

Столкновительные свойства атомов

ТУЛИЯ

**Лучников И.^{1,4}, Кожокару И.^{1,2}, Давлетов Э.^{1,4}, Цыганок В.^{1,4},
Бушмакин В.^{1,4}, Сукачев Д.^{1,3,5}, Акимов А.^{1,2,3}, и другие.**

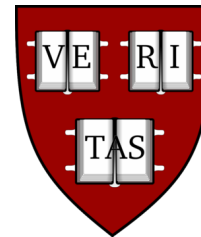
Russian Quantum Center, Russia¹

Texas A&M University, USA²

Lebedev Physical Institute RAS, Russia³

МИПТ⁴

Harvard University⁵



Мотивация: изучение поведения сильно коррелированных материалов

Понимание поведения сильно коррелированных систем очень полезно:

- **Высокотемпературные сверхпроводники**
 - Появляется у некоторых материалов при температурах выше 138 К
 - Много интересных приложений
 - Нет теоретической модели
- **Магнитные материалы**



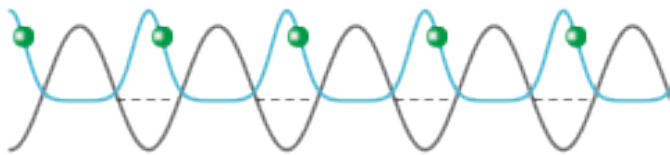
Richard Feynman

Подход: использовать контролируемые квантовые системы для моделирования реальных систем

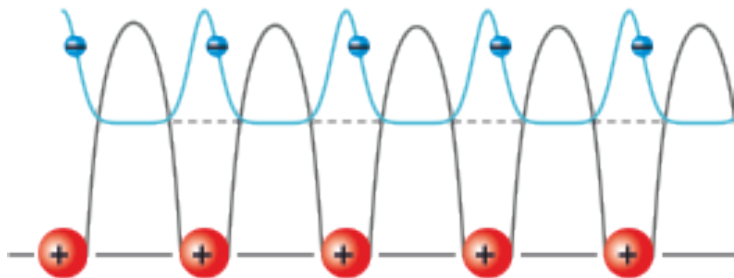
- **Другие применения:**
 - Ядерное взаимодействие
 - Взаимодействие фононов
 - Турбулентность

Ключевая идея: использование ансамбля холодных атомов

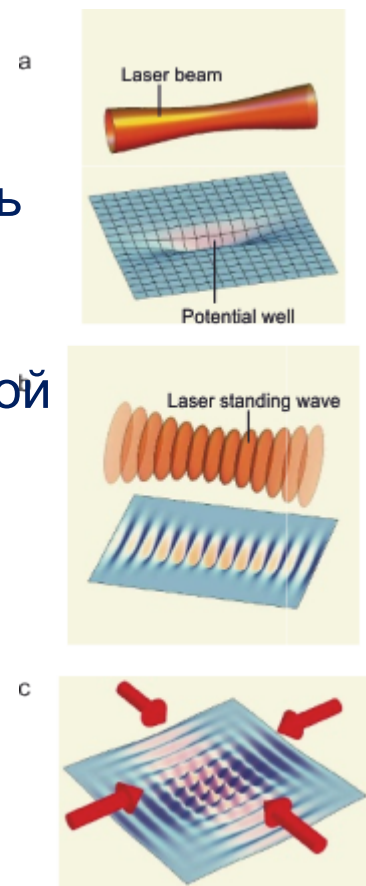
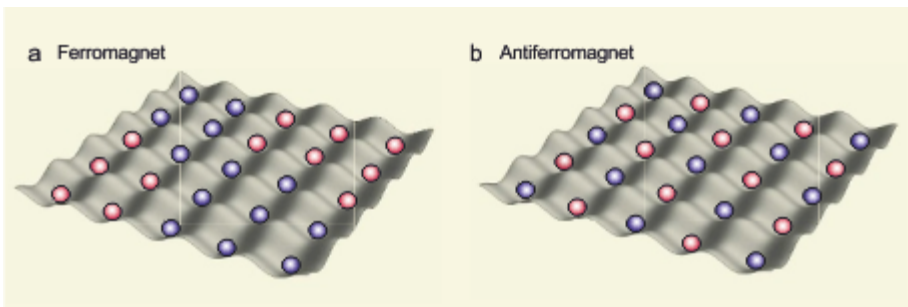
Оптическая решетка



Кристаллическая решетка

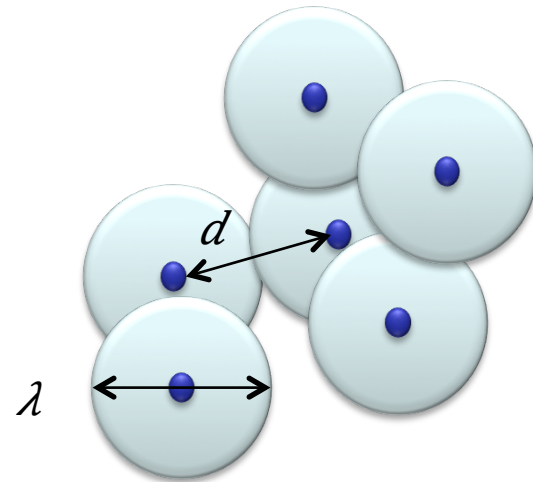


Атомы в оптических решетках очень похожи на электроны в кристаллической решетке



Почему обязательно получать БЭК?

- БЭК хорошая отправная точка для симуляции:
 - Ярко выраженные квантовые свойства
 - Известно начальное состояние всех частиц
- Но
 - Обязательна высокая фазовая плотность
 - Необходимо много атомов для испарительного охлаждения



Only hot
ones go
away...

Atomic Properties of the Elements

Frequently used fundamental physical constants
For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ^{133}Cs

speed of light in vacuum	c	299 792 458	m s^{-1}	(exact)
Planck constant	h	6.6261×10^{-34}	J s	($h = h/2\pi$)
elementary charge	e	1.6022×10^{-19}	C	
electron mass	m_e	9.1094×10^{-31}	kg	
proton mass	m_p	1.6726×10^{-27}	kg	
fine-structure constant	α	1/137.036		
Rydberg constant	R_∞	$10\,973\,732$	m^{-1}	
	$R_\infty c$	$3.289\,842 \times 10^{15}$	Hz	
	$R_\infty hc$	13.6057	eV	
Boltzmann constant	k	1.3807×10^{-23}	J K^{-1}	

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Physics Laboratory physics.nist.gov		Standard Reference Data Group www.nist.gov/srd				
13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA	
5 B Boron 10.811 $1s^2 2s^2 2p^1$ 8.2960	6 C Carbon 12.0107 $1s^2 2s^2 2p^2$ 11.2603	7 N Nitrogen 14.0067 $1s^2 2s^2 2p^3$ 14.5341	8 O Oxygen 15.9994 $1s^2 2s^2 2p^4$ 13.8181	9 F Fluorine 18.9984032 $1s^2 2s^2 2p^5$ 17.4228	10 Ne Neon 20.1797 $1s^2 2s^2 2p^6$ 21.5645	
13 Al Aluminum 26.981538 $[\text{Ne}]3s^2 3p^1$ 5.9858	14 Si Silicon 28.0855 $[\text{Ne}]3s^2 3p^2$ 8.1517	15 P Phosphorus 30.973761 $[\text{Ne}]3s^2 3p^3$ 10.4867	16 S Sulfur 32.065 $[\text{Ne}]3s^2 3p^4$ 10.3600	17 Cl Chlorine 35.453 $[\text{Ne}]3s^2 3p^5$ 12.9870	18 Ar Argon 39.948 $[\text{Ne}]3s^2 3p^6$ 15.7596	
31 Ga Gallium 69.723 $[\text{Ar}]3d^{10} 4s^1 4p^1$ 5.9993	32 Ge Germanium 72.64 $[\text{Ar}]3d^{10} 4s^2 4p^2$ 7.8994	33 As Arsenic 74.92160 $[\text{Ar}]3d^{10} 4s^2 4p^3$ 9.7886	34 Se Selenium 78.96 $[\text{Ar}]3d^{10} 4s^2 4p^4$ 7.7524	35 Br Bromine 79.904 $[\text{Ar}]3d^{10} 4s^2 4p^5$ 11.8138	36 Kr Krypton 83.798 $[\text{Ar}]3d^{10} 4s^2 4p^6$ 13.9996	
49 In Indium 114.818 $[\text{Kr}]4d^{10} 5s^2 5p^2$ 5.7864	50 Sn Tin 118.710 $[\text{Kr}]4d^{10} 5s^2 5p^2$ 7.3439	51 Sb Antimony 121.760 $[\text{Kr}]4d^{10} 5s^2 5p^3$ 8.6084	52 Te Tellurium 127.60 $[\text{Kr}]4d^{10} 5s^2 5p^4$ 9.0096	53 I Iodine 126.90447 $[\text{Kr}]4d^{10} 5s^2 5p^5$ 10.4513	54 Xe Xenon 131.293 $[\text{Kr}]4d^{10} 5s^2 5p^6$ 12.1298	
81 Tl Thallium 204.3833 $[\text{Hg}]6p$ 6.1082	82 Pb Lead 207.2 $[\text{Hg}]6p^2$ 7.4167	83 Bi Bismuth 208.98038 $[\text{Hg}]6p^3$ 7.2855	84 Po Polonium (209) $[\text{Hg}]6p^4$ 8.414	85 At Astatine (210) $[\text{Hg}]6p^5$	86 Rn Radon (222) $[\text{Hg}]6p^6$ 10.7485	
111 Uuu Ununium (272)	112 Uub Unubium (285)	114 Uuq Ununquadium (289)	116 Uuh Ununhexium (292)			

Period

$4f^n 6s^2$

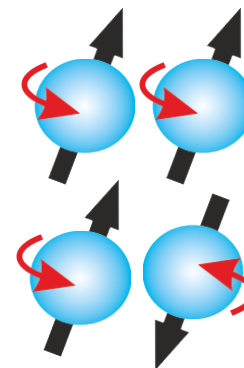
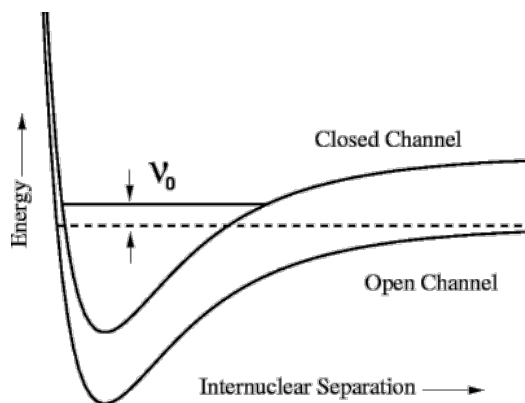
57 La Lanthanum 138.9055 $[\text{Xe}]5d^1 6s^2$ 5.5769	58 Ce Cerium 140.116 $[\text{Xe}]4f^1 5d^1 6s^2$ 5.5387	59 Pr Praseodymium 140.90765 $[\text{Xe}]4f^3 6s^2$ 5.473	60 Nd Neodymium 144.24 $[\text{Xe}]4f^4 6s^2$ 5.5250	61 Pm Promethium (145) $[\text{Xe}]4f^5 6s^2$ 5.582	62 Sm Samarium 150.36 $[\text{Xe}]4f^6 6s^2$ 5.6437	63 Eu Europium 151.964 $[\text{Xe}]4f^7 6s^2$ 5.6704	64 Gd Gadolinium 157.25 $[\text{Xe}]4f^7 5d^1 6s^2$ 6.1498	65 Tb Terbium 158.92534 $[\text{Xe}]4f^9 6s^2$ 5.8638	66 Dy Dysprosium 162.500 $[\text{Xe}]4f^10 6s^2$ 5.9389	67 Ho Holmium 164.93032 $[\text{Xe}]4f^11 6s^2$ 6.0215	68 Er Erbium 167.259 $[\text{Xe}]4f^12 6s^2$ 6.1077	69 Tm Thulium 168.93421 $[\text{Xe}]4f^13 6s^2$ 6.1843	70 Yb Ytterbium 173.04 $[\text{Xe}]4f^14 6s^2$ 6.2542	71 Lu Lutetium 174.967 $[\text{Xe}]4f^14 5d^1 6s^2$ 5.4259
89 Ac Actinium (227) $[\text{Rn}]6d^1 7s^2$ 5.17	90 Th Thorium 232.0381 $[\text{Rn}]6d^2 7s^2$ 6.3067	91 Pa Protactinium 231.03688 $[\text{Rn}]5f^2 6d^1 7s^2$ 5.89	92 U Uranium 238.02891 $[\text{Rn}]5f^3 6d^1 7s^2$ 6.1941	93 Np Neptunium (237) $[\text{Rn}]5f^4 6d^1 7s^2$ 6.2657	94 Pu Plutonium (244) $[\text{Rn}]5f^6 7s^2$ 6.0260	95 Am Americium (243) $[\text{Rn}]5f^7 7s^2$ 5.9738	96 Cm Curium (247) $[\text{Rn}]5f^7 6d^1 7s^2$ 5.9914	97 Bk Berkelium (247) $[\text{Rn}]5f^9 7s^2$ 6.1979	98 Cf Californium (251) $[\text{Rn}]5f^10 7s^2$ 6.2817	99 Es Einsteinium (252) $[\text{Rn}]5f^11 7s^2$ 6.42	100 Fm Fermium (257) $[\text{Rn}]5f^12 7s^2$ 6.50	101 Md Mendelevium (258) $[\text{Rn}]5f^13 7s^2$ 6.58	102 No Nobelium (259) $[\text{Rn}]5f^14 7s^2$ 6.65	103 Lr Lawrencium (262) $[\text{Rn}]5f^14 7s^2 7p^1$ 4.97

¹Based upon ^{12}C . () indicates the mass number of the most stable isotope.

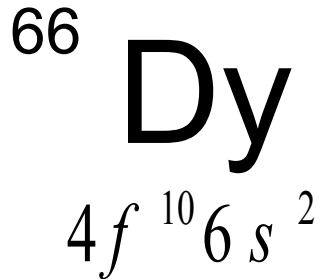
For a description of the data, visit physics.nist.gov/data

Ожидаемые свойства тулия

- Резонансы Фешбаха в умеренном магнитном поле
- Подходит для охлаждения до БЭК в дипольной решетке
- Сильное магнитное диполь-дипольное взаимодействие (\sim в 100 раз сильнее чем для щелочных металлов)
- Возможно управление ядерным и электронным спином
- Одинаковые g факторы для основного и возбужденного состояния

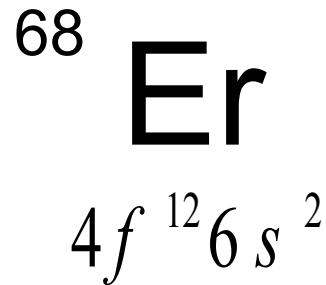


Охлажденные лантаноиды на сегодняшний день :



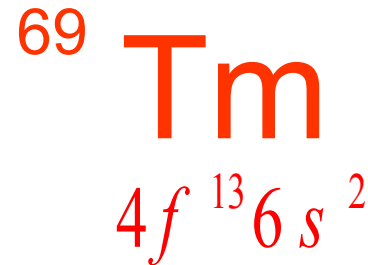
- Сложная структура уровней
- **10μ_B**
- 421 nm 1 стадия
- 721nm 2 стадия
- 1064 nm дипольная ловушка
- БЭК получен

B.Lev , Stanford University
PRL 107, 190401 (2011)



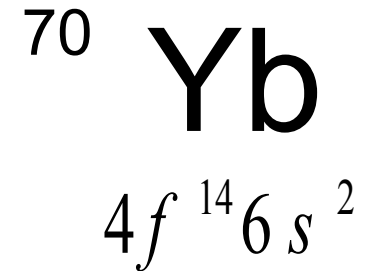
- Сложная структура уровней
- **7μ_B**
- 401 nm 1 стадия
- 583nm 2 стадия
- 1064/1075 nm дипольная ловушка
- БЭК получен

F. Ferlaino, Innsbruck University
PRL 108, 210401 (2012)



- Простая структура уровней
- **4μ_B**
- 410 nm 1 стадия
- 531 nm 2 стадия
- 532 nm дипольная ловушка
- ?БЭК

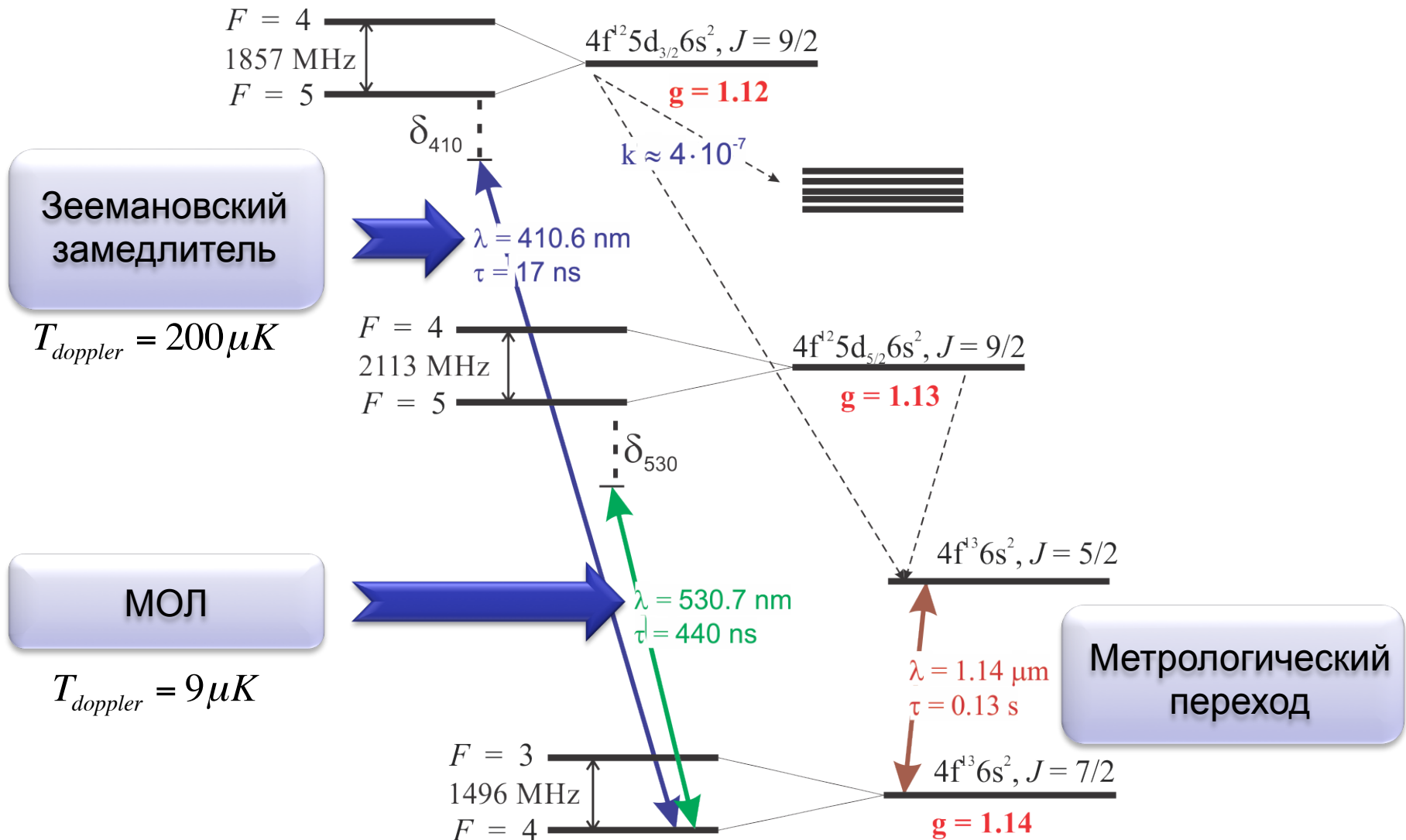
A. Akimov, RQC&LPI,
PRA 108, 210401 (2012)



- Очень простая структура уровней
- **0.5μ_B**
- 399 nm 1 стадия
- 556 nm 2 стадия
- 532 nm дипольная ловушка
- БЭК получен

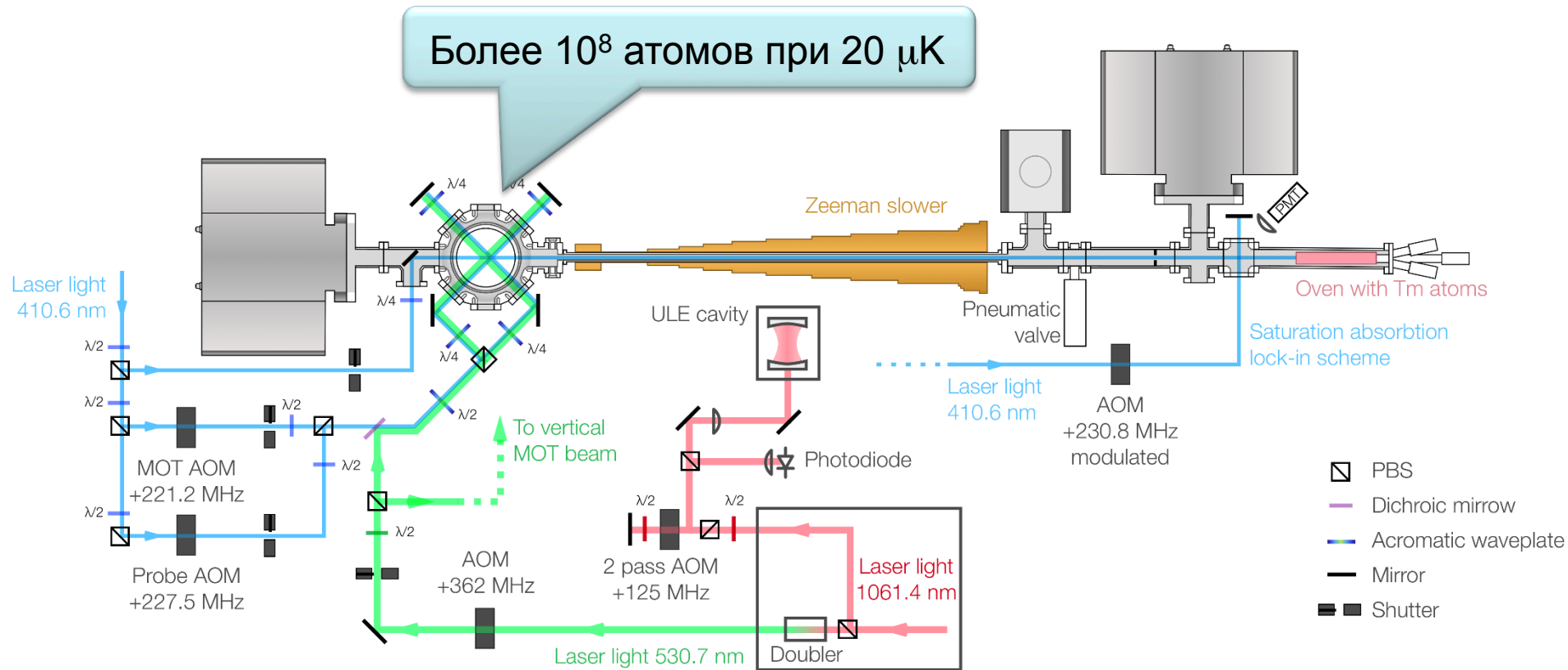
Y. Takahashi, Kyoto University
PRL **98**, 030401 (2007)

Структура уровней тулия



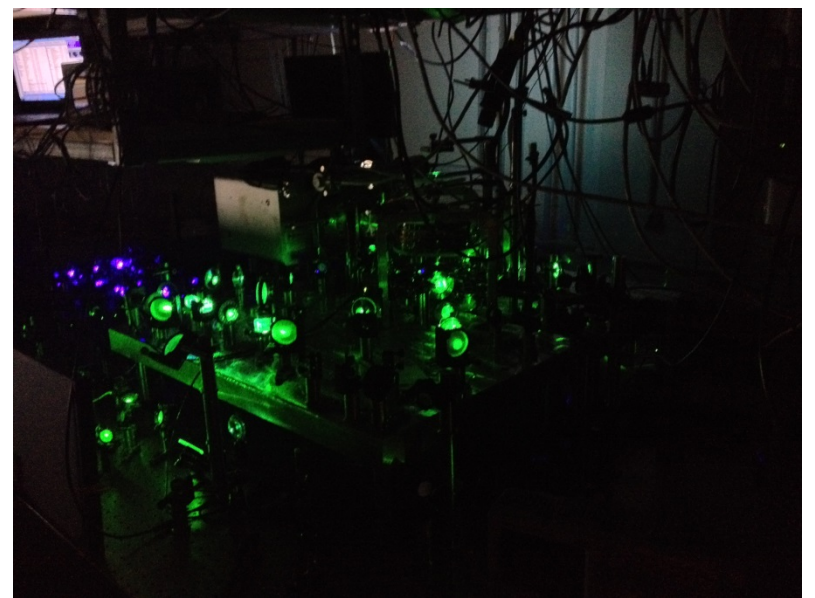
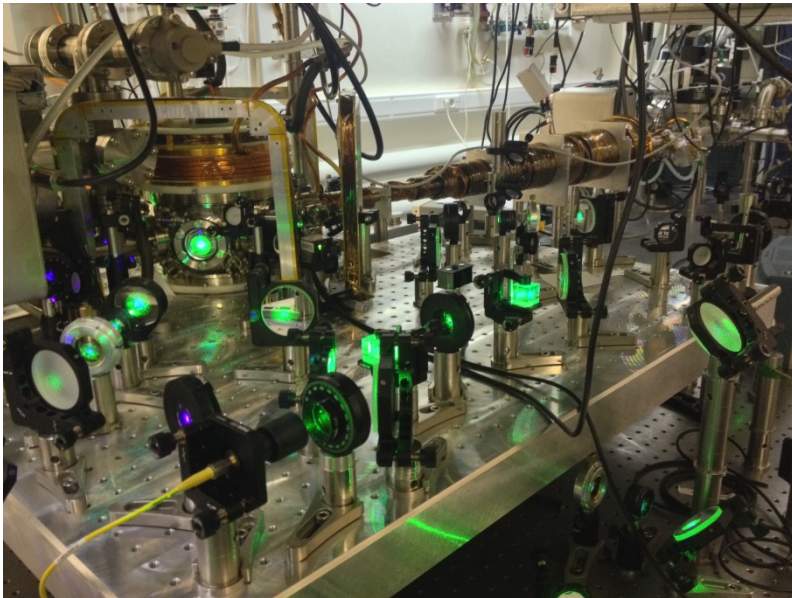
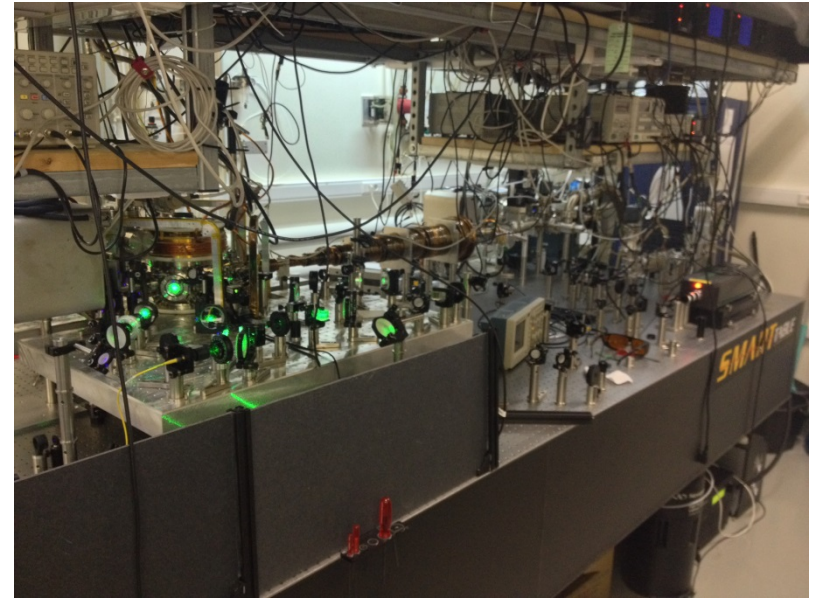
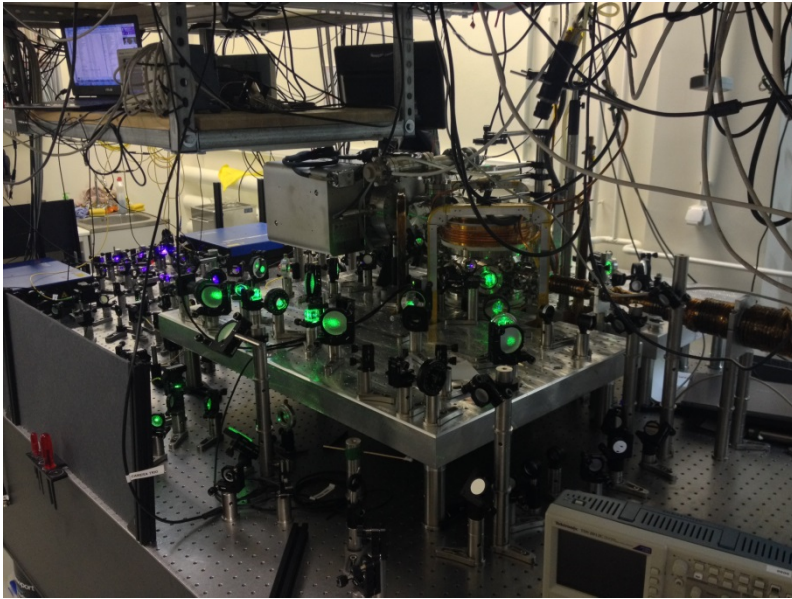
Экспериментальная установка

Более 10^8 атомов при $20 \mu\text{K}$

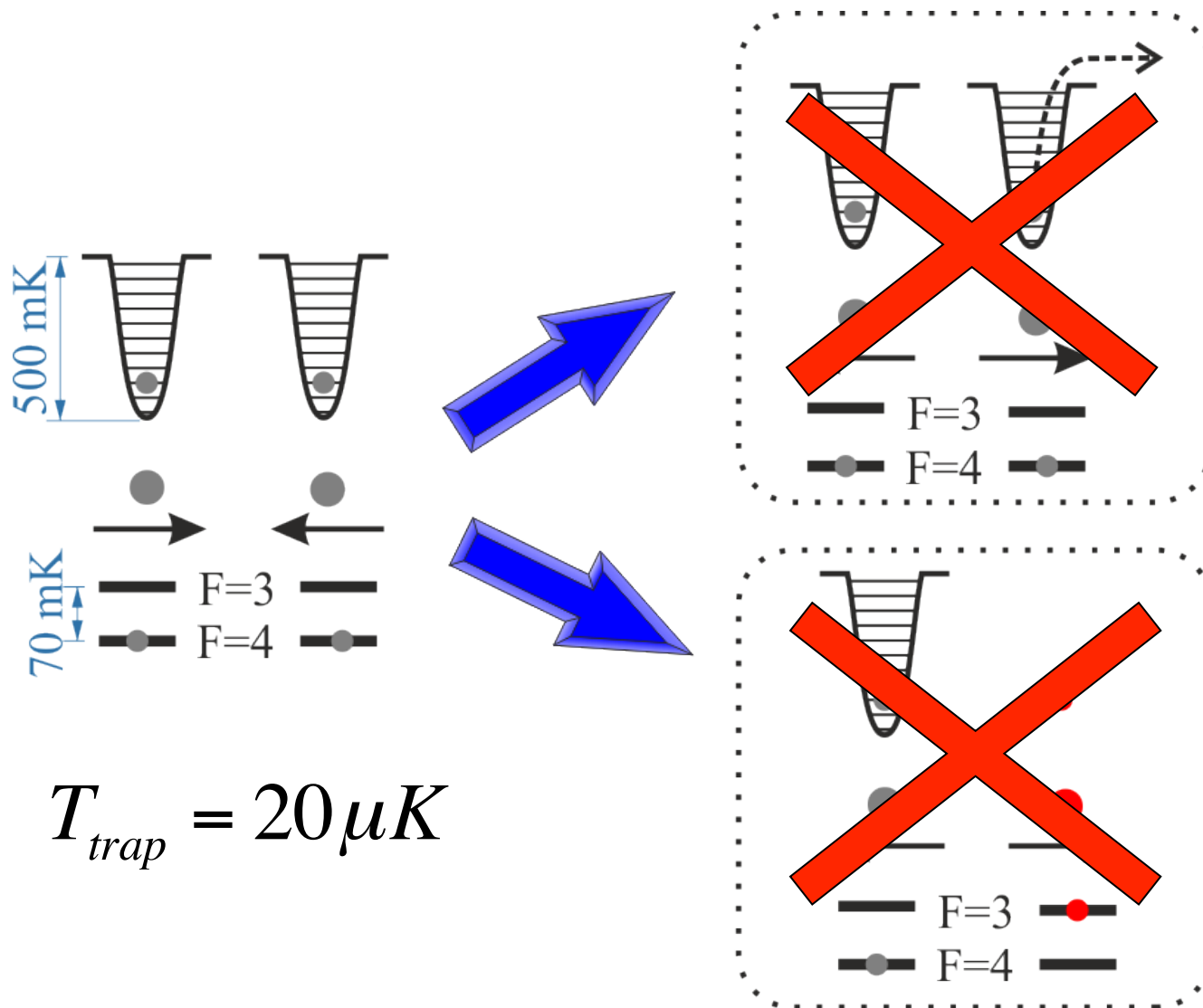


- Прямая загрузка в МОЛ на слабом переходе
- 2D синяя паточка для увеличения кол-во атомов
- Вакуум позволяет жить МОЛ в течение 10 секунд

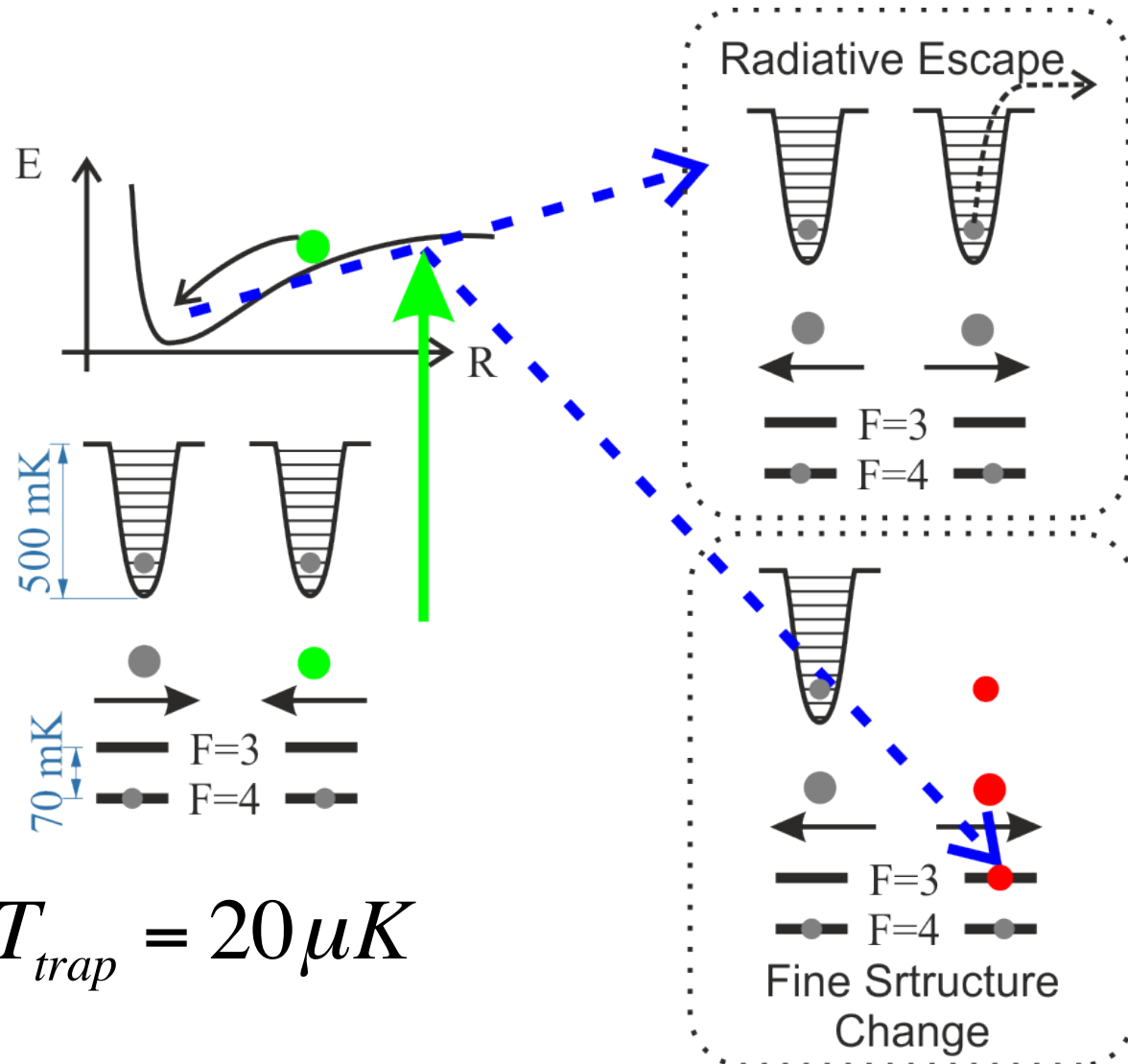
Установка



Столкновения без участия света



Не упругие столкновения: фотоиндуцированные



$$T_{trap} = 20 \mu K$$

Парные столкновения

Распад МОЛ

Количество атомов в МОЛ

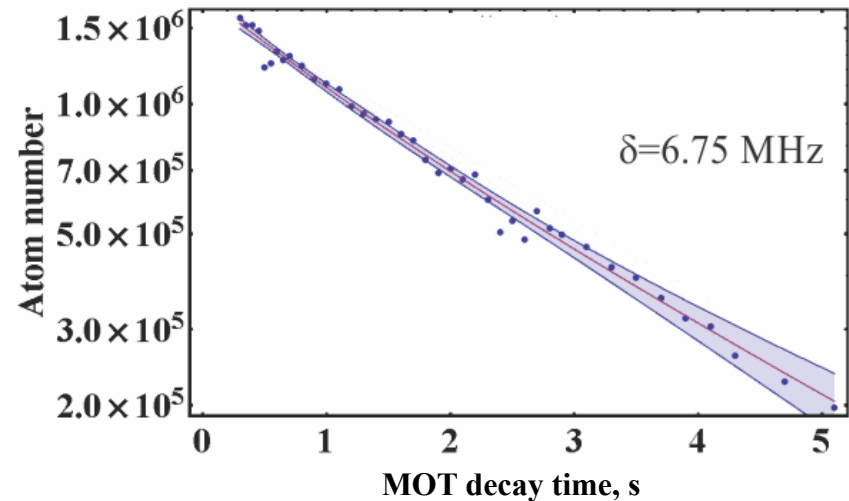
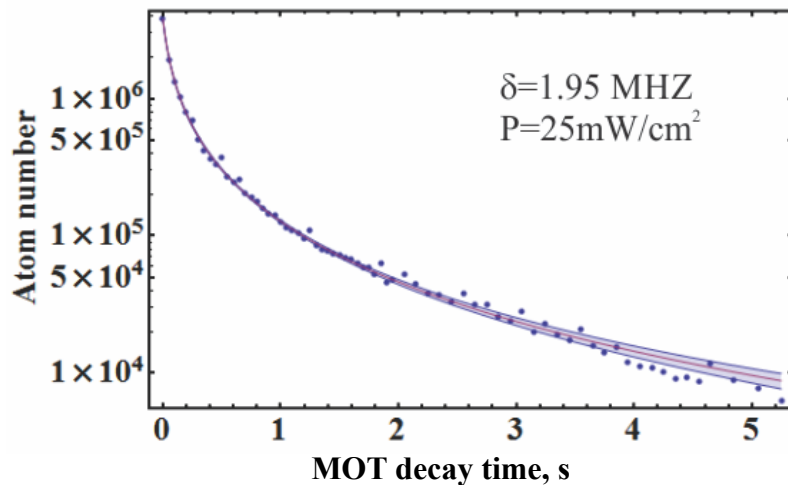
$$\frac{dN(t)}{dt} = -\gamma N(t) - \beta \frac{N^2(t)}{(2\pi)^{2/3} w^3(t)}$$

Линейный распад:

$$\gamma = \gamma_{\text{buffer}} + \gamma_{\text{green}}$$

Распад за счет парных столкновений:

$$\beta = \beta_{\text{light}}$$



Объем ловушки

- Объем уменьшается в процессе распада
- Возможный механизм – радиационное отталкивание
- Оптическая плотность ~ 1
- Объем ловушки падает вместе с количеством атомов

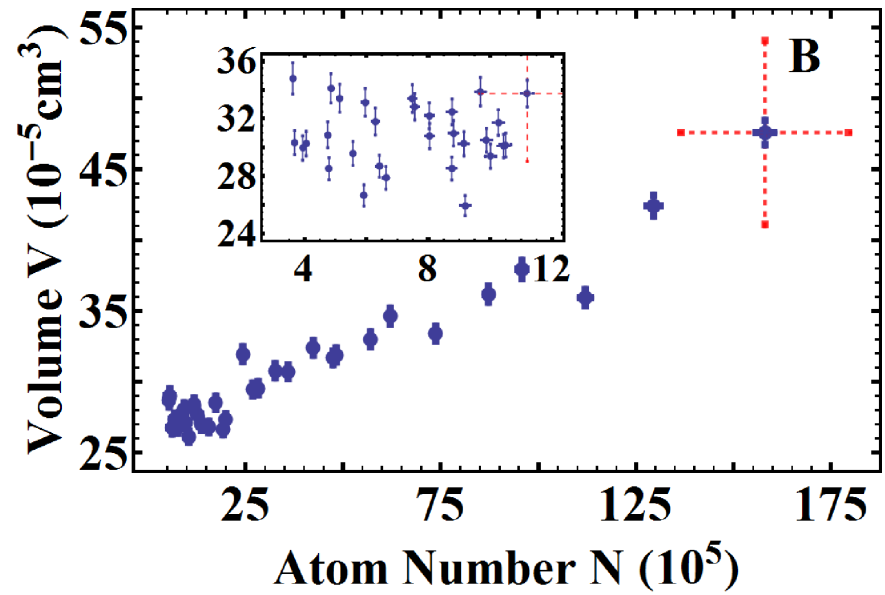
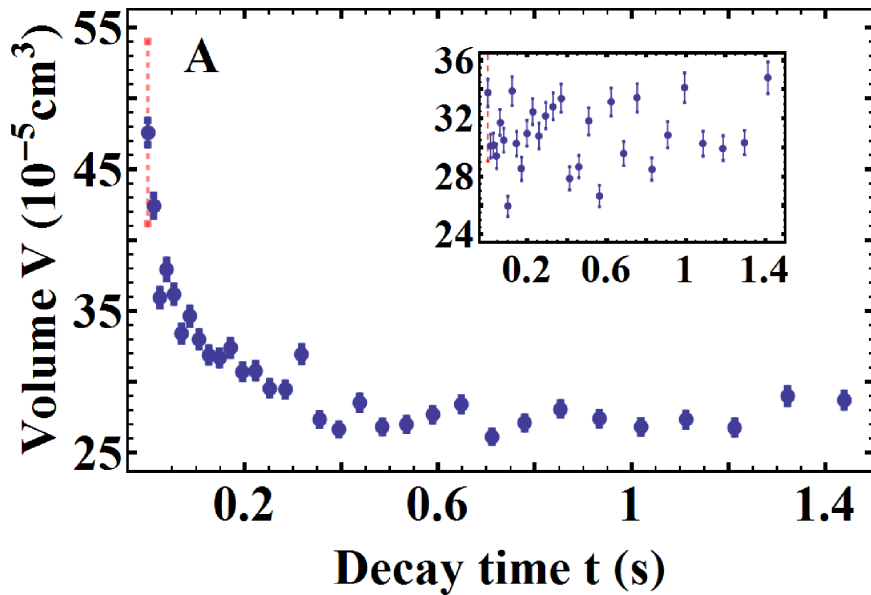
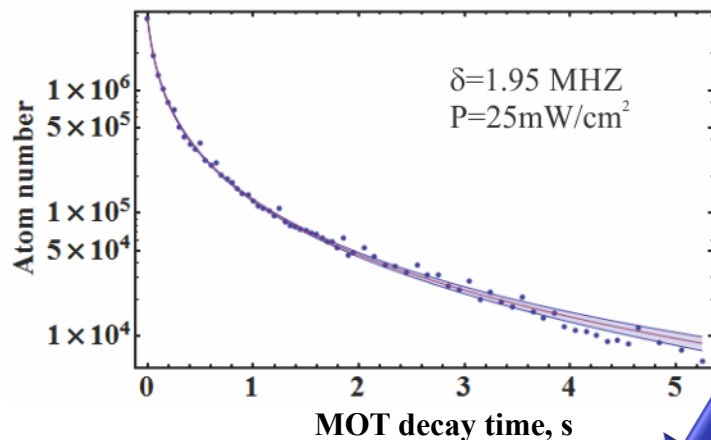


Фото индуцированные столкновения



$$N(t) = N_0 \frac{e^{-t\gamma}}{1 + N_0 \int_0^t \frac{\beta e^{-\theta\gamma}}{(2\pi)^{2/3} w^3(\theta)} d\theta}$$

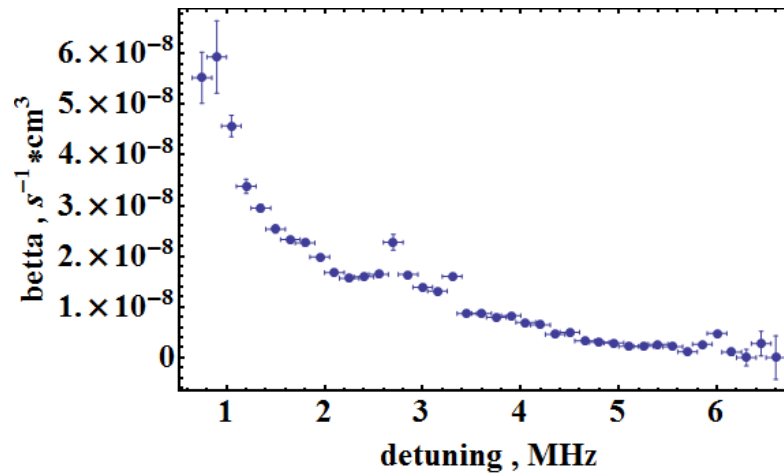
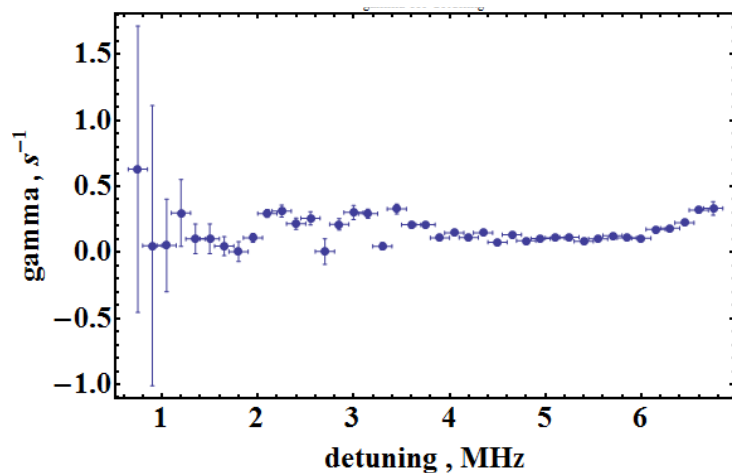
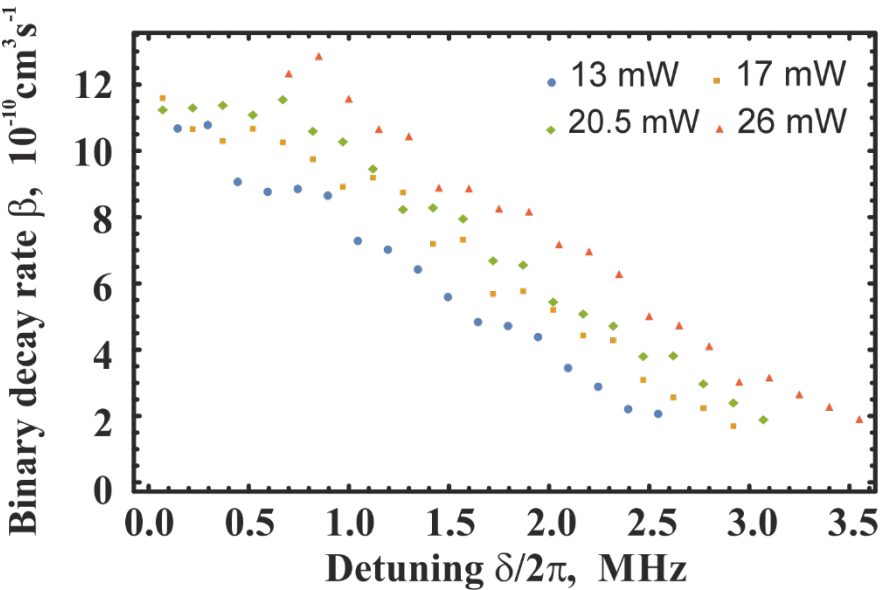
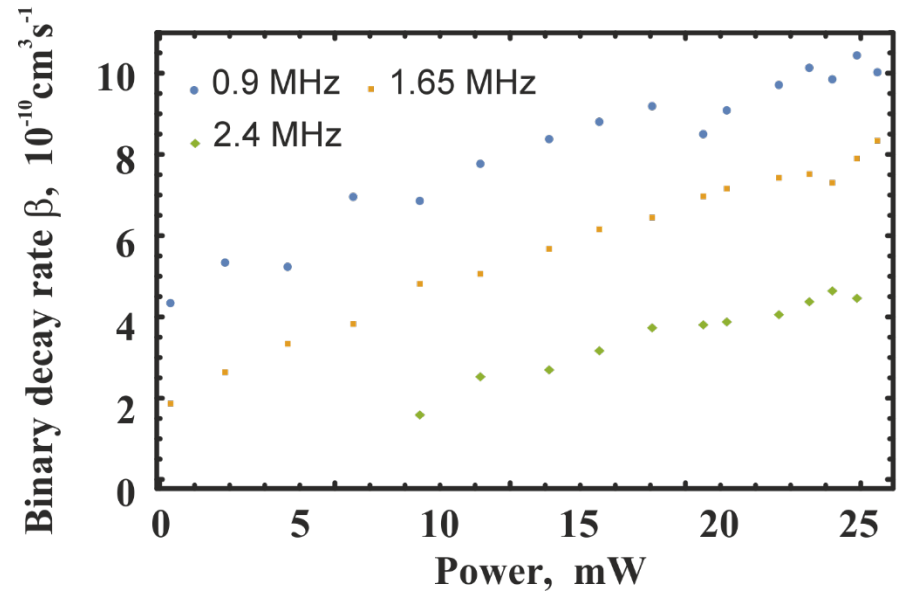


Фото индуцированные СТОЛКНОВЕНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ

Light assisted losses, detuning



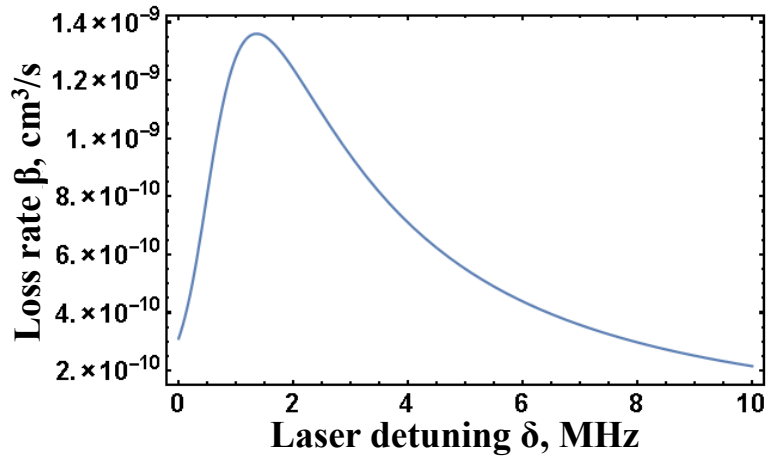
Light assisted losses, power



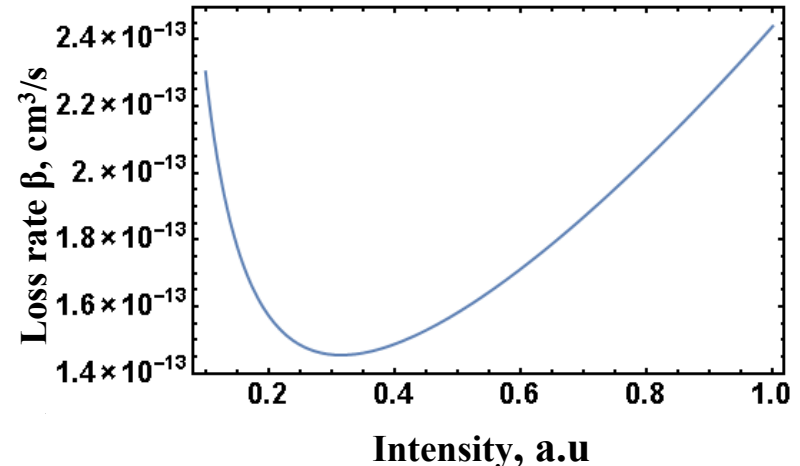
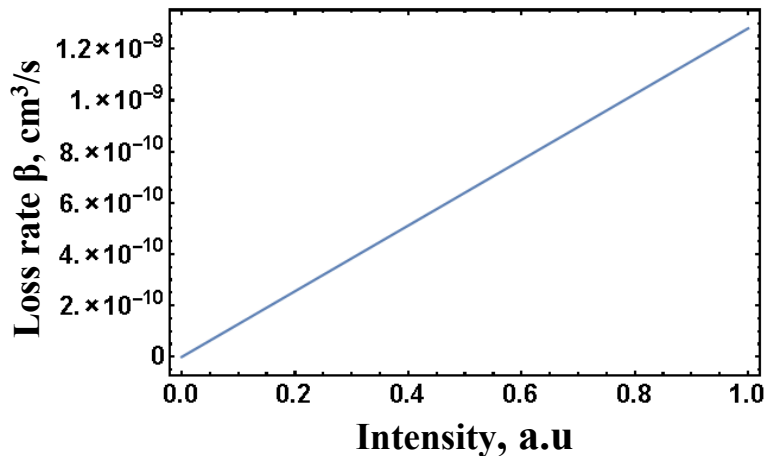
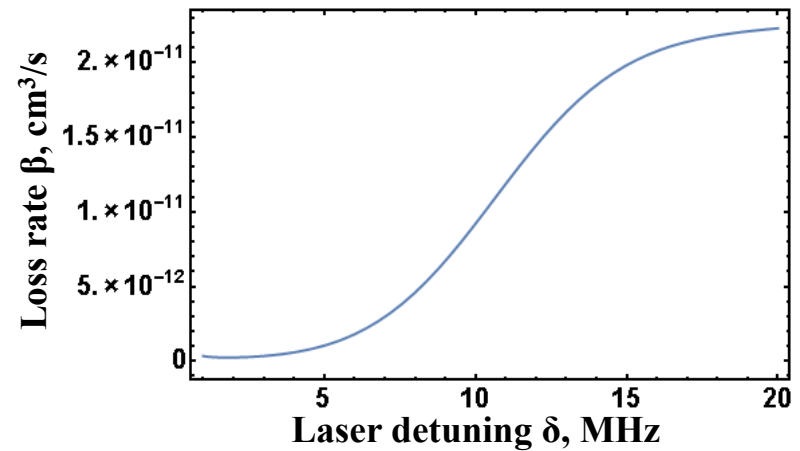
Аналитическая модель для каналов СТОЛКНОВЕНИЙ

- Fine structure changing collisions
- Radiative Escape

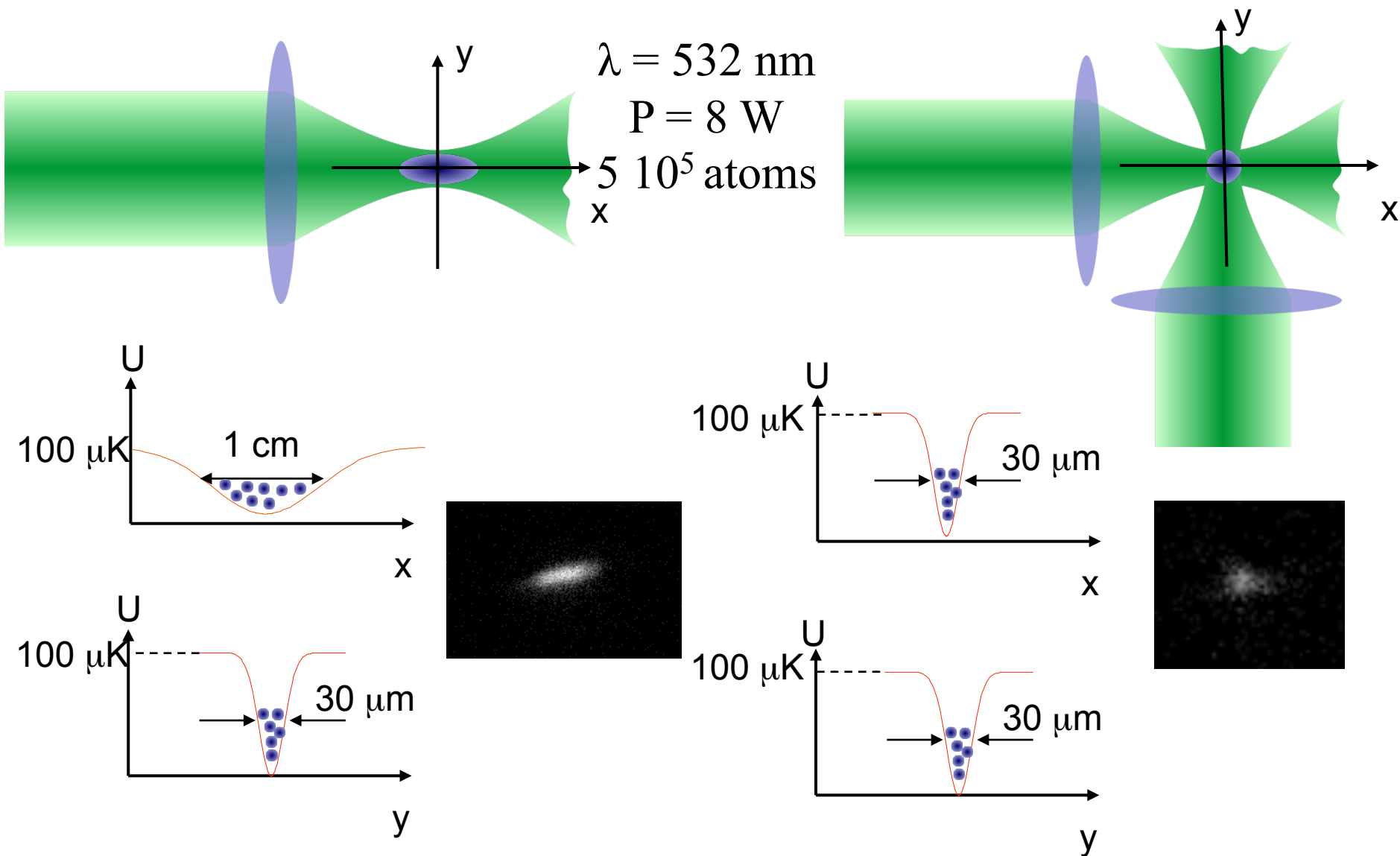
DE Pritchard, A Gallagher, PRL 63(9), 957–960, (1989)



G. D. Telles, et al PRL, 86(20), 4496–4499, (2001)



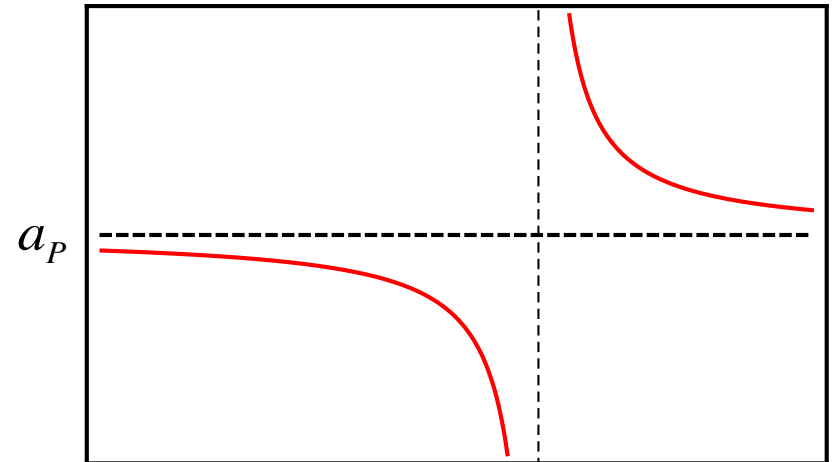
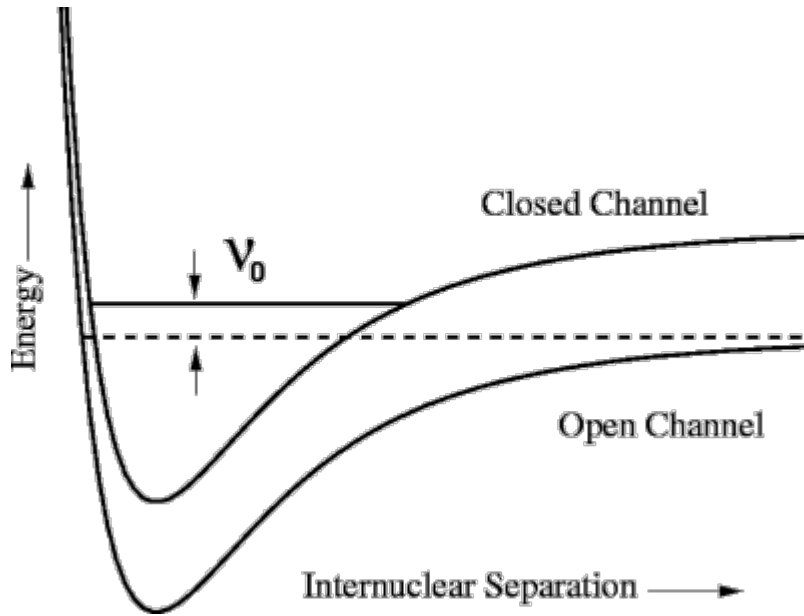
Дипольная ловушка и испарительное охлаждение



Резонанс Фешбаха

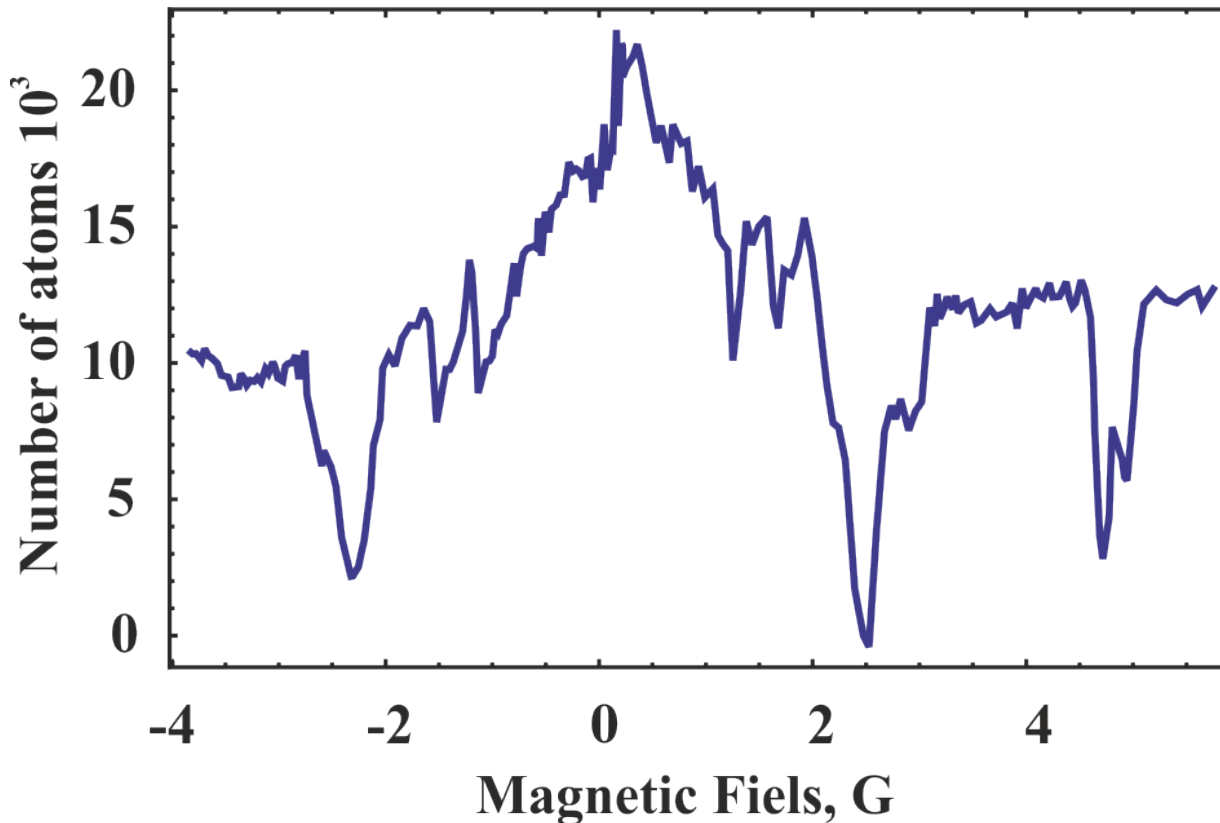
$$\frac{\hbar^2}{\pi m} a = \frac{\hbar^2}{\pi m} a_P + \frac{|\langle \psi_r | H_{QP} | \psi_0 \rangle|^2}{E - E_r}$$

$$a = a_P + a_P \frac{\Delta B}{B - B_0}$$



Резонансы Фешбаха в слабых полях, эксперимент

Feshbach resonances



- Несколько сильных резонансов Фешбаха в слабом поле
- Несколько резонансов на Гаусс

Where we are:

- Laser cooling and trapping of Thulium at 532 nm was demonstrated with more than 10^8 at $20 \mu\text{K}$
- Light assisted collisions was demonstrated with high binary collision rate, $\beta \sim 10^{-9} \text{ cm}^3 / \text{s}$
- Dipole trap with 5×10^5 atoms at $20 \mu\text{K}$
- Evaporation cooling is under optimization, currently $3 \mu\text{K}$ reached, phase density so far 10^{-4}
- Trap frequency (full power) = 700-2000Hz
- Dipole trap lifetime $< 1 \text{ s}$
- Low field Feshbach resonance detected

Группа



Иван Кожокару



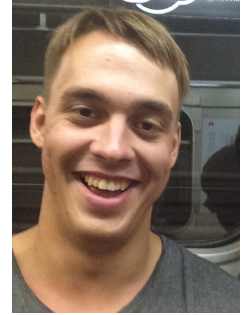
Сергей Пятченков
(Амстердам)



Степан Снигирев
(MPQ)



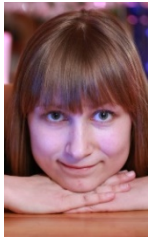
Денис Сукачев
(Harvard)



Илья Лучников
(МФТИ)



Андрей
Хорошилов



Елена
Калганова



Гульнара
Вишнякова



Олеся
Беляева
(США)



Margaret
Pavlovich
(MIT)

Новые люди в лаборатории:



Дарья
Кубликова



Влад
Бушмакин



Эмиль
Давлетов



Влад
Цыганок



Руководитель
группы:
Алексей Акимов

Спасибо за внимание!