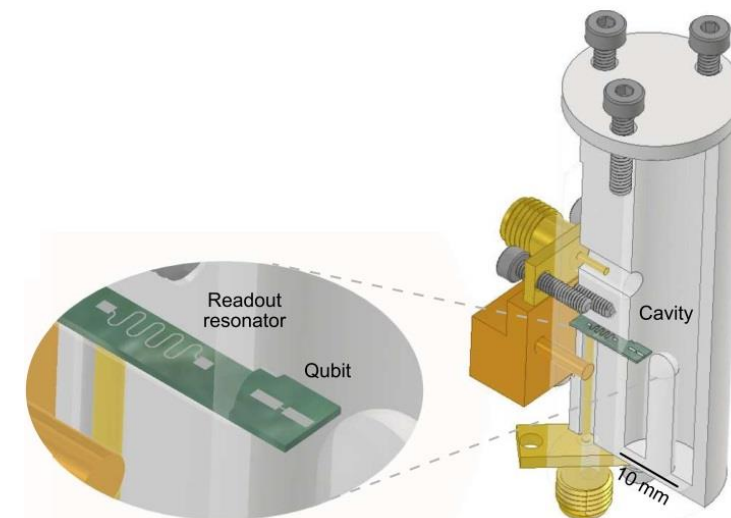
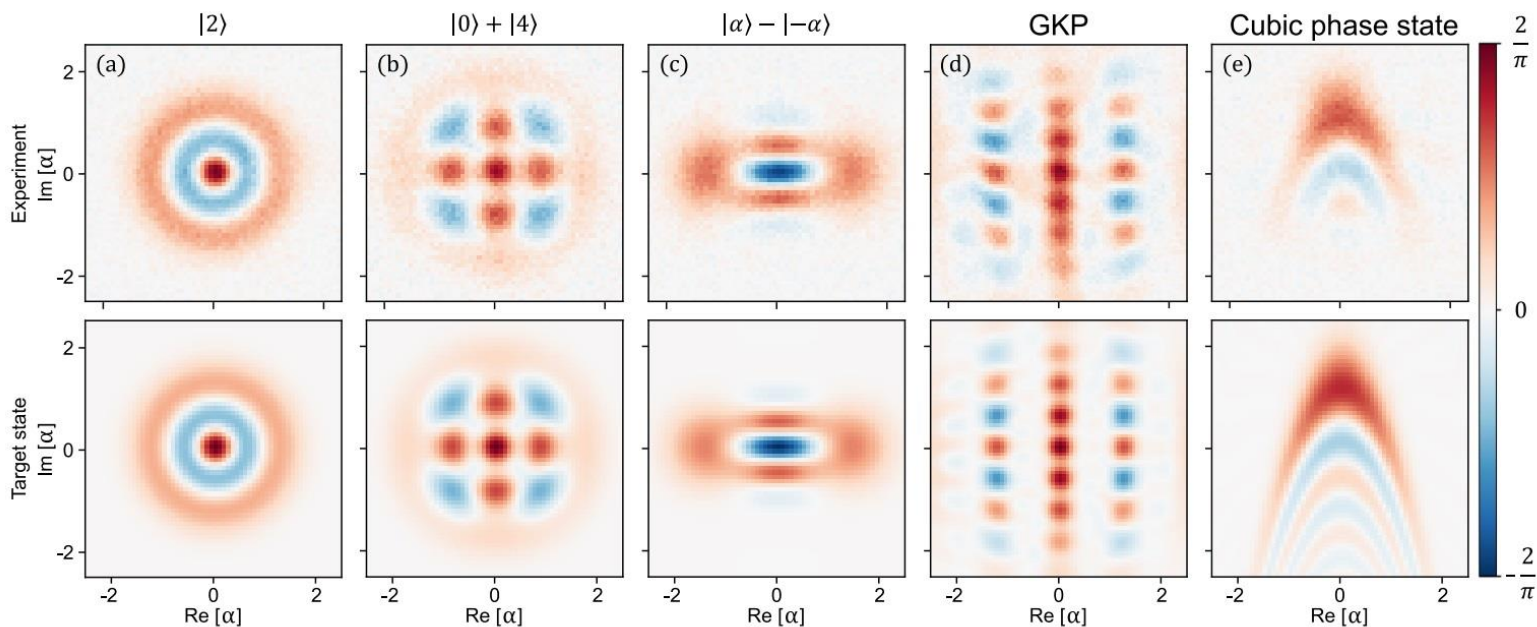


Кубиты на джозефсоновских контактах и их роль для генерации негаусовых состояний

Зинатуллин Э.Р.

Мотивация



M. Kudra, M. Kervinen, I. Strandberg, S. Ahmed, M. Scigliuzzo, A. Osman, D. P. Lozano, G. Ferrini, J. Bylander, A. F. Kockum, F. Quijandr'ia, P. Delsing, and S. Gasparinetti, arXiv:2111.07965 [quant-ph].

Джозефсоновский переход

Куперовские пары образуют конденсат, который можно описывается волновой функцией:

$$\Psi(\vec{r}, t) = \sqrt{n(\vec{r}, t)} e^{i\theta(\vec{r}, t)} \quad (1)$$

$n(\vec{r}, t)$ – плотность куперовских пар, $\theta(\vec{r}, t)$ – фаза.

Сверхток через переход описывается соотношениями Джозефсона

$$I = I_c \sin(\varphi) \quad (2)$$

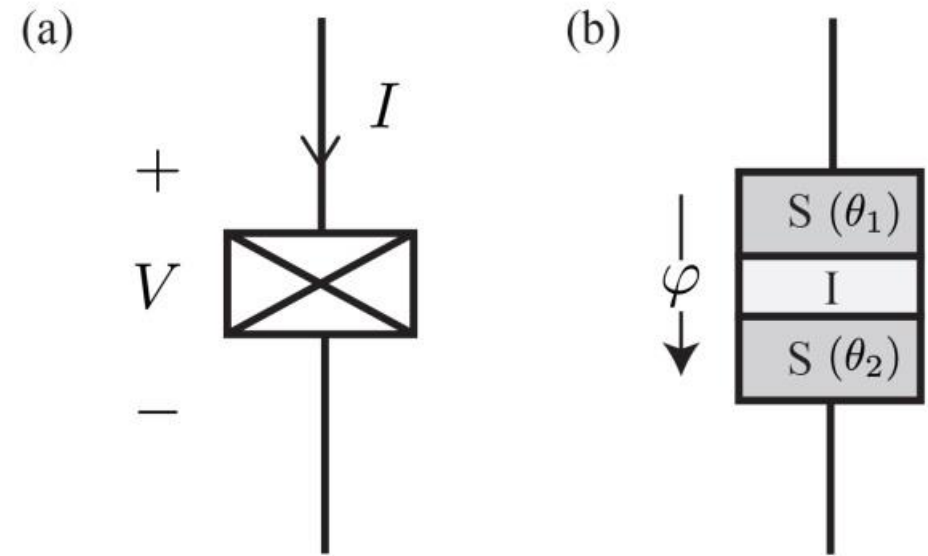
$$V = \left(\frac{\hbar}{2e} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \left(\frac{\Phi_o}{2\pi} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3)$$

где $\varphi = \theta_1 - \theta_2$.

Энергия, запасенная в джозефсоновском переходе

$$U(\varphi) = \int IV dt = -E_J \cos \varphi \quad (4)$$

$E_J = \frac{\Phi_o I_c}{2\pi}$ – энергия джозефсона.



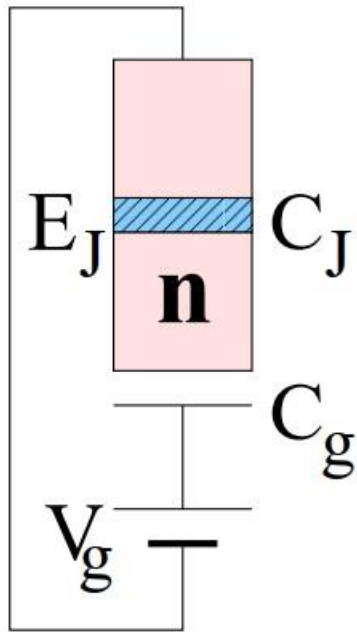
(a) Схематическое обозначение джозефсоновских переходов.

(b) Два куска сверхпроводника разделены тонким слоем диэлектрика. Куперовские пары могут туннелировать через барьер как сверхток, который связан с разницей фаз между двумя сверхпроводниками.

B. D. Josephson. Rev. Mod. Phys. 46, 251 (1974)

Типы сверхпроводящих кубитов

I Зарядовый кубит



Система описывается гамильтонианом

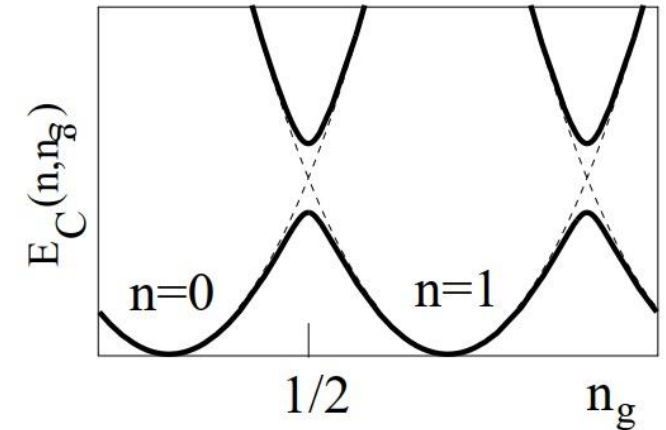
$$\hat{H} = 4E_C(\hat{n} - n_g)^2 - E_J \cos \hat{\phi} \quad (5)$$

где \hat{n} – оператор числа куперовских пар на сверхпроводящем острове.

$E_C \equiv e^2/2(C_g + C_J)$ – энергия зарядки.

$n_g \equiv C_g V_g / 2e$ – заряд затвора.

Рассматриваем режим, в котором $E_C \gg E_J$



Энергия зарядки как функция заряда затвора для различного числа куперовских пар (штриховые параболы). Вблизи точек вырождения слабая джозефсоновская связь смешивает зарядовые состояния и изменяет энергию собственных состояний (сплошные линии).

Схема зарядового кубита.

Yuriy Makhlin, Gerd Schön, and Alexander Shnirman Rev. Mod. Phys. 73, 357 (2001)

Типы сверхпроводящих кубитов

II Поточковый кубит

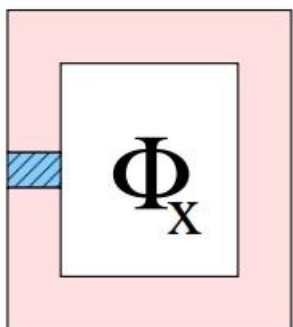


Схема потокового кубита.

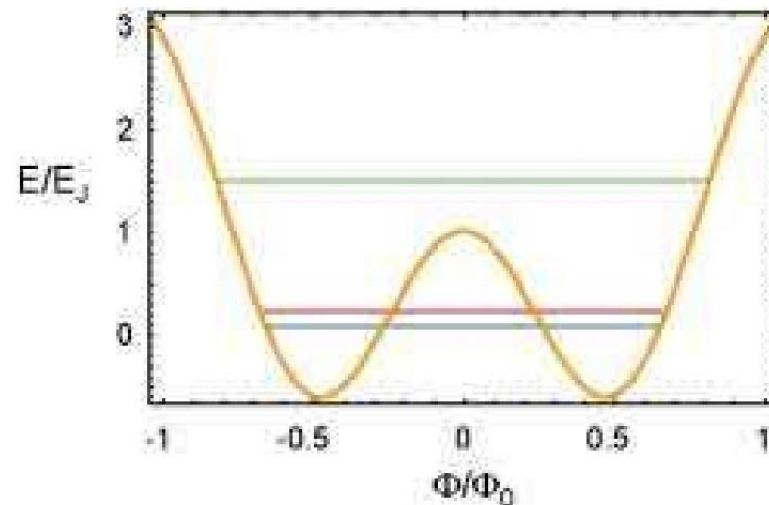
Система описывается гамильтонианом

$$\hat{H} = \frac{\hat{q}^2}{2C_J} + \left(\frac{\Phi_0}{2\pi}\right)^2 \frac{\hat{\phi}^2}{2L} - E_J \cos\left[\hat{\phi} - \Phi \frac{2\pi}{\Phi_0}\right] \quad (6)$$

\hat{q} – это заряд емкости перехода.

L – индуктивность сверхпроводящего контура.

Рассматриваем режим, в котором $E_J \gg E_C$



Вид потенциала для потокового кубита.

Devoret M. H., Wallraff A., Martinis J. M. Superconducting Qubits: A Short Review. (2004).

Типы сверхпроводящих кубитов

III Фазовый кубит

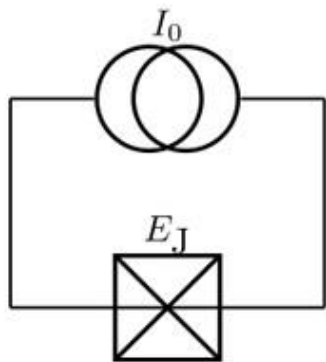


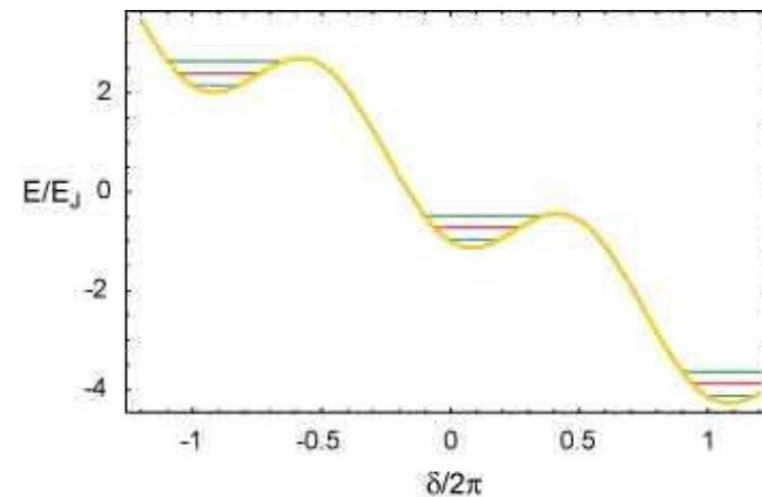
Схема фазового кубита.

Система описывается гамильтонианом

$$\hat{H} = \frac{(2e)^2}{2C_J} \hat{q}^2 - I_0 \frac{\Phi_0}{2\pi} \hat{\phi} - E_J \cos \hat{\phi} \quad (7)$$

I_0 – ток внешнего источника.

Рассматриваем режим, в котором $E_J \gg E_C$

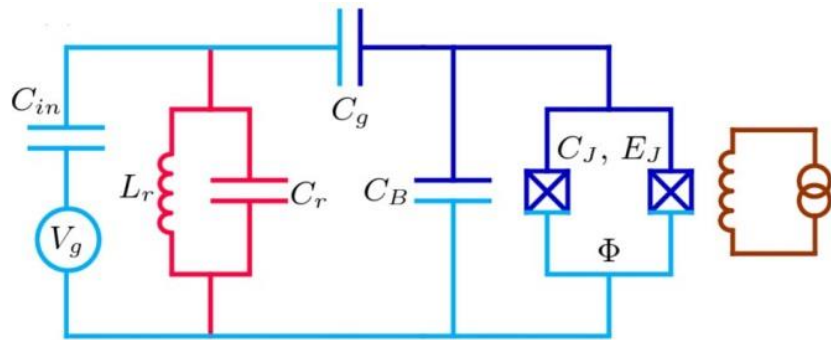


Вид потенциала для фазового кубита.

You, J. Q., and Franco Nori. "Superconducting Circuits and Quantum Information." Physics Today 58.11 (2005): 42-47.

Типы сверхпроводящих кубитов

IV Транзмонный кубит



Принципиальная схема транзмонного кубита. Синим выделен изолированный сверхпроводящий остров, красным – дополнительный колебательный контур.

Гамильтониан, описывающий схему при отсутствии дополнительного колебательного контура.

$$\hat{H} = 4E_C(\hat{n} - n_g)^2 - E_J \cos \hat{\varphi}$$

Рассматриваем режим, в котором $E_J \gg E_C$

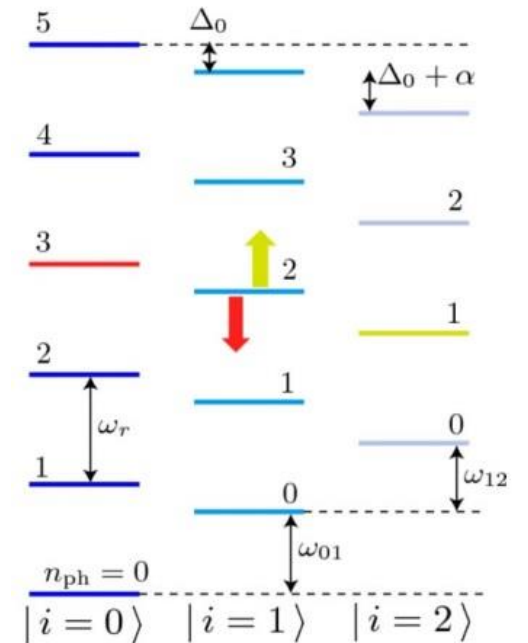


Схема уровней для рассматриваемой системы. Состояния транзмонов обозначаются $i=0,1,2$. Число фотонов в резонаторе отложено по вертикали.

Jens Koch, Terri M. Yu, Jay Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, Alexandre Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf. Phys. Rev. A 76, 042319 (2007)

За «пределами» кубита

Параметры линейной части джозефсоновского контакта:

$$C_J = e^2/(2E_C) \quad L_J = \phi_0^2/E_J \quad (8)$$

Гамильтониан системы: $H = H_0 + H_{nl}$

$$H_0 = \sum_p \hbar\omega_p a_p^\dagger a_p \quad (9)$$

$$H_{nl} = -(\hat{\phi})^4/(24\phi_0^2 L_J) + \mathcal{O}((\hat{\phi}/\phi_0)^6) \quad (10)$$

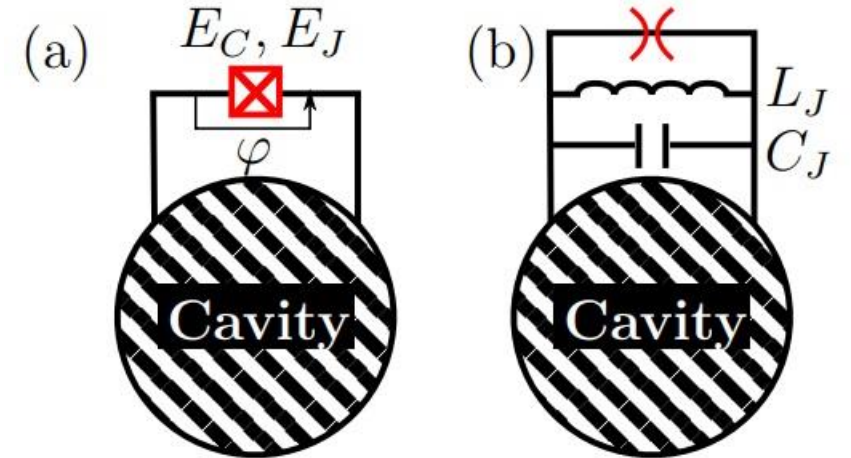
В случае, когда в нелинейной части гамильтониана оставляется слагаемое только первого порядка малости, гамильтониан системы сводится к:

$$H_4 = H'_0 + \frac{1}{2} \sum_{pp'} \chi_{pp'} \hat{n}_p \hat{n}_{p'} \quad (11)$$

Где константы взаимодействия:

$$\chi_{pp} = -\frac{L_p}{L_J} \frac{C_J}{C_p} E_C, \quad \chi_{pp'} = -2\sqrt{\chi_{pp}\chi_{p'p'}}. \quad (12)$$

Simon E. Nigg, Hanhee Paik, Brian Vlastakis, Gerhard Kirchmair, S. Shankar, Luigi Frunzio, M. H. Devoret, R. J. Schoelkopf, and S. M. Girvin. Phys. Rev. Lett. 108, 240502 (2012)



(a) Схема из джозефсоновского контакта, соединённого с некоторым линейным элементом.

(b) Элемент Джозефсона заменен параллельной комбинацией из линейной индуктивности, линейной емкости и чисто нелинейный элемента.

Selective Number-dependent Arbitrary Phase (SNAP) gate

SNAP гейт для состояния Фока $|n\rangle$ может быть описан как

$$S_n(\theta) = e^{i\theta|n\rangle\langle n|} \quad (13)$$

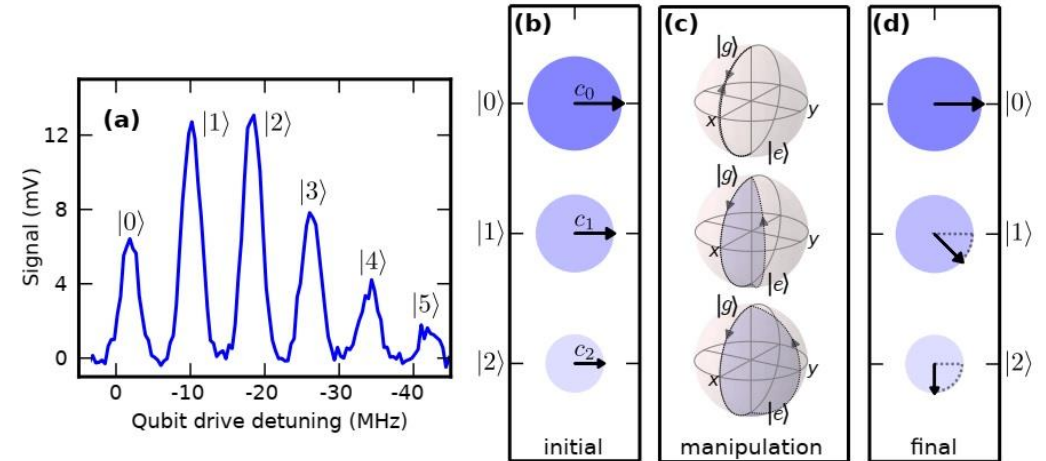
Обобщенный вентиль SNAP, действующий на несколько компонентов состояния Фока:

$$S(\vec{\theta}) = \prod_{n=0}^{\infty} S_n(\theta_n) \quad (14)$$

SNAP гейт реализуется в системах, в которых присутствует кросс-керровское взаимодействие:

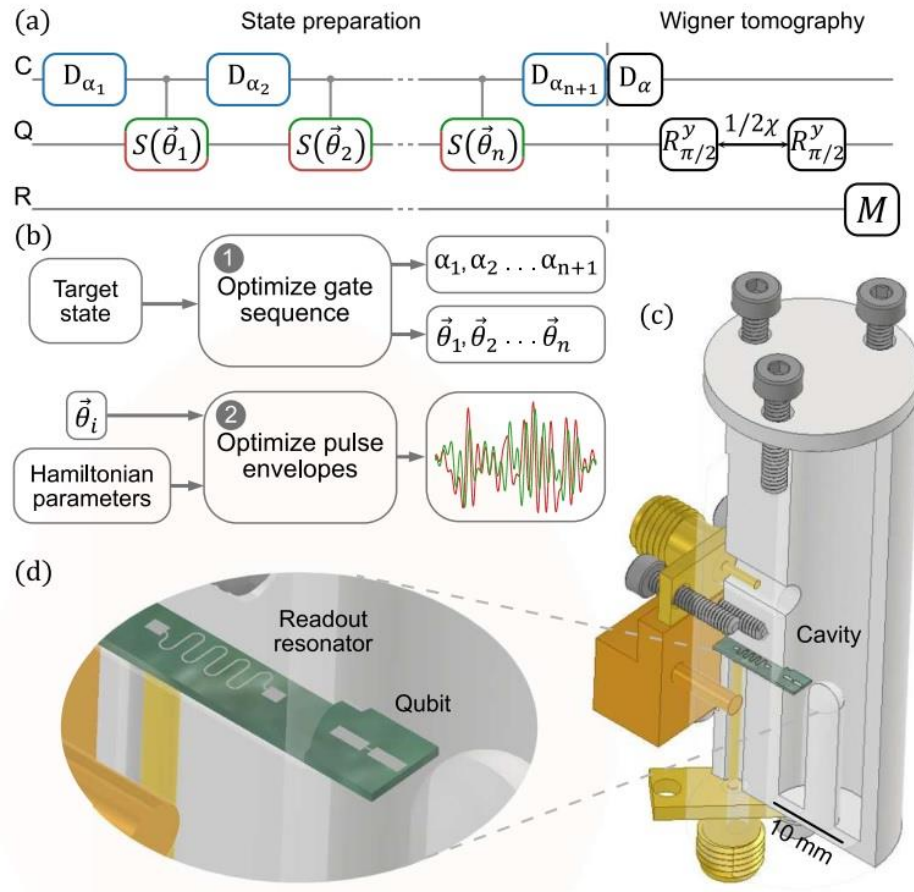
$$H = \omega_c a^\dagger a + \omega_q b^\dagger b - \chi a^\dagger a b^\dagger b \quad (15)$$

Reinier W. Heeres, Brian Vlastakis, Eric Holland, Stefan Krastanov, Victor V. Albert, Luigi Frunzio, Liang Jiang, and Robert J. Schoelkopf. Phys. Rev. Lett. 115, 137002 (2015)



- (a) Спектр кубита с заполнением полости хранения $n \approx 2$, показывающий, что частота перехода кубита зависит от количества фотонов в полости.
- (b) Векторное представление состояния резонатора.
- (c) Пример вентиля SNAP: два π -импульса на кубите по разным осям приводят к траектории, которая охватывает геометрическую фазу и позволяет избирательно вращать каждый сп.
- (d) Конечное состояние после операции (c), что приводит к управляемой эволюции фазы для каждого сп.

Генерация негауссовых состояний



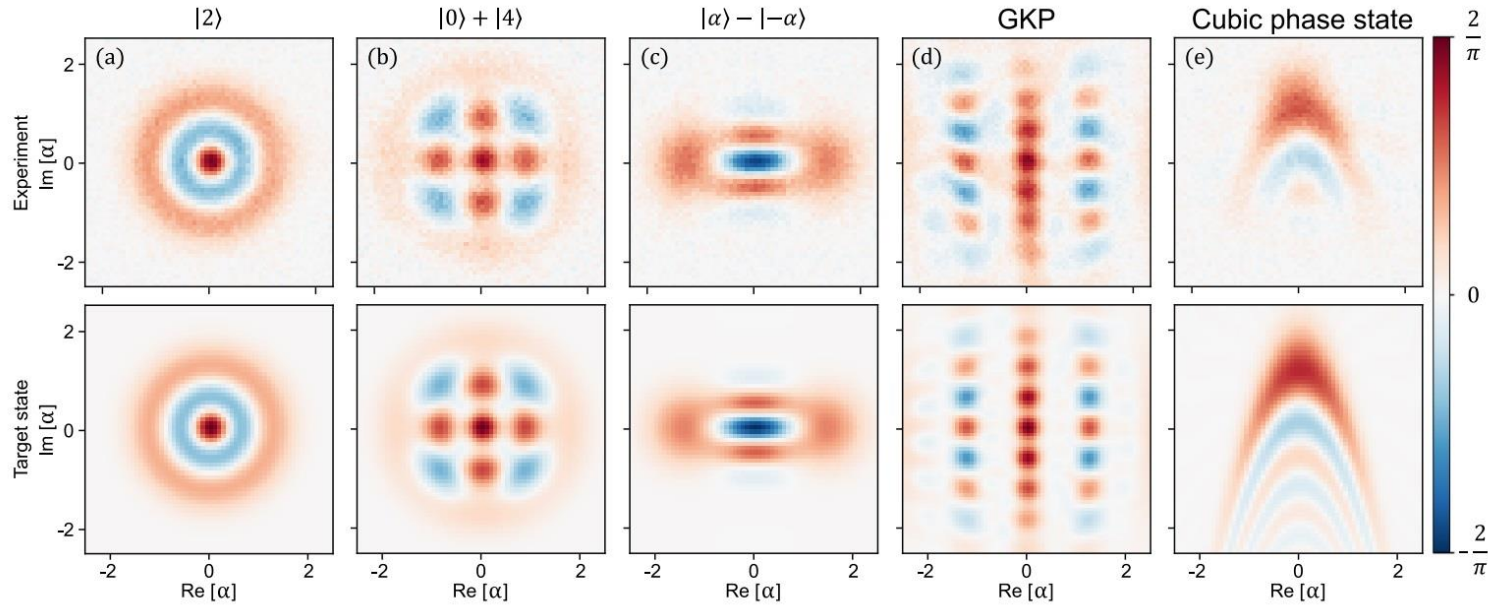
(a) Схематическое изображение последовательности импульсов, используемой для подготовки и характеристики состояний. C, Q и R обозначают резонатор, кубит и считывающий резонатор соответственно. D_{α_i} — смещение, а $S(\theta_i)$ — вентили SNAP. $R_{\pi/2}^y$ — независимые от состояния резонатора $\pi/2$ -импульсы. M — измерение.

(b) Два шага оптимизации, которые выполняются, чтобы найти желаемое смещение и ворота SNAP.

(c) Рисунок резонатора с геометрией заглушки, соединенного с транзмонным кубитом.

(г) Увеличенный чип, содержащий резонатор считывания и транзмонный кубит.

Генерация негауссовых состояний



State	(#Disp,#SNAP)	Experiment	Theory
Fock $ 2\rangle$	(3,2)	0.996	0.972
Binomial	(3,2)	0.937	0.972
Cat	(3,2)	0.963	0.966
GKP	(4,3)	0.942	0.932
Cubic phase	(3,3)	0.717	0.922
$ \Psi_1\rangle = D_{\alpha_1} 0\rangle$	(1,0)	0.994	0.999
$ \Psi_2\rangle = S(\vec{\theta}_1) \Psi_1\rangle$	(1,1)	0.959	0.987
$ \Psi_3\rangle = D_{\alpha_2} \Psi_2\rangle$	(2,1)	0.946	0.986
$ \Psi_4\rangle = S(\vec{\theta}_2) \Psi_3\rangle$	(2,2)	0.921	0.974

Точность (fidelities) для сгенерированных состояний.

Спасибо за внимание!
