

# Оптическая дипольная ловушка для атомов тулия на длине волны 1064 нм

Цыганок В.В., Першин Д.А., Хлебников В.А., Кумпилов Д.А., Пырх И.А., Руднев А.Е., Аксенцев П.,  
Федотова Е.А., Гайфутдинов Д.В., Кожокару И.С., Зыкова А.К., Хоружий К., Акимов А.В.

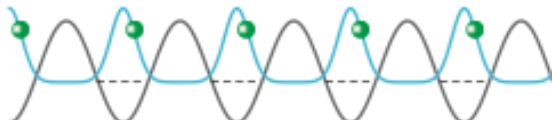
[tsyganokv22@gmail.com](mailto:tsyganokv22@gmail.com)



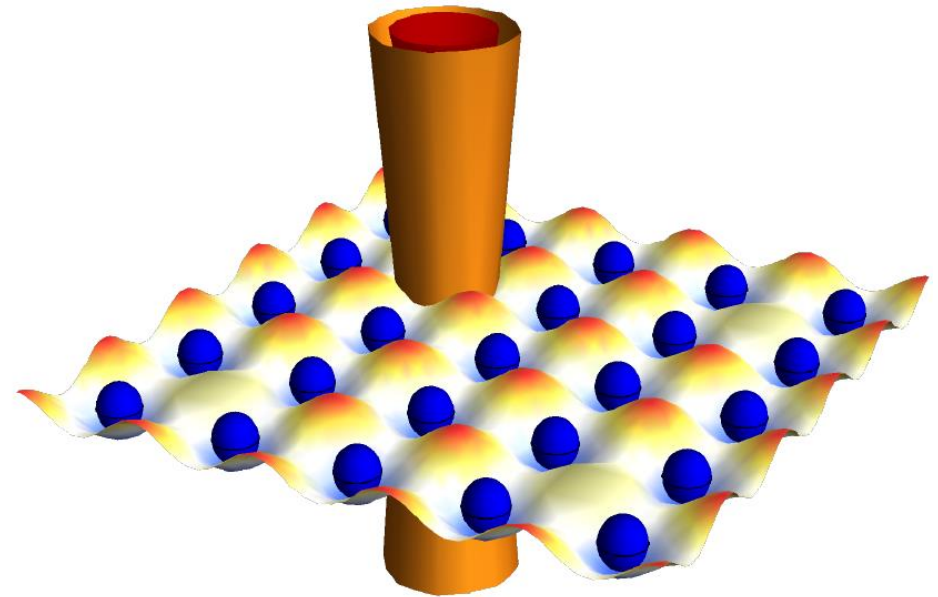
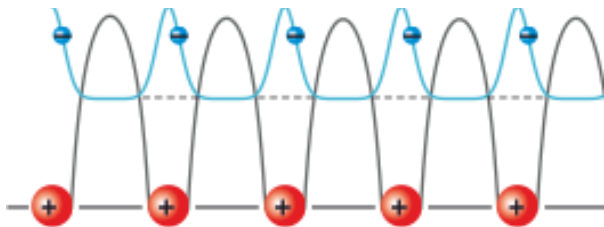
Новосибирск, 2022

# Основная идея – использование ультрахолодного атомарного газа тулия-169 в оптических решетках

Оптическая решетка



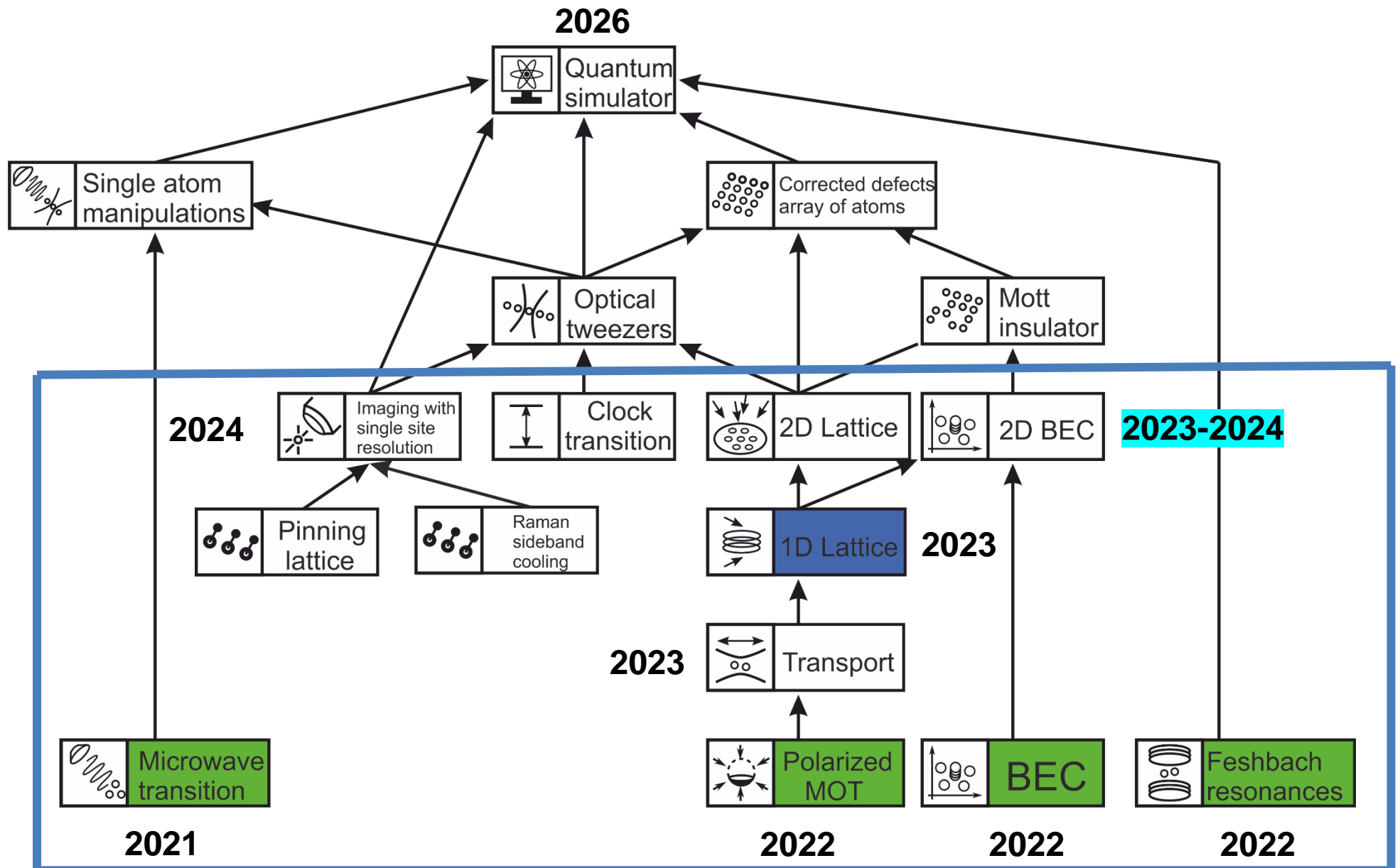
Атомарная решетка



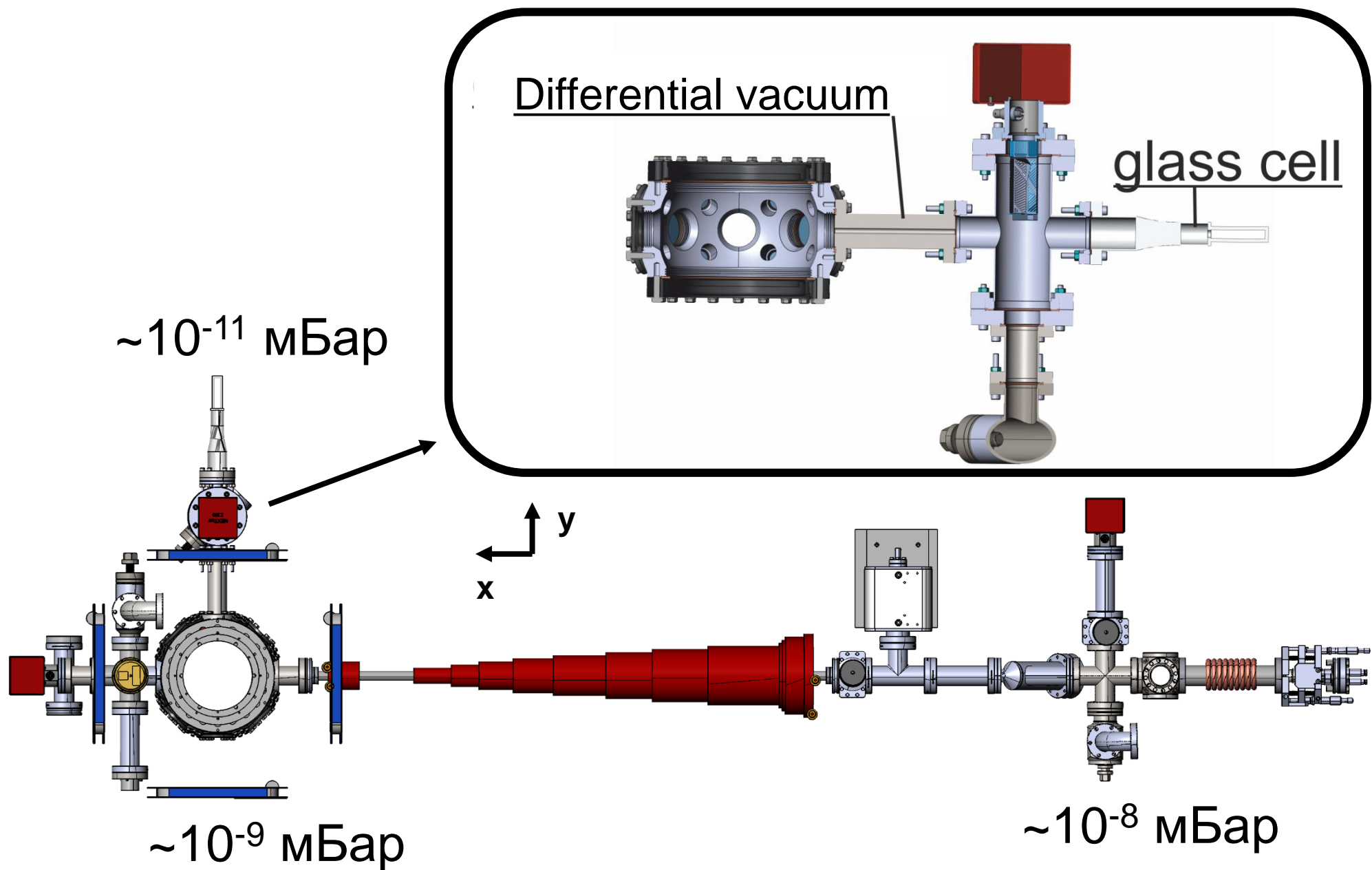
1. Начальное состояние – БЭК в оптической решетке
2. Контролируемые параметры
  - а) Взаимодействие – резонансы Фешбаха
  - б) Подвижность – глубина и наклоны потенциала оптической решетки (ОР)
  - в) Управляемая заполненность ОР
  - г) Управляемые дефекты

$$\hat{H} = -t \sum_{\langle i,j \rangle} (b_i^\dagger b_j + b_j^\dagger b_i) + \frac{U}{2} \sum_i \hat{n}_i (\hat{n}_i - 1) - \mu \sum_i \hat{n}_i$$

# Блок-схема квантового симулятора

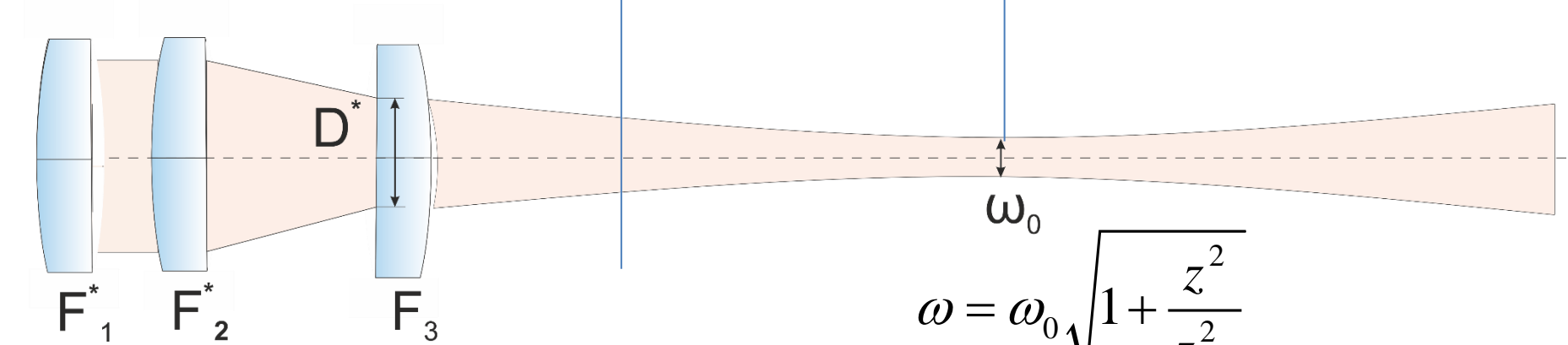
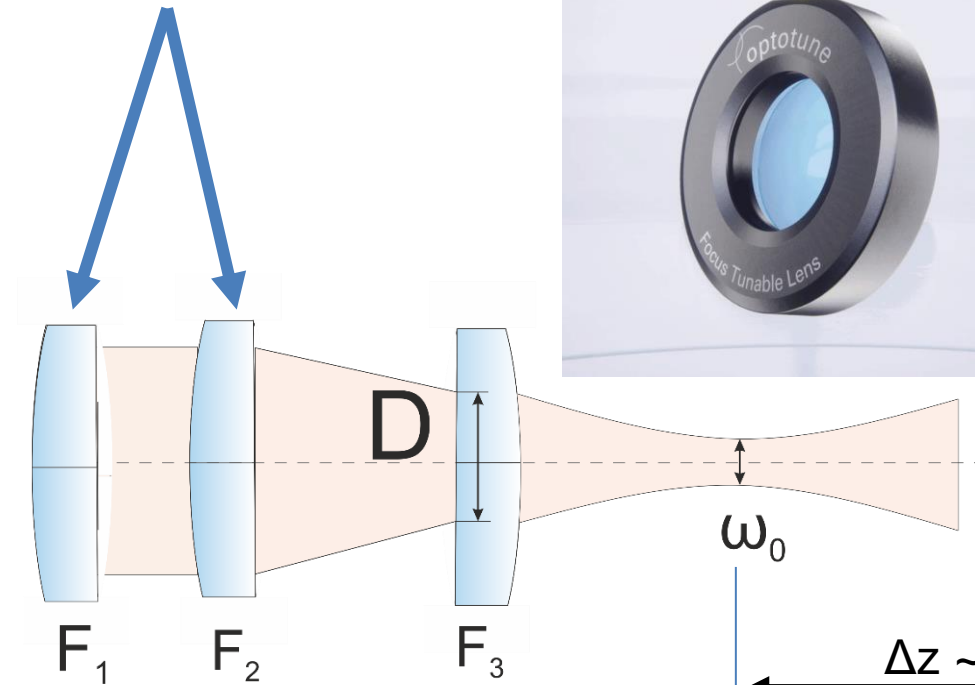


# Вакуумная система



# Оптический транспорт

Линзы с переменным фокусным расстоянием  
EL-16-40-TC Optotune



$$\omega_{waist} \approx F \frac{\lambda}{\pi D}$$

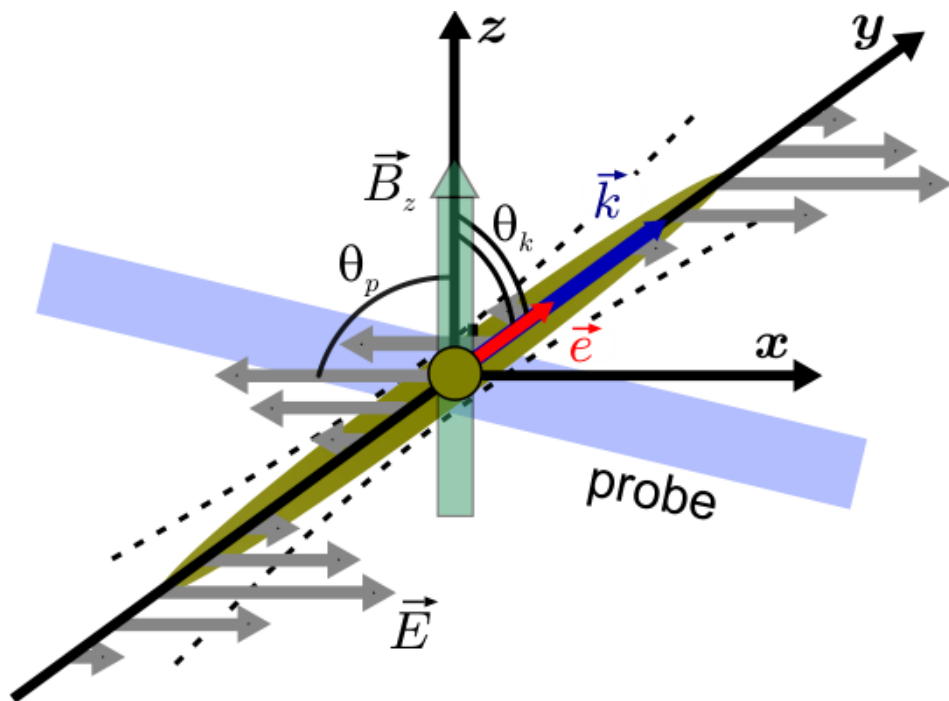
$$U_{depth} \sim \text{Re}[\alpha] \frac{Power}{\pi \omega_{waist}^2}$$

$$I(r, z) = \frac{2 Power}{\pi \omega^2(z)} \exp\left[-2 \frac{r^2}{\omega^2(z)}\right]$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_{rel}^2}}$$

# Поляризуемость атомов тулия на 532 нм

V.V. Tsyganok and et al. Phys. Rev. A **100**, 042502 (2019)



532 нм	Эксперимент	Теория
$\alpha_{\text{scalar}}$	547 а.е.	583 а.е.
$\alpha_{\text{tensor}}$	-145 а.е.	-140 а.е.
$\alpha_{\text{vector}}$	676 а.е.	684 а.е.

1064 нм	Теория
$\alpha_{\text{scalar}}$	160 а.е.
$\alpha_{\text{tensor}}$	-3 а.е.
$\alpha_{\text{vector}}$	-0.2 а.е.

$$U(\omega) = -\frac{1}{2\varepsilon_0 c} I(r) \alpha_{\text{tot}} = U_s + U_v + U_t$$

$$= -\frac{1}{2\varepsilon_0 c} I(r) \left[ \underbrace{\alpha_s(\omega)}_{\text{Scalar}} + |u^* \times u| \cos \theta_k \frac{m_J}{2J} \underbrace{\alpha_v(\omega)}_{\text{Vector}} + \frac{3m_J^2 - J(J+1)}{J(2J-1)} \times \frac{3\cos^2 \theta_p - 1}{2} \underbrace{\alpha_t(\omega)}_{\text{Tensor}} \right]$$

Сильная чувствительность к направлению магнитного поля!!!

1064 nm имеет преимущество



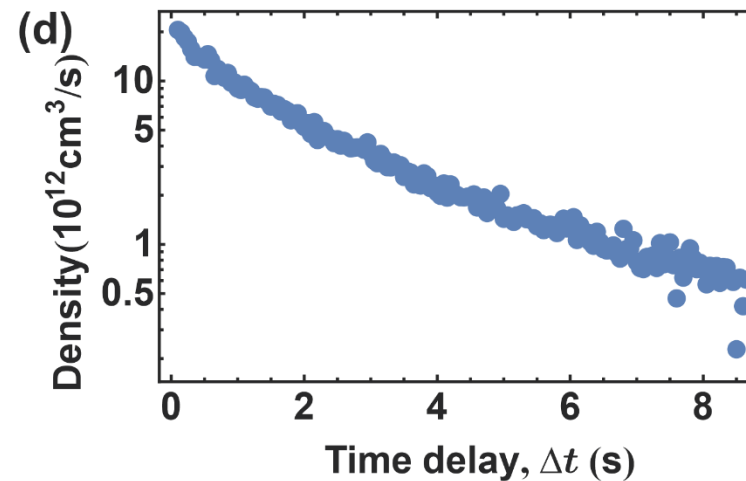
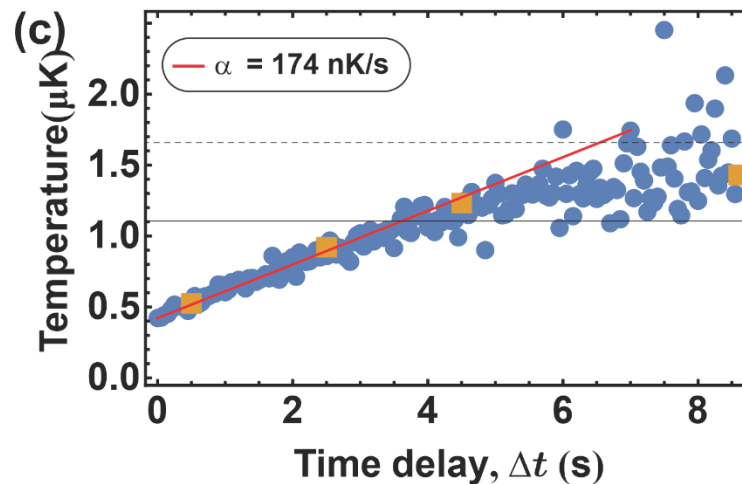
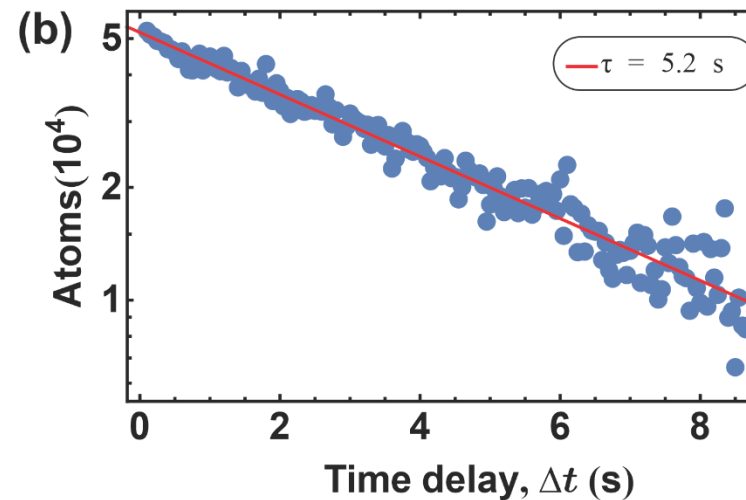
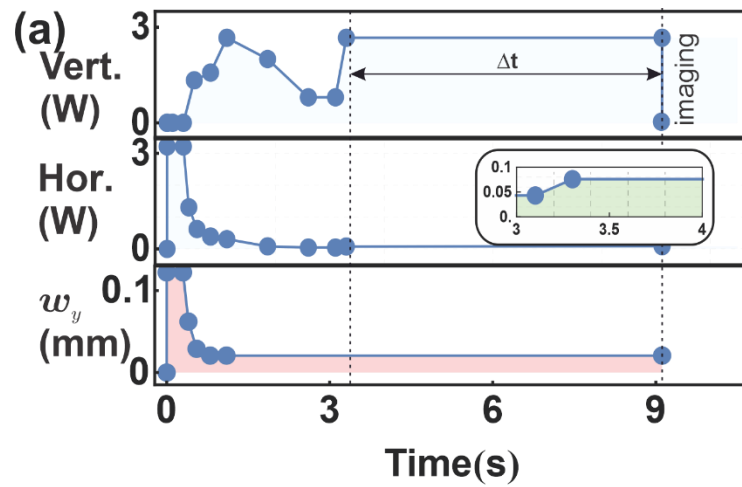
# Нагрев в ОДЛ на длине волны 532 нм

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha N - \gamma \frac{N^3}{T^3},$$

$$\Gamma_{SC} = \Gamma_{SC,hor} (P_{hor}, \varepsilon_{hor}, \theta_{k,hor}, \theta_{P,hor})$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{3} T_{rec} \Gamma_{SC} + \gamma \frac{N^2 (T + T_h)}{T^3}$$

$$+ \Gamma_{SC,vert} (P_{vert}, \varepsilon_{vert}, \theta_{k,vert}, \theta_{P,vert}) \approx 1.5 \text{ Hz}$$



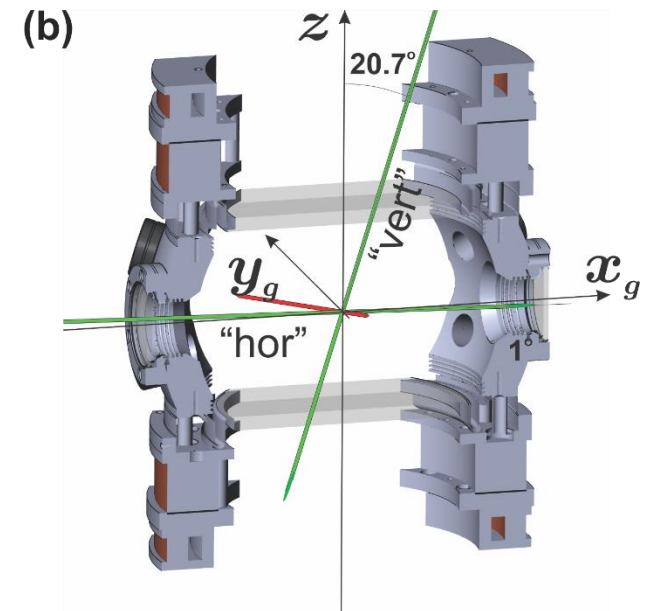
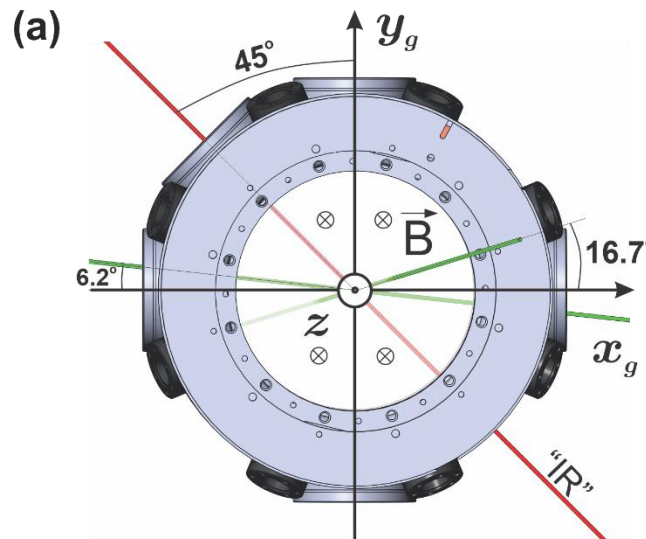
# Измерение частот ОДЛ

$$U_{DIP} = -\frac{2\pi a_B^3 \Re(\alpha)}{c} \frac{2P}{\pi w_y(x) w_z(x)} \text{Exp} \left[ -\frac{2y^2}{w_y^2(x)} - \frac{2z^2}{w_z^2(x)} \right]$$

$$U_{DIP} \approx U_{DIP}(0,0,0) + \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial U_{DIP}}{\partial i}(0,0,0) i + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_{DIP}}{\partial i^2}(0,0,0) i^2 =$$

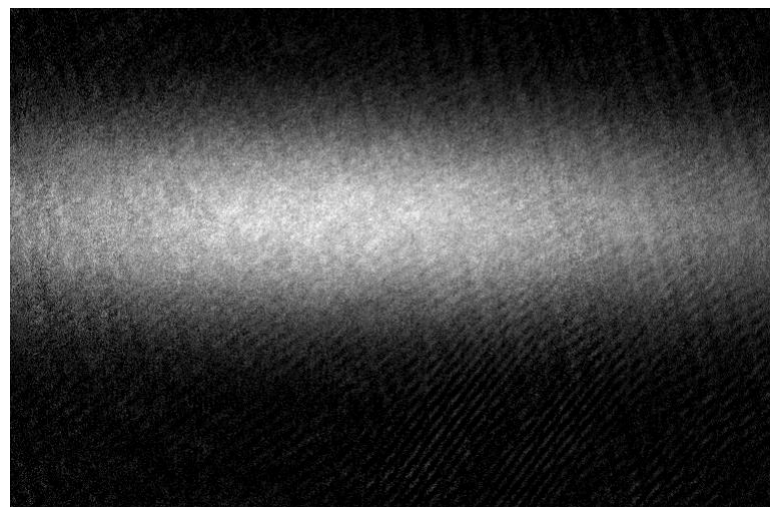
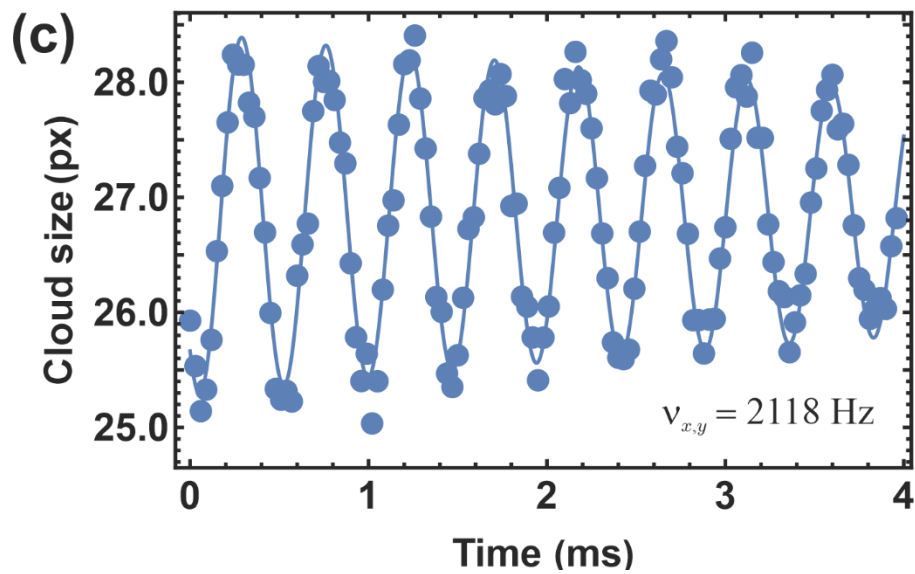
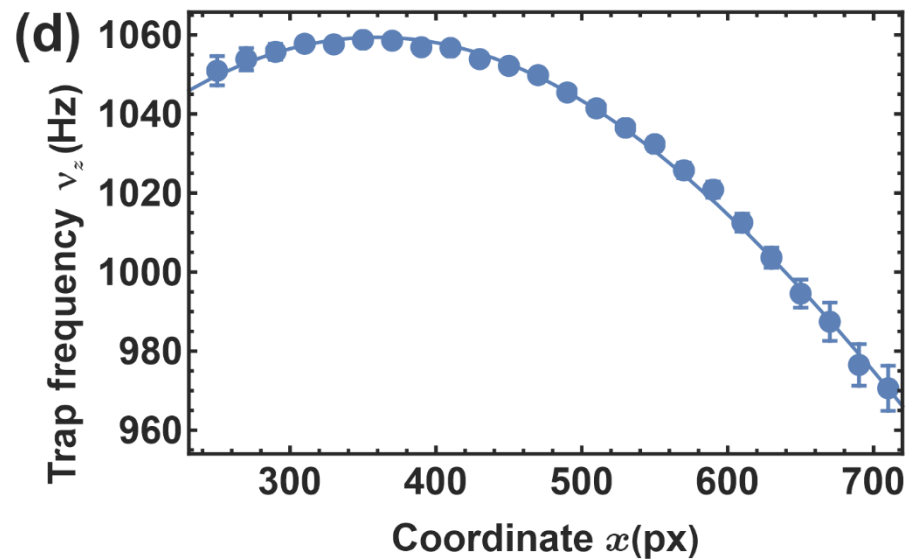
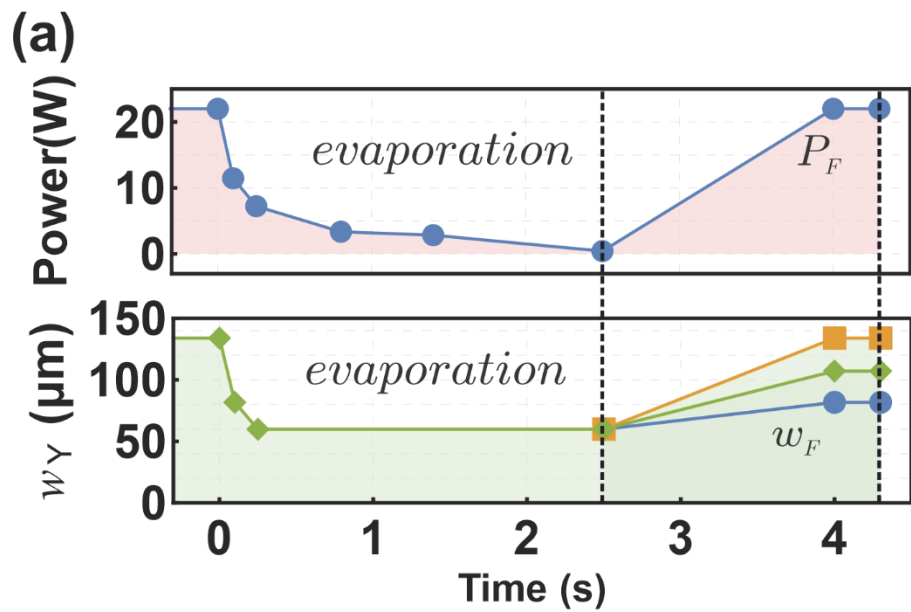
$$= -\frac{2\pi a_B^3 \Re(\alpha)}{c} \frac{2P}{\pi w_{0y} w_{0z}} \left[ 1 - \frac{2y^2}{w_{0y}^2} - \frac{2z^2}{w_{0z}^2} - \frac{1}{2} x^2 \left( \frac{1}{x_{Ry}^2} + \frac{1}{x_{Rz}^2} \right) \right].$$

$$\alpha = \pi^3 \varepsilon_0 c \frac{v_y^2 w_{0y}^3 w_{0z} m_{Th}}{P} = \pi^3 \varepsilon_0 c \frac{v_z^2 w_{0z}^3 w_{0y} m_{Th}}{P}$$

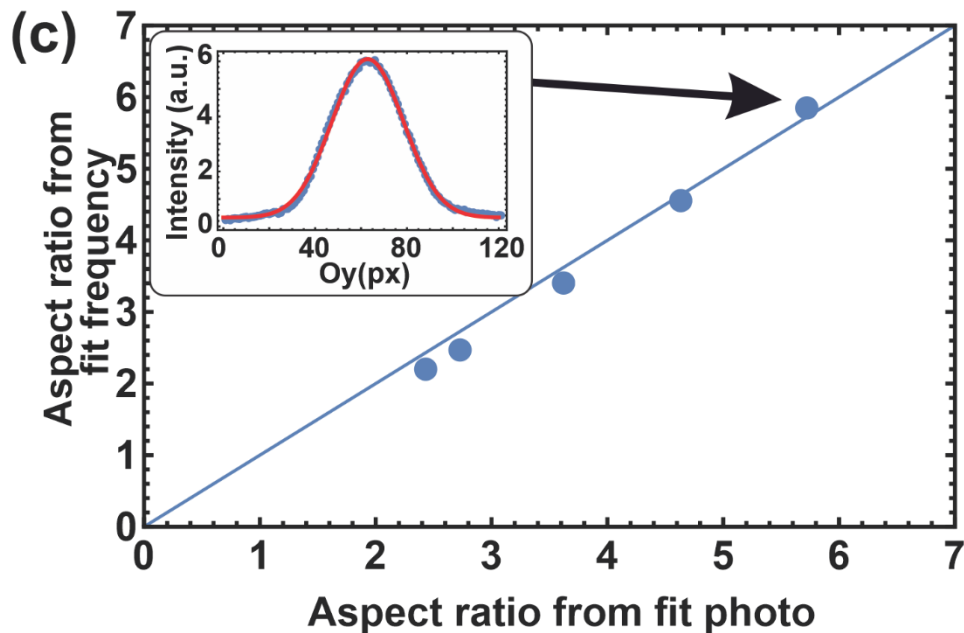




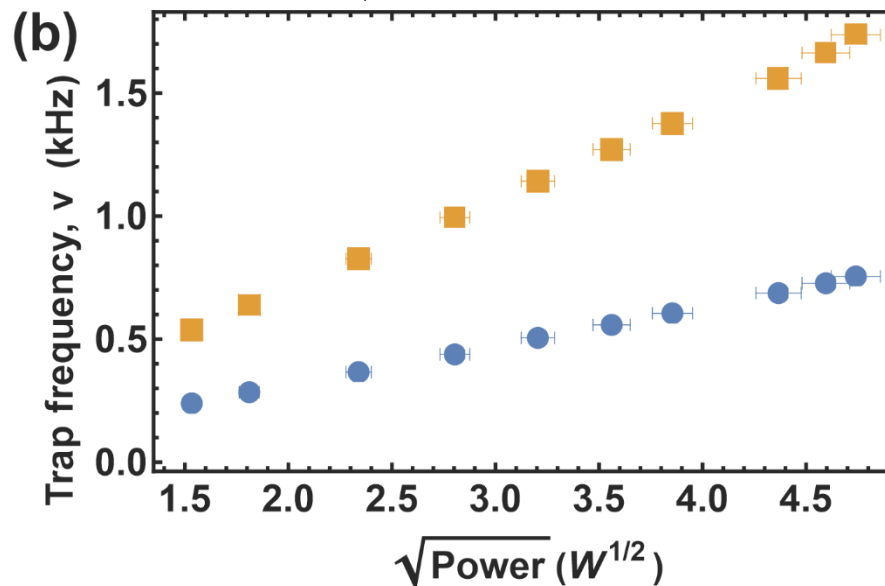
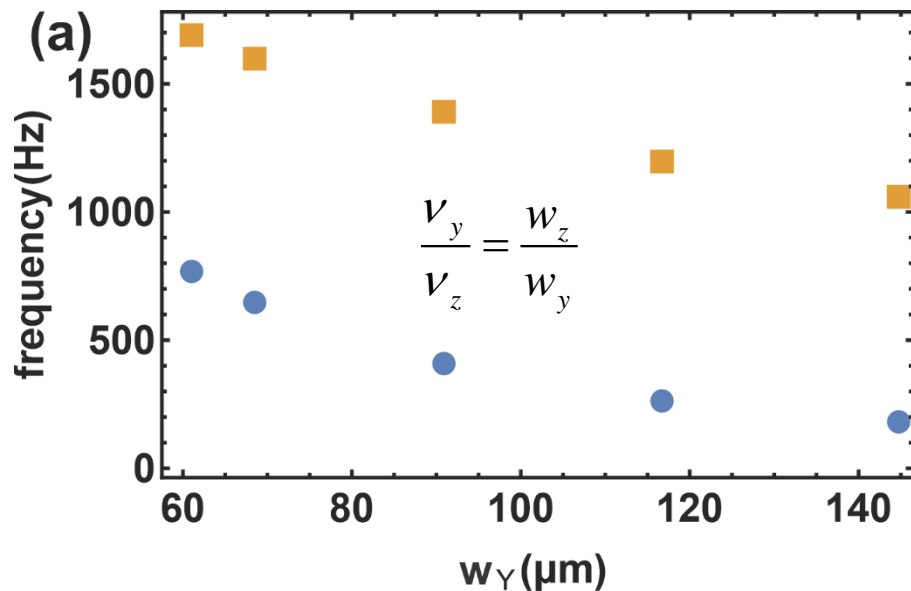
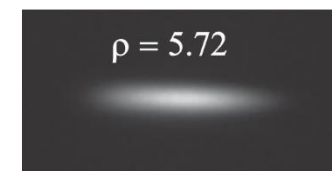
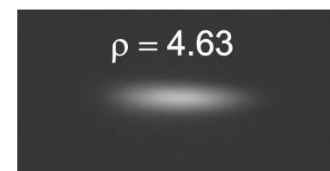
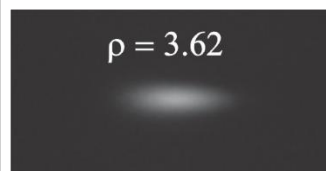
# Измерение частот ОДЛ 1064 нм



# Измерение перетяжек ОДЛ 1064 нм



$$\alpha = \pi^3 \varepsilon_0 c \frac{V_y^2 w_{0y}^3 w_{0z} m_{Th}}{P} = \pi^3 \varepsilon_0 c \frac{V_z^2 w_{0z}^3 w_{0y} m_{Th}}{P}$$



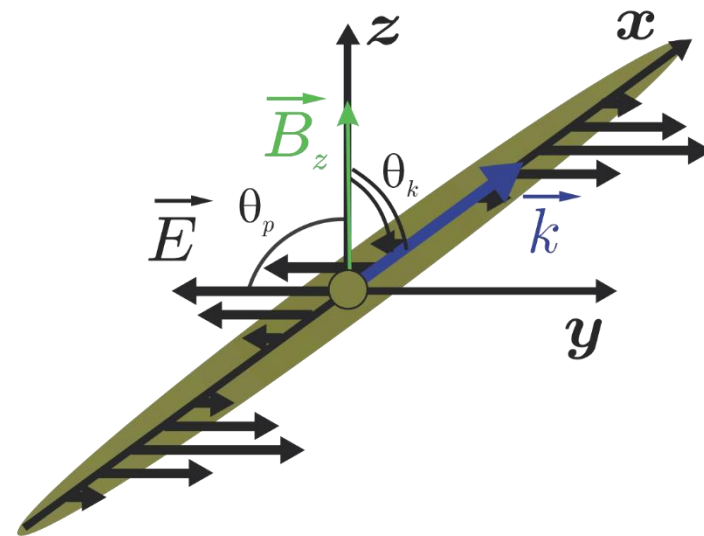
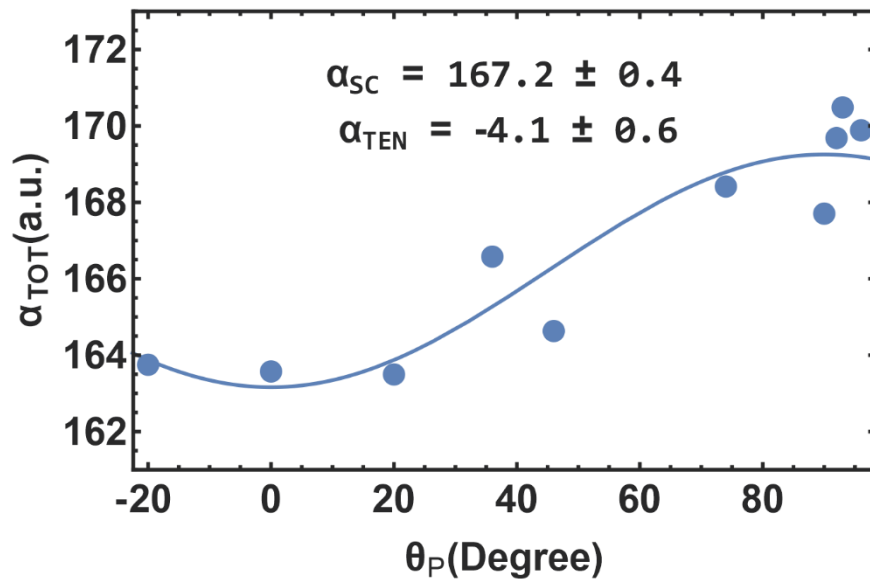
# Поляризуемость тулия на 1064 нм

$$w_z = 25.3 \pm 0.9 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\alpha_{SC} = 167.2 \pm 0.4_{STAT} \pm 24.7_{SYS} \text{ a.u.}$$

$$w_y = 57.6 \pm 2 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\alpha_{TEN} = -4.1 \pm 0.6_{STAT} \pm 0.6_{SYS} \text{ a.u.}$$



$$\alpha_{tot} = \alpha_{SC} + \frac{3m_F^2 - F(F+1)}{F(2F-1)} \times \frac{3\cos^2\theta_P - 1}{2} \alpha_{tens}$$

1064 нм	Теория
$\alpha_{scalar}$	160 а.е.
$\alpha_{tensor}$	-3 а.е.
$\alpha_{vector}$	-0.2 а.е.

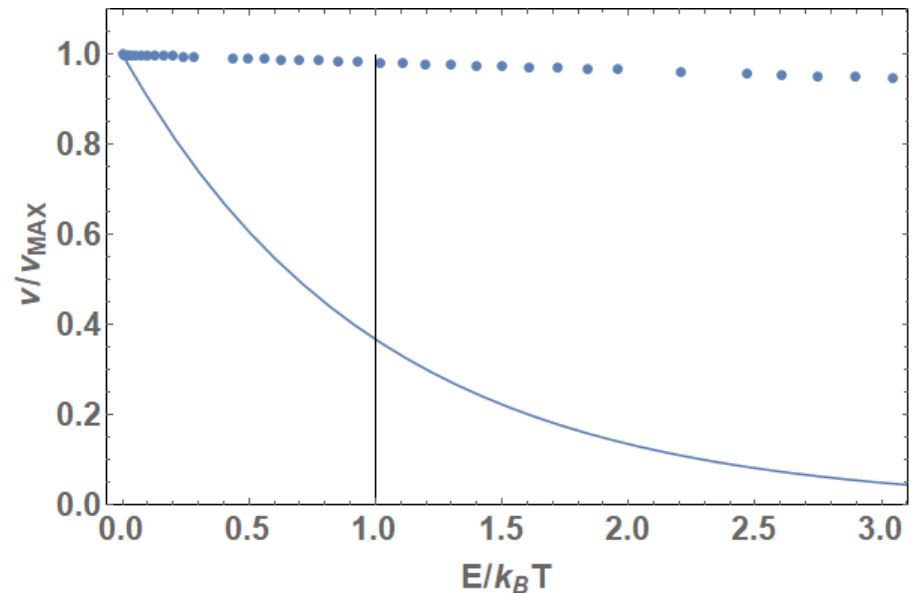
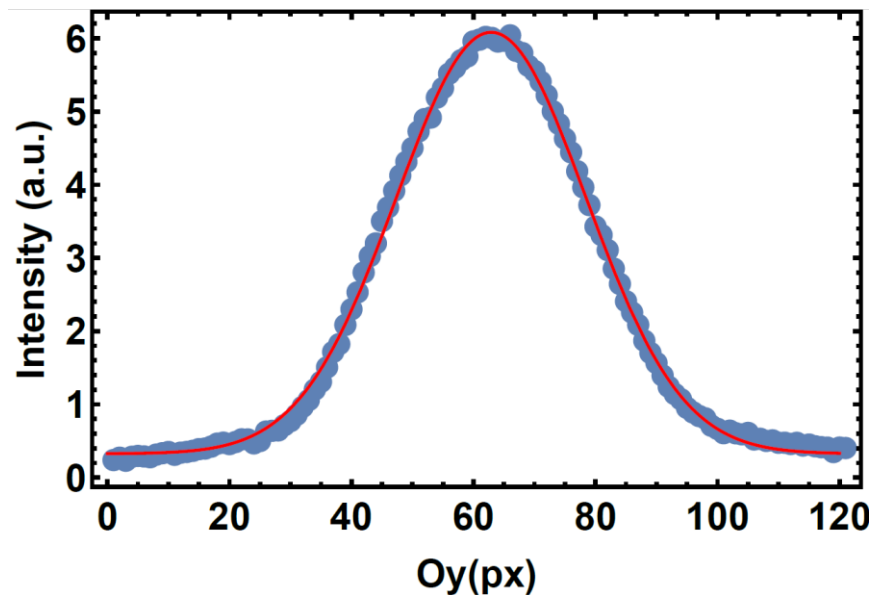
# Поляризуемость тулия на 1064 нм

	Теория (а.е.)	Эксп. (а.е.)	Сист. (а.е.)	Стат. (а.е.)
$\alpha_{\text{scalar}}$	159.6	167	25	0.4
$\alpha_{\text{tensor}}$	-3.2	4	0.6	0.6
$\alpha_{\text{vector}}$	-0.2	-	-	-

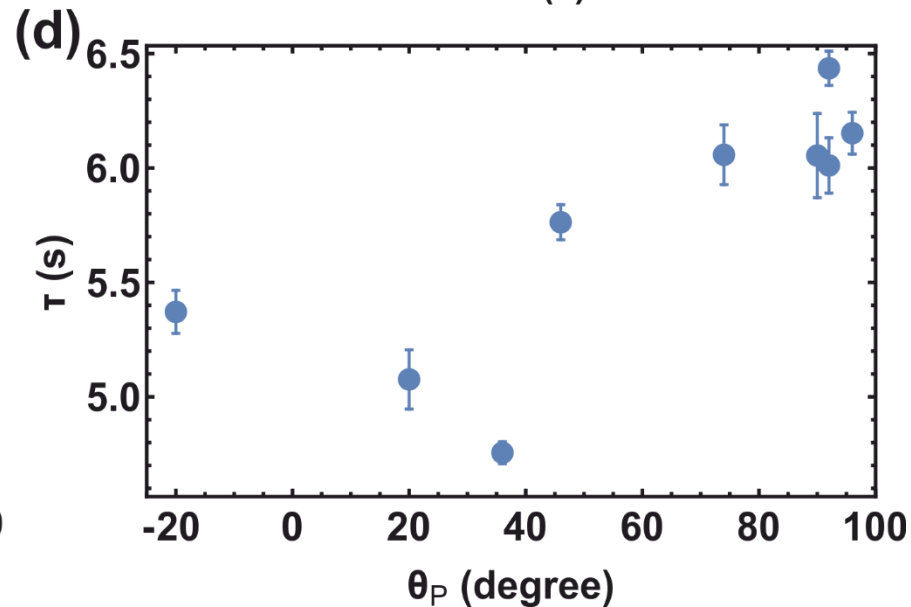
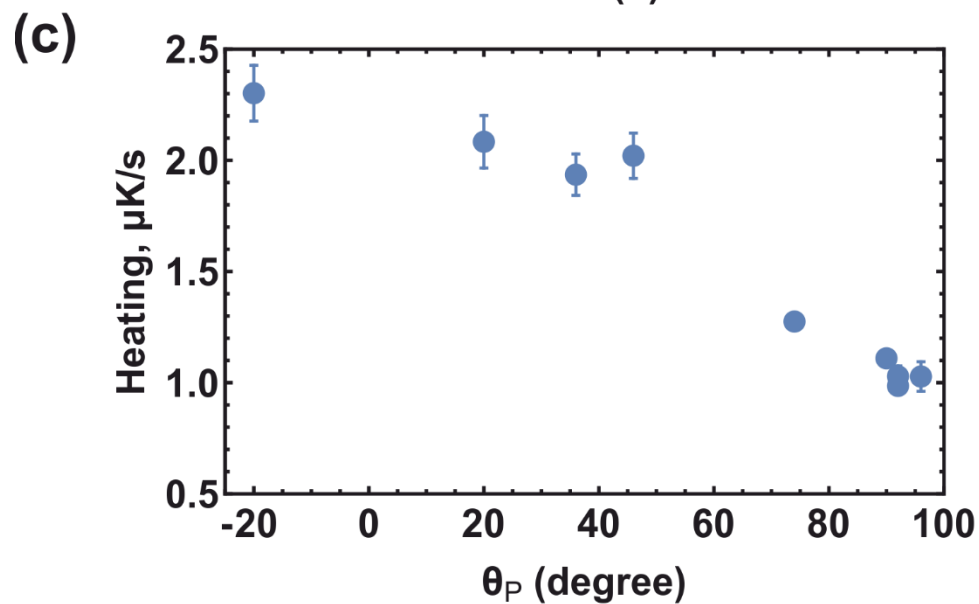
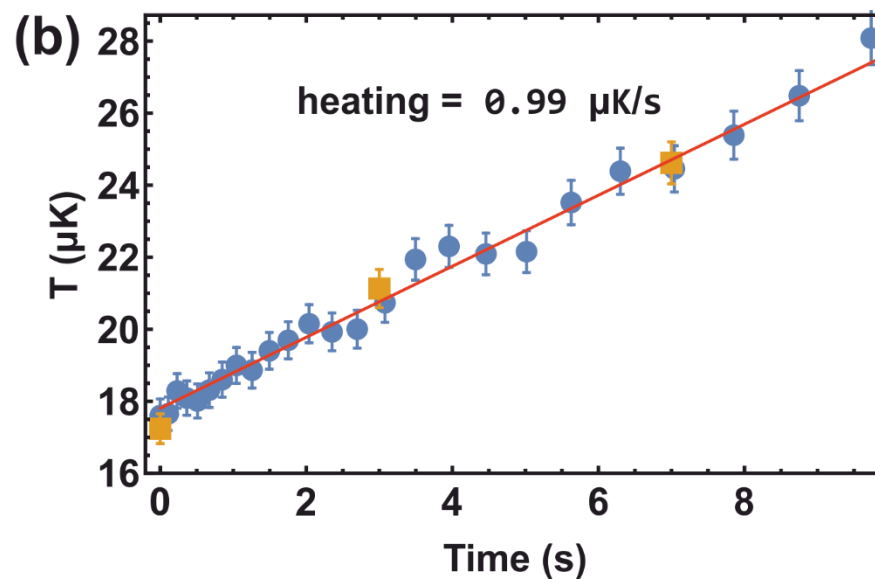
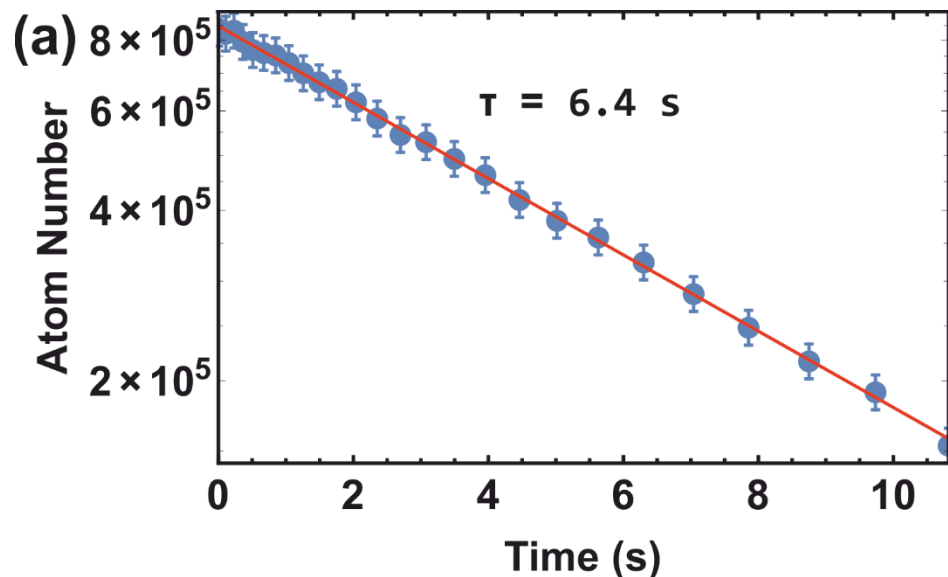
$$\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial i} \frac{1}{m_{Th}} i = 0, i \in \{x, y, z\}, (x_0, y_0, z_0), (i'(0)) = \left\{ 0, \sqrt{\frac{4k_B T}{m_{Th}}} \right\}$$

$$\langle v \rangle = \frac{\int v(E) \text{Exp}[-E/k_B T] dE}{\int \text{Exp}[-E/k_B T] dE}$$

$$\langle v \rangle / v_{\text{max}} = 0.99$$



# Нагрев в ОДЛ 1064 нм

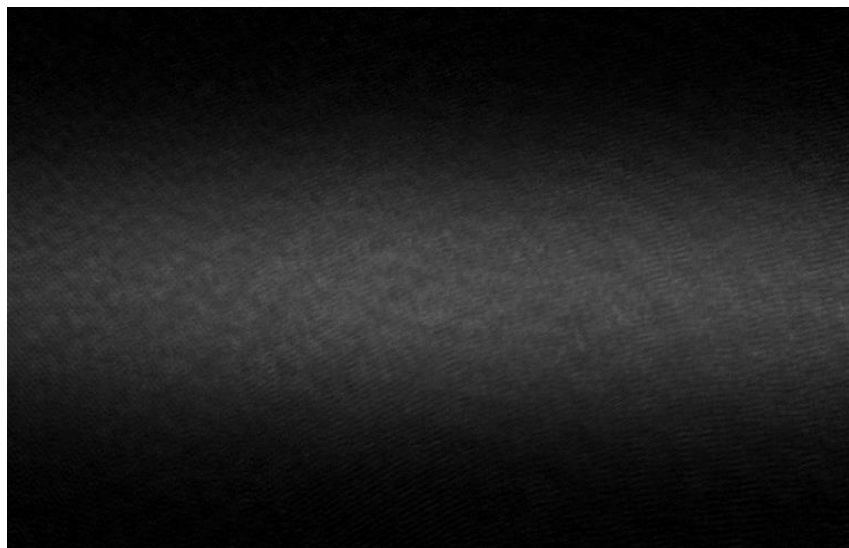


Нагрев по теории 31 nK/s

# Использование ОДЛ на 1064 нм

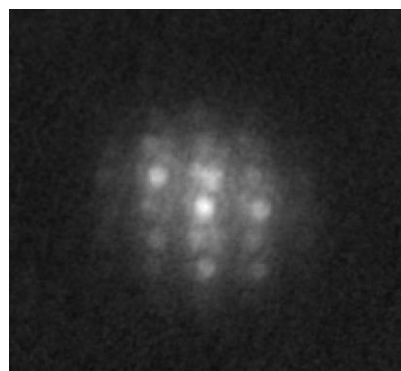
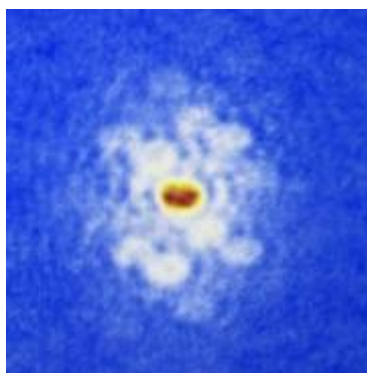
- Испарение до БЭК в скрещенной ОДЛ

Доклад Хлебникова В.А.

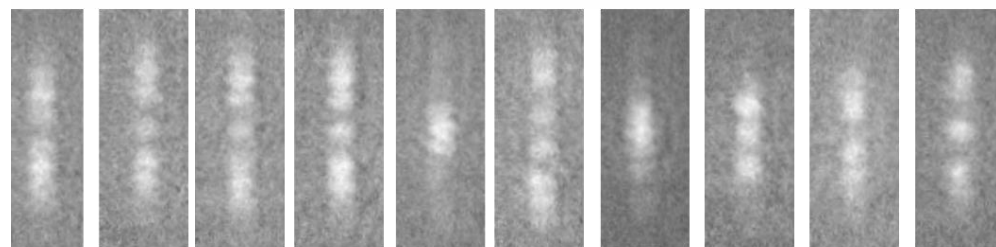


Дифракция БЭК на периодическом потенциале:

Пучки МОЛ



Оптическая решетка с переменным шагом





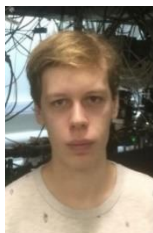
# Наша команда



Alexey V.  
Akimov



Vladimir  
Khlebnikov



Daniil  
Pershin



Ivan.  
Kozhokaru



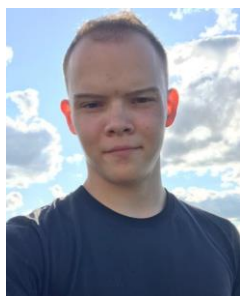
Davlet  
Kumpilov



Rudnev  
Arjuna



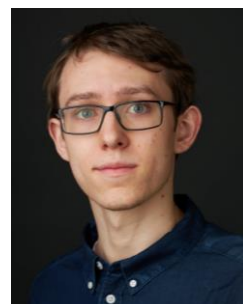
Pyrkh  
Ivan



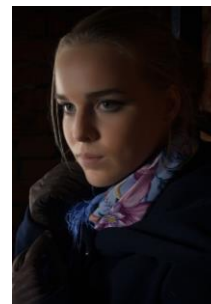
Damir  
Gaifutdinov



Pavel  
Aksentsev



Kirill  
Khoruzhii



Ekaterina  
Fedotova



Anna  
Zykova

The work was supported by Rosatom in the framework of the Roadmap for Quantum computing  
(Contract No. 868-1.3-15/15-2021 dated October 5, 2021).