

Исследование сверхпроводящих потоковых кубитов

Федоров Г. П. Группа 125. Научный руководитель: Рязанов В.В.
24 июня 2015 г.



1 Теоретические сведения

- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором
- Уровни энергии и спектр

2 Экспериментальные методы

- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

3 Результаты

- Двухтоновые спектры малой мощности
- Двухтоновая спектроскопия большой мощности
- Квазипересечения спектров (пятый кубит)
- Нелинейные эффекты

4 Заключение

1 Теоретические сведения

- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором
- Уровни энергии и спектр

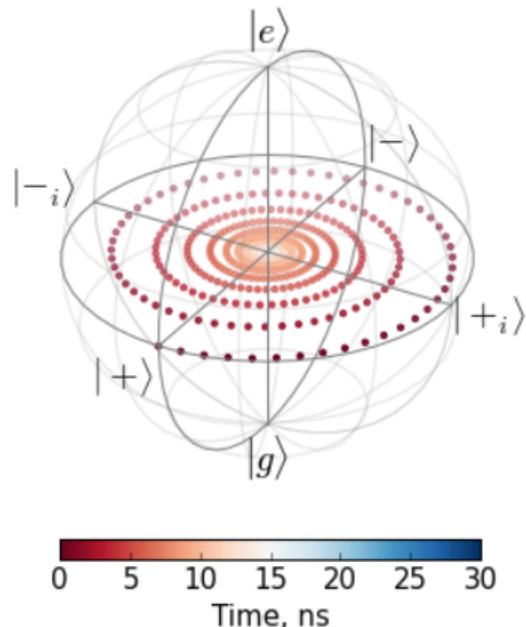
2 Экспериментальные методы

- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

3 Результаты

- Двухтоновые спектры малой мощности
- Двухтоновая спектроскопия большой мощности
- Квазипересечения спектров (пятый кубит)
- Нелинейные эффекты

4 Заключение



Процесс дефазировки, изображенный на сфере Блоха

Состояние классического бита:

0 или 1

Состояние квантового бита:

$$\hat{\rho} = \frac{1}{2}(\hat{1} + a\hat{\sigma}_x + b\hat{\sigma}_y + c\hat{\sigma}_z), \quad a, b, c \in \mathbb{R},$$

$$a^2 + b^2 + c^2 \in [0, 1]$$

$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$ – вектор внутри единичного шара

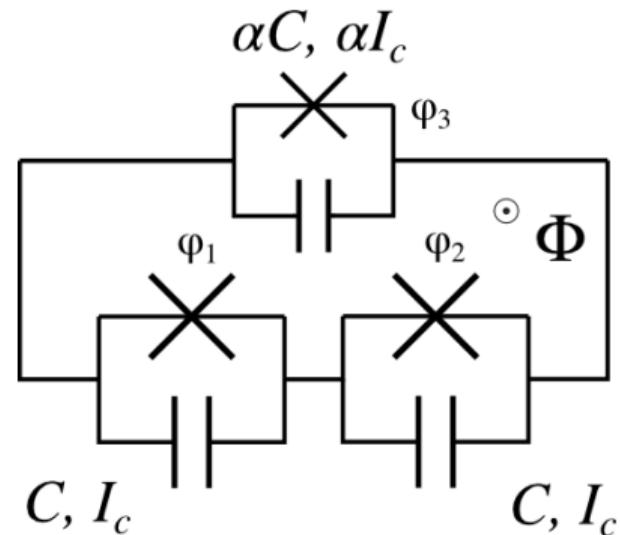
Степени свободы:

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

Энергия одного перехода:

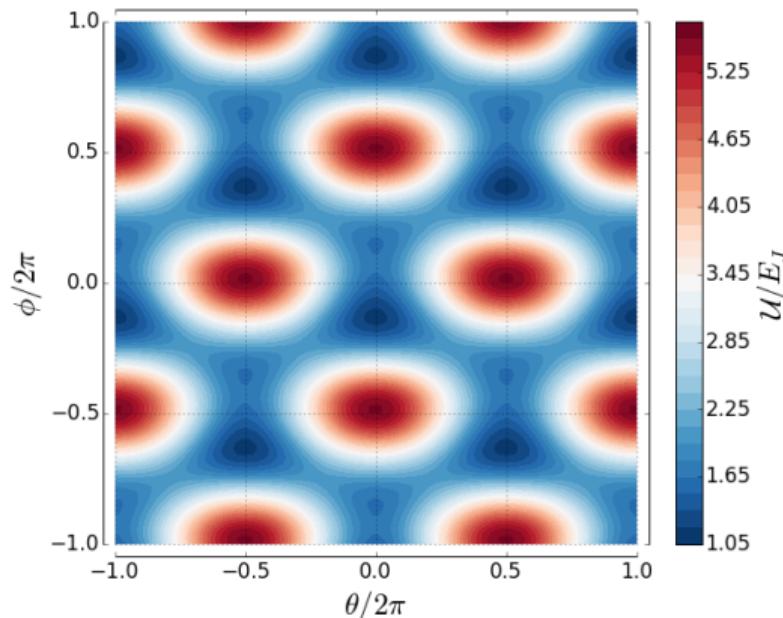
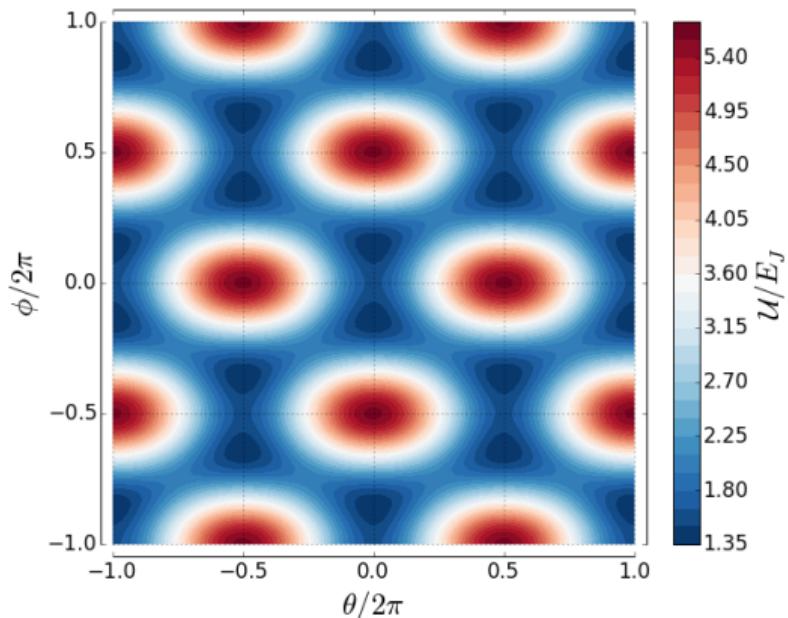
$$E_i = E_J(1 - \cos \varphi_i) + \frac{\hbar^2}{4E_C} \dot{\varphi}_i^2,$$

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



Теория изолированного Flux-кубита

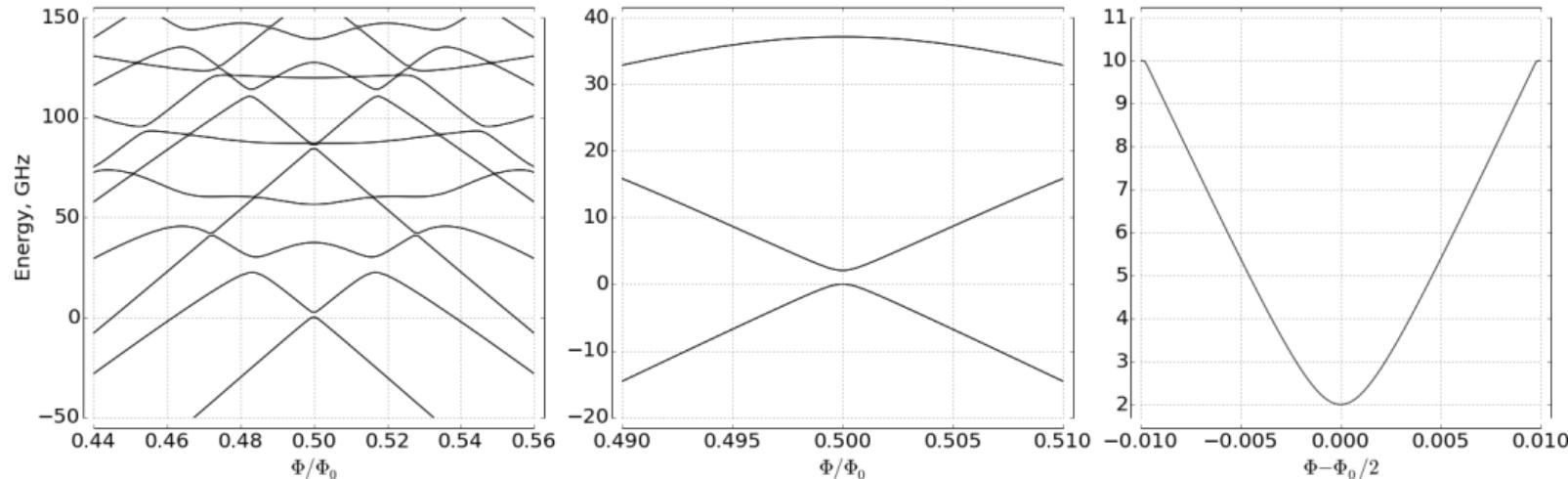
Теоретические сведения



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

Теория изолированного Flux-кубита

Теоретические сведения

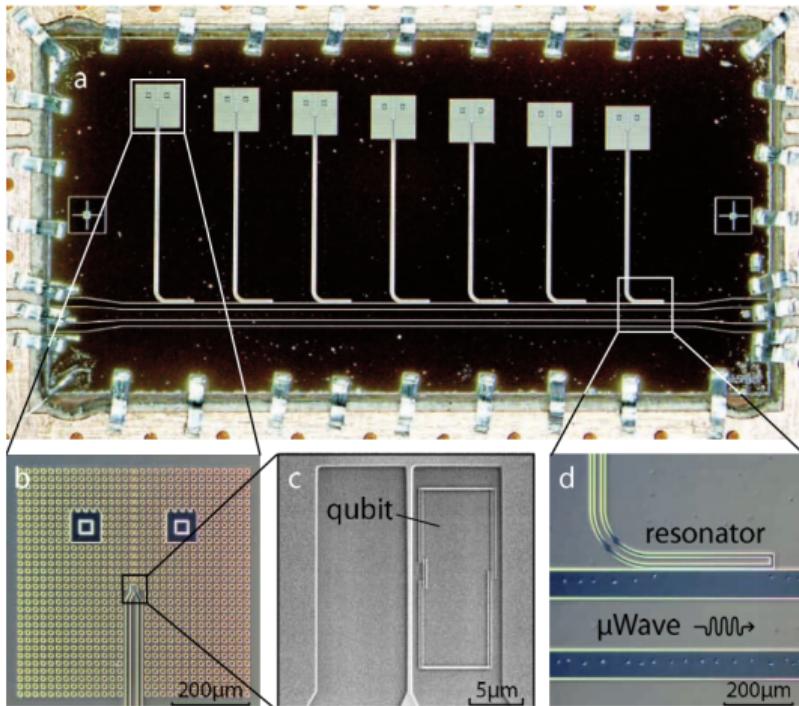


$$\hat{\mathcal{H}} = \frac{\hbar\Delta}{2} \hat{\sigma}_z + \frac{\hbar\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_x, \quad E_1 - E_0 = \hbar\sqrt{\Delta^2 + \varepsilon^2} - \text{гипербола по } \delta$$

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

Кубит, связанный с резонатором

Теоретические сведения



Ситуация при $\Phi = \Phi_0/2$:

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

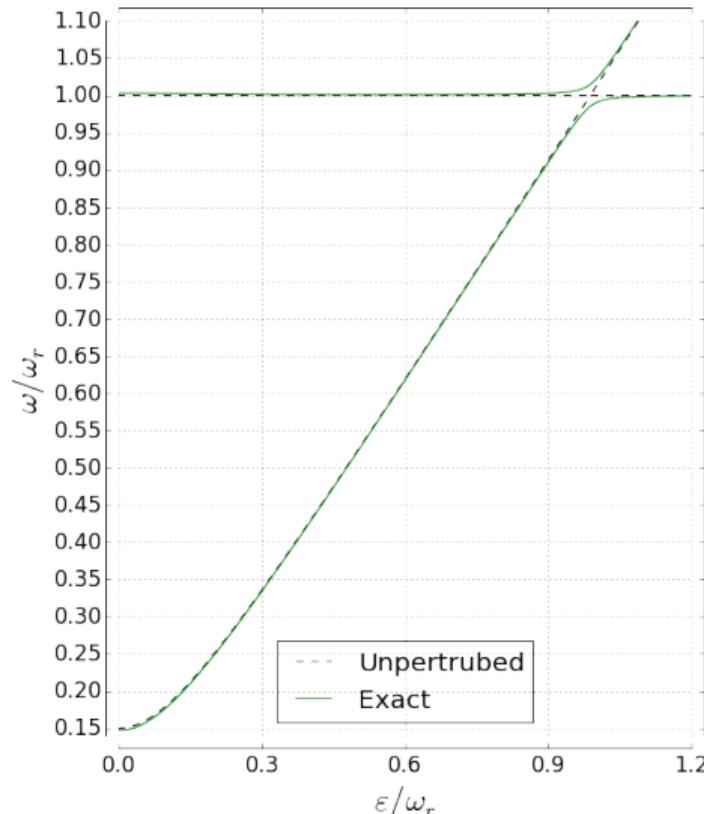
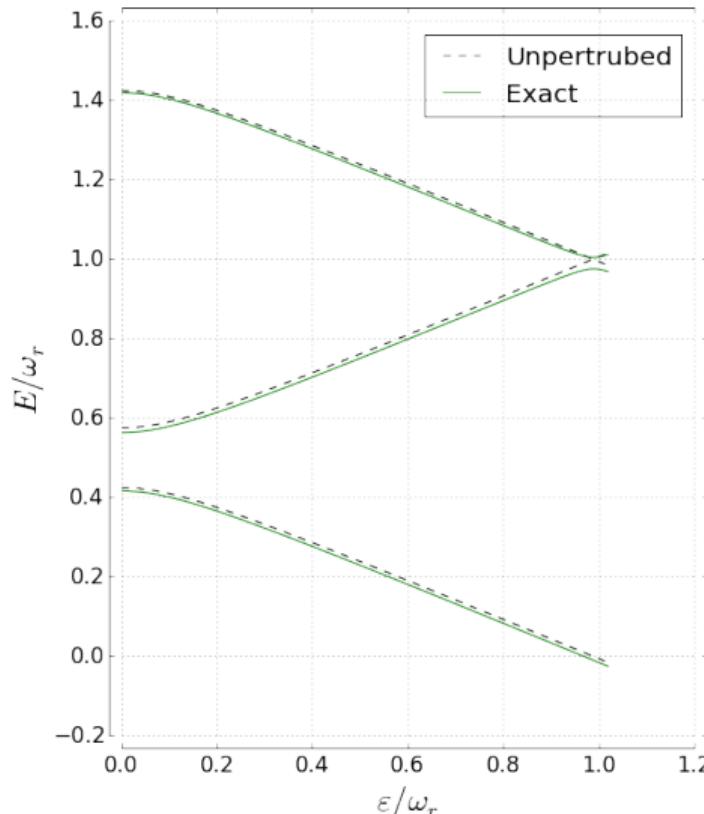
$$\hat{\mathcal{H}}_q = \frac{\varepsilon}{2} \hat{\sigma}_z = \frac{\hbar\omega_q}{2} \hat{\sigma}_z,$$

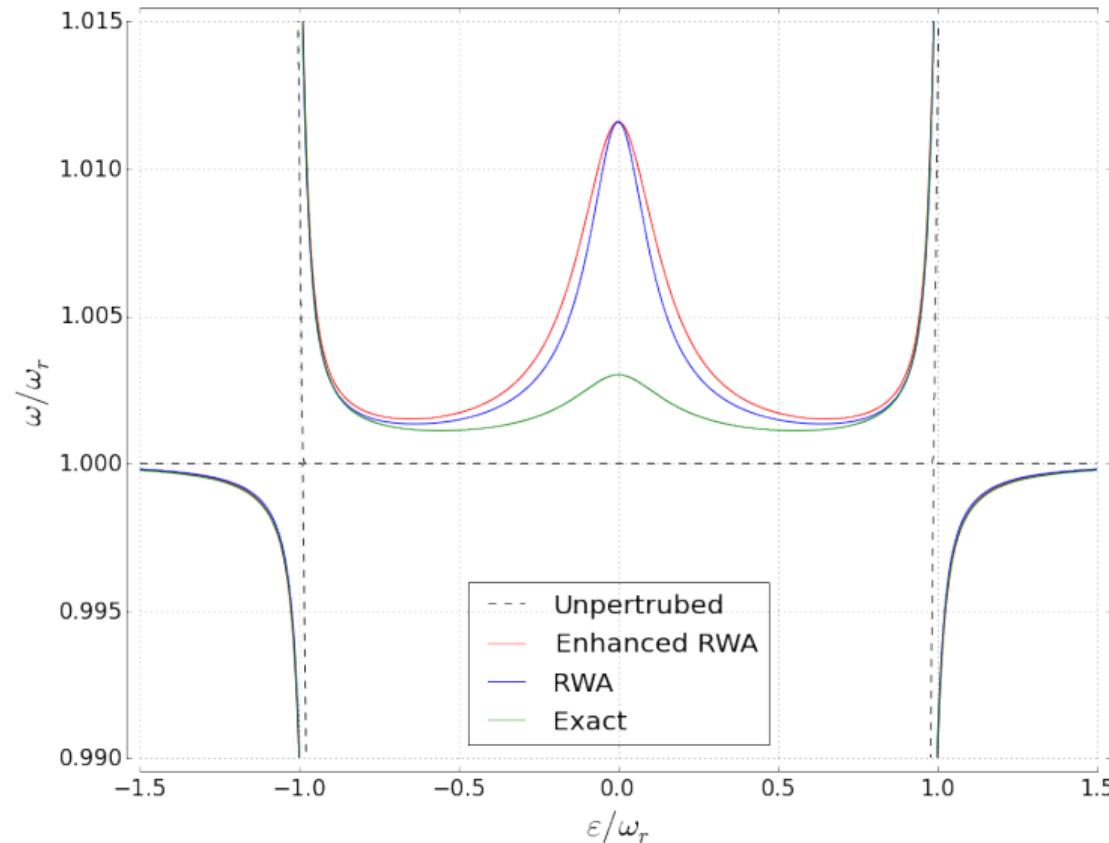
$$\hat{\mathcal{H}}_r = \hbar\omega_r \hat{a}^\dagger \hat{a},$$

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

– первый порядок

Две модели: Раби (без приближений) и Джейнса-Каммингса (приближенная)





1 Теоретические сведения

- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором
- Уровни энергии и спектр

2 Экспериментальные методы

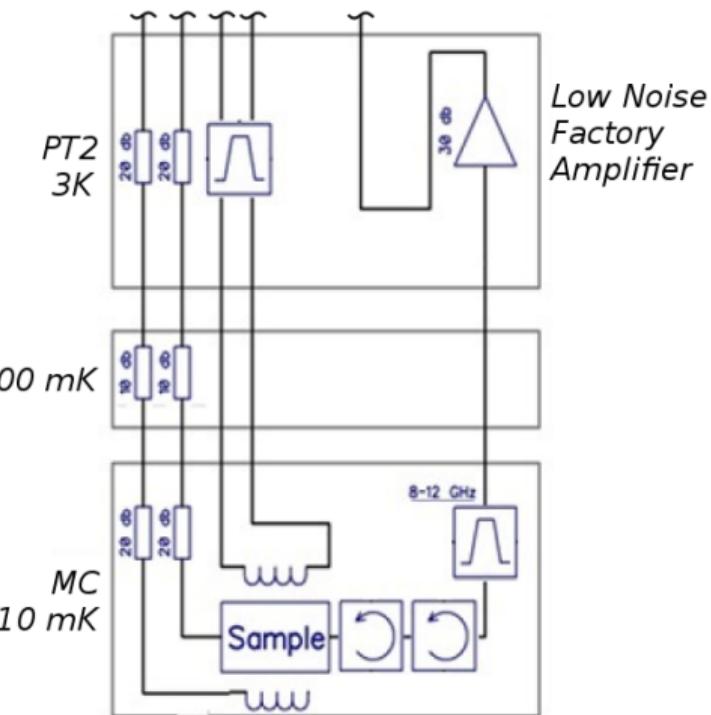
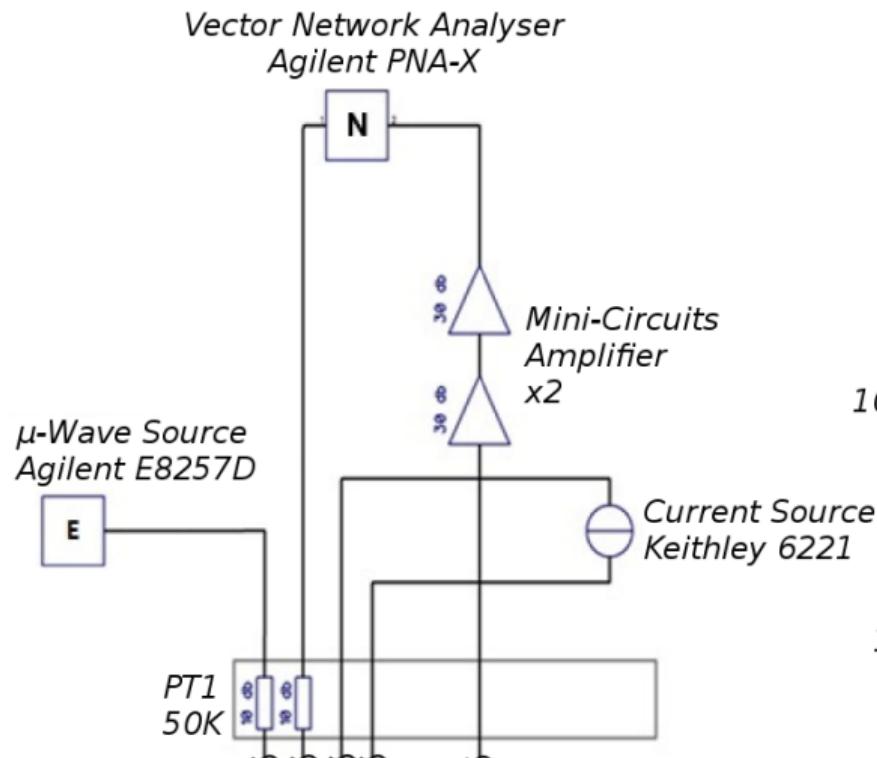
- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

3 Результаты

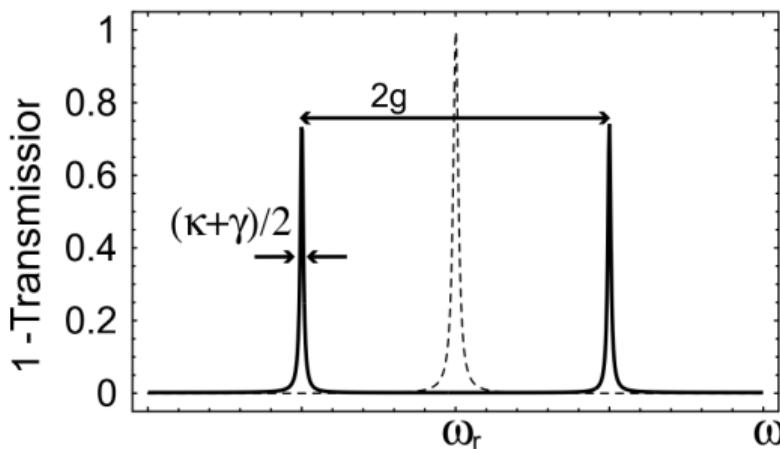
- Двухтоновые спектры малой мощности
- Двухтоновая спектроскопия большой мощности
- Квазипересечения спектров (пятый кубит)
- Нелинейные эффекты

4 Заключение

Взаимодействие с образцом внутри криостата:

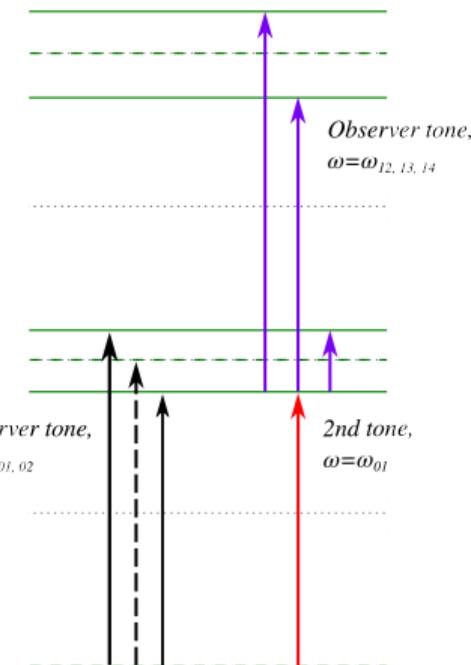


В эксперименте наблюдаются сдвиги или расщепления частот поглощения:

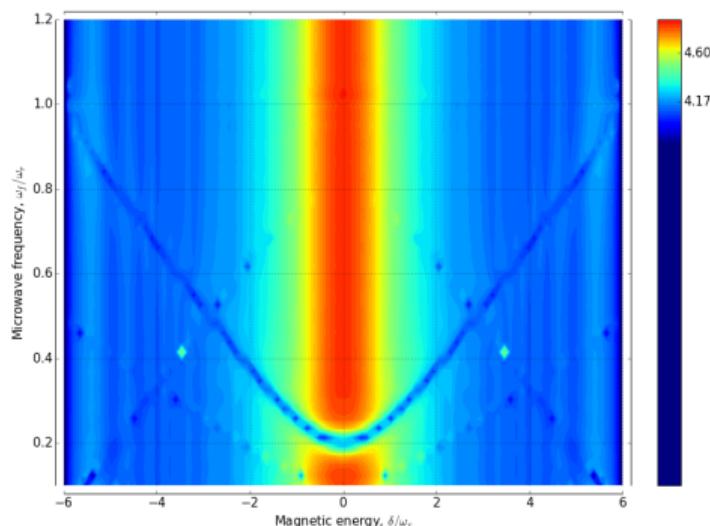


Черные стрелки соответствуют линиям на графике пропускания

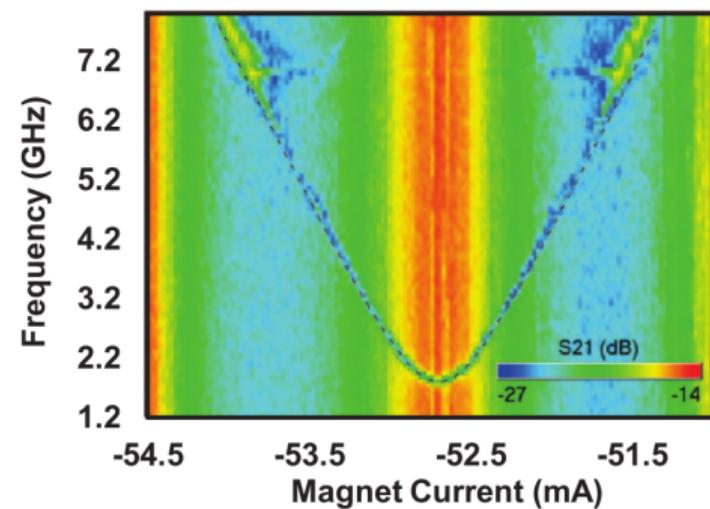
Иллюстрация однотоновой и двухтоновой спектроскопий:



Теория:



Эксперимент:



1 Теоретические сведения

- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором
- Уровни энергии и спектр

2 Экспериментальные методы

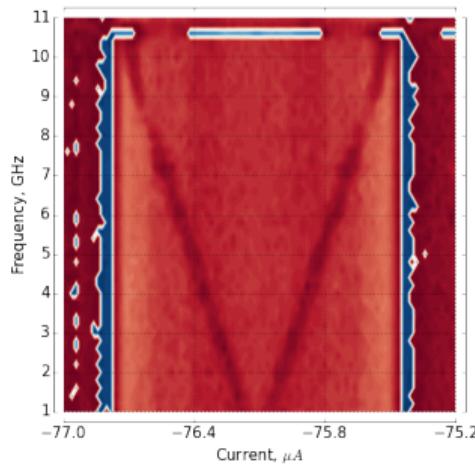
- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

3 Результаты

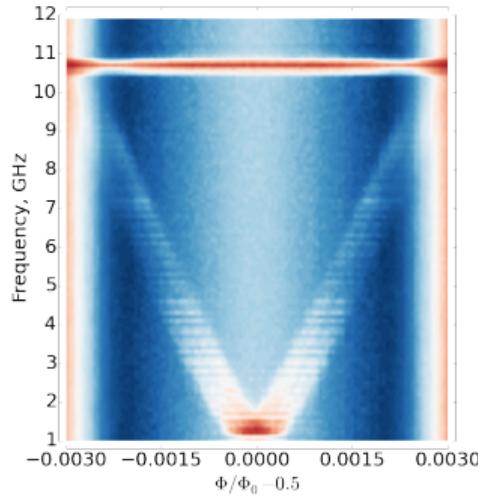
- Двухтоновые спектры малой мощности
- Двухтоновая спектроскопия большой мощности
- Квазипересечения спектров (пятый кубит)
- Нелинейные эффекты

4 Заключение

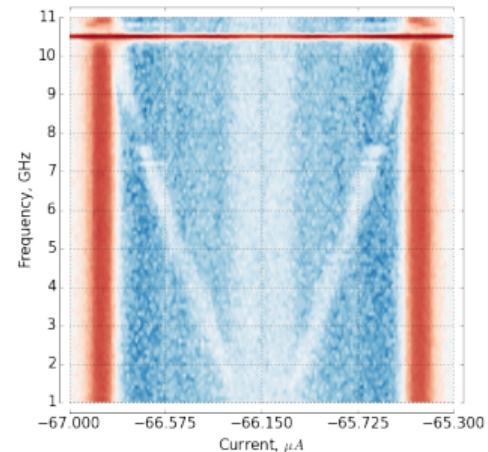
Второй резонатор/кубит



Пятый резонатор/кубит



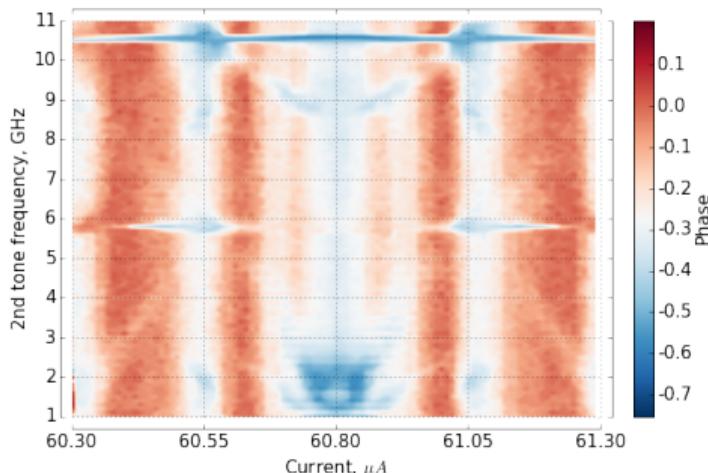
Пятый резонатор/кубит



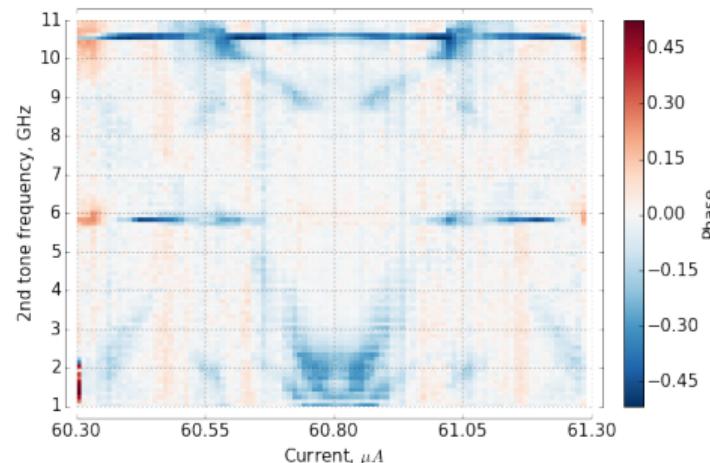
Гиперболическая зависимость от $\varepsilon \propto \Phi - \Phi_0/2$:

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

Без вычитания фона:



Без фона:

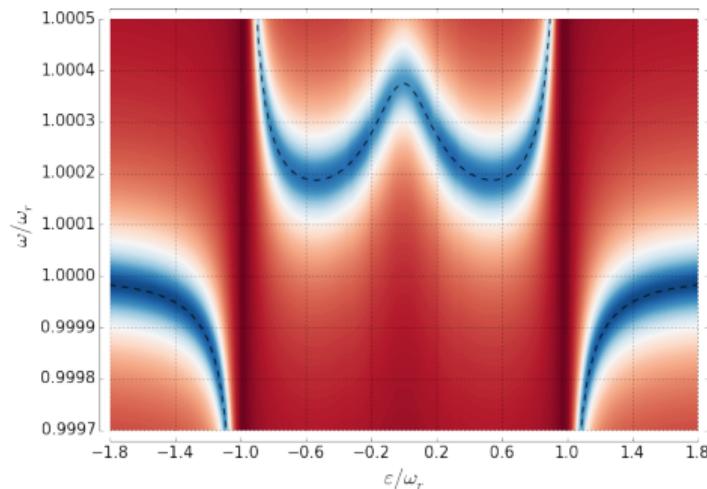


Обнаруживаются переходы:

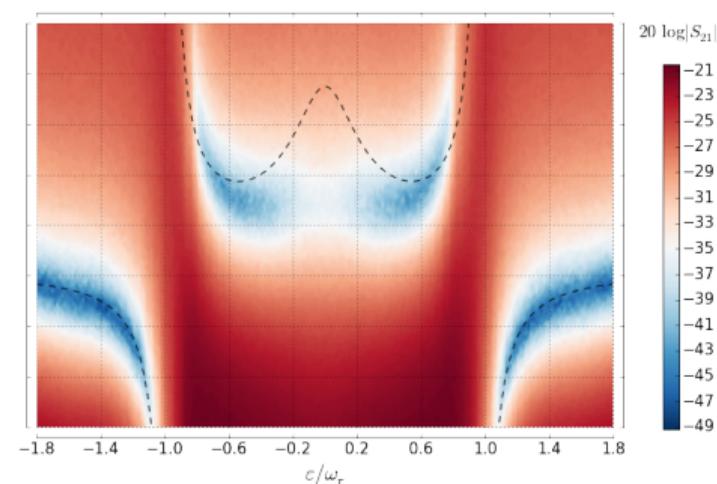
- $|0, 0, g\rangle \rightarrow |0, 0, e\rangle$ – одно- и двухфотонный
- $|0, 0, e\rangle \rightarrow |1, 0, g\rangle$ – однофотонный
- $|0, 0, g\rangle \rightarrow |1, 1, e\rangle$ – двухфотонный

Спектры переходов $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ и $|0\rangle \rightarrow |2\rangle$:

Теория:



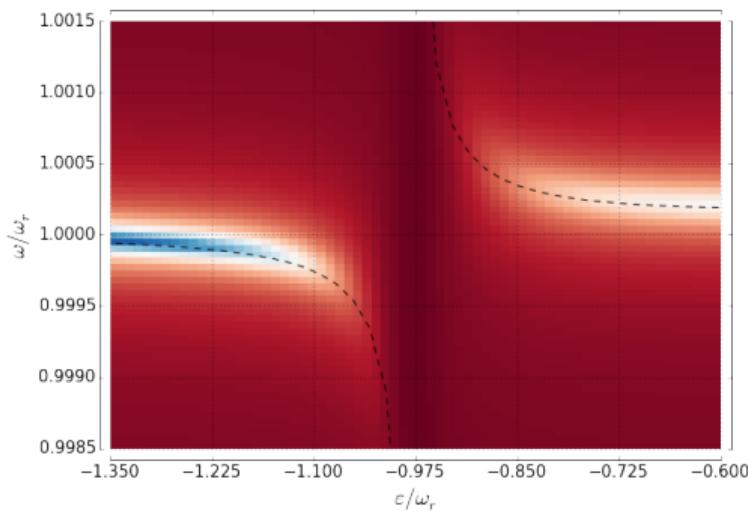
Эксперимент:



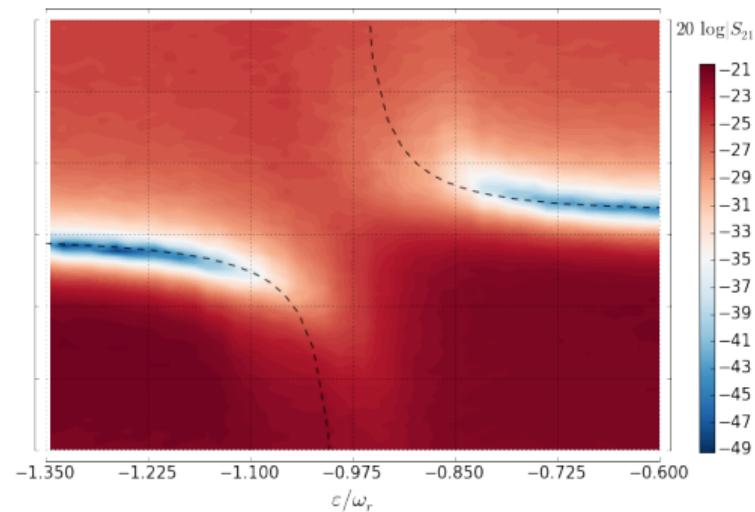
Поведение исследованного образца отличается от смоделированного поведения модели Раби в верхней ветви ($|0\rangle \rightarrow |2\rangle$).

Увеличенный снимок левого квазипересечения:

Теория:



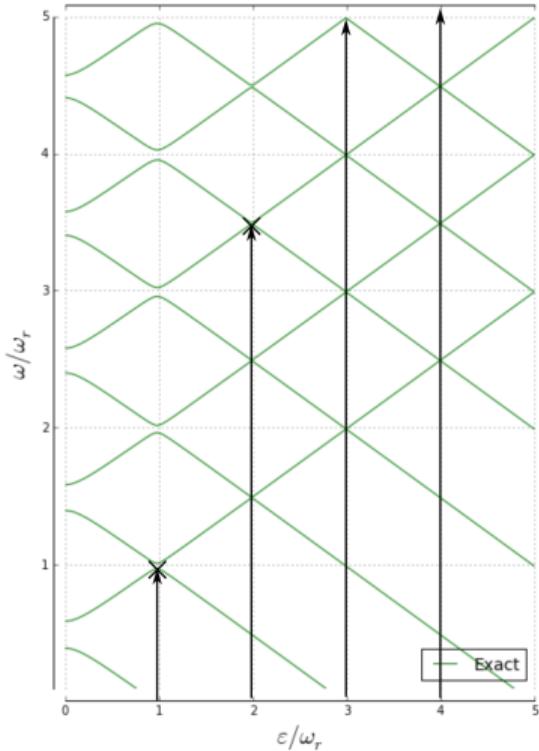
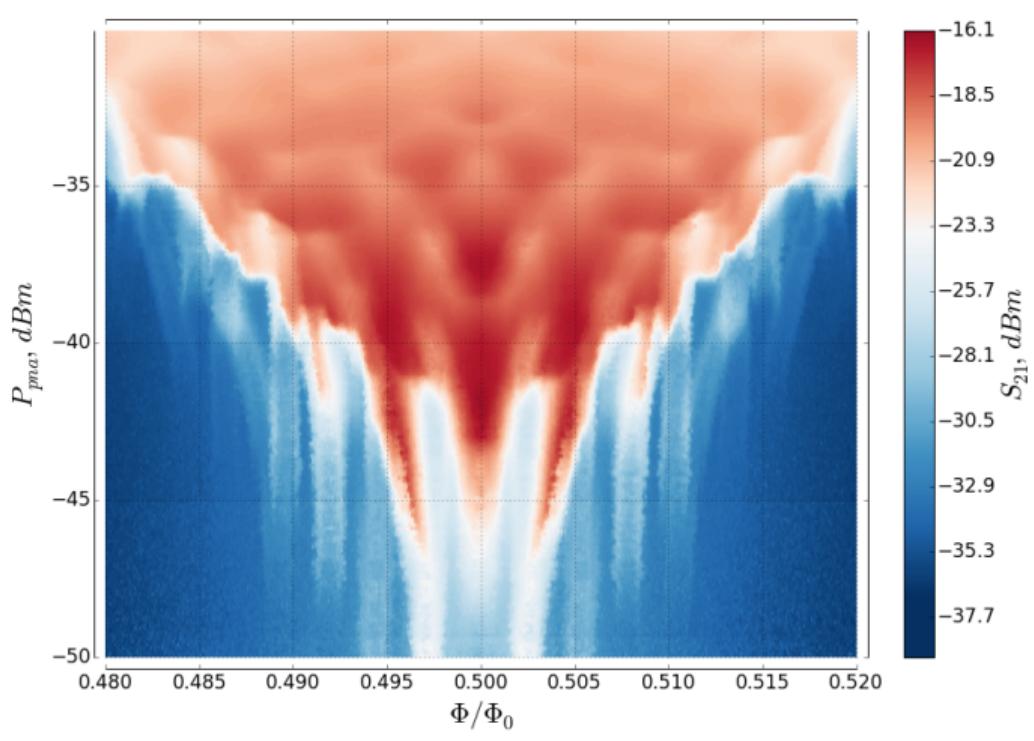
Эксперимент:



Моделирование показывает, что ненаблюдаемость квазипересечения связана с малым времени жизни кубита

Нелинейные эффекты

Результаты



1 Теоретические сведения

- Квантовые биты
- Теория изолированного Flux-кубита
- Кубит, связанный с резонатором
- Уровни энергии и спектр

2 Экспериментальные методы

- Установка
- Техника измерений
- Двухтоновая спектроскопия

3 Результаты

- Двухтоновые спектры малой мощности
- Двухтоновая спектроскопия большой мощности
- Квазипересечения спектров (пятый кубит)
- Нелинейные эффекты

4 Заключение

- 1 Численное моделирование широкого класса эффектов, связанных со стационарным и динамическим поведением исследуемой системы.
- 2 По ширине линий спектров оценены времена жизни кубитов. Изучена структура уровней исследуемой системы кубит-резонатор при проведении двухтоновой спектроскопии высокой мощности.
- 3 Исследованы квазипересечения спектров кубита и резонатора, результаты сравнены с результатами выполненного численного моделирования.
- 4 Проведены наблюдения нелинейных по мощности эффектов в поведении зависимости пропускания на частоте резонатора от тока, эффекты объяснены.

Теория Г.-Л. и уравнения Джозефсона:

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

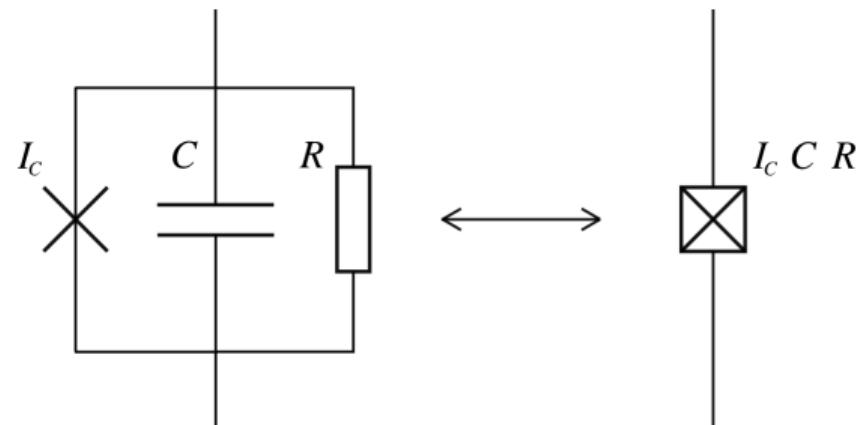
$$I_s = I_c \sin \varphi, \quad \hbar \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 2eV$$

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

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

Разность фаз на берегах контакта:

$$\Delta\theta = \varphi$$



RSCJ-модель

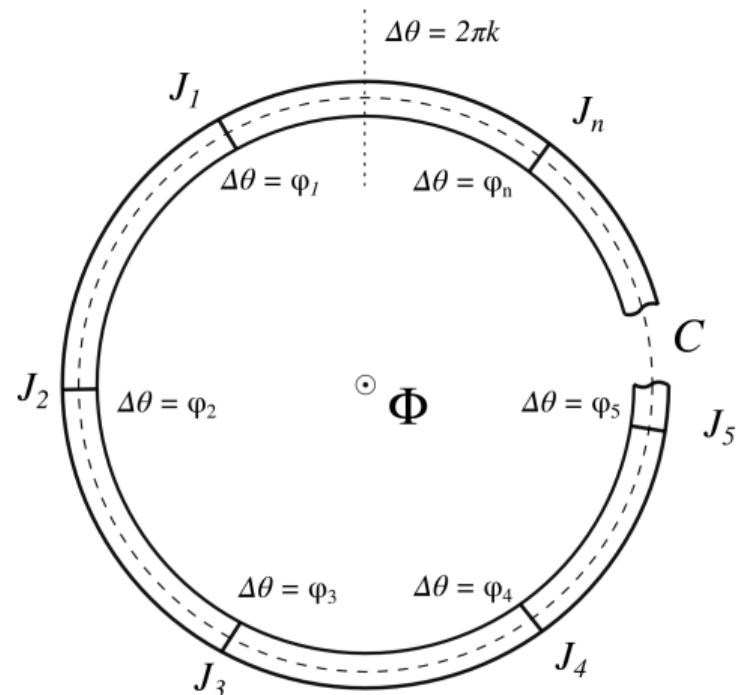
Квантование магнитного потока:

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

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

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

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



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

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 $\hat{\sigma}_z$:

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

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

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

конечная форма:

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

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

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

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

Без приближений:

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

Стандартный RWA:

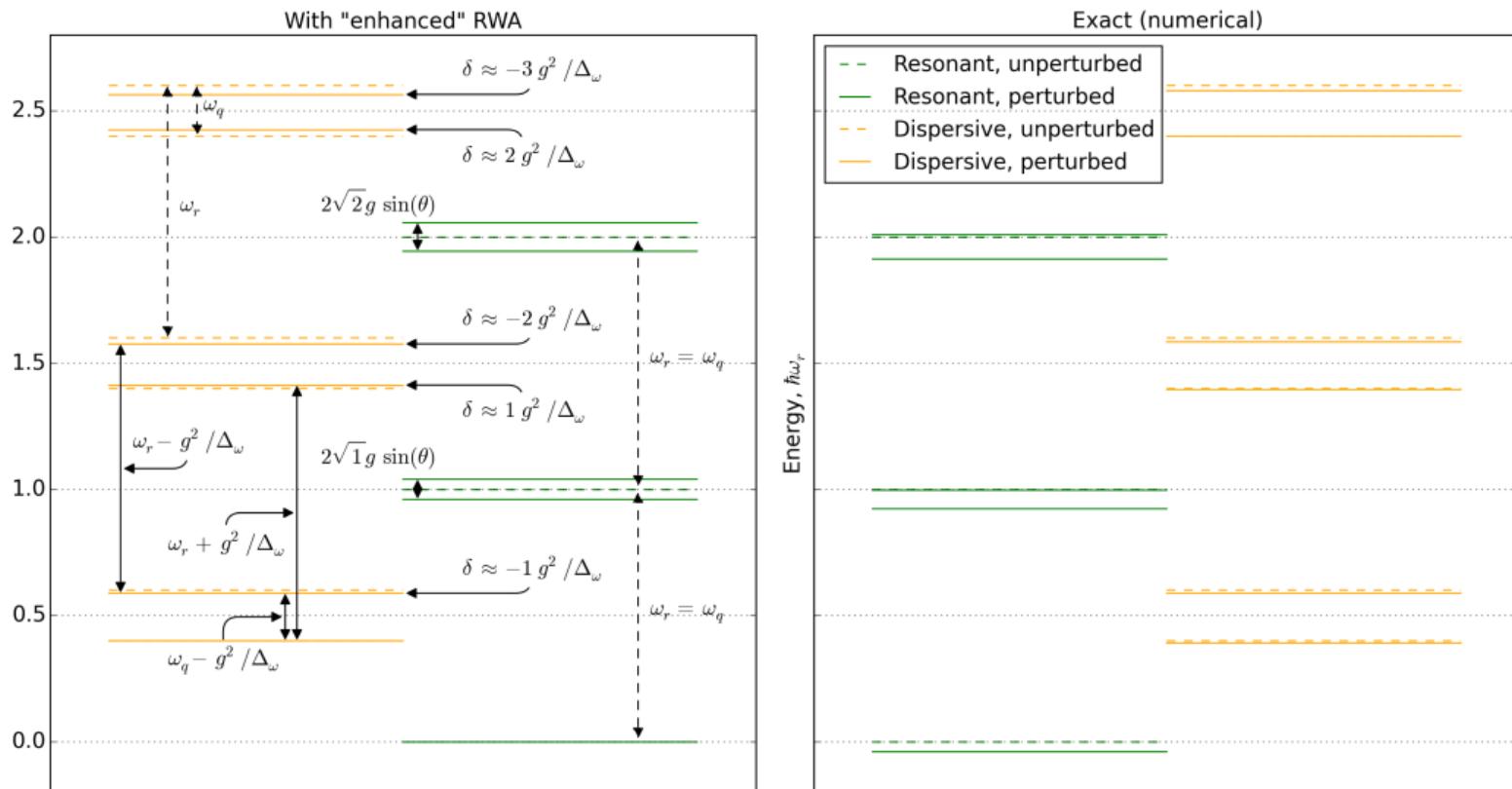
$$\hat{\mathcal{H}}_i = g \sin \theta (\hat{a}^\dagger \otimes \hat{\sigma}^- + \hat{a} \otimes \hat{\sigma}^+) - g \cos \theta (\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \otimes \hat{\sigma}_z$$

Улучшенный RWA:

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

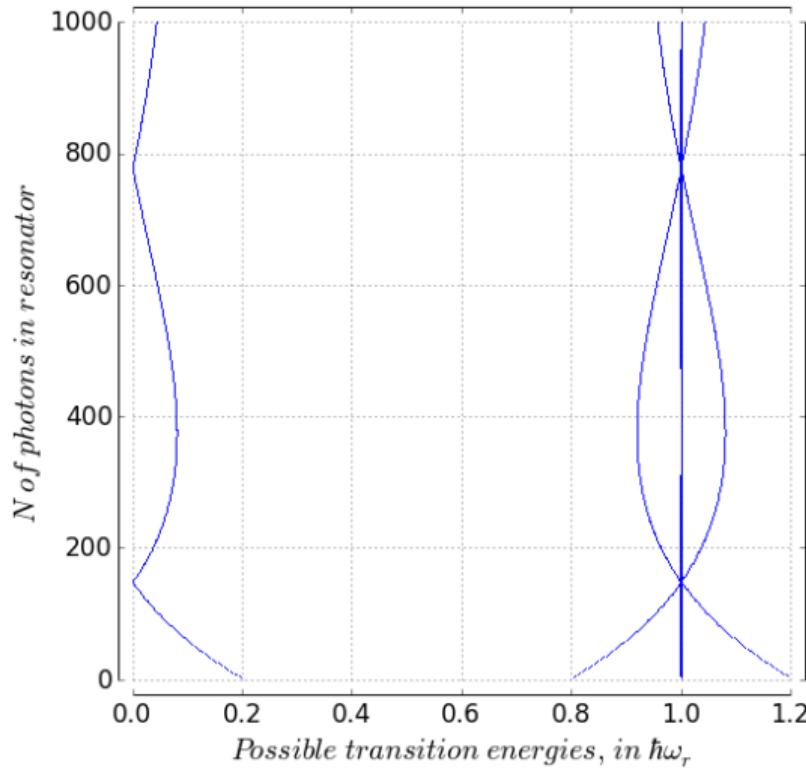
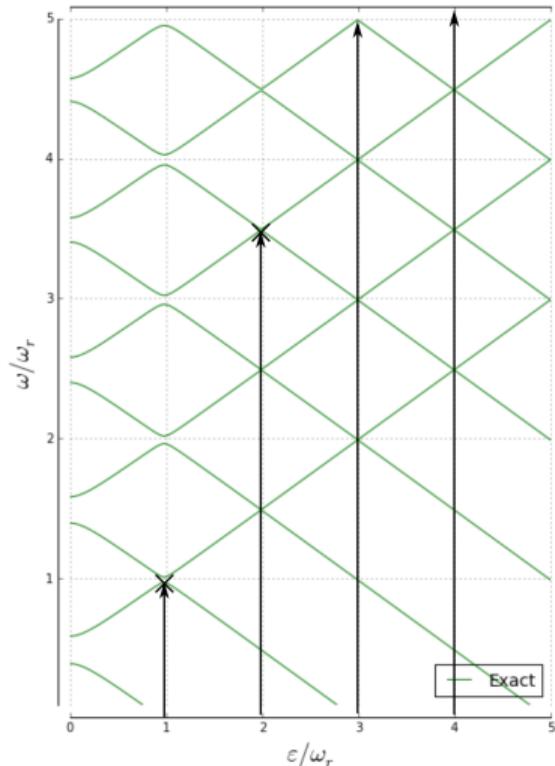
Энергетический спектр модели Раби

Вспомогательные материалы



Энергетический спектр модели Раби

Вспомогательные материалы



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

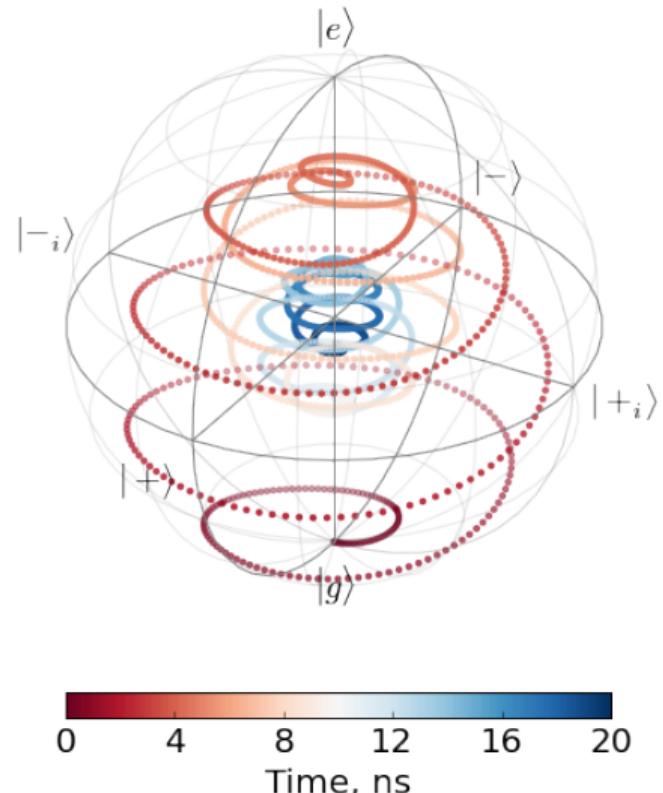
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \hat{\rho}_s = [\hat{\mathcal{H}}_s, \hat{\rho}_s] +$$

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

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

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

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



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

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

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

