



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

Машко Анастасия

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

02.02.2020

Нобелевские лауреаты

За создание методов охлаждения и улавливания атомов лазерным лучом (1997)



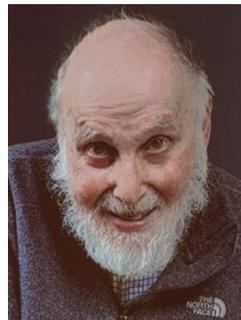
Клод Коэн-Таннуджи



Стивен Чу



Уильям Филлипс



Артур Эшкин

За изобретение оптического пинцета и их применение в биологических системах (2018)

За достижение конденсации Бозе — Эйнштейна в разреженных газах щелочных металлов и за начальные фундаментальные исследования свойств конденсатов (2001)



Эрик Корнелл

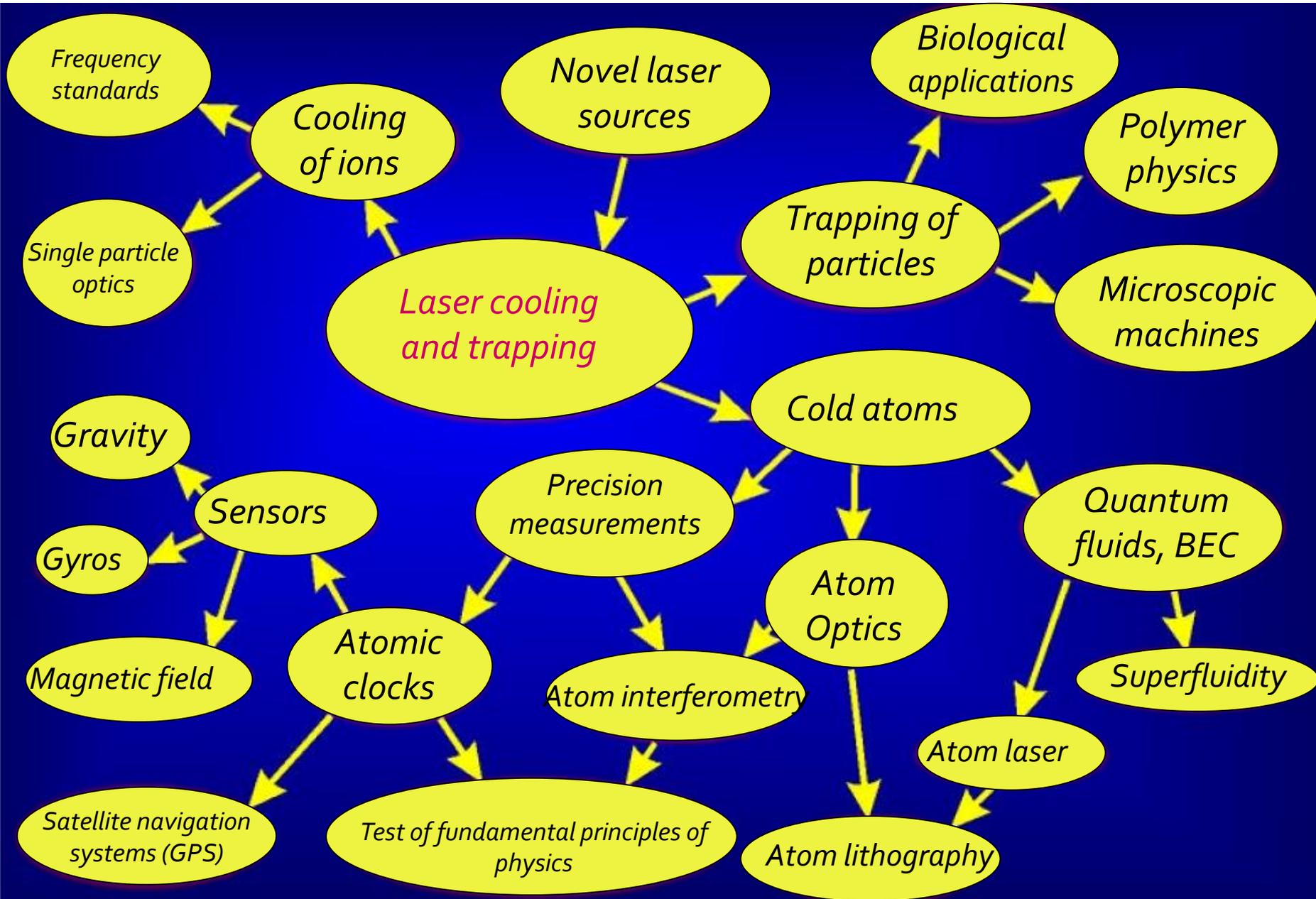


Вольфганг Кеттерле



Карл Виман

Лазерное охлаждение и атомная оптика



Первые идеи по охлаждению атомов и ионов

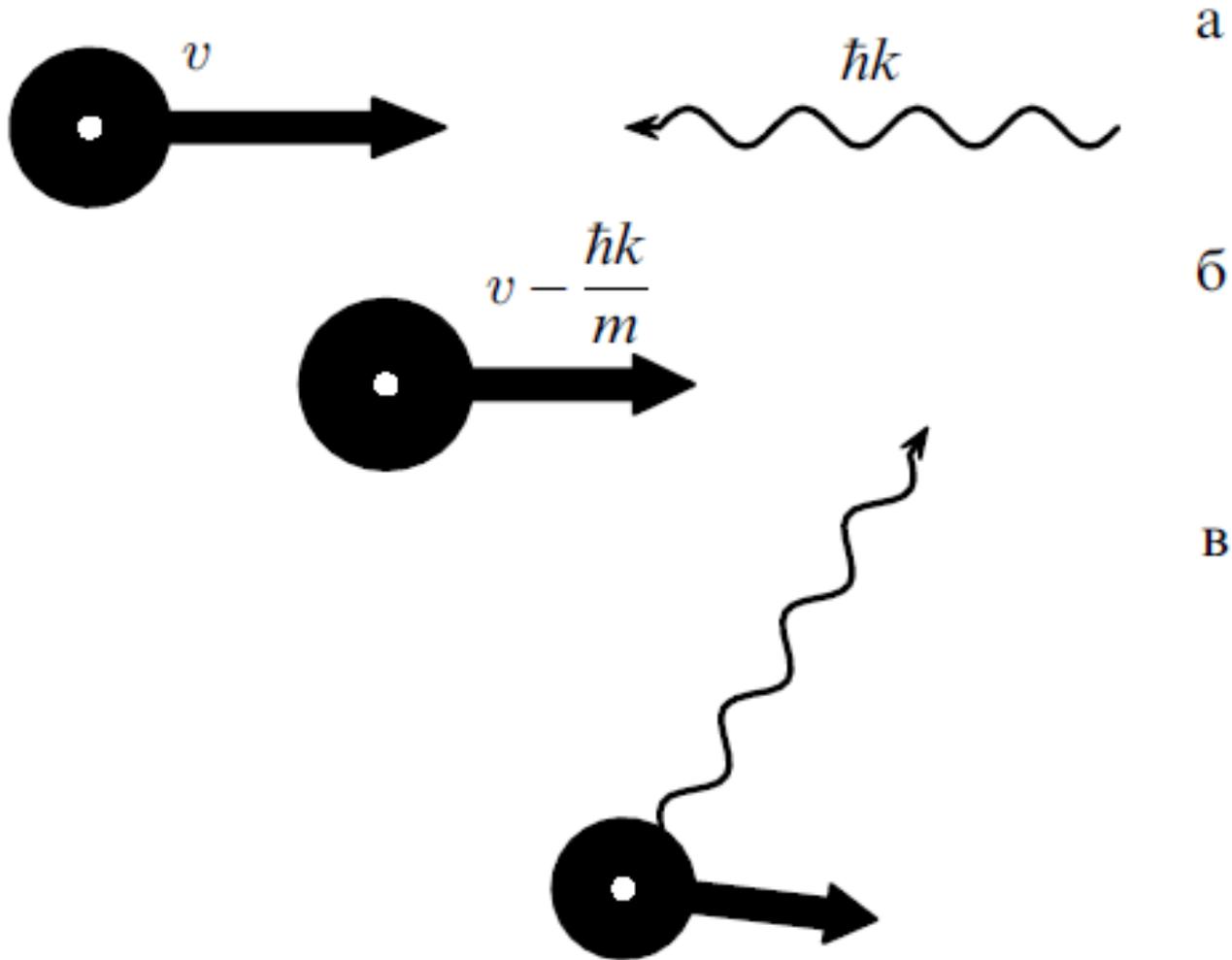
- Применения лазерного света для нагрева вещества $k_B T_{\text{изл}} \approx \bar{n} \hbar \omega$, где $\bar{n} \gg 1$
- 1950 Альфред Кастлер, 1974 Яков Борисович Зельдович $(\omega \rightarrow \omega \pm \delta\omega)$
- 1975 Вайнлэнд и Демельт, Хэнч и Шавлов

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

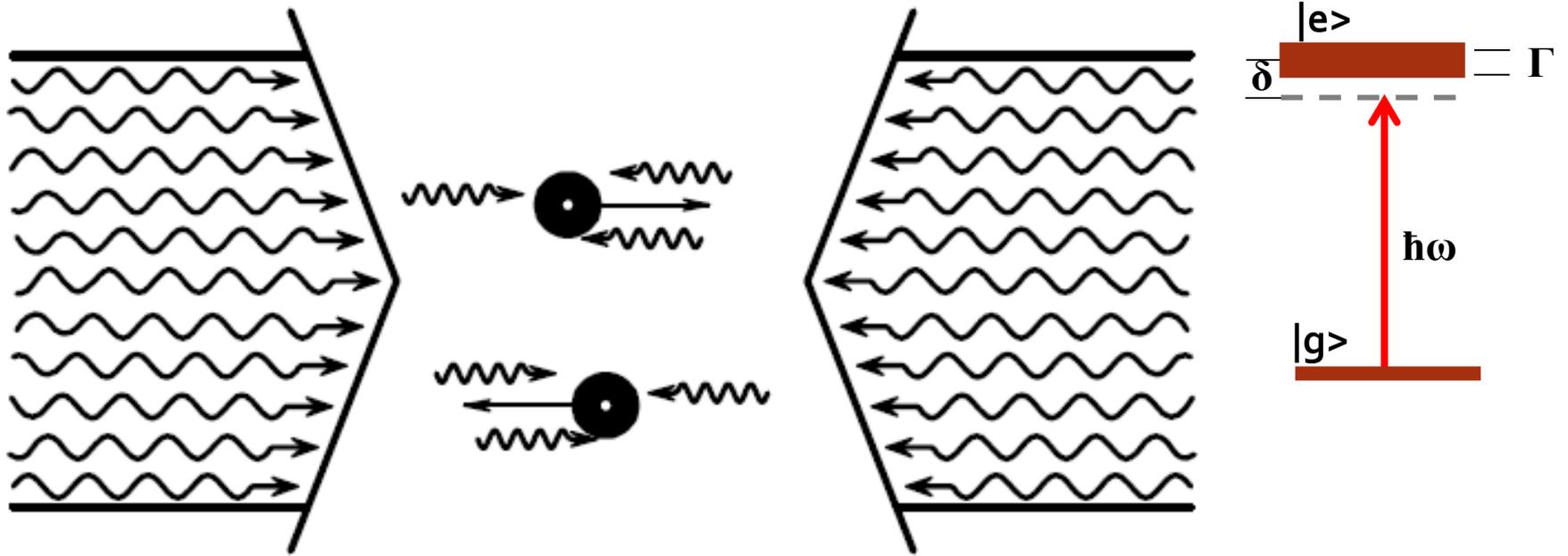
При температуре жидкого азота (77K) атомы имеют скорость 150 м/с

При температуре жидкого гелия (4K) 90 м/с (50 MHz для Rb)

Основной принцип лазерного охлаждения



Доплеровское охлаждение



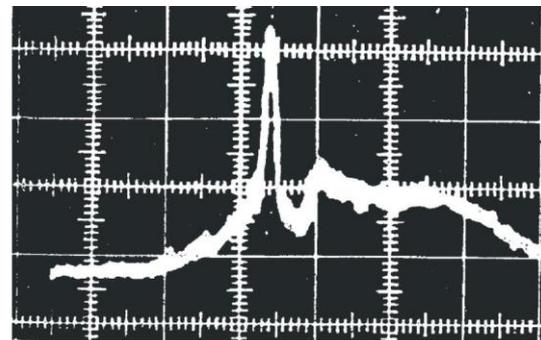
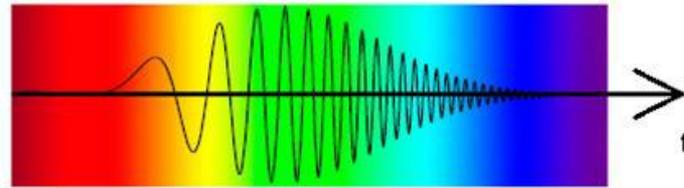
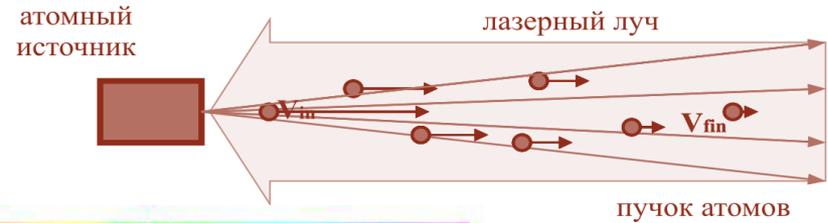
Доплеровское охлаждение в одном измерении.

- 1977 Доплеровский предел охлаждения
- Для натрия 240 мК (30 см/с), Rb 146 мК

$$m\langle v_i^2 \rangle = k_B T = \frac{\hbar\Gamma}{4} \left(\frac{\Gamma}{2\delta} + \frac{2\delta}{\Gamma} \right), \quad T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$$

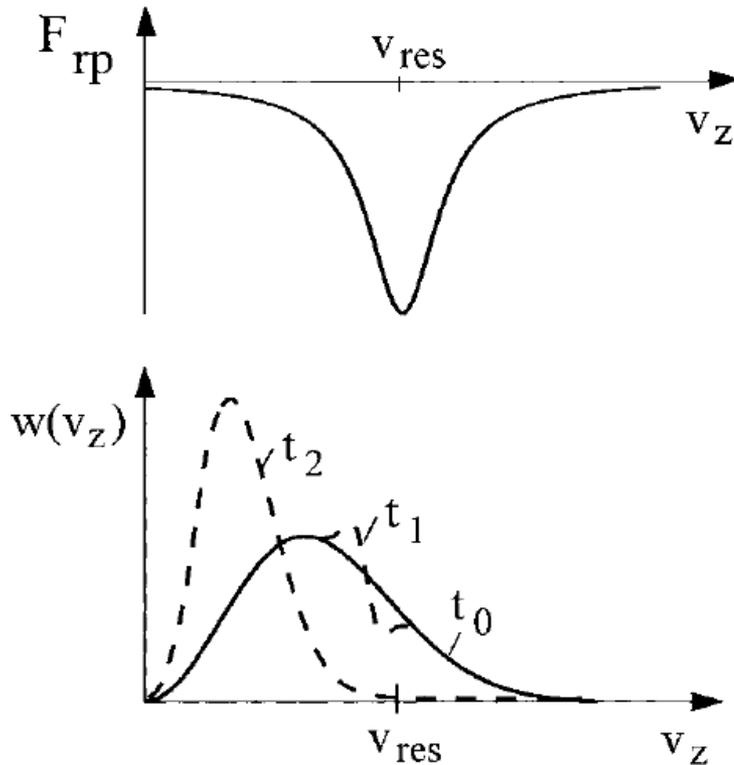
Первый эксперимент

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

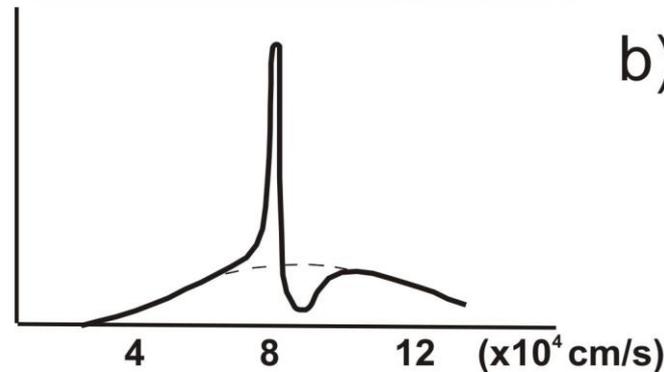


a)

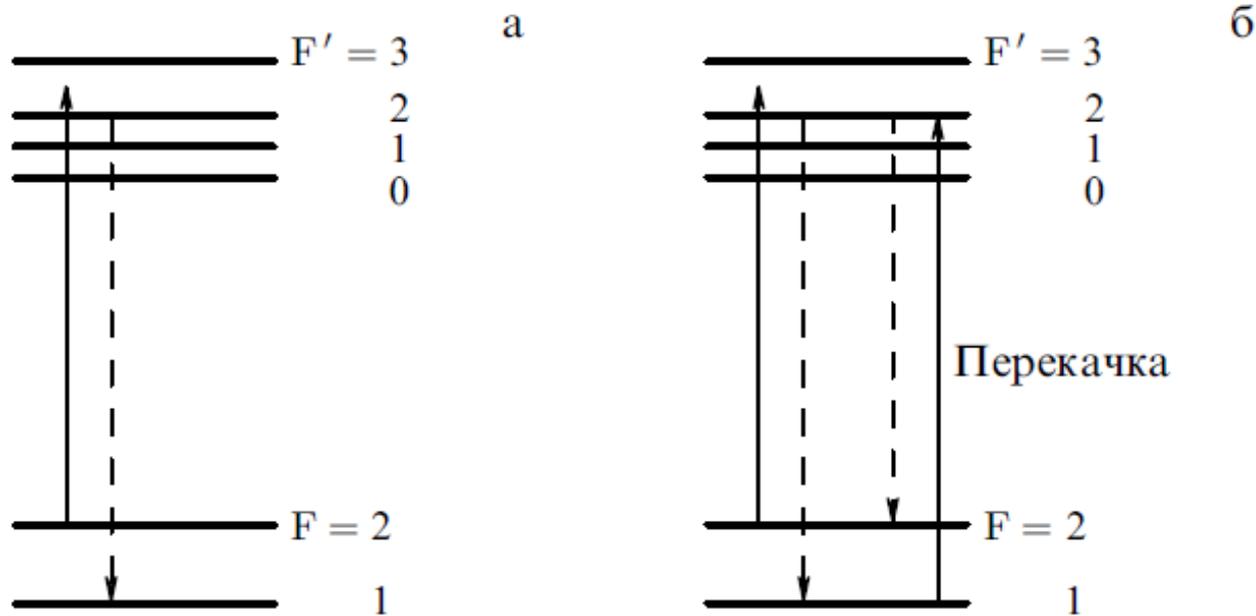
$$\omega = \omega_0 - kv$$



b)



Основные проблемы на пути к лазерному охлаждению

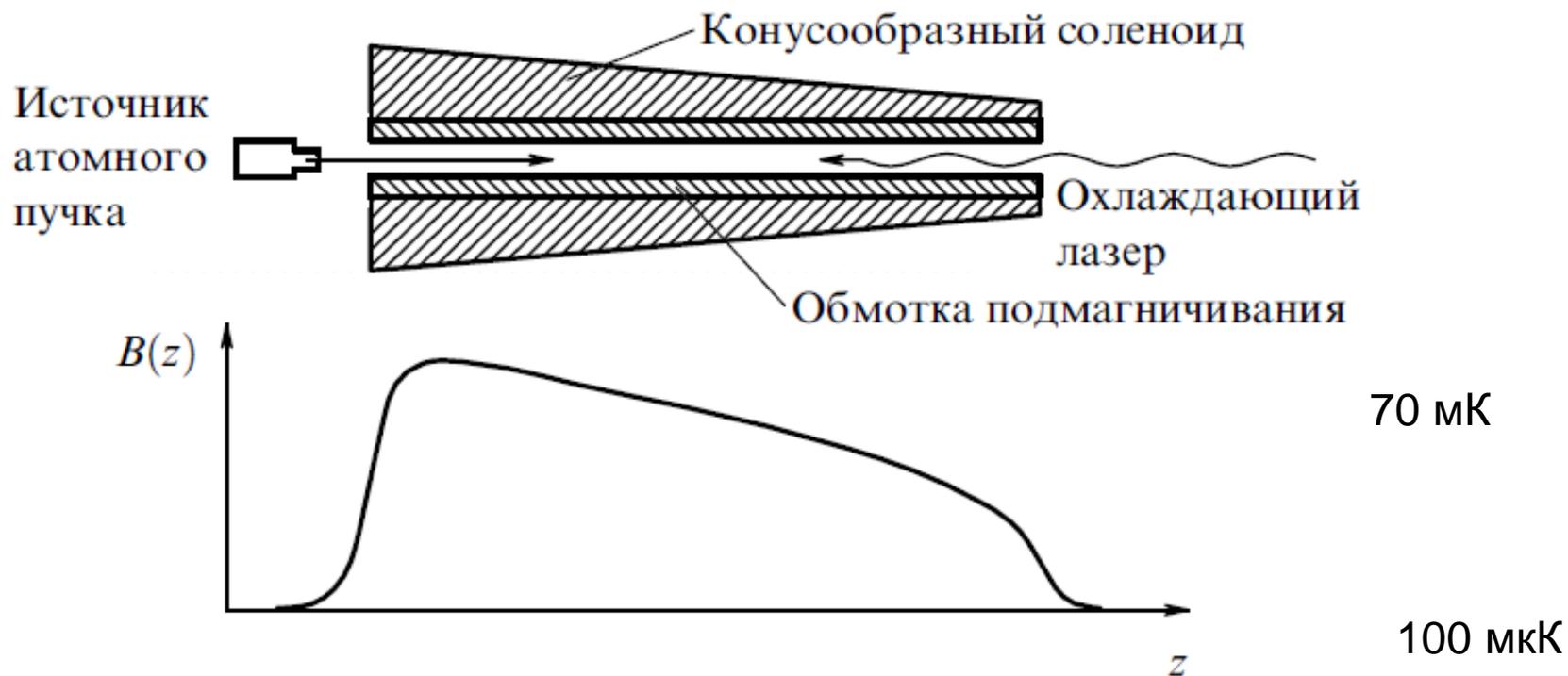


Процесс оптической накачки, препятствующий циклическому возбуждению в щелочных атомах типа натрия (а); использование перекачивающего лазера для обеспечения многих циклов поглощение – излучение (б).

Зеемановский замедлитель

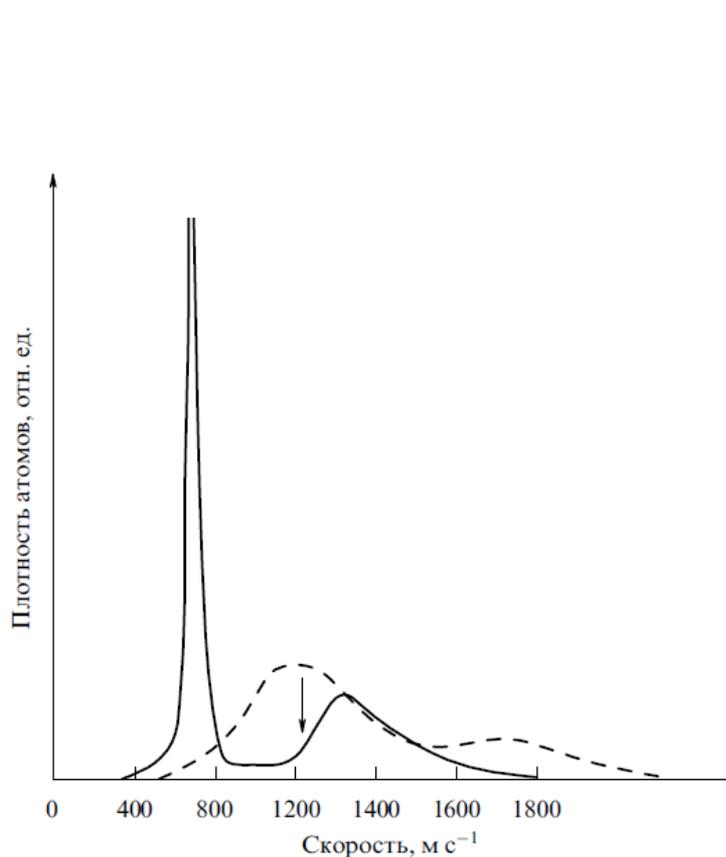
• 1983 Филлипс

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

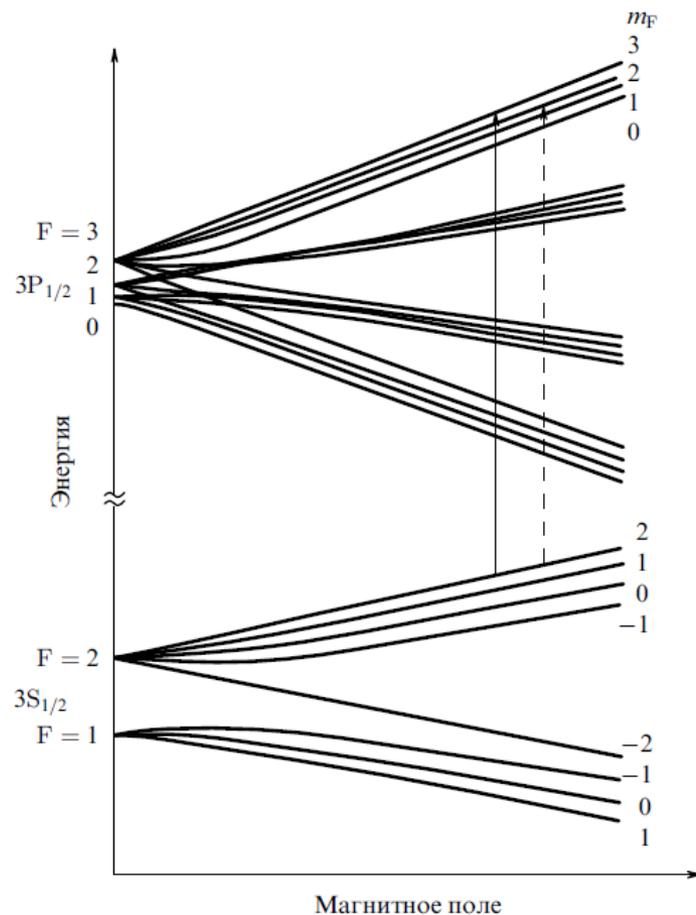


Вверху — схематическое изображение зеемановского замедлителя. Внизу — изменение поля вдоль оси.

Зеемановский замедлитель

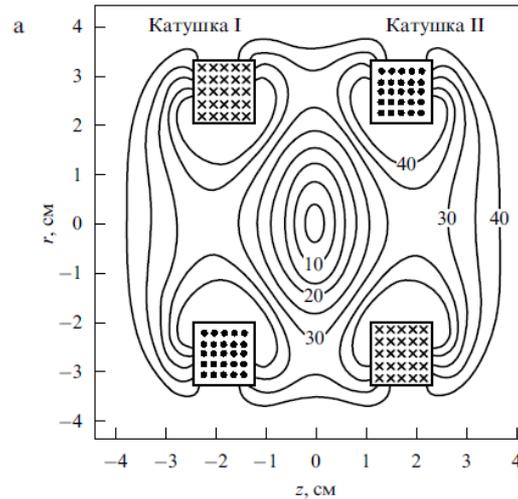
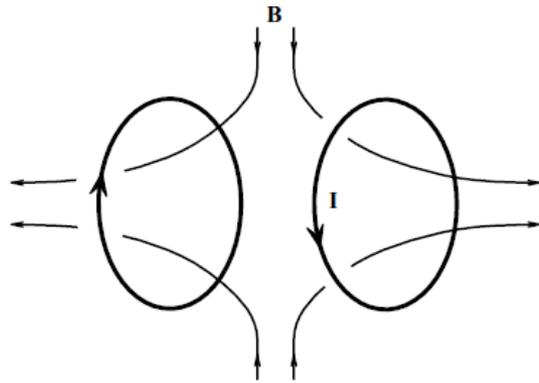


Распределение по скоростям до (штриховая линия) и после (сплошная линия) зеемановского охлаждения. Стрелкой отмечена максимальная скорость, резонансная с замедляющим лазером (дополнительный максимум при 1700 м с^{-1} дают атомы в состоянии $F = 1$, которые оптически накачиваются в состояние $F = 2$ в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

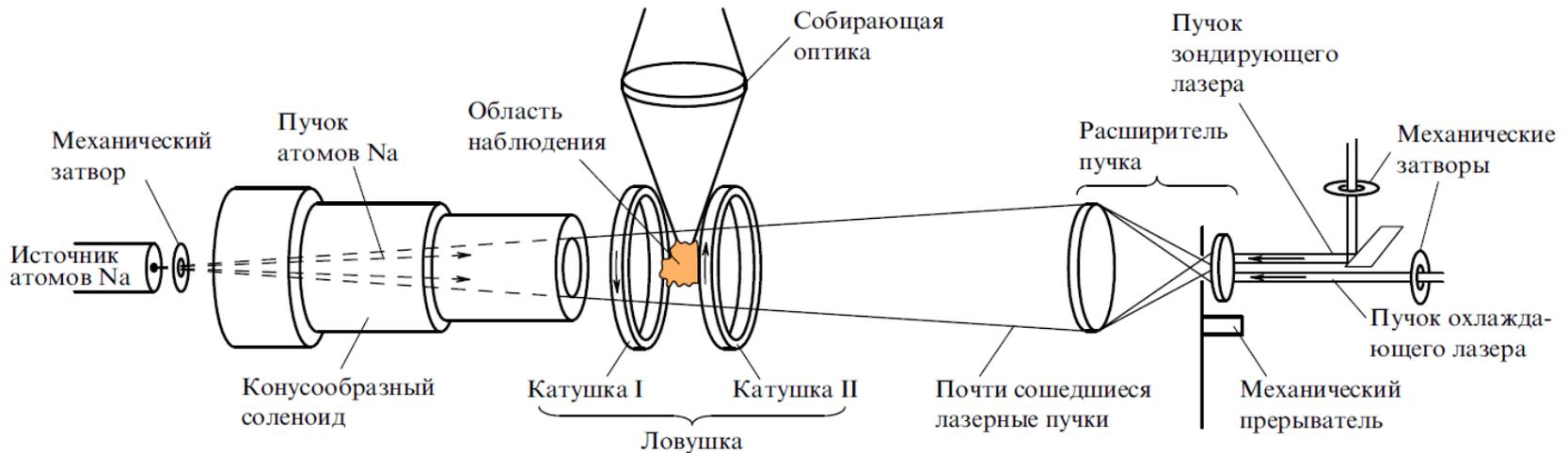


6

17мК

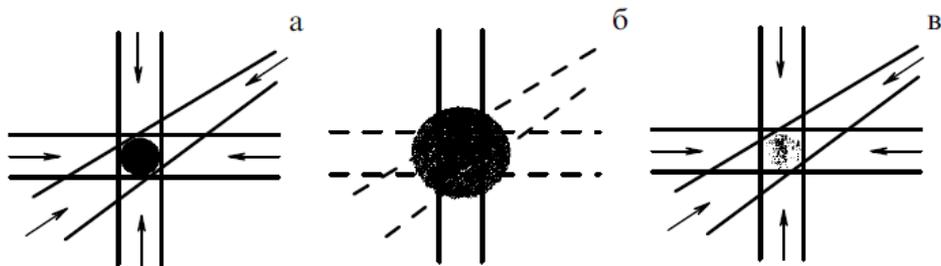
$$U = -\vec{\mu} \mathbf{B} = -\mu_l B$$

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



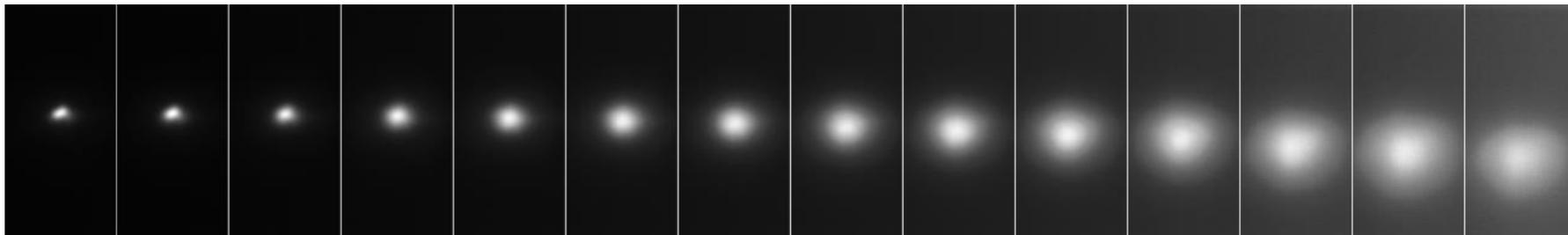
Способы измерения температуры

• 1987г Филипс, Гоулд, Летт

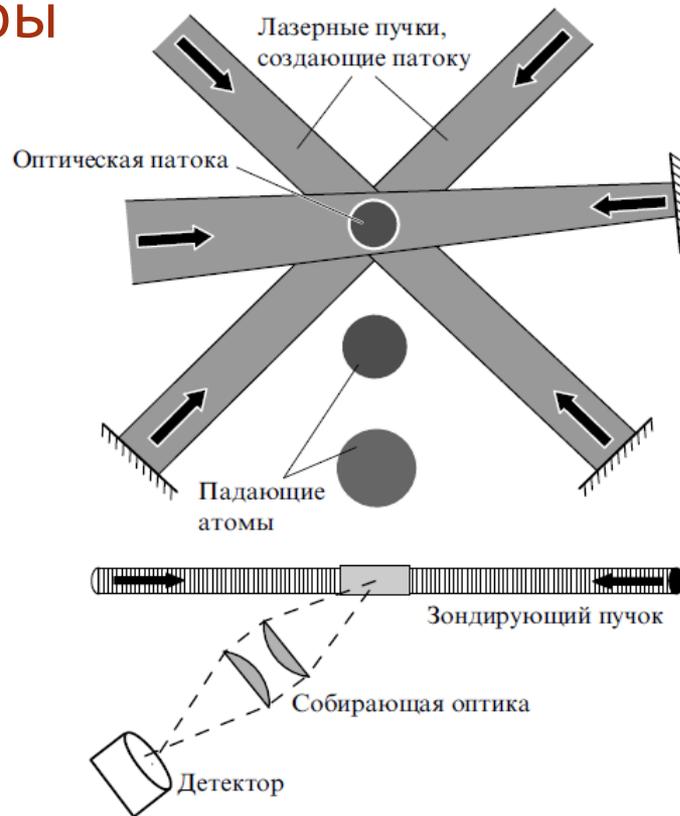


Измерение температуры методом освобождения и перезахвата.

0 мс

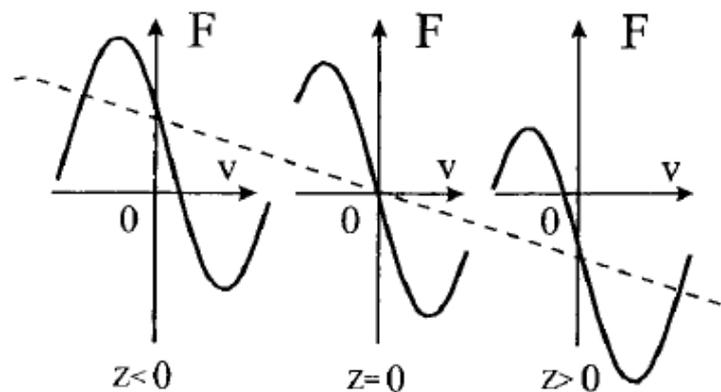
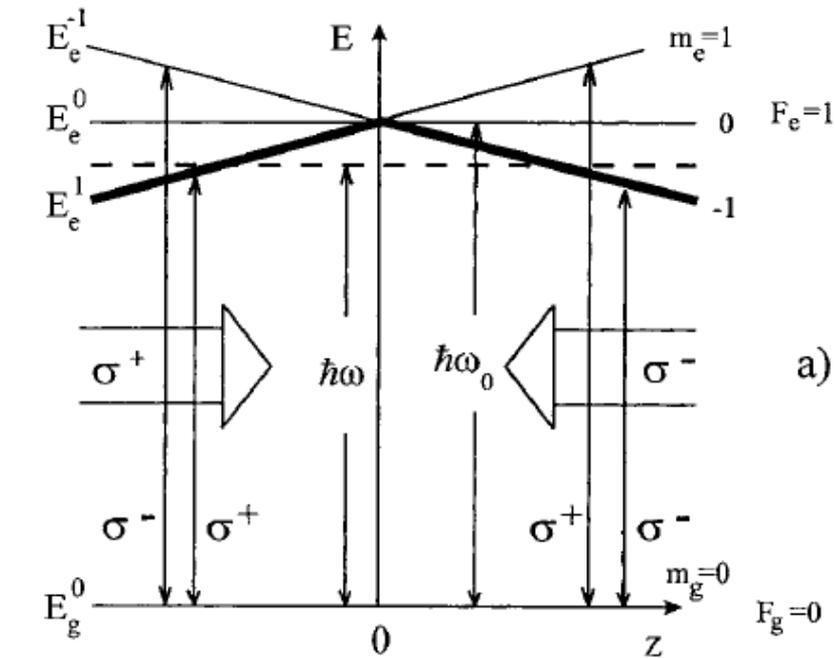


26 мс

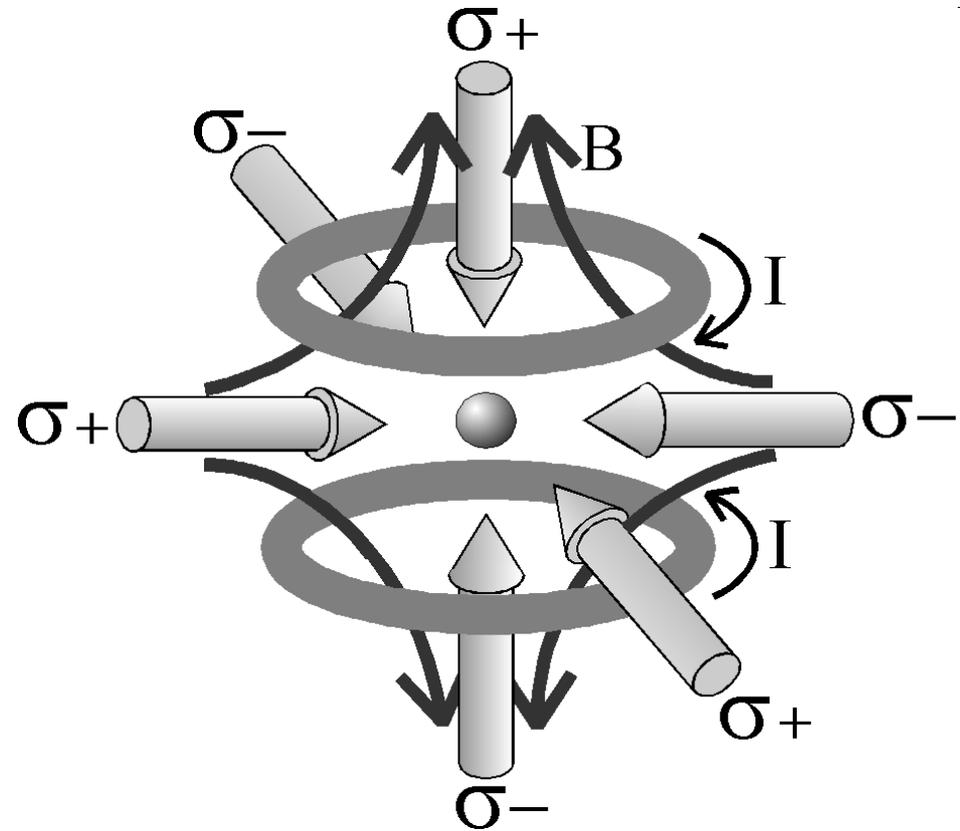


Времяпролетный метод измерения температуры при лазерном охлаждении.

Магнито-оптическая ловушка

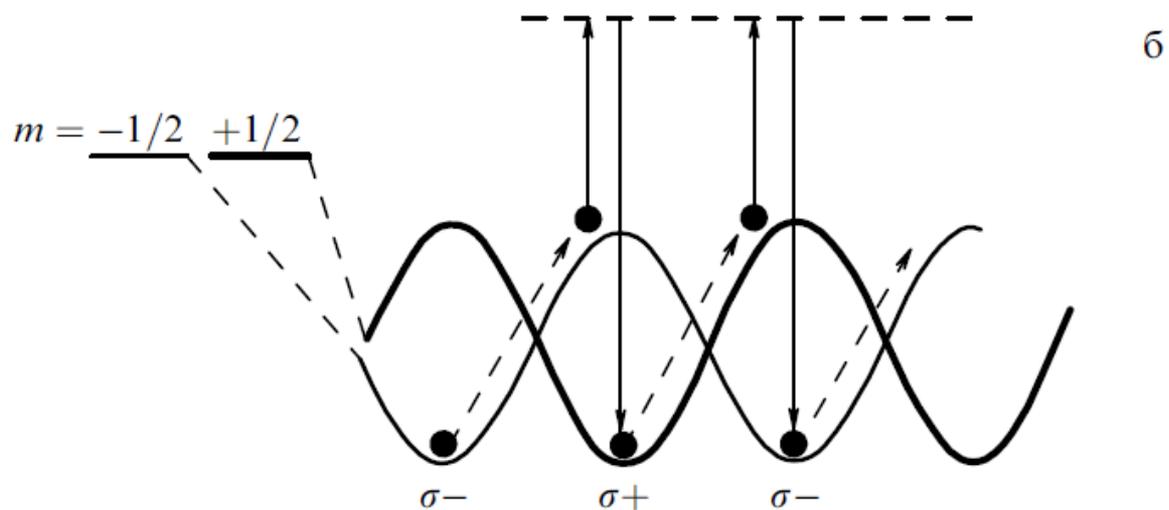
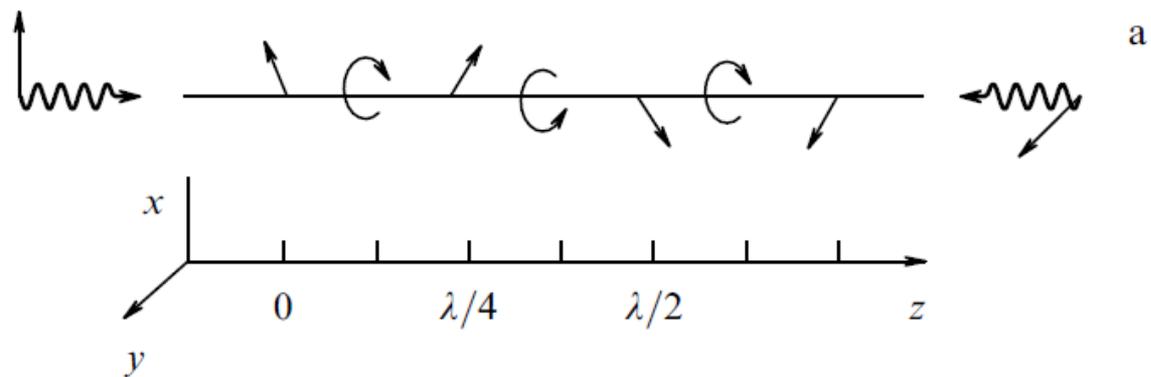


$$E_e^{\pm 1} = \hbar\omega_0 \pm \mu B(z)$$



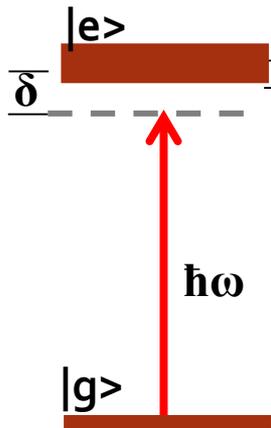
• 1987 Жан Далибар

Сизифово охлаждение



ДИПОЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ
АТОМОВ ИМПУЛЬСНЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ
ФЕМТОСЕКУНДНОЙ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Взаимодействие атома с электрическим полем



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

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

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

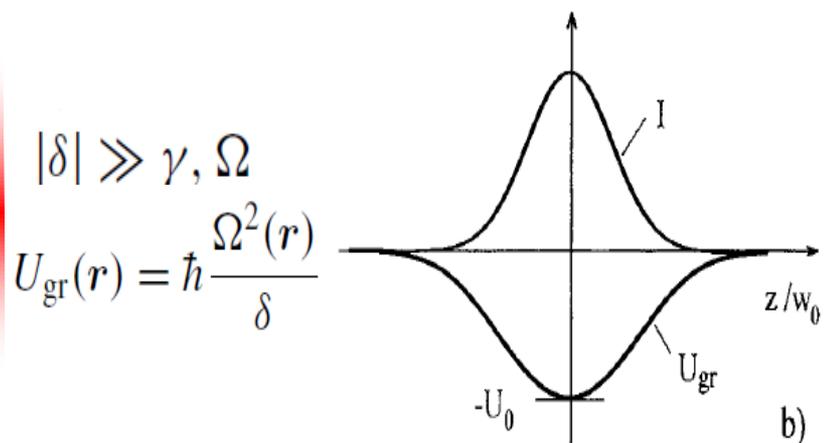
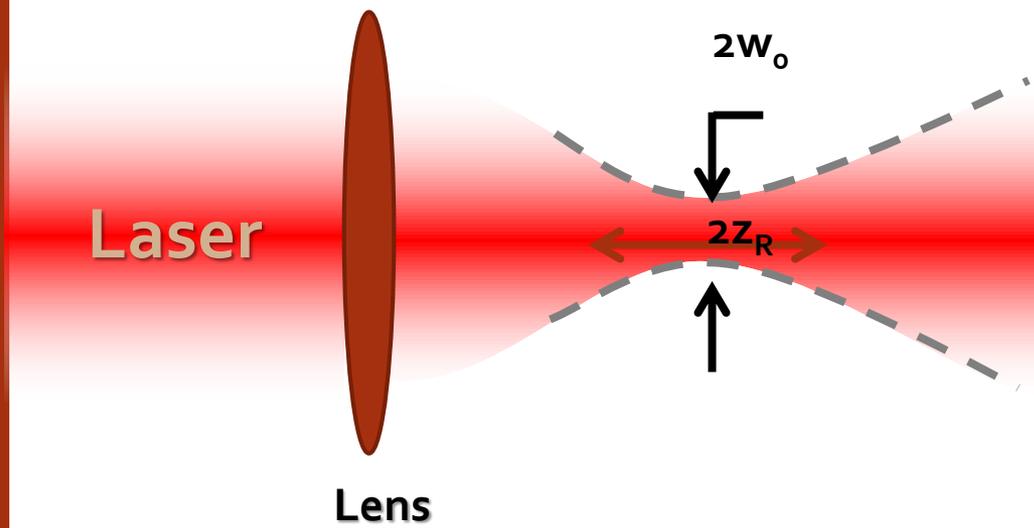
$$F = F_{rp} + F_{gr}$$

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

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

Охлаждение

Локализация



Лазерное охлаждение и локализация атомов

Periodic Table of the Elements

$\lambda \approx 121 \text{ nm}$

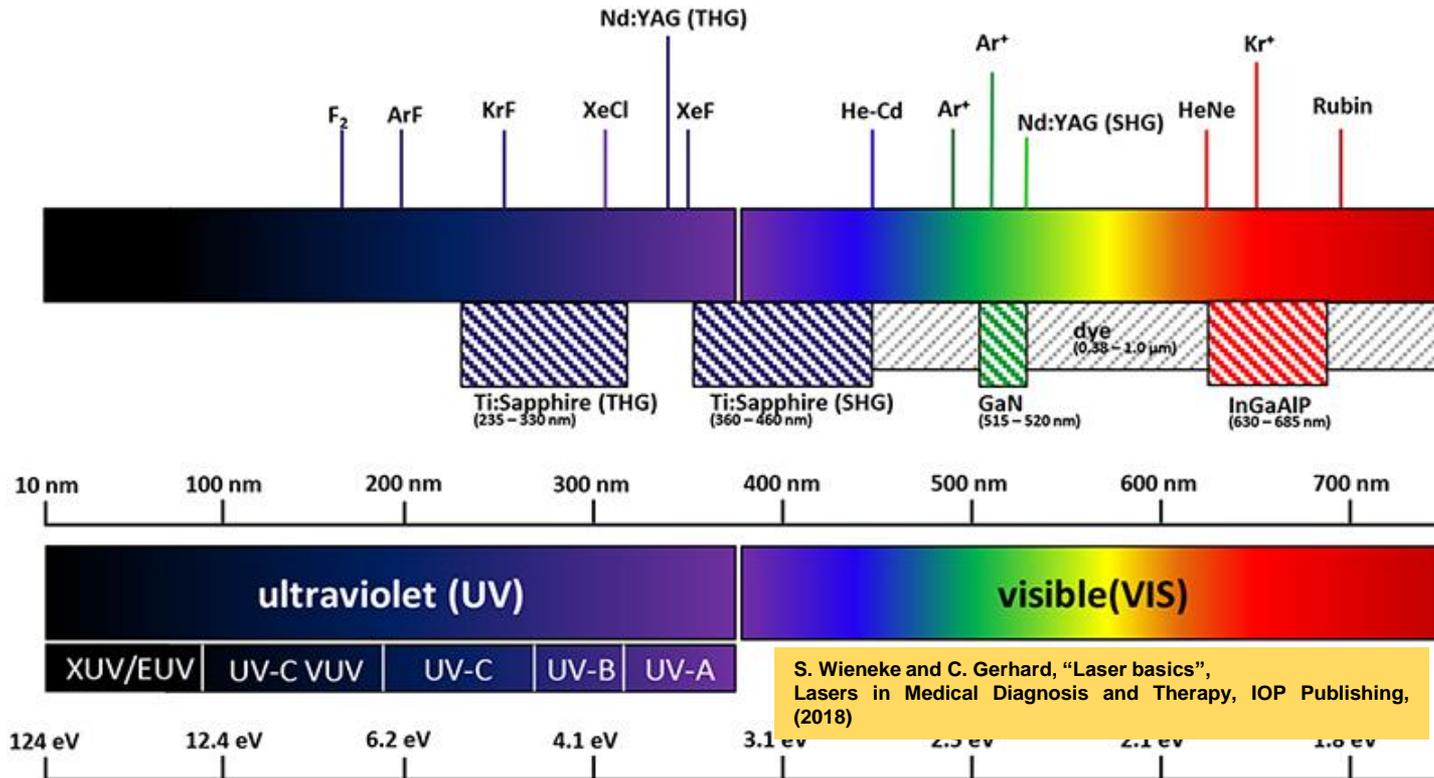
1 IA 1A H Hydrogen 1.008	2 IIA 2A He Helium 4.003																
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948										
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.972	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [278]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]
		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967	
		89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]	

- Laser-cooled atoms

Fundamental investigations:

1. Equivalence principle
2. Fundamental constants

Laser sources in UV

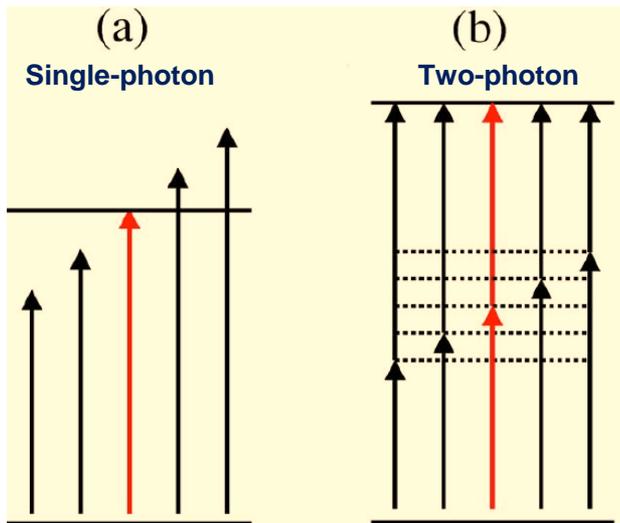


S. Wieneke and C. Gerhard, "Laser basics", Lasers in Medical Diagnosis and Therapy, IOP Publishing, (2018)

There are not appropriate for trapping sources of CW radiation in UV spectrum range

Efficiency of harmonic generation depends on the peak laser intensity

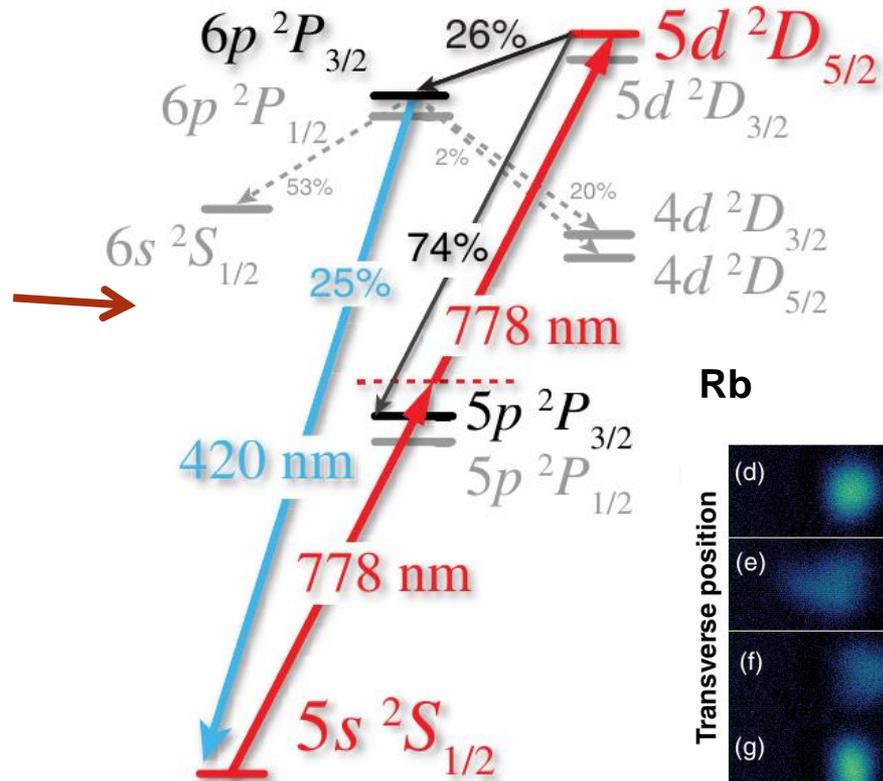
Cooling with UV radiation



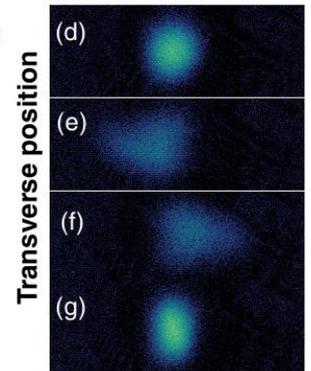
D. Kielpinski, Physical Review A 73, 063407 (2006)

$T=57 \mu\text{K}$

A. M. Jayich, X. Long, and W. C. Campbell, Phys.Rev. X, 6, 041004 (2016)



Rb



Position along ML beam

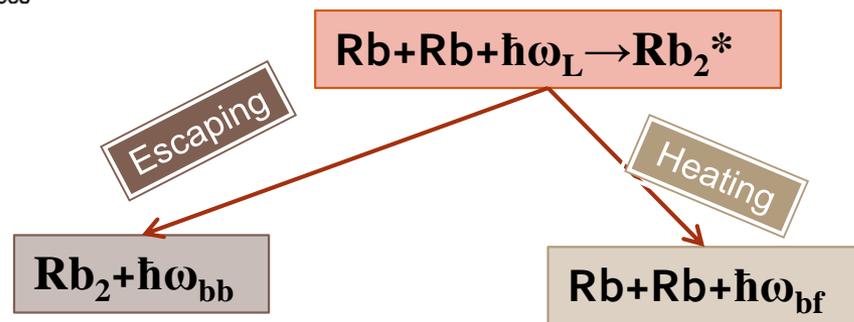
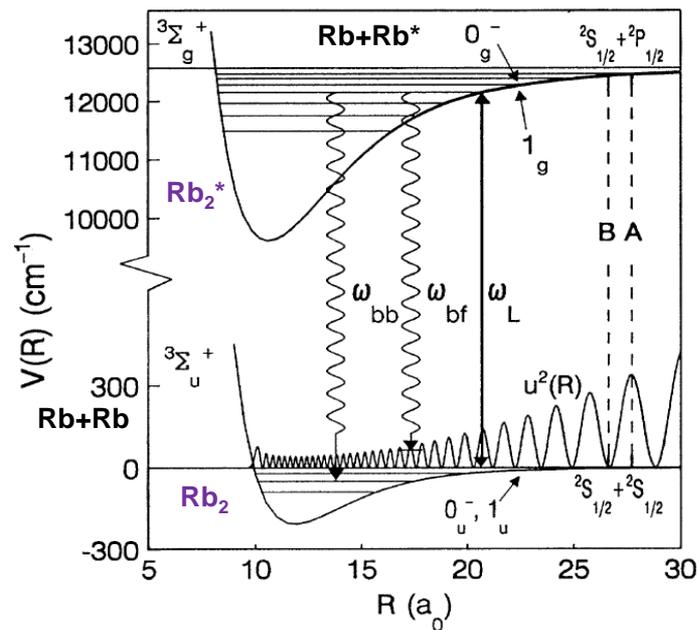
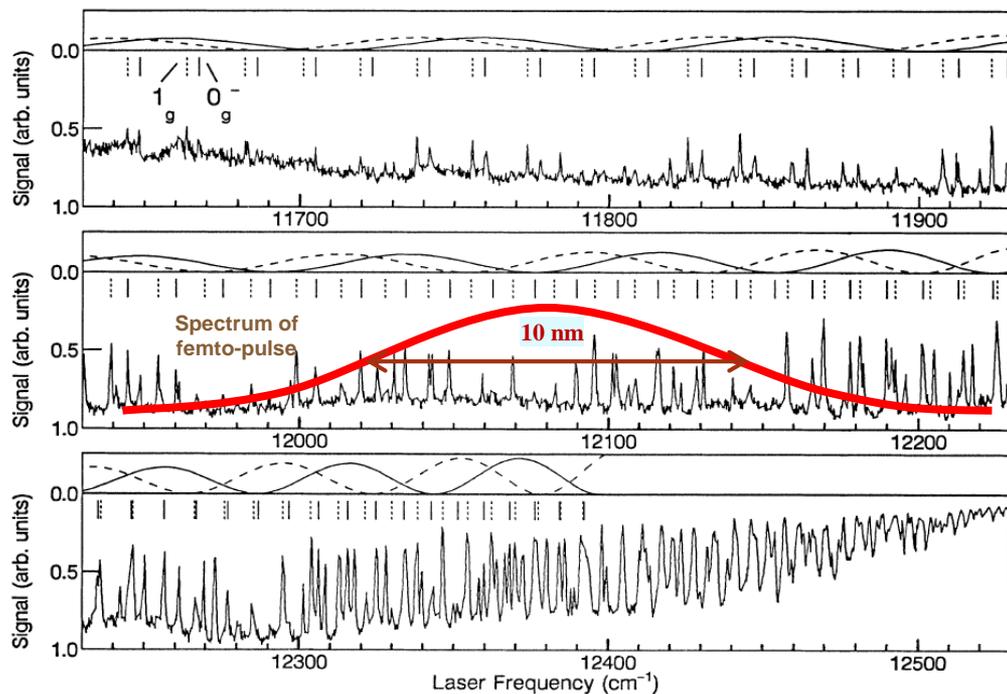
Время жизни атомов в ловушке

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

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

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

Photoassociation of Rb



Theory of momentum diffusion

PHYSICAL REVIEW A

VOLUME 21, NUMBER 5

MAY 1980

Motion of atoms in a radiation trap

J. P. Gordon and A. Ashkin

p. 1606

Does not saturate

$$2D_p = \hbar^2 \alpha^2 \Gamma \frac{p}{2(1+p)^3} \left[1 + \left(\frac{\Gamma^2}{|\gamma|^2} - 1 \right) p + 3p^2 + \frac{4|\gamma|^2}{\Gamma^2} p^3 \right] + \hbar^2 \beta^2 \Gamma \frac{p}{2(1+p)^3} \left[1 + \left(3 - \frac{\Gamma^2}{|\gamma|^2} \right) p + p^2 \right] + 2\hbar^2 (\vec{\alpha} \cdot \vec{\beta}) \Omega \frac{p^2}{(1+p)^3} \left[\frac{\Gamma^2}{|\gamma|^2} + p \right] + (\hbar k)^2 \Gamma \frac{p}{2(1+p)}. \quad (30)$$

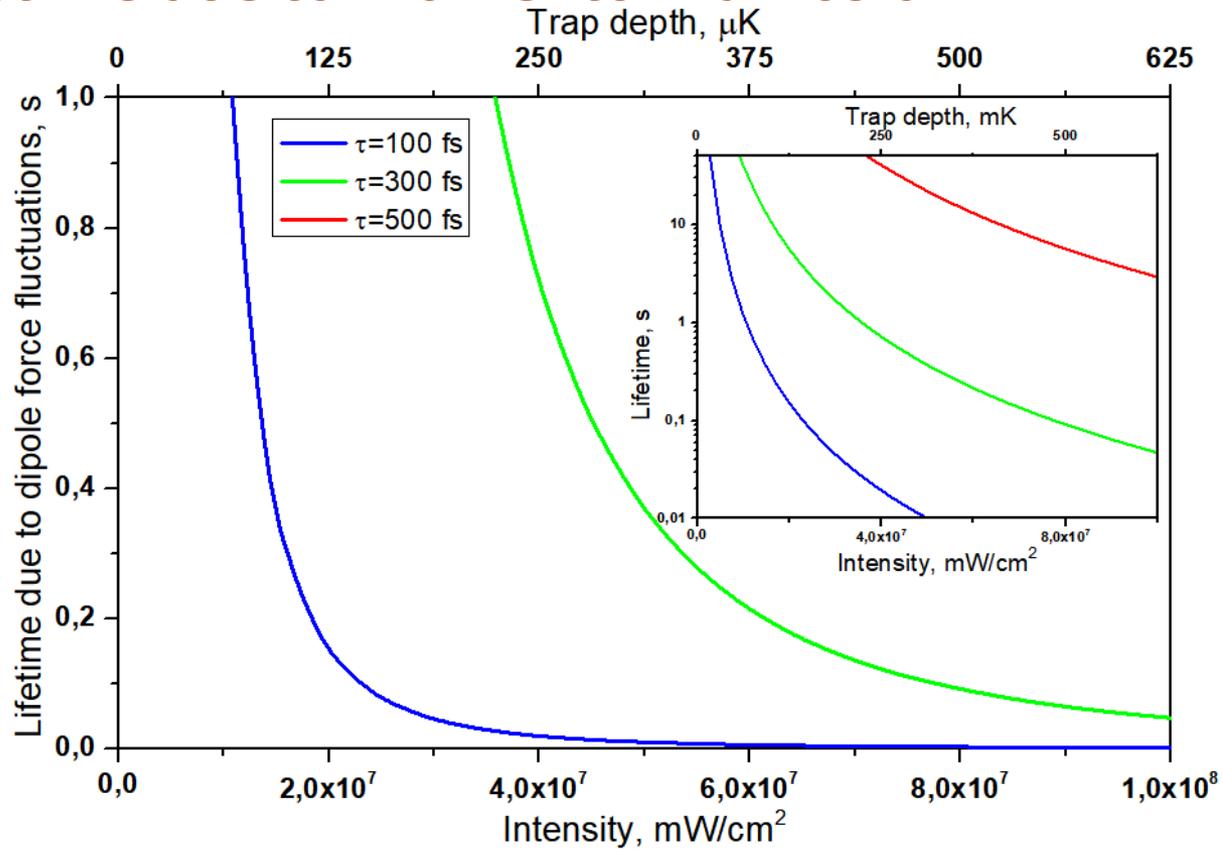
~~For small excitation of the atom ($p \ll 1$)~~

$$~~2D_p \approx \frac{1}{2} \hbar^2 \Gamma p (k^2 + \alpha^2 + \beta^2)~~$$

$$~~\Gamma_{sc}(\mathbf{r}) = \frac{3\pi c^2}{2\hbar\omega_0^3} \left(\frac{\Gamma}{\Delta} \right)^2 I(\mathbf{r})~~$$

Does not work in
case of femto-
pulses ($p \sim 1$)

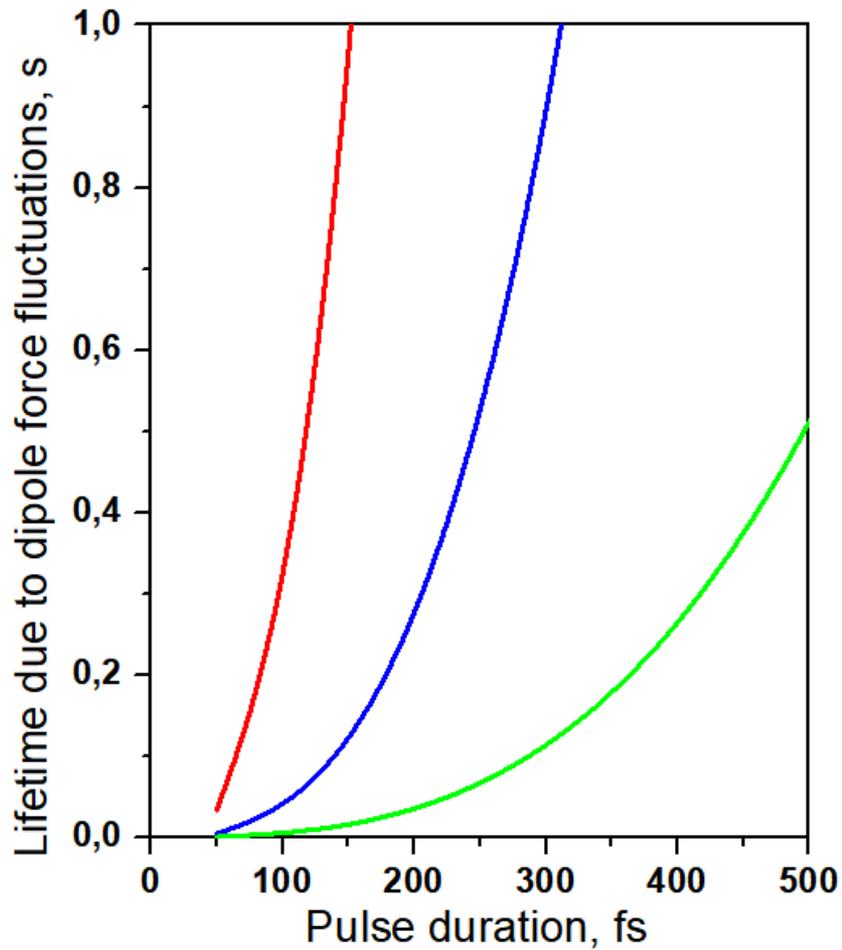
Lifetime due to momentum diffusion



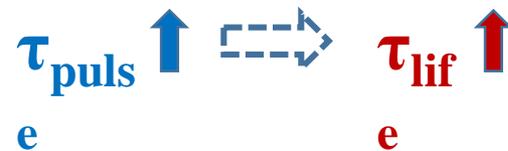
$$\tau_{lif} \uparrow \quad \leftarrow \text{---} \quad P \downarrow \quad \text{---} \rightarrow \quad U_0 \downarrow$$

e

Lifetime due to momentum diffusion



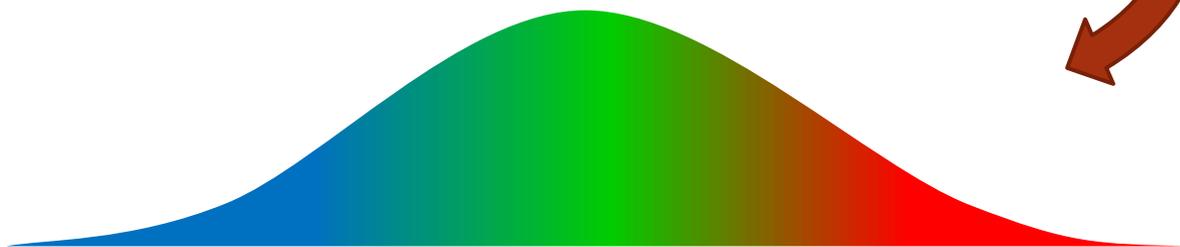
- P=200 mW
I=1,0x10⁸ mW/cm²
U=600 μK
- P=100 mW
I=5,0x10⁷ mW/cm²
U=310 μK
- P=50 mW
I=2,5x10⁷ mW/cm²
U=150 μK



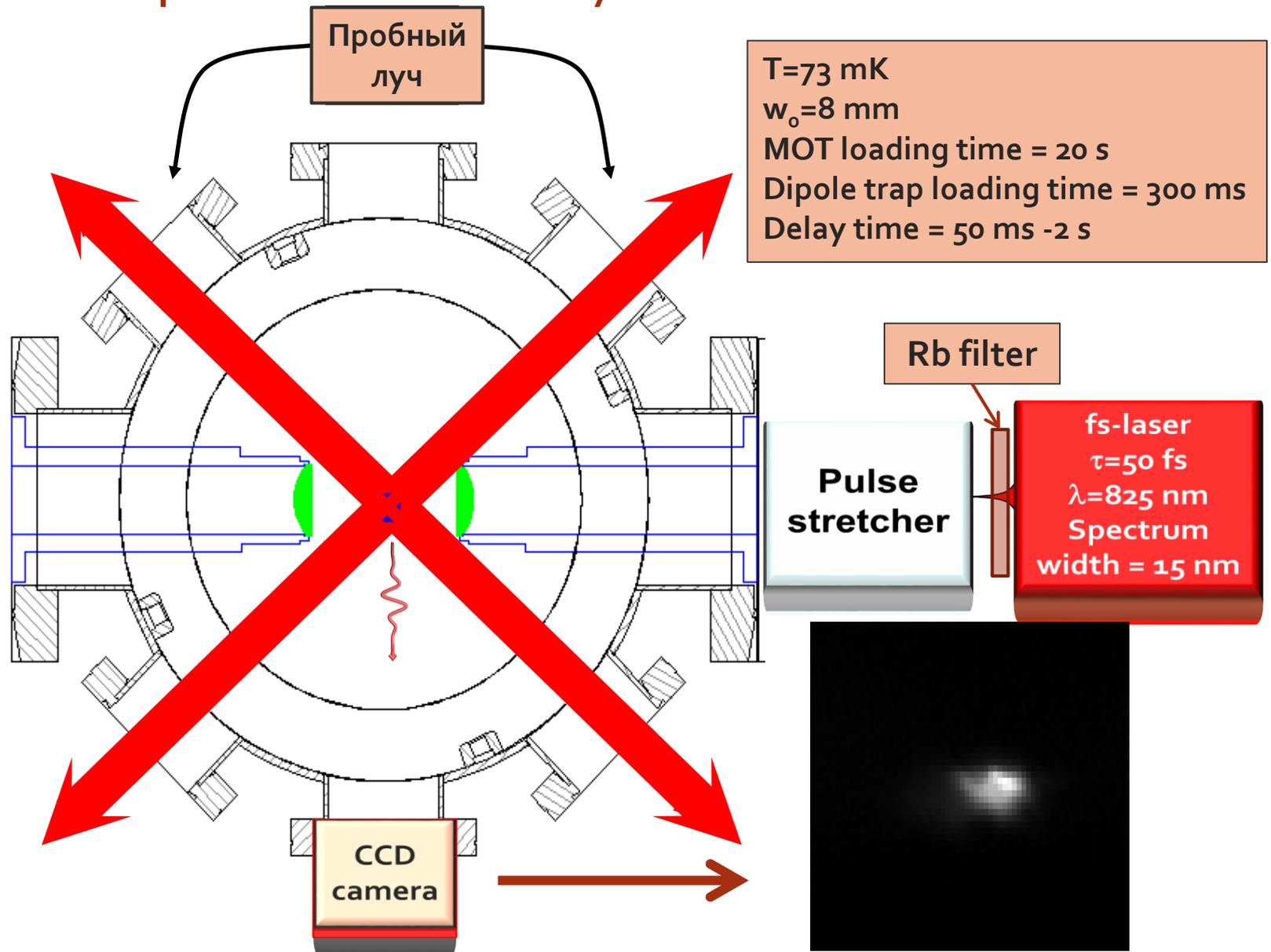
Теория импульсной диффузии

Чтобы различить импульсную диффузию от фотоассоциации:

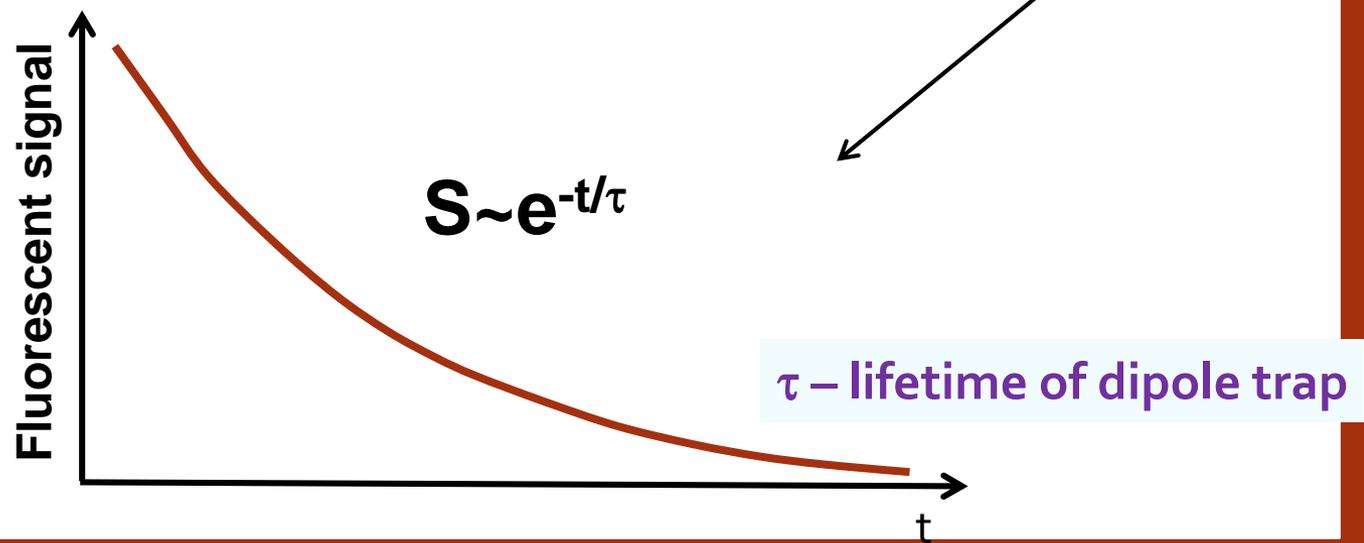
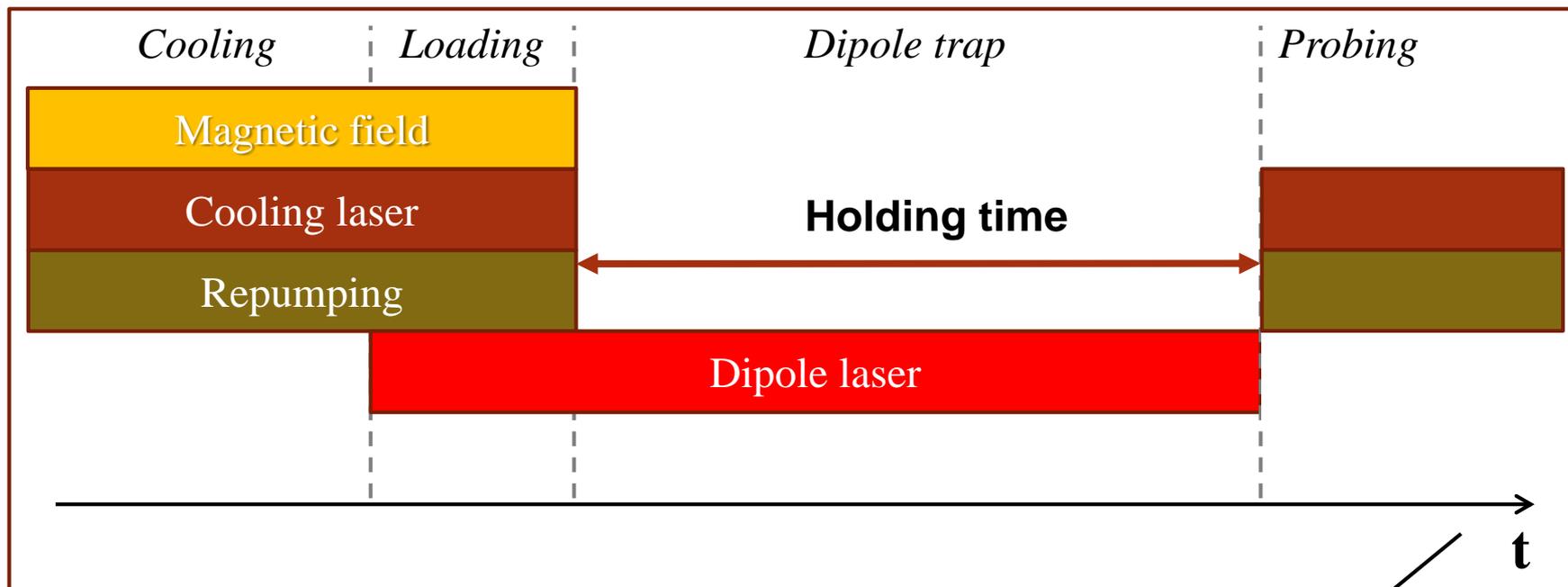
- Фиксируем спектральную ширину
- Фиксируем среднюю интенсивность
- **Изменяем длительность импульса**
- **Изменяем пиковую интенсивность**



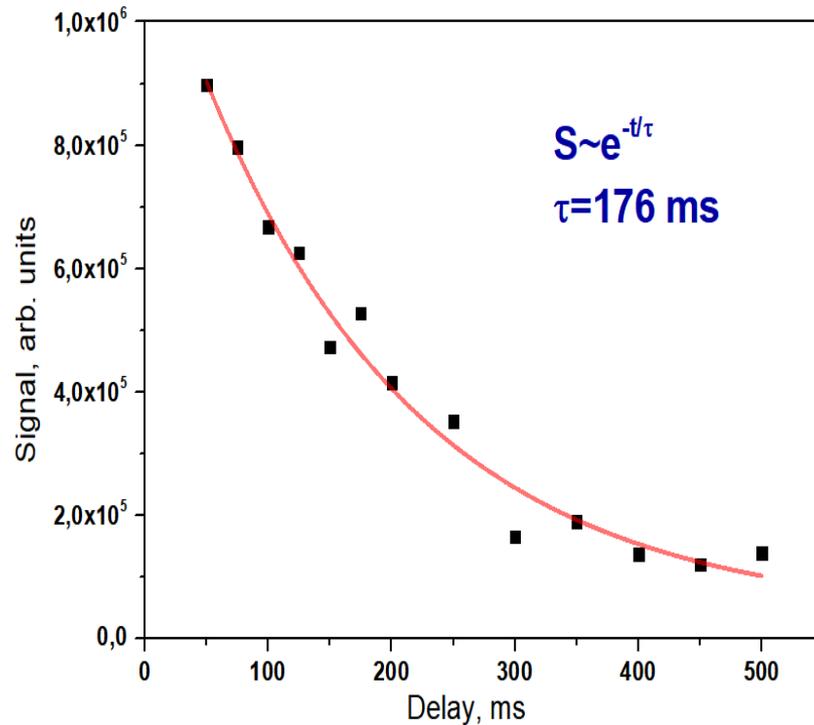
Экспериментальная установка



Измерения

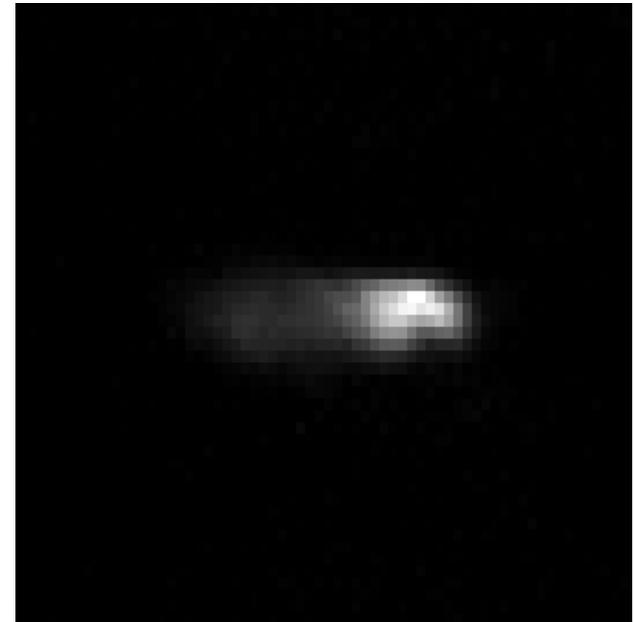


Импульсная ловушка с минимальной длительностью импульсов

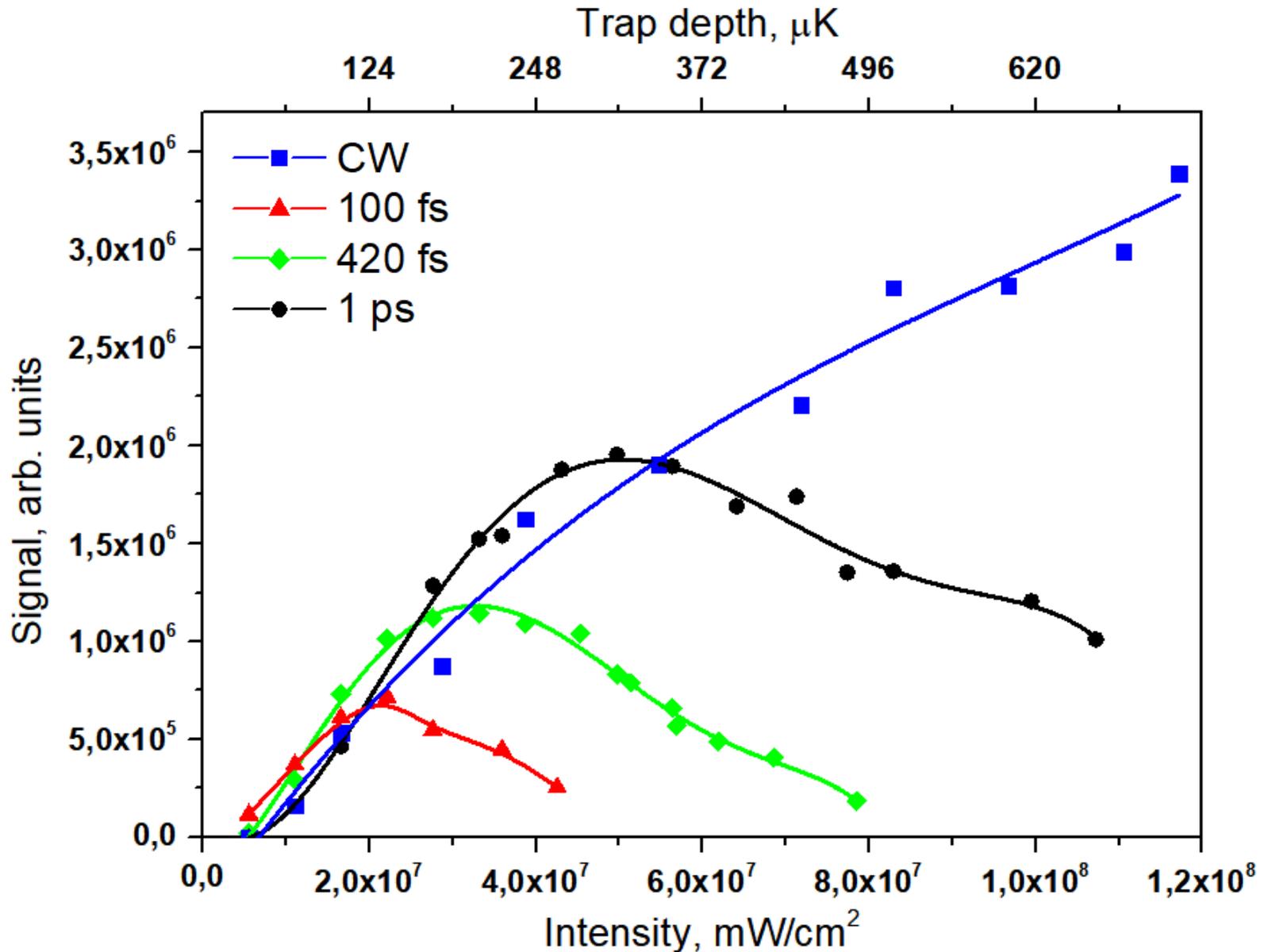


Длительность импульсов **70 фс!**

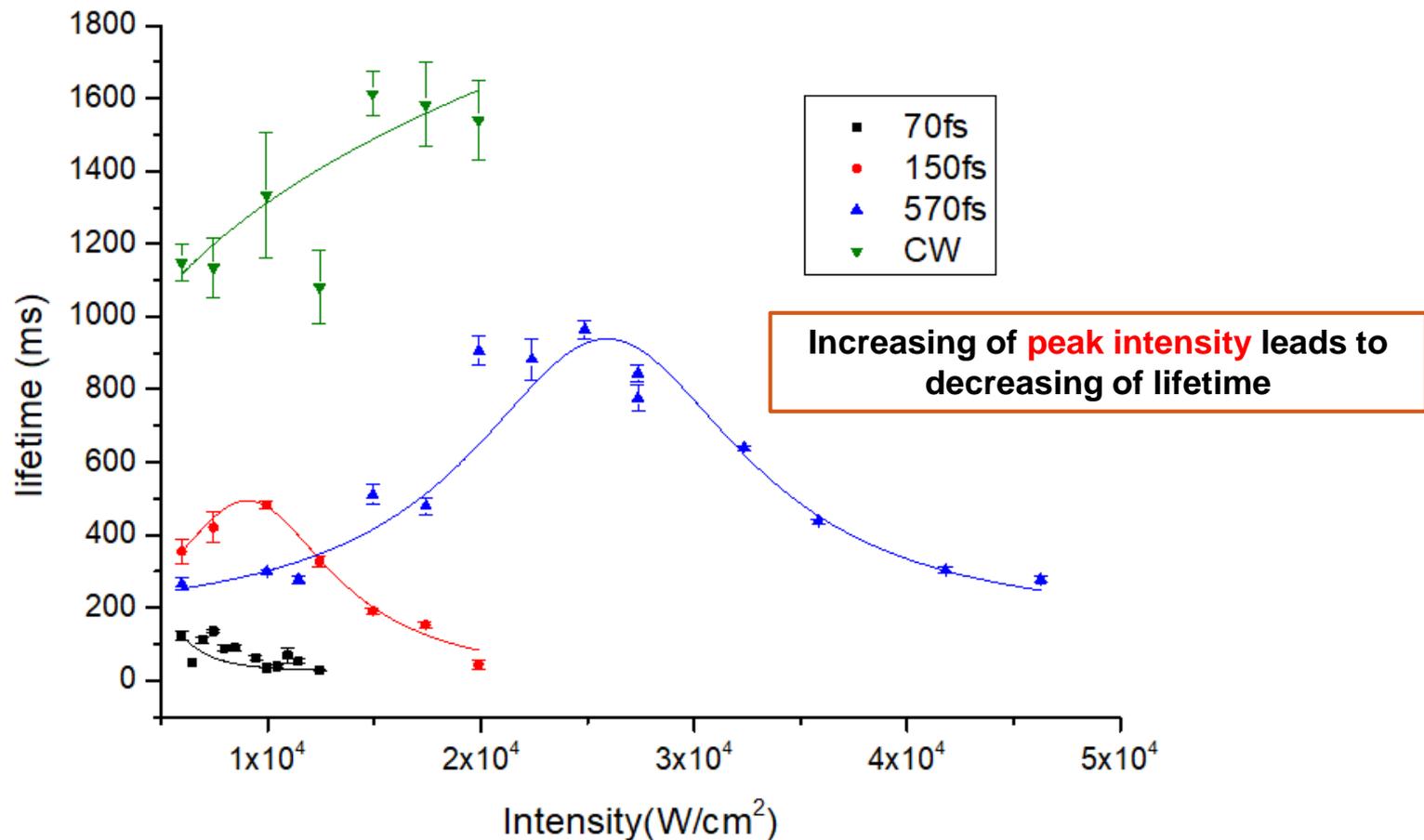
$P=33 \text{ mW}$
 $I=1,7 \times 10^7 \text{ mW/cm}^2$
 $U=100 \text{ }\mu\text{K}$



Эффективность локализации vs интенсивность

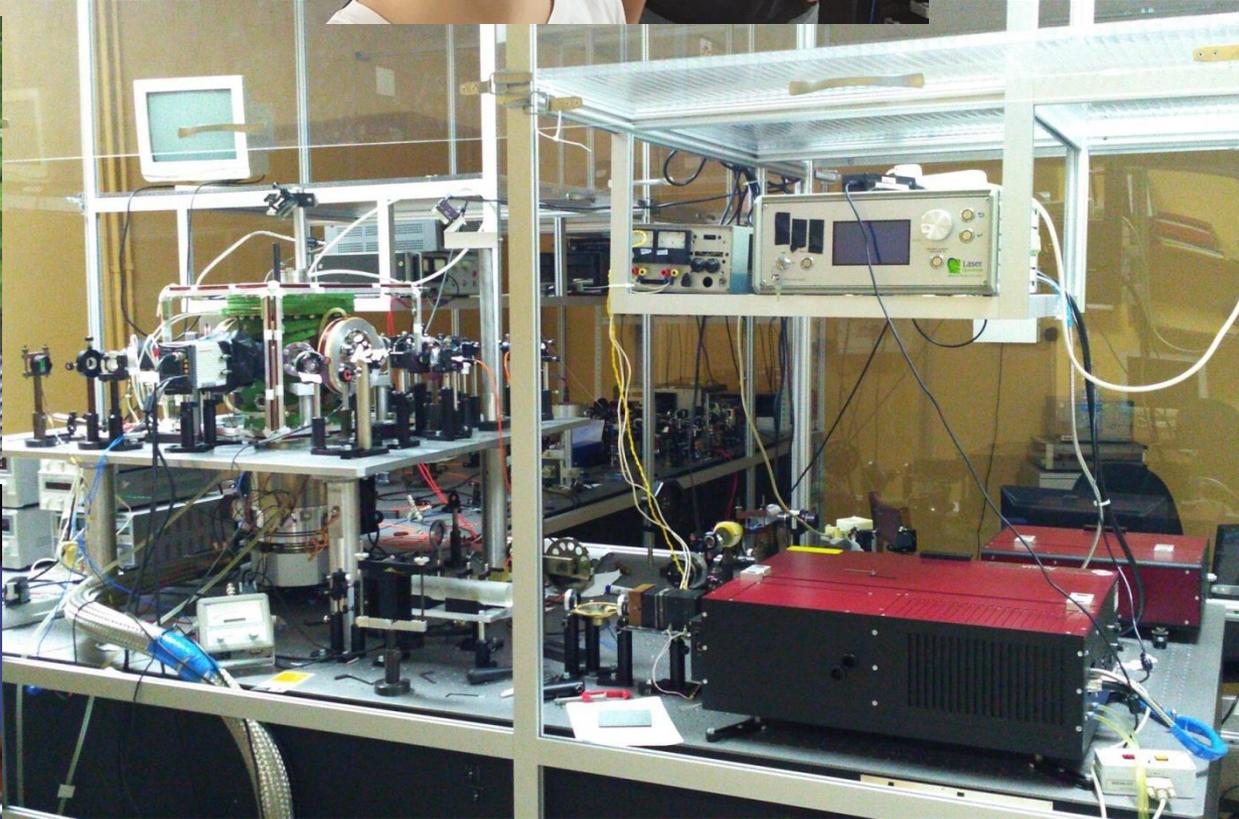


Время жизни атомов в ловушке VS средняя интенсивность



Заключение

- ✓ Произведена локализация атомов полем лазерных фемтоимпульсов.
- ✓ Изучены основные механизмы потерь атомов из импульсной дипольной ловушки.
- ✓ Изучена зависимость времени жизни атомов от средней интенсивности локализующего поля в импульсных дипольных ловушках различной длительности импульса.



Спасибо за внимание!

