



Факультет  
физики

Базовая кафедра квантовой  
оптики и нанофотоники

Москва  
2023

# Фокусировка атомного пучка для локализации атомов вблизи атомного чипа

Д.В. Быкова<sup>1,2</sup>, П.И. Скакуненко<sup>3,4</sup>, А.Е. Афанасьев<sup>1</sup>, В.И. Балыкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт

<sup>4</sup>Сколковский институт науки и технологий

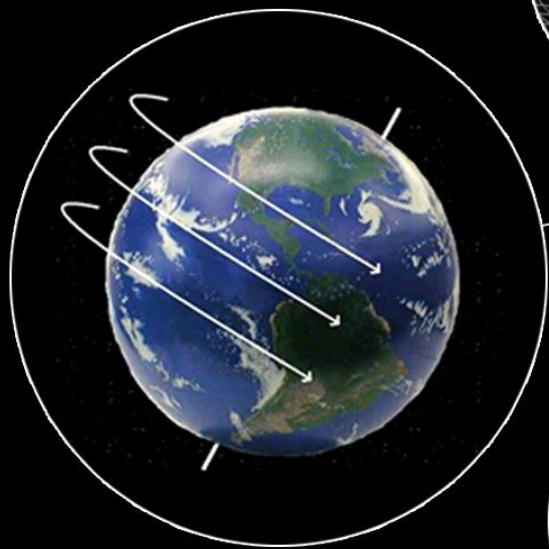


## Содержание доклада

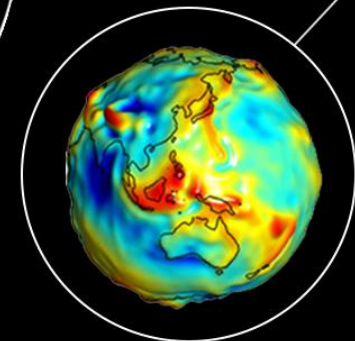
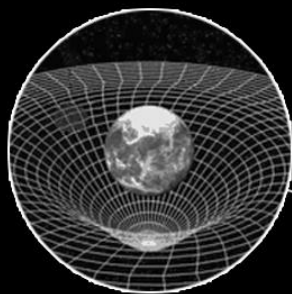
1. Введение.
  - а) Атомный чип в приложениях квантовой сенсорики.
  - б) Последовательность работы квантового сенсора на атомном чипе.
  - с) Загрузка ловушки вблизи атомного чипа из низкоскоростного атомного пучка.
2. Цели и задачи работы.
3. Фокусировка атомного пучка для эффективной загрузки атомного чипа.
  - а) Решение уравнение Ньютона
  - б) Решение уравнения Фоккера-Планка
4. Выводы

## Фундаментальные применения

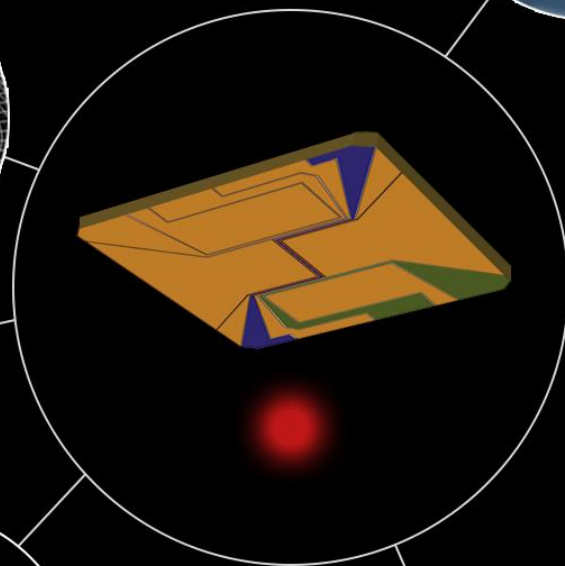
- Определение фундаментальных констант
- Измерение ускорения свободного падения
- Проверка принципа эквивалентности Эйнштейна
- Поиск отклонений от Ньютоновского закона гравитации
- Детектирование гравитационных волн
- Квантовая гравитация
- Поиск тёмной энергии
- Поиск тёмной материи



Геофизика



Гравиметрия



## Навигация

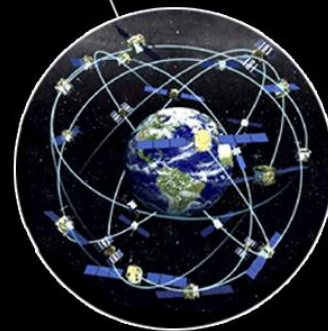


## Геология



## Космические спутники

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



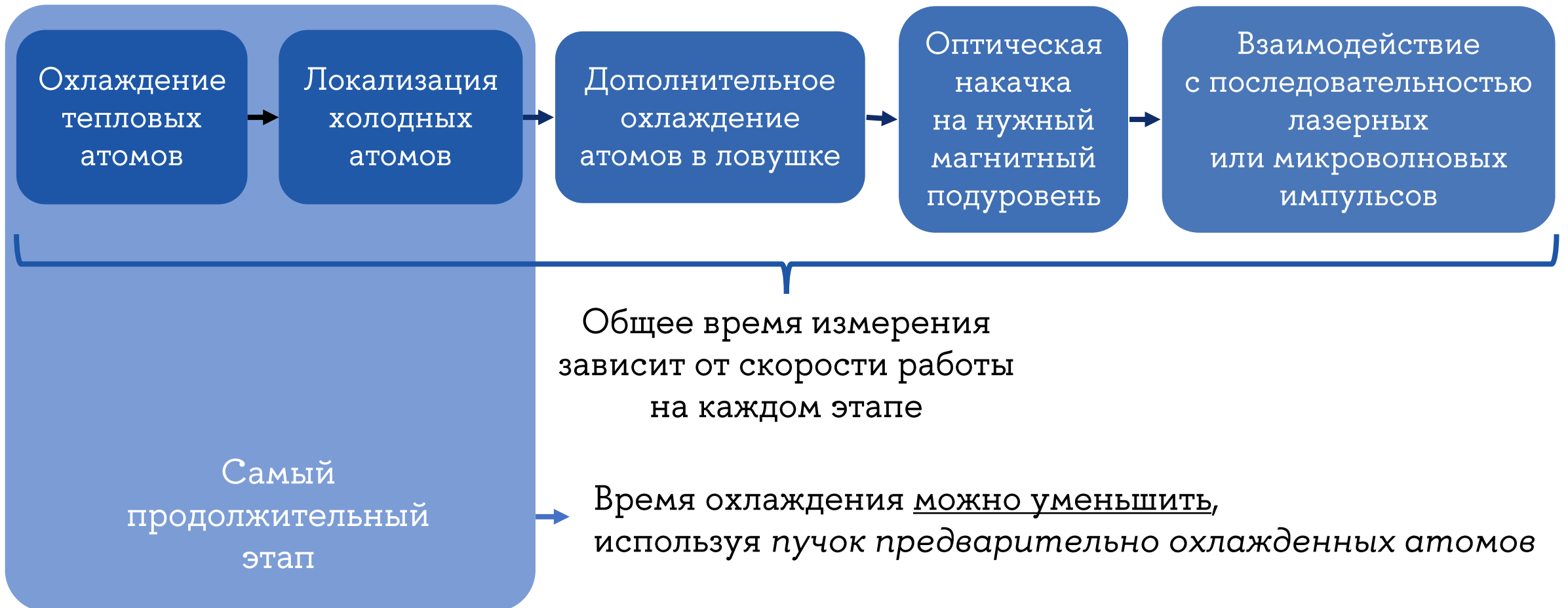
## Введение

**Атомный чип** – устройство для создания магнитных полей требуемой конфигурации при протекании тока через микропровода на его поверхности.

С помощью атомного чипа формируется ловушка для нейтральных атомов – основа для создания **квантовых сенсоров.**



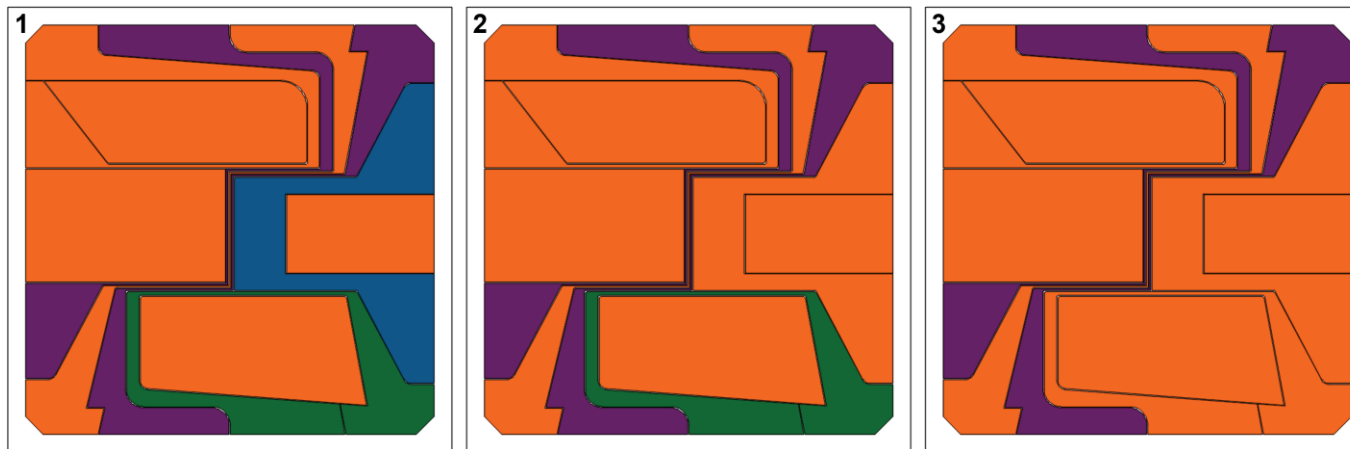
## Последовательность работы квантового сенсора на атомном чипе





## Последовательность работы атомного чипа

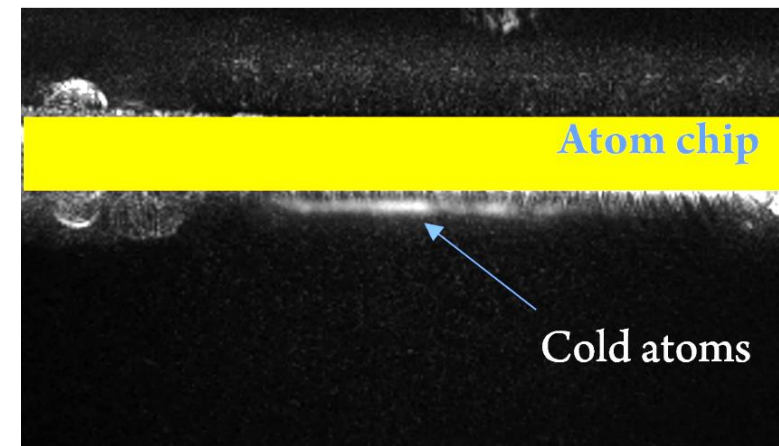
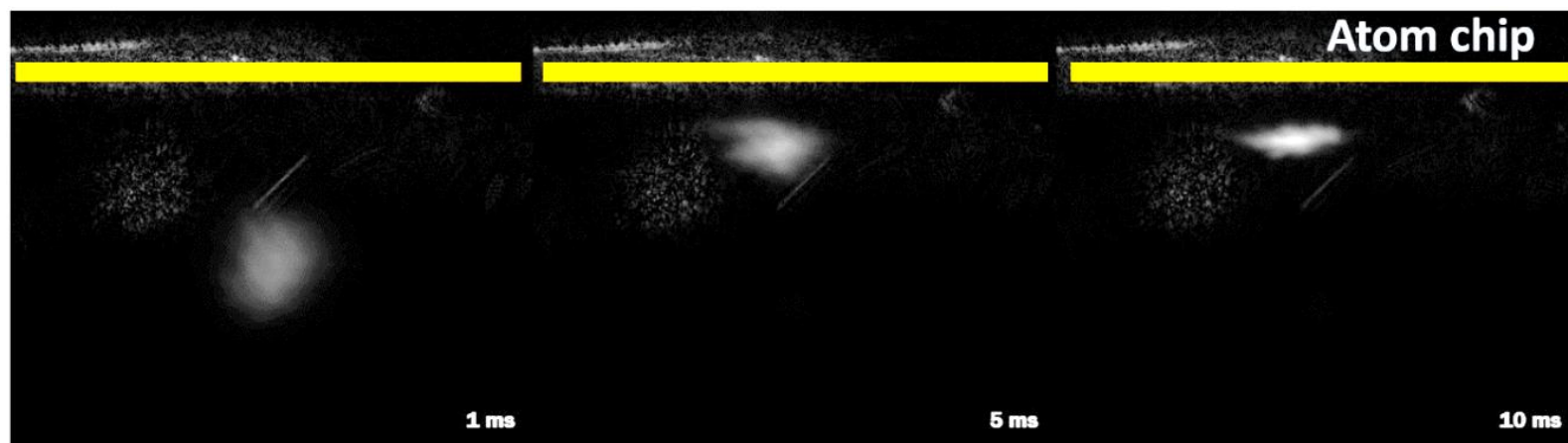
Цветом указаны  
задействованные на каждой  
стадии эксперимента  
дорожки чипа.



Магнито-оптическая  
ловушка с широкой  
дорожкой

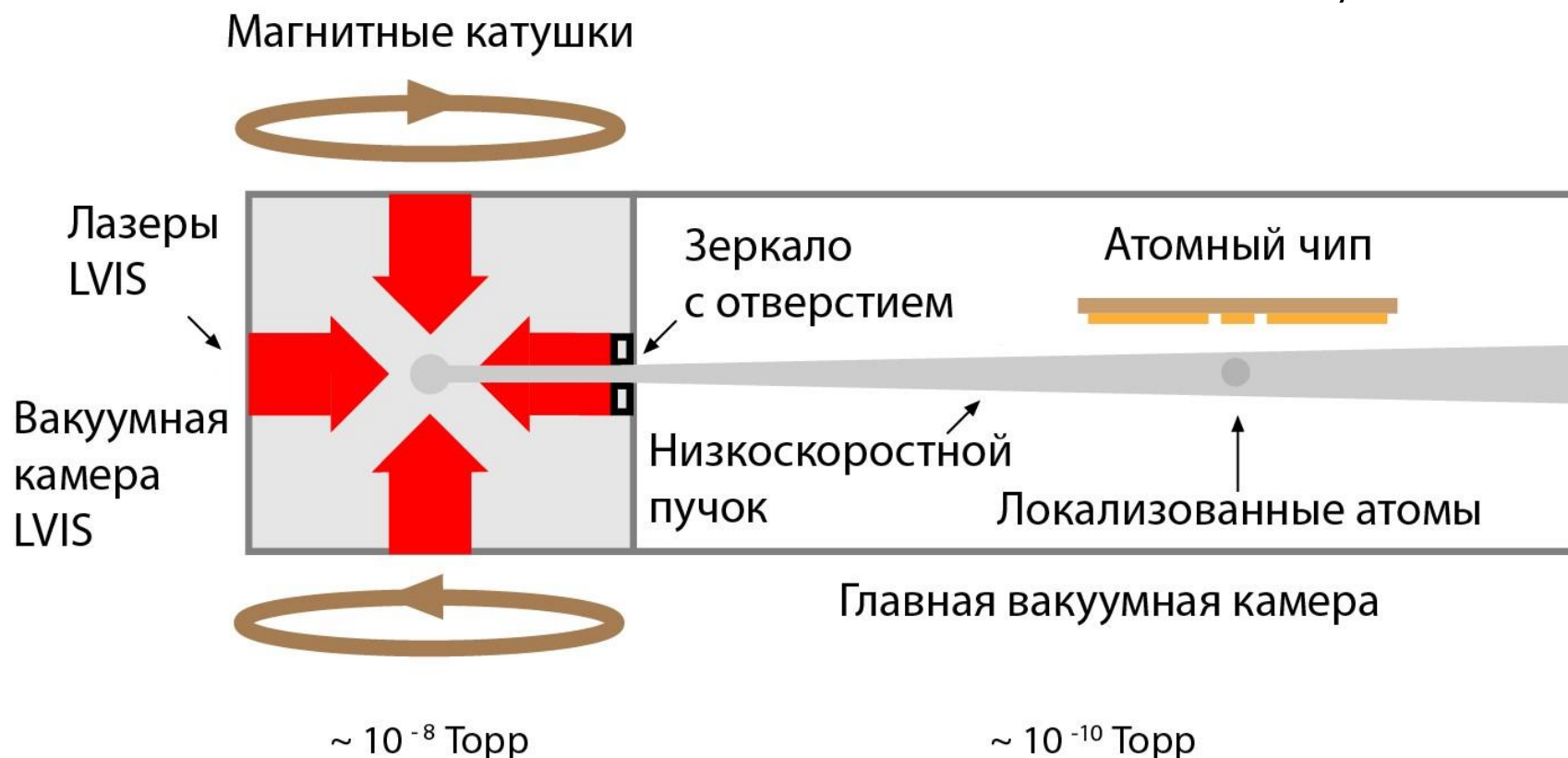
Магнито-оптическая  
ловушка с узкими  
дорожками

Магнитная ловушка



## Загрузка ловушки вблизи атомного чипа из низкоскоростного атомного пучка

(англ. low-velocity intense source - LVIS)





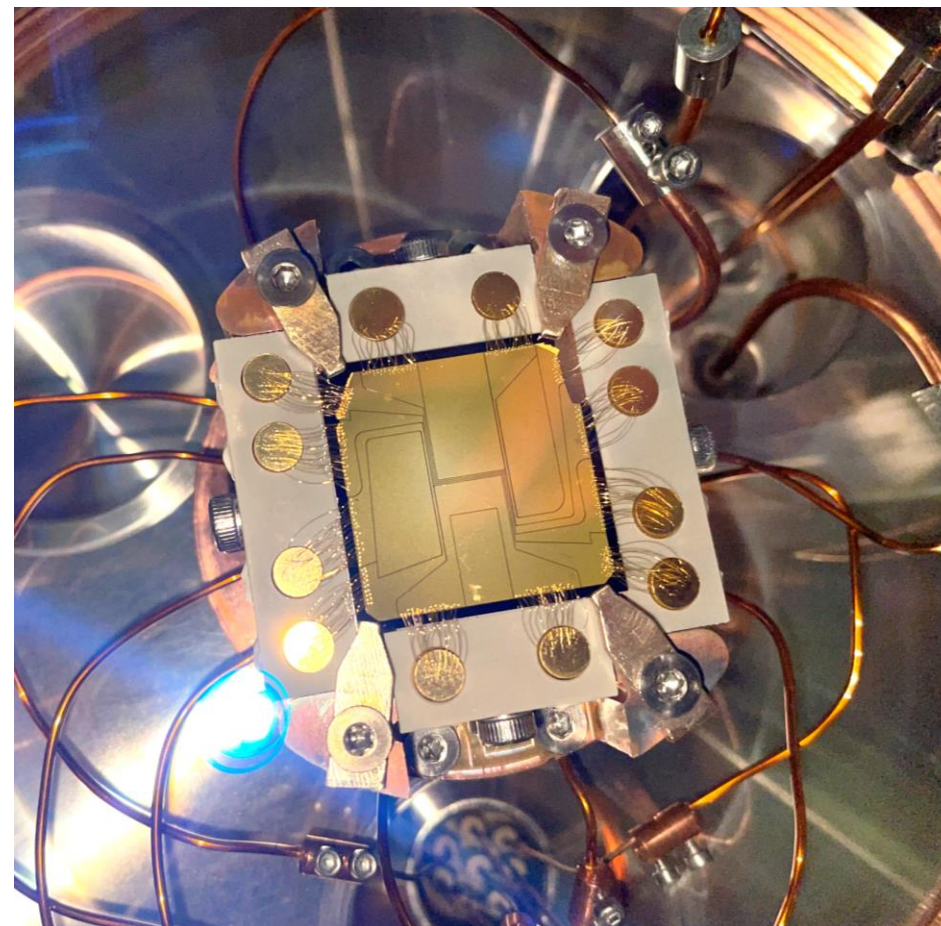


## Цель работы

Рассмотреть метод фокусировки атомного пучка в область локализации атомного чипа с помощью двумерной магнито-оптической ловушки.

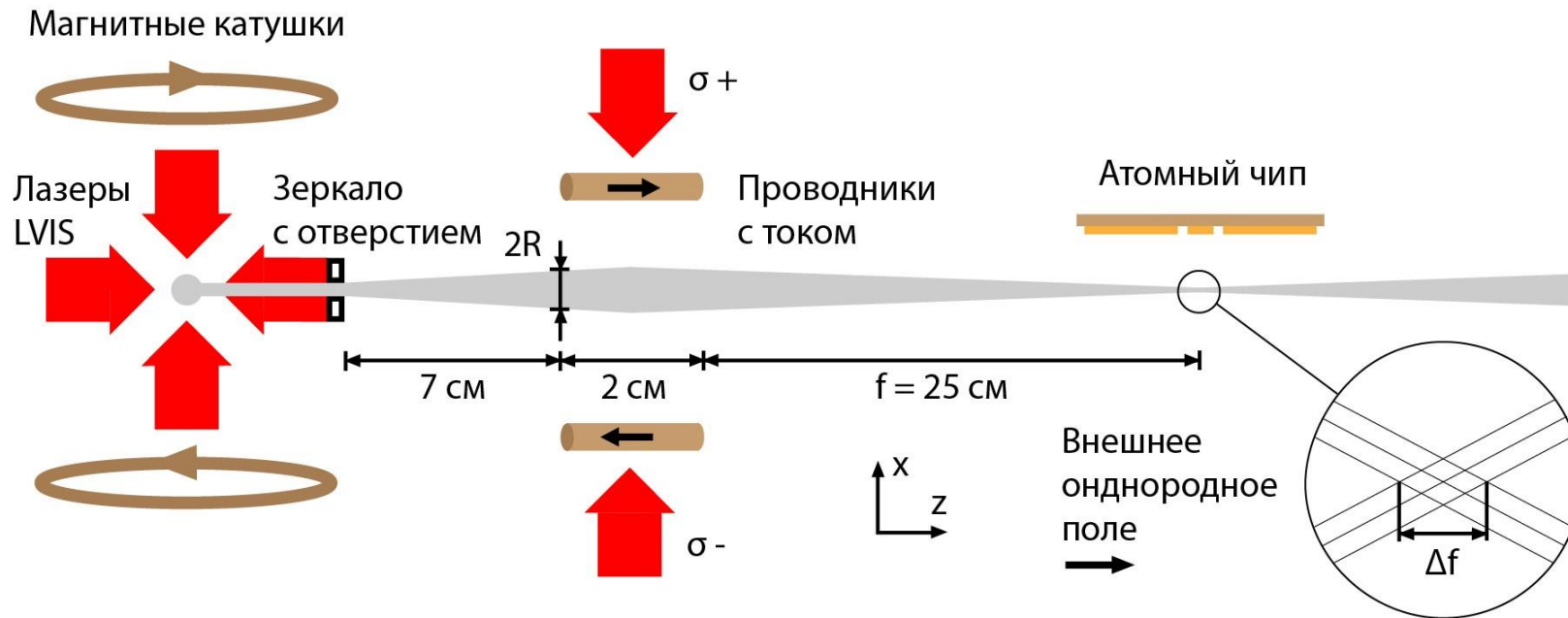
## Задачи

- Численно решить уравнение Ньютона при взаимодействии атомов с лазерным полем в 2D-МОЛ. Найти диаметр перетяжки атомного пучка в фокусе.
- Численно решить уравнение Фоккера-Планка при взаимодействии атомов с лазерным полем в 2D-МОЛ с учетом диффузии импульса. Найти диаметр перетяжки атомного пучка в фокусе.
- Рассмотреть методы уменьшения влияния диффузии импульса на уширение распределения атомов в фокусе.



## Фокусировка атомного пучка для эффективной загрузки атомного чипа

А. Е. Афанасьев, Д. В. Быкова, П. И. Скакуненко, В. И. Балыкин, *Письма в ЖЭТФ* **115(9)**, 562 (2022).



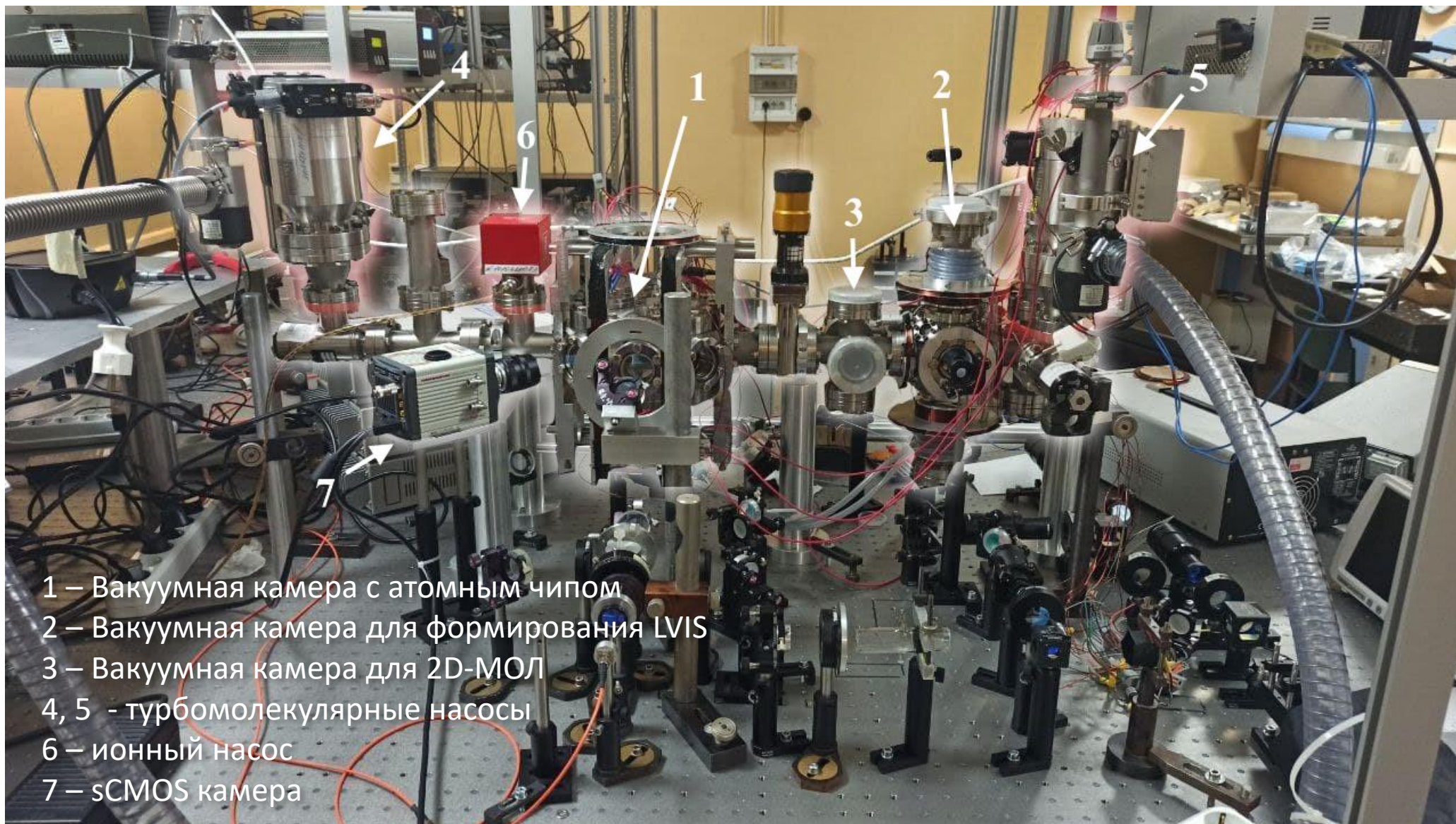
Расчеты показывают, что за счет фокусировки атомного пучка возможно увеличение скорости загрузки в 160 раз в области локализации с диаметром 250 мкм.

► «Хроматическая» абберация при фокусировке различных скоростных групп атомов в пучке

$\alpha$  – величина сдвига резонансной линии поглощения в следствии эффекта Зеемана в магнитном поле  $B_x = g\mu_B H$  ( $\alpha = 2\pi \times 1,4$  МГц/Гс)

$$f = \frac{kv_z}{\alpha g} \quad \Delta f = \frac{k}{\alpha g} \Delta v_z$$





- 1 – Вакуумная камера с атомным чипом
- 2 – Вакуумная камера для формирования LVIS
- 3 – Вакуумная камера для 2D-МОЛ
- 4, 5 - турбомолекулярные насосы
- 6 – ионный насос
- 7 – sCMOS камера

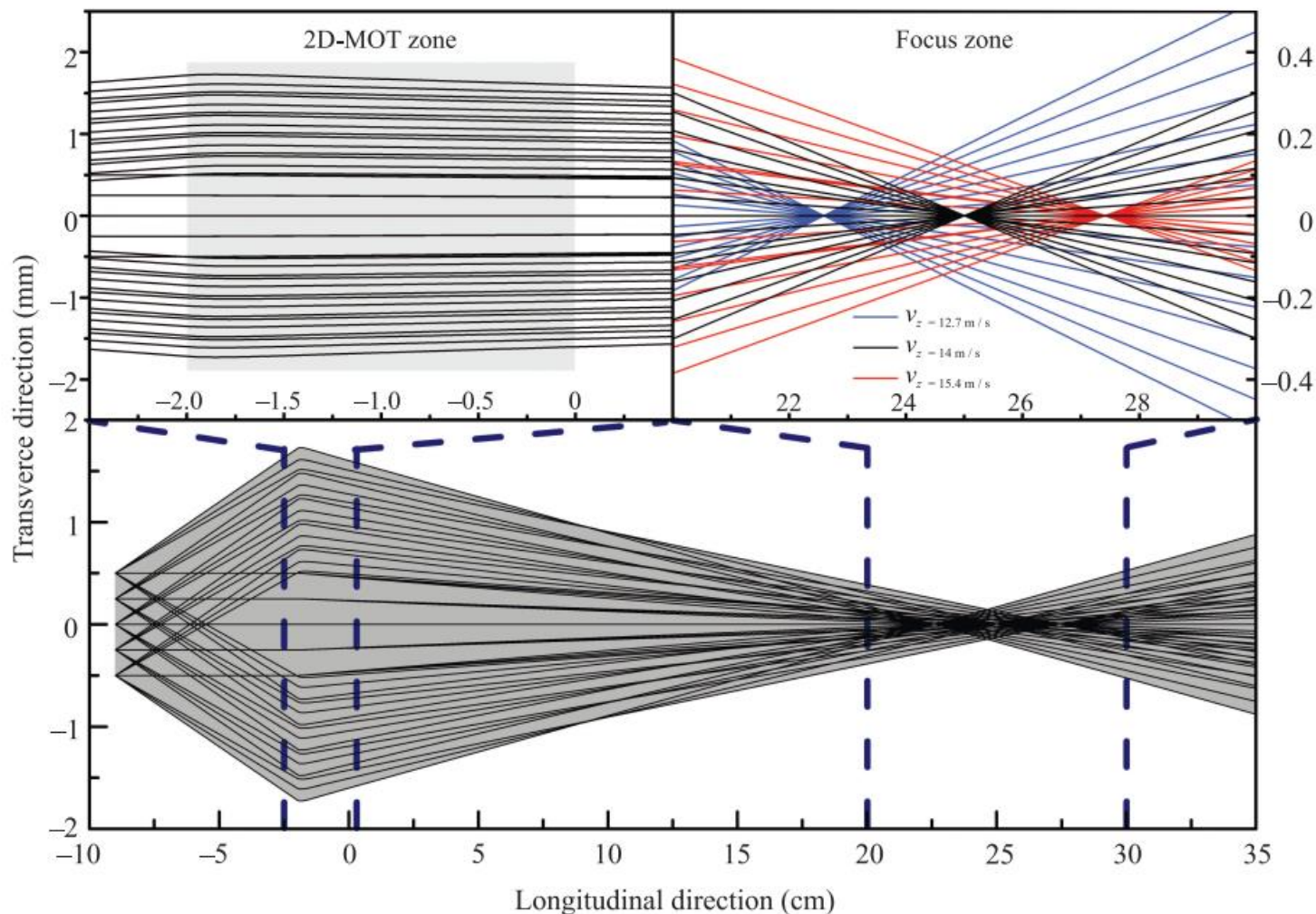


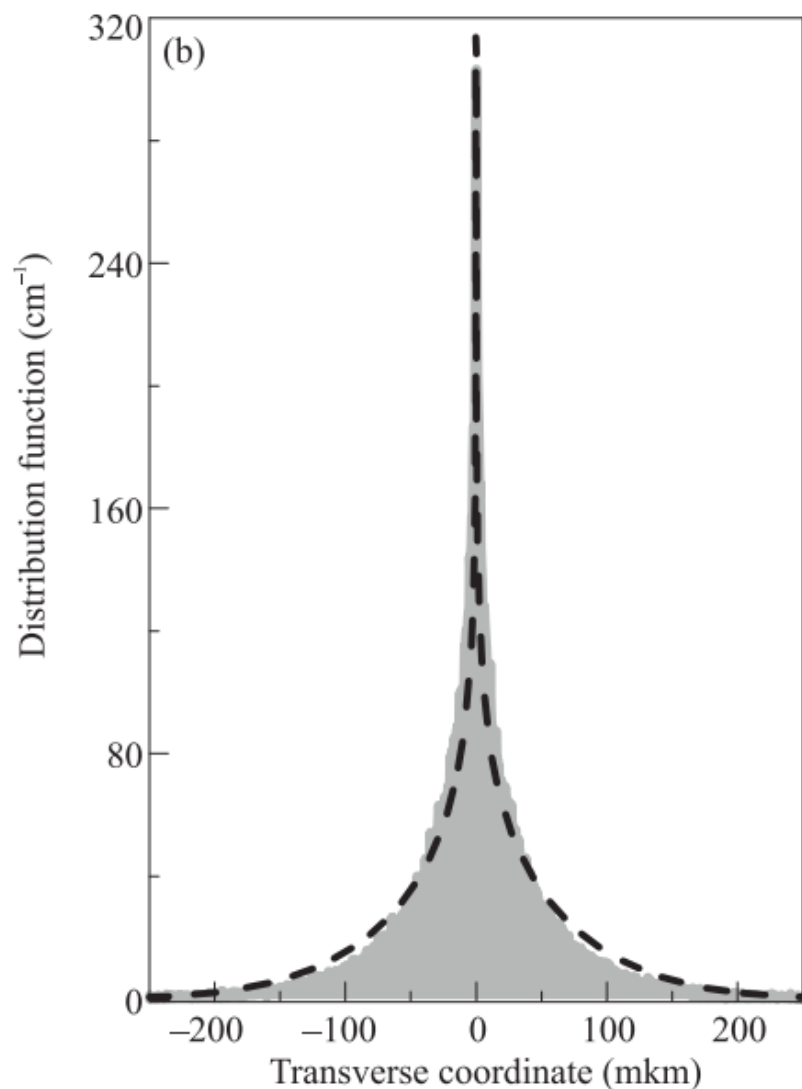
## Решение уравнения Ньютона

Для описания взаимодействия атомов с 2D-МОЛ решается уравнение Ньютона. На атом действует сила

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

где  $G$  – параметр насыщения,  $\gamma$  – полуширина резонансной линии,  $x$  – поперечная координата.





## Определение размеров фокусировки

Рассмотрим функцию распределения атомов в поперечном направлении  $F_x(x)$  в точке фокуса ( $z = 25$  см):

$$\int_{-\infty}^{\infty} F_x(x) dx = 1 \quad dN_x(x) = N_0 F_x(x) dx.$$

$N_x$  - количество атомов на расстоянии  $x$  от оси распространения атомов в LVIS;  $N_0$  - количество атомов, прошедших через LVIS.

В одномерном случае:

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

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

Пунктир – аналитическое выражение, серая кривая – результат расчета методом Монте-Карло.

Порядка 90% атомов содержится в области 200 мкм.



## Учет диффузии импульса атомов

Для учета диффузии импульса атома из-за флуктуаций направления и числа рассеиваемых фотонов решается уравнение Фоккера-Планка:

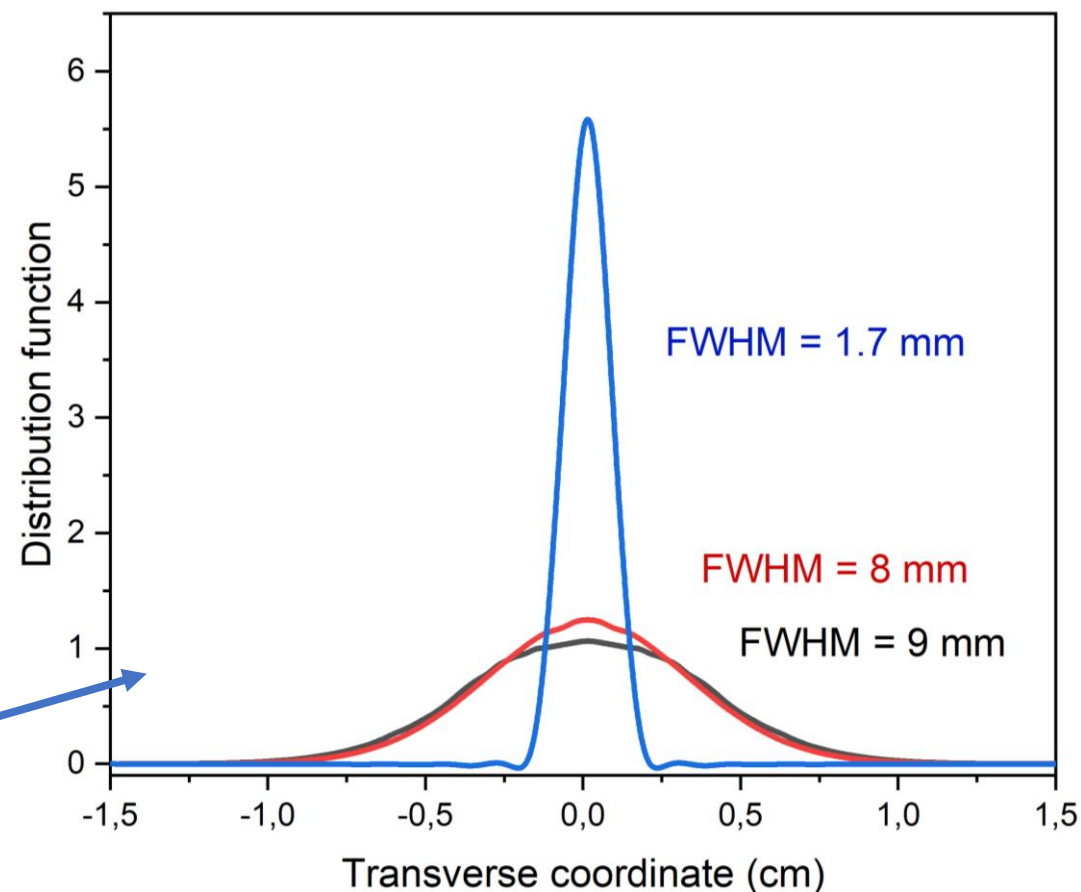
$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial v_z} (A_z w) + \frac{\partial^2}{\partial v_z^2} (C_{zz} w),$$

где  $w(v, t)$  – функция распределения атомов,  $A_z$  – ускорение в лазерных полях,  $C_{zz}$  – коэффициент скоростной диффузии.

В области фокуса поперечное распределение атомов имеет ширину **9 мм** в **отсутствии фокусировки**,

**8 мм** при фокусировке в 2D-МОЛ с лазерной отстройкой  $-4\gamma = -2\Gamma$  (**доплеровский механизм охлаждения**),

**1,7 мм** при фокусировке в 2D-МОЛ с лазерной отстройкой  $-10\Gamma$  (**субдоплеровский механизм охлаждения**).



- Without focusing
- Focusing with Doppler regime
- Focusing with subDoppler regime



## Выводы

1. При **доплеровском режиме** взаимодействия в 2D-МОЛ в силу диффузии импульса область фокусировки составила значение **8 мм**.
2. При больших отстройках лазерного излучения характер взаимодействия атомов с лазерным полем изменяется. Существенным становится **субдоплеровский механизм** взаимодействия. Это приводит к уменьшению диффузии импульса и, как следствие, к уменьшению скоростного распределения атомов по поперечным скоростям. В таком режиме взаимодействия расчётная область фокусировки составила значение **1,7 мм**.
3. Уменьшение области фокусировки может быть достигнуто за счёт уменьшения фокусного расстояния:

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

