



Quantum Optical
Technologies
laboratory



Physics Faculty
Lomonosov MSU

Голографические ловушки для одиночных нейтральных атомов

И.Б.Бобров, С.Р.Самойленко, А.И.Разжигаев, С.С.Страупе,
С.П.Кулик

Лаборатория квантовых оптических технологий, кафедра квантовой электроники,
физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

18 декабря 2017 г.

Мотивация: квантовые регистры

Микродипольные ловушки для одиночных атомов

Голографические микроловушки

Мотивация: квантовые регистры

Микродипольные ловушки для одиночных атомов

Голографические микроловушки

- ▶ A **scalable** physical system with **well characterized** qubits
- ▶ The ability to initialize the state of the qubits to a simple fiducial state, such as $|000 \dots\rangle$
- ▶ Long relevant decoherence times, much longer than the gate operation time
- ▶ A «universal» set of quantum gates
- ▶ A **qubit-specific measurement capability**

Pros:

- ▶ Большие времена когерентности:
 $T_1 > 5$ с [Kuhr et al. PRA 72, 023 (2005)]
 $T_2 > 200$ мс [J. Yang et al. PRL 117, 123201 (2016)]
- ▶ Быстрые и качественные однокубитные вентили
($\tau_{\pi/2} \simeq 40$ нс $\sim 10^{-6} T_2^*$ [Jones et al. PRA, 75 (2007)])
- ▶ Хорошие перспективы масштабируемости (см. далее)

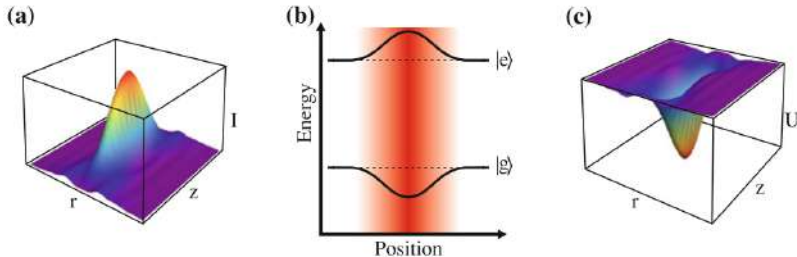
Cons:

- ▶ Низкое качество двухкубитных вентилей ($F \sim 0.85$)

Мотивация: квантовые регистры

Микродипольные ловушки для одиночных атомов

Голографические микроловушки

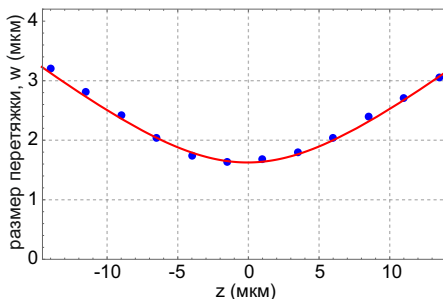
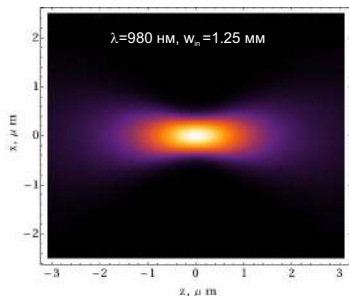


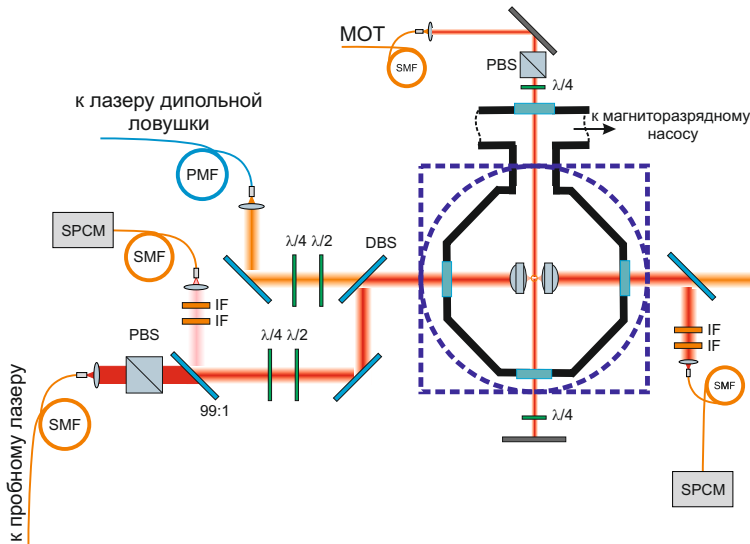
Потенциал: $U(\mathbf{r}) = \frac{3\pi c^2}{2\omega^3} \frac{\Gamma}{\Delta} I(\mathbf{r})$

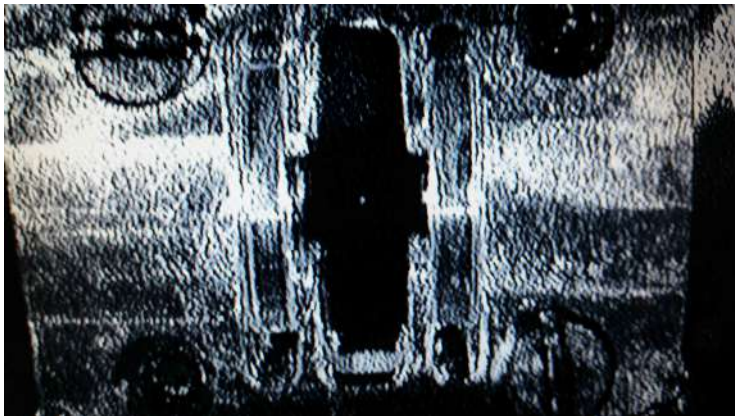
Сечение рассеяния фотонов ловушки $\sim \left(\frac{\Gamma}{\Delta}\right)^2$

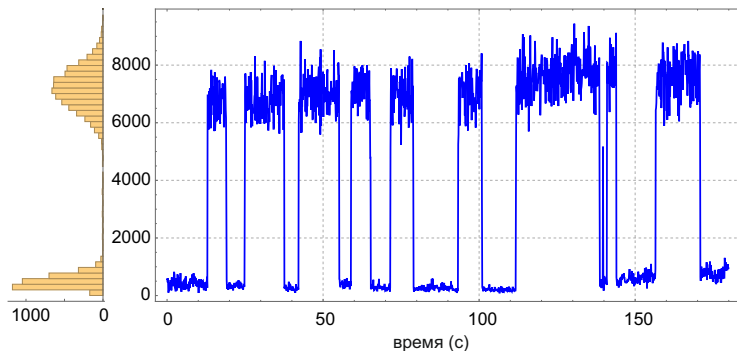
Глубина потенциала ~ 1 мК

- ▶ Диодный лазер, длина волны 980 нм/830 нм, мощность 30 мВт/2 мВт
- ▶ Фокусировка асферической линзой с $f = 3.1$ мм
- ▶ Глубина потенциала ~ 1 мК \Rightarrow лазерное охлаждение





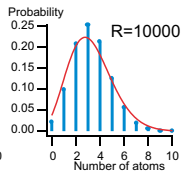
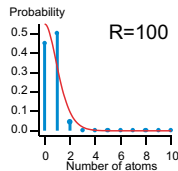
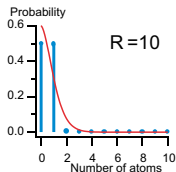
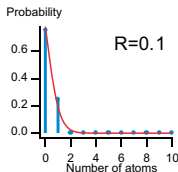
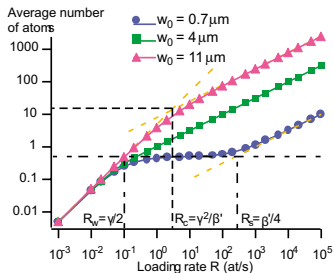




Кинетика загрузок:
$$\frac{dN}{dt} = R - \gamma N - \beta N(N - 1)$$

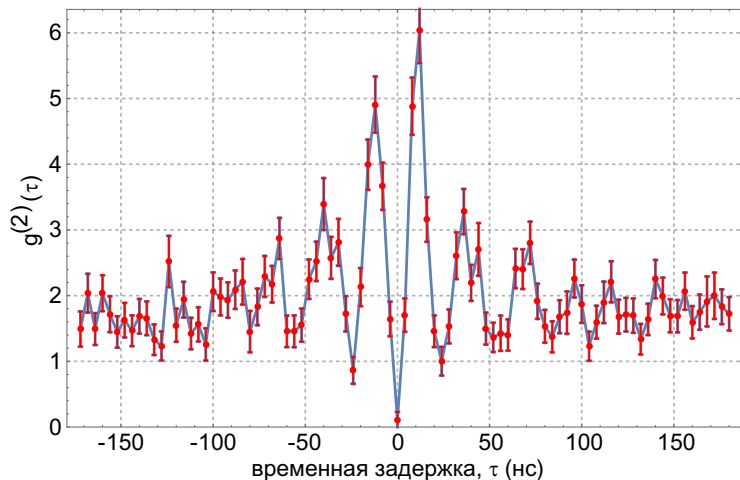
N. Schlosser, G. Reymond, and P. Grangier. Phys. Rev. Lett. **89**, 023005 (2002)

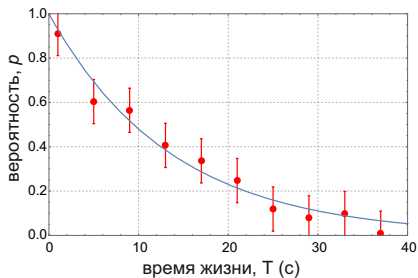
$$\frac{dN}{dt} = R - \gamma N - \beta N(N - 1)$$



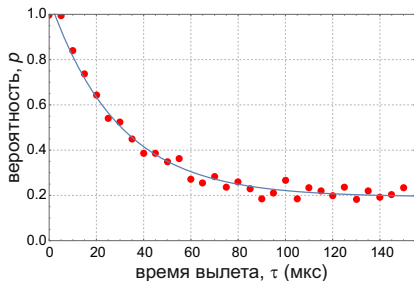
¹N. Schlosser, G. Reymond, and P. Grangier, Phys. Rev. Lett. **89**, 023005 (2002)

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \langle n_2(t) \rangle}$$





$$t = (10 \pm 1) \text{ c}$$

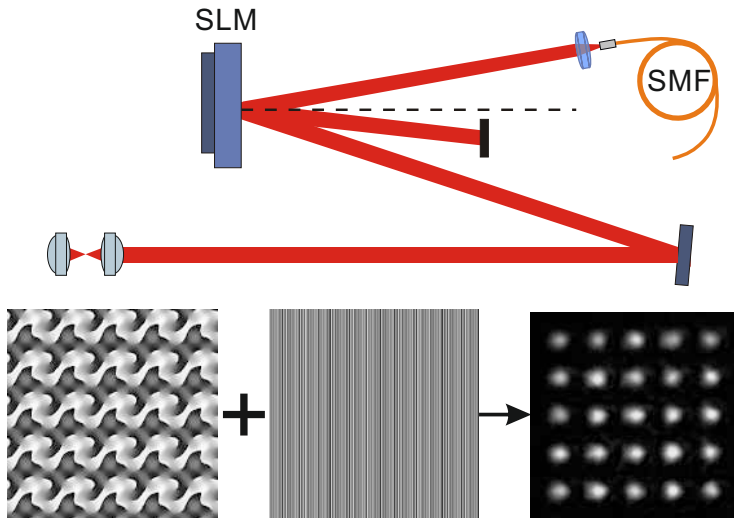


$$T \sim 30 \text{ мкК}$$

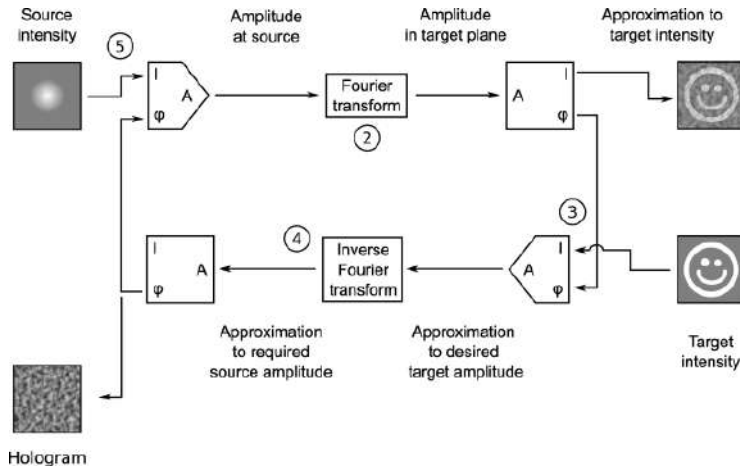
Мотивация: квантовые регистры

Микродипольные ловушки для одиночных атомов

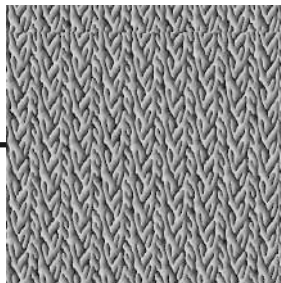
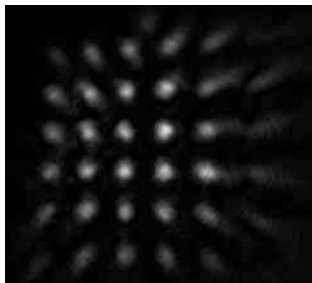
Голографические микроловушки



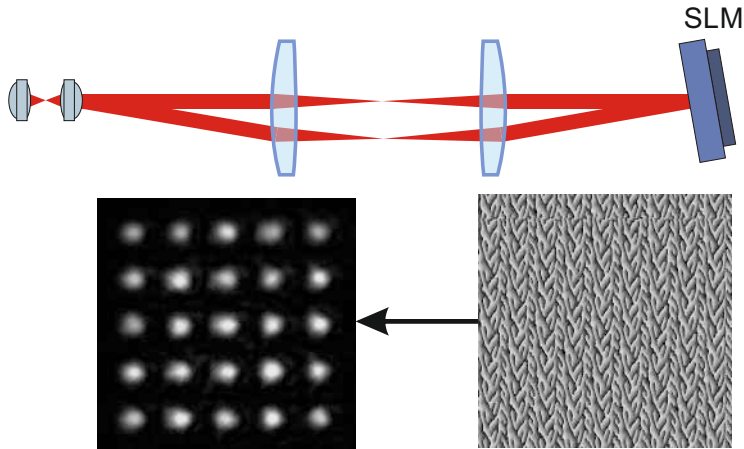
Алгоритм Герцберга-Сакстона

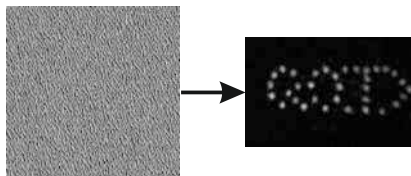
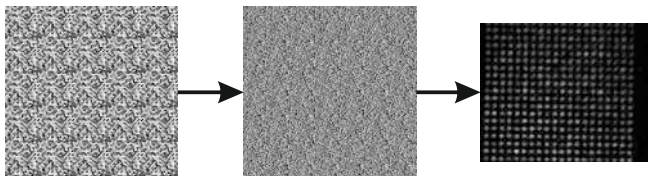
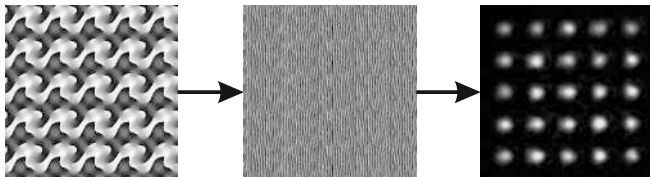


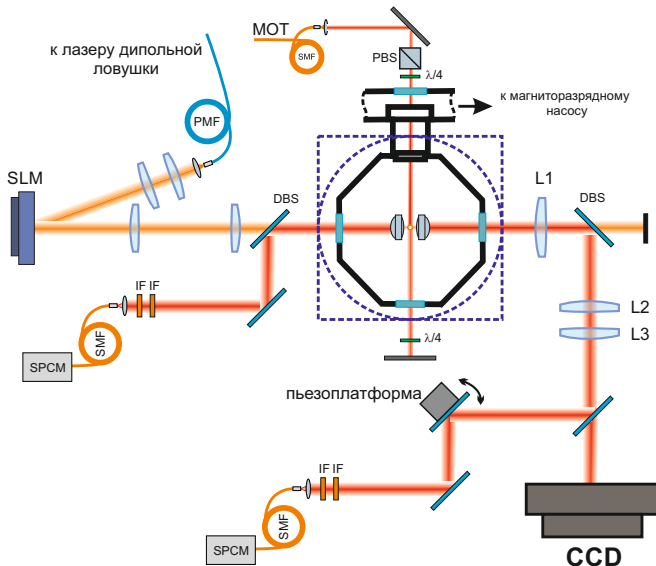
Поле ограничено из-за конечной апертуры линз



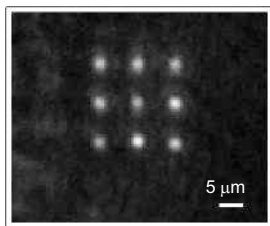
Сопрягающий телескоп увеличивает поле до $\sim 200 \times 200$ мкм



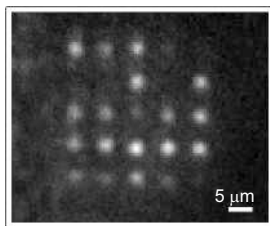




Снимки охлаждаемой до -20°C CCD камерой



Экспозиция 25 с
Мощность 11 мВт

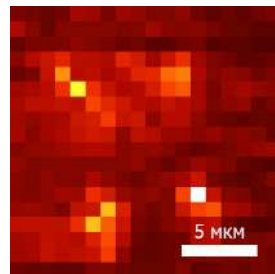
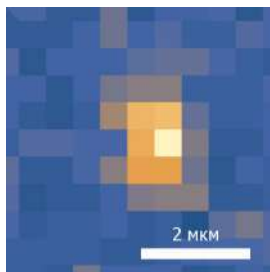
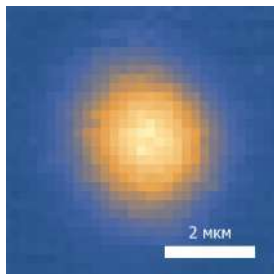


Экспозиция 30 с
Мощность 33 мВт



Экспозиция 30 с
Мощность 23 мВт

Растровое сканирование подвижным зеркалом, детектирование лавинным фотодиодом – больше сигнал/шум, меньше экспозиция



Экспозиция по
триггеру ⇒
единственный атом

- ▶ Уменьшить дисперсию глубины ловушек. Например, можно использовать измеренную интенсивность на новом шаге алгоритма ГС.
- ▶ Увеличить полную мощность ловушки, есть запас в 2-3 раза.
- ▶ Реализовать динамическое перемещение ловушек. Оценить нагрев и потери атомов при перемещении.
- ▶ Реализовать систему активного трекинга положения адресующего зеркала. Продемонстрировать адресные измерения и однокубитные операции, оценить кросс-толк.

- ▶ **Однородно заполненные решетки** – перемещение атомов (тестируется полностью голографический вариант)
- ▶ **Однокубитные операции с адресацией** – оптические рамановские переходы (лазерная система уже готова)
- ▶ **Двухкубитные операции** – ридберговские вентили, двухфотонное или трехфотонное возбуждение

- ▶ Разработана голографическая ловушка для одиночных атомов ^{87}Rb .
- ▶ Продемонстрирована возможность создания массивов ловушек в произвольной пространственной конфигурации.
- ▶ Возможные размеры массивов – более 400 ловушек
- ▶ Продемонстрирован устойчивый захват до 15 одиночных атомов.
- ▶ Продемонстрирована возможность быстрой индивидуальной адресации атомов в массиве