

19-21 ДЕКАБРЯ

16-я Всероссийская
научная конференция
с международным
участием

ФИЗИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМОВ 2022

Laser noise influence on Rydberg excitation of single atoms

Авторы доклада:

Гордеев А.П., Шчепанович Д., Бобров И.Б., Ковлаков Е.В., Кулик С.П., Страупе С.С.



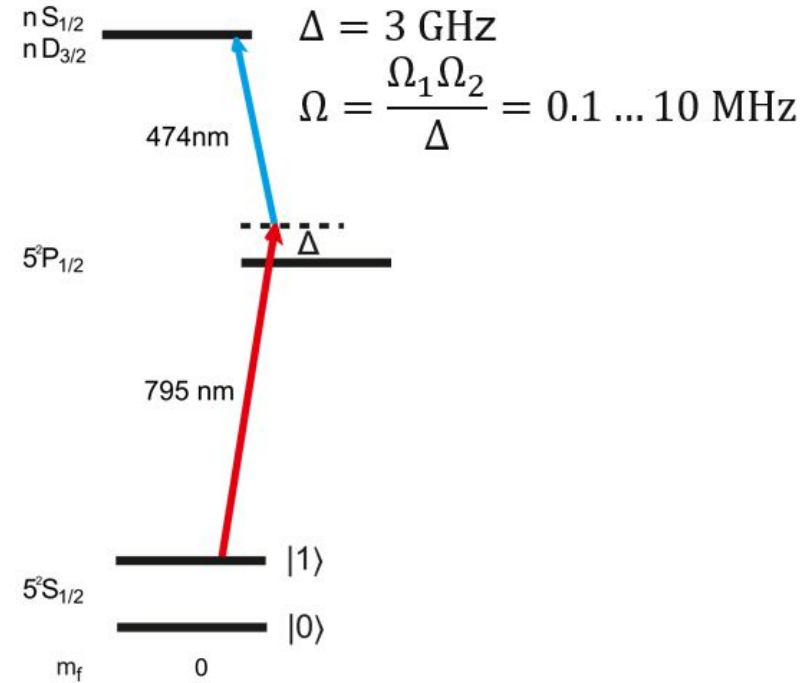
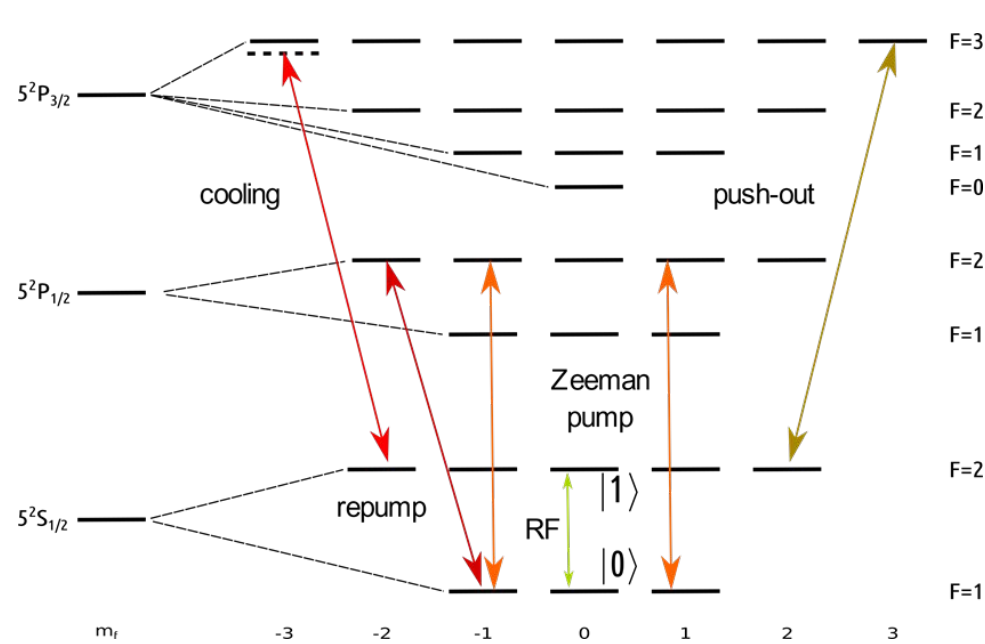
MSU
Quantum
Technology
Center

План доклада:

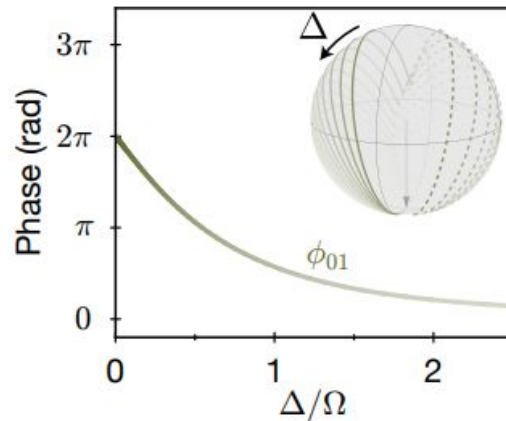
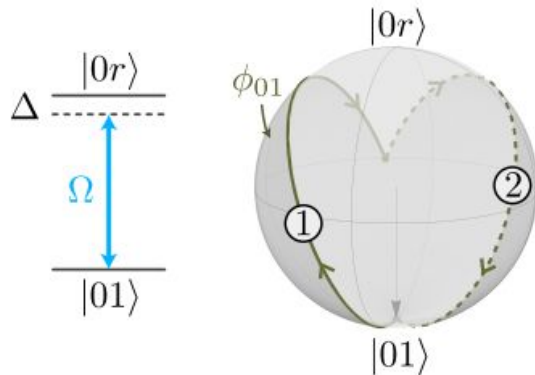
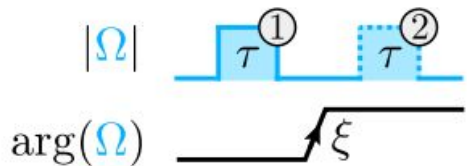
- Вычислительные гейты на холодных атомах ^{87}Rb
- Экспериментальная реализация
- Последние результаты
- Анализ влияния шумов лазеров



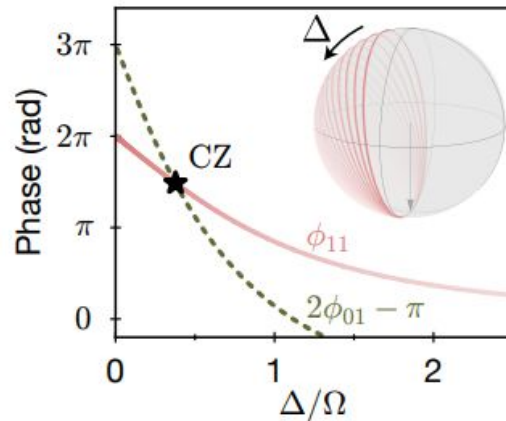
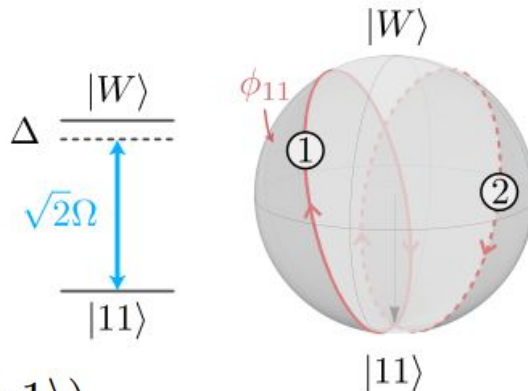
Кубиты на атомах рубидия



Двухкубитные гейты: CZ



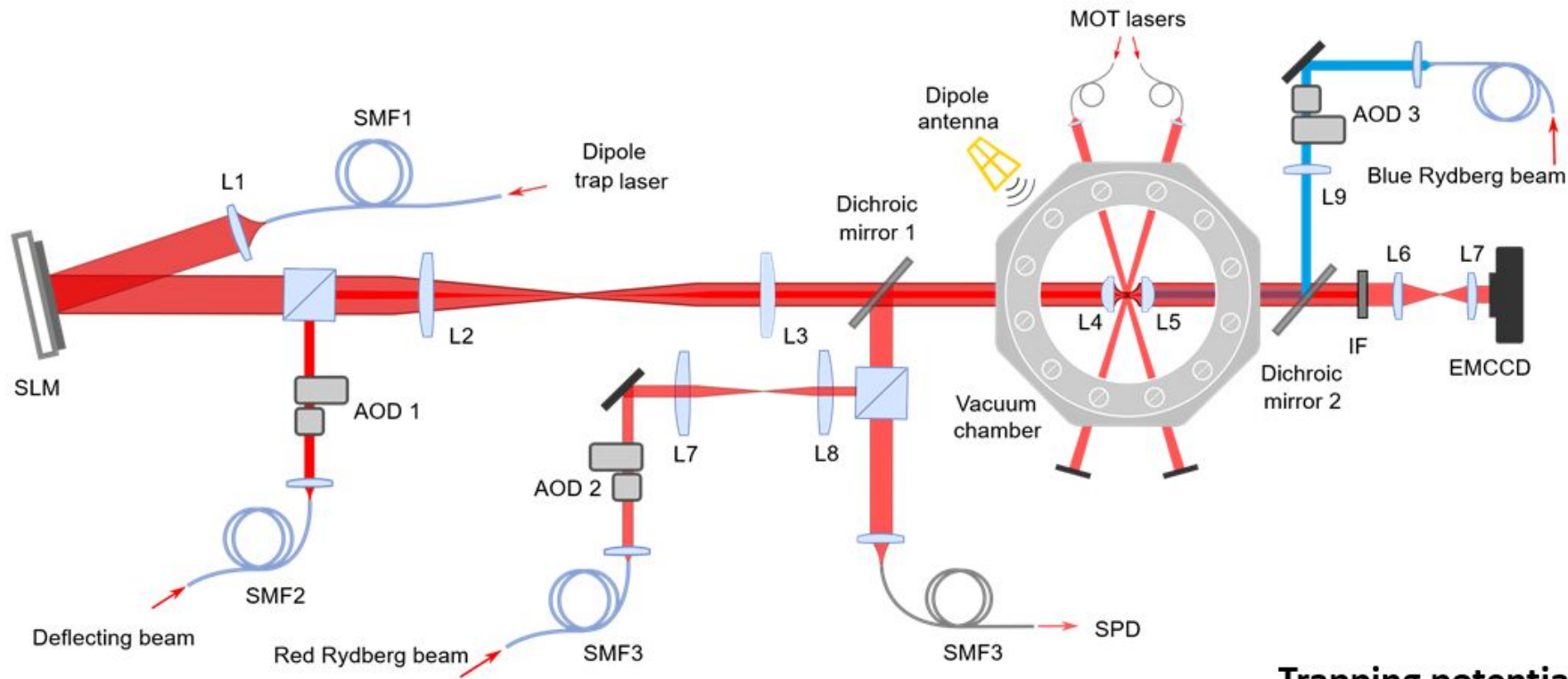
- $|00\rangle \rightarrow |00\rangle$
- $|01\rangle \rightarrow |01\rangle e^{i\phi_{01}}$
- $|10\rangle \rightarrow |10\rangle e^{i\phi_{10}}$
- $|11\rangle \rightarrow |11\rangle e^{i\phi_{11}}$



$$|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1r\rangle + |r1\rangle)$$



Экспериментальная установка



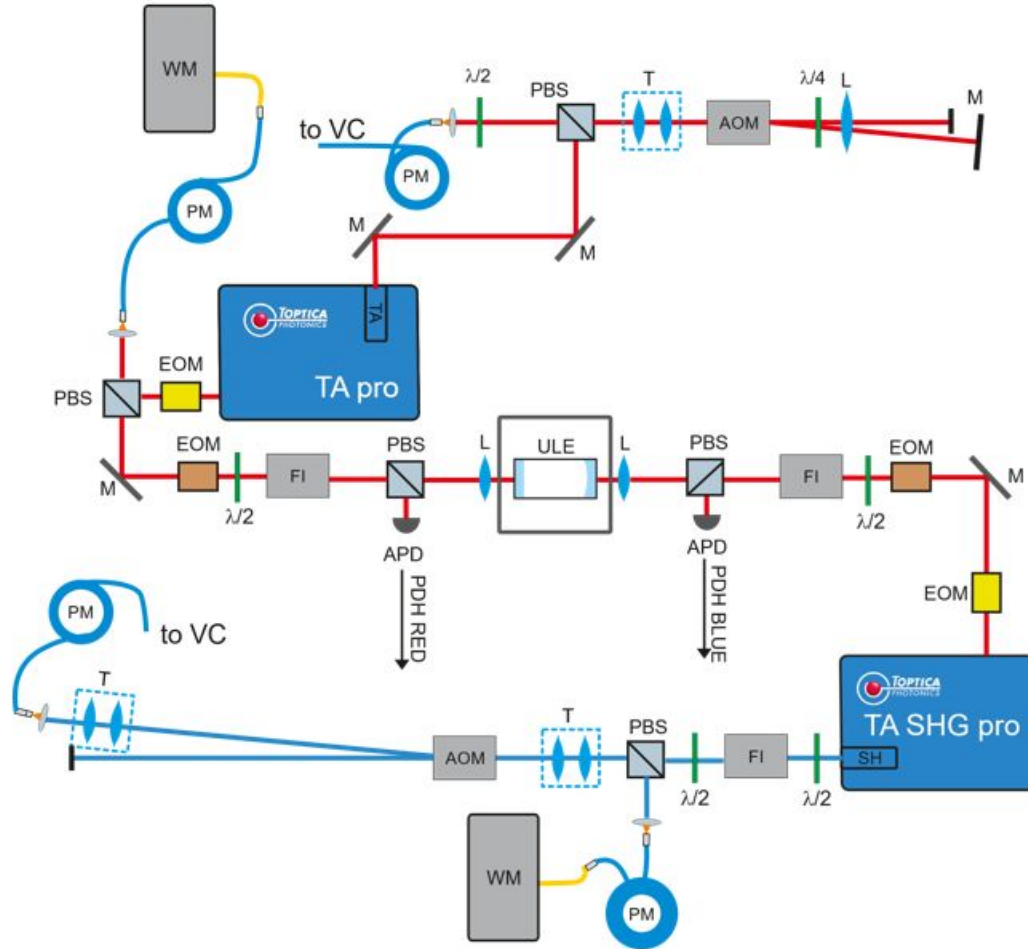
- Laser power before SLM ~ 1.8 W
- Power per trap (852 nm) ~ 4 mW (~ 1.2 mK trap depth)
- Moving tweezer (830 nm) ~ 30 mW (~ 14 mK)

Trapping potential

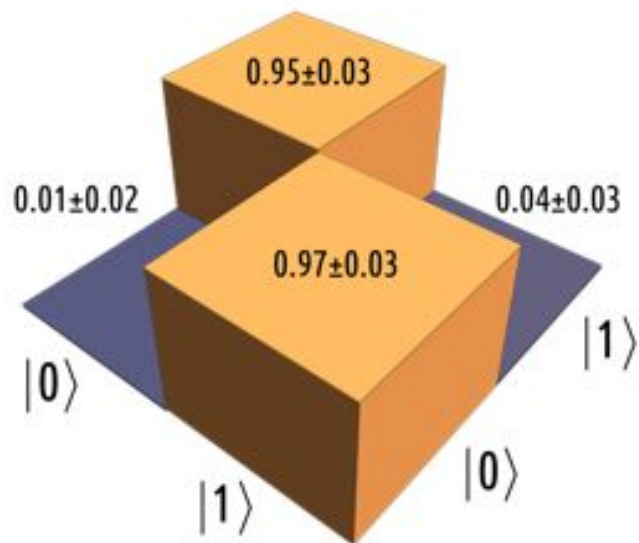
$$U(\mathbf{r}) = \frac{3\pi c^2}{2\omega^3} \frac{\Gamma}{\Delta} I(\mathbf{r})$$



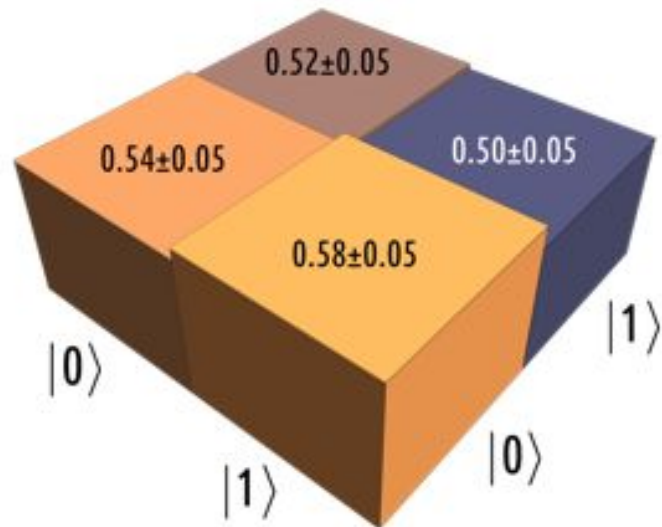
Экспериментальная установка



Последние результаты



X gate

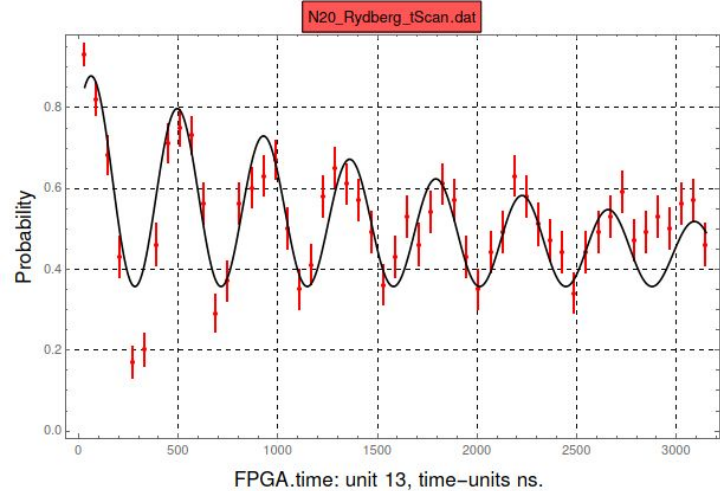
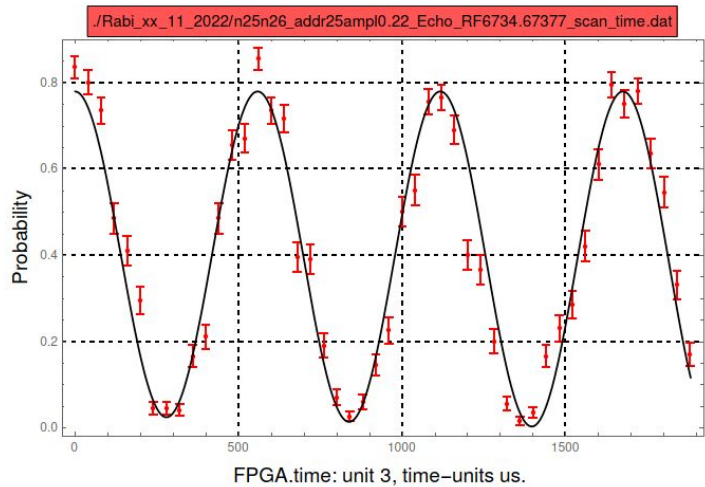
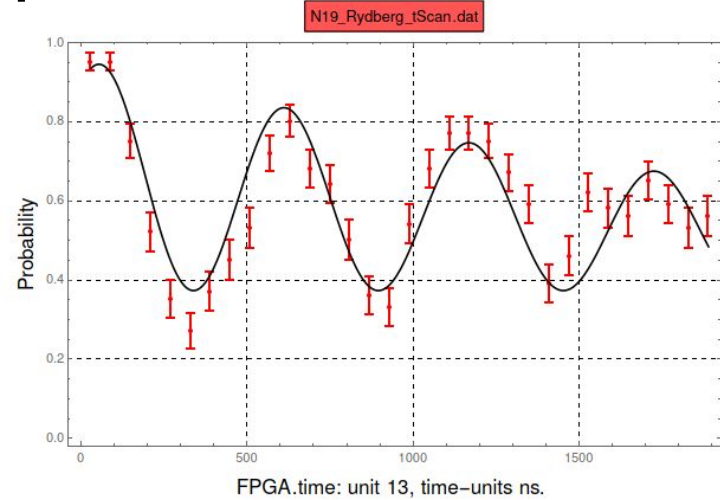
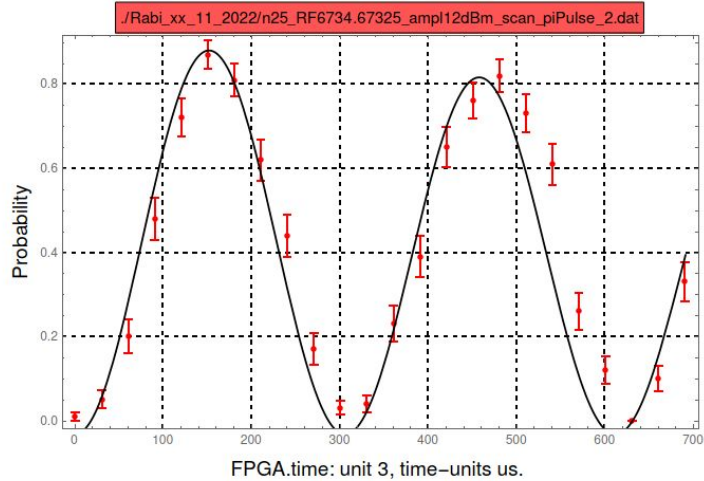


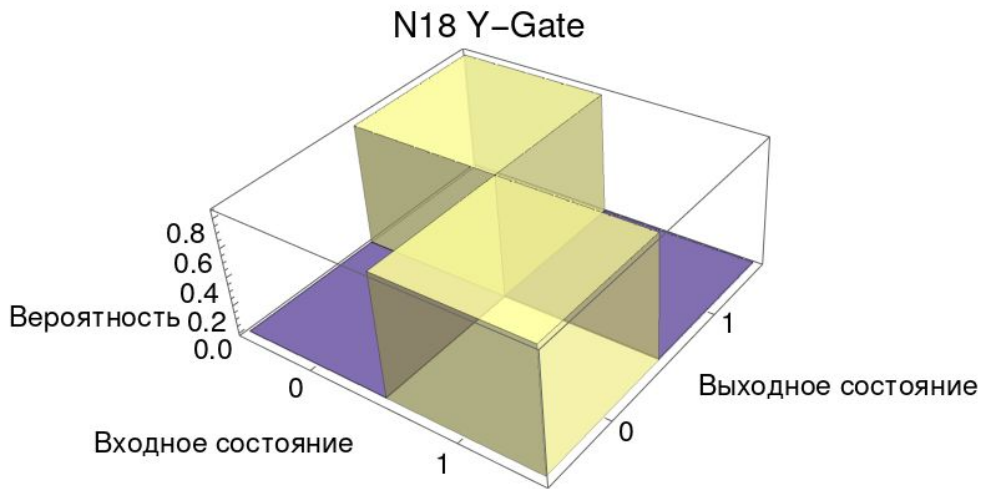
Hadamard gate

$$\tilde{V} = 96.0 \pm 1.6\%$$



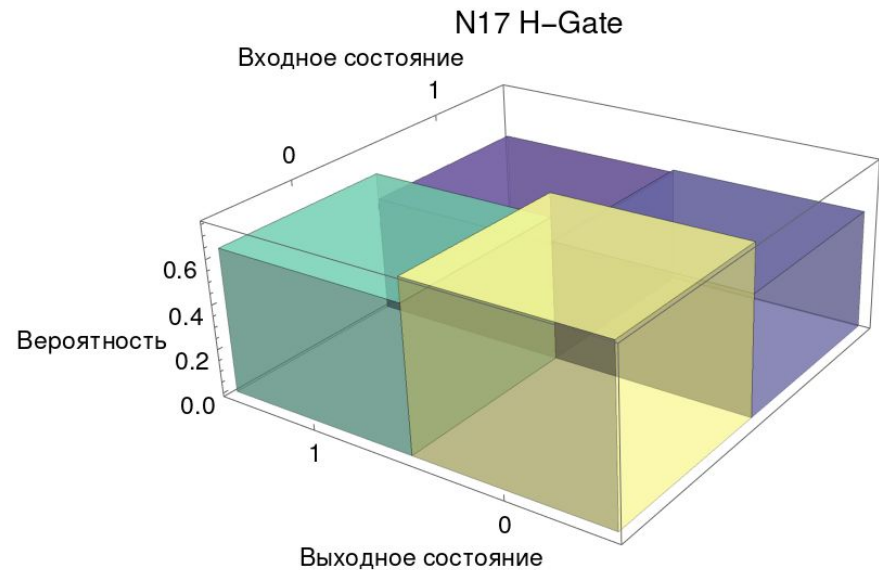
Осцилляции Раби





Gate error= 0.9 ‰

Error of the error= 2.5 ‰

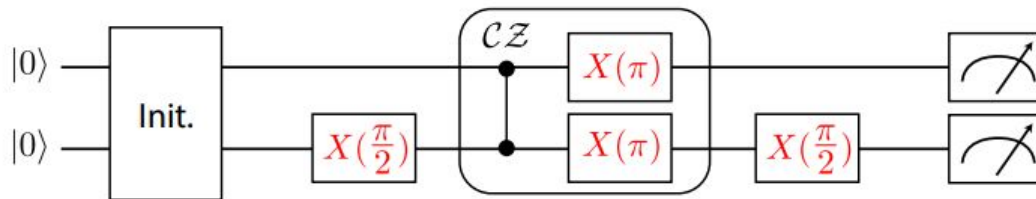


Gate error= 0.5 ‰

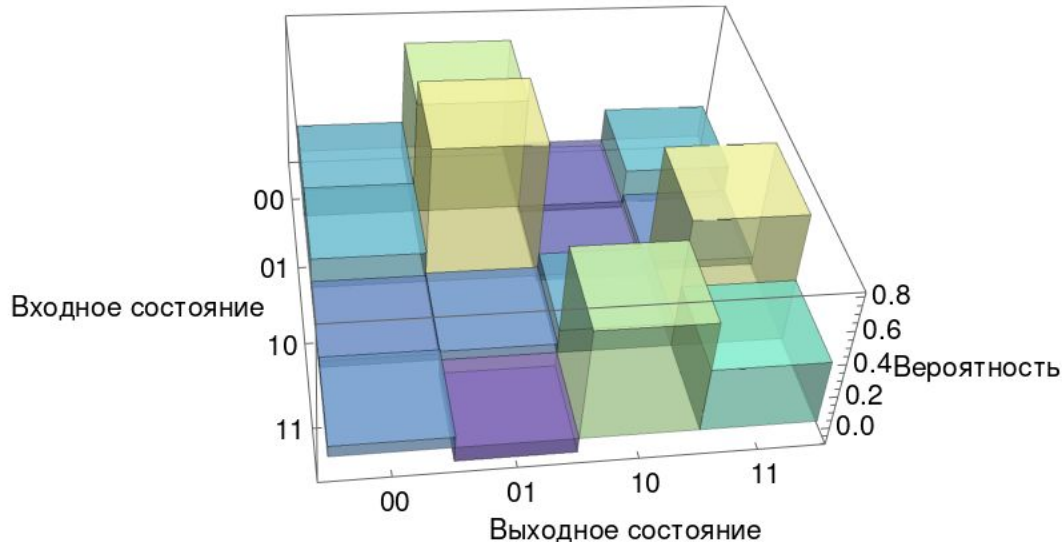
Error of the error= 4.7 ‰



Двухкубитные операции: CNOT



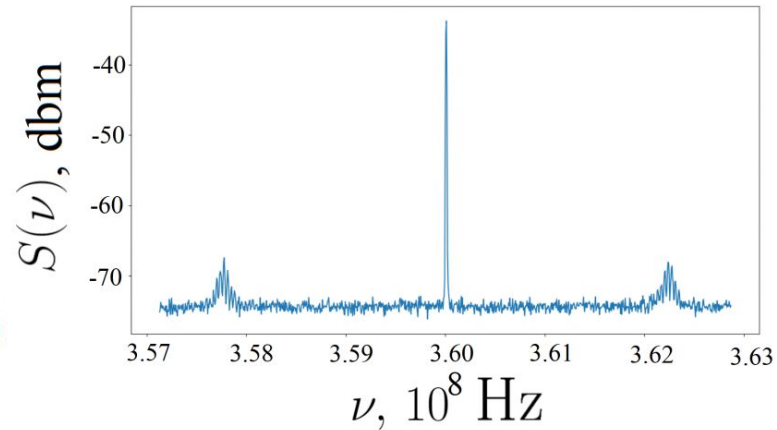
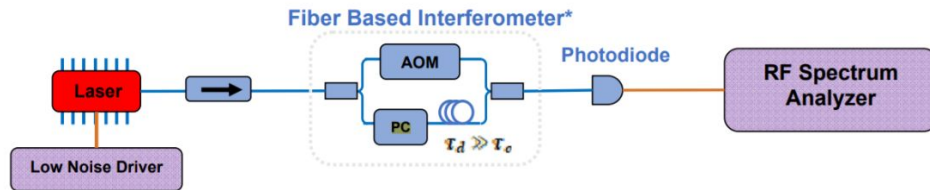
Atom HCzH-Gate



Fidelity = 0.52

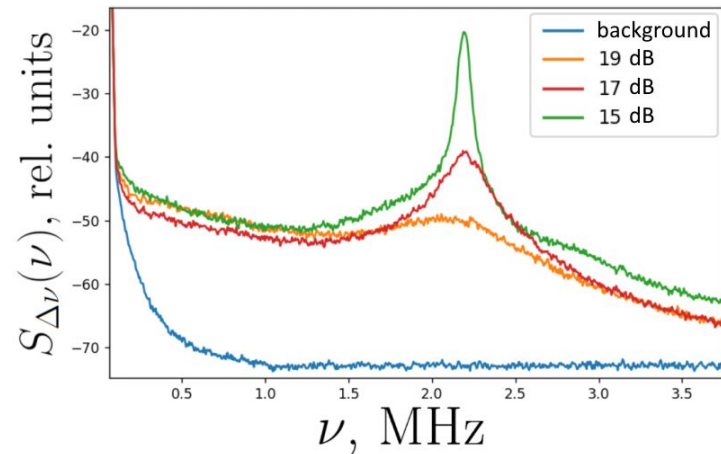
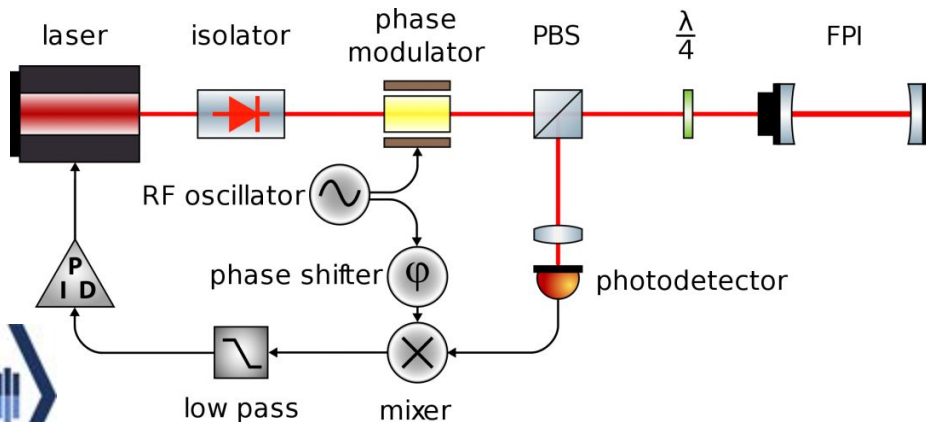


Гетеродинный метод получения спектра:



$$2S_E(f)/E_0^2 = S_\phi(f) = S_{\delta\nu}(f)/f^2$$

Измерение сигнала системы стабилизации лазера:



Численное моделирование

$$\left\{ \begin{aligned} i\hbar\partial_t\Psi_1 &= \frac{\hbar\Omega_1}{2}\Psi_r + \hbar\Delta_1\Psi_1 \\ i\hbar\partial_t\Psi_2 &= \frac{\hbar\Omega_2}{2}\Psi_r + \hbar\Delta_2\Psi_2 \\ i\hbar\partial_t\Psi_r &= \frac{\hbar\Omega_1}{2}\Psi_1 + \frac{\hbar\Omega_2}{2}\Psi_2, \end{aligned} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{aligned} i\hbar\partial_t\Psi_1 &= \hbar(\Delta_1 + \omega_{AC1})\Psi_1 + \frac{\hbar\Omega_R}{2}\Psi_2 \\ i\hbar\partial_t\Psi_2 &= \hbar(\Delta_2 + \omega_{AC2})\Psi_2 + \frac{\hbar\Omega_R}{2}\Psi_1 \end{aligned} \right.$$

$|\Delta_1 - \Delta_2| \ll \Delta_{1,2}$
 $\partial_t\Psi_r = 0$

$\Omega_R = \frac{\Omega_1\Omega_2}{2\Delta}, \omega_{AC1,2} = \frac{\Omega_{1,2}^2}{4\Delta}, \Delta = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$

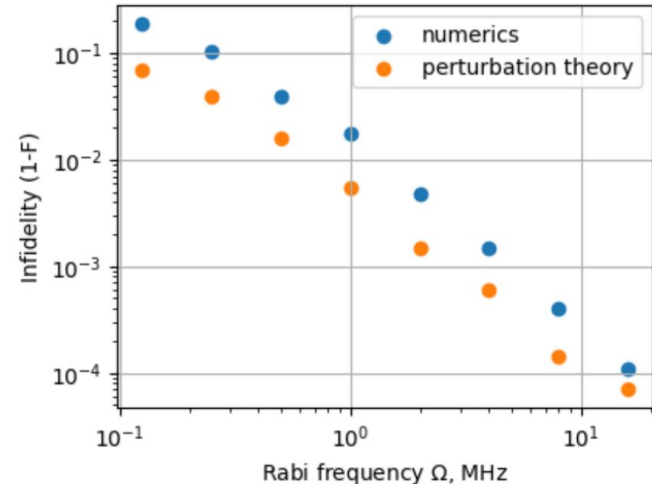
$$\hat{H} = \frac{\hbar(\Delta + \nu(t))}{2}\sigma_z + \frac{\hbar\Omega(1 + \varepsilon(t))}{2}\sigma_x$$

Амплитудный шум:

$$\overline{\rho_{ee}(t)} = \frac{1}{2} - \frac{\cos\Omega t}{2} \exp\left[-\frac{\Omega^2 t^2}{2} \int \frac{\sin^2(\omega t/2)}{(\omega t/2)^2} S_\varepsilon(\omega) \frac{d\omega}{2\pi}\right]$$

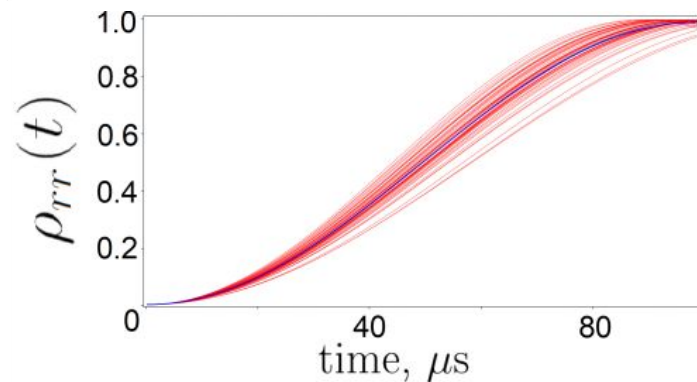
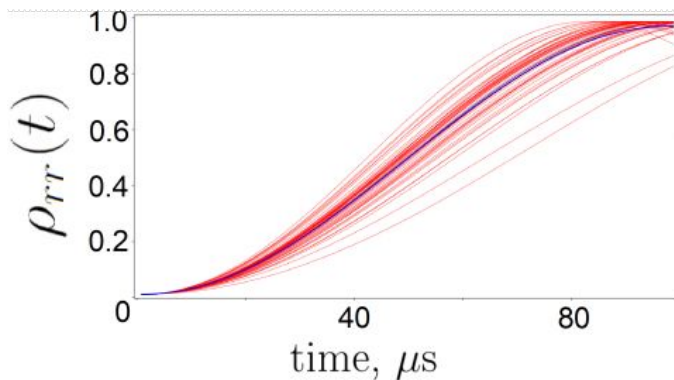
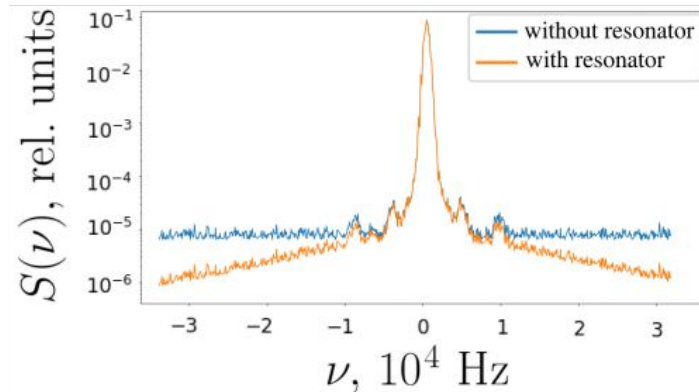
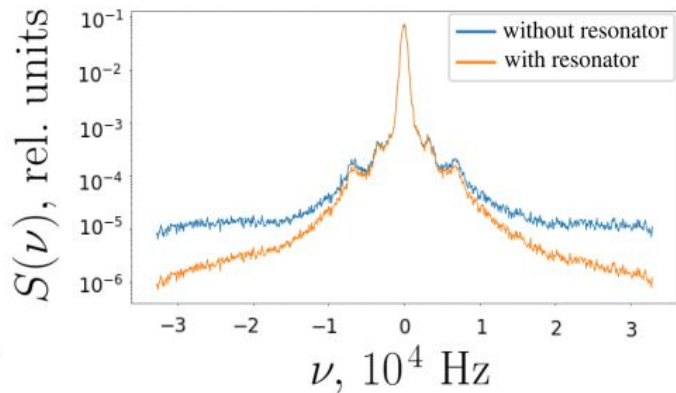
Частотный шум:

$$\overline{\rho_{ee}(t)} = \frac{1}{2} - \cos\Omega t \left(\frac{1}{2} - \frac{t^2}{8} \int W_1(\omega, \Omega, t) S_\nu(\omega) \frac{d\omega}{2\pi} \right) + \sin\Omega t \left(\frac{t^2}{8} \int W_2(\omega, \Omega, t) S_\nu(\omega) \frac{d\omega}{2\pi} \right)$$



Анализ частотного шума

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\pi\omega}{\Delta\nu_{FSR}}}$$



Excitation error: Red - 0.2% \longrightarrow 0.1%

Blue - 0.5% \longrightarrow 0.3%



Альтернативные оценки

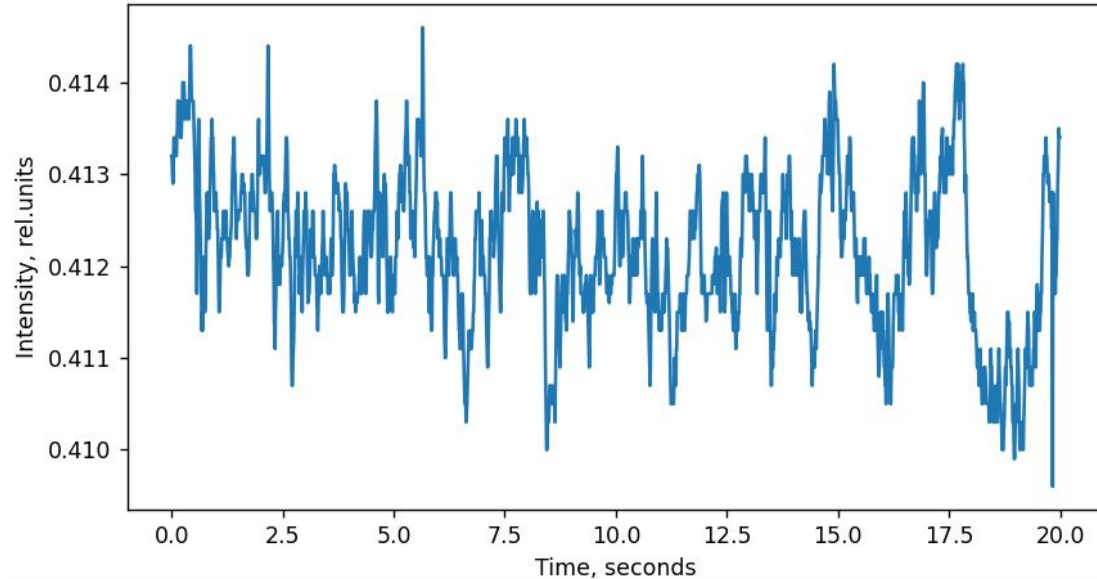
Частотный шум: $2S_E(f)/E_0^2 \approx \frac{h_0}{f^2 + (\pi h_0)^2} + \frac{h_g}{f_g^2} \exp\left[-\frac{(f - f_g)^2}{2\sigma_g^2}\right] + \frac{h_g}{f_g^2} \exp\left[-\frac{(f + f_g)^2}{2\sigma_g^2}\right]$

$$\mathcal{E} \approx 2s_{g1}(\pi f_{g1}\tilde{\Omega}_0)^2 \frac{1 - (-1)^{2N} \cos(4\pi^2 N f_{g1}/\tilde{\Omega}_0)}{(\tilde{\Omega}_0^2 - 4\pi^2 f_{g1}^2)^2} + 2s_{g2}(\pi f_{g2}\tilde{\Omega}_0)^2 \frac{1 - (-1)^{2N} \cos(4\pi^2 N f_{g2}/\tilde{\Omega}_0)}{(\tilde{\Omega}_0^2 - 4\pi^2 f_{g2}^2)^2}$$

$$\mathcal{E} \sim 1\%$$

Амплитудный шум:

$$\mathcal{E} = \frac{\pi^2 N^2 (\sigma_{\alpha I1}^2 + \sigma_{\alpha I2}^2)}{4} < 10^{-4}$$



Выводы:

- Продемонстрированы возможность захвата атомов рубидия в двухмерную структуру с временем жизни ~ 10 с, и возможность осуществления однокубитных операции с фиделити $\sim 96\%$ и двухкубитных операций.
- Анализ влияния шумов показал незначительное влияние флуктуаций интенсивности лазера на вероятность возбуждения ридберговского состояния атома. Флуктуации частоты лазера вносят ошибку порядка нескольких процентов.

