



**Острая фокусировка атомного пучка
с использованием доплеровского и суб-доплеровского
механизмов лазерного охлаждения
в двумерной магнито-оптической ловушке**

Д.В. Быкова^{1,2}, А.Е. Афанасьев¹, В.И. Балыкин¹

1 Институт спектроскопии Российской академии наук, 108840, Москва, Троицк, Россия

2 Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

План доклада

Введение. Квантовые сенсоры на основе холодных атомов

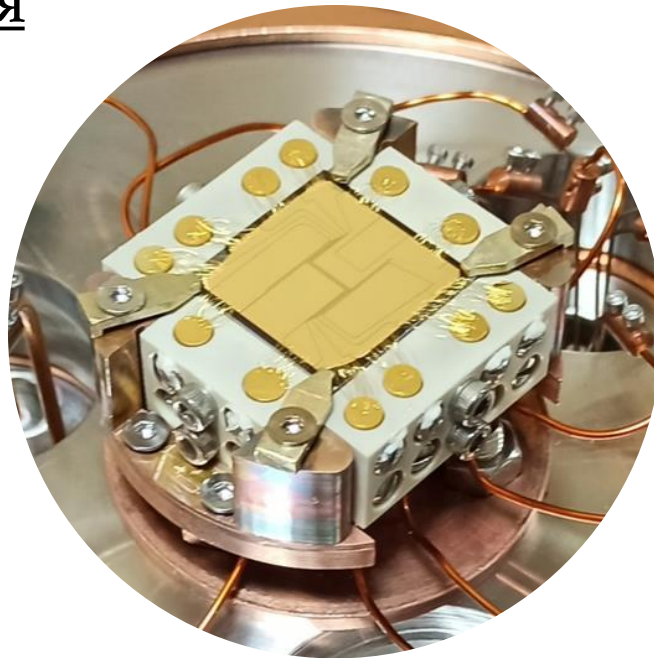
Атомный чип

Низкоскоростной атомный пучок

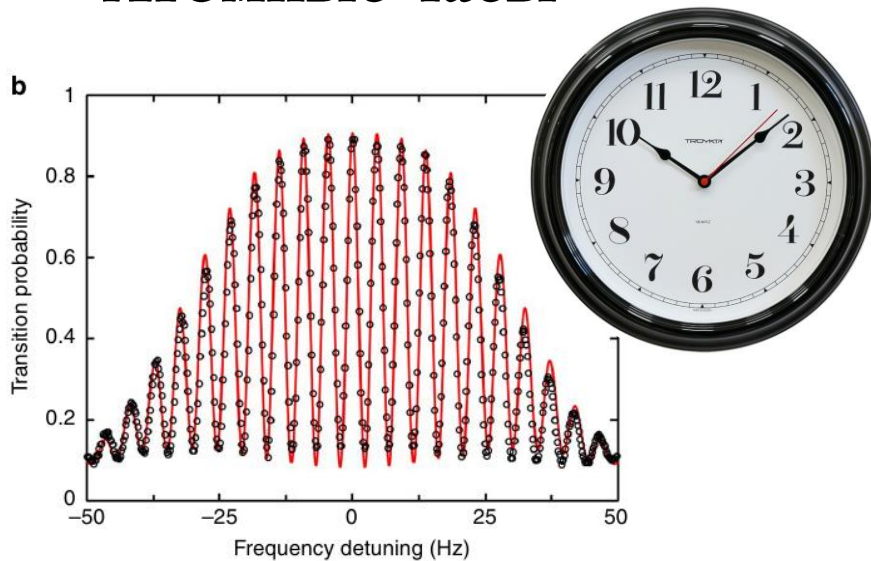
Фокусировка атомного пучка: доплеровский и суб-доплеровский режим охлаждения

Заключение

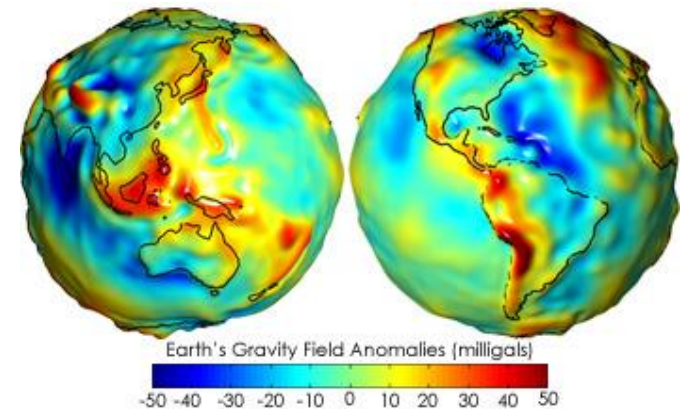
Цели исследования



Атомные часы

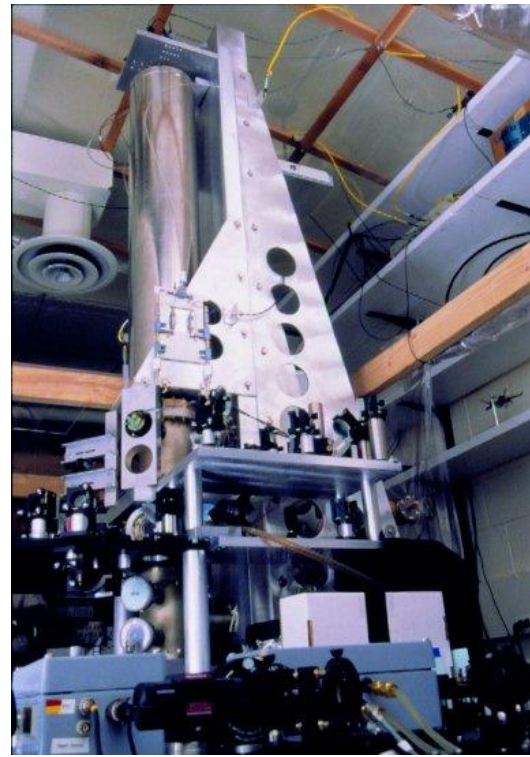
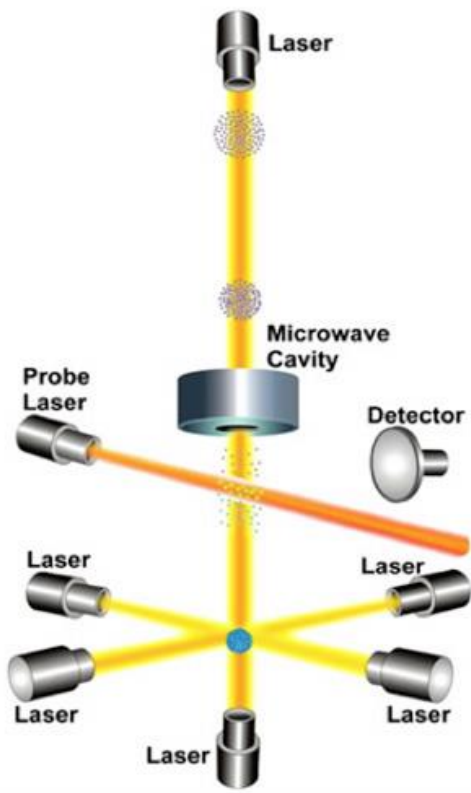


Гравиметр



Используемые квантовые сенсоры на основе холодных атомов

Цезиевый фонтан



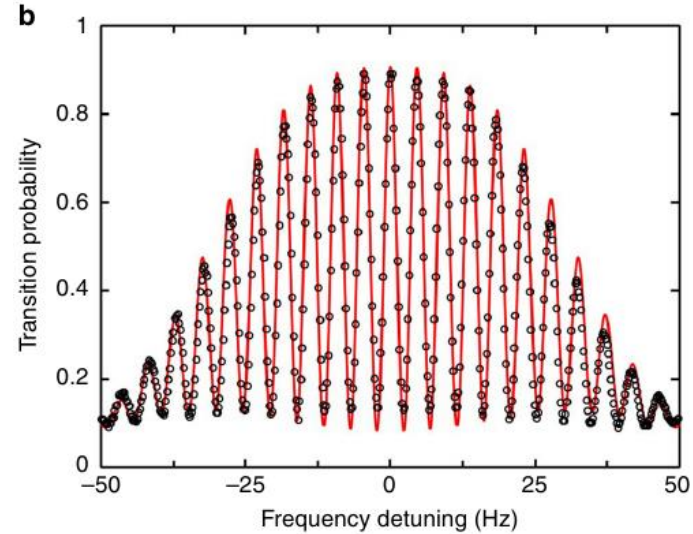
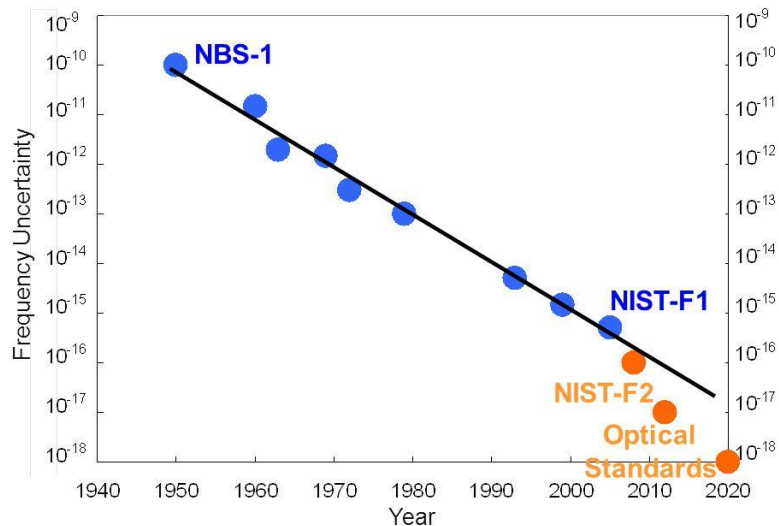
Оптический переход
(детектирующий)

Микроволновый переход (часовой)



NIST

Improvements in Primary Frequency Standards: Optical Clocks

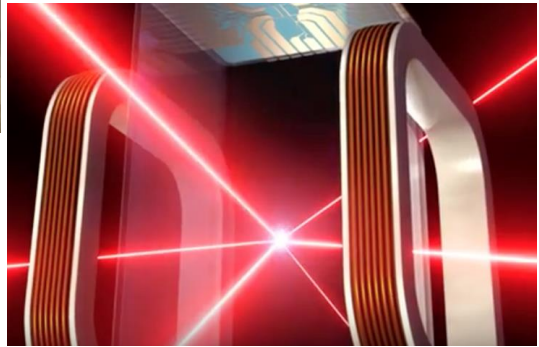
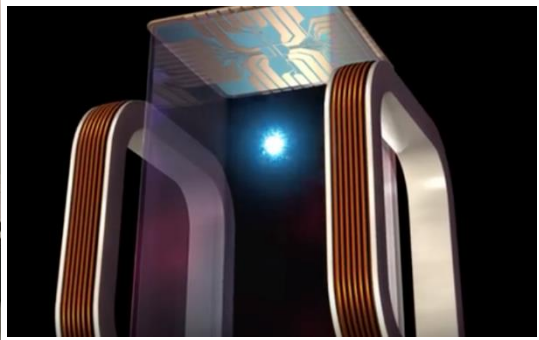
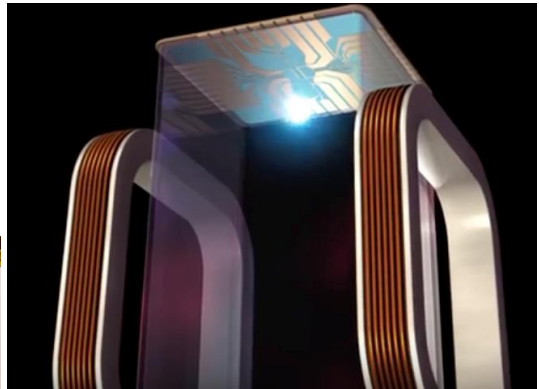
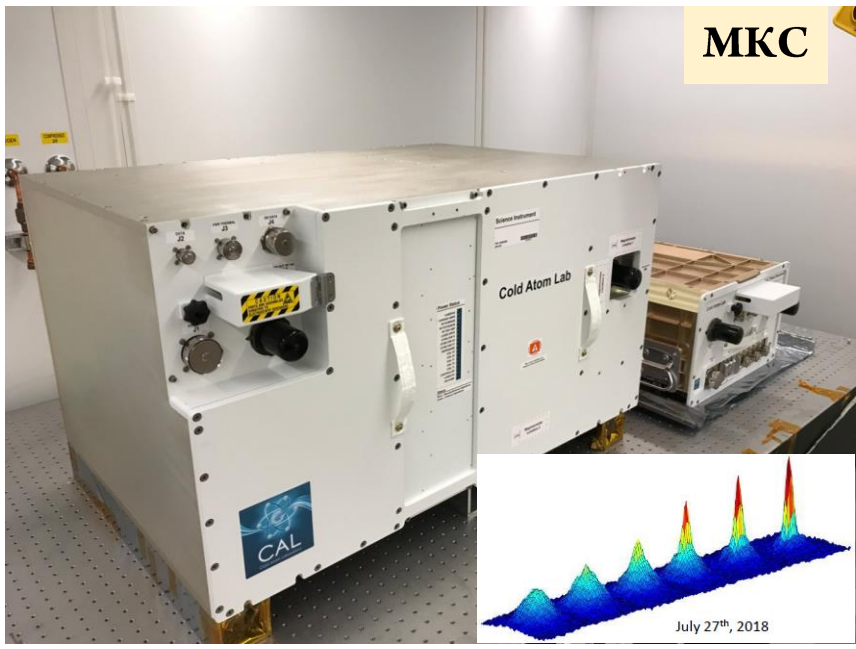
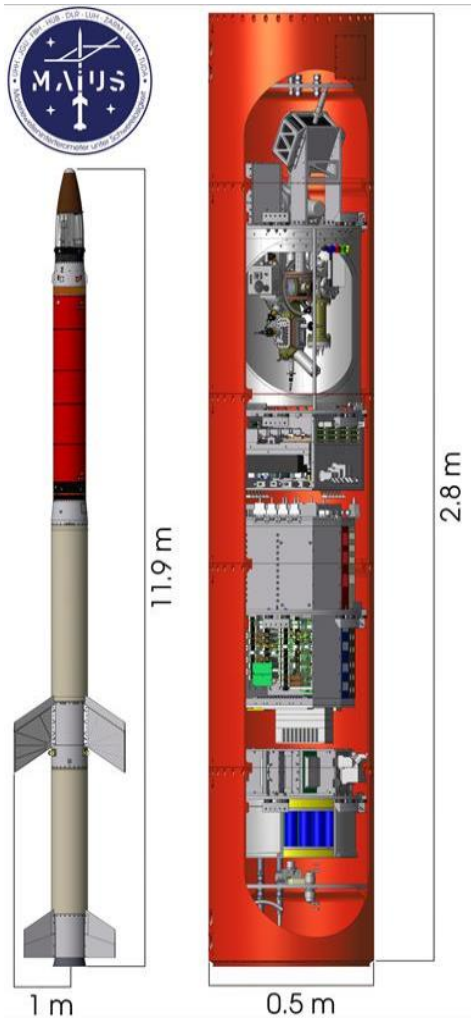


Квантовые сенсоры для фундаментальной физики

CAL

MAIUS

Развитие методов атомной интерферометрии в условиях микрогравитации



Применение квантовых сенсоров на атомном чипе

Фундаментальные применения

- Определение фундаментальных констант
- Измерение ускорения свободного падения
- Проверка принципа эквивалентности Эйнштейна
- Поиск отклонений от Ньютоновского закона гравитации
- Детектирование гравитационных волн
- Квантовая гравитация
- Поиск тёмной энергии
- Поиск тёмной материи

Навигация

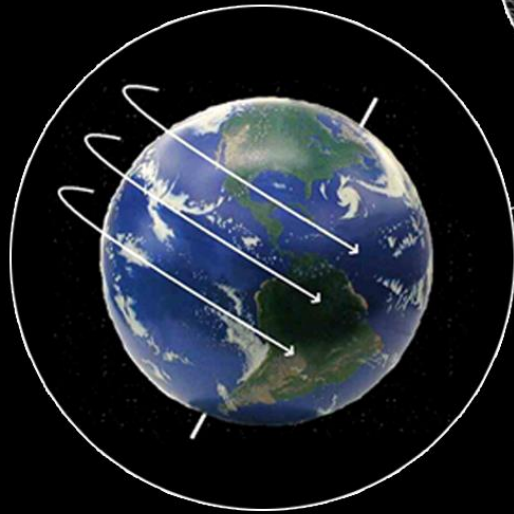


Геология

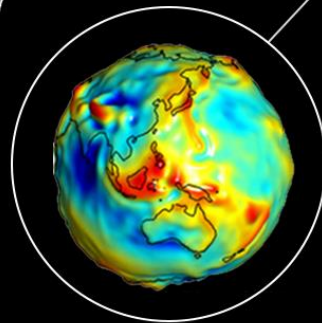
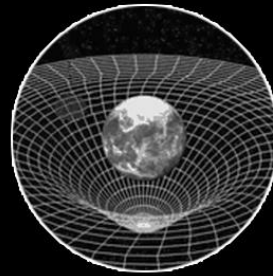


Космические спутники

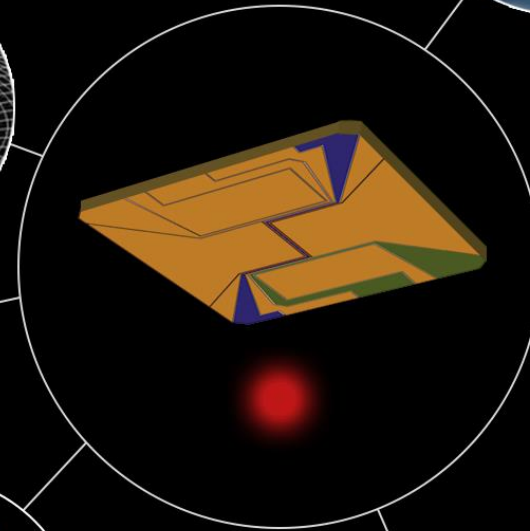
- Атомные часы
- Акселерометр
- Гироскоп
- Магнитометр
- ...



Геофизика



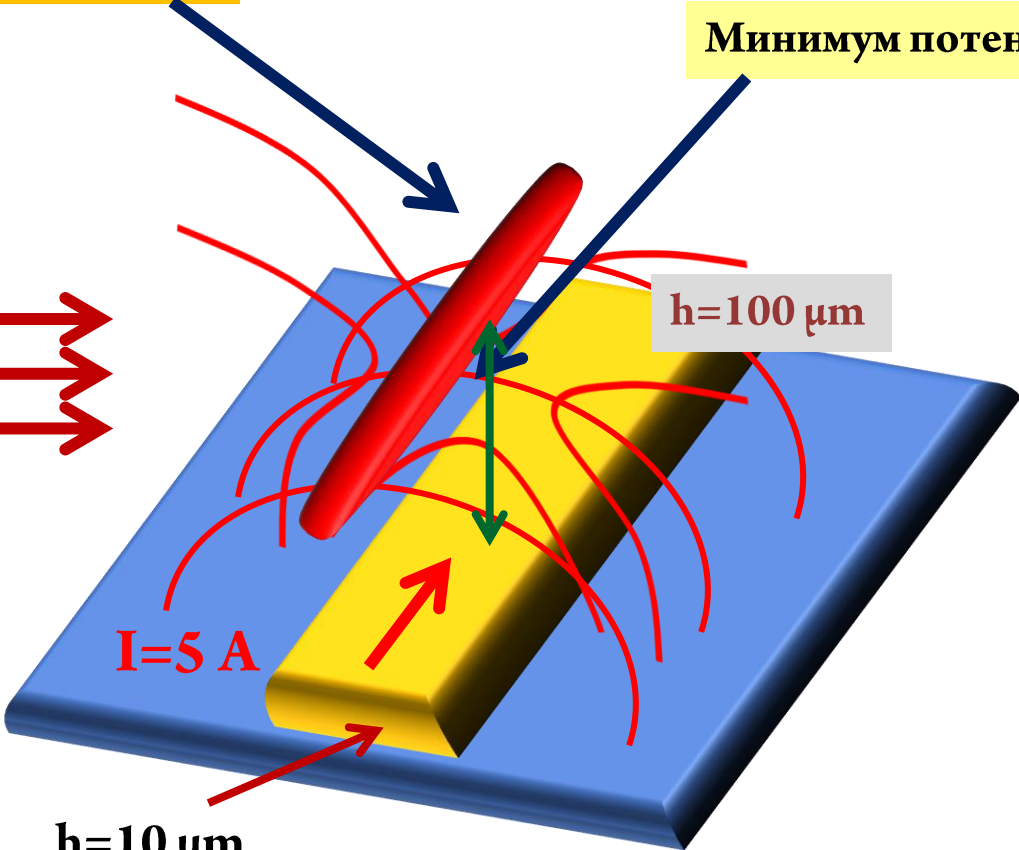
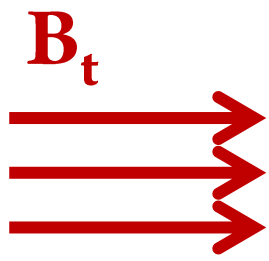
Гравиметрия



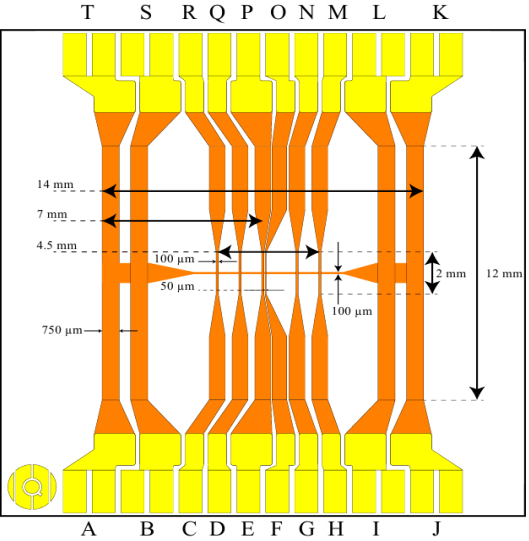
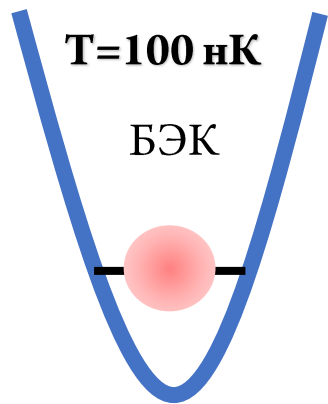
Атомный чип

Локализованные атомы

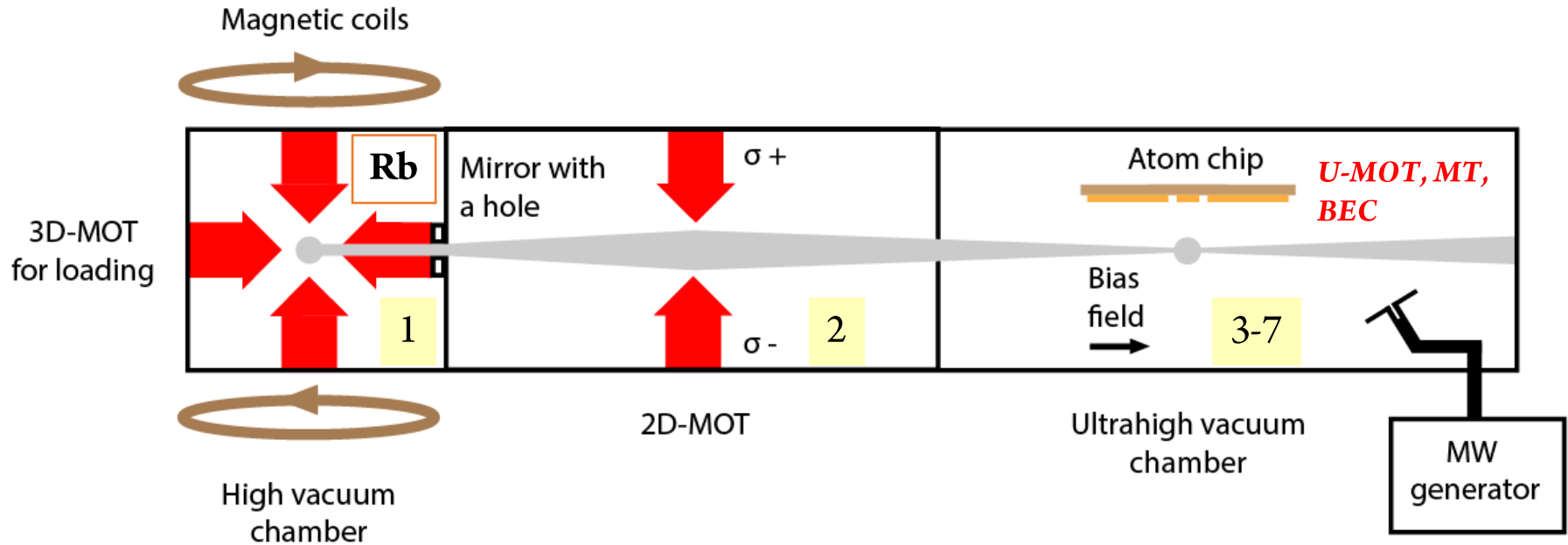
Минимум потенциала



$h = 10 \mu\text{m}$
 $w = 50-100 \mu\text{m}$



Атомные часы на чипе

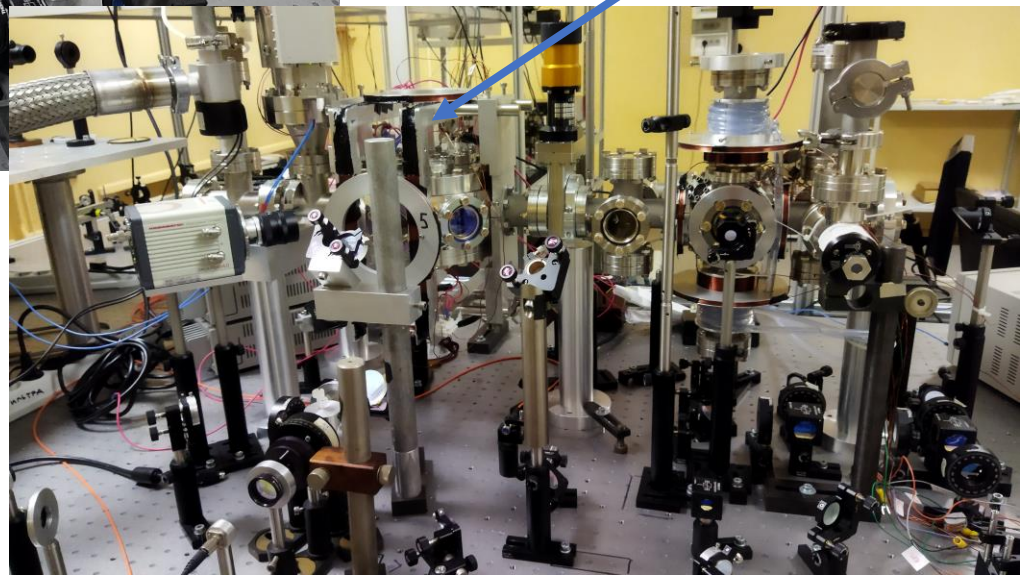
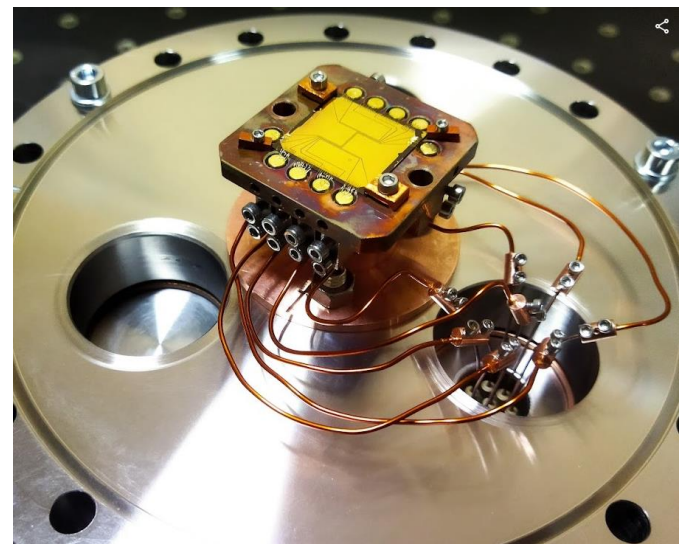
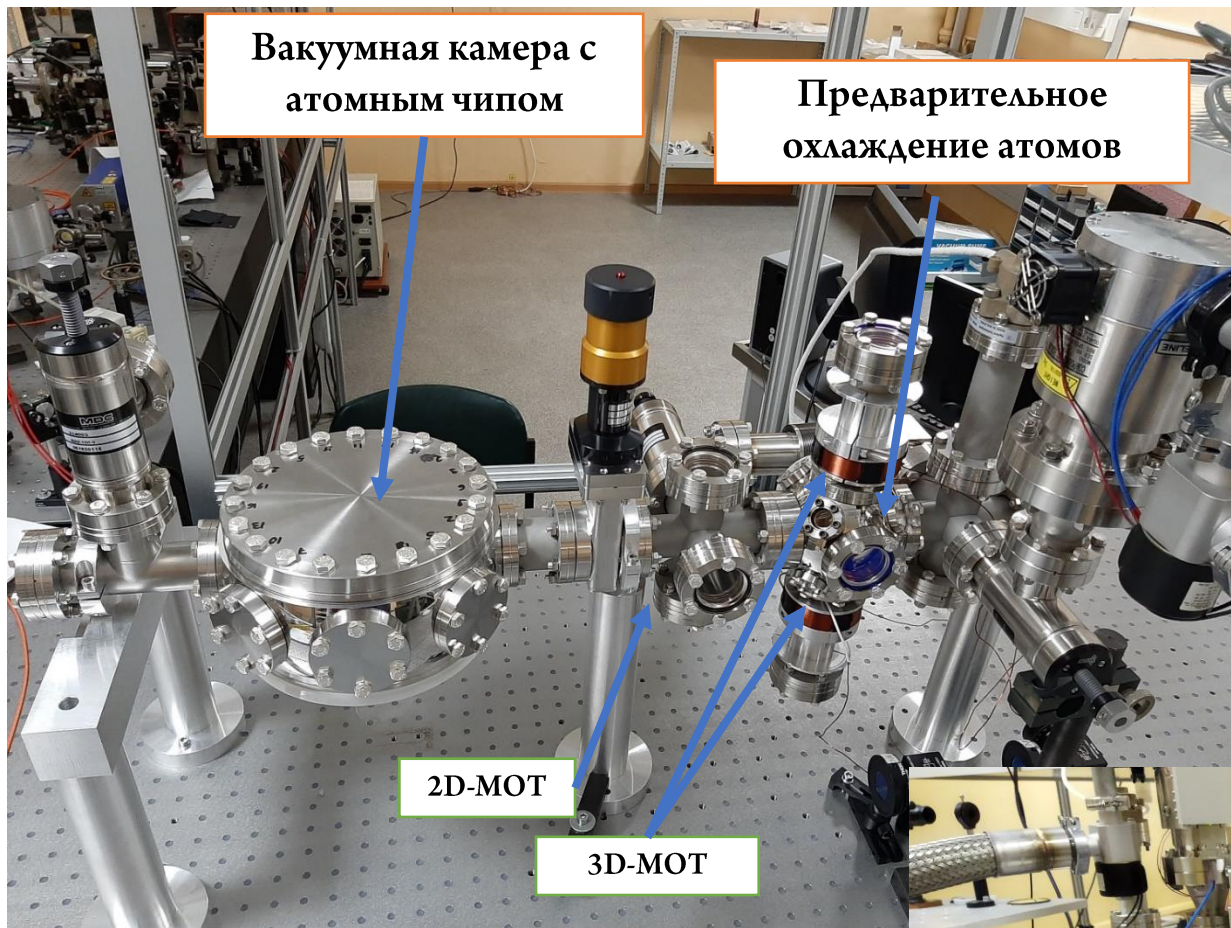


Experimental sequence:

1. Formation of Low-velocity intense atomic beam
2. Focusing of atomic beam with 2D-MOT
3. Cooling of atoms using mirror-MOT near atom chip using U-trap
4. Loading of Z-trap
5. Evaporative cooling
6. Ramsey pulses
7. Detection of the signal

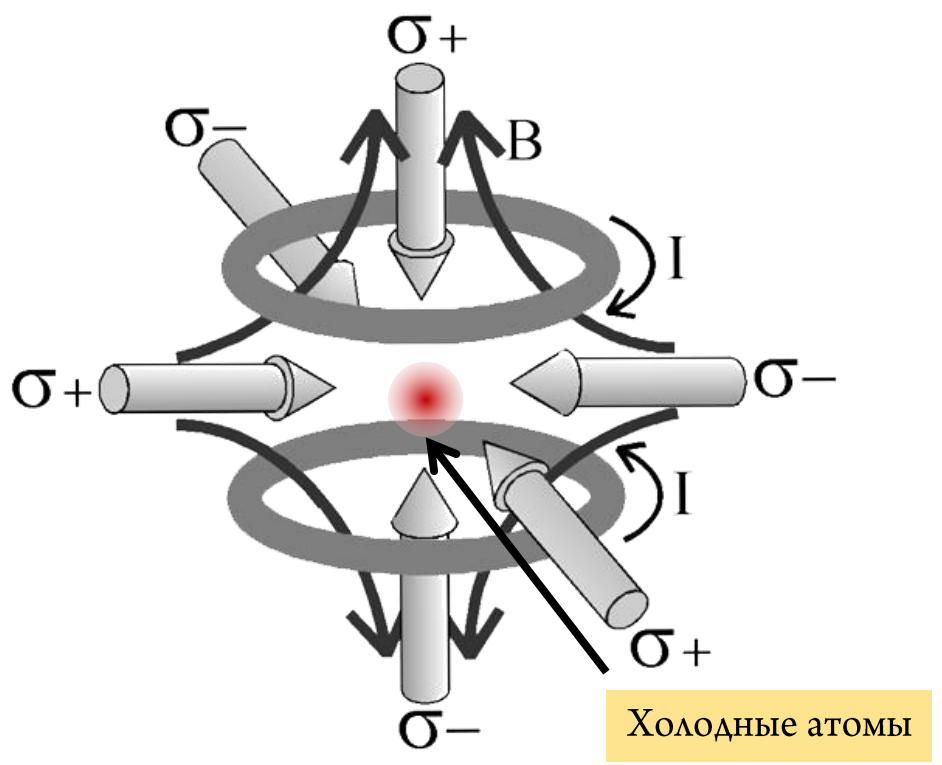
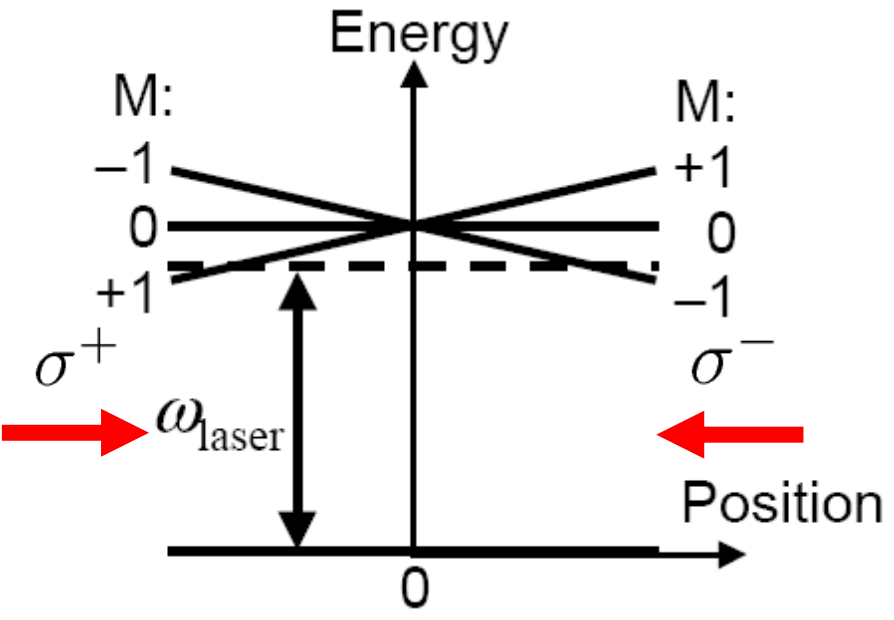
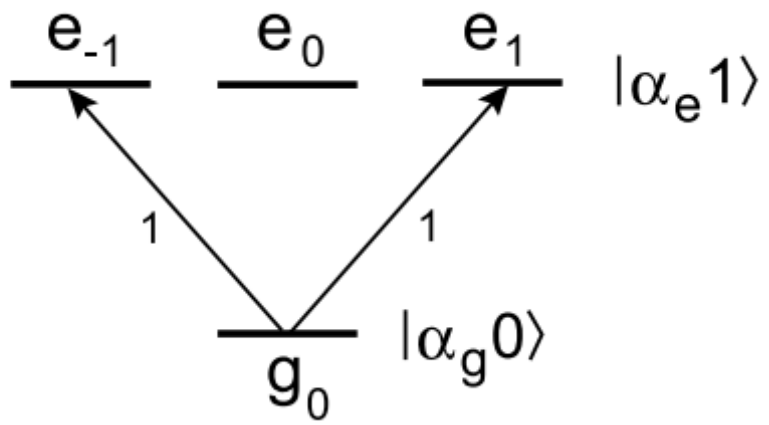
Экспериментальная установка

Атомный чип

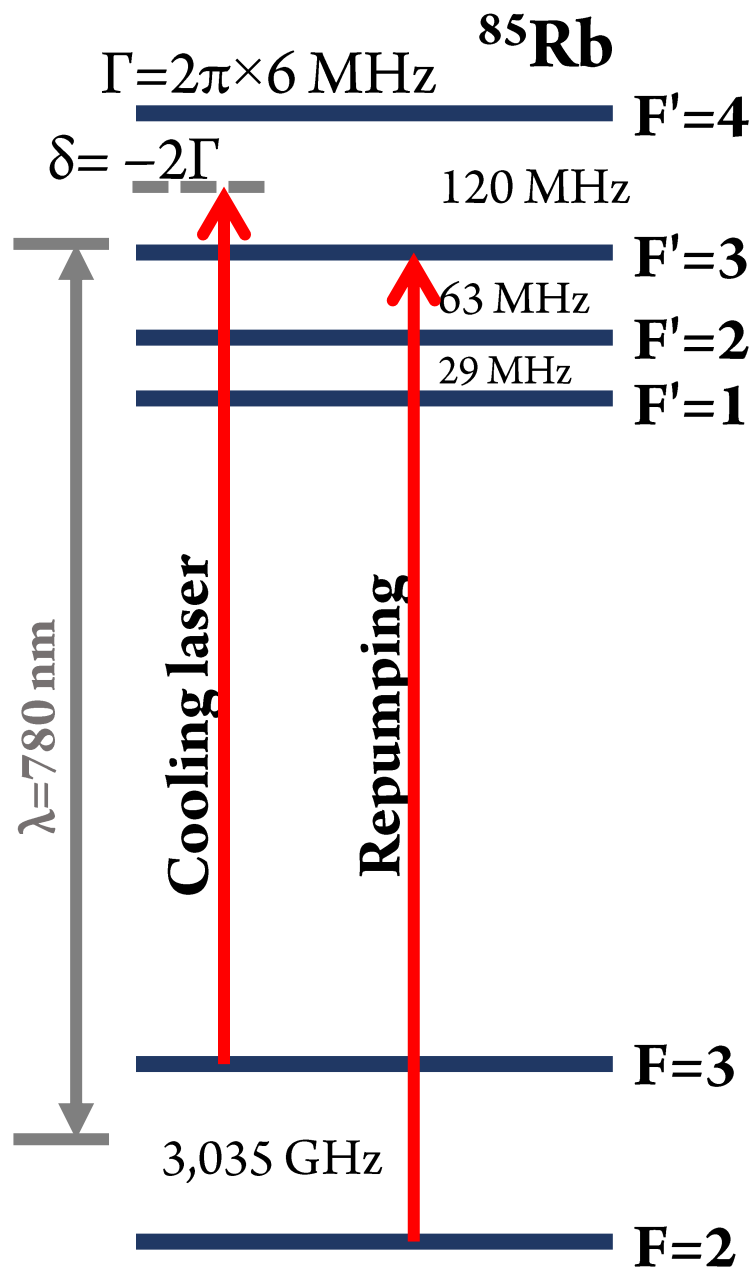


Магнито-оптическая ловушка

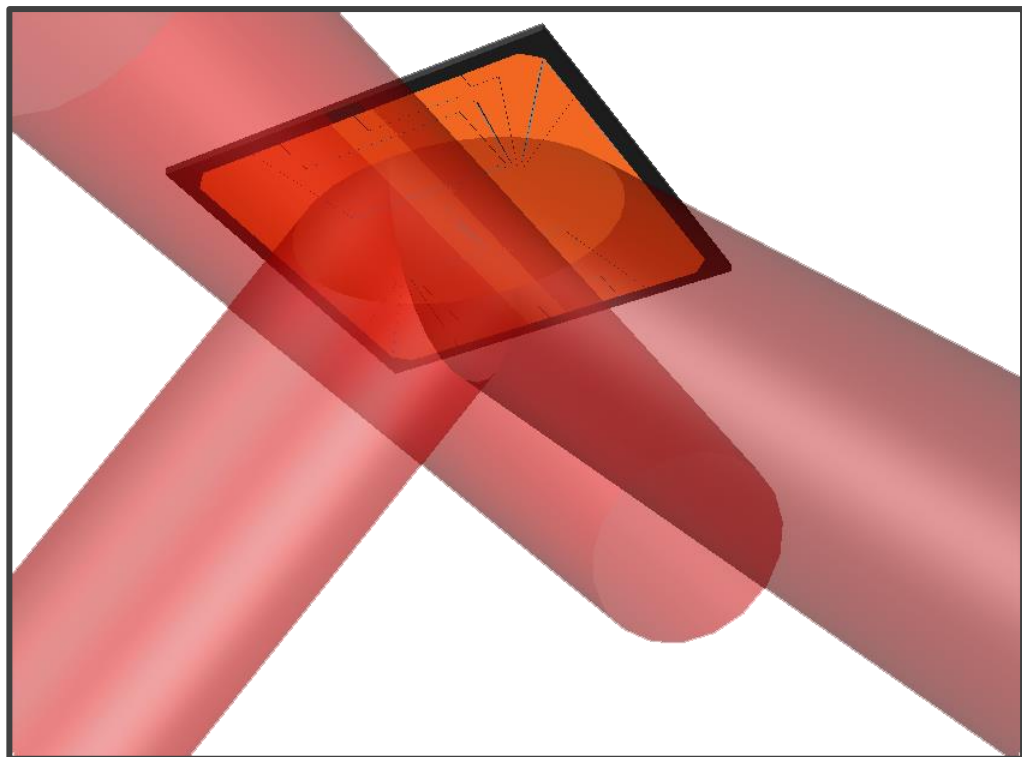
Схема (1+3)-уровневого атома



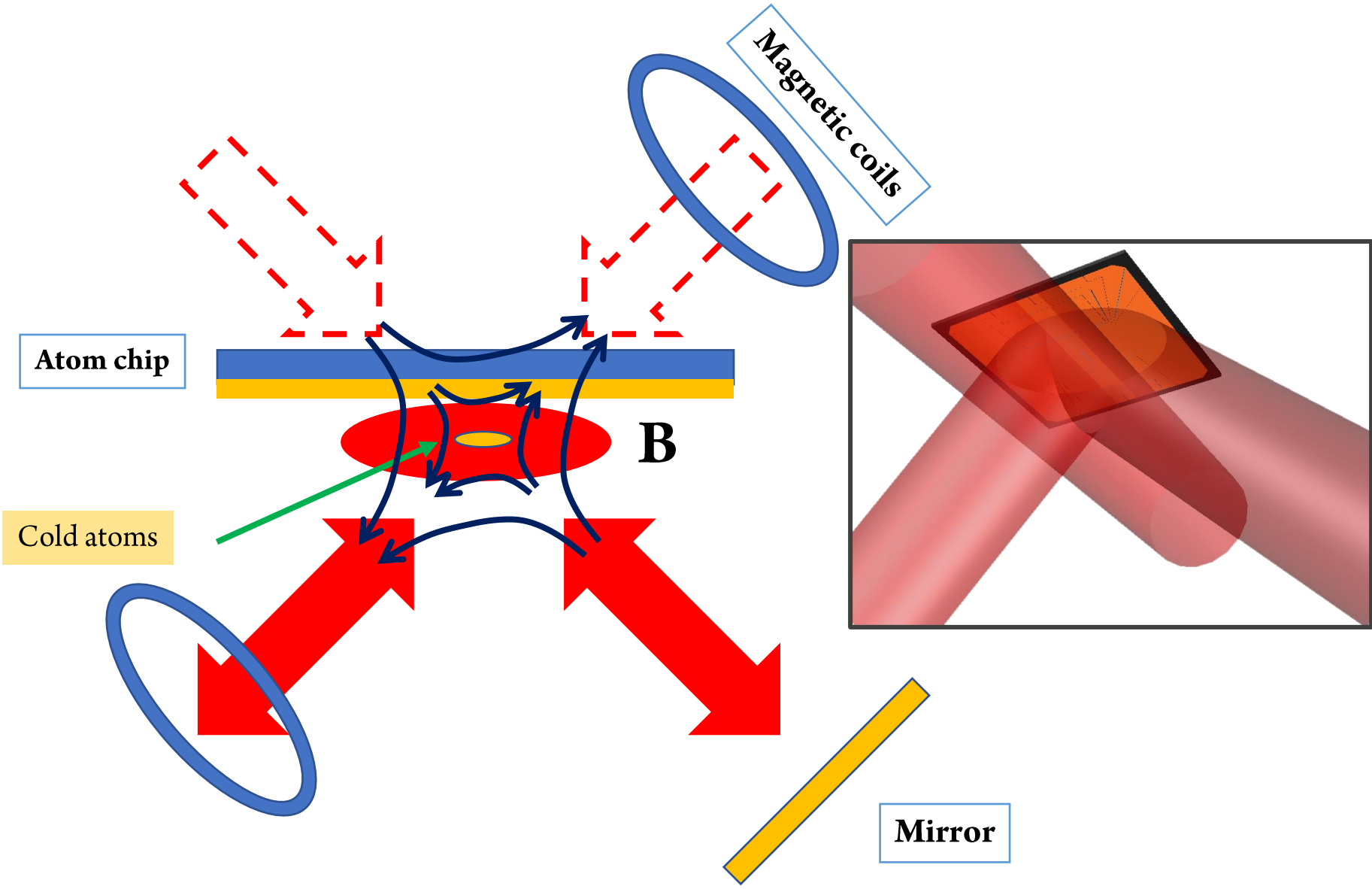
Экспериментальная схема



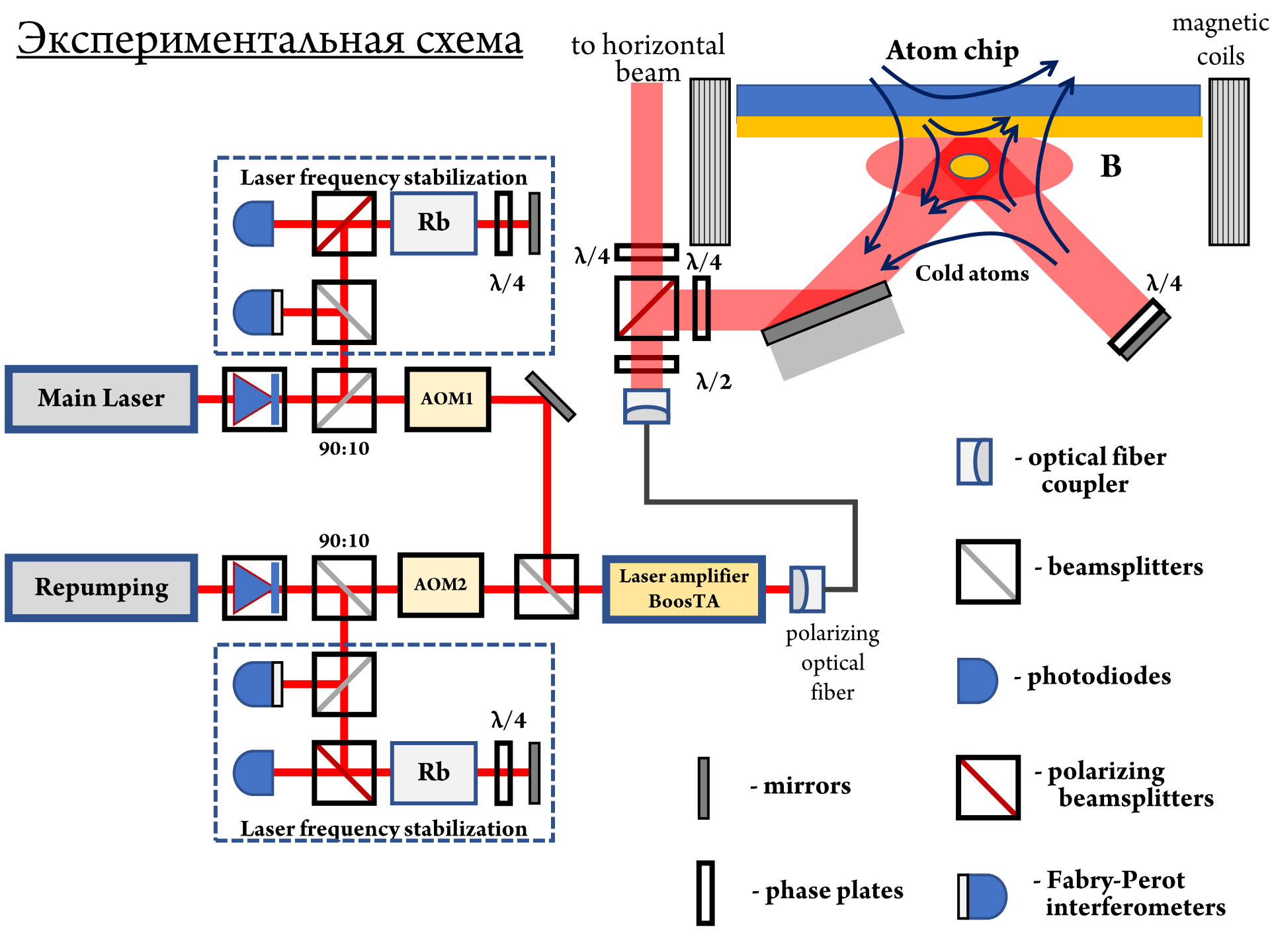
U-MOT configuration



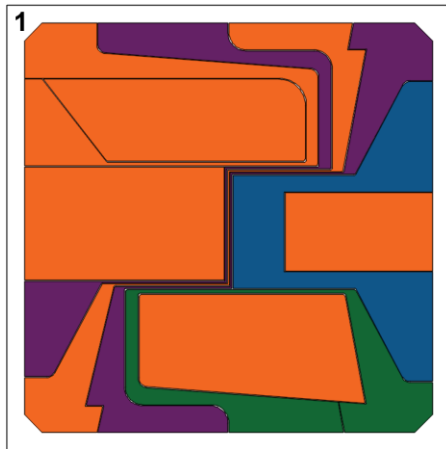
Охлаждением атомов вблизи атомного чипа



Экспериментальная схема



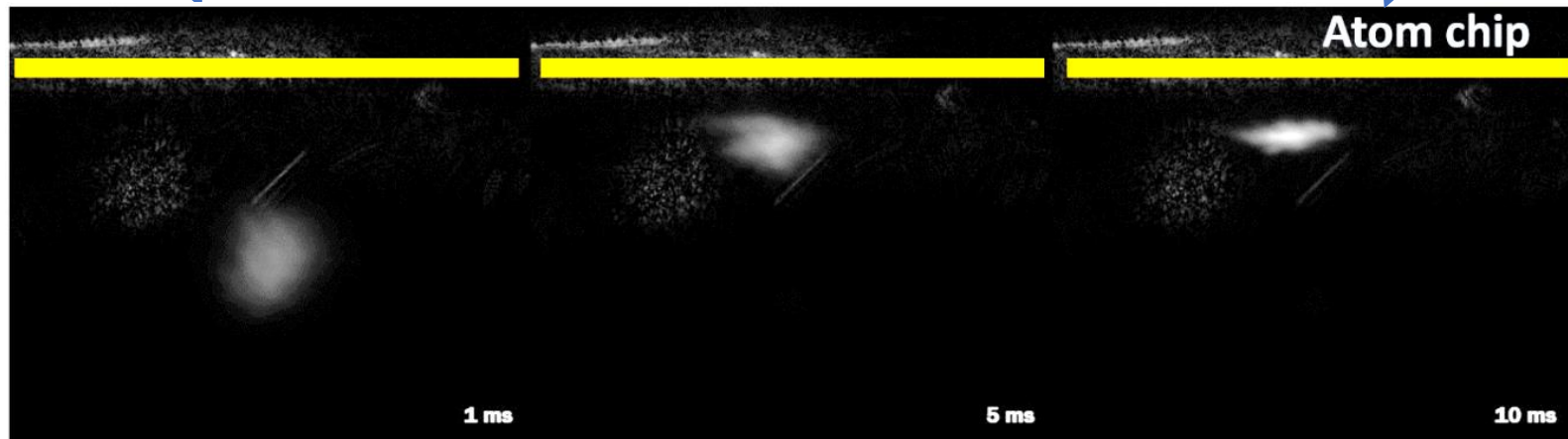
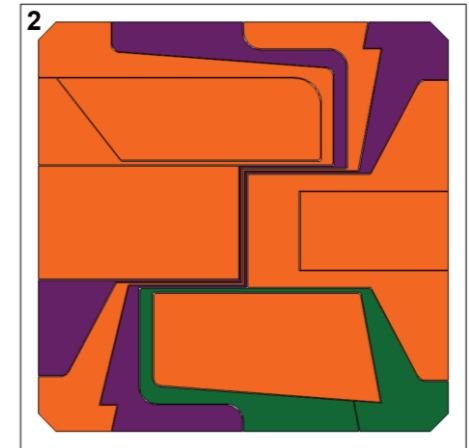
Холодные атомы вблизи атомного чипа



Достигнутые параметры

Количество атомов: $N \approx 10^7$

Концентрация: $n \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$



Магнито-оптическая
ловушка с широкой
дорожкой

Магнито-оптическая
ловушка с узкими
дорожками

Загрузка МОЛ

$$\frac{dN}{dt} = R - \frac{N}{\tau} - \beta_c N^2$$

N – количество атомов

τ – время жизни атомов в МОЛ

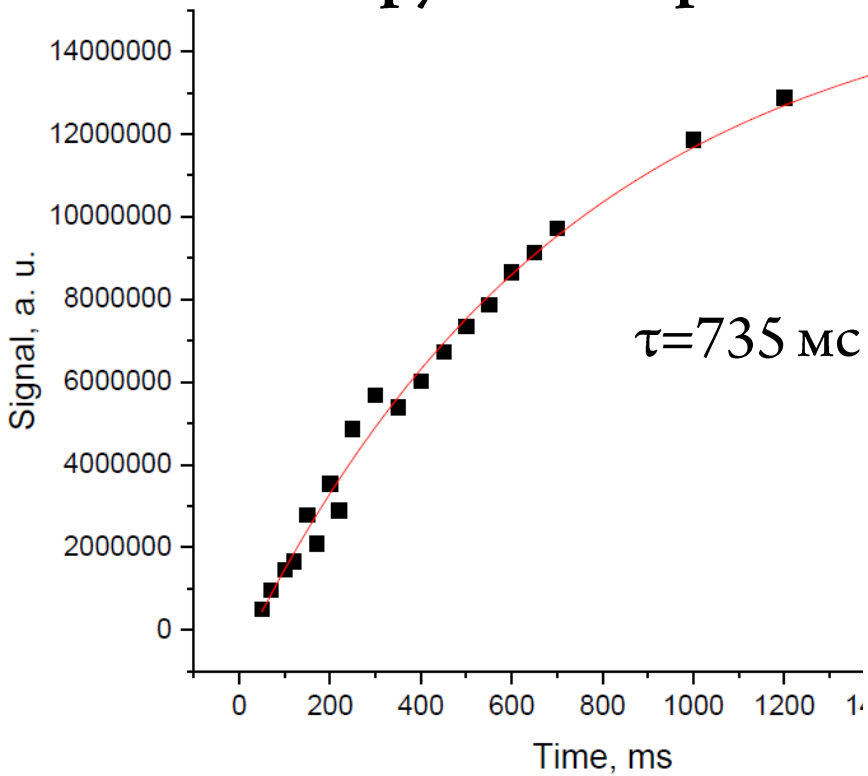
β_c – параметр двухчастичных потерь

Количество атомов в МОЛ

$$N = \frac{1}{2\beta_c\tau} \left((1 + 4\beta_c R\tau^2)^{\frac{1}{2}} - 1 \right) \approx R\tau$$

Время жизни атомов в МОЛ

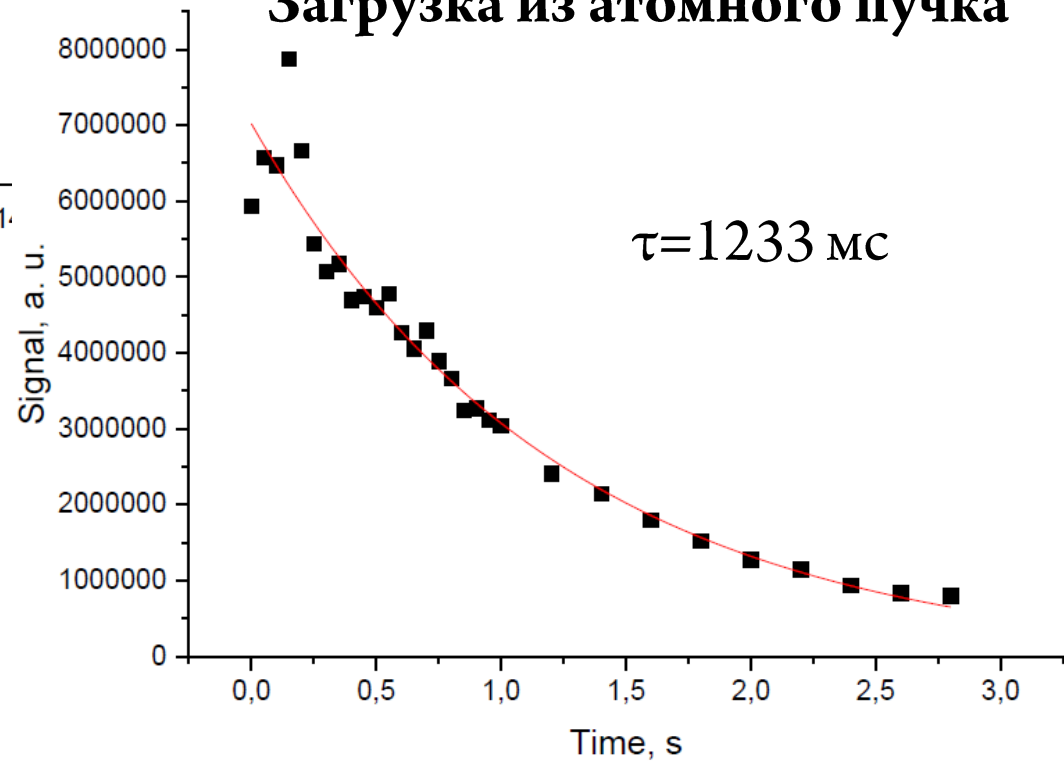
Загрузка из паров



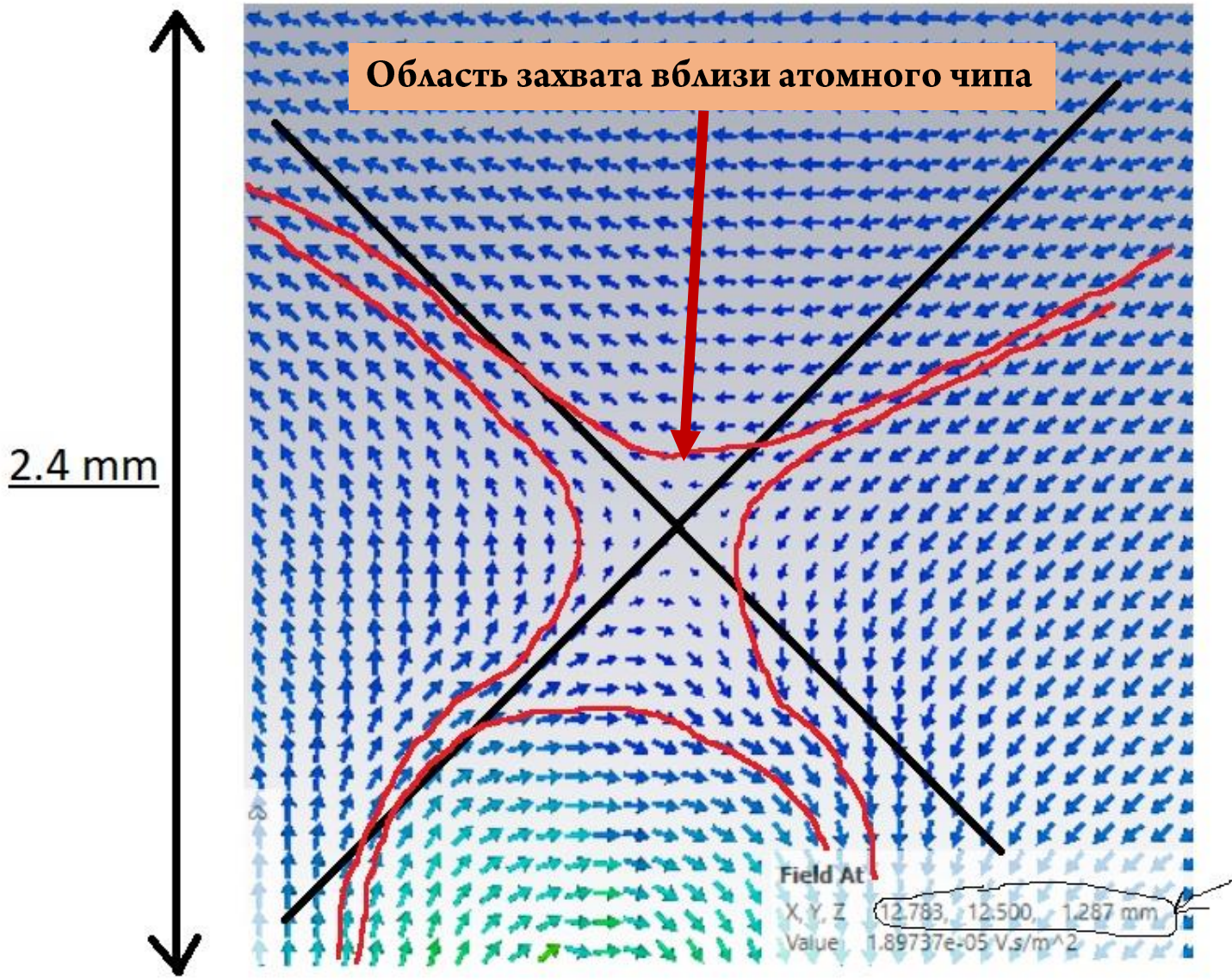
$$\frac{dN}{dt} = R - \frac{N}{\tau}$$

N – количество атомов

Загрузка из атомного пучка

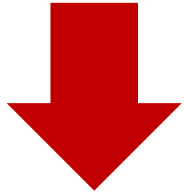


Неэффективность магнитного поля

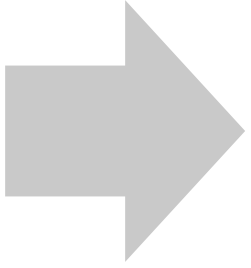


Область эффективного захвата ~ 1 мм

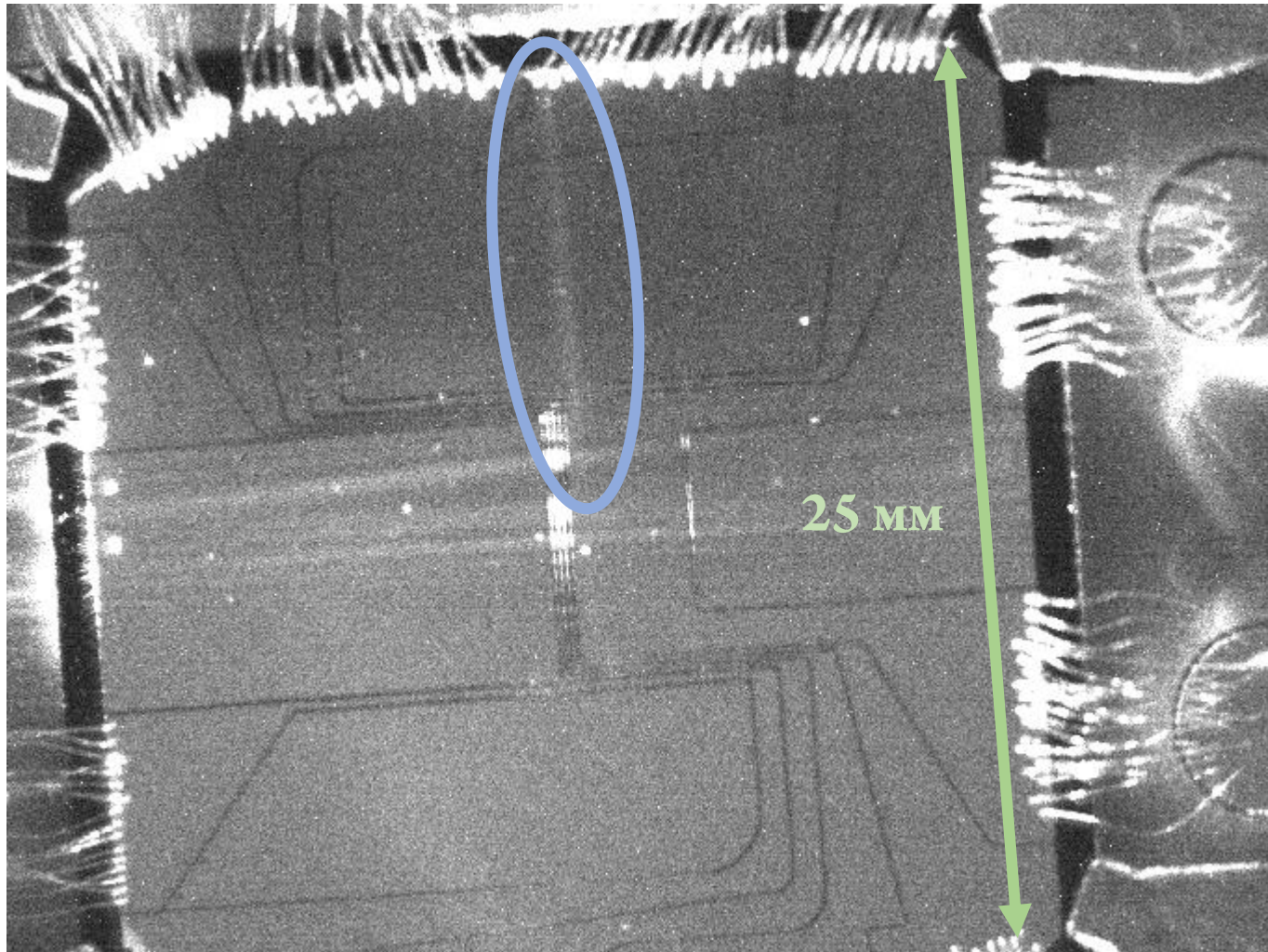
Диаметр атомного пучка в области чипа



Детектирующий лазерный луч

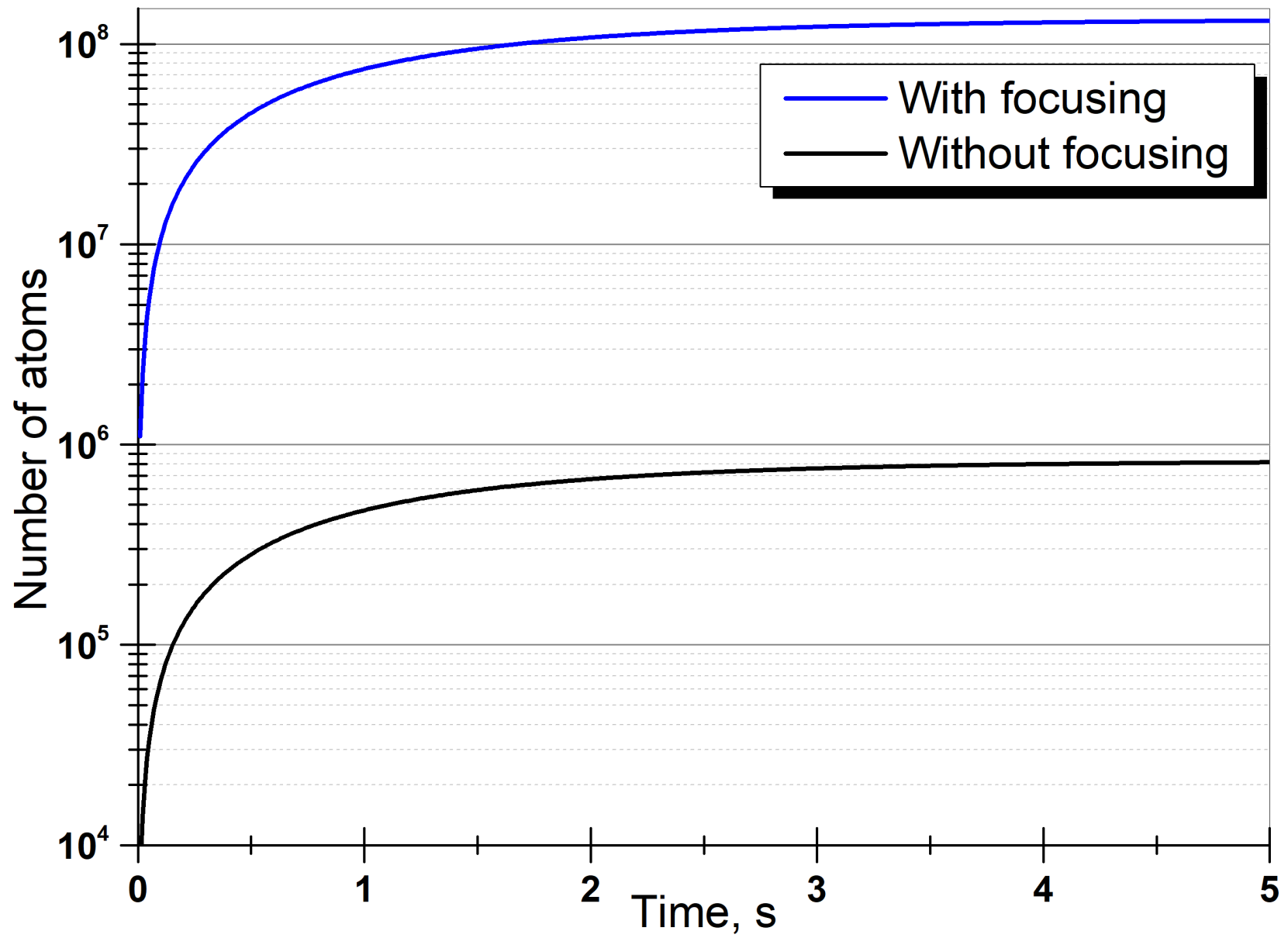


Пучок атомов

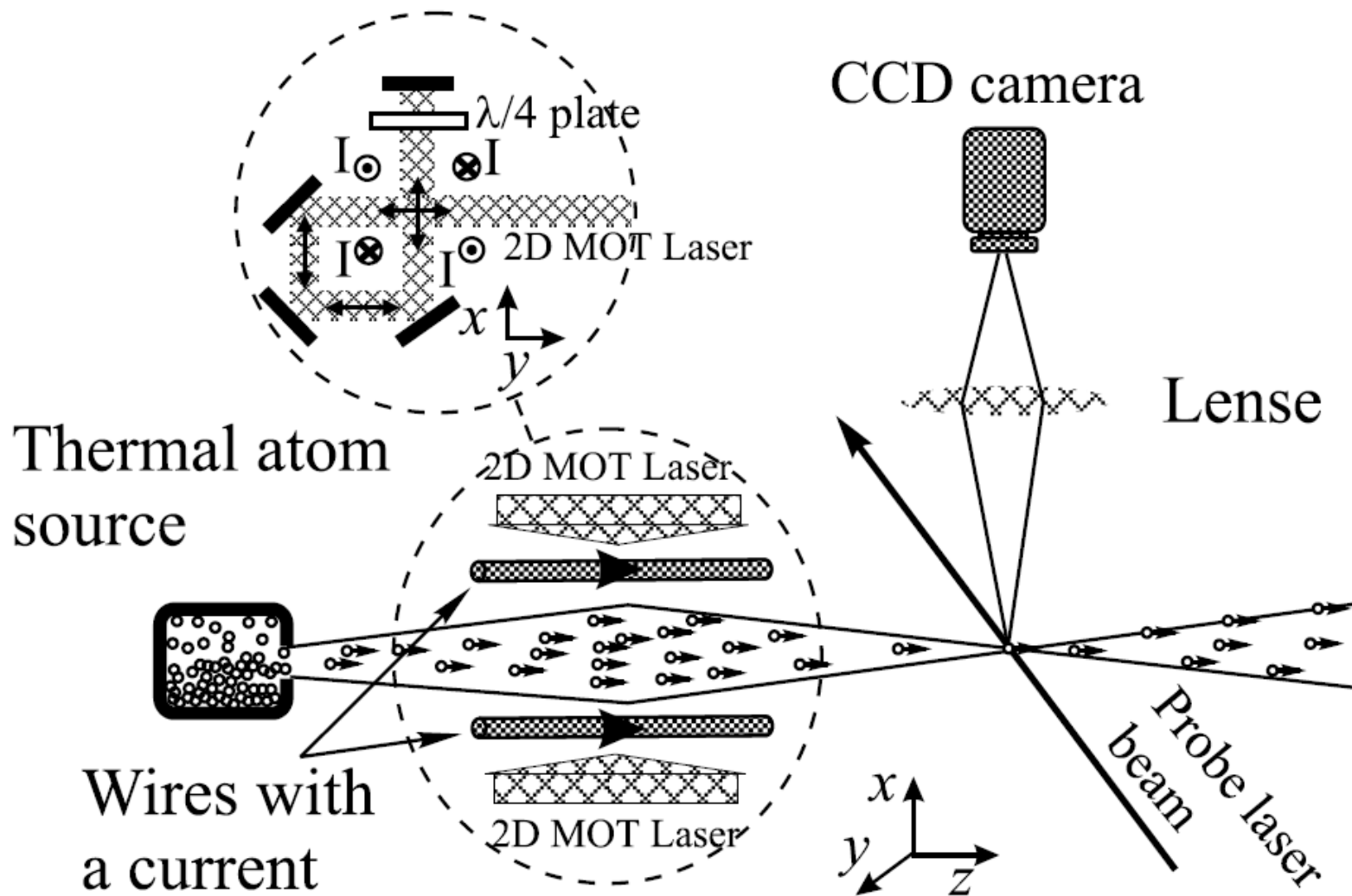


25 мм

Влияние фокусировки на скорость загрузки

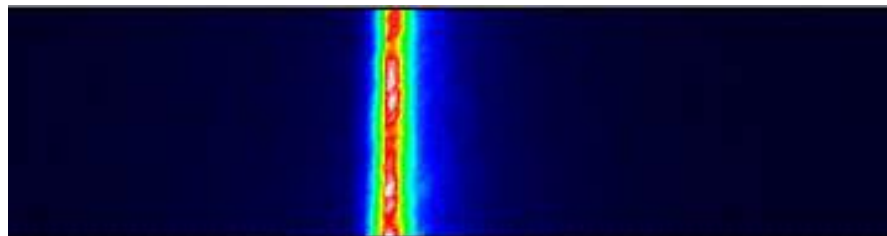


Фокусировка атомного пучка



P. N. Melentiev, et al., "Focusing of an Atomic Beam by a Two-Dimensional Magneto-Optical Trap", JETP Letters, 83, 14 (2006)

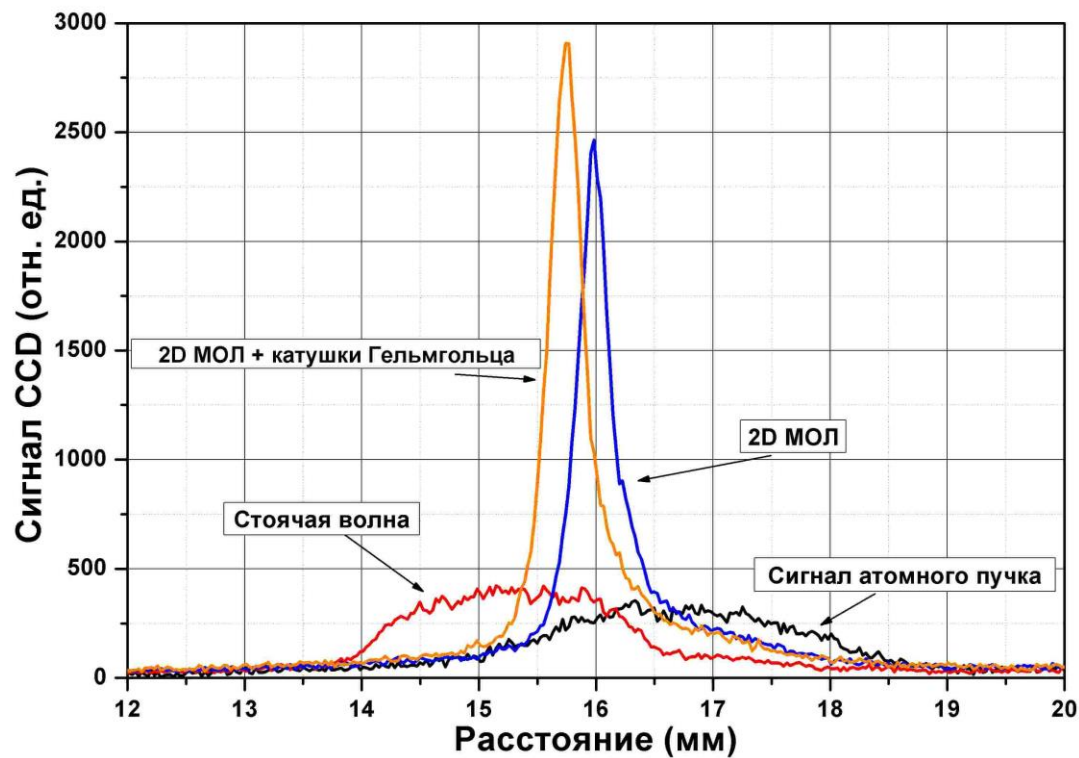
Фокусировка атомного пучка



2D МОЛ включен



2D МОЛ выключен

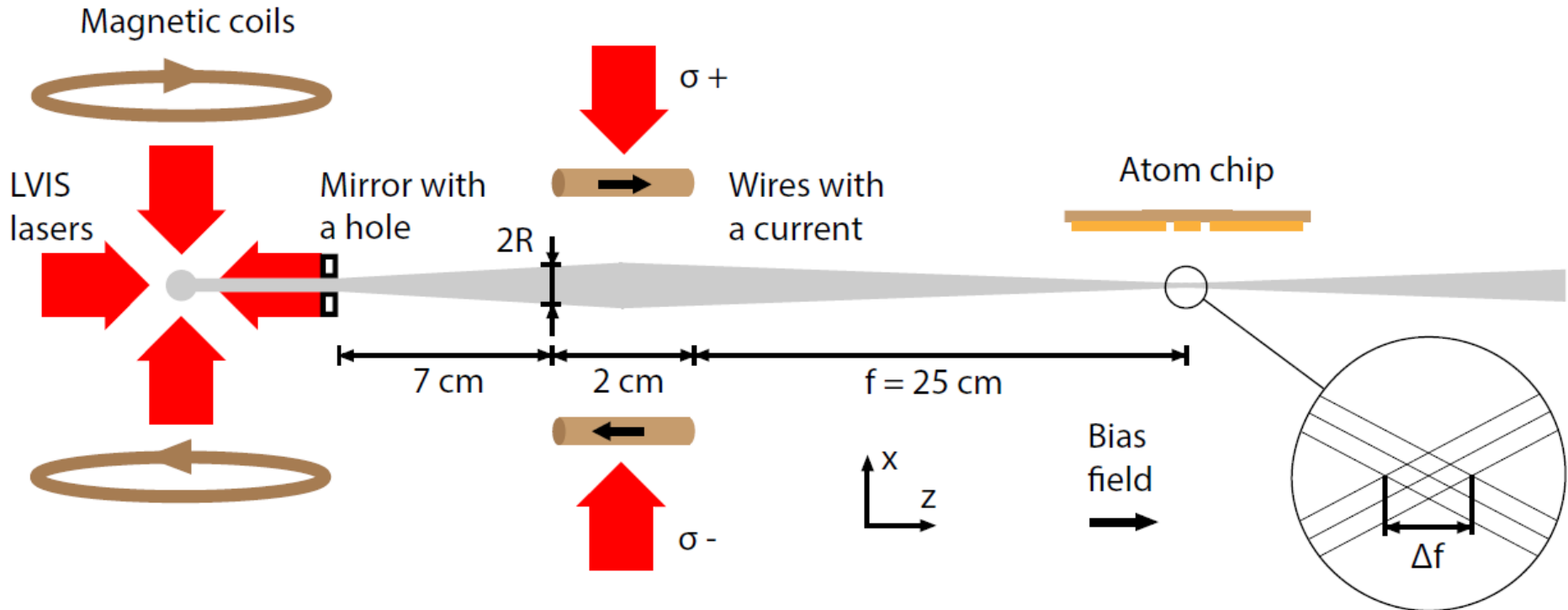
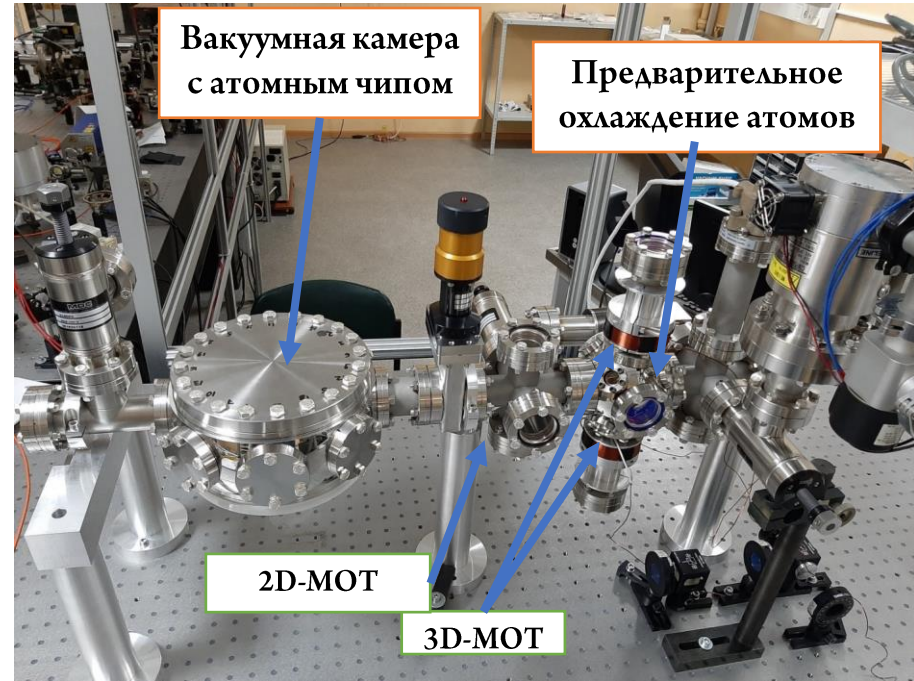


d=270 мкм

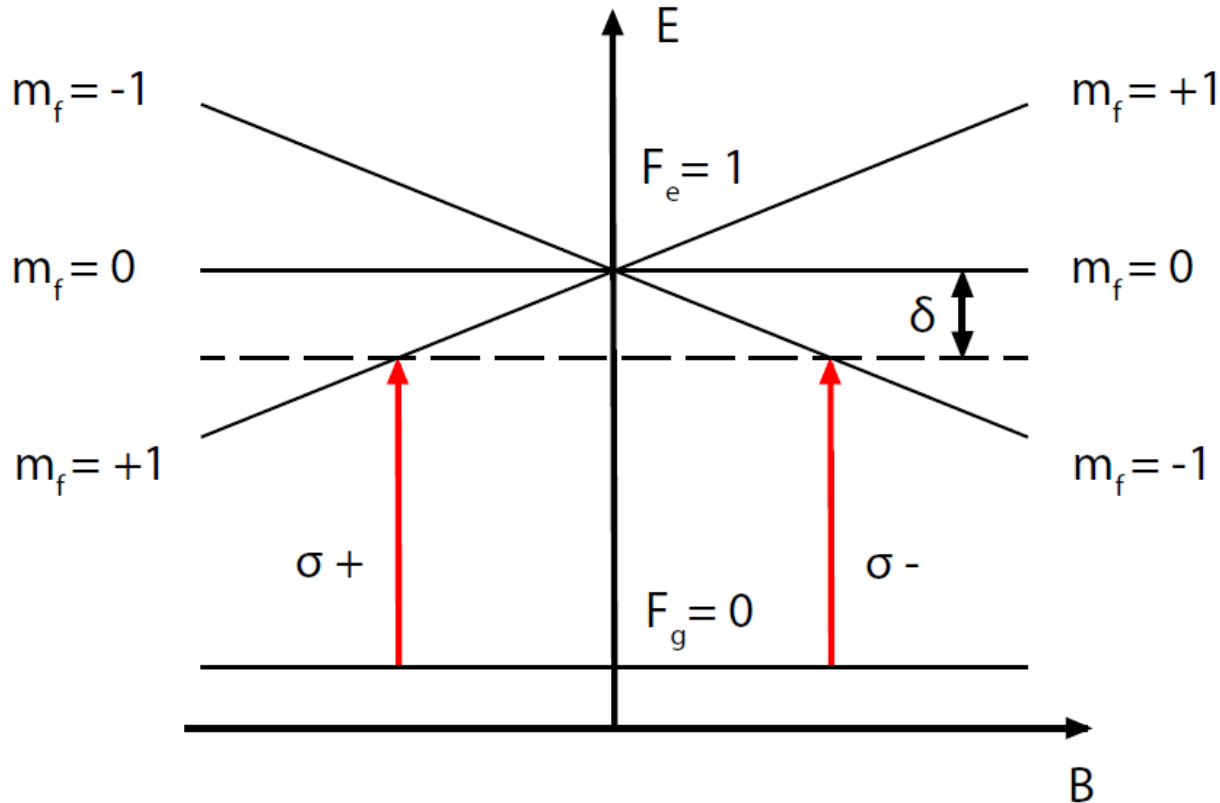
Фокусировка атомного пучка вблизи атомного чипа

$R=1,6$ мм – радиус атомного пучка на входе 2D-MOТ

Оценочный радиус в области атомного чипа $R'=5,8$ мм



Сила, действующая на атом



$$F = F(\Delta m_F = -1) - F(\Delta m_F = 1) =$$

$$= \hbar k \gamma G \left(\frac{1}{1+G + \left(\frac{\delta - k\dot{x} - \alpha g x}{\gamma}\right)^2} - \frac{1}{1+G + \left(\frac{\delta + k\dot{x} + \alpha g x}{\gamma}\right)^2} \right)$$

δ – отстройка лазерного излучения

$\alpha = 2\pi \times 1,4$ МГц/Гс – параметр сдвига линии в магнитном поле

g – градиент магнитного поля

Поперечная скорость после 2D-МОЛ

$$\delta \gg \alpha g x + k v_x$$

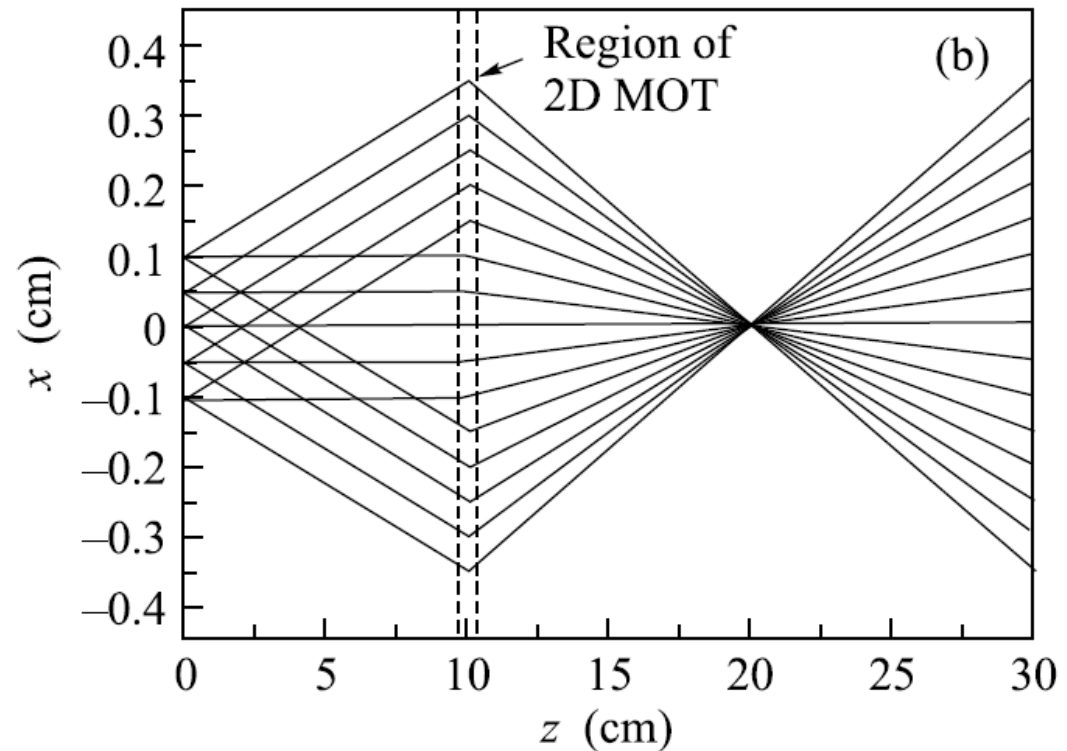
$$v_x = \frac{\alpha g x}{k} (e^{\beta t} - 1) + v_x^0 e^{\beta t}$$

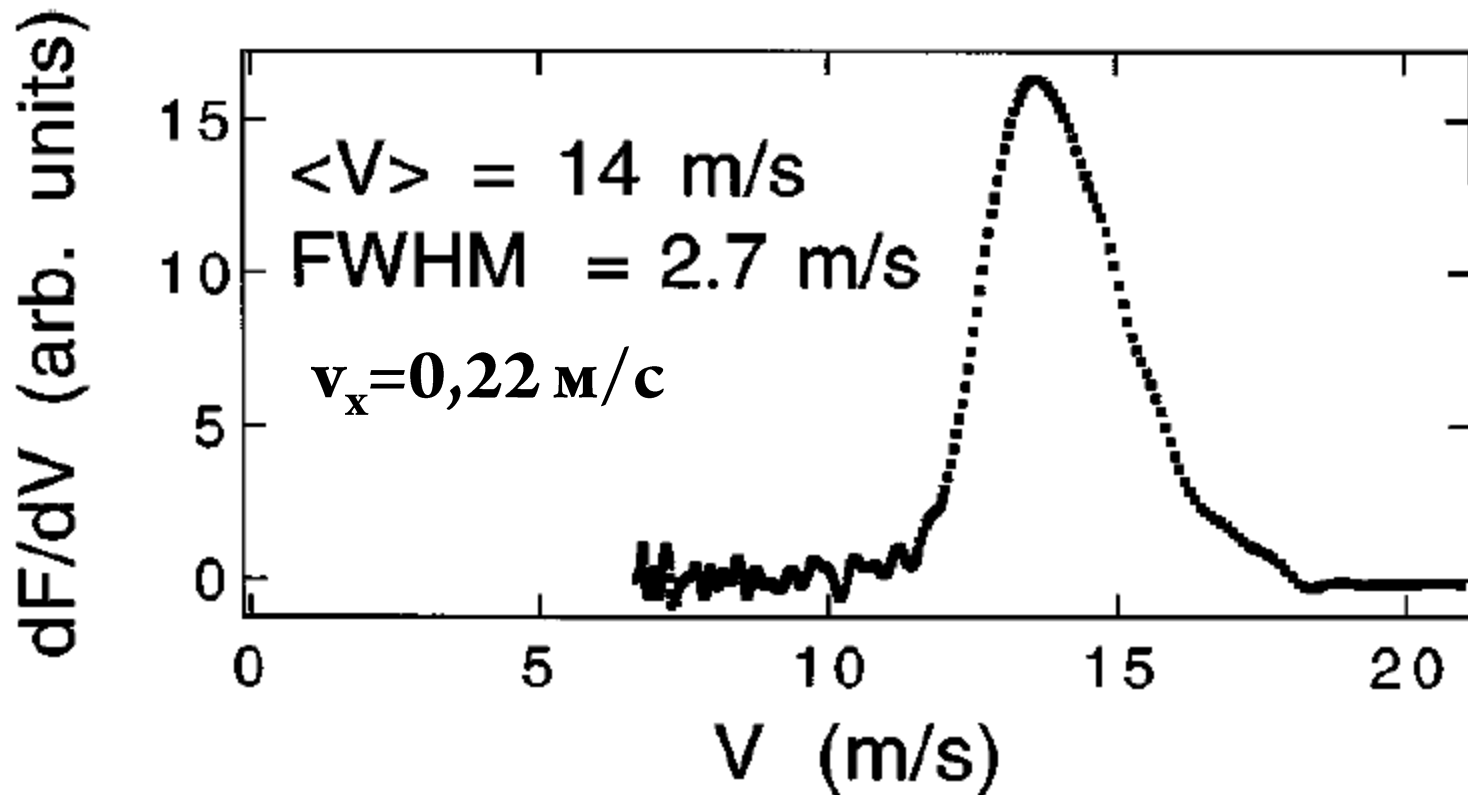
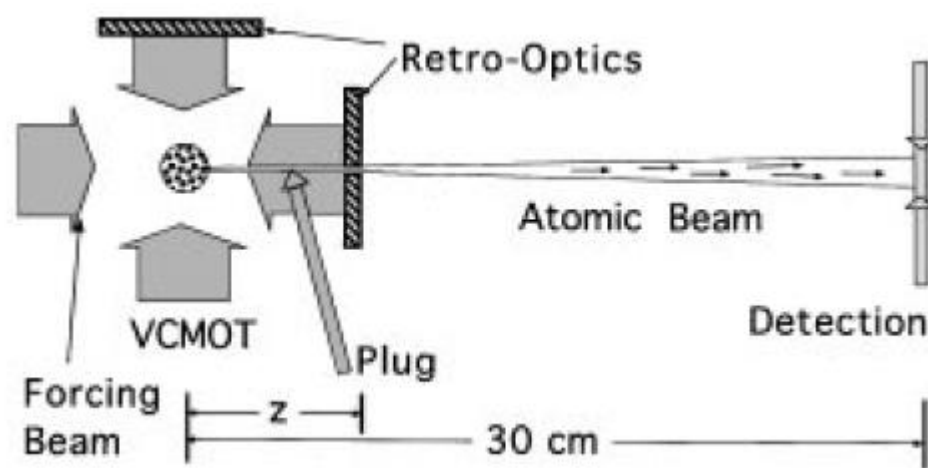
$$\beta = \frac{4\hbar k^2 \gamma^3 G \delta}{m((1+G)\gamma^2 + \delta^2)^2}$$

$$f = \frac{k v_z}{\alpha g}$$

Время взаимодействия

$$t_{\text{int}} = L/v_z > |1/\beta|$$
$$v_x = -\frac{\alpha g x}{k}$$

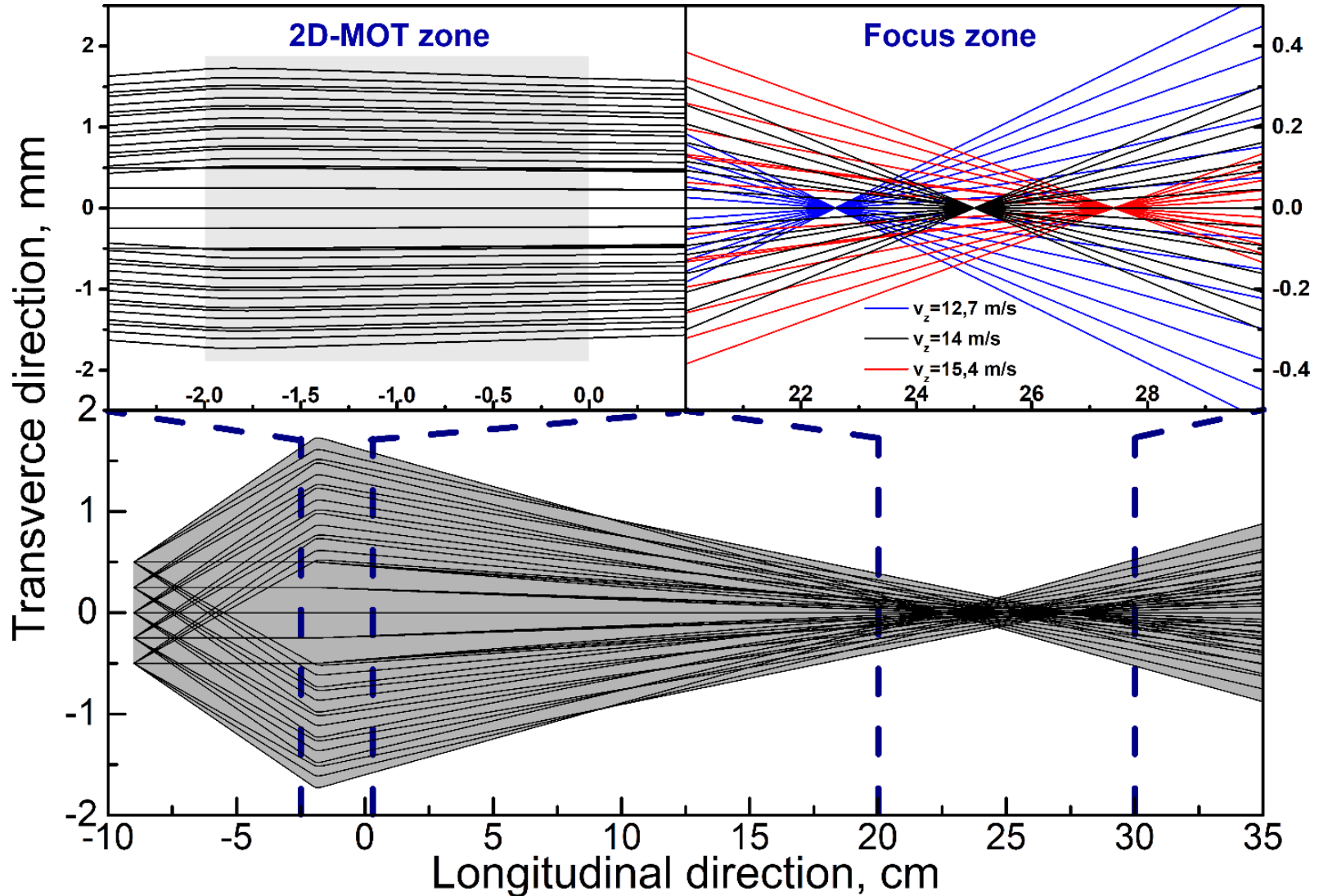




Оценки

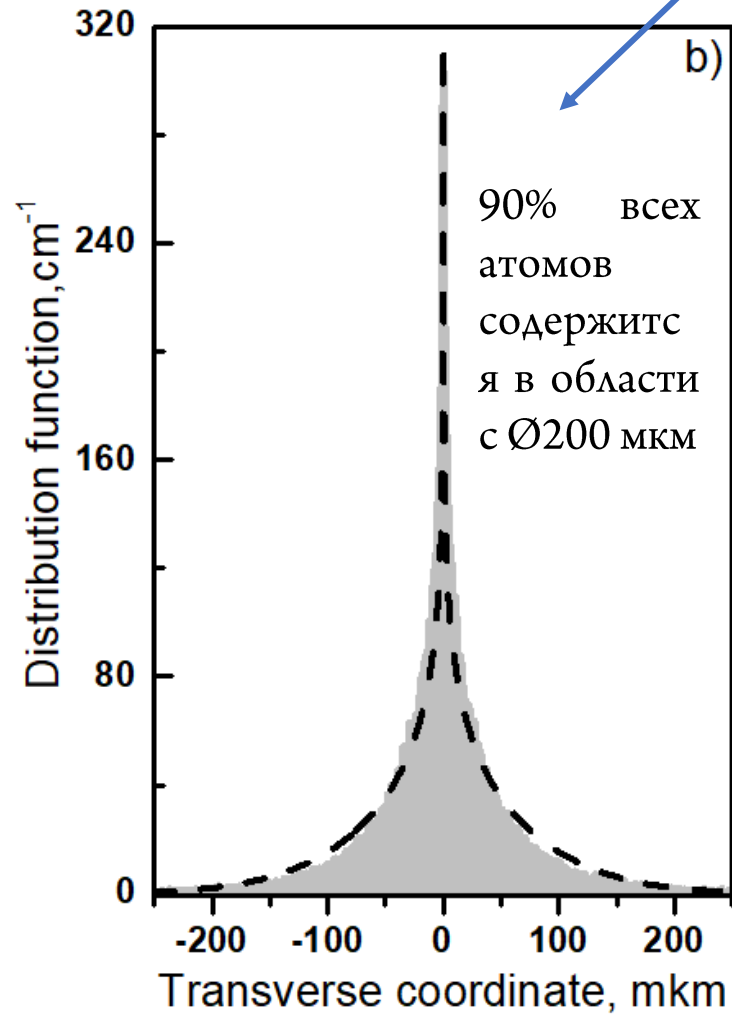
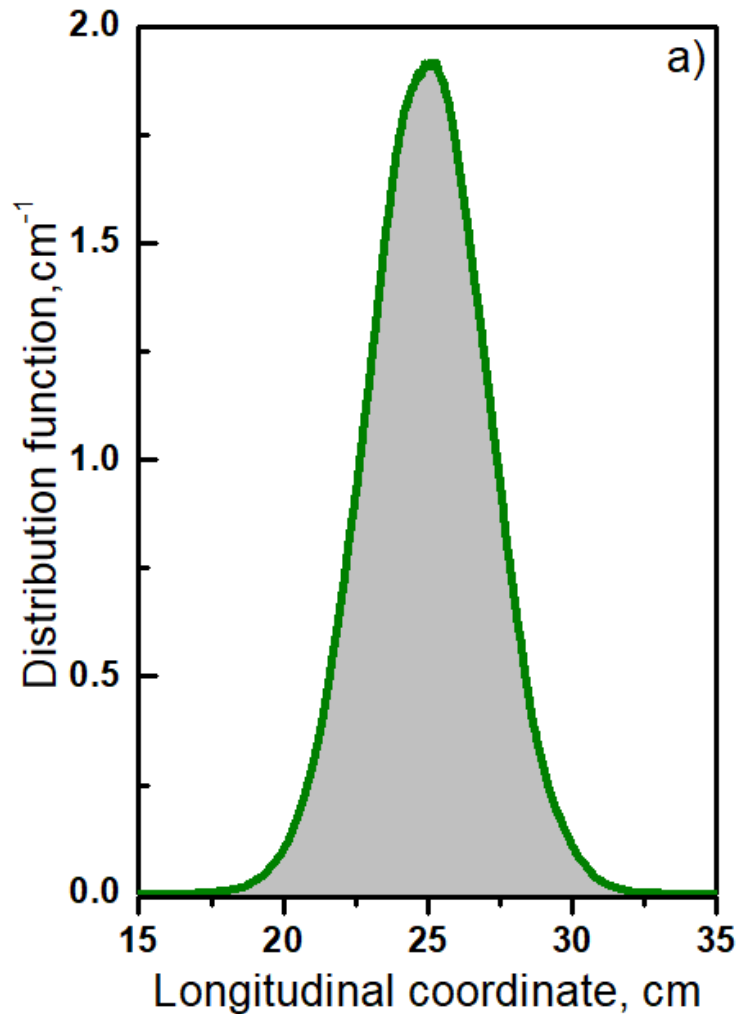
$v_z=14$ м/с	$\Delta v_z=2,7$ м/с
$f(v_z=14$ м/с) = 25 см	$\Delta f=4,8$ см
$g=0,51$ Гц/см	

$\delta=-2\Gamma$	$G=10$
$\beta=-10^4$ с ⁻¹	
$v_z < \beta L=200$ м/с	$v_x < 2,5$ м/с



Распределение атомов

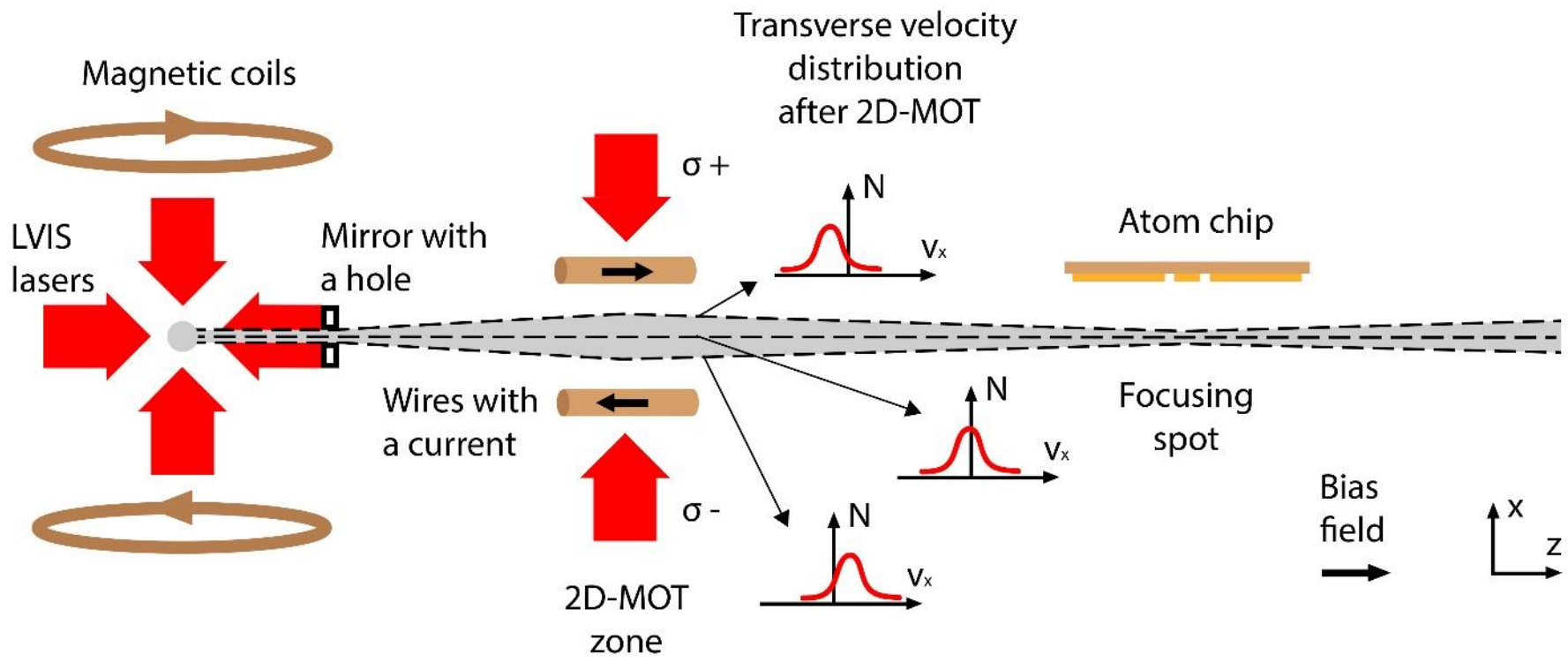
$$dN_x(x) = N_0 F_x(x) dx$$



$$F_x(x) = \frac{1}{2R} \left(\int_x^R f\left(\frac{x'v_0}{(x'-x)}\right) \frac{x'v_0}{(x'-x)^2} dx' - \int_{-R}^0 f\left(\frac{x'v_0}{(x'+x)}\right) \frac{x'v_0}{(x'+x)^2} dx' \right), x > 0$$

$$v_0 = \frac{f_0 \alpha g}{k}$$

Учет распределения по поперечным скоростям



$$\Delta x = \frac{f}{v_z} \Delta v_x$$

Учет диффузии импульса

Уравнение Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial v_x} \left(\frac{F_x}{m} w \right) + \frac{\partial^2}{\partial v_x^2} \left(\frac{D_{xx}}{m^2} w \right)$$

Доплеровское охлаждение

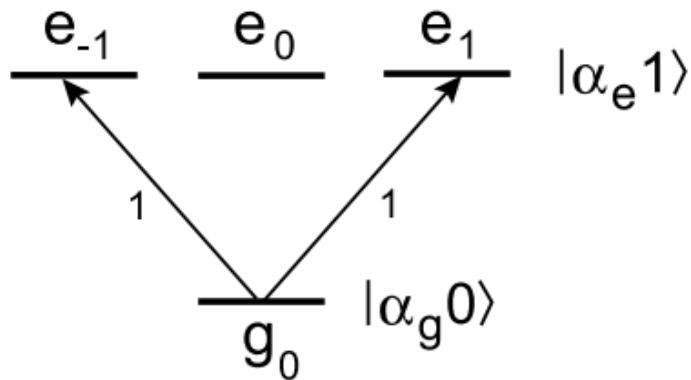


Схема (1+3)-уровневого атома

Суб-доплеровское охлаждение

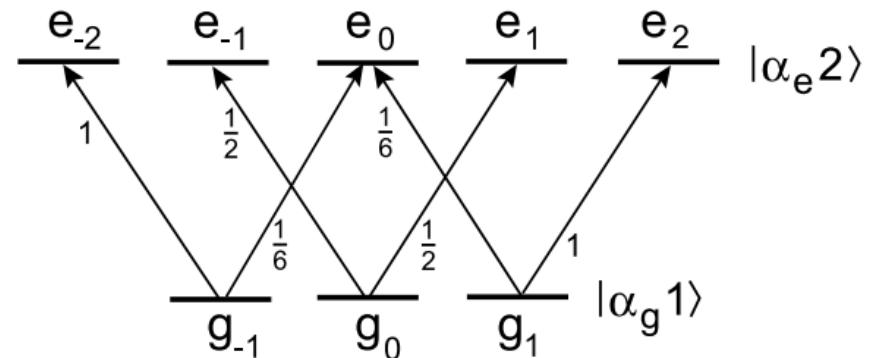
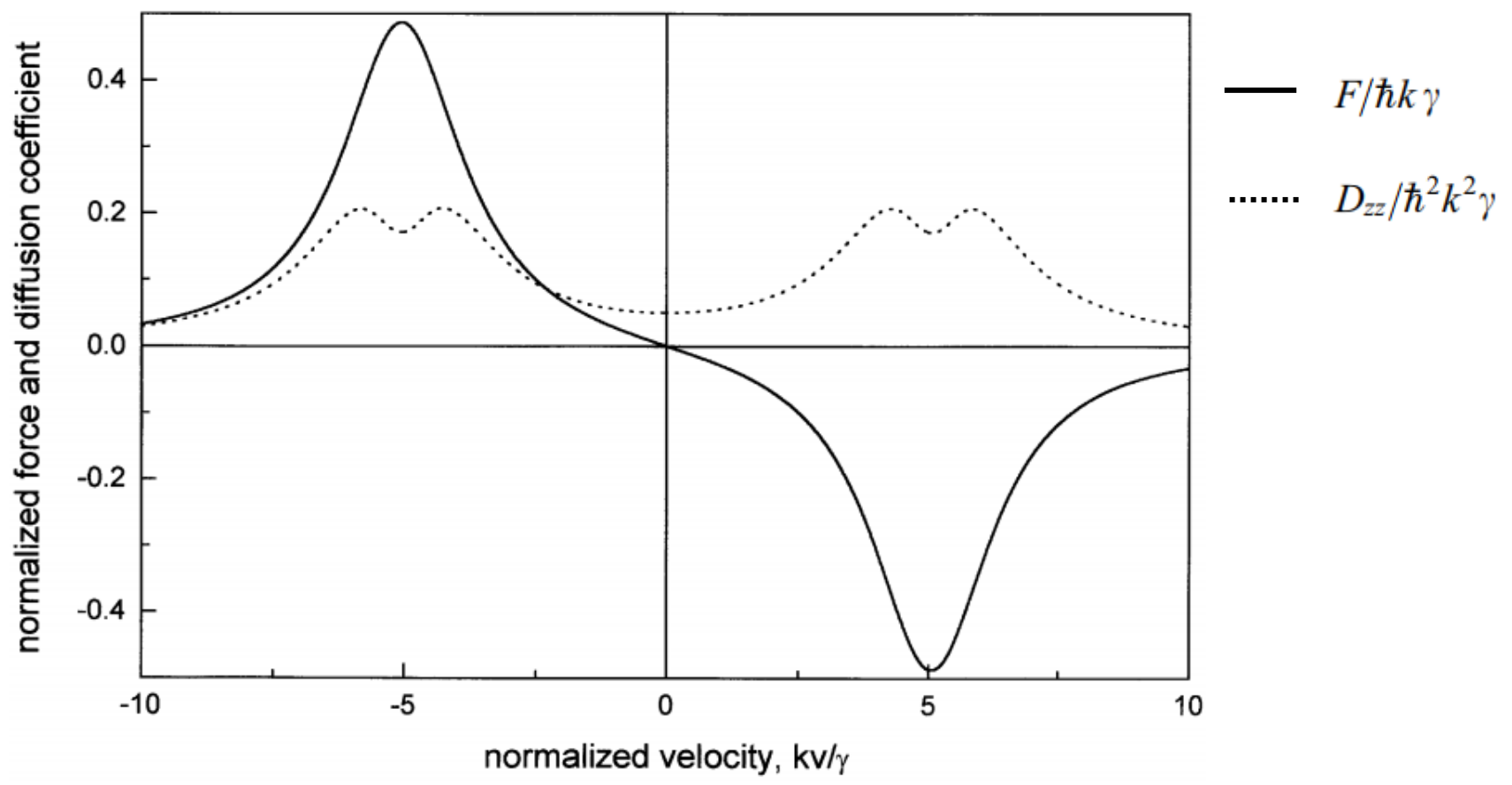
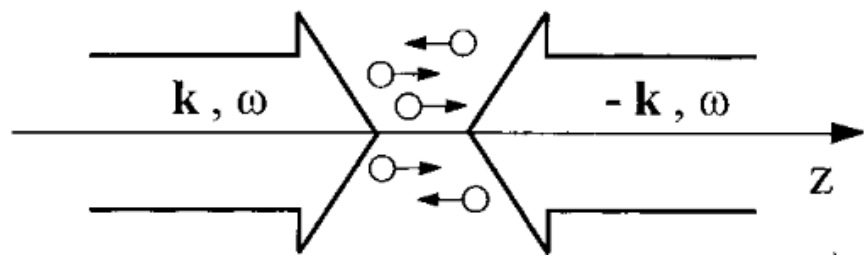
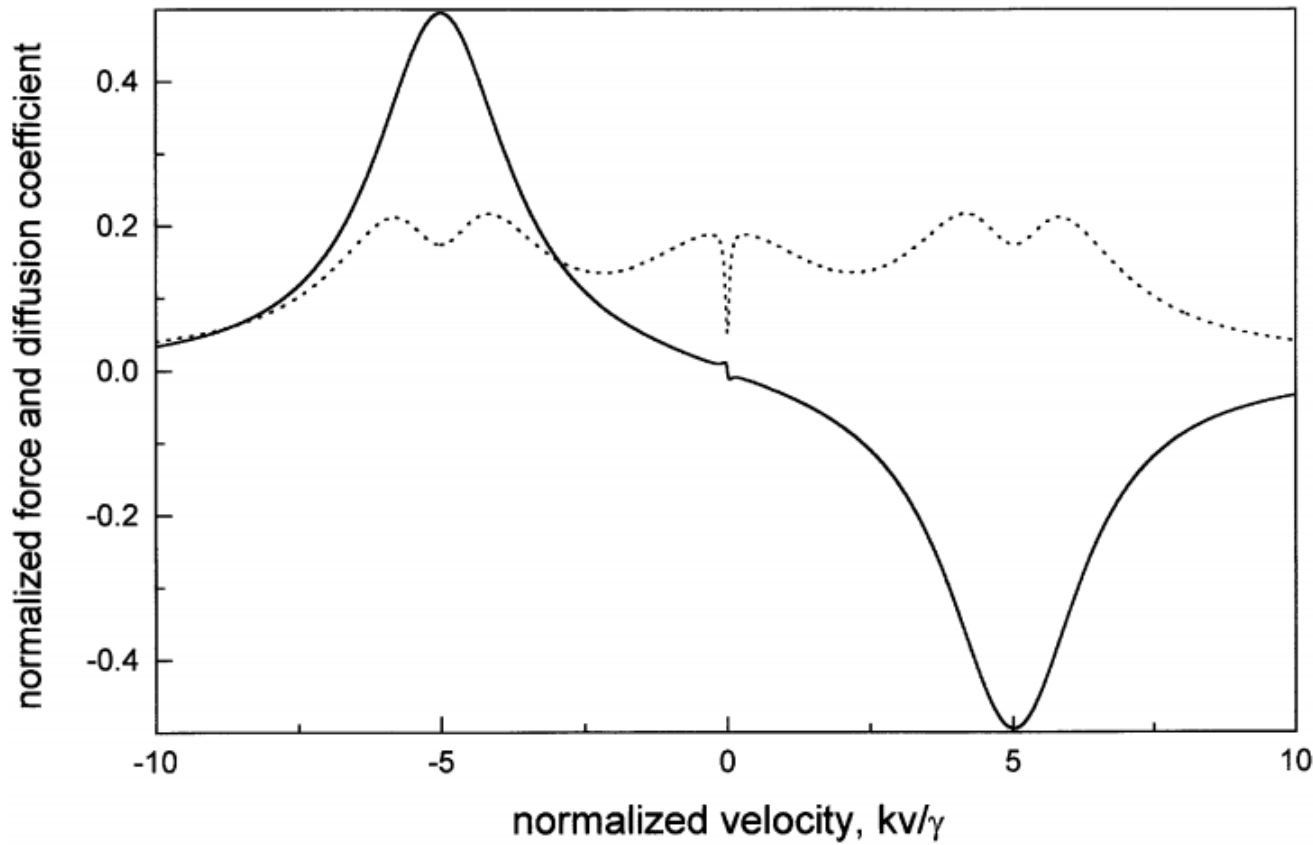
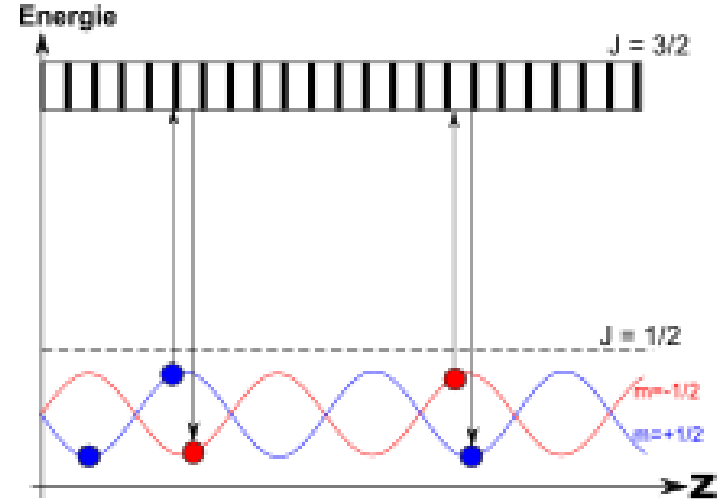
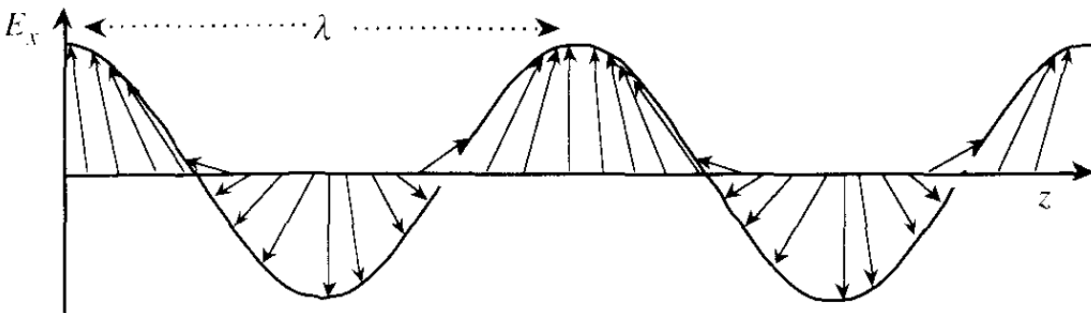


Схема (3+5)-уровневого атома

Доплеровское охлаждение



Суб-доплеровское охлаждение



— $F/\hbar k \gamma$
 $D_{zz}/\hbar^2 k^2 \gamma$

$$T = \frac{D(0)}{M\beta k_B}$$

Учет диффузии импульса. Доплеровский режим охлаждения

Уравнение Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial v_x} \left(\frac{F_x}{m} w \right) + \frac{\partial^2}{\partial v_x^2} \left(\frac{D_{xx}}{m^2} w \right)$$

Отстройка
от частоты
резонанса

$$\delta = -4\gamma$$

$$G = 10$$

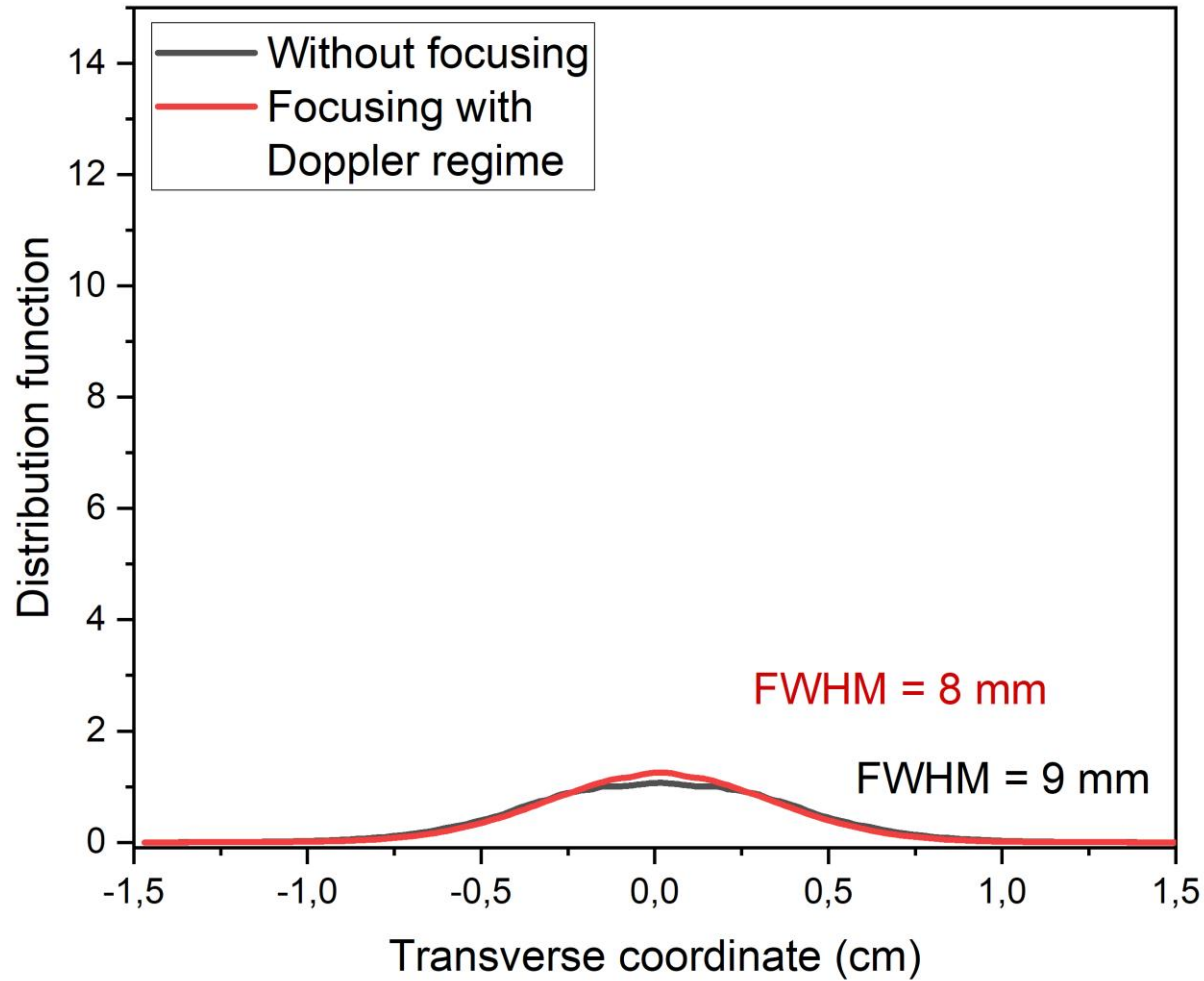
Сила, действующая на атом в 2D-МОЛ
в режиме доплеровского охлаждения:

$$F_x(x, v_x) = -\hbar k \gamma G \left(\frac{1}{1 + G + \left(\frac{\delta + kv_x + \omega_e(x)}{\gamma} \right)^2} - \frac{1}{1 + G + \left(\frac{\delta - kv_x - \omega_e(x)}{\gamma} \right)^2} \right)$$

Тензор диффузии импульса:

$$D_{xx}(x, v_x) = -0.7 \hbar^2 k^2 \gamma G \left(\frac{1}{1 + G + \left(\frac{\delta + kv_x + \alpha g x}{\gamma} \right)^2} + \frac{1}{1 + G + \left(\frac{\delta - kv_x - \alpha g x}{\gamma} \right)^2} \right)$$

Учет диффузии импульса. Доплеровский режим охлаждения



Учет диффузии импульса. Суб-доплеровский режим охлаждения

Уравнение Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial v_x} \left(\frac{F_x}{m} w \right) + \frac{\partial^2}{\partial v_x^2} \left(\frac{D_{xx}}{m^2} w \right)$$

Отстройка
от частоты
резонанса

$$\delta = -20\gamma$$

$$G = 1$$

Сила, действующая на атом в 2D-МОЛ
в режиме суб-доплеровского охлаждения:

$$\frac{F_x(x, v_x)}{m} = a_{v_x} v_x(t) + a_x x(t)$$

$$a_x = -\frac{5}{748} \frac{gk\mu_B\gamma^3 G |\delta| (17\gamma^2 G g_g + 176(3g_e - g_g)\mu^2)}{(\delta^2 + \gamma^2)^2 \mu^2 M};$$

при $x \rightarrow 0$ и $v_x \rightarrow 0$

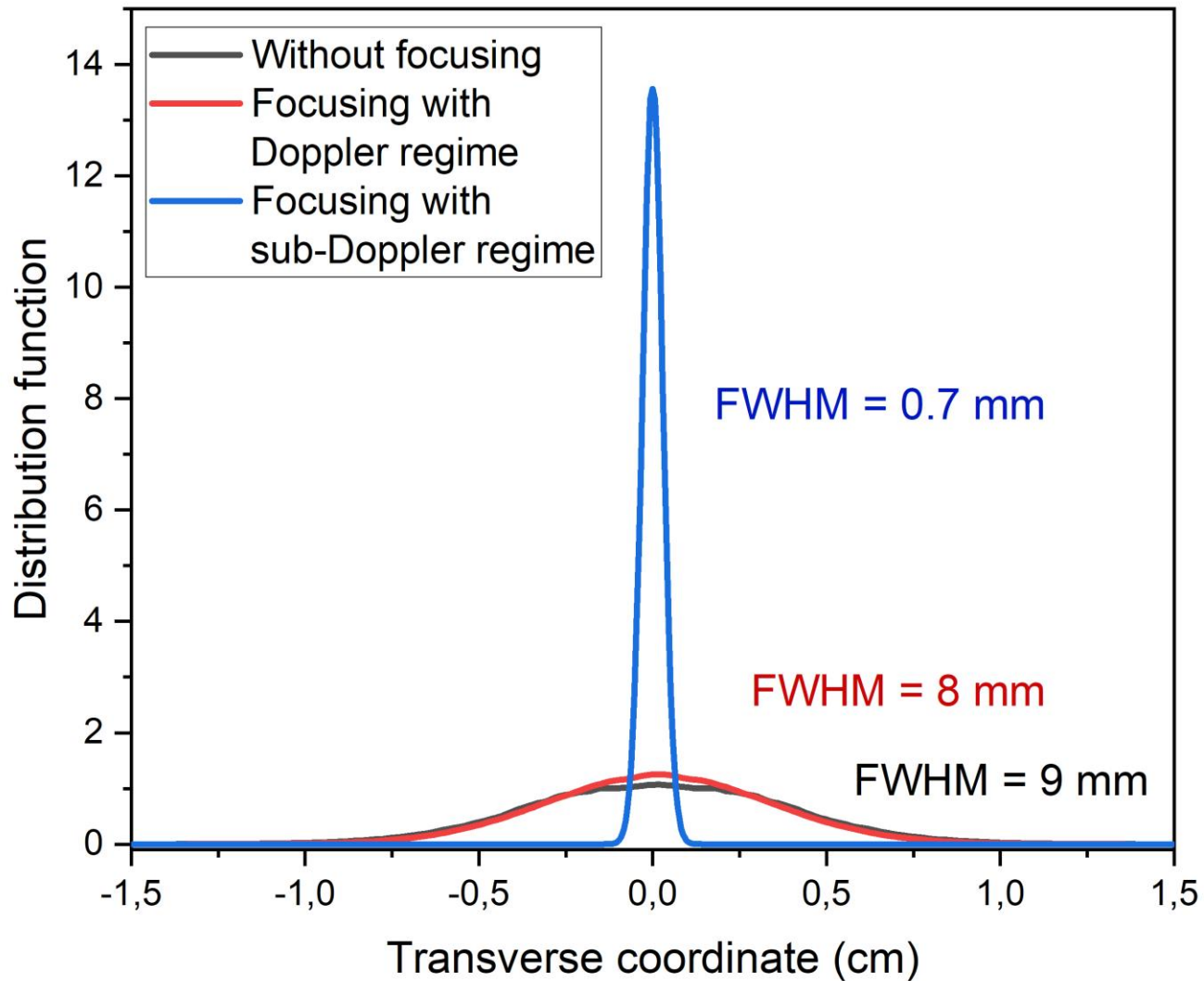
$$a_{v_x} = -\frac{5}{748} \frac{\hbar k^2 \gamma^3 G |\delta| (17\gamma^2 G + 352\mu^2)}{(\delta^2 + \gamma^2)^2 \mu^2 M},$$

Тензор диффузии импульса:

$$D_0 = D_{xx}(0, 0) = -\frac{23}{17} \hbar^2 k^2 \gamma \frac{G\gamma^2}{\delta^2}$$

$$\mu = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{17}{33} \frac{G\gamma^2 \sqrt{5\gamma^2 + \delta^2}}{\gamma^2 + \delta^2}}$$

Учет диффузии импульса. Суб-доплеровский режим охлаждения



Заключение

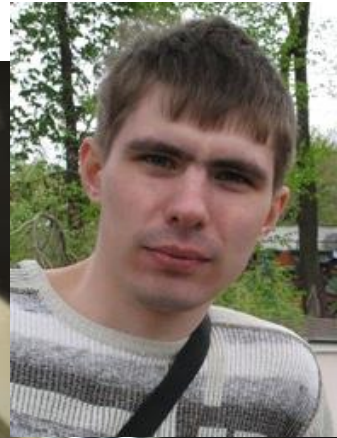
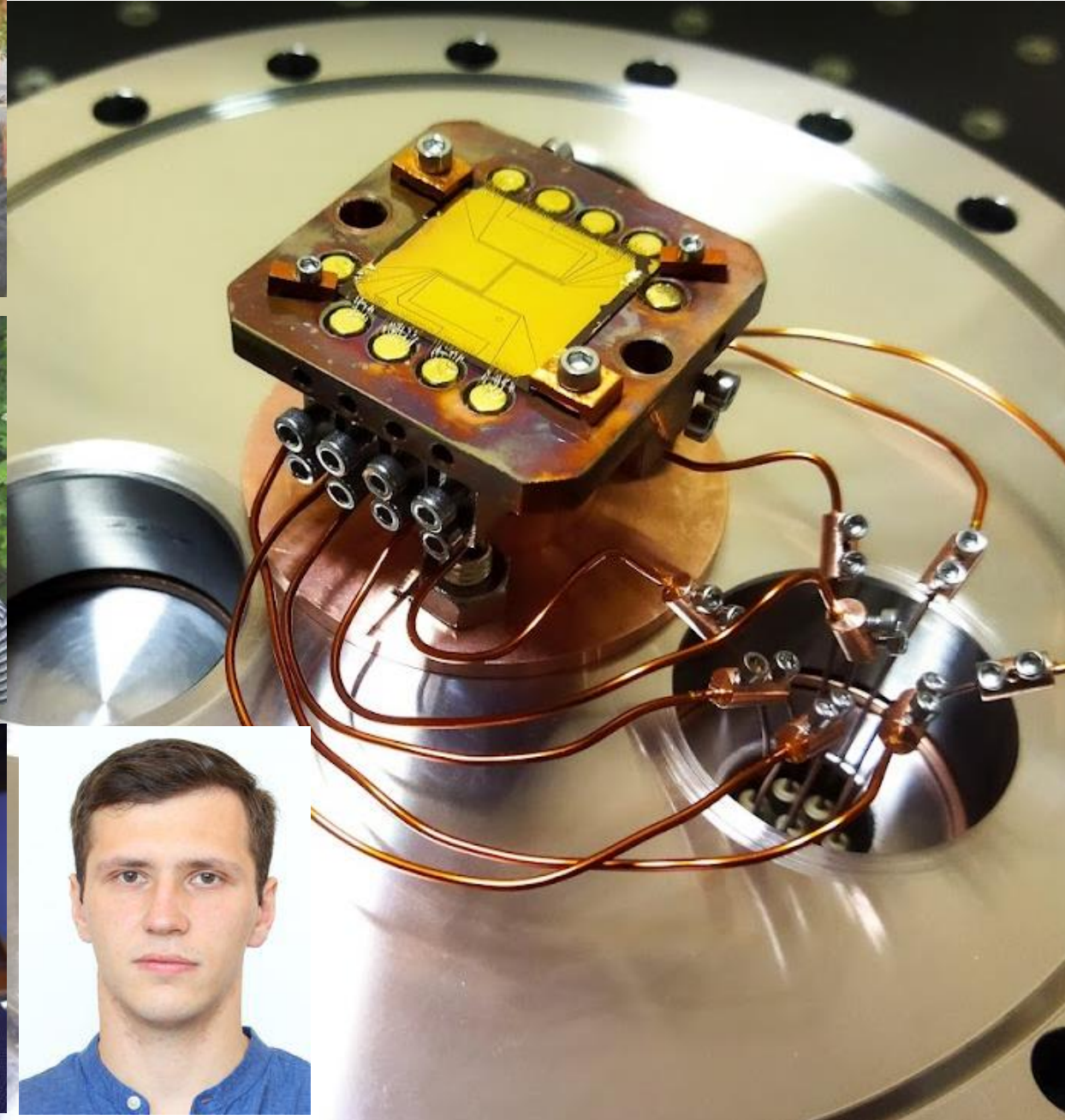


Рассмотрена схема фокусировки низкоскоростного атомного пучка (LVIS) двумерной магнито-оптической ловушкой (2D-МОЛ) в область охлаждения атомного чипа

Показано, что при фокусировке с помощью 2D-МОЛ в суб-доплеровском режиме охлаждения расчетный диаметр сфокусированного пятна составил 0,7 мм.

При этом плотность атомов в фокальной плоскости увеличилась в 169 раз.

Спасибо за внимание!





КОНКУРС ЛУЧШИХ
РУССКОЯЗЫЧНЫХ НАУЧНЫХ
И НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫХ
РАБОТ РАБОТНИКОВ
НИУ ВШЭ

ПОЧЕТНАЯ ГРАМОТА

*Простирайтесь в обогащении разума
и в украшении русского слова*

М.В. Ломоносов

НАГРАЖДАЕТСЯ ПОБЕДИТЕЛЬ В НОМИНАЦИИ

«Научная»

ПО НАПРАВЛЕНИЮ

«Физика и инженерные науки»

АВТОР/АВТОРСКИЙ КОЛЛЕКТИВ

Афанасьев А.Е., Быкова Д.В.,
Скакуненко П.И., Балыкин В.И.

НАЗВАНИЕ РАБОТЫ

Фокусировка атомного пучка для эффективной
загрузки атомного чипа // Письма в ЖЭТФ. 2022.
№115 (9). С.562 – 570

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ЖЮРИ

В.В. Радаев

Москва, 2023