



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ АТОМОВ

Машко Анастасия

*Институт спектроскопии Российской академии наук
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

06.06.2019

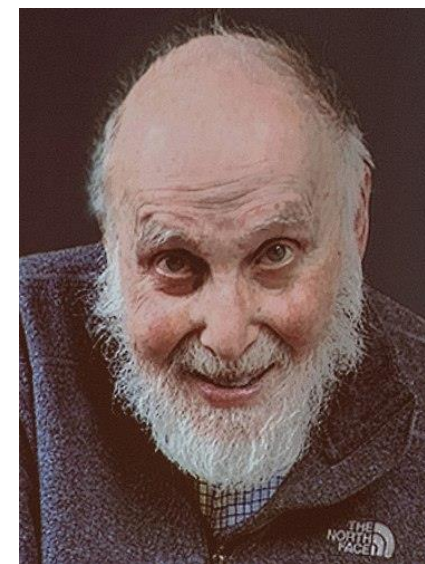
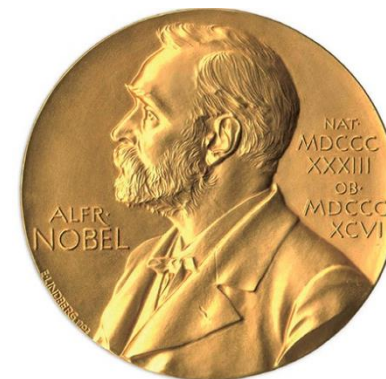
«За создание методов охлаждения и пленения атомов с помощью лазерного света» 1997г.



Клод Коэн-Таннуджи
1933

Уильям Филлипс
1948

Стивен Чу
1948



Артур Ашкин
1922

«За изобретение оптического пинцета и их применение в биологических системах» 2018г.

Первые идеи по охлаждению атомов и ионов

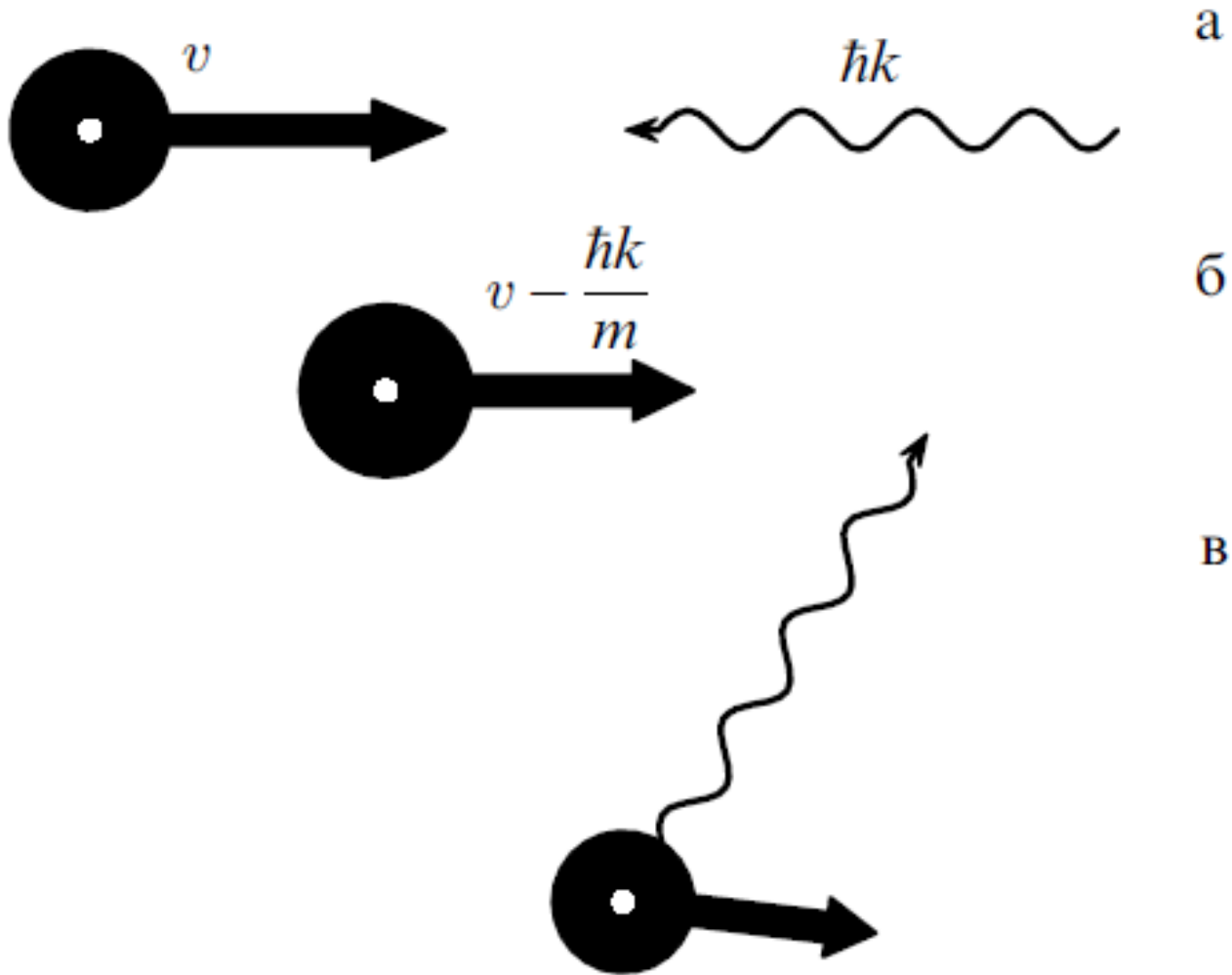
- Применения лазерного света для нагрева вещества $k_B T_{\text{изл}} \approx \bar{n} \hbar \omega$, где $\bar{n} \gg 1$
- 1950 Альфред Кастлер, 1974 Яков Борисович Зельдович $(\omega \rightarrow \omega \pm \delta\omega)$
- 1975 Вайнлэнд и Демельт, Хэнч и Шавлов

Атомы и молекулы при комнатной температуре движутся со скоростями порядка 300 м/с

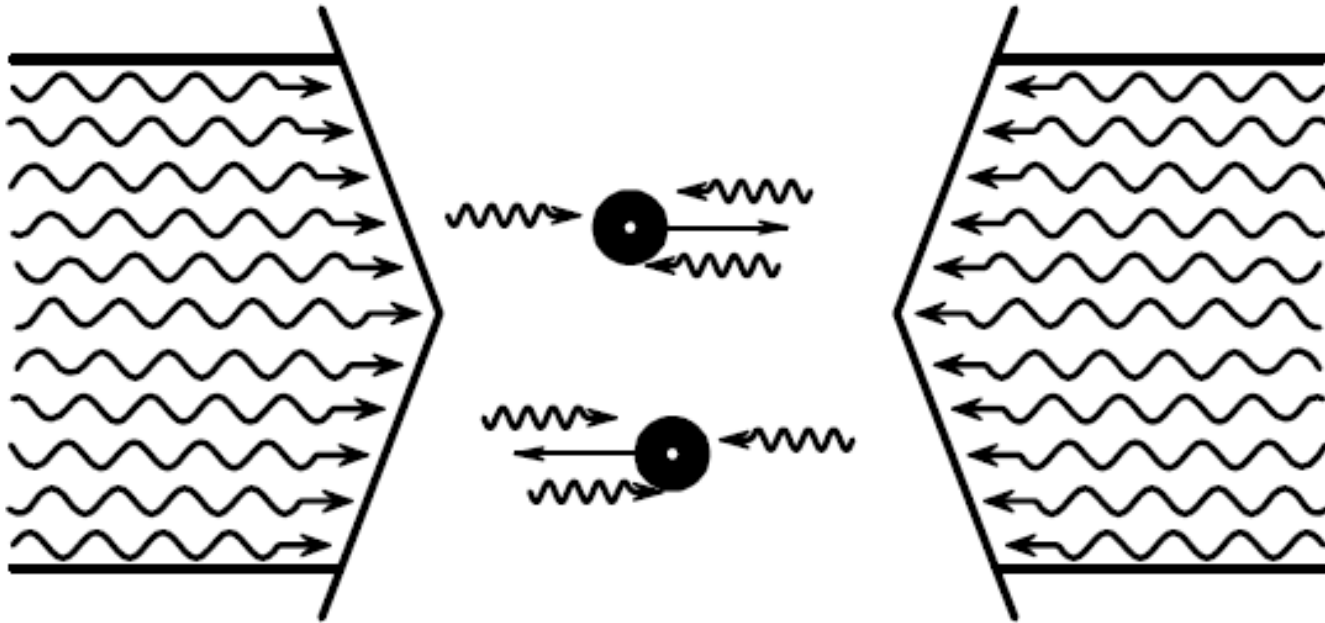
При температуре жидкого азота (77K) атомы имеют скорость 150 м/с

При температуре жидкого гелия (4K) 90 м/с

Основной принцип лазерного охлаждения



Доплеровское охлаждение

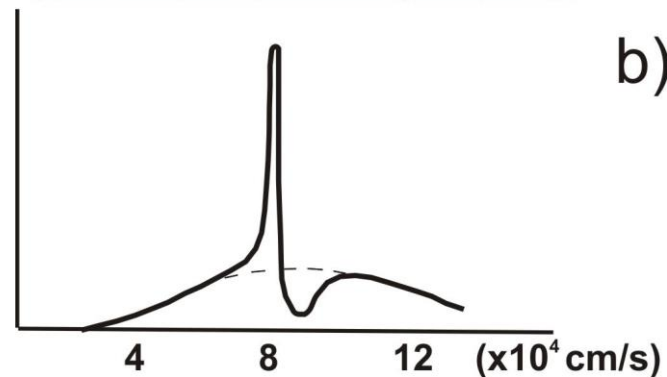
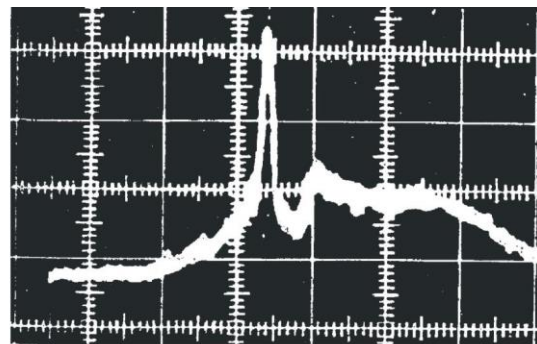
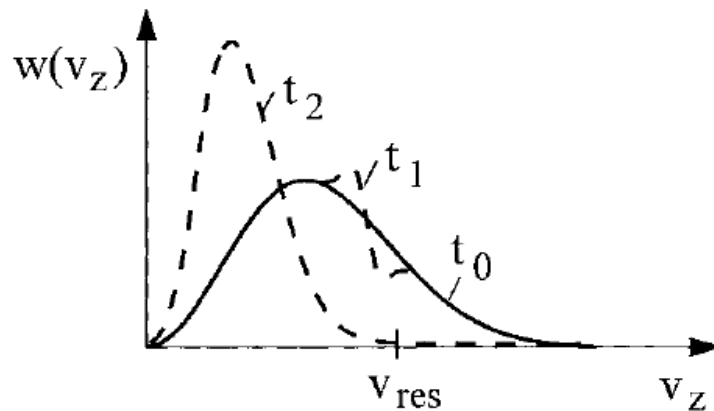
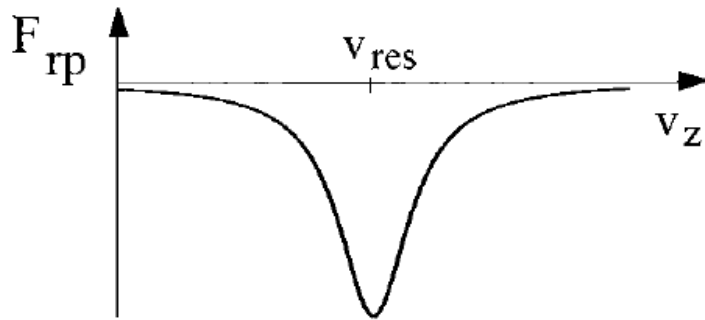
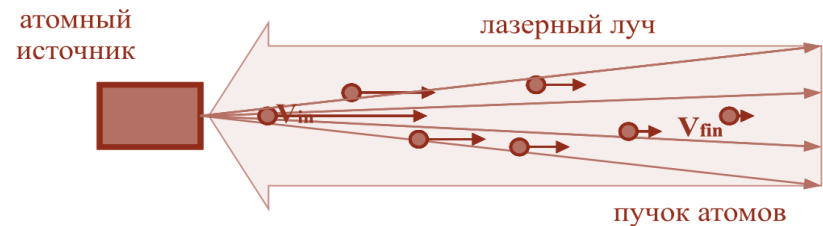


Доплеровское охлаждение в одном измерении.

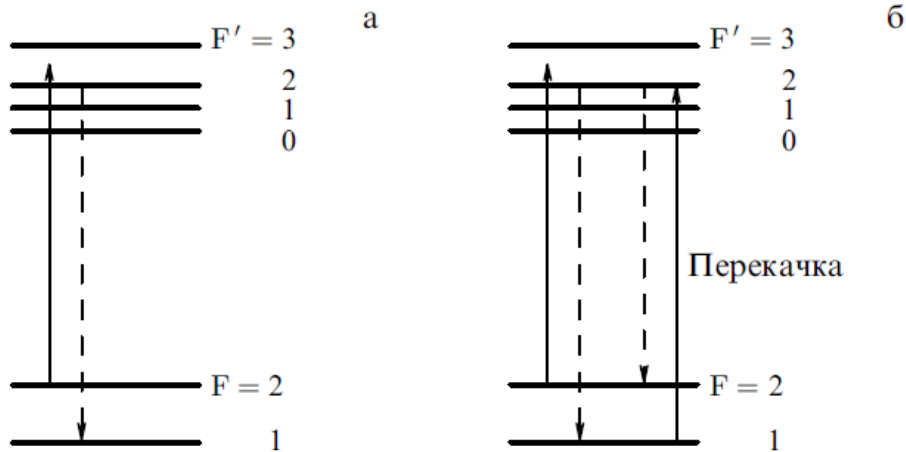
- 1977 Доплеровский предел охлаждения $m\langle v_i^2 \rangle = k_B T = \frac{\hbar\Gamma}{4} \left(\frac{\Gamma}{2\delta} + \frac{2\delta}{\Gamma} \right)$, $T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$
- Для натрия 240 мК (30 см/с)

Первый эксперимент

- 1981 Андреев, Балыкин, Летохов, Миногин 1.5 К
- 1976 Летохов, Миногин, Павлик ЧИРПИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ



Основные проблемы на пути к лазерному охлаждению

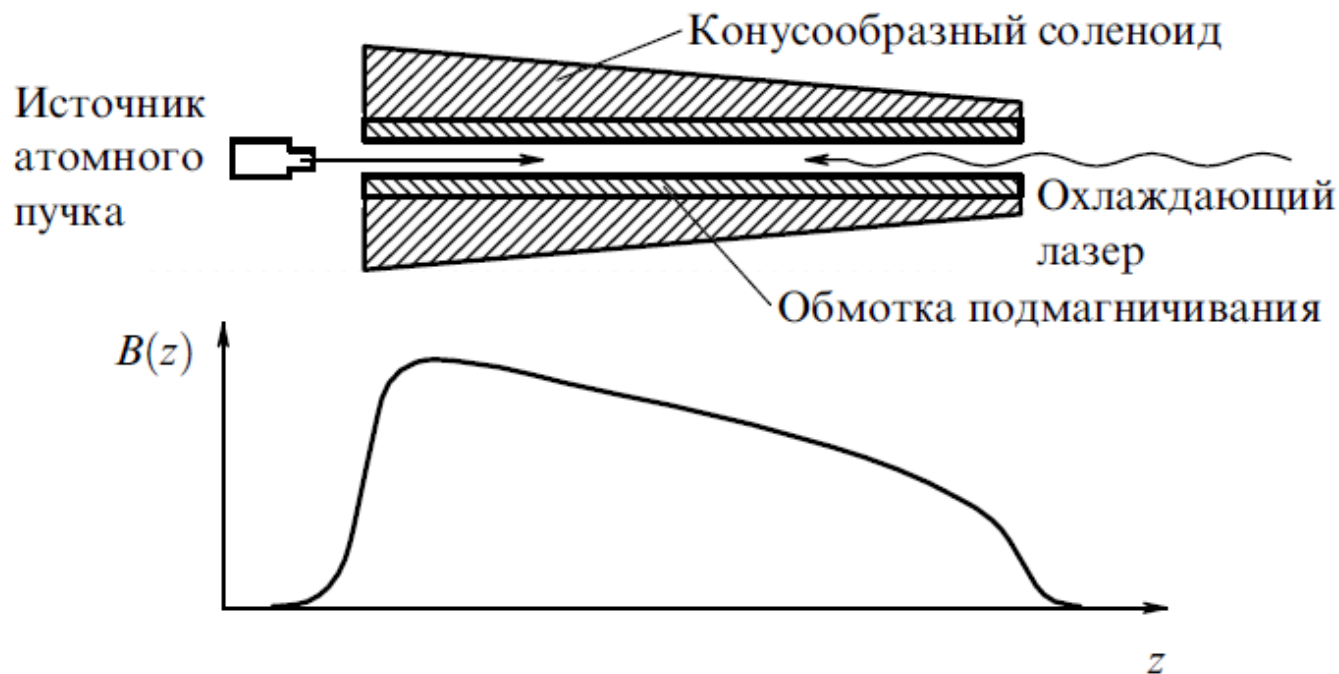


Процесс оптической накачки, препятствующий циклическому возбуждению в щелочных атомах типа натрия (а); использование перекачивающего лазера для обеспечения многих циклов поглощение – излучение (б).

- 1976 Летохов, Миногин, Павлик
ЧИРПИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ

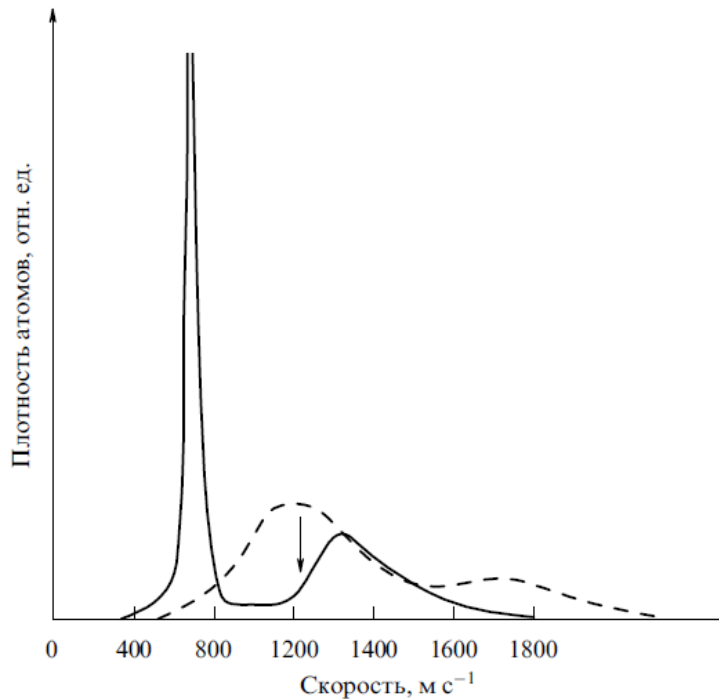
Зеемановский замедлитель

- 1983 Филлипс

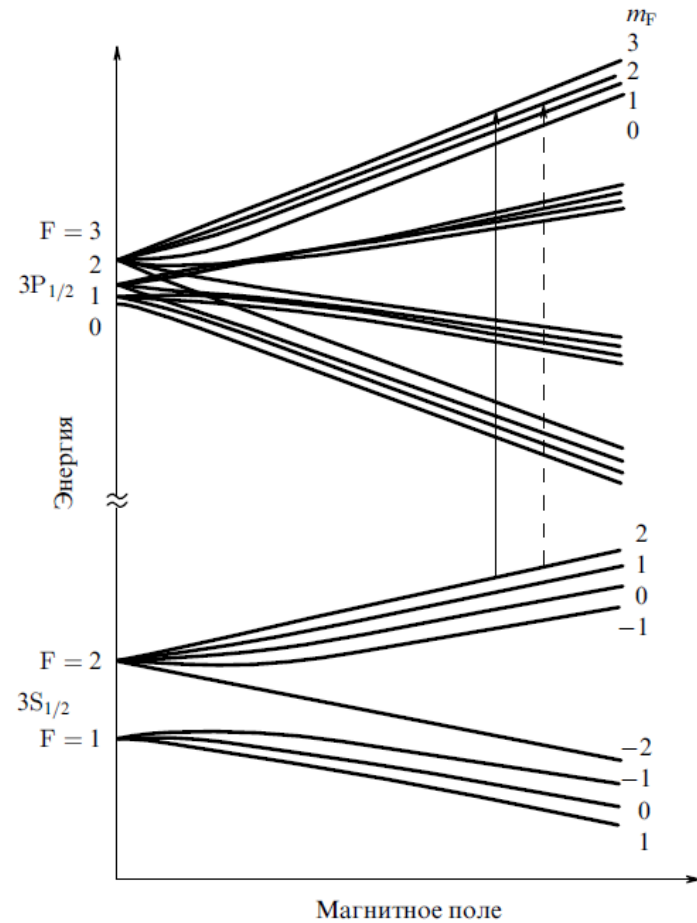


Вверху — схематическое изображение зеемановского замедлителя. Внизу — изменение поля вдоль оси.

Зеемановский замедлитель

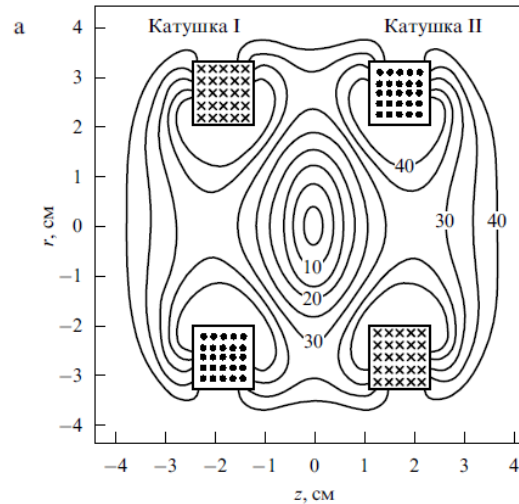
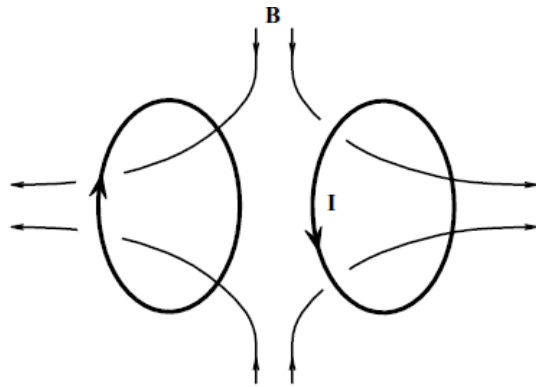


Распределение по скоростям до (штриховая линия) и после (сплошная линия) зеемановского охлаждения. Стрелкой отмечена максимальная скорость, резонансная с замедляющим лазером (дополнительный максимум при 1700 м с^{-1} дают атомы в состоянии $F = 1$, которые оптически накачиваются в состояние $F = 2$ в течение процесса охлаждения).



Энергетические уровни атома натрия в магнитном поле. Переход, используемый для лазерного охлаждения, показан сплошной стрелкой, а один из почти запрещенных каналов возбуждения, ведущий к нежелательной оптической накачке, — штрихами.

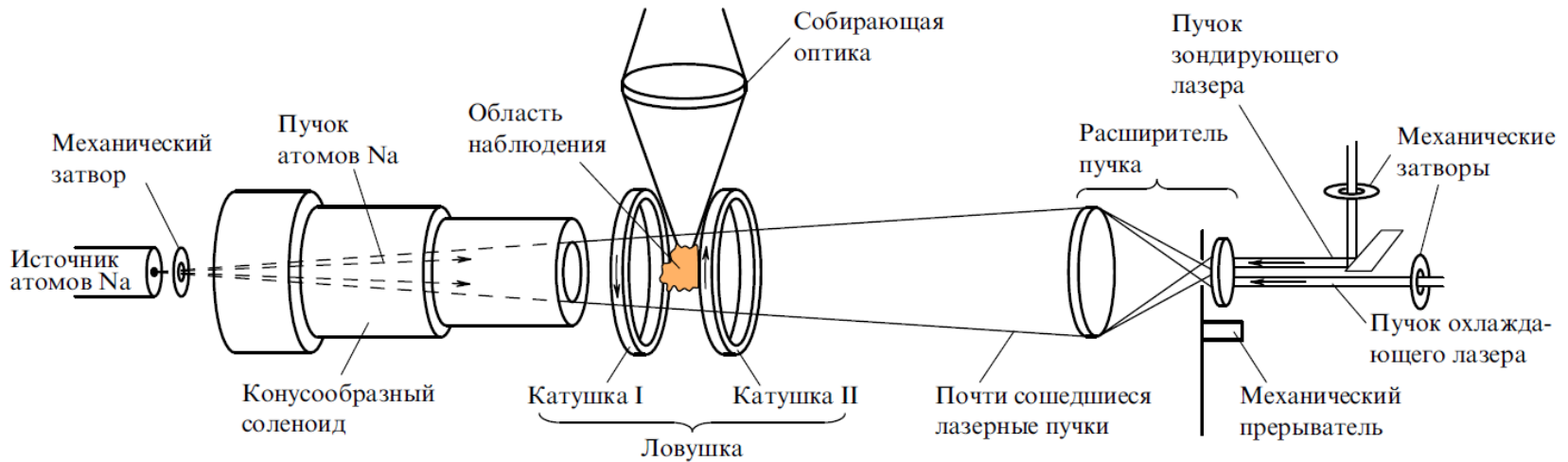
Магнитная ловушка с использованием Зеемановского замедлителя



17мК

$$U = -\vec{\mu} \mathbf{B} = -\mu_l B$$

$$\mathbf{F} = \nabla(\vec{\mu} \mathbf{B}) = \mu_l \nabla B$$



Способы измерения температуры

• 1987г Филипс, Гоулд, Летт

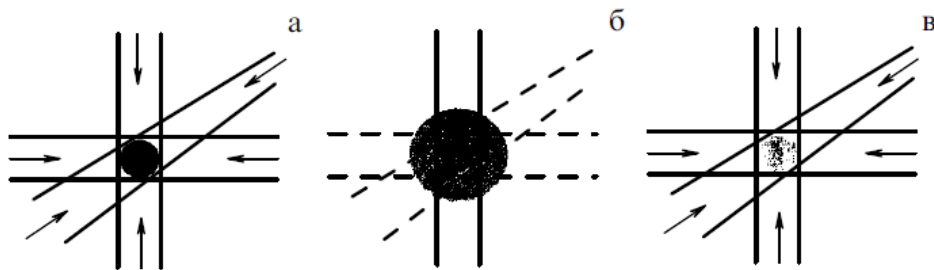


Рис. 13. Измерение температуры методом освобождения и перезахвата.

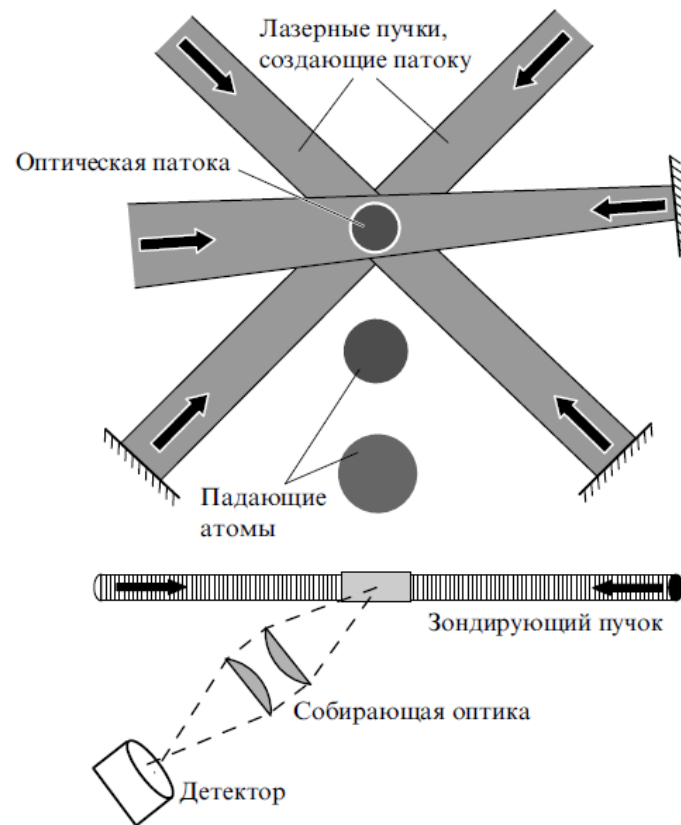
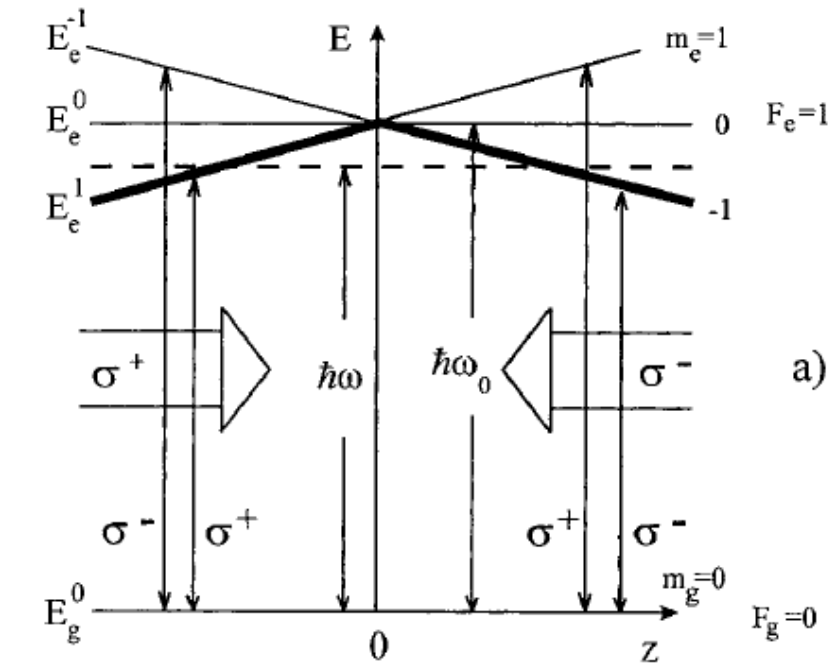
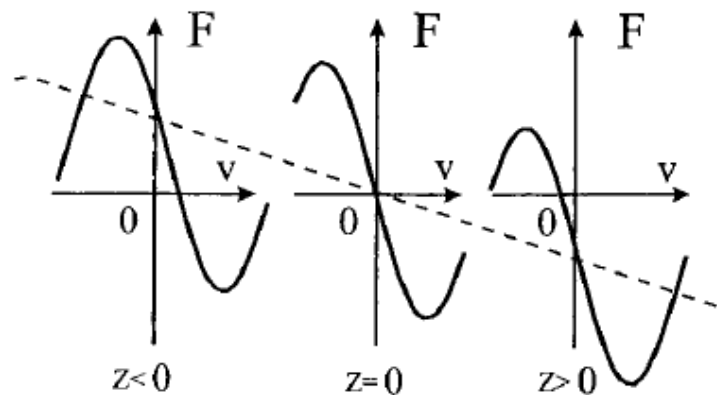
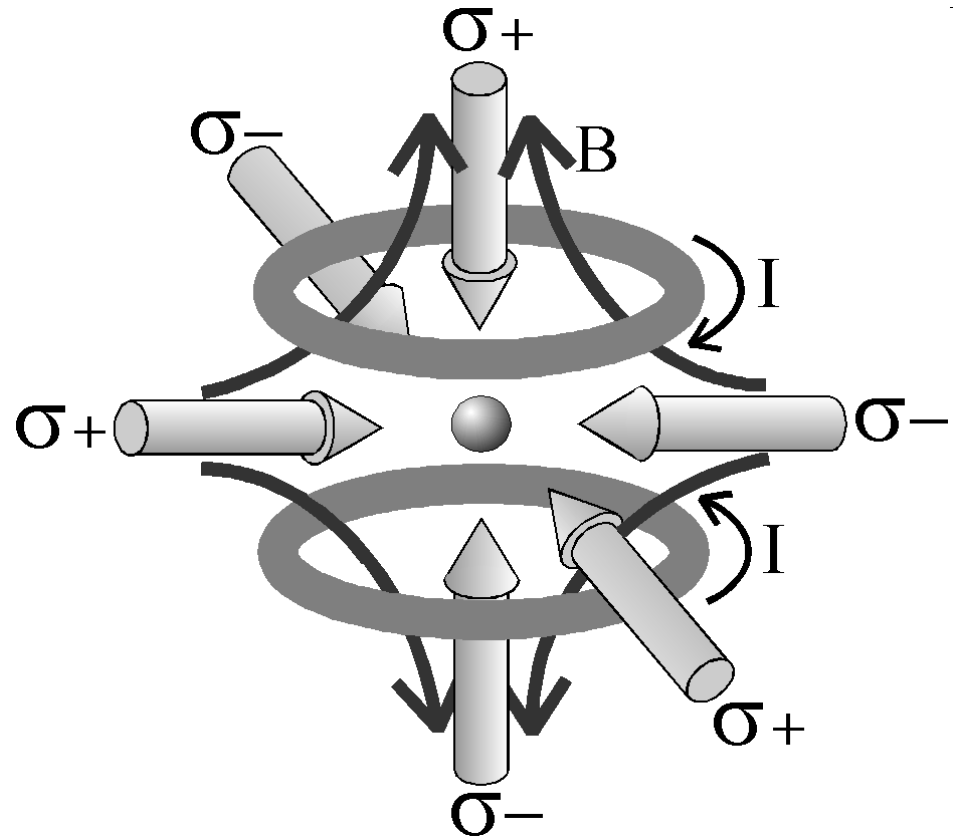


Рис. 15. Времяпролетный метод измерения температуры при лазерном охлаждении.

Магнито-оптическая ловушка

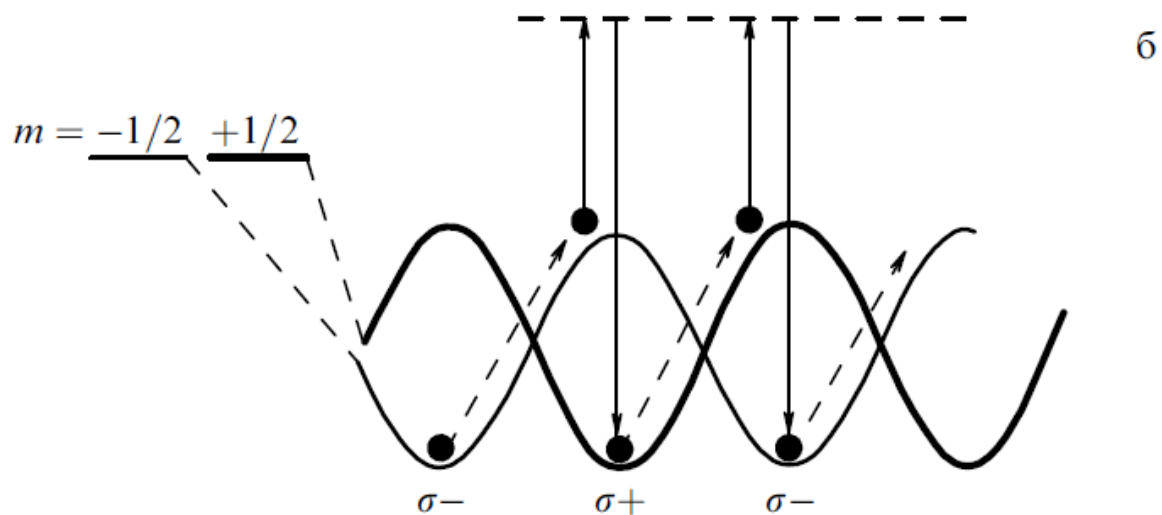
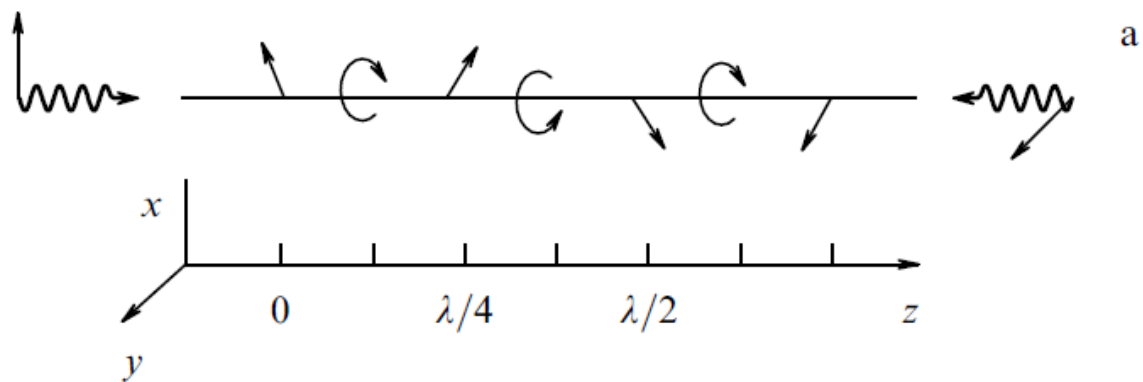


$$E_e^{\pm 1} = \hbar\omega_0 \pm \mu B(z)$$



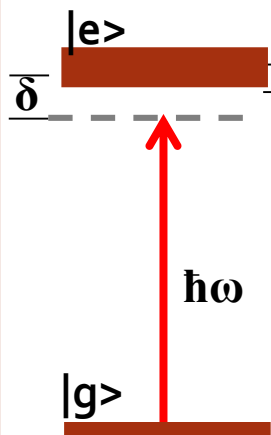
• 1987 Жан Далибар

Сизифово охлаждение



ДИПОЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ
АТОМОВ ИМПУЛЬСНЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ
ФЕМТОСЕКУНДНОЙ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Взаимодействие атома с электрическим полем



$$U = \langle V \rangle = -\langle D \rangle E$$

$$F = \nabla U = \nabla(\langle D \rangle E)$$

$$E = eE_0(r) \cos(kr - \omega t)$$

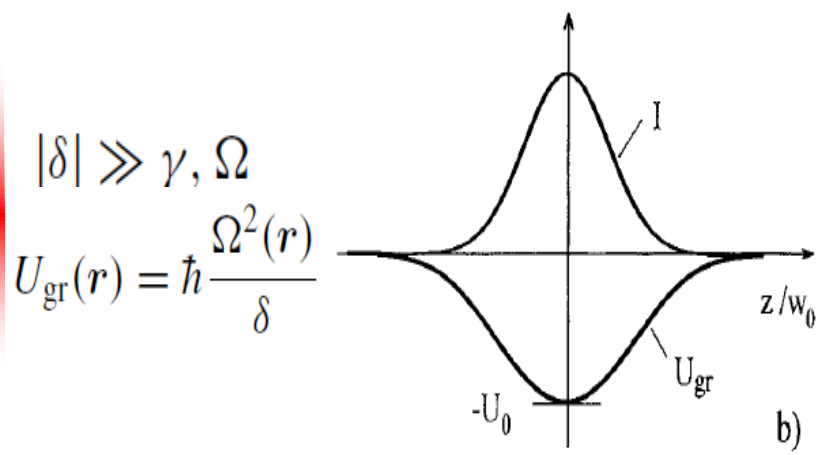
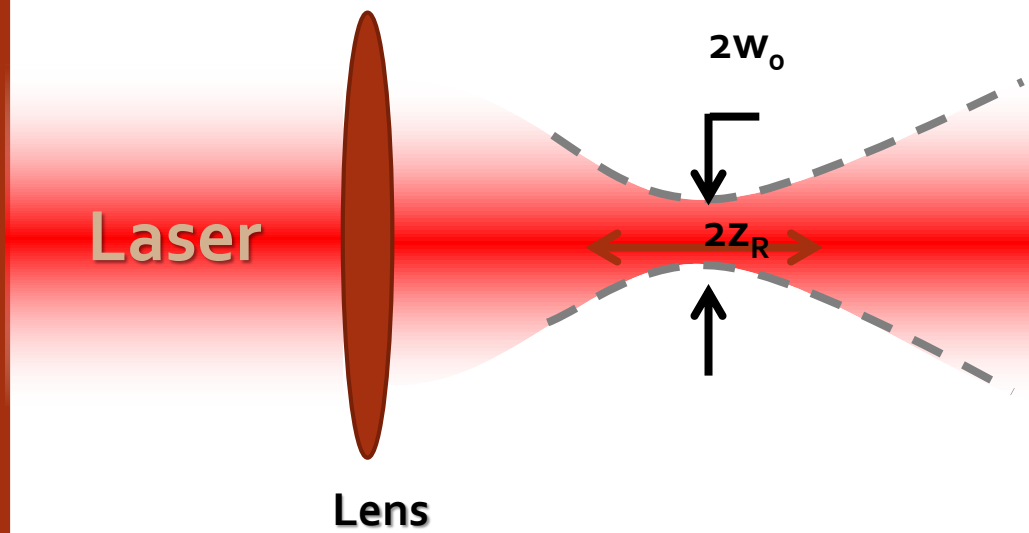
$$F = F_{rp} + F_{gr}$$

$$F_{rp} = \hbar k \Gamma \frac{G(r)}{1 + G(r) + (\delta - kv)^2 / \Gamma^2},$$

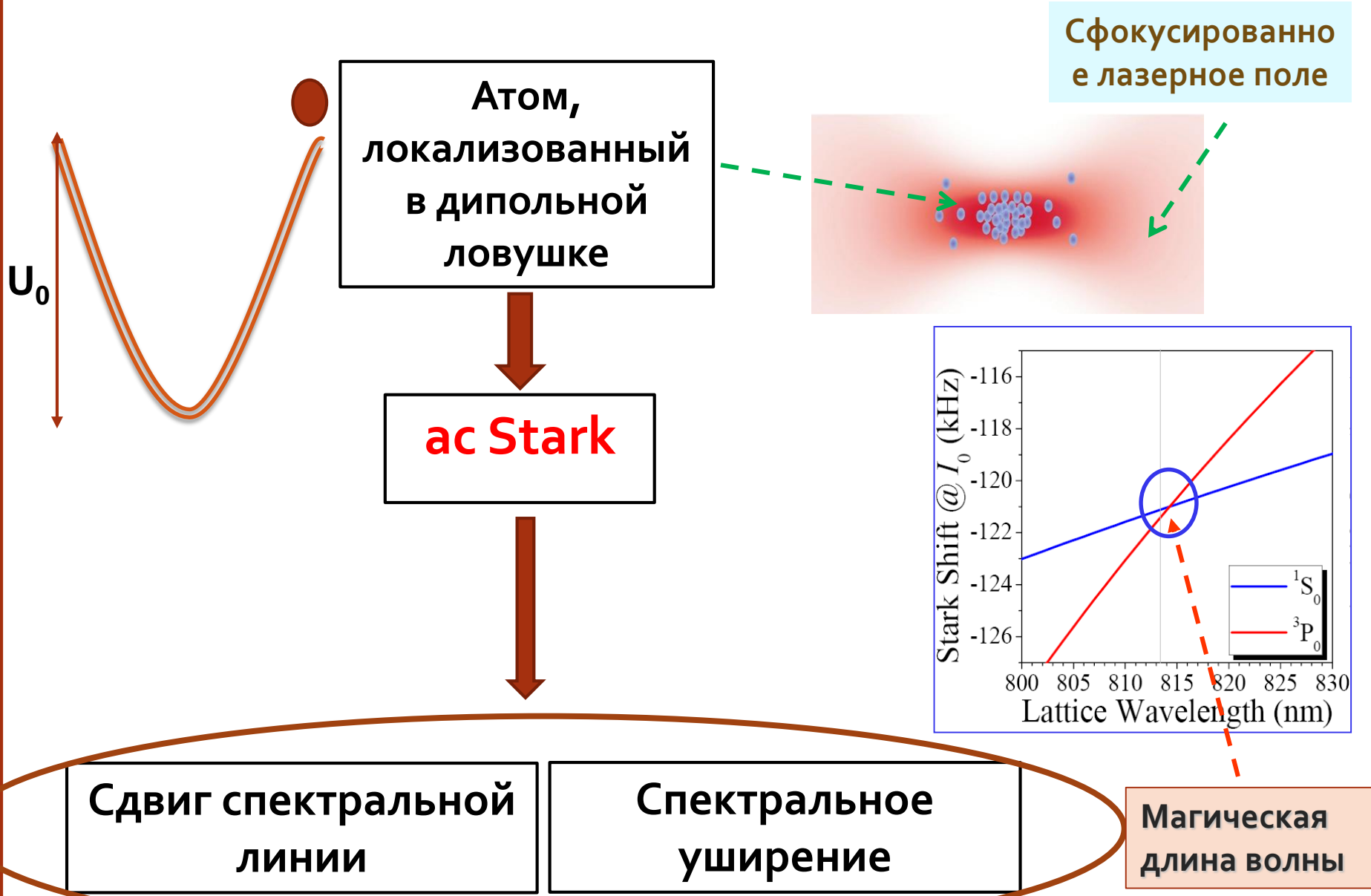
$$F_{gr} = -\frac{1}{2} \hbar (\delta - kv) \frac{\nabla G(r)}{1 + G(r) + (\delta - kv)^2 / \Gamma^2},$$

Охлаждение

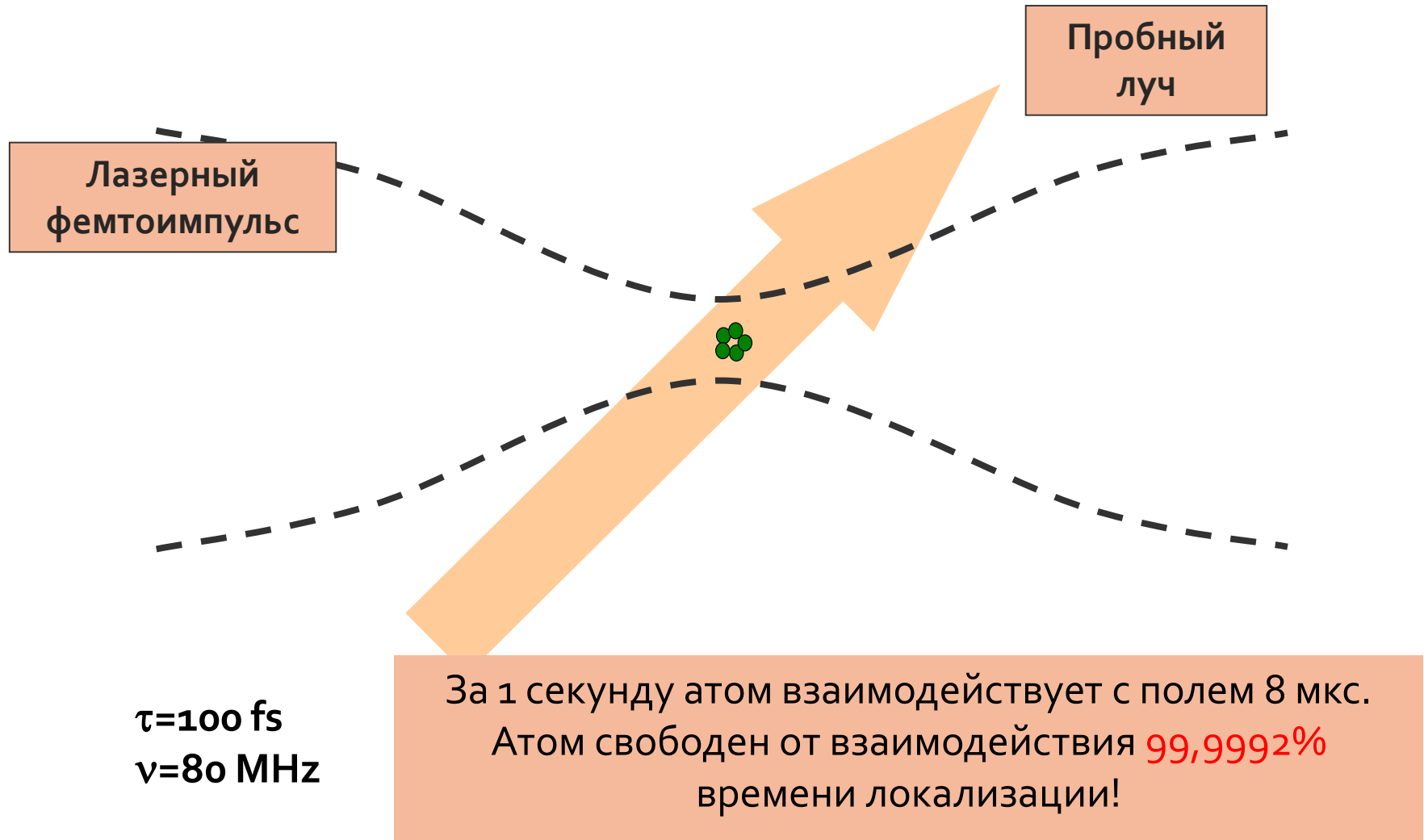
Локализация



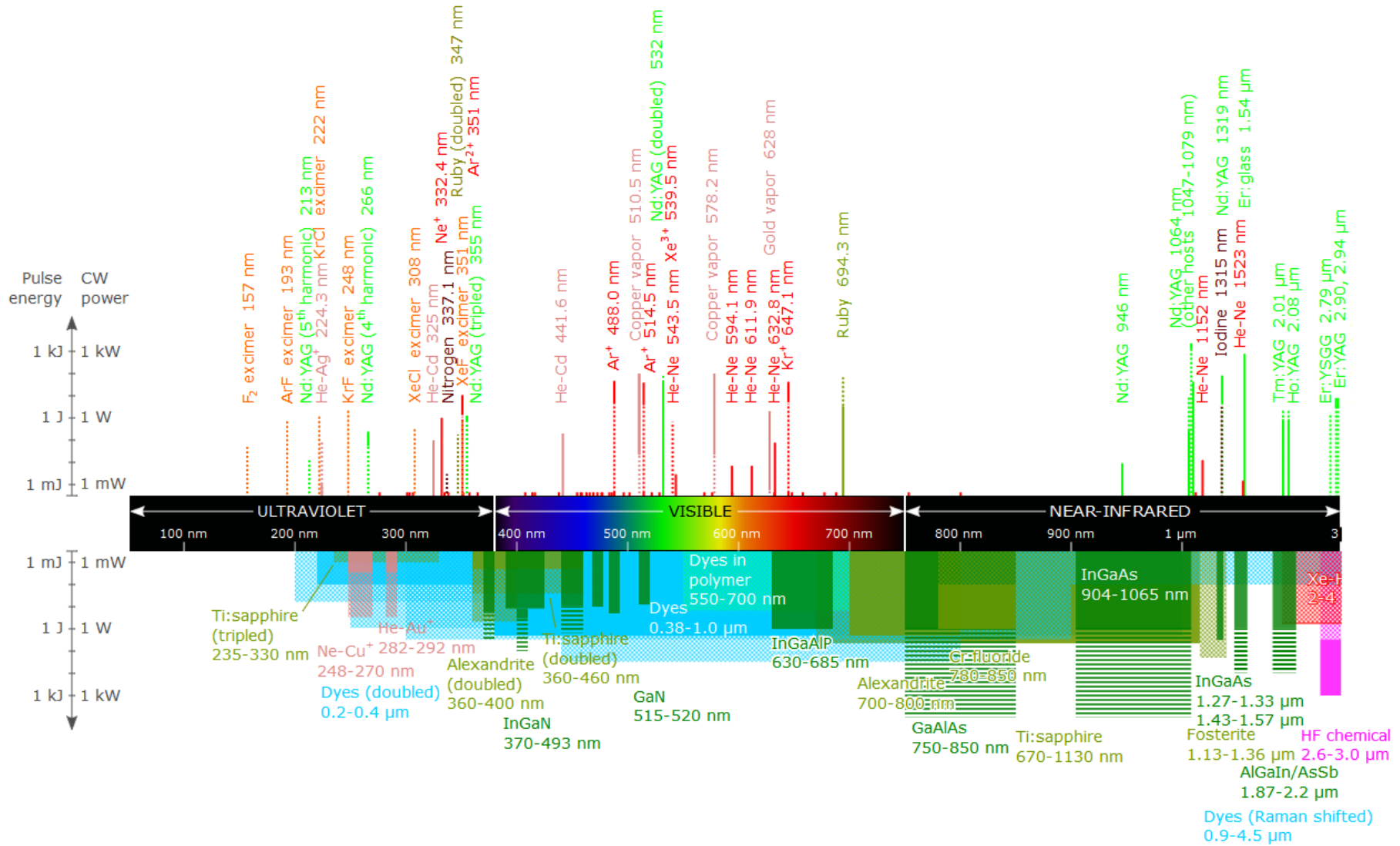
Спектр локализованных атомов



Уменьшение времени взаимодействия атома с полем



Локализация атомов с помощью УФ излучения



Нет подходящих источников постоянного излучения в УФ области для локализации!

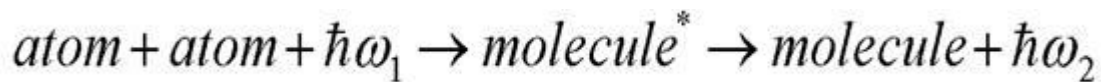
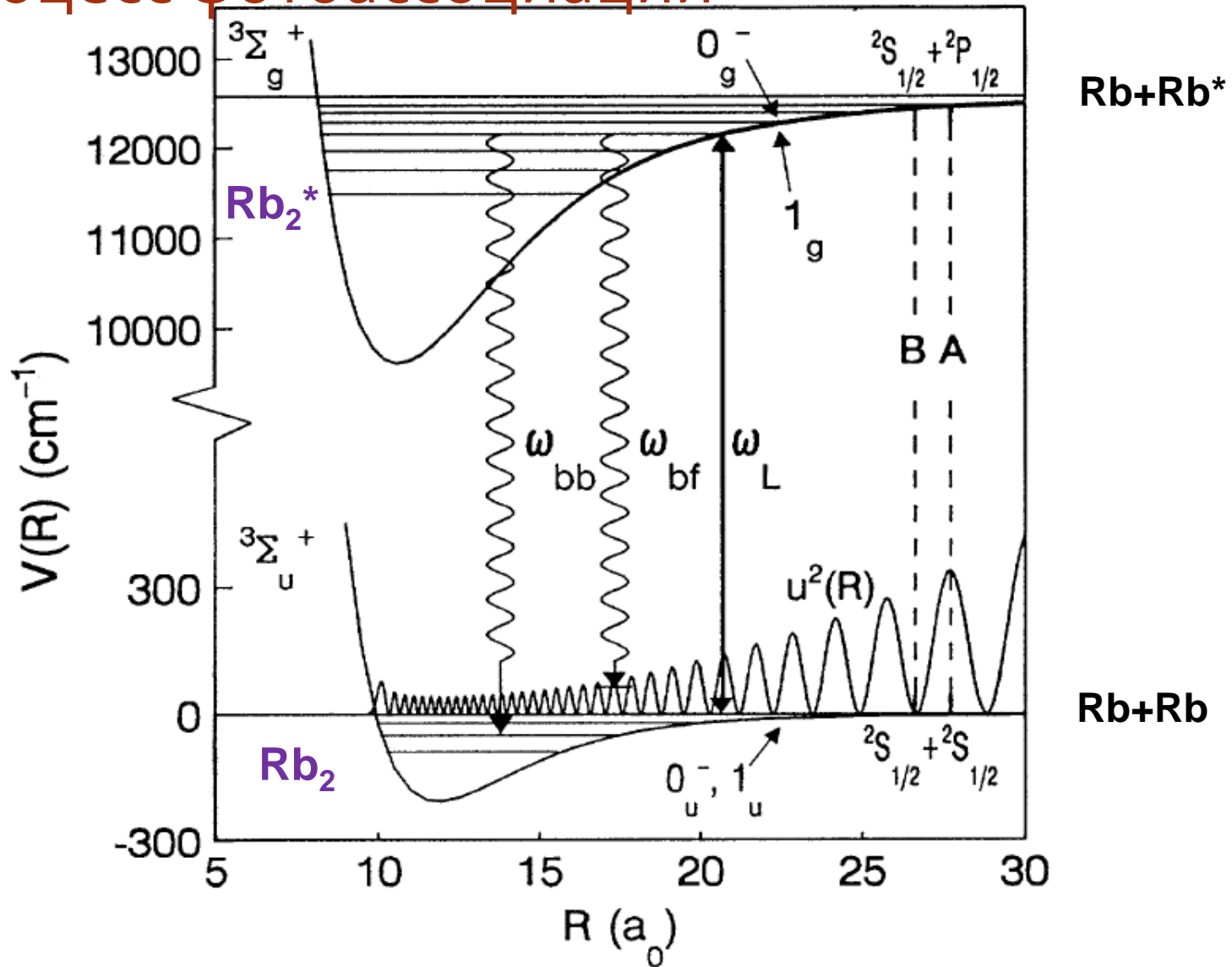
Время жизни атомов в ловушке

$$\Gamma = \Gamma_{\text{background}} + \Gamma_{\text{Photoassociation}} + \Gamma_{\text{Momentum diffusion}}$$

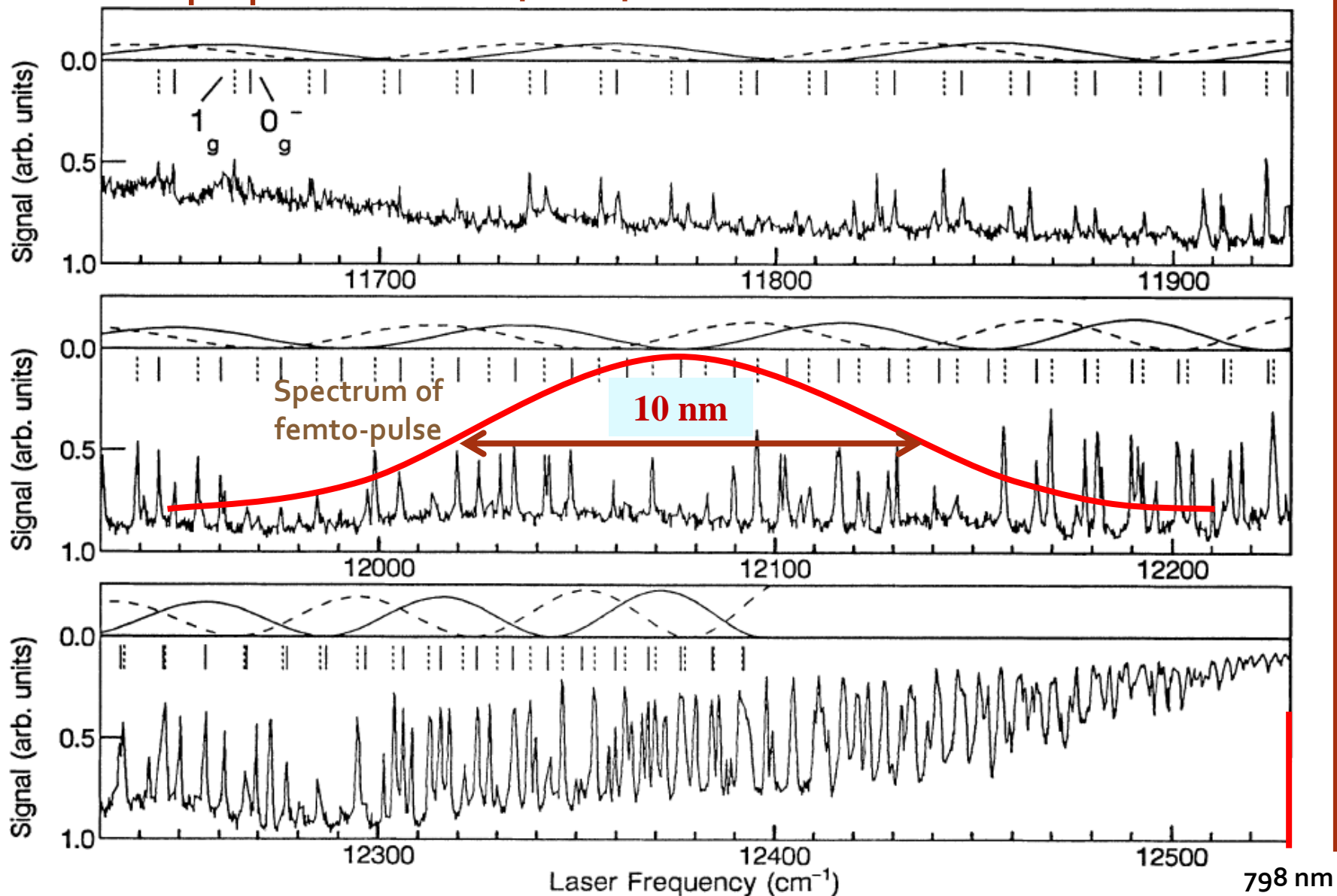
Зависит от **средней** интенсивности лазера и спектральной ширины лазерного поля

Зависит от **пиковой** интенсивности лазера и длительности импульса

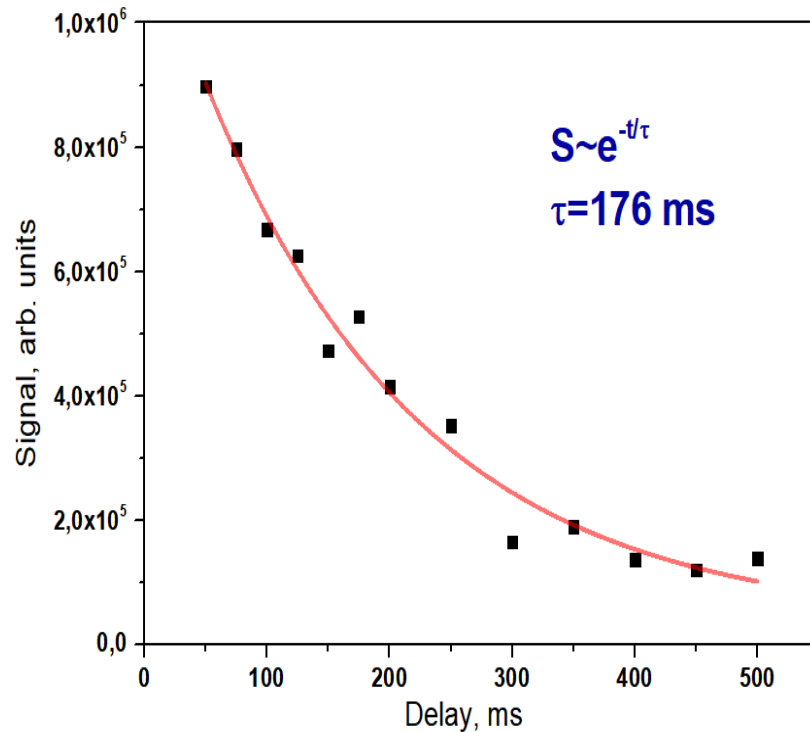
Процесс фотоассоциации



Спектр фотоассоциации Rb

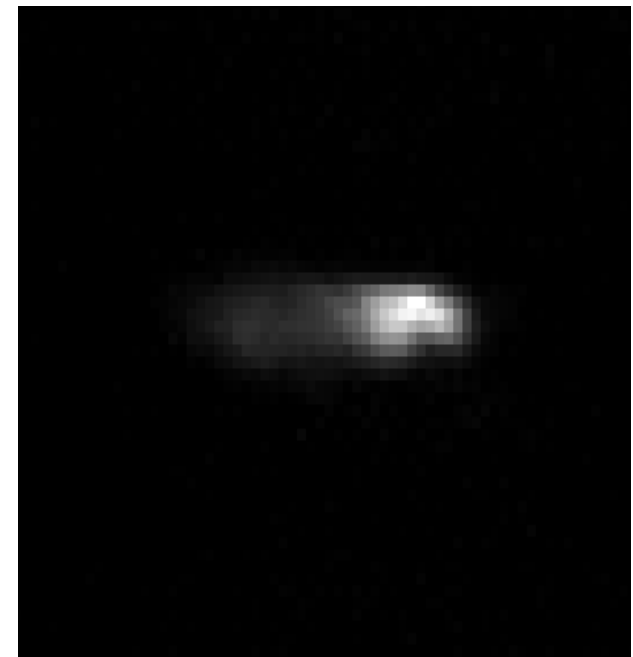


Импульсная ловушка с минимальной длительностью импульсов

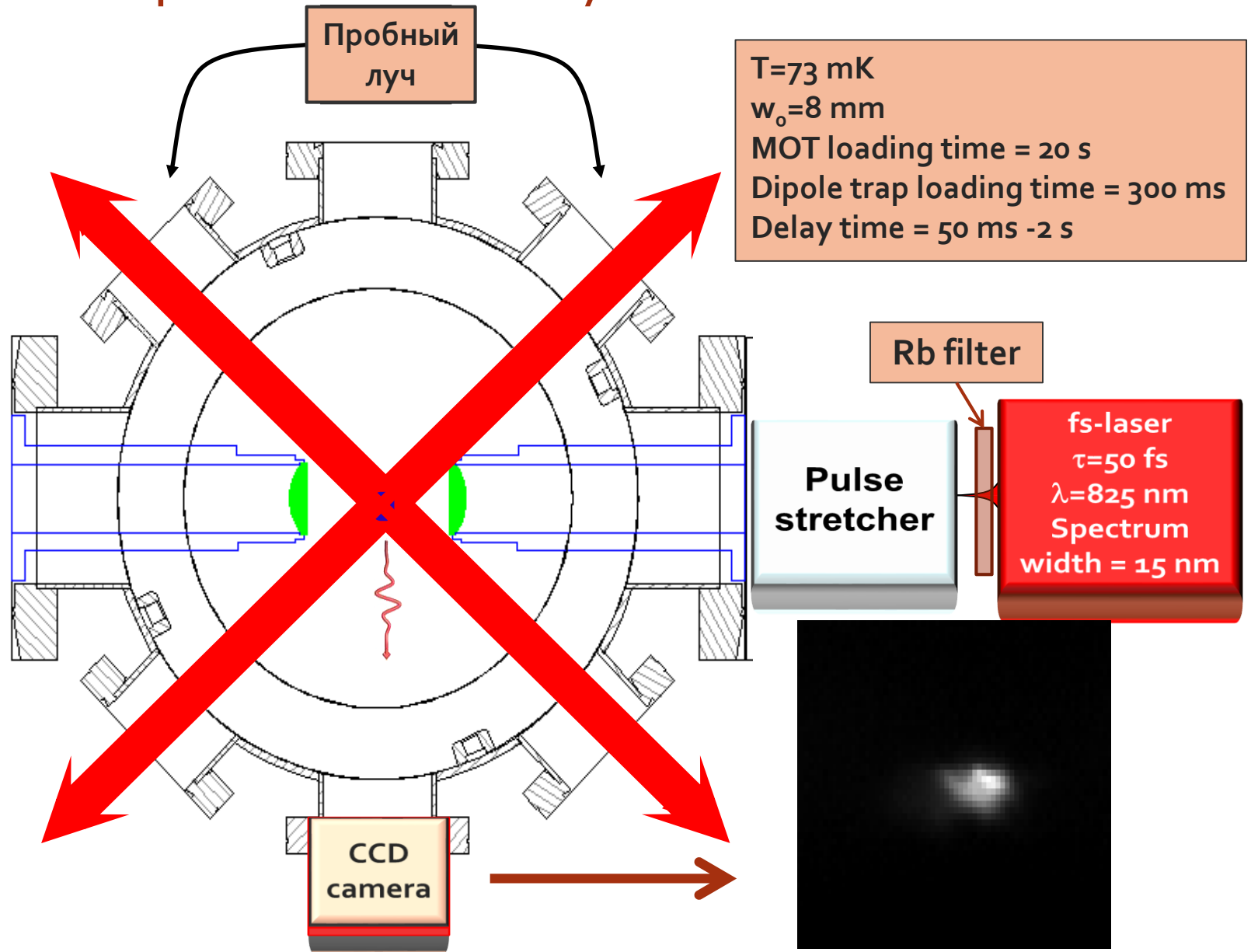


Длительность импульсов **70 фс!**

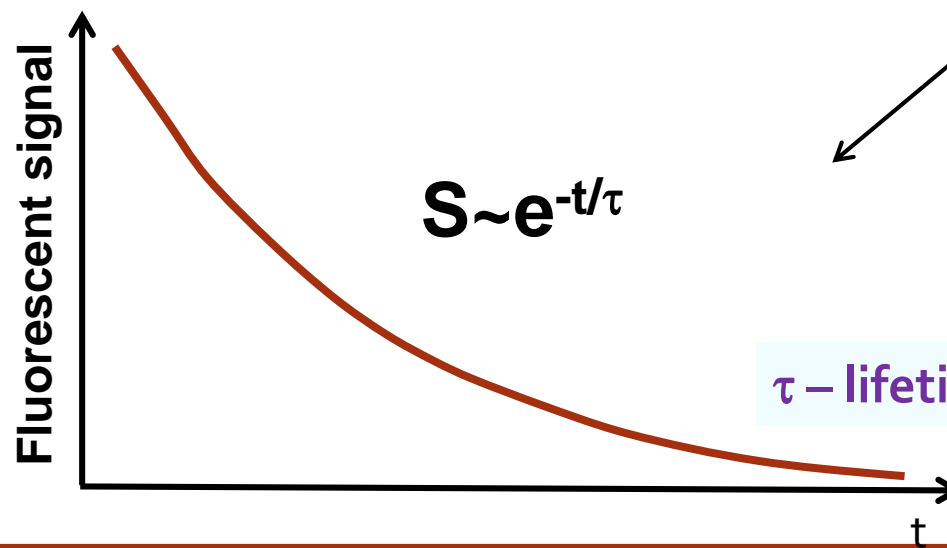
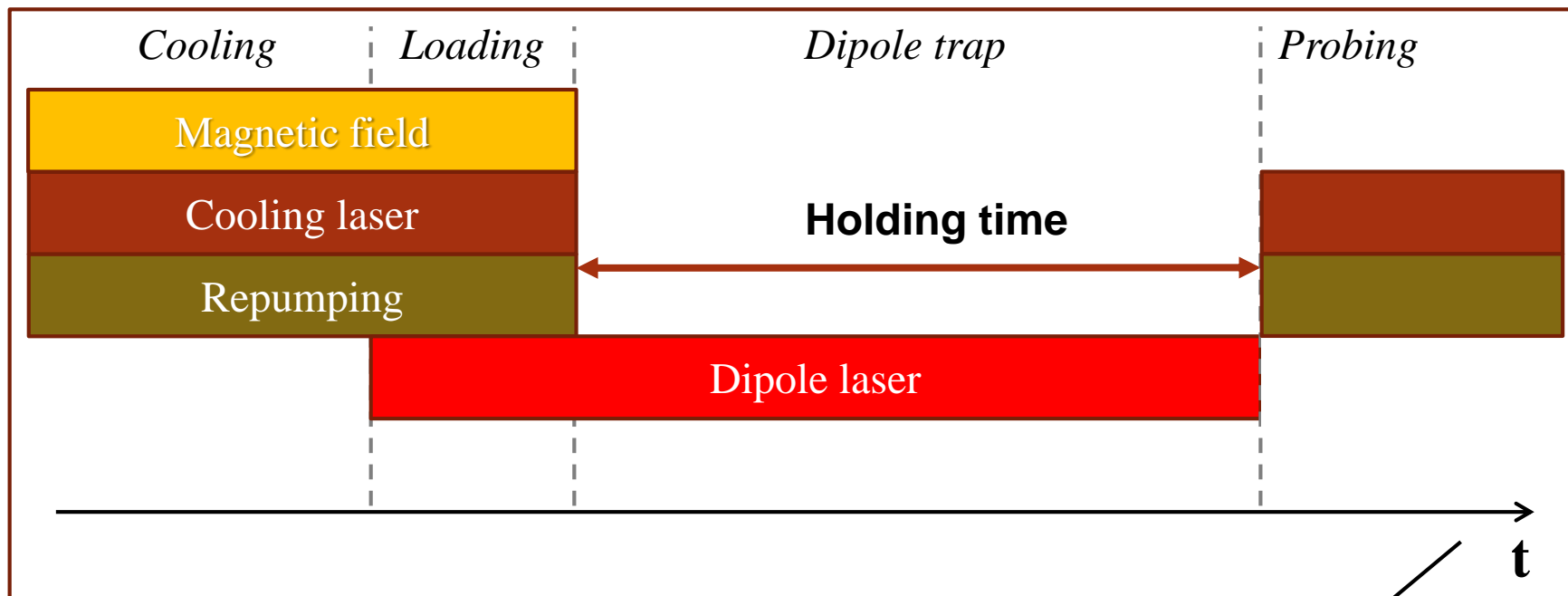
$P=33 \text{ mW}$
 $I=1,7 \times 10^7 \text{ mW/cm}^2$
 $U=100 \text{ }\mu\text{K}$



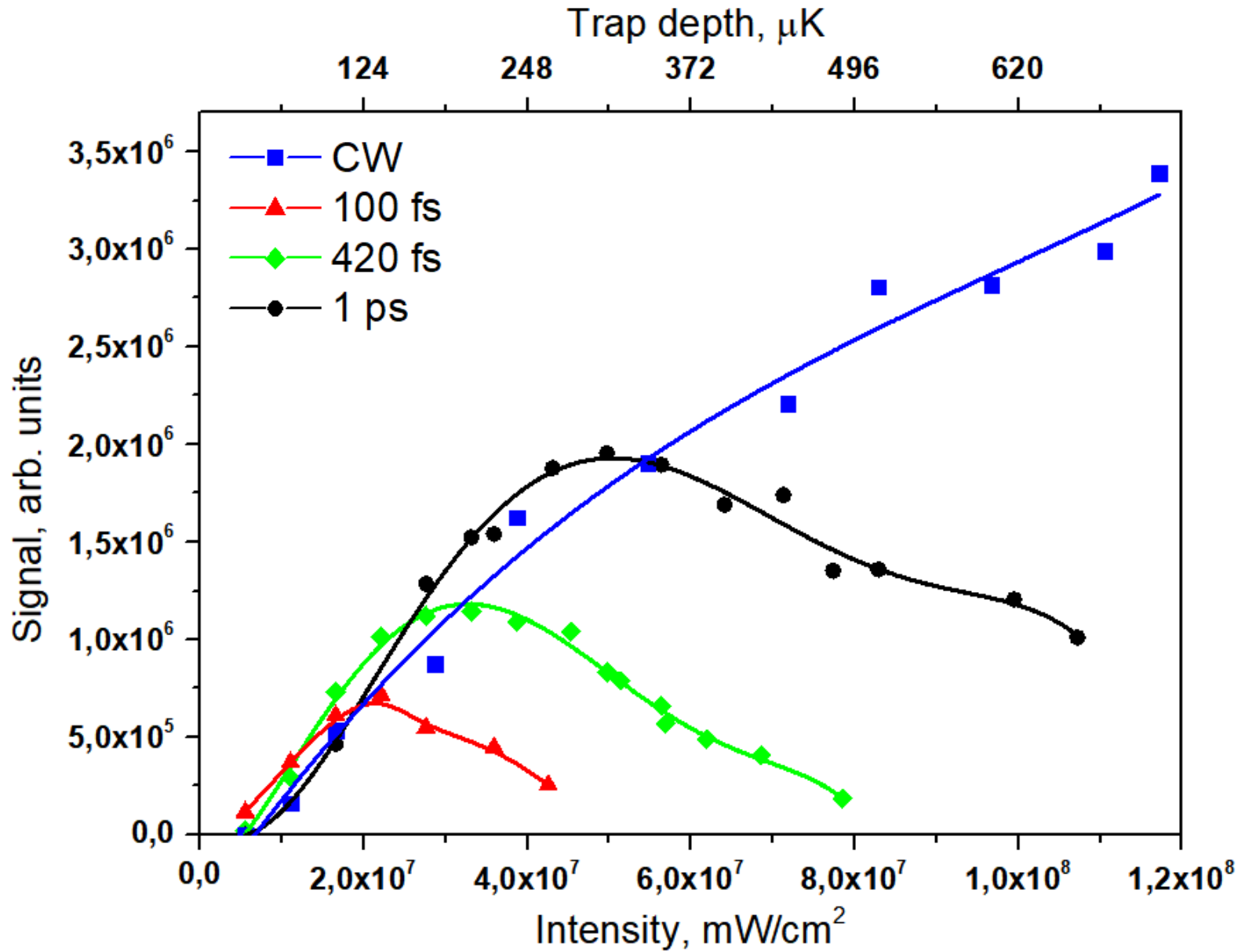
Экспериментальная установка



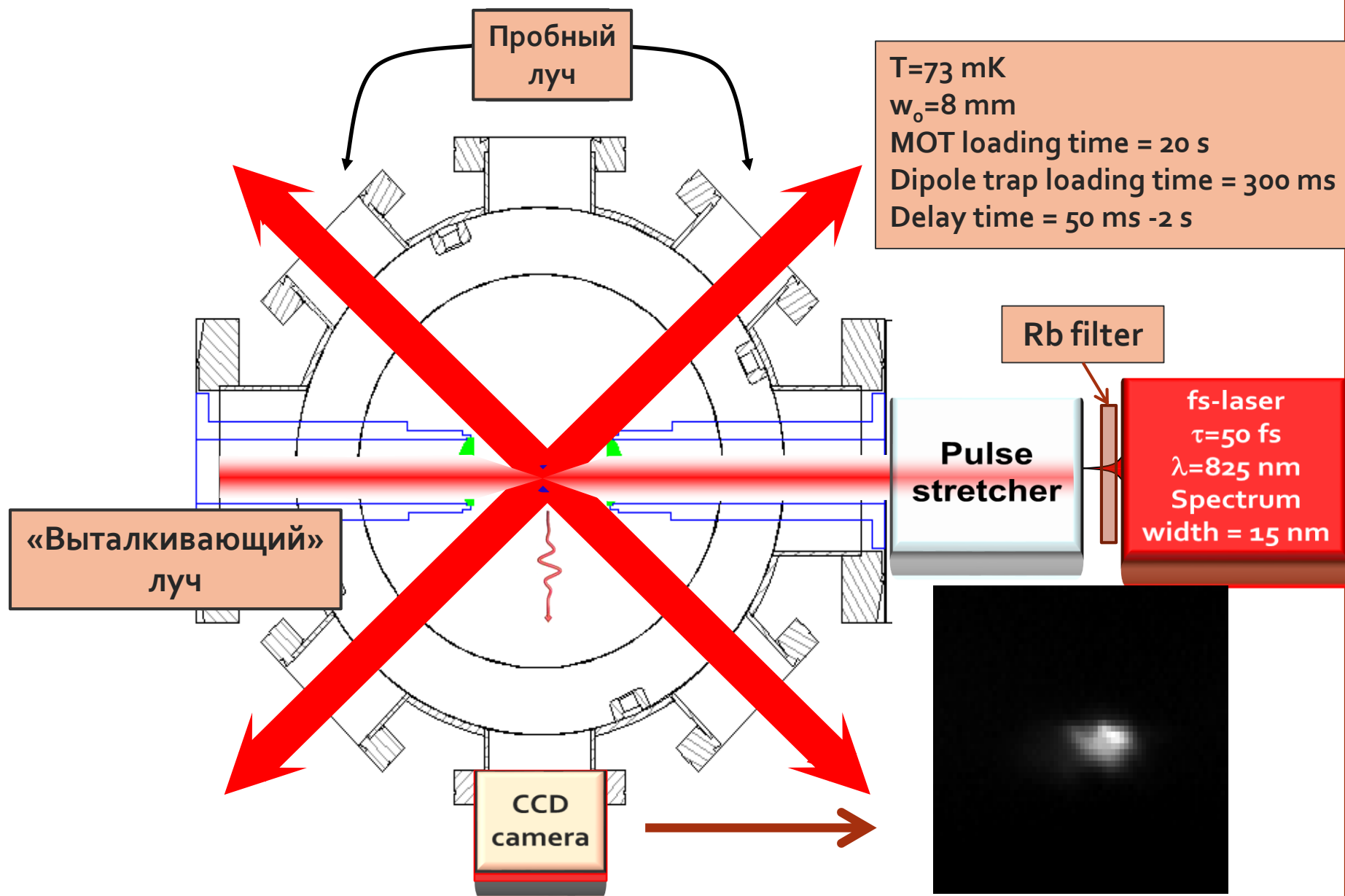
Измерения



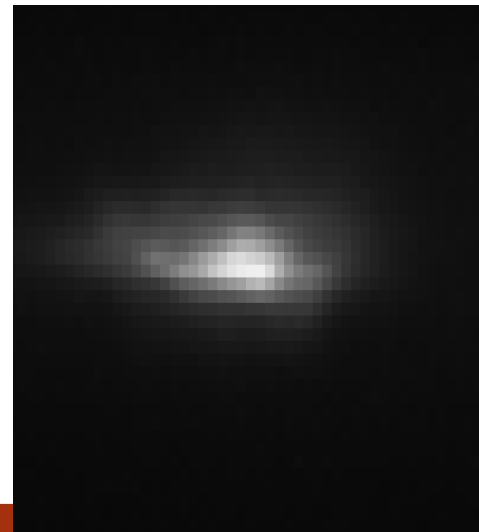
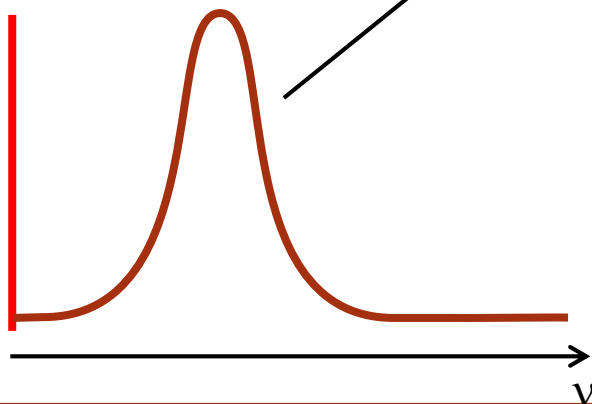
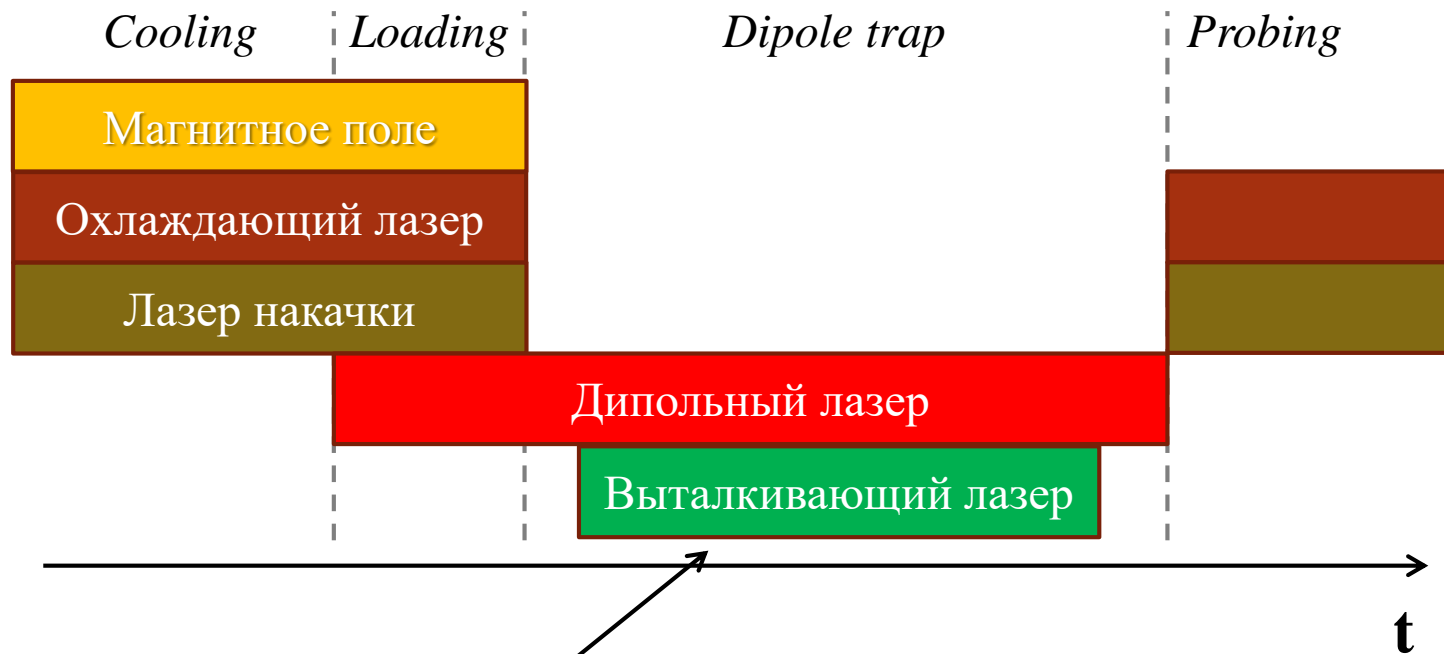
Эффективность локализации vs интенсивность



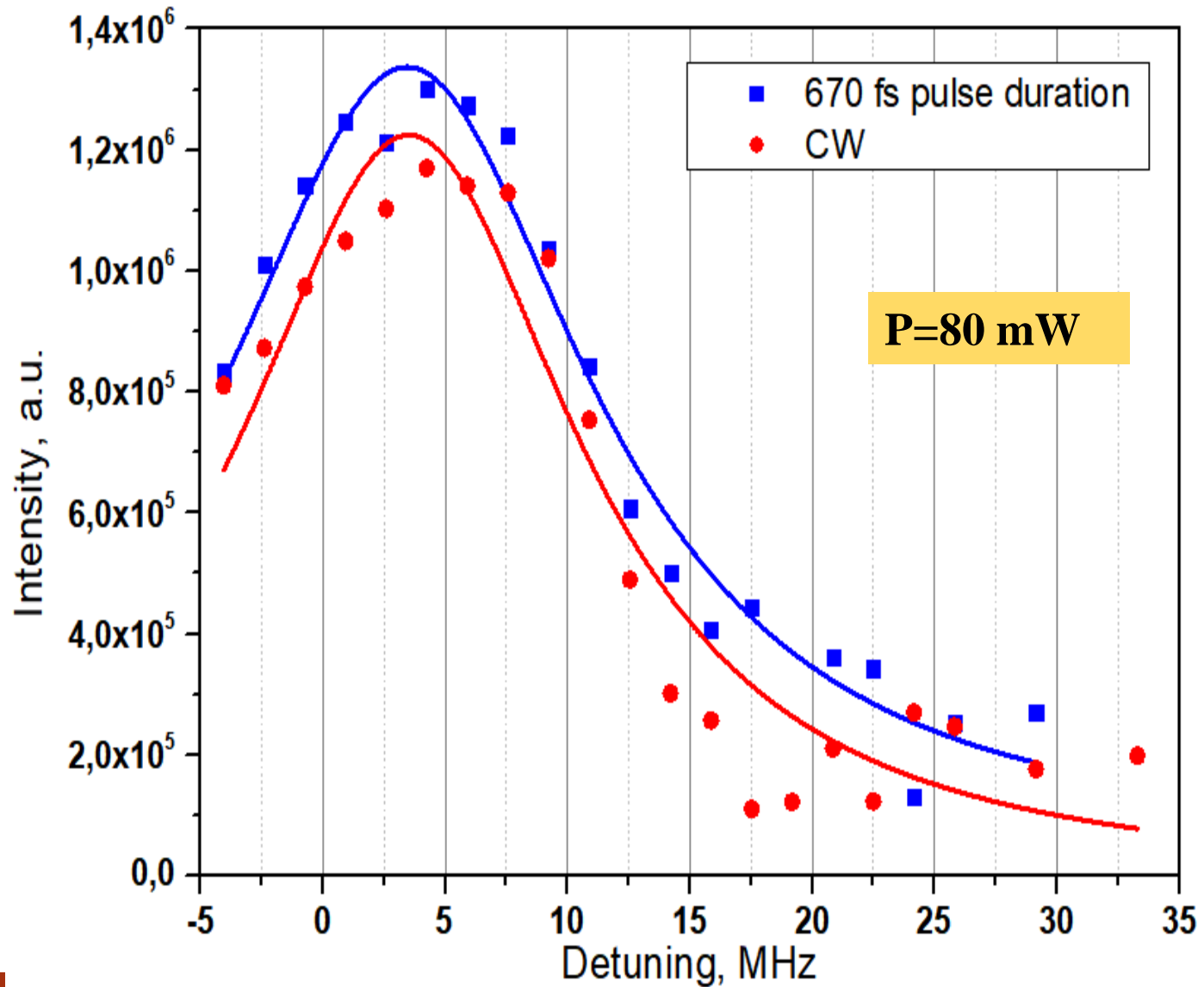
Экспериментальная установка



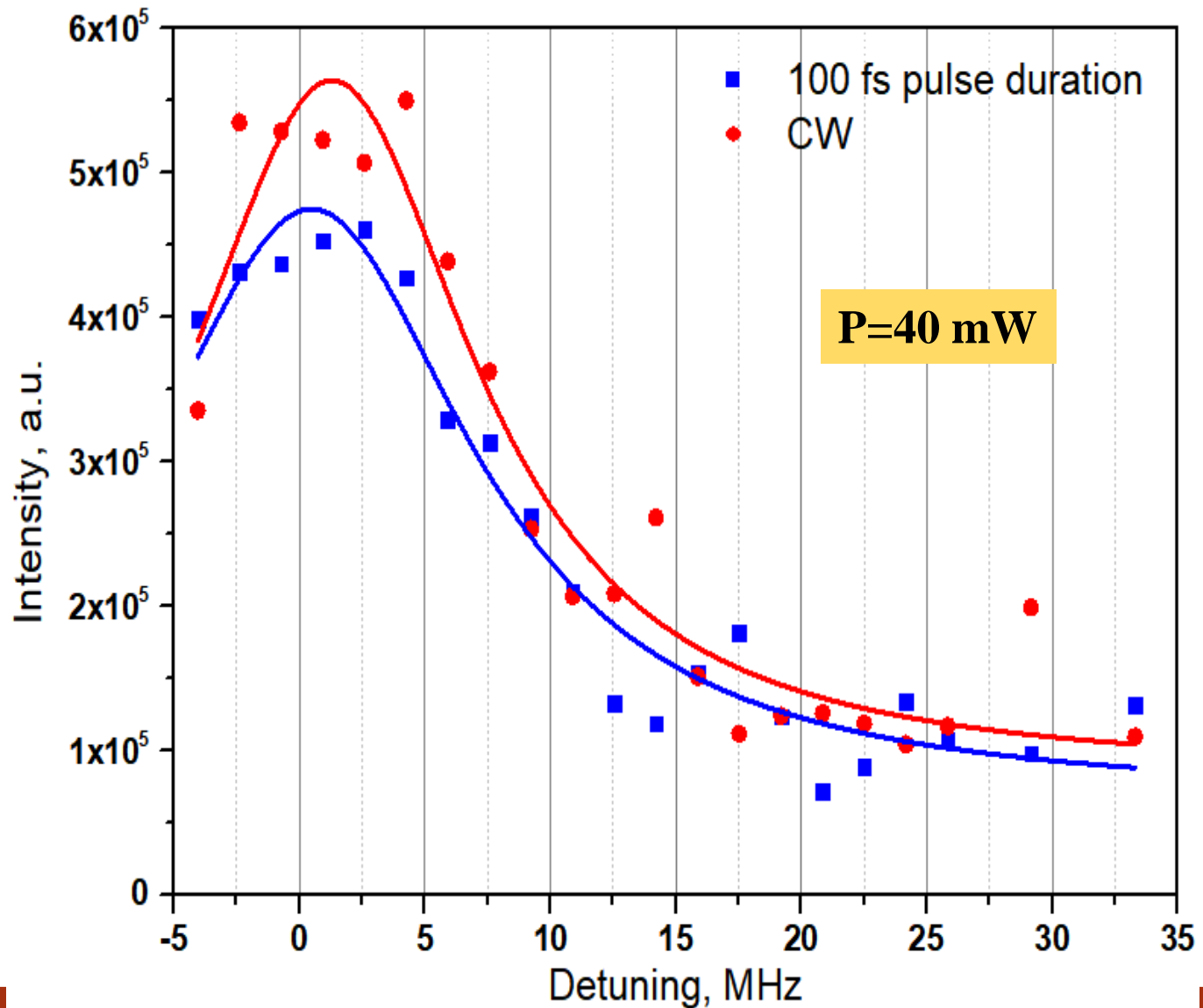
Измерение спектра



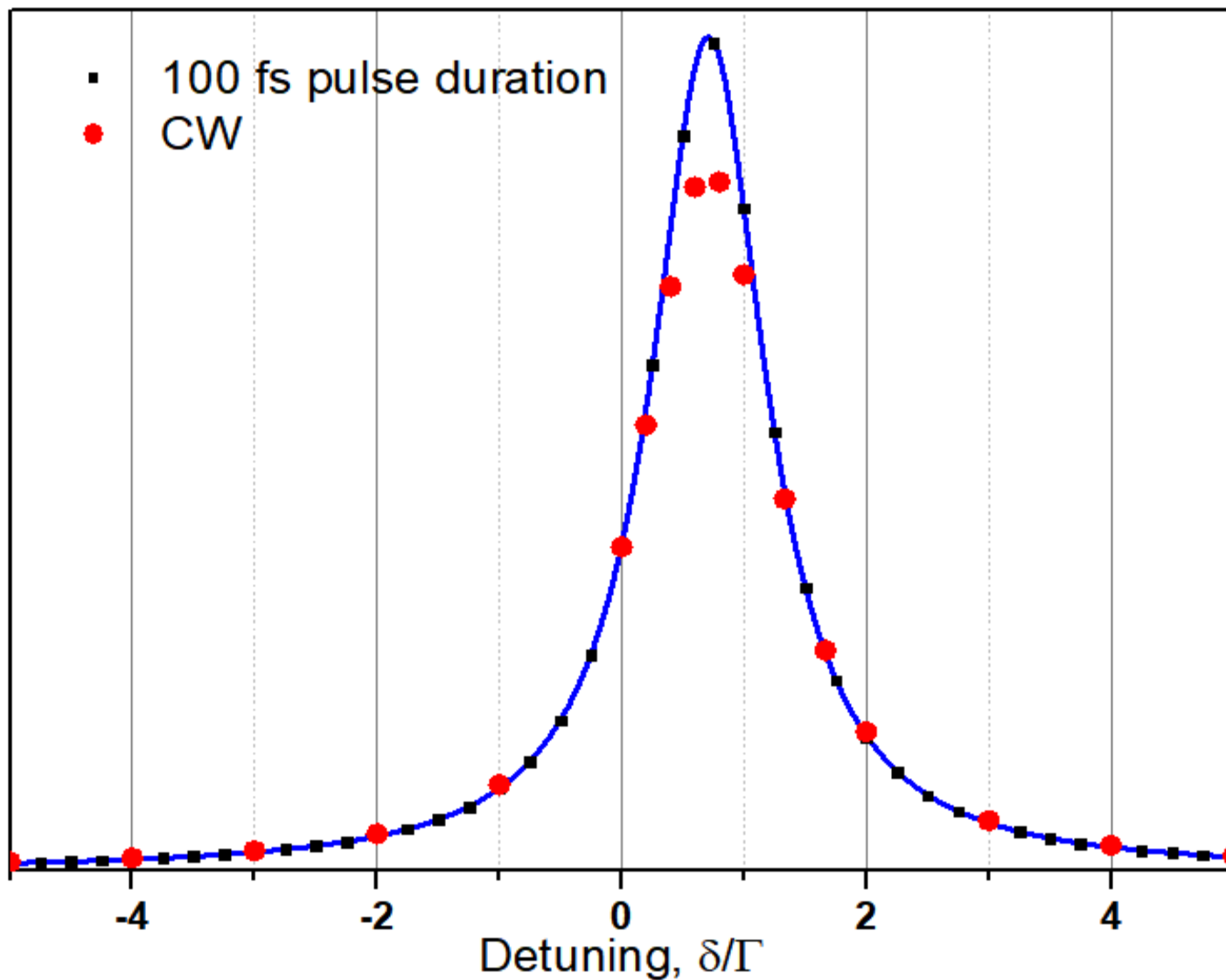
Спектр атомов, локализованных лазерным полем



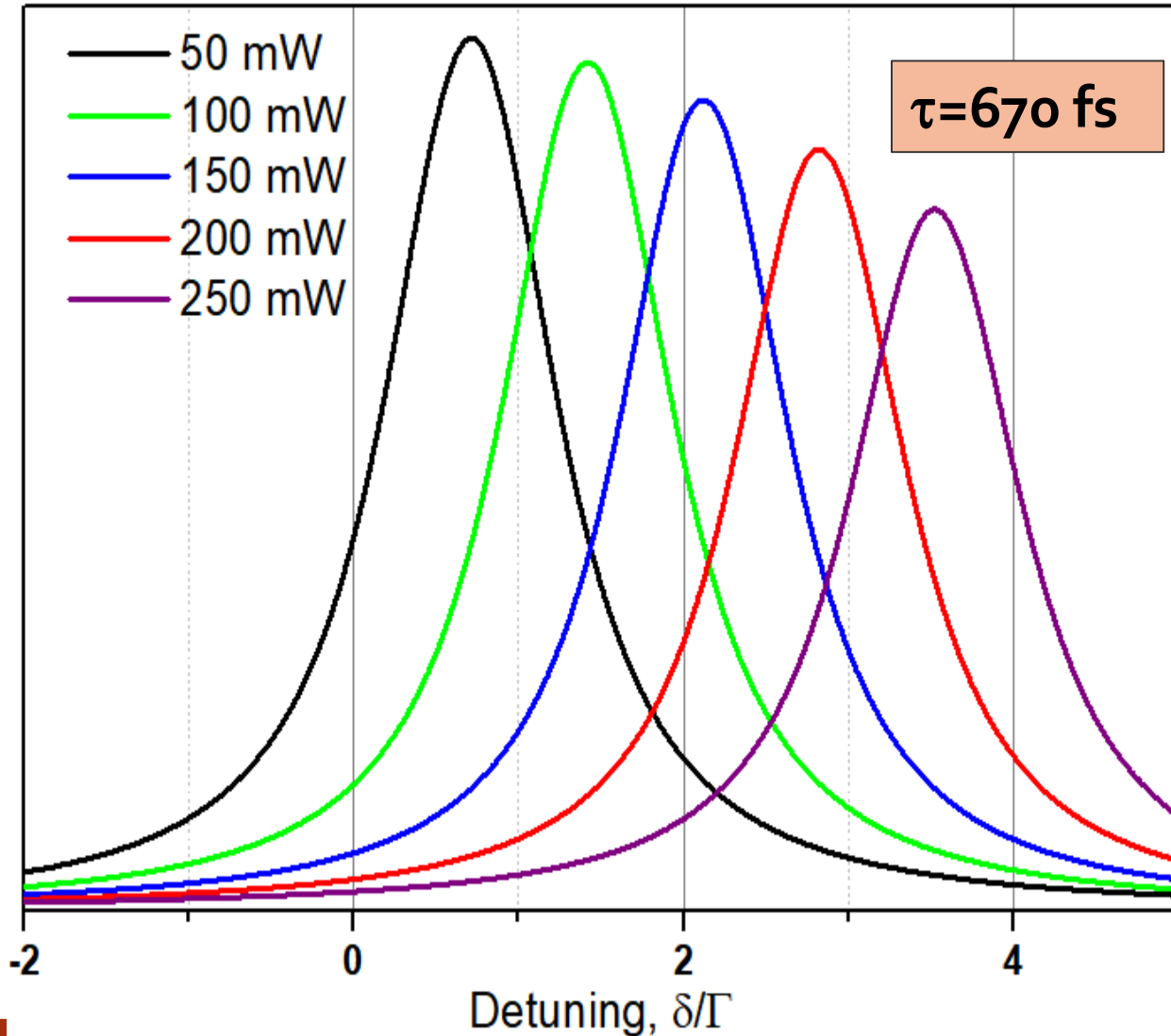
Спектр атомов, локализованных лазерным полем



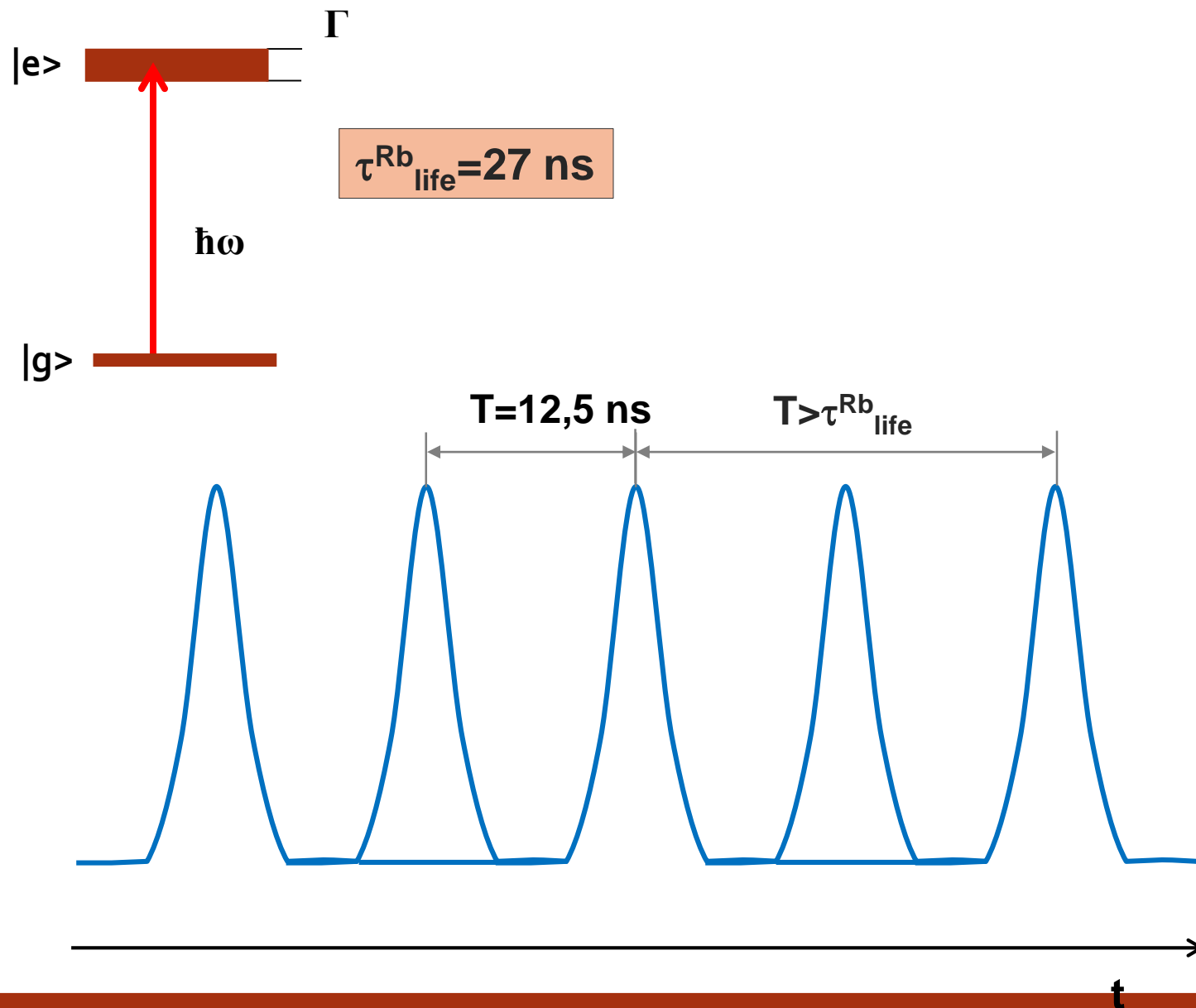
Спектр атомов, локализованных лазерным полем (Теоретическая модель)



Спектр атомов, локализованных лазерным полем (Теоретический расчет)



Перспектива спектроскопии



Заключение

- ✓ Произведена локализация атомов полем лазерных фемтоимпульсов.
- ✓ Получена спектроскопия атомов Rb, локализованных излучением импульсного лазера фемтосекундной длительности.
- ✓ Произведено сравнение спектров атомов, локализованных в непрерывной и импульсной ловушках.
- ✓ Предложены объяснение полученных результатов и дальнейшая перспектива спектроскопии атомов, локализованных импульсным полем.

Спасибо за

внимание !