

Новосибирский Государственный Технический Университет



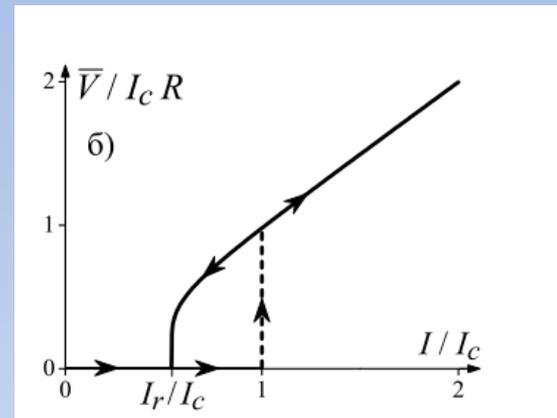
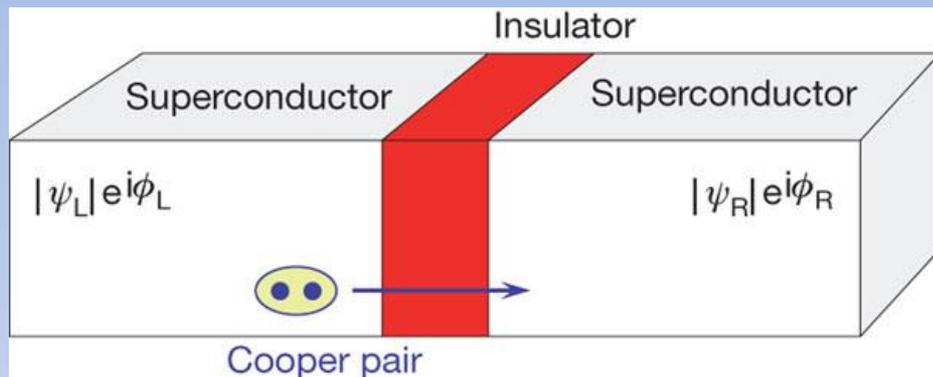
Я. С. Гринберг

Сверхпроводниковые квантовые биты на основе Джозефсоновских переходов

Содержание

- Контакт Джозефсона
- Фазовый кубит
- Сверхпроводниковый потоковый кубит
- Лаборатория криогенной квантовой электроники в НГТУ

Контакт Джозефсона



$$I = I_C \sin \varphi$$

$$V = L \frac{dI}{dt} \rightarrow L_J = \frac{\hbar}{2eI_C \cos \varphi}$$

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}$$

$$E = E_J (1 - \cos \varphi)$$

$$E_J = \frac{\hbar I_C}{2e}$$

Зоопарк джозефсоновских кубитов

Table 1. Main types of Josephson junction (JJ) based qubit circuits.

	C	C_J	L	L_{J0}	E_L/E_{J0}	E_{J0}/E_C	Z
	fF	fF	pH	pH			Ω
1. Phase qubit [16]	0	6000	3300	16	0.005	$\sim 10^6$	~ 1.5
2. Phase qubit [115]	800	~ 0	720	~ 80	0.11	$\sim 10^4$	~ 15
3. rf-SQUID [12]	0	40	238	101	0.43	2000	48
4. Flux qubit [125]	0	3	1200	600	0.5	10	450
5. Fluxonium [137]	0.15	~ 0	3300	150	0.045	1	1400
6. C-shunt [140]	50	~ 0	15 000	4500	0.3	25	480
7. Charge qubit [11]	0.68	~ 0	∞	808	0	0.018	$\sim 10^4$
8. Quantronium [15]	2.8	~ 0	∞	$1.1 \cdot 10^4$	0	1.27	1300
9. Transmon [25, 26]	15–40	~ 0	∞	$\sim 10^3$	0	10–50	~ 250
10. Xmon [149]	100	~ 0	∞	$\sim 10^4$	0	22–28	~ 500
11. Gatemon [153]	100	~ 0	∞	$\sim 10^4$	0	17–32	~ 500

Charging energy of one Cooper pair ($2e$): $E_C = (2e)^2/2C$

Inductive energy: $E_L = \hbar^2/(4e^2L)$

Josephson energy: $E_{J0} = \hbar^2/(4e^2L_{J0})$

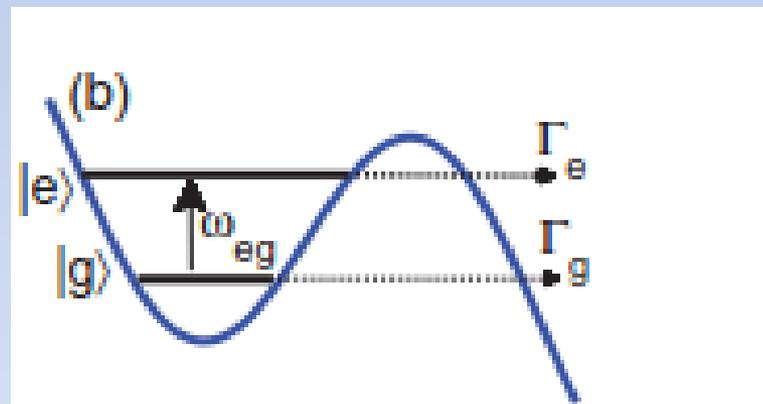
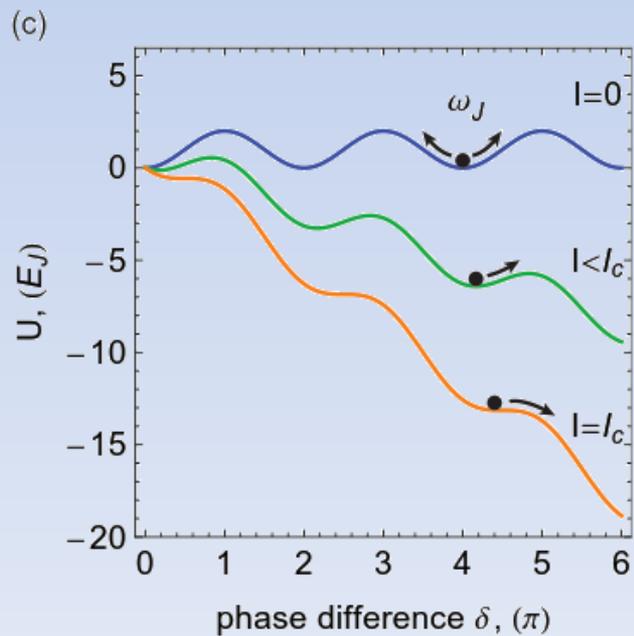
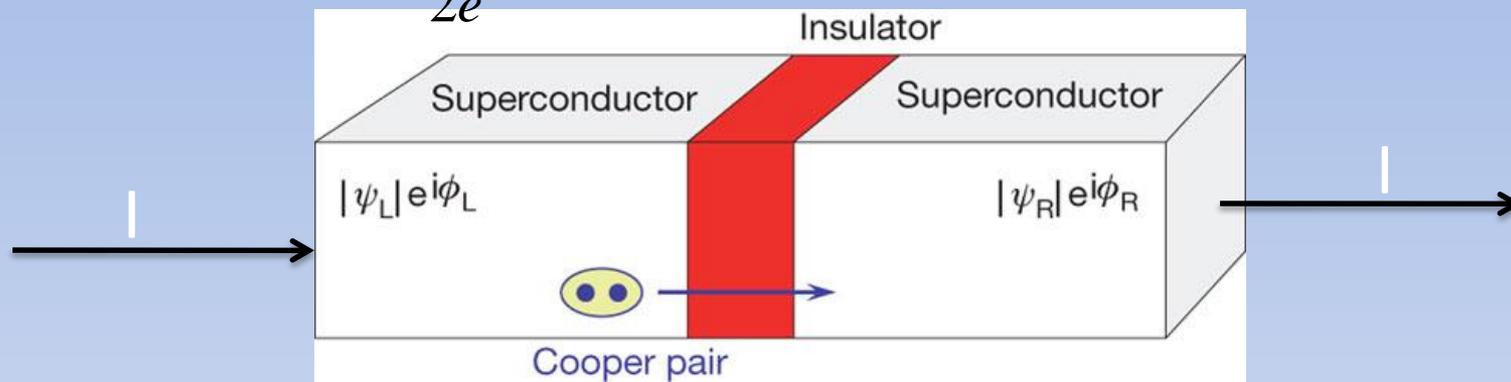
Resistance 'quantum': $R_Q = \hbar/(2e)^2 \approx 1.027\,059\text{ k}\Omega$

Impedance: $Z \sim \sqrt{L_{J0}/C} = R_Q\sqrt{2}/\sqrt{E_{J0}/E_C}$

Wendin G. Quantum information processing with superconducting circuits: a review
Rep Prog Phys 80, 106001 (2017).

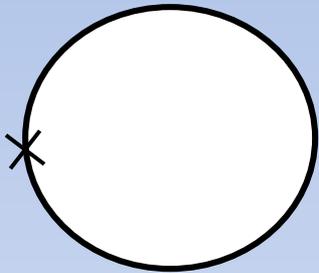
Фазовый кубит

$$E = E_J (1 - \cos \varphi) - \frac{\hbar}{2e} I \varphi$$



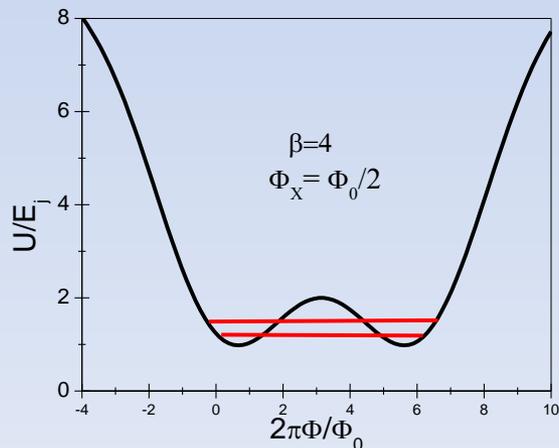
ПОТОКОВЫЙ КУБИТ

Одноконтактный
интерферометр $L \approx 100$ пГн, $I_C \approx 1$
мкА, $\beta > 1$

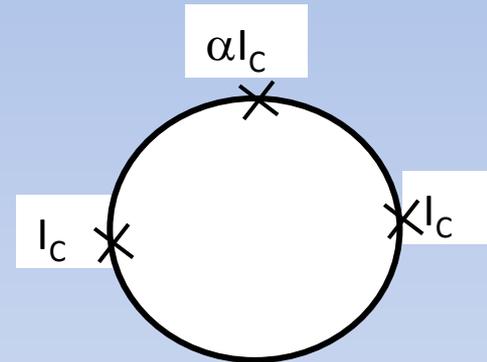


$$\beta = \frac{2\pi L I_C}{\Phi_0}$$

$$U = E_J \left[1 - \cos \varphi + \frac{(\varphi_X - \varphi)^2}{2\beta} \right]$$

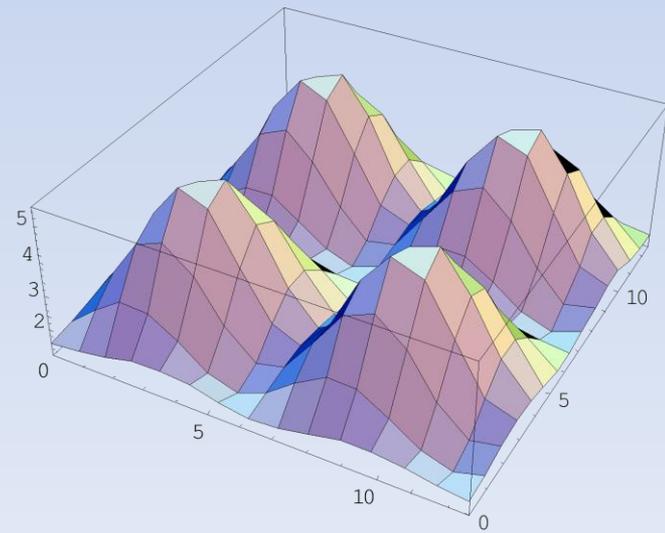


Трехконтактный интерферометр
 $0.5 < \alpha < 1$, $L \approx 10$ пГн, $I_C \approx 100$ нА,
 $\beta \approx 0.001$

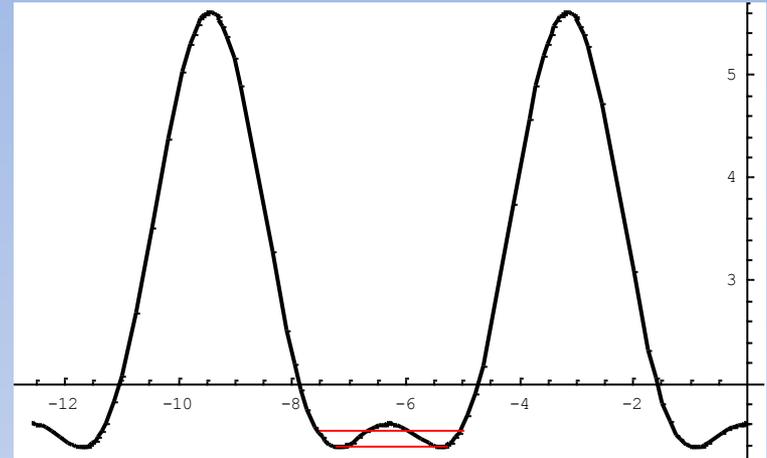
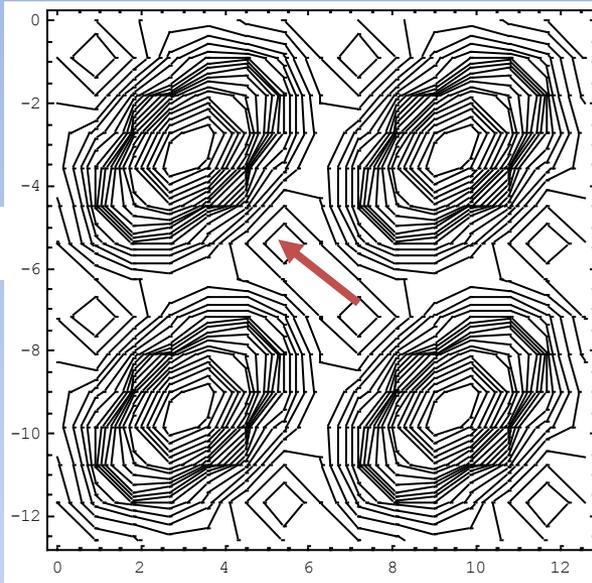


$$U(f_X, \varphi, \theta) = E_J [\alpha - 2 \cos \varphi \cos \theta + \alpha \cos(2\pi f_X + 2\theta)]$$

Mooij et al.
Science 245
(1999)



ПОТОКОВЫЙ КУБИТ

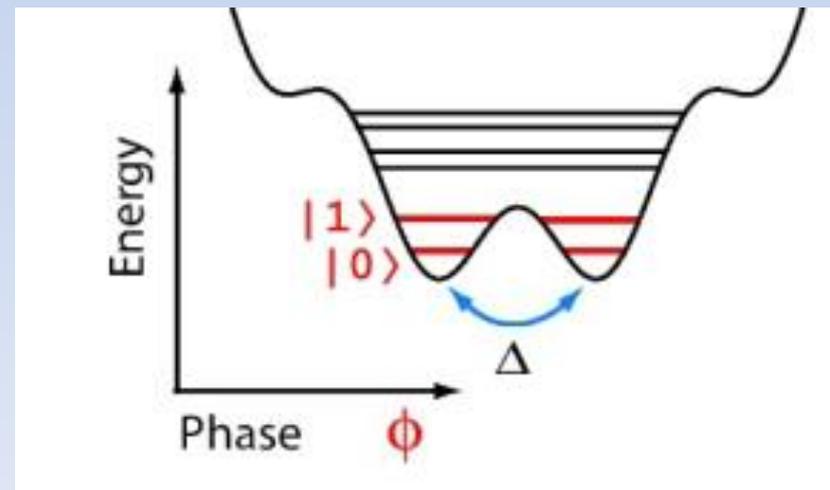


$$\Phi_{ext} = \frac{\Phi_0}{2}$$

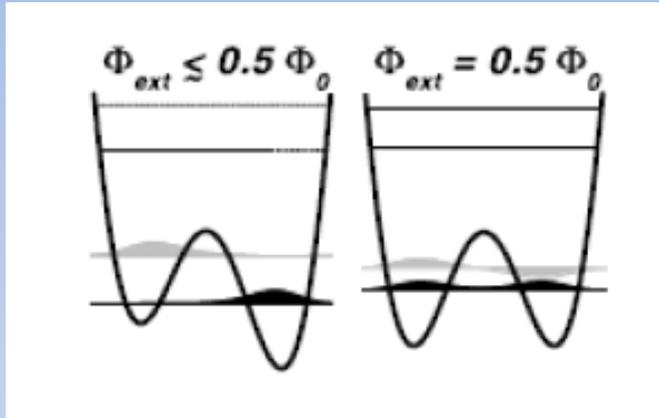
$$\varphi = \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} = \frac{2\pi\Phi_{ext}}{\Phi_0}$$

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|L\rangle + |R\rangle)$$

$$|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|L\rangle - |R\rangle)$$

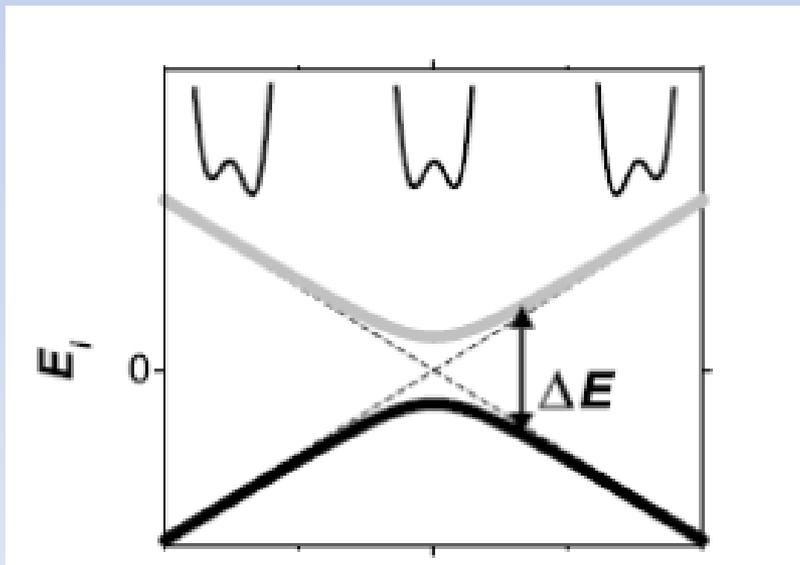


ПОТОКОВЫЙ КУБИТ



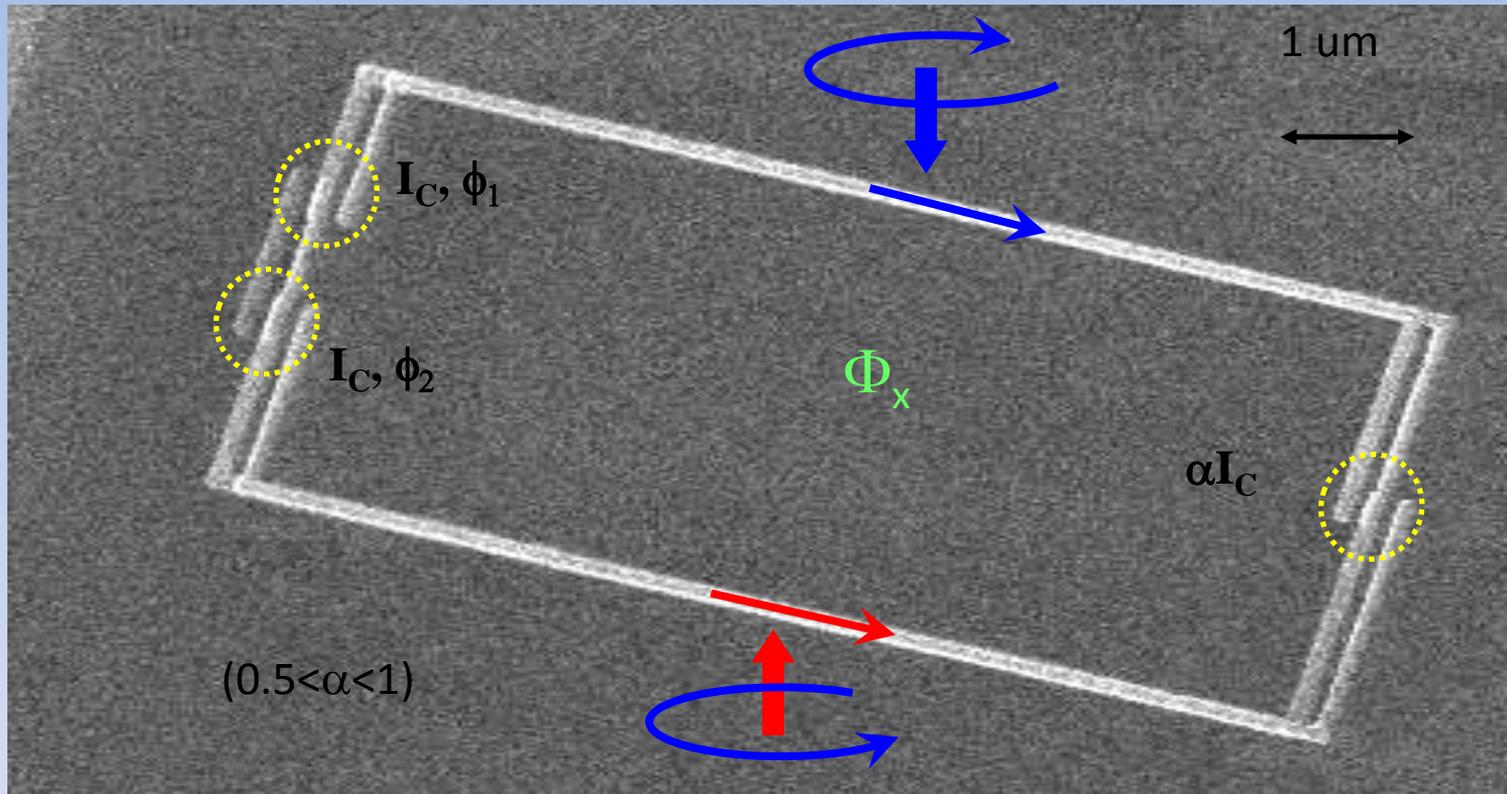
$$E_{\pm} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^2}$$

$$\varepsilon = 2I_p \left(\Phi_{ext} - \frac{\Phi_0}{2} \right)$$



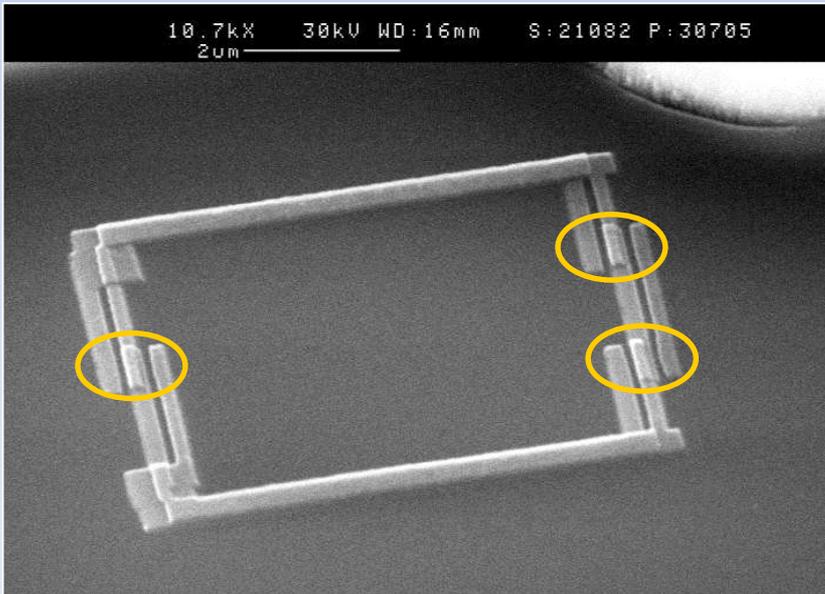
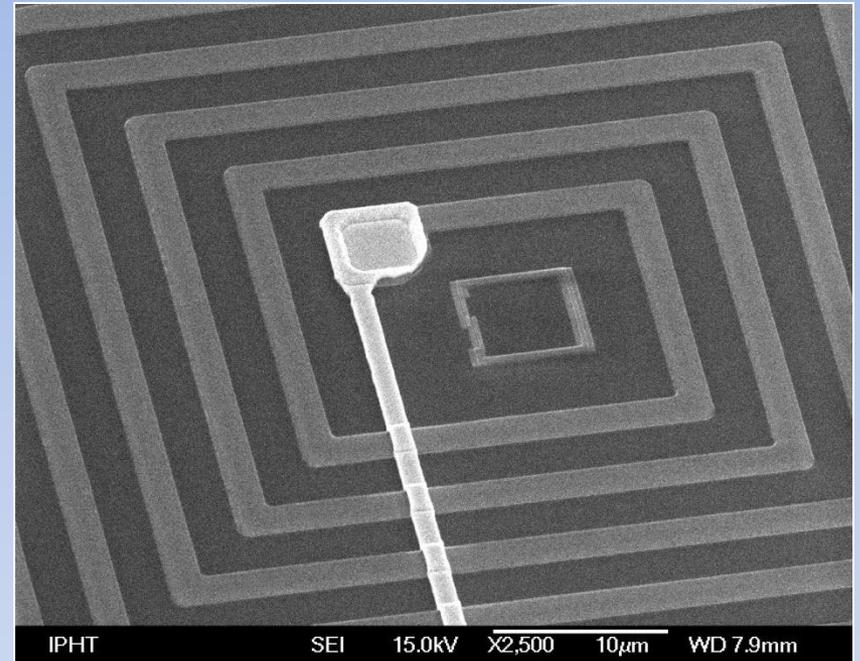
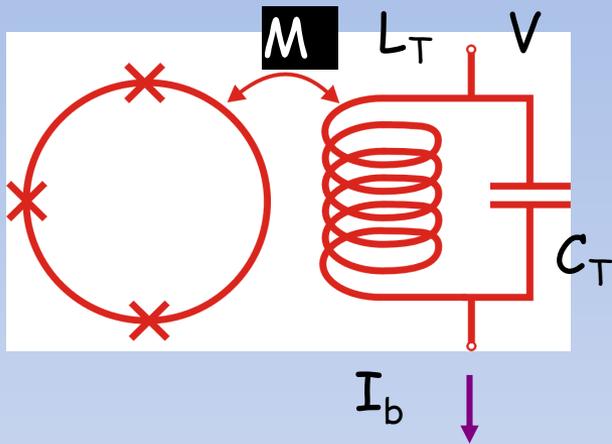
$$\Delta E = \sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^2} \approx (2 - 10) \Gamma T \psi$$

Сверхпроводниковый потоковый кубит

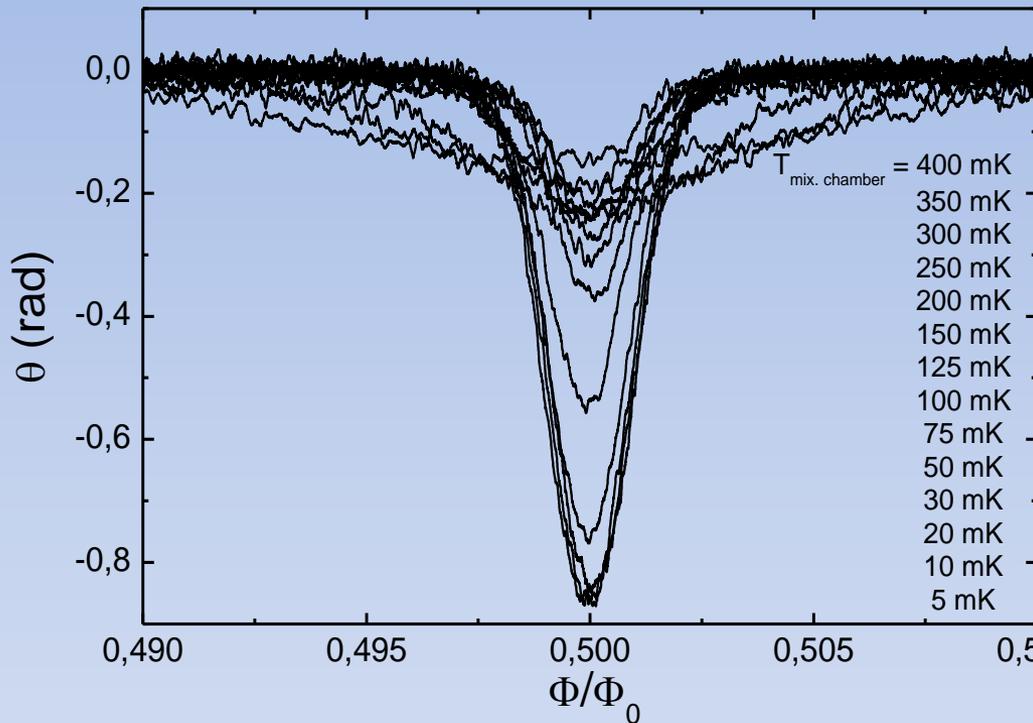


- Material: Aluminium, Shadow-evaporation technique
- Two contacts $\sim 600 \times 200 \text{ nm}$, ($I_C \approx 600 \text{ nA}$), the third is smaller, so that $\alpha = E_{J1} / E_{J2,3} \sim 0.8 - 0.9$
- Inductance $L \approx 20 \text{ pH}$
- J.E. Mooij *et al.*, Science **285**, 1036, 1999.

Потоковый кубит связанный с резонансным контуром



Фазовый отклик кубита в зависимости от внешнего потока



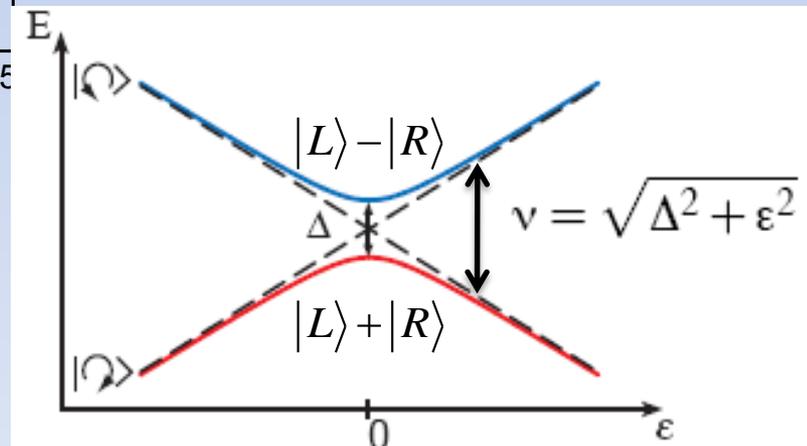
Ya. S. Greenberg et al., PRB 66, 214525 (2002)

M. Grajcar et al., PRB 69, 060501(R) (2004)

$$\tan \mathcal{G} = k^2 QL \frac{d^2 E_-}{d\Phi^2}$$

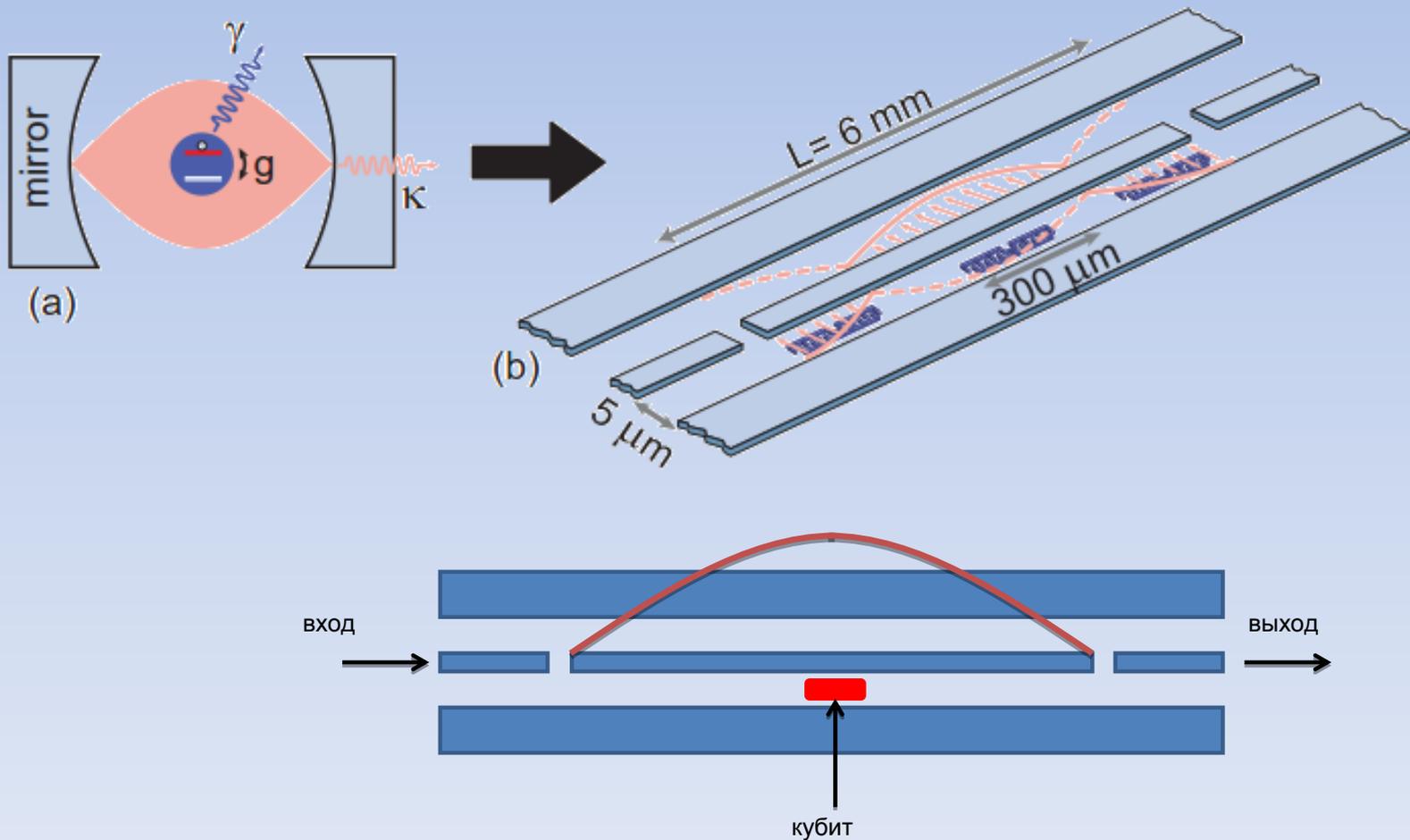
$$E_- = -\frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^2}$$

$$\varepsilon = 2I_p \left(\Phi_{\text{ext}} - \frac{\Phi_0}{2} \right)$$

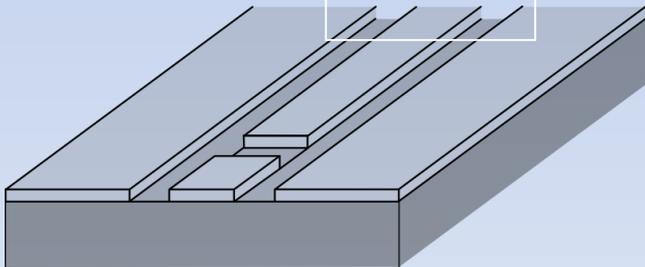
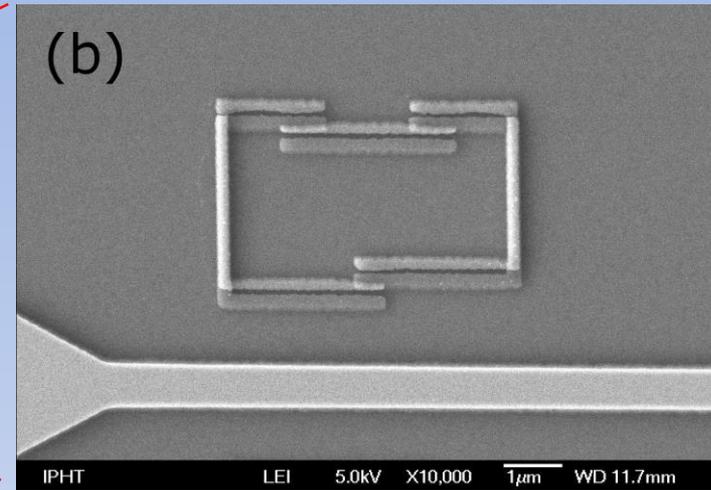
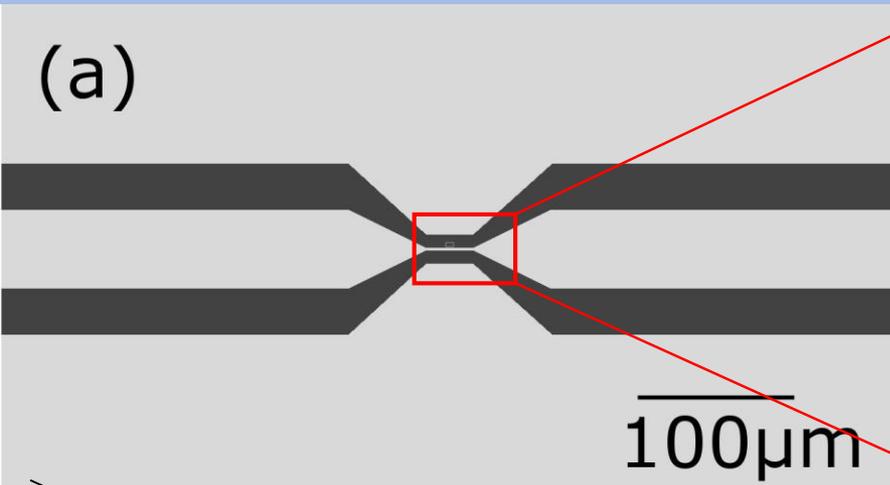


$$\Delta = I_p \cdot \frac{\Phi_0 f_{FWHM}}{2\sqrt{2^{2/3} - 1}}$$

Потоковый кубит в микроволновом резонаторе



Потоковый кубит в микроволновом резонаторе



Взаимодействие кубита с полем резонатора

$$H = \frac{1}{2} \hbar \Omega \sigma_Z + \hbar \omega_r \left(a^+ a + \frac{1}{2} \right) + \hbar g (a^+ \sigma_- + a \sigma_+)$$

Сильная связь

$$g \gg \gamma, \kappa$$

$$g \approx 100 \text{ МГц};$$

$$\gamma \approx 2 \text{ МГц};$$

$$\kappa \approx 200 \text{ кГц}$$

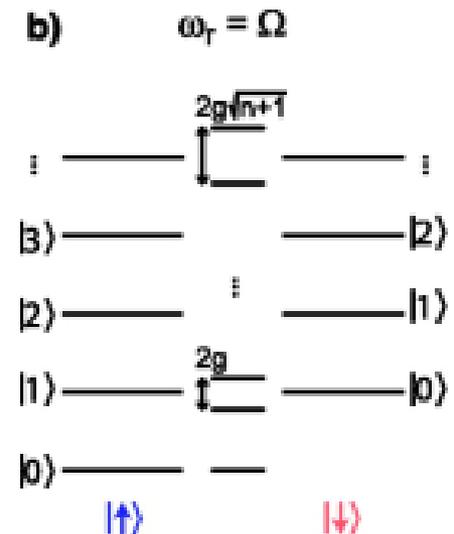
$$\Omega_R = \sqrt{(\omega - \Omega)^2 + 4g^2 n}$$

Резонансный режим

$$\frac{g}{\omega_r - \Omega} \gg 1$$

$$\Omega = 6.23 \text{ ГГц}$$

$$\omega_r = 6.25 \text{ ГГц}$$



Взаимодействие кубита с полем резонатора в дисперсионном режиме

$$\frac{g}{\omega_r - \Omega} \ll 1 \quad \Omega = 7 \Gamma \mu; \quad \omega_r = 6 \Gamma \mu; \quad g = 100 \text{ МГц}$$

$$H = \frac{1}{2} \hbar \Omega \sigma_z + \hbar \omega_r \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) + \hbar \chi \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) \sigma_z$$

$$\chi = \frac{g^2}{\omega_r - \Omega} = 10 \text{ МГц}$$

$$E_{ng} = -\frac{1}{2} \hbar \Omega + \hbar \omega_r n - \hbar \chi n - \frac{1}{2} \hbar \chi$$

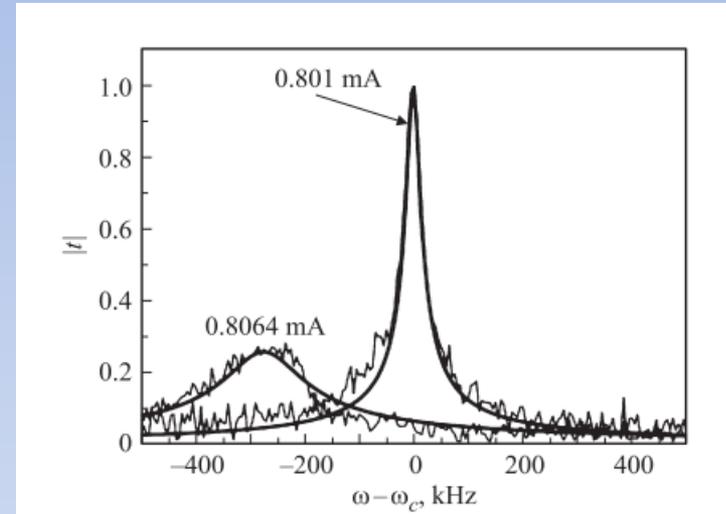
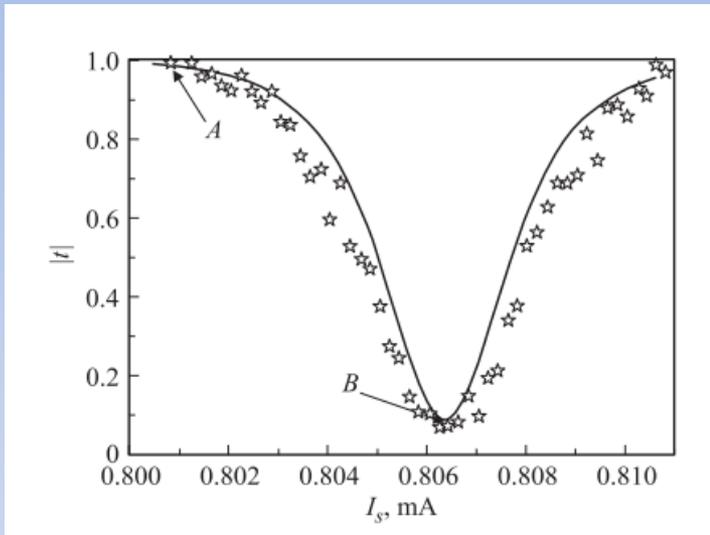
$$E_{ne} = \frac{1}{2} \hbar \Omega + \hbar \omega_r n + \hbar \chi n + \frac{1}{2} \hbar \chi$$

$$E_{n+1,g} - E_{n,g} = \hbar(\omega_r - \chi)$$

$$E_{n+1,e} - E_{n,e} = \hbar(\omega_r + \chi)$$

$$E_{n,e} - E_{n,g} = \hbar \Omega + \hbar \chi (2n + 1)$$

Взаимодействие кубита с полем резонатора в дисперсионном режиме



$$t = \frac{-i\kappa(\omega - \Omega + i\gamma)}{(\omega - \Omega + i\gamma)(\omega - \omega_r + i\kappa) - g^2}$$

$$\varepsilon = 2I_p \left(\Phi_{ext} - \frac{\Phi_0}{2} \right)$$

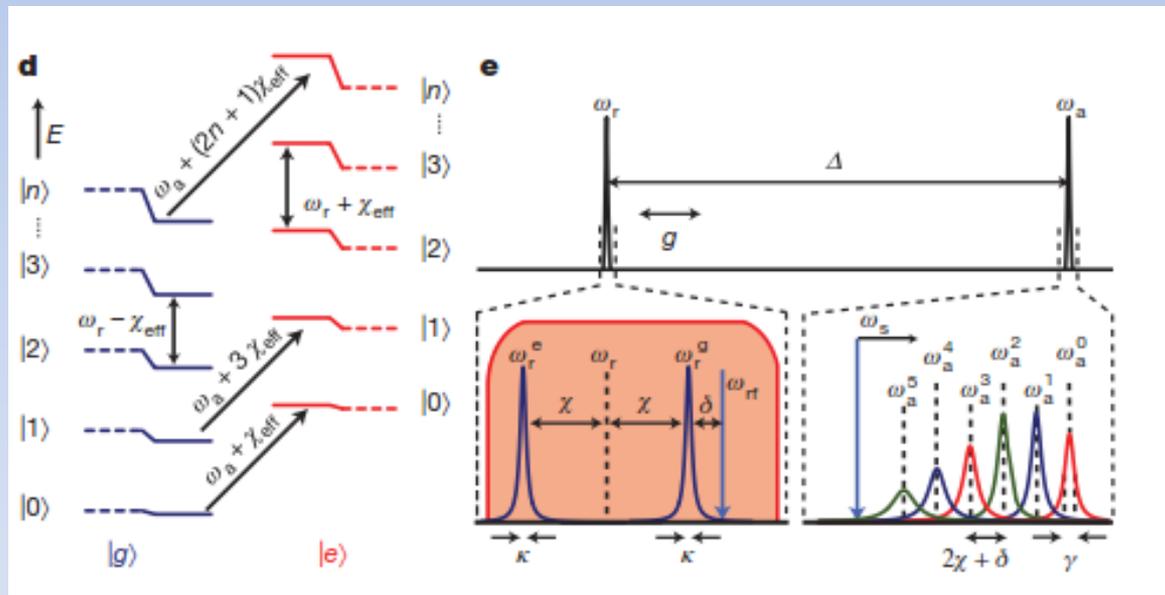
$$\Omega = \sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^2}$$

Взаимодействие кубита с полем резонатора в дисперсионном режиме

$$E_{n+1,g} - E_{n,g} = \hbar(\omega_r - \chi)$$

$$E_{n+1,e} - E_{n,e} = \hbar(\omega_r + \chi)$$

$$E_{n,e} - E_{n,g} = \hbar\Omega + \hbar\chi(2n + 1)$$

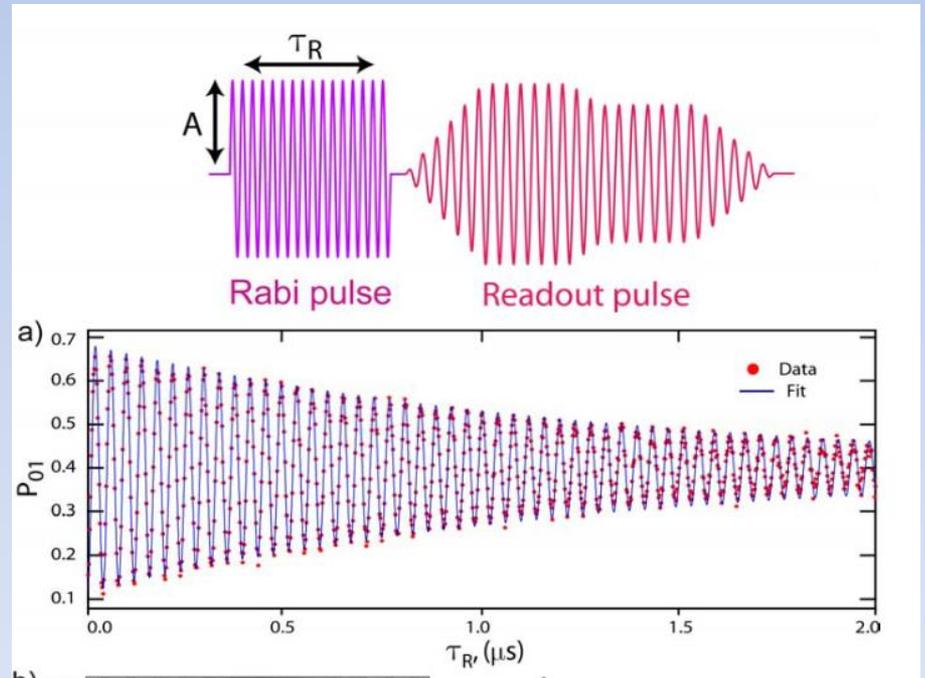
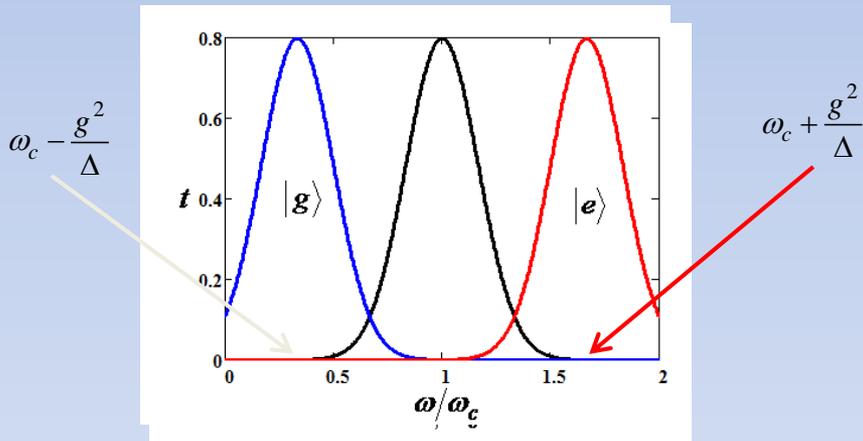


Shuster D. I. et al., Nature **445**, 515 (2007)

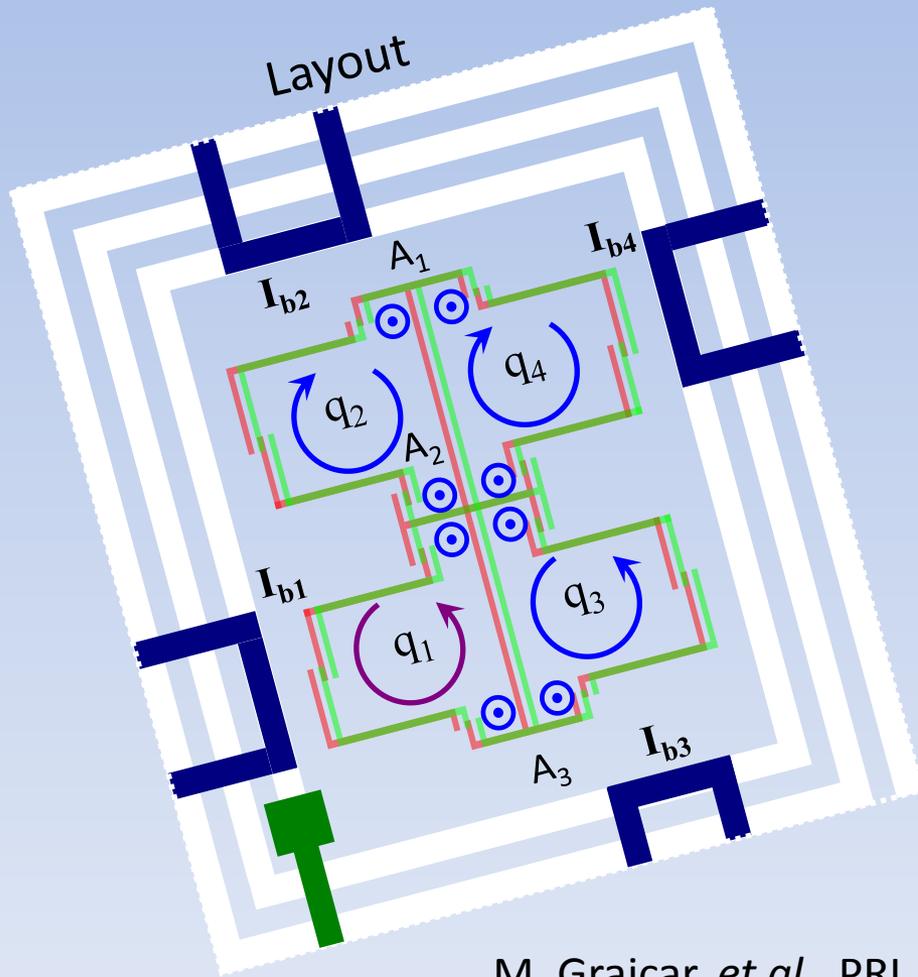
Рабби спектроскопия

$$H = \frac{1}{2}\Omega\sigma_Z + \Omega_R \cos(\omega_d t)\sigma_X$$

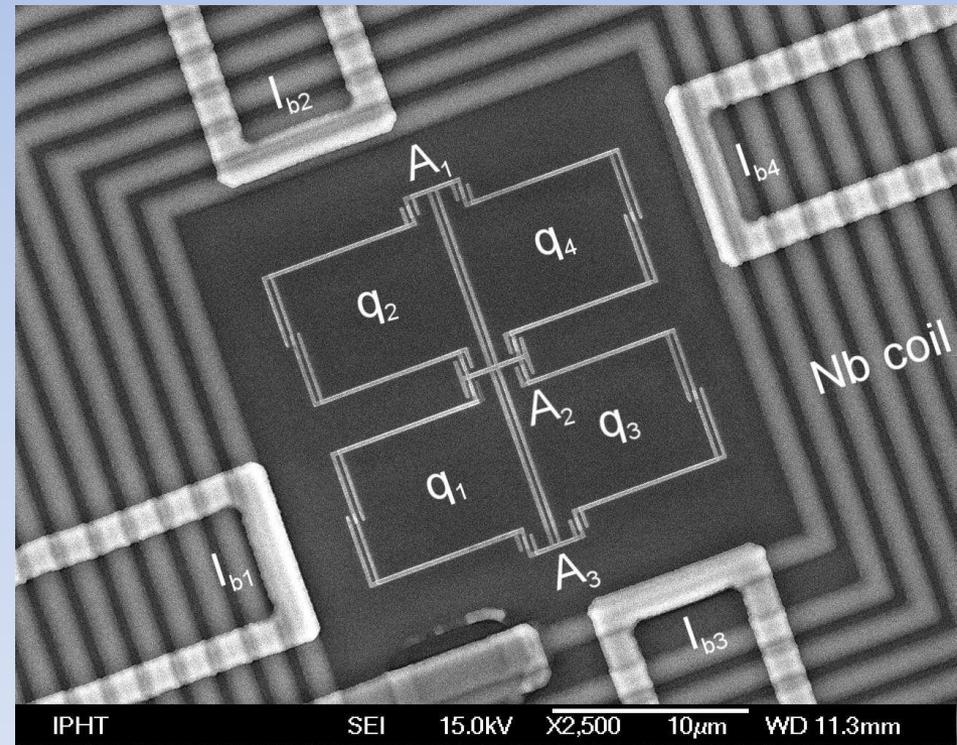
$$\Psi(t) = \cos\left(\frac{\Omega_R t}{2}\right)|g\rangle + \sin\left(\frac{\Omega_R t}{2}\right)|e\rangle$$



Четырехкубитный процессор



Micrograph



M. Grajcar, *et al.*, PRL 96,047006 (2006)

Лаборатория криогенной квантовой электроники в НГТУ

Рефрижератор растворения

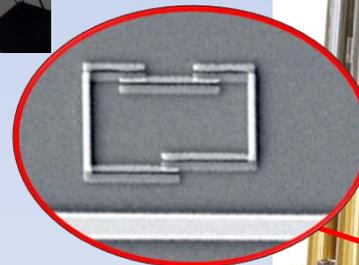
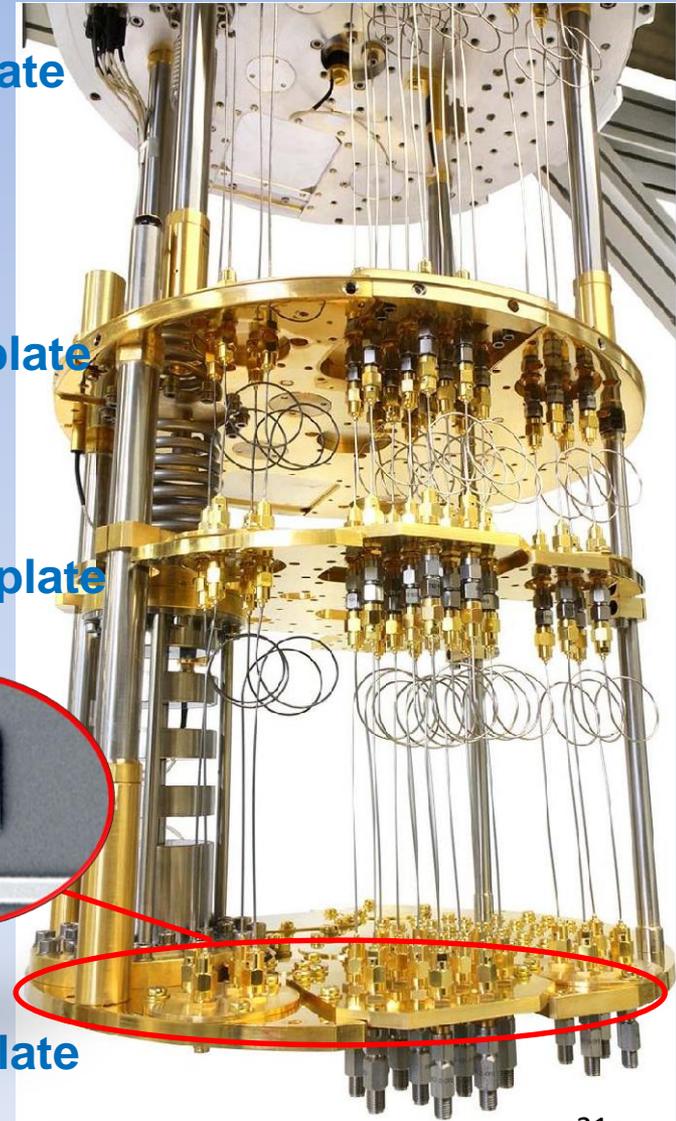
- Система контроля и мониторинга



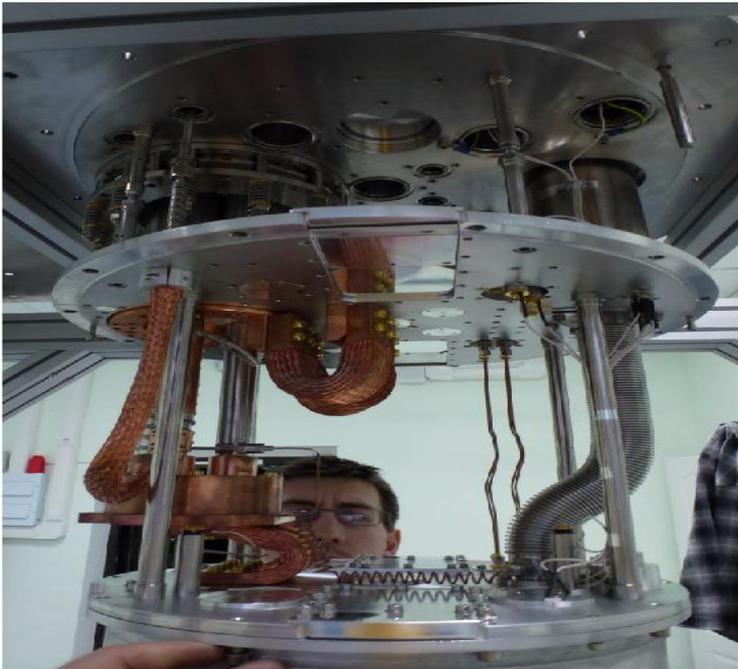
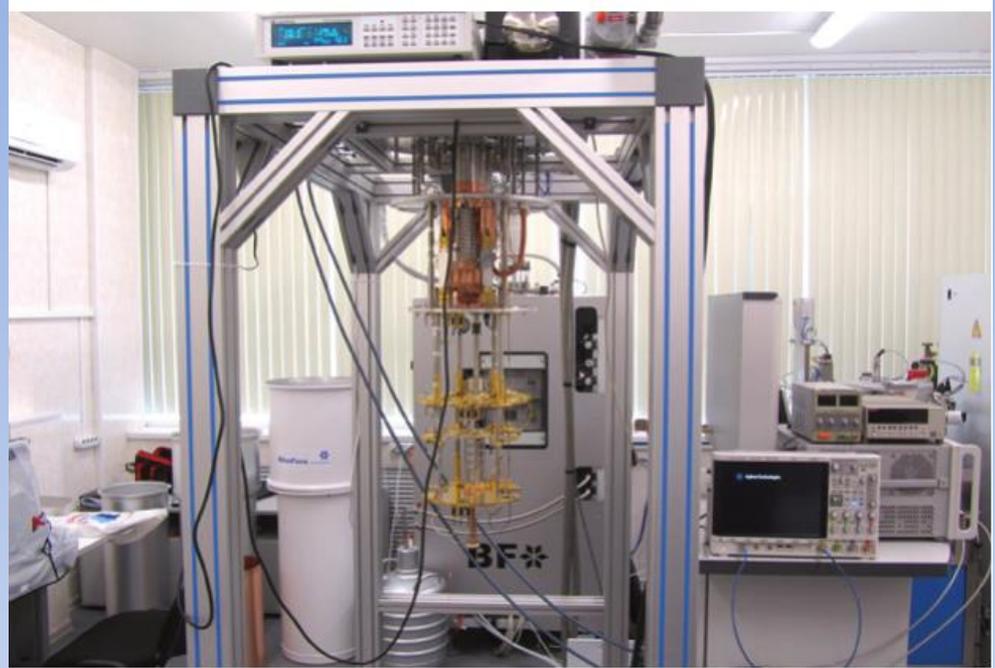
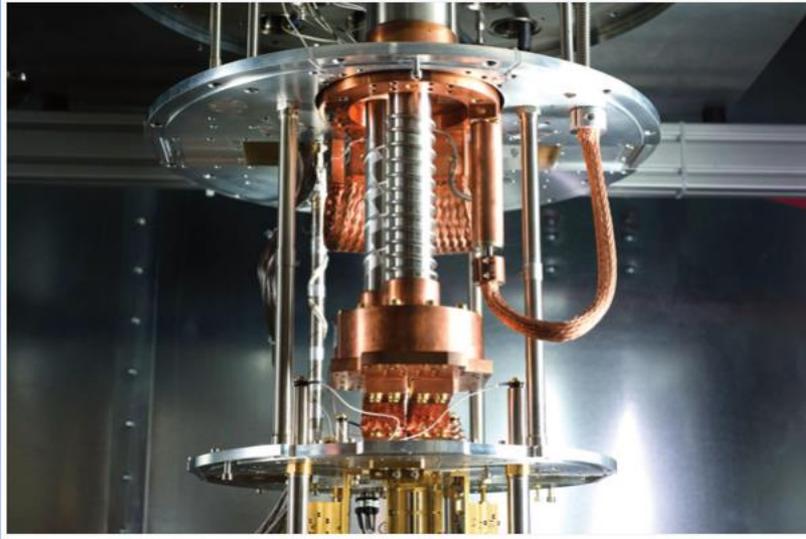
4.2 K plate

800 mK plate

100 mK plate



10 mK plate



Рефрижератор 300 мК с рабочим сорбционным модулем He-7



Оснащение лаборатории - Компрессорная



Система распределения газа

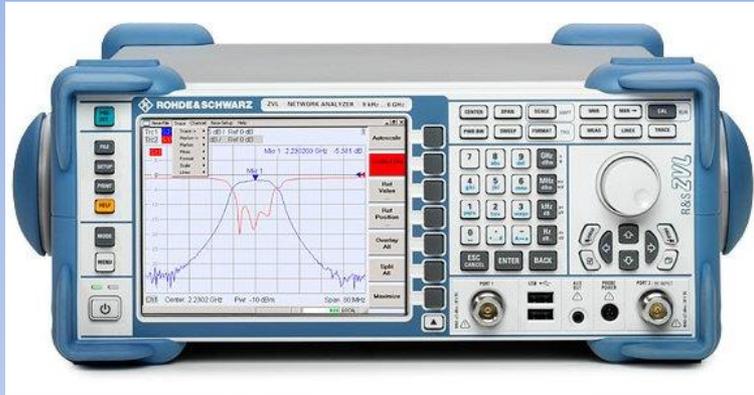


Мощный компрессор для механического охлаждения газа He_4

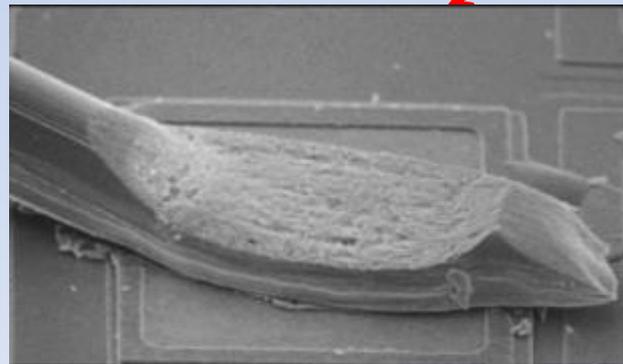


Охладитель пульсирующей трубки (pulse tube cooler)

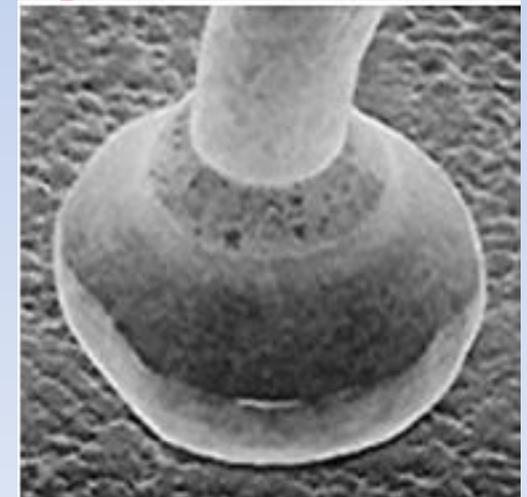
Экспериментальное оборудование



- 13 ГГц аналоговая полоса
- 10 Гц полоса фильтра промежуточной
- 2 порта для измерения S-параметров
- -150 dBm уровень собственных шумов

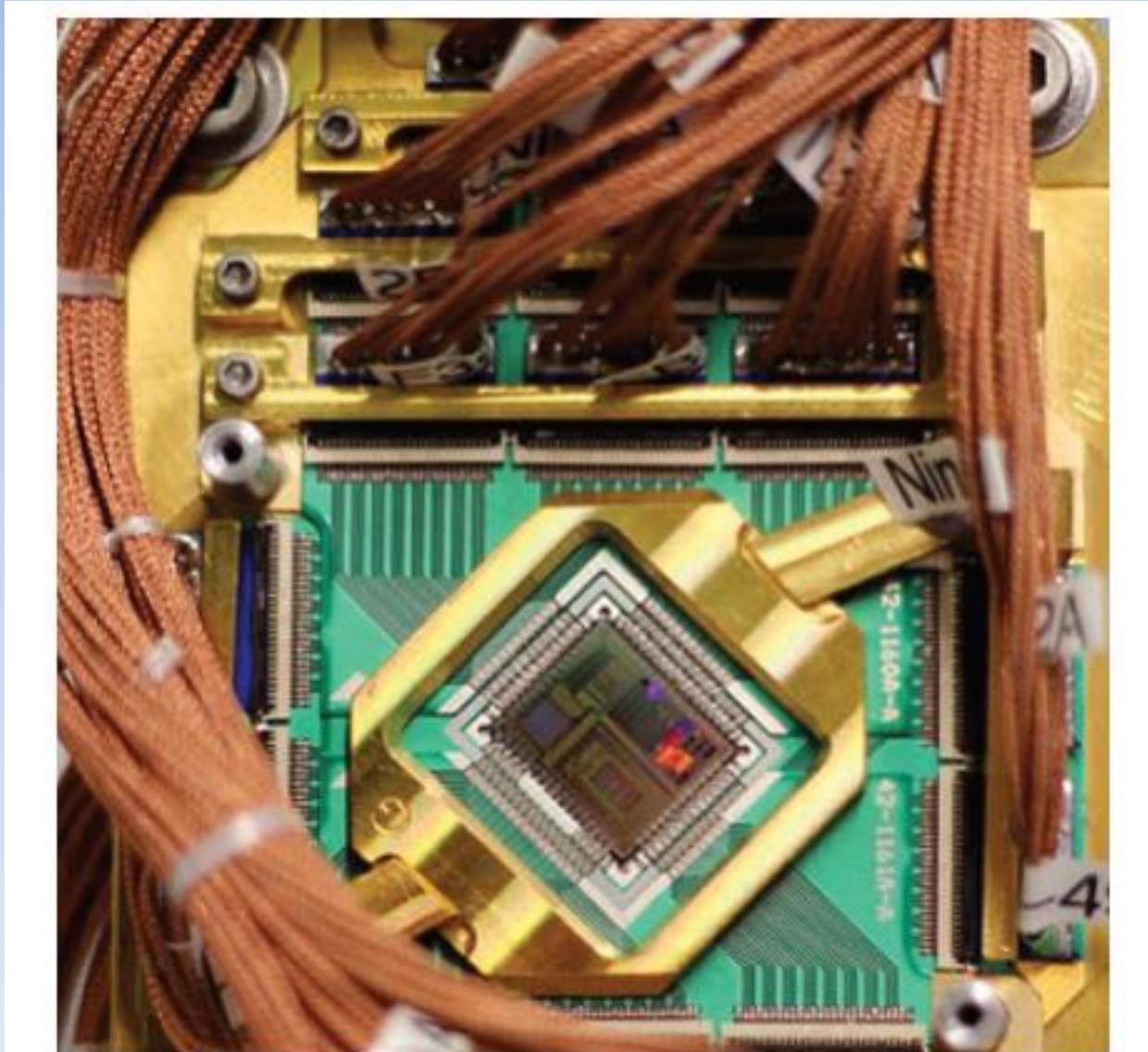


Ультразвуковая сварка Al клином



Ультразвуковая сварка Au шариком

Процессор первого коммерческого квантового вычислителя D-Wave Two



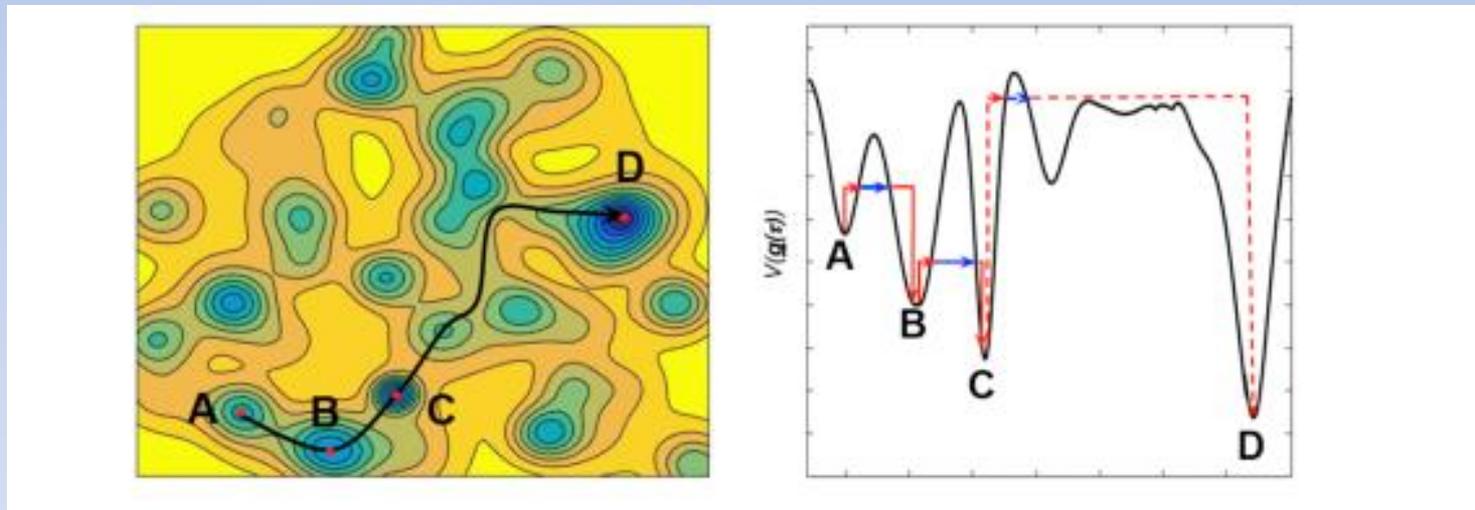
Компьютер D-wave 1024 кубит



Квантовый отжиг

Адиабатический квантовый алгоритм

$$H = (1 - s(t))H_0 + s(t)H_t$$



Wendin G. Quantum information processing with superconducting circuits: a review
Rep Prog Phys 80, 106001 (2017).

Спасибо за внимание!