

# Оптимизация количества атомов тулия в магнито-оптической ловушке

Хоружий Кирилл

группа «Квантовые симуляторы и интегрированная фотоника»

Научный руководитель: Акимов А. В.

Научный консультант: Цыганок В. В.

27 июня 2023 г.

## Квантовые приборы:

- гравиметры
- часы
- транспортеры
- ...
- ...

## Квантовые симуляторы:

- реализация моделей ферми-хаббарда и бозе-хаббарда
- переход от БКШ к БЭК
- локализация Андерсона и многочастичная локализация
- формирование вихрей в БЭК
- ...

# Общая схема охлаждения

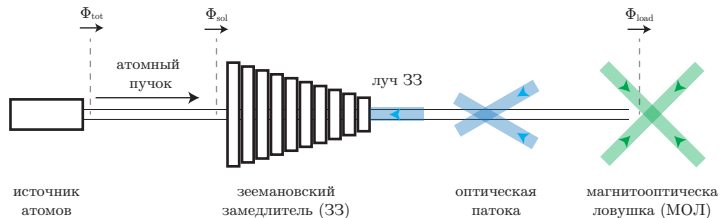


Рис. 1: Принципиальная схема установки

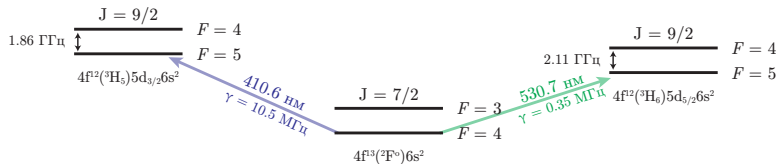


Рис. 2: Используемые в эксперименте атомные переходы

# Общая схема охлаждения

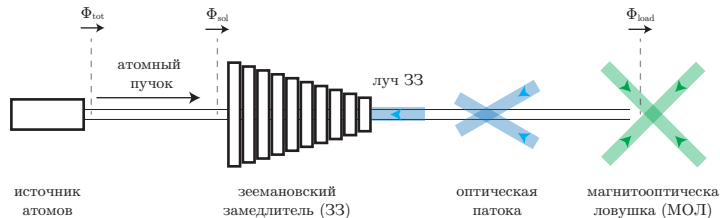


Рис. 1: Принципиальная схема установки

$t_{life}$  – время непрерывной работы установки

Ограничения на  $t_{life}$ :

- заканчиваются атомы
- напыление на зеркало перед замедлителем

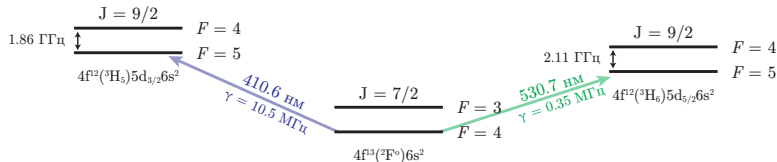


Рис. 2: Используемые в эксперименте атомные переходы

**Задача:**  
увеличить  $t_{life}$ , сохранив  $\Phi_{load}$

# Общая схема охлаждения

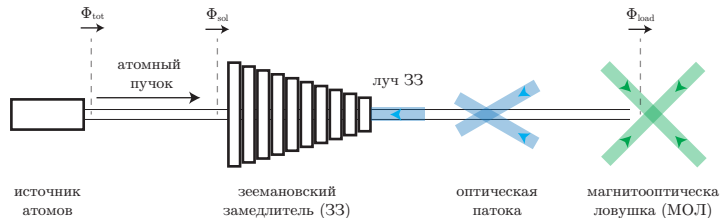


Рис. 1: Принципиальная схема установки

**Задача:**

увеличить  $t_{\text{life}}$ , сохранив  $\Phi_{\text{load}}$

$$t_{\text{life}} \propto 1/\Phi_{\text{tot}}(T)$$

$$\Phi_{\text{sol}} \propto \Phi_{\text{tot}}$$

$$\Phi_{\text{load}} = \eta \Phi_{\text{sol}}$$

$\eta$  – эффективность ЗЗ

Дальнейшие действия:

- понижение  $T$
- повышение  $\eta$

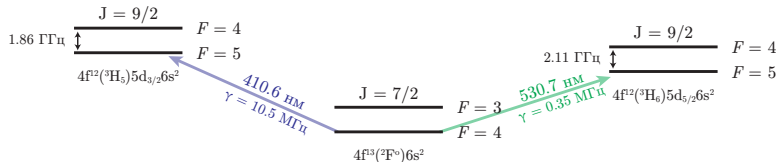


Рис. 2: Используемые в эксперименте атомные переходы

# Зеемановский замедлитель I

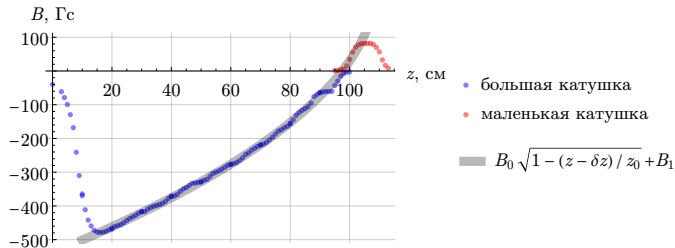


Рис. 3: Зависимость магнитного поля внутри зеемановского замедлителя от координаты  $z$ . Ток маленькой катушки  $I_{\text{small}} = 17$  А, ток большой катушки  $I_{\text{big}} = 35$  А.

Тормозящая сила:

$$F = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \frac{s}{1 + s + 4(\delta + kv)^2 / \Gamma^2}$$

Эффект Доплера:

$$1 \text{ м/с} \sim 2 \text{ МГц}$$

При этом:

$$\Gamma \sim 10 \text{ МГц}$$

Замедление

от 150 м/с до  $v_{\text{slow}} \sim 30$  м/с

Необходима подстройка резонанса магнитным полем:

$$\delta \rightarrow \delta + \mu B / \hbar$$

# Зеемановский замедлитель II

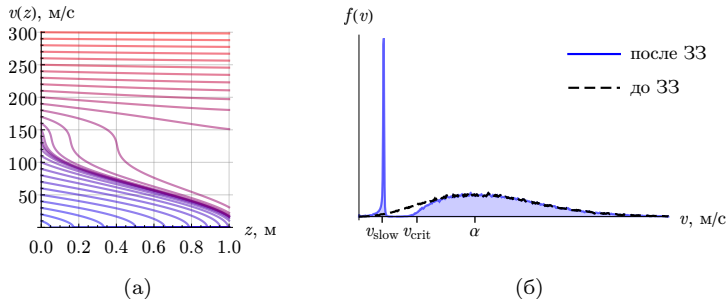


Рис. 4: а) Зависимость скорости атомов от координаты в зеемановском замедлителе для различных начальных скоростей. б) Характерное преобразование распределения атомов по скоростям после замедления.

Тормозящая сила:

$$F = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \frac{s}{1 + s + 4(\delta + kv)^2/\Gamma^2}$$

Уравнение движения:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}, \quad v \frac{dt}{dz} \stackrel{\Leftrightarrow}{=} \frac{dv}{dz} = \frac{F(v, z)}{m v(z)}$$

# Зеемановский замедлитель III

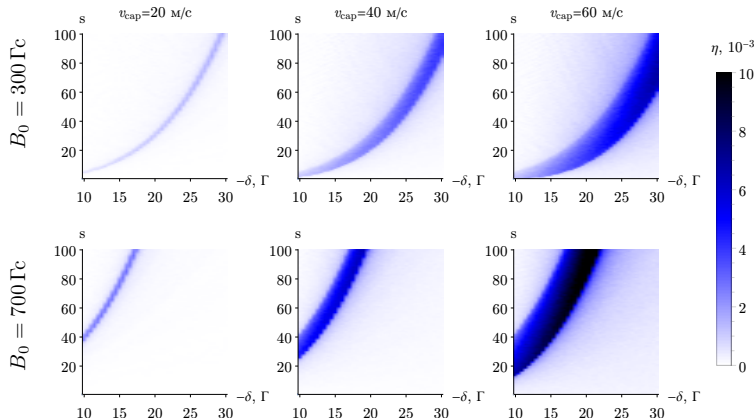


Рис. 5: Зависимость эффективности работы замедлителя  $\eta$  от отстройки луча ЗЗ  $\delta$ , параметра насыщения  $s$  для двух различных значений амплитуды магнитного поля в ЗЗ

Загрузка в МОЛ:  $v < v_{\text{cap}}$

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{load}}}{\Phi_{\text{sol}}} - \text{эффективность ЗЗ}$$

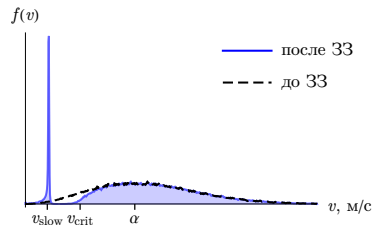


Рис. 6: Преобразование распределения атомов по скоростям после ЗЗ



# Магнито-оптическая ловушка (МОЛ)

Сила в МОЛ:

$$F = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \left( \frac{s}{1 + s + 4 \left( \frac{2\pi\delta - kv}{\Gamma} \right)^2} - \frac{s}{1 + s + 4 \left( \frac{2\pi\delta + kv}{\Gamma} \right)^2} \right)$$

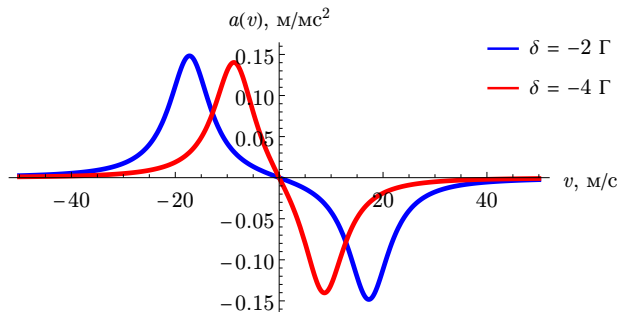


Рис. 7: Зависимость ускорения от силы светового давления, действующей на движущийся атом от его скорости

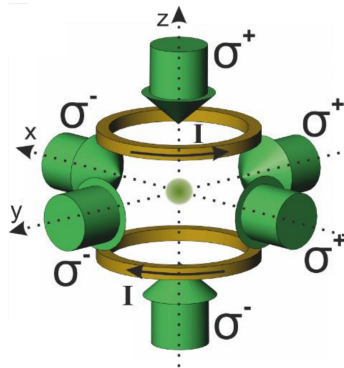


Рис. 8: Схема лучей МОЛ

# Магнито-оптическая ловушка (МОЛ)

Сила в МОЛ:

$$\mathbf{F} = \frac{\hbar \mathbf{k} \Gamma}{2} \left( \frac{s}{1 + s + 4 \left( \frac{2\pi\delta - \mathbf{k}\mathbf{v}}{\Gamma} \right)^2} - \frac{s}{1 + s + 4 \left( \frac{2\pi\delta + \mathbf{k}\mathbf{v}}{\Gamma} \right)^2} \right)$$

Магнитное поле  $\Rightarrow$  эффект Зеемана:

$$\mathbf{B} = \beta(-x, -y, 2z)^T/2, \quad \Delta E = -\mathbf{B}\boldsymbol{\mu}, \quad \delta \rightarrow \delta + \Delta E/\hbar$$

Движение в МОЛ  $\sim$  затухающий осциллятор:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = -\alpha \mathbf{v} - \varkappa \mathbf{r}$$

с коэффициентами

$$\varkappa = \frac{-\delta}{\Gamma/2\pi} \frac{8\mu_B \beta k s}{\left(1 + s + 4 \left( \frac{2\pi\delta}{\Gamma} \right)^2\right)^2}, \quad \alpha = \frac{-\delta}{\Gamma} \frac{8\hbar k^2 s}{\left(1 + s + 4 \left( \frac{2\pi\delta}{\Gamma} \right)^2\right)^2},$$

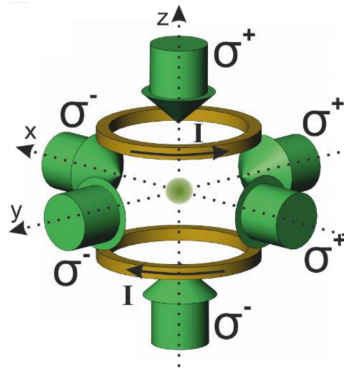


Рис. 7: Схема лучей МОЛ



# Количество атомов в МОЛ

Аппроксимация распределения:

$$f_{\text{fit}}(x, y) = B + A \exp \left( - \left( \frac{\tilde{x}}{\sigma_1} \right)^2 - \left( \frac{\tilde{y}}{\sigma_2} \right)^2 \right)$$

Полное число атомов:

$$N = \pi A \sigma_1 \sigma_2$$

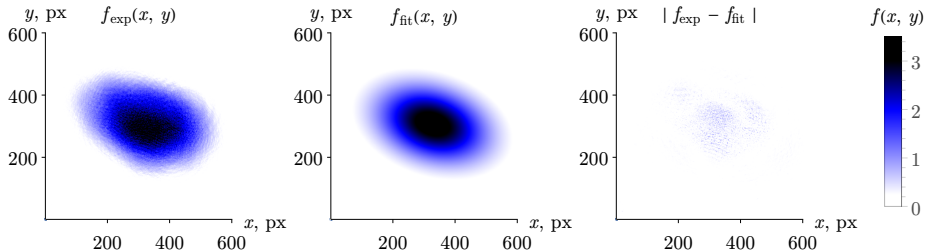


Рис. 10: Экспериментально сфотографированное распределение атомов  $f_{\text{exp}}$ , аппроксимация распределения атомов гауссовой функцией  $f_{\text{fit}}$  и остатки аппроксимации  $|f_{\text{exp}} - f_{\text{fit}}|$

# Загрузка МОЛ: оптимизация отстройки лучей МОЛ

Динамика количества атомов в МОЛ:

$$\frac{dN}{dt} = \Phi_{\text{load}} - \gamma N - \beta N^2 \quad \Rightarrow \quad N(t) = \sqrt{\frac{\Phi_{\text{load}}}{\beta}} \left(1 - e^{-t\sqrt{\beta\Phi_{\text{load}}}}\right)$$

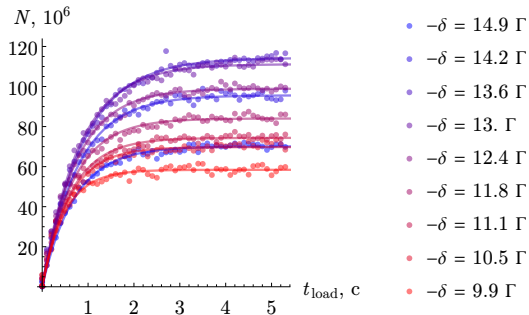


Рис. 11: Динамика загрузки МОЛ для различных значений отстройки  $\delta$  лучей МОЛ

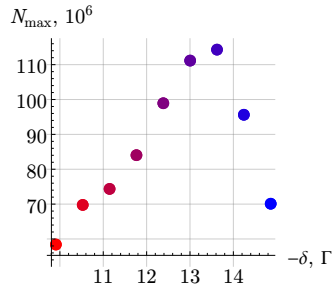
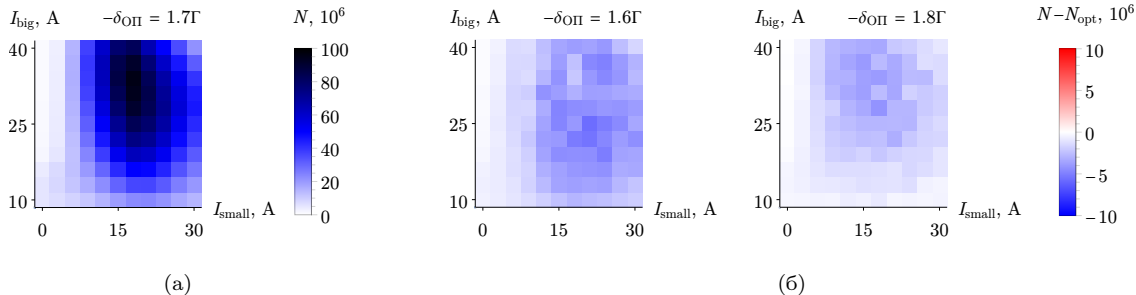


Рис. 12: Зависимость максимального числа атомов в МОЛ от величины отстройки  $\delta$  лучей МОЛ

# Загрузка МОЛ: оптимизация токов зеемановского замедлителя



**Рис. 13:** а) Зависимость количества загруженных за 5с в МОЛ атомов от величины токов малой и большой катушки ЗЗ. Зависимость снята при оптимальной отстройке лучей ОП  $\delta_{\text{оп}}$ . б) Зависимость количества загруженных за 5с при оптимальной отстройке лучей ОП в МОЛ атомов от величины токов малой и большой катушки ЗЗ. Зависимость снята при  $\delta_{\text{оп}}$  большей и меньшей оптимального значения в  $\delta_{\text{оп}} = 9.4\text{Г}$ .

# 2D-МОЛ

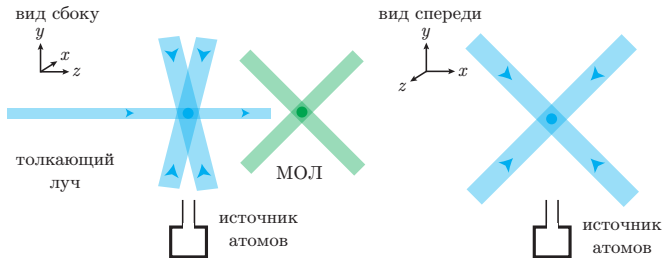


Рис. 14: Принципиальная схема лучей 2D-МОЛ

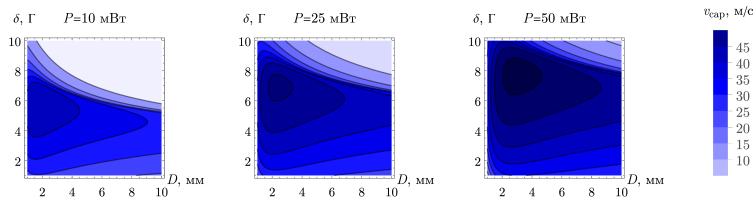


Рис. 15: Зависимость скорости захвата 2D-МОЛ для различных мощностей от отстройки  $\delta$  лучей 2D-МОЛ и размера  $D$  пучков

Загрузка МОЛ:

$$\Phi_{\text{load}} \propto \Phi_{\text{sol}} \left( \frac{v_{\text{cap}}}{\alpha} \right)^4$$

Скорости захвата:

$$m \int_{v_{\text{cap}}}^0 \frac{v}{F(v)} dv = D$$

Критическое расстояние:

$$l_{\text{крит}} \sim \sqrt{\frac{h_{\text{крит}} v_{\text{cap}}^2}{g}} \sim 1 \text{ м}$$

При  $T \sim 700^\circ\text{C}$ :

$$\Phi_{\text{load}}(v_{\text{cap}} = 40 \text{ м/с}) \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$$

- Построена модель ЗЗ. Моделированием методом Монте-Карло определена зависимость системы от параметров.
- Оптимизацией работы ЗЗ, ОП и МОЛ удалось уменьшить температуру с  $730^{\circ}\text{C}$  до  $680^{\circ}\text{C}$ , сохранив загрузку МОЛ  $\Phi_{\text{load}}$  на исходном уровне. Это увеличило время непрерывной работы установки в 5 раз: с 2 месяцев до 10 месяцев.
- Подготовлена альтернатива ЗЗ: 2D-МОЛ. Произведены основные оценки необходимые для работы 2D-МОЛ. После 2D-МОЛ мы можем получить загрузку МОЛ  $\Phi_{\text{load}}$  на исходном уровне, таким образом 2D-МОЛ является компактной перспективной заменой ЗЗ.



Спасибо за внимание!