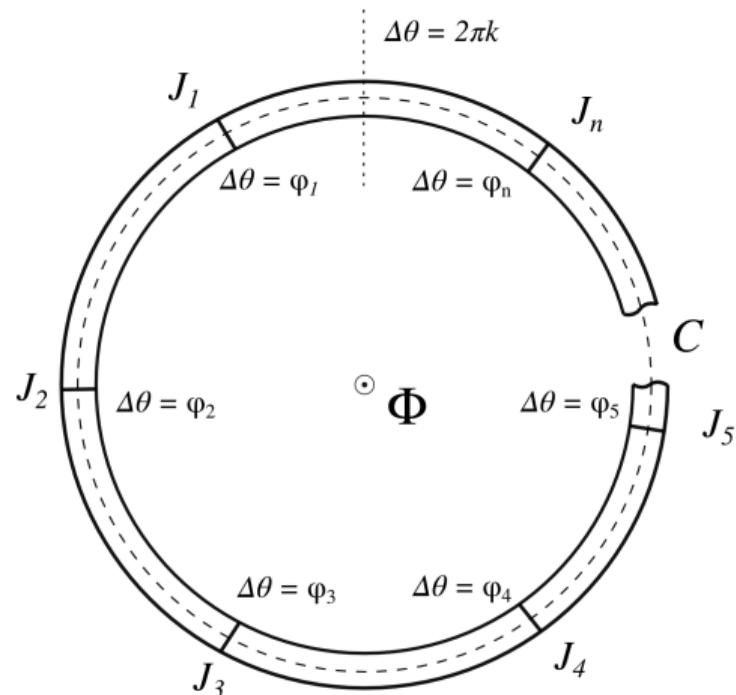
Квантование магнитного потока:

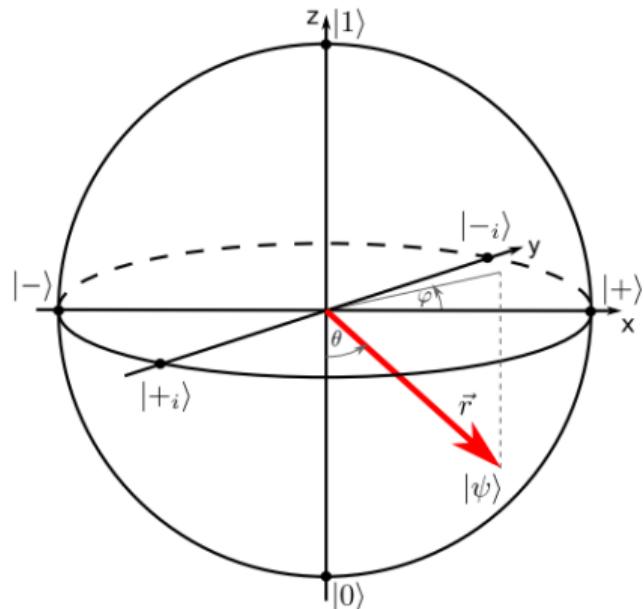
$$\Psi(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{n_s}{2}} e^{i\theta(\mathbf{r})}$$

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

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

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





Сфера Блоха

Состояние классического бита:

0 или 1

Состояние квантового бита:

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

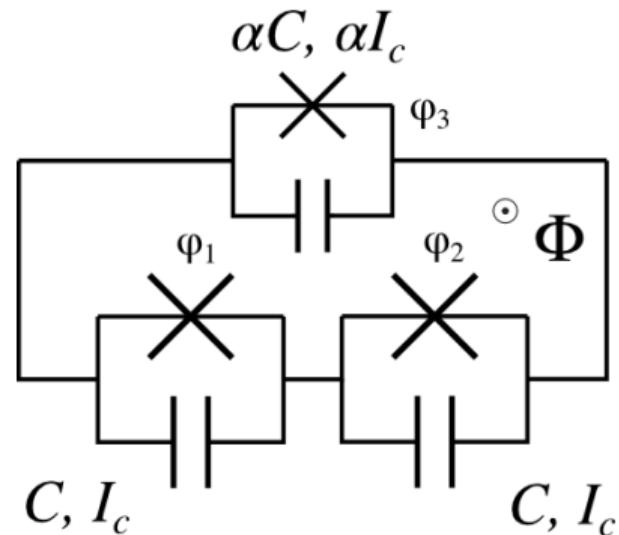
Степени свободы:

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

Энергия одного перехода:

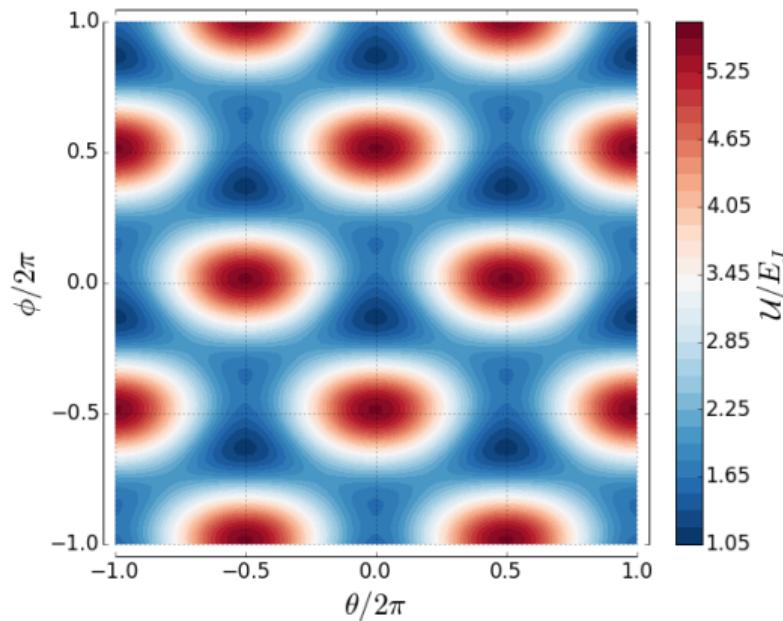
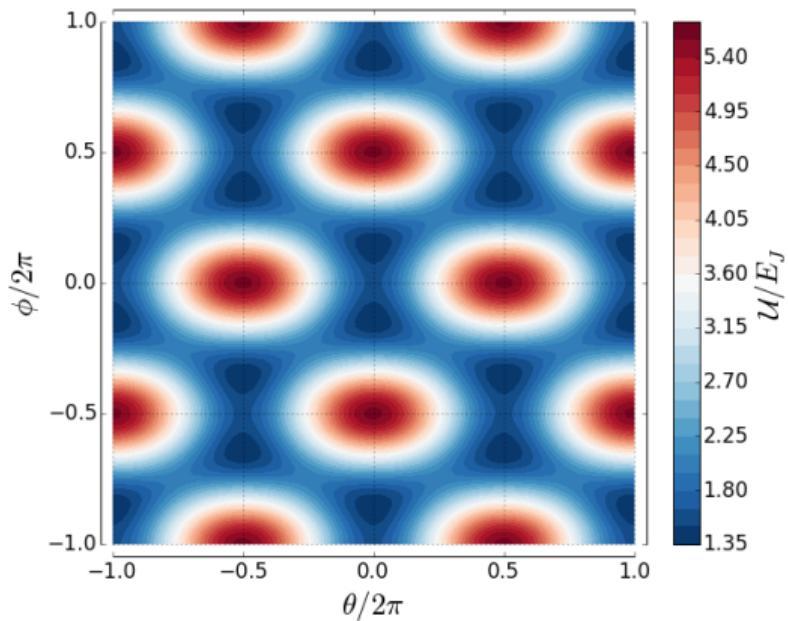
$$E_i = E_J(1 - \cos \varphi_i) + \frac{\hbar^2}{4E_C} \dot{\varphi}_i^2,$$

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



Теория изолированного Flux-кубита

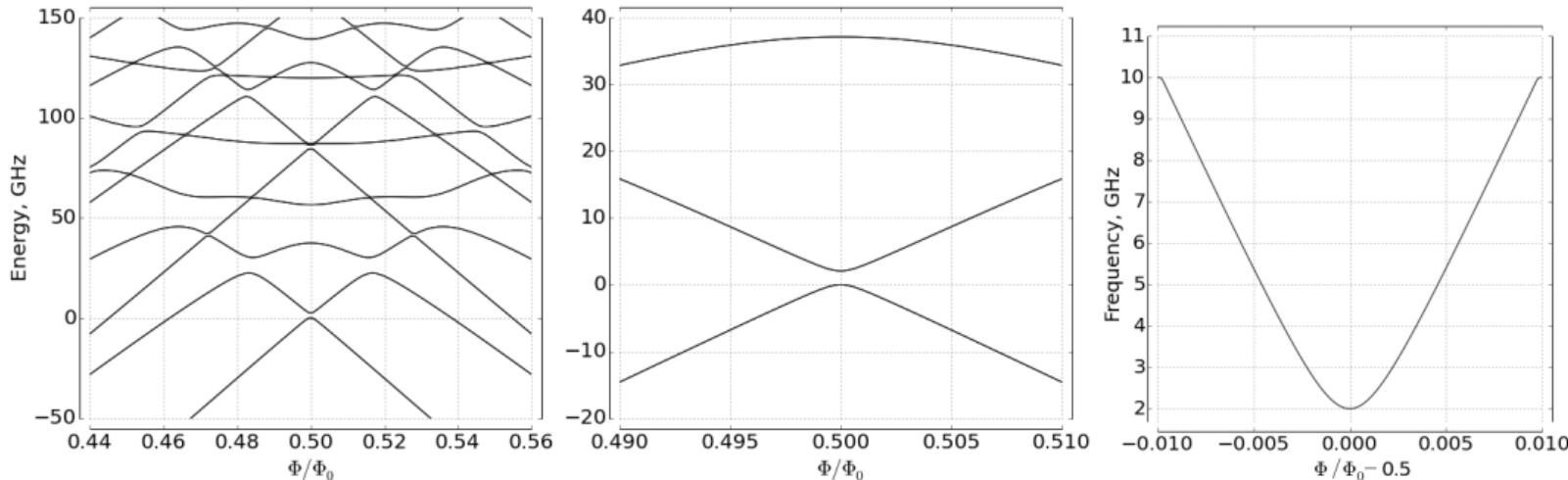
Вспомогательные материалы



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

Энергетический спектр Flux-кубита

Вспомогательные материалы



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

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