



Экспериментальное и теоретическое исследование ультрахолодных ридберговского газа и плазмы.

Б.Б. Зеленер,
Зав. лаб. 1.4

Лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы

ОИВТ РАН

boboze1@mail.ru

Содержание

- Введение в теорию ридберговских атомов (РА).
- Основные методы возбуждения и регистрации РА.
- Получение и измерение энергий РА в магнитооптических ловушках.
- Чувствительный метод детектирования разреженной ультрахолодной плазмы на основе автоионизационных резонансов РА кальция 40 в непрерывно работающей магнитооптической ловушке.
- Квантовые симуляторы на основе РА.
- Электрон-дырочные комплексы (экситоны) в полупроводниках - аналоги РА.
- Измерение микроволнового излучения при помощи РА (космический эксперимент).

Свойства ридберговских атомов

Свойство	Зависимость	H (n=2)	H (n=50)
Энергия связи	$-Rn^{-2}$	4 эВ	5.4 мэВ
$E_{n+1}-E_n$	$\frac{R}{n^2} - \frac{R}{(n+1)^2} \sim \frac{1}{n^3}$	2 эВ	0.2 мэВ
Средний радиус	$a_0 n^2$	0.2 нм	132 нм
Спонтанное время жизни	$\sim n^3$	$5 \cdot 10^{-9}$ сек	$1.5 \cdot 10^{-4}$ сек
Критическое поле	$E_c = \pi \epsilon_0 R^2 e^{-3} n^{-4}$	$5 \cdot 10^9$ В/м	$5 \cdot 10^3$ В/м
Поляризуемость	$\alpha \sim n^7$	10^{-6} сек $^{-1}$ В $^{-2}$ м 2	20 сек $^{-1}$ В $^{-2}$ м 2

$$a_0 = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$E_n = E_I - \frac{R}{(n-\delta)^2} + c_s (n - \delta)^7$$

Ридберговские атомы. Метод регистрации ионизационным сигналом.

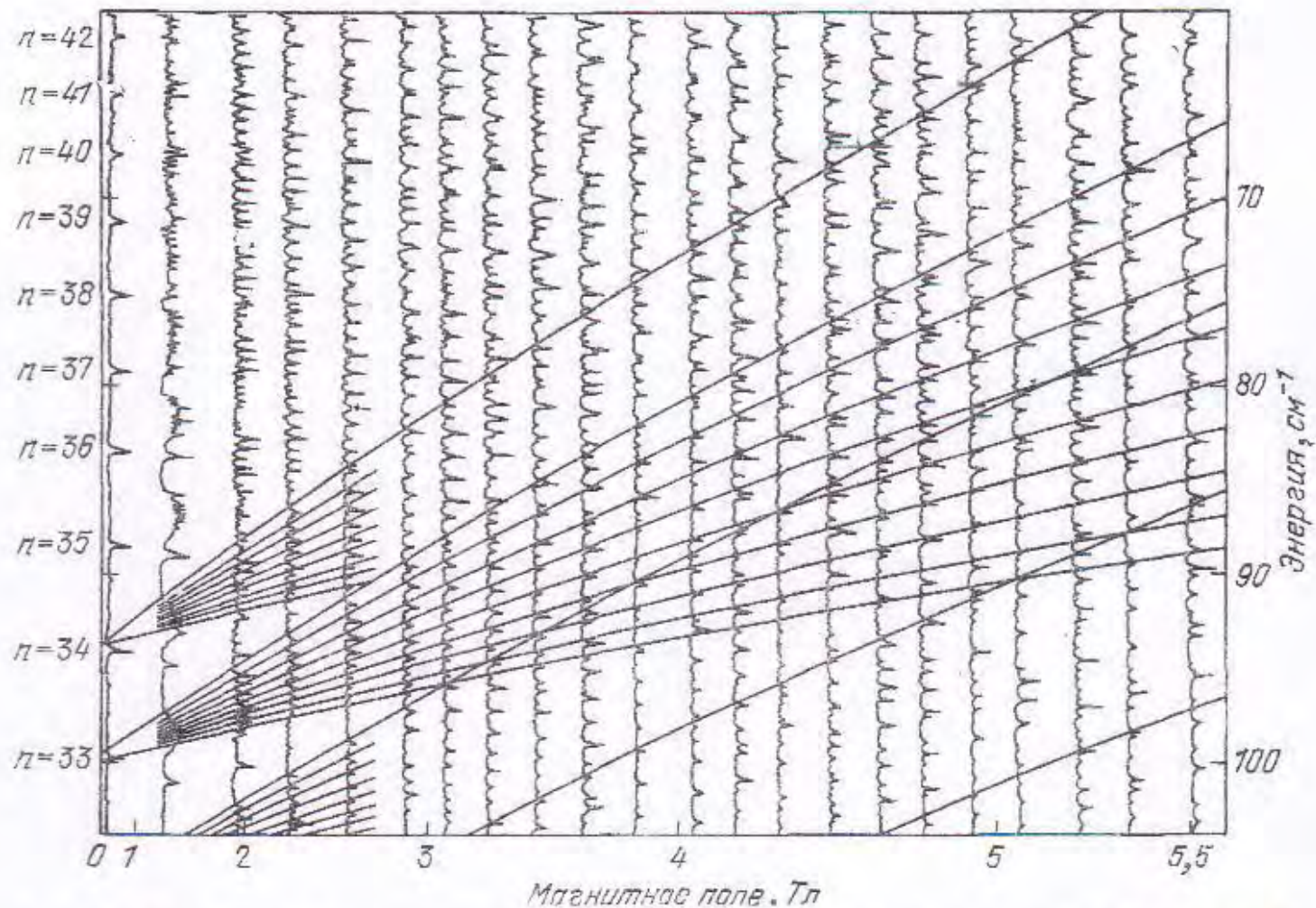
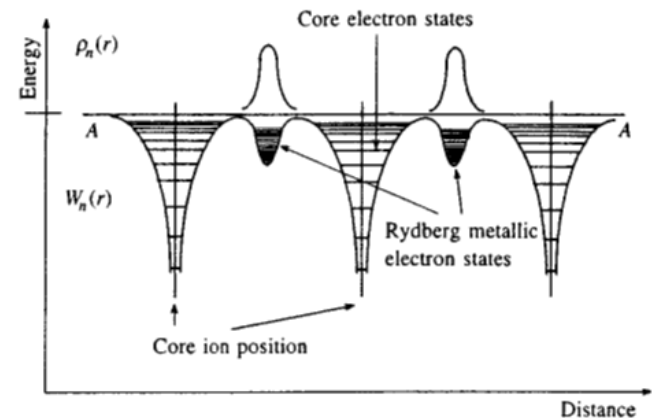
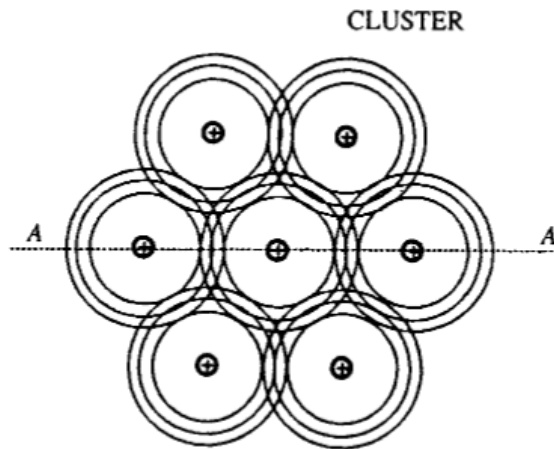
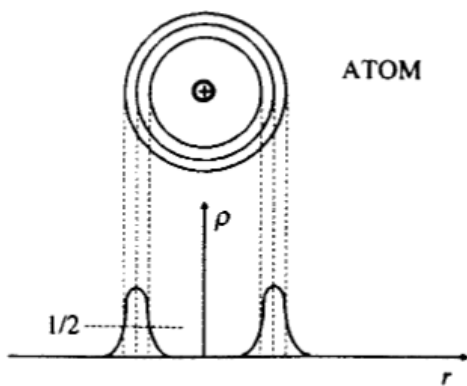


Рис. 14. Магнитная структура ридберговских атомов, полученная (при изменении напряженности внешнего магнитного поля) методом регистрации ионизационного сигнала.

Ридберговское вещество

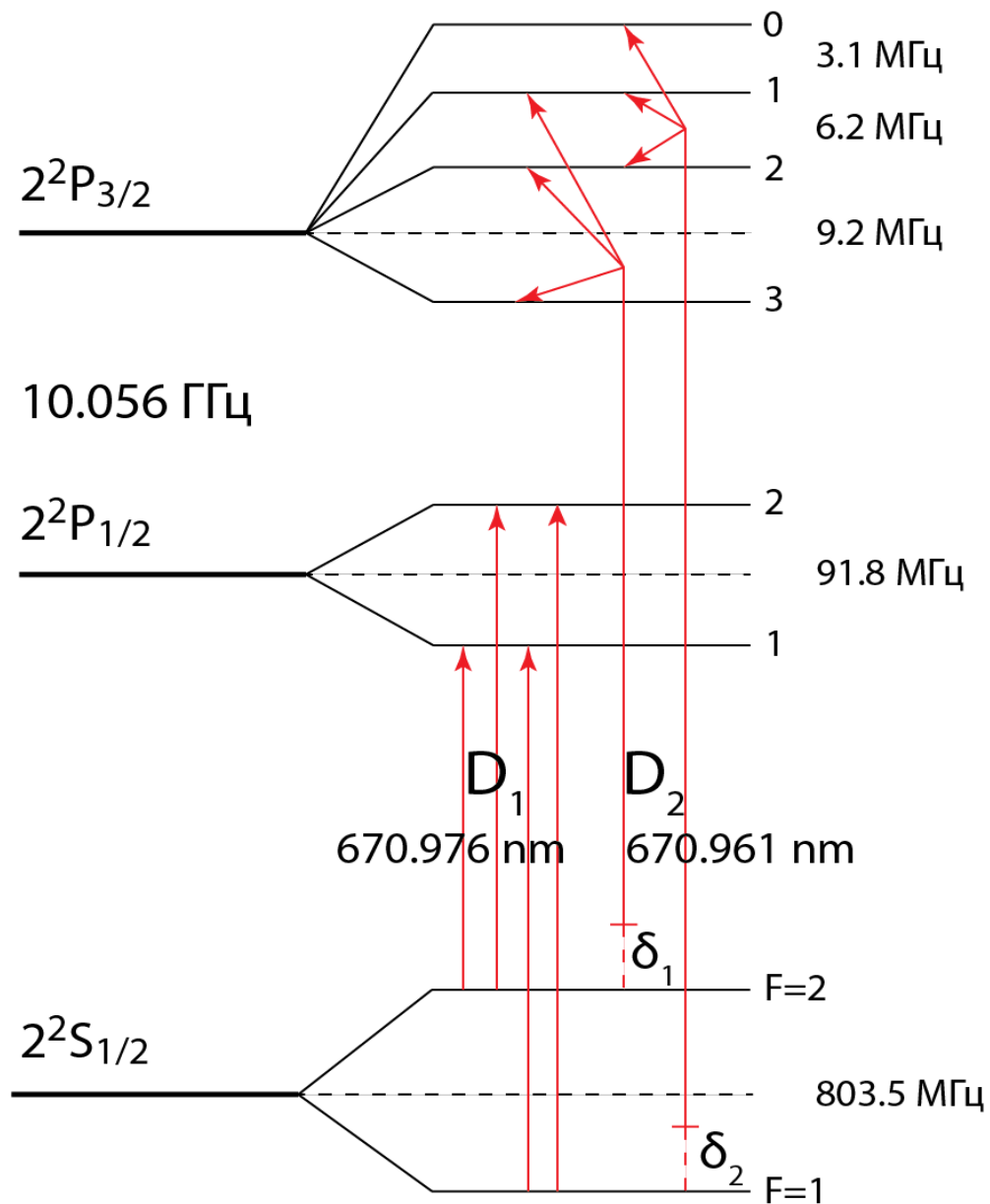


Манькин Э. А., Ожован М. И., Полуэктов П. П. О коллективном электронном состоянии в системе сильновозбужденных атомов // Доклады Академии наук. – Российская академия наук, 1981. – Т. 260. – №. 5. – С. 1096-1098.

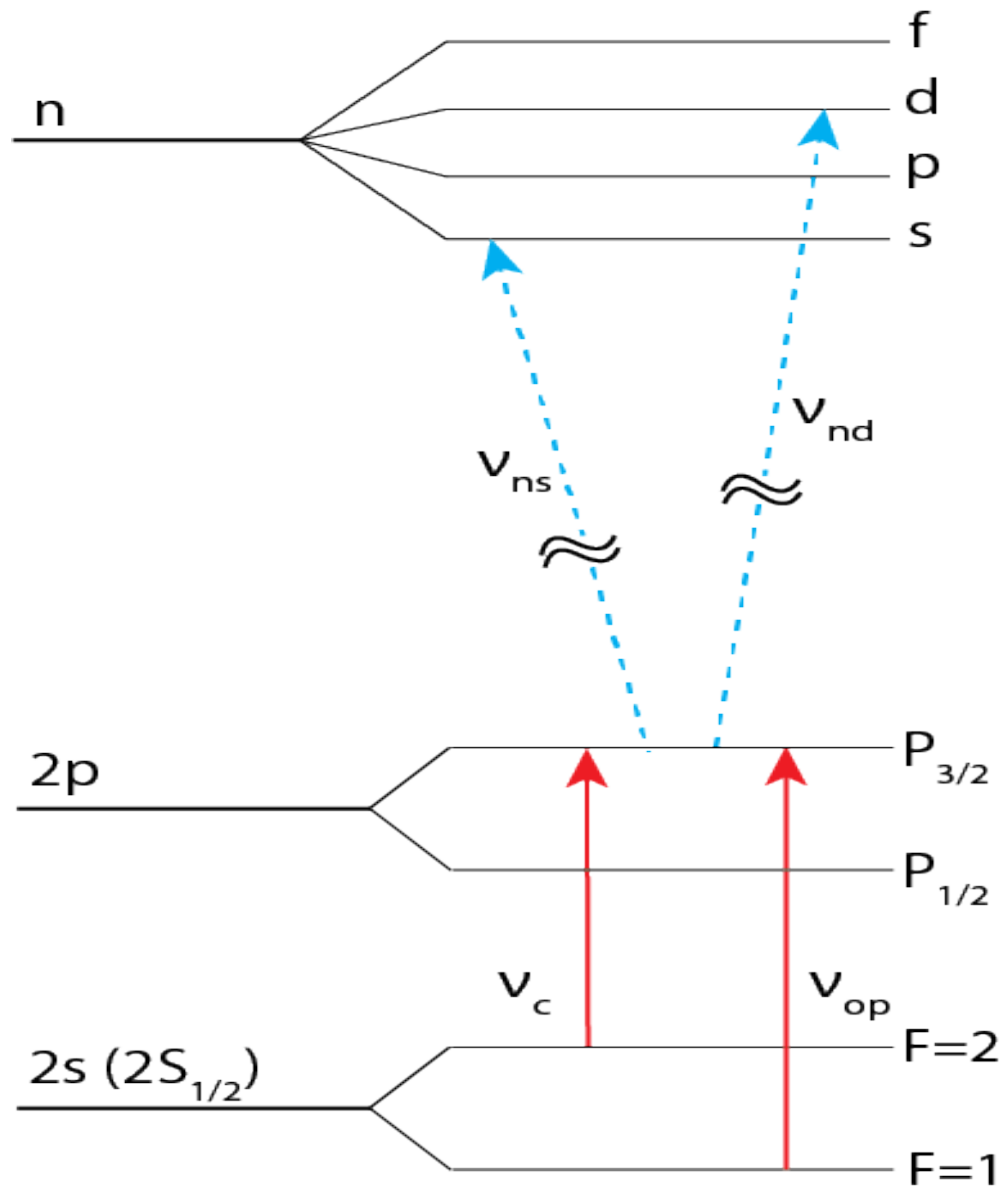
Svensson, R., & Holmlid, L. (1992). Very low work function surfaces from condensed excited states: Rydberg matter of cesium. *Surface science*, 269, 695-699.

Holmlid, L., & Manykin, E. A. (1997). Rydberg matter—a long-lived excited state of matter. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 84(5), 875-880.

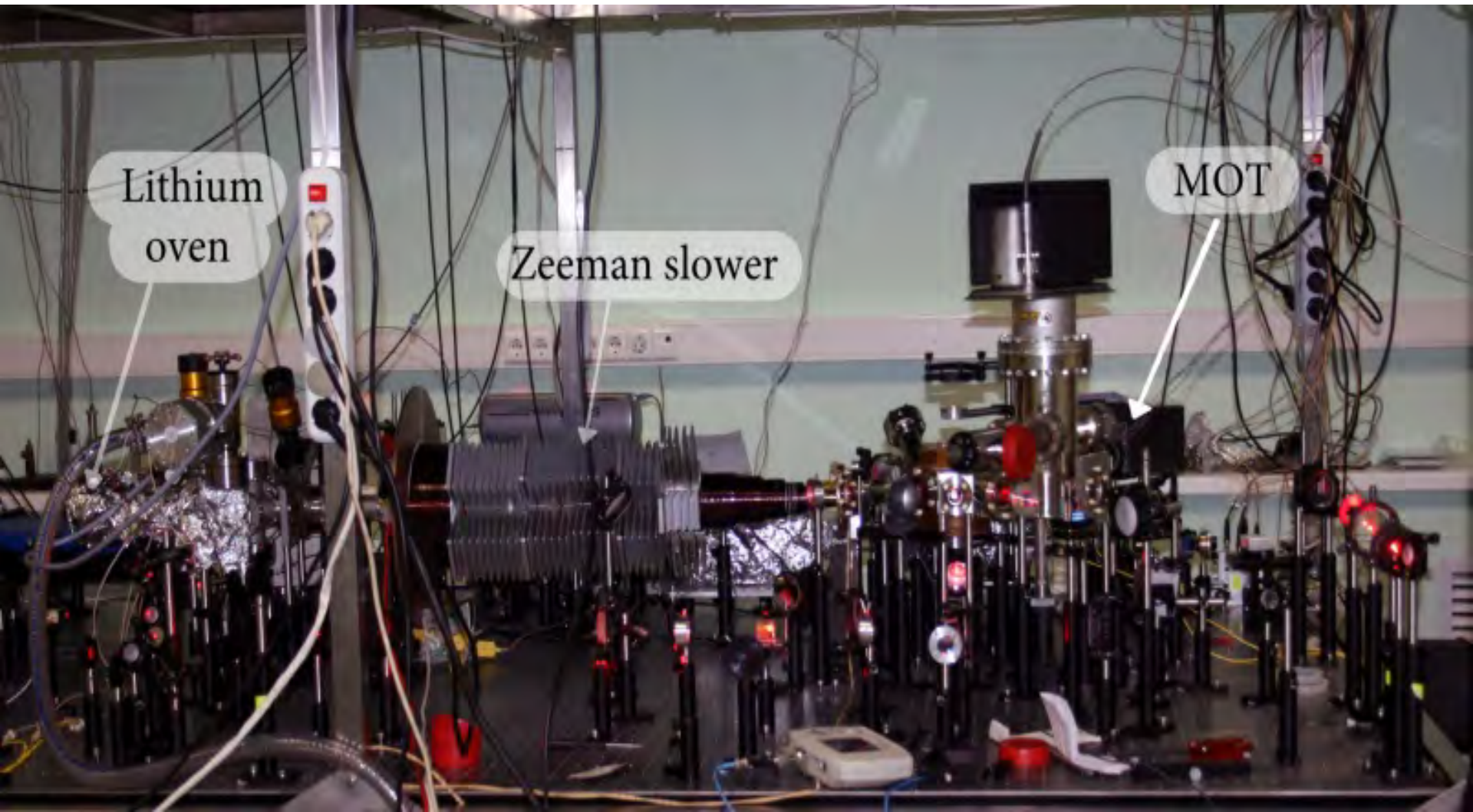
Схема уровней атомов лития 7

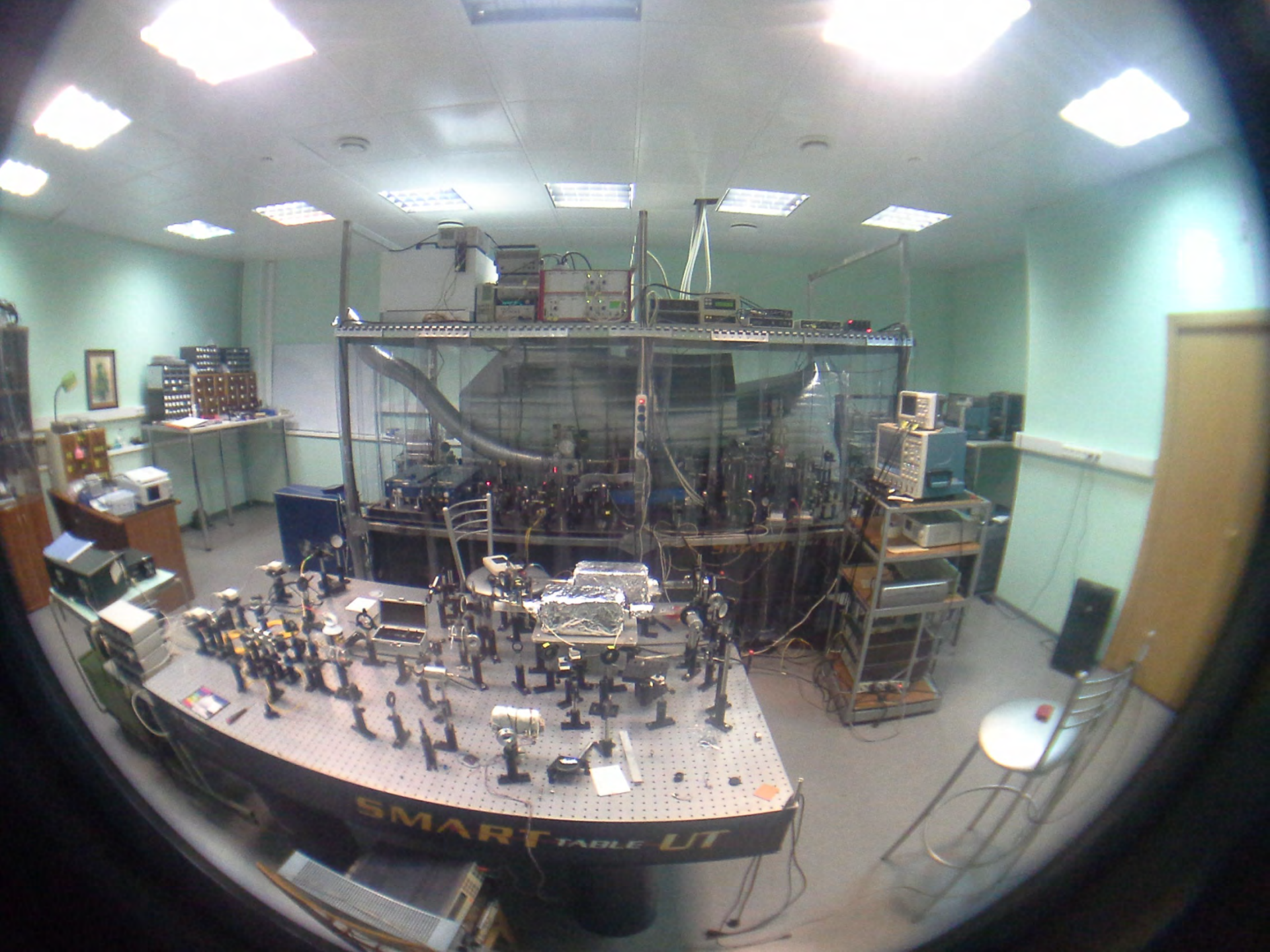


Ридберговские атомы лития 7



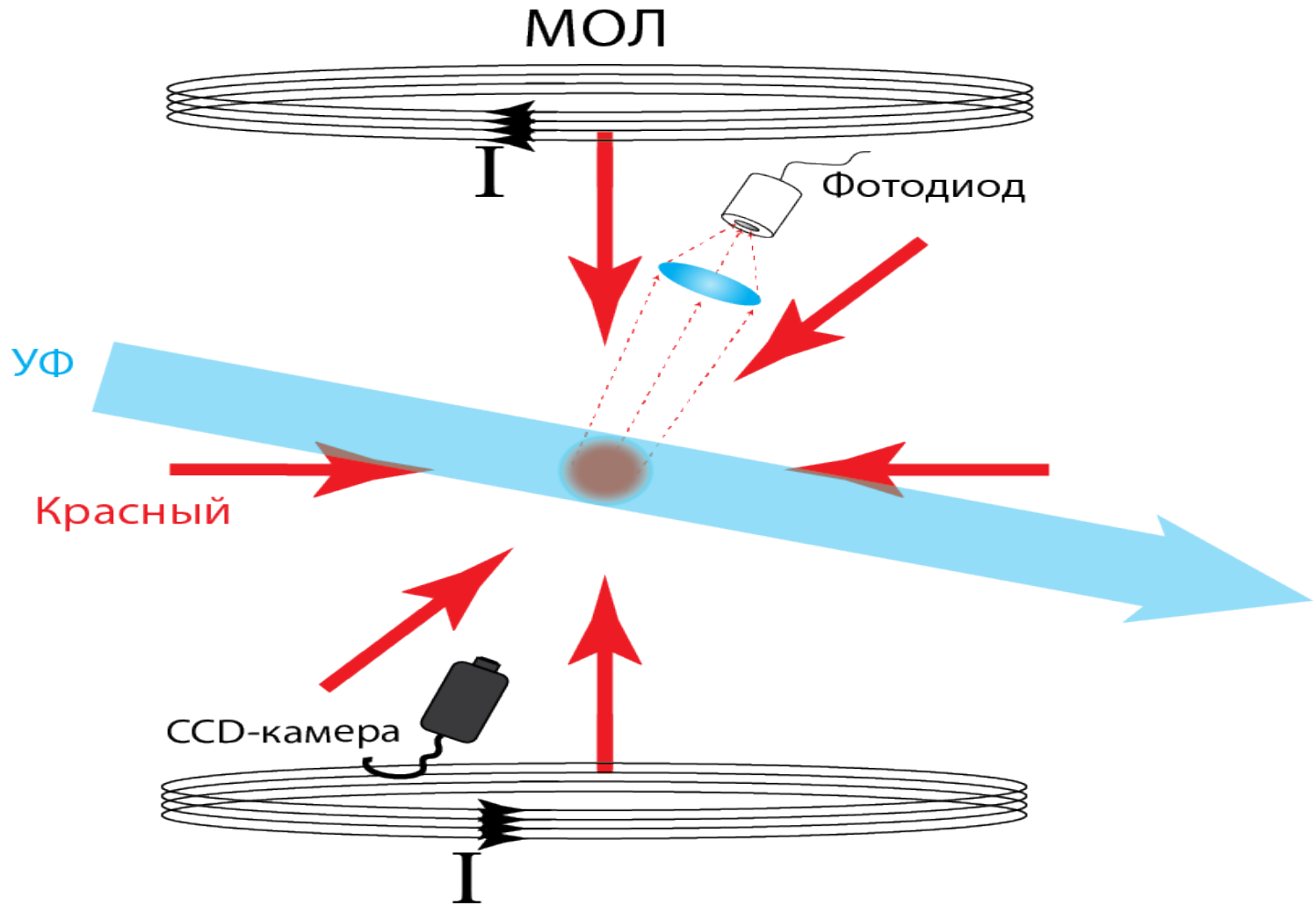
Экспериментальный стенд

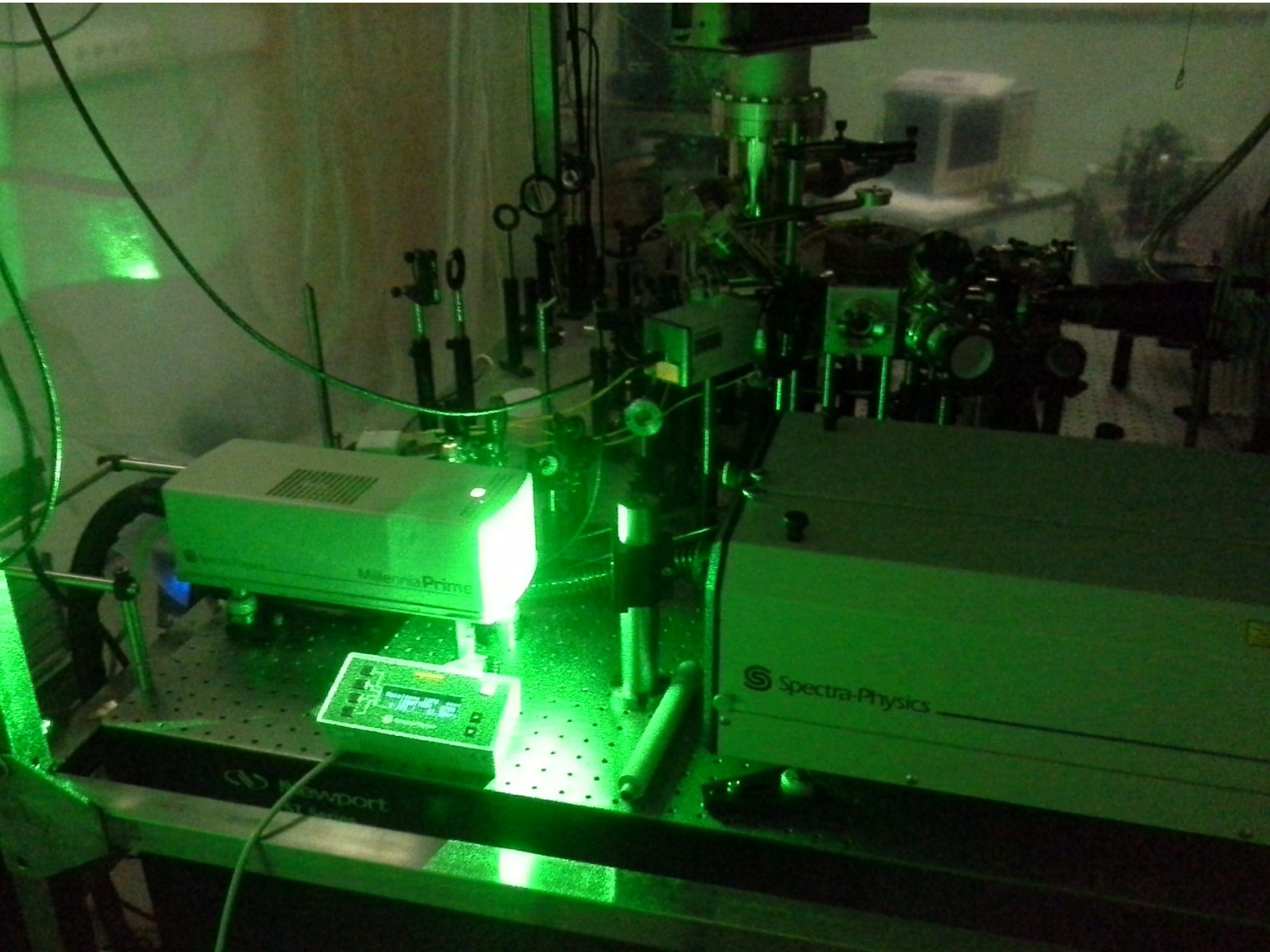






Принципиальная схема установки



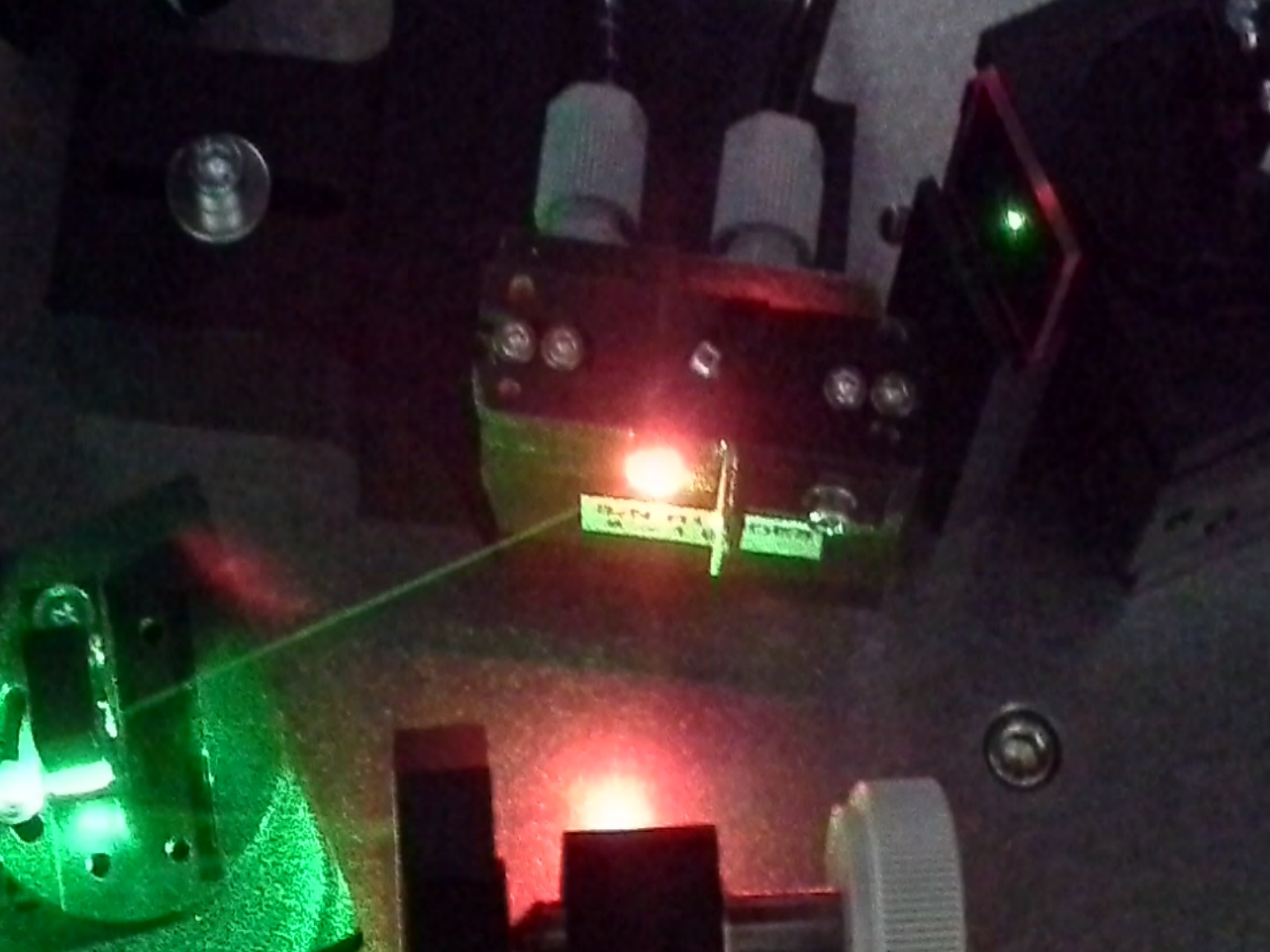


MillenniaPrime

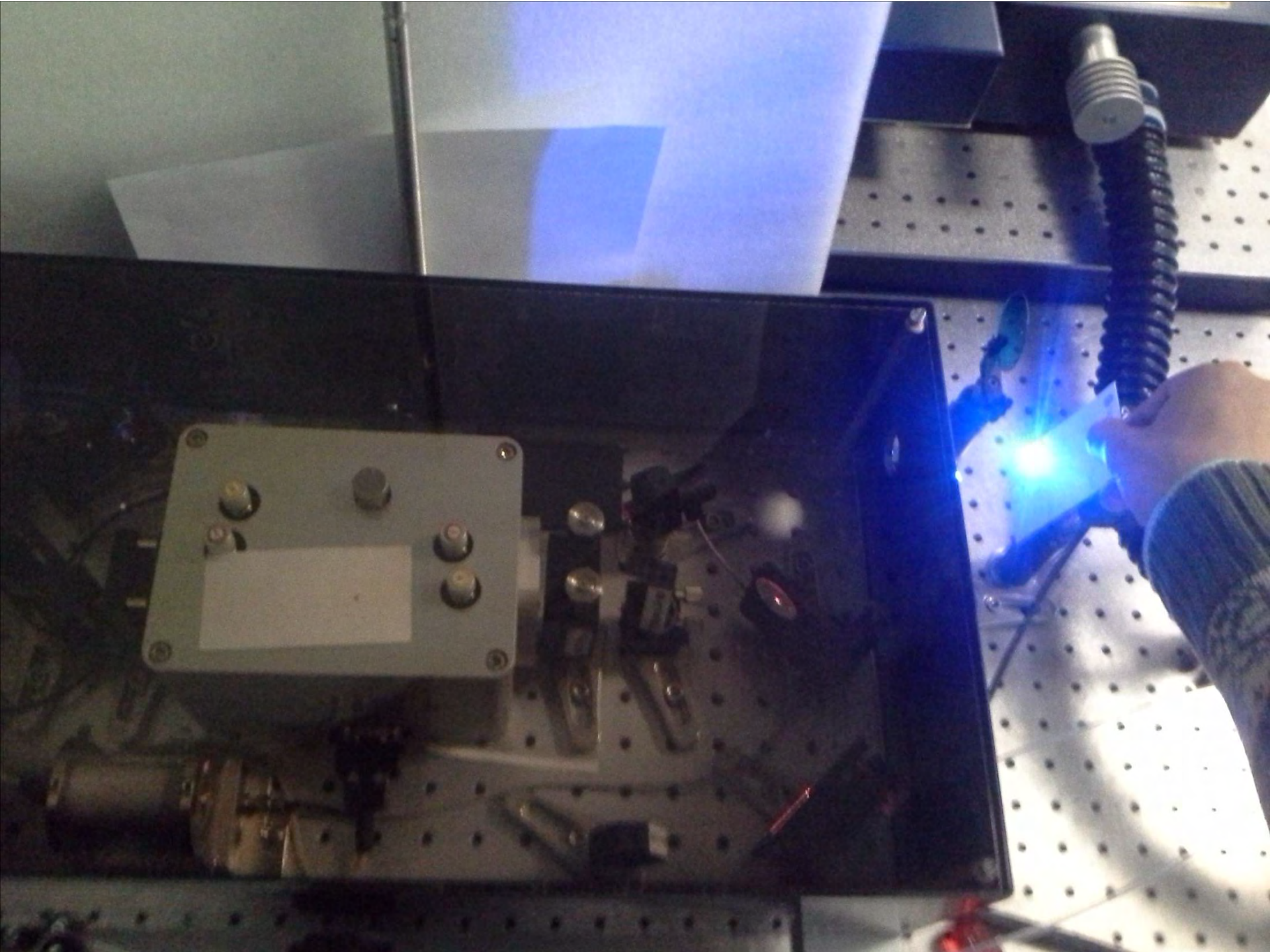
10.000000

Spectra-Physics

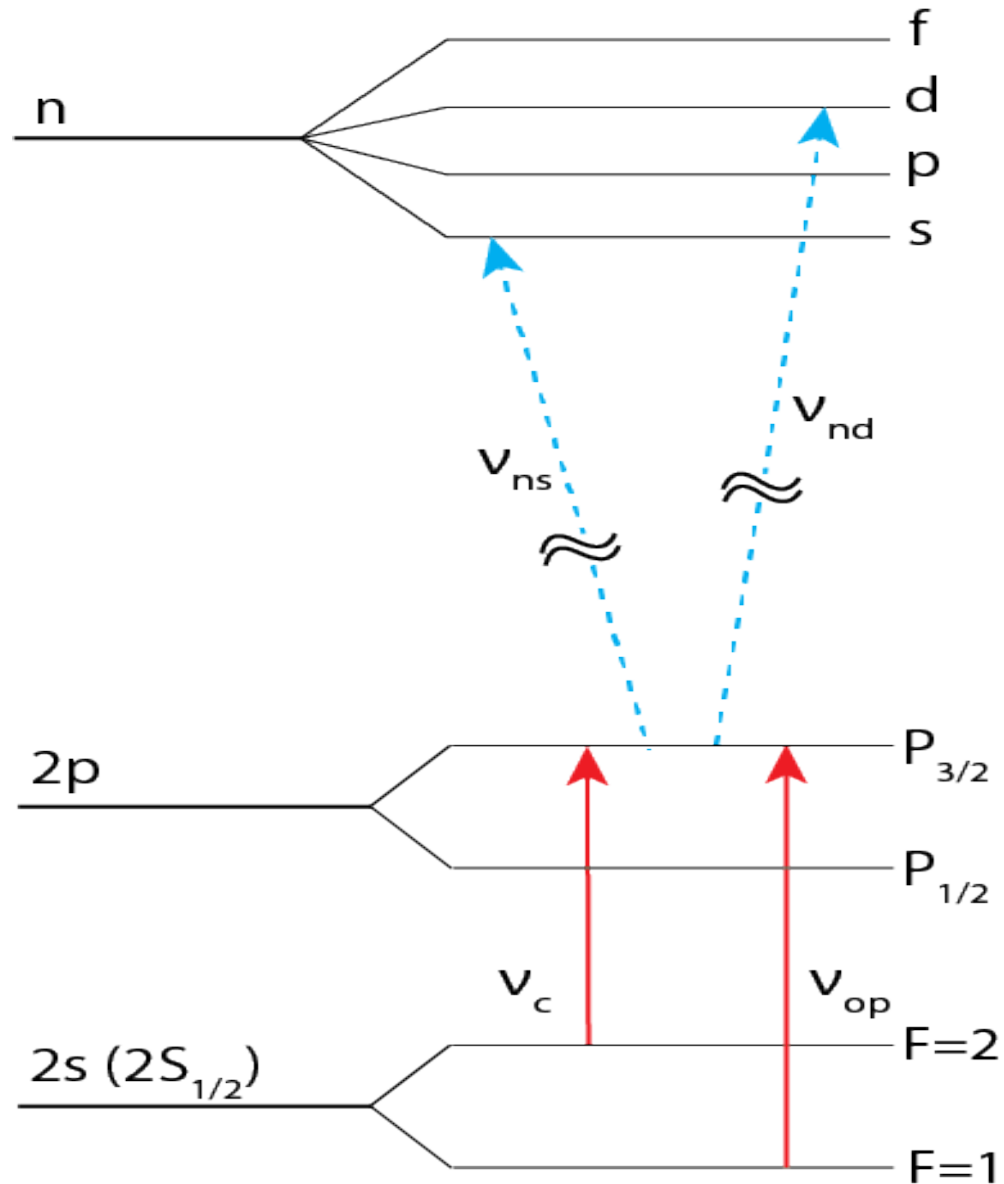
Newport

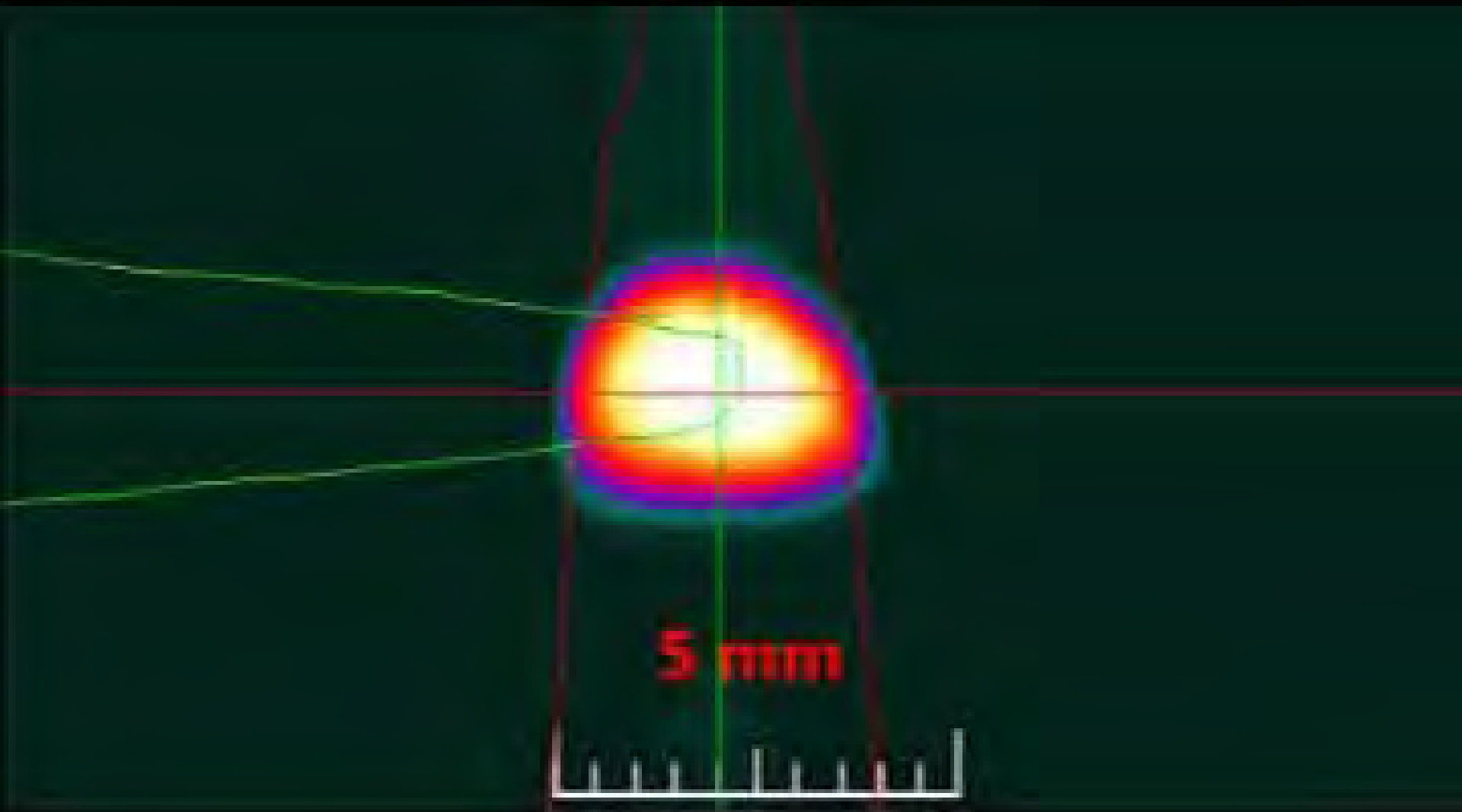


12-14-11 11:11 AM
12-14-11 11:11 AM

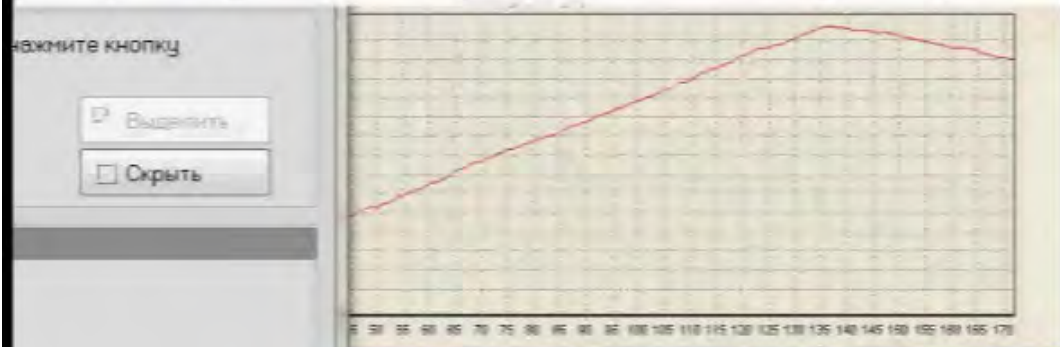
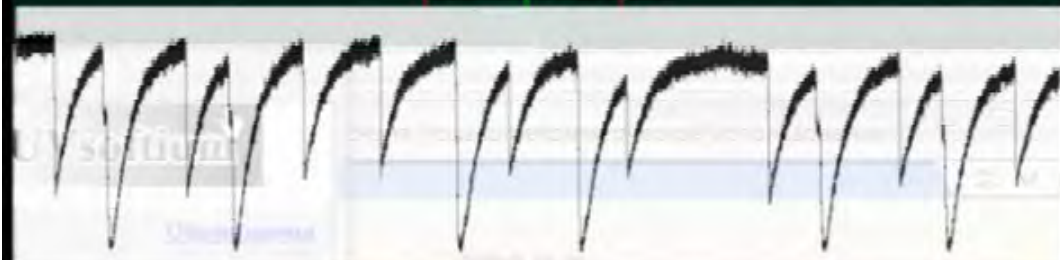
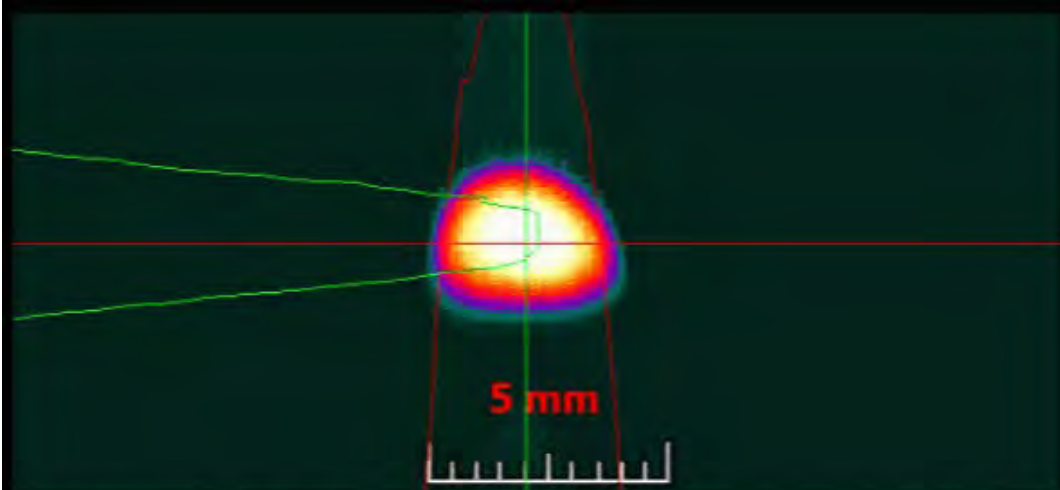


Энергетические уровни лития 7



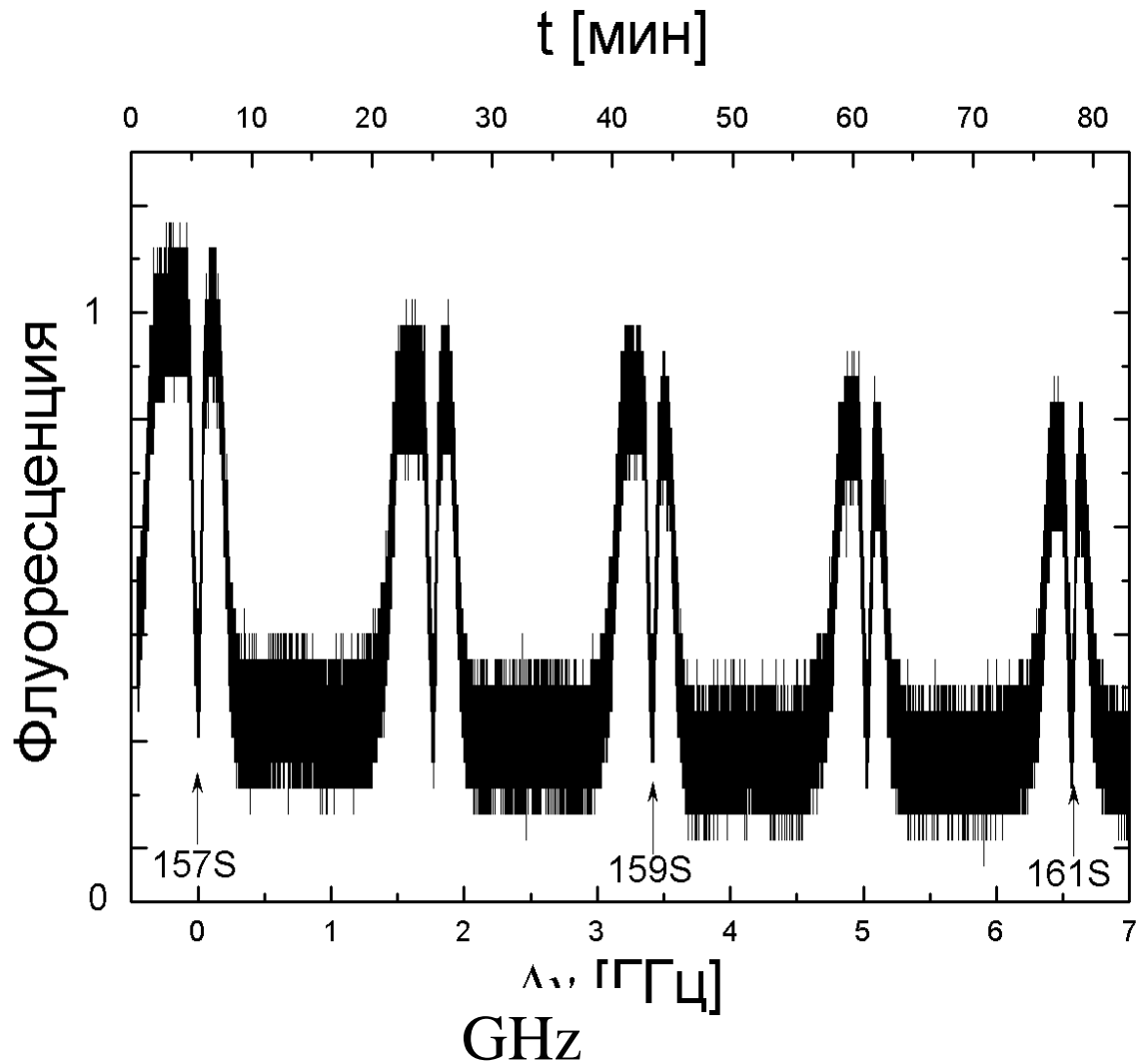


5 mm



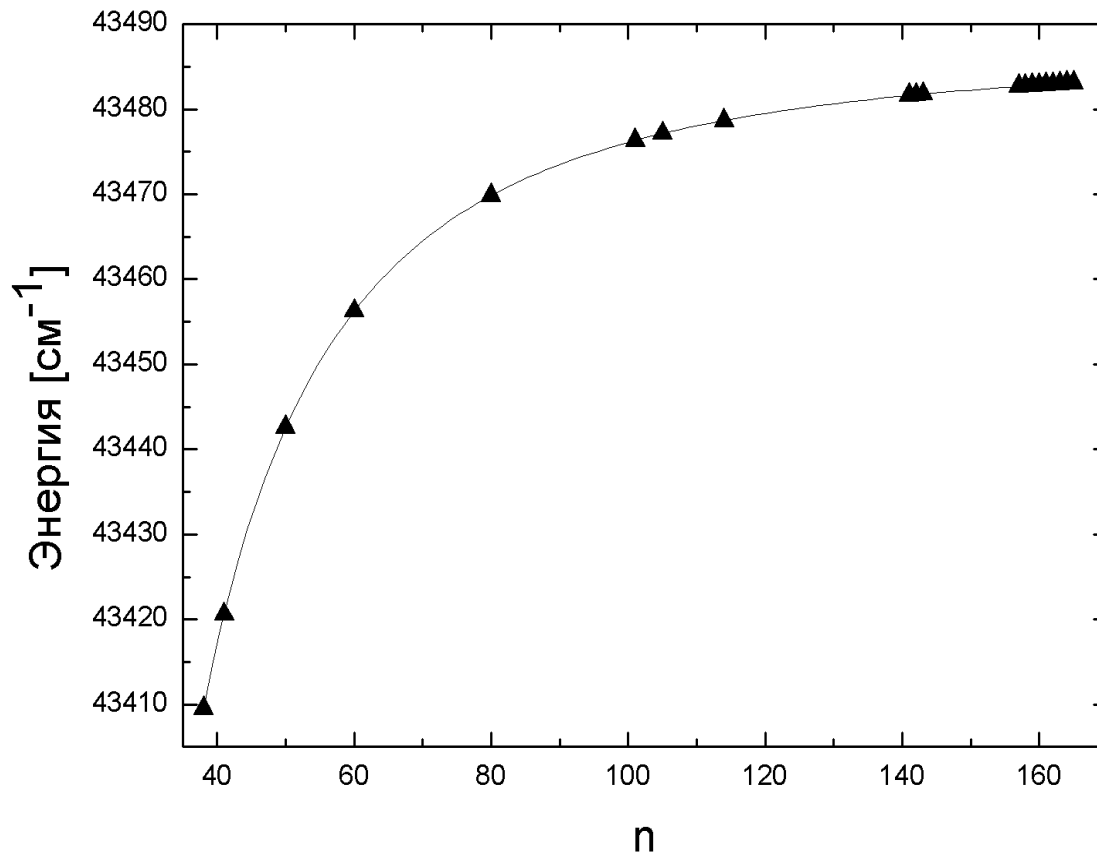
0.014993 nm

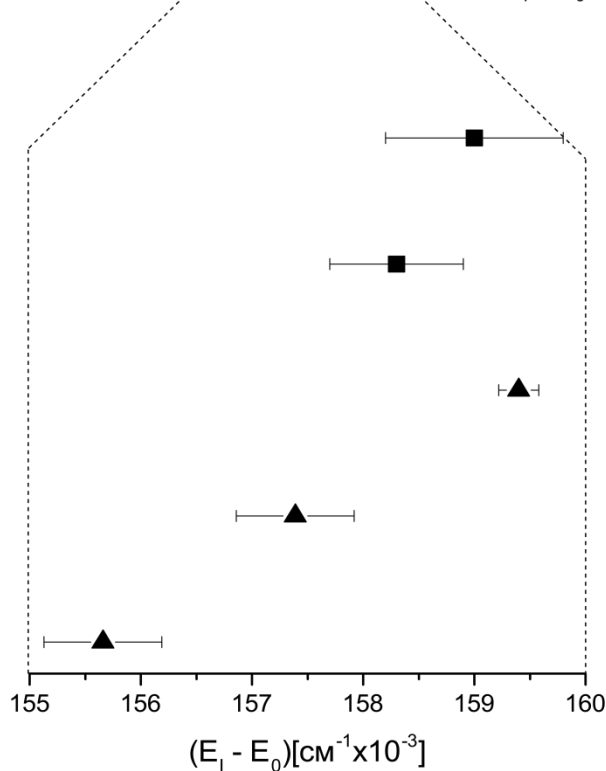
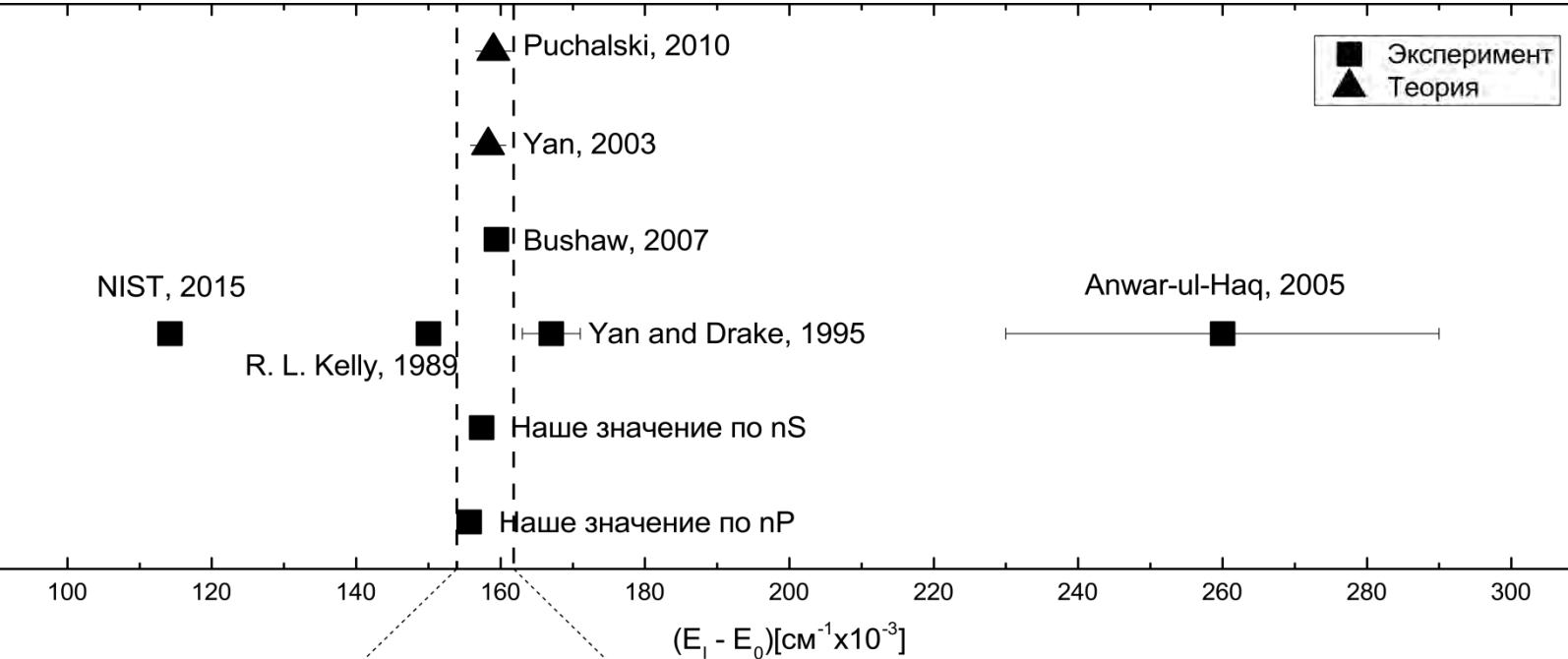
Высокие ридберговские S и D переходы



Аппроксимационная формула для энергии nS переходов

$$E_n = E_I - \frac{R_m}{(n-\delta)^2} + c_s(n-\delta)^7$$

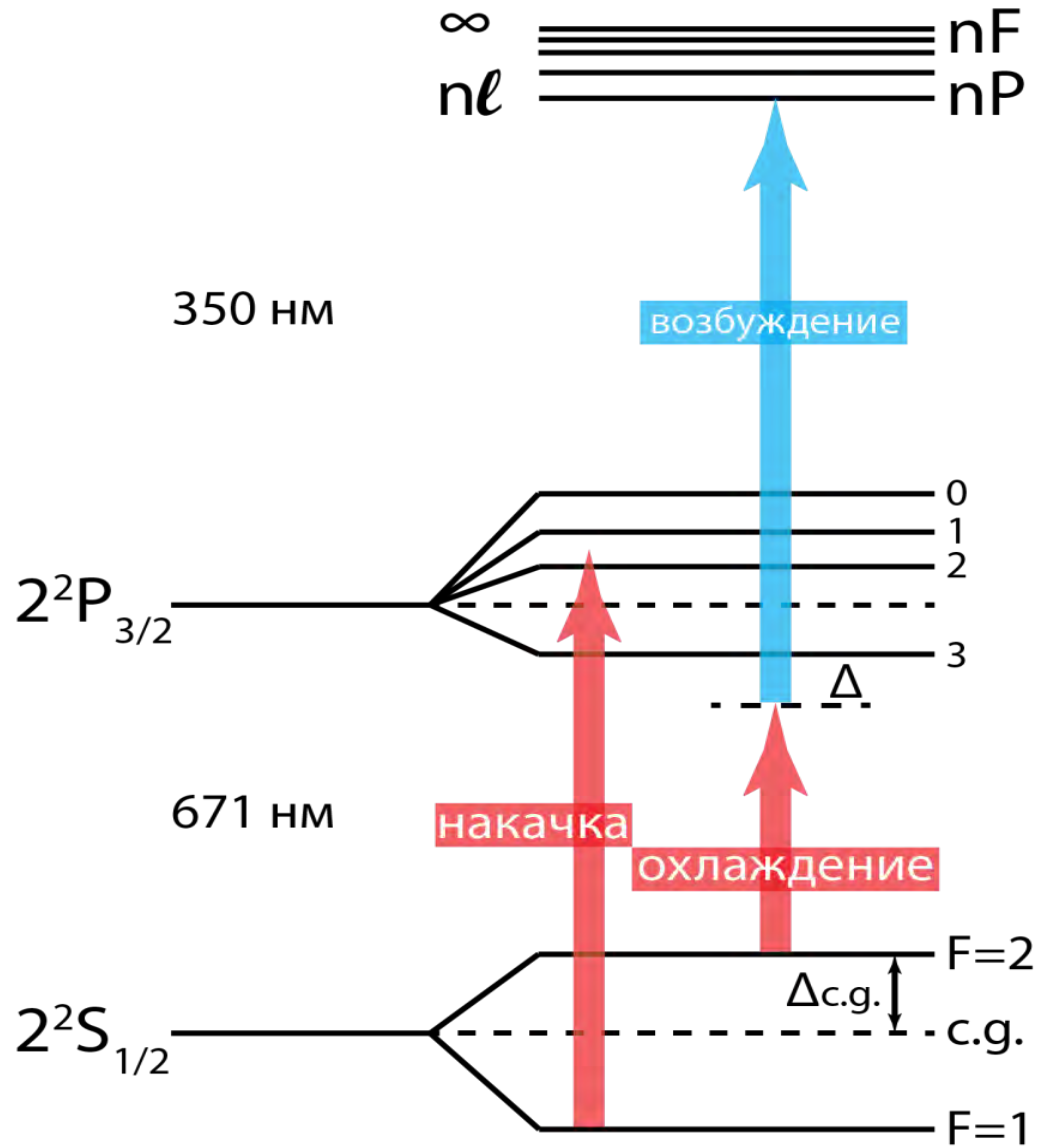




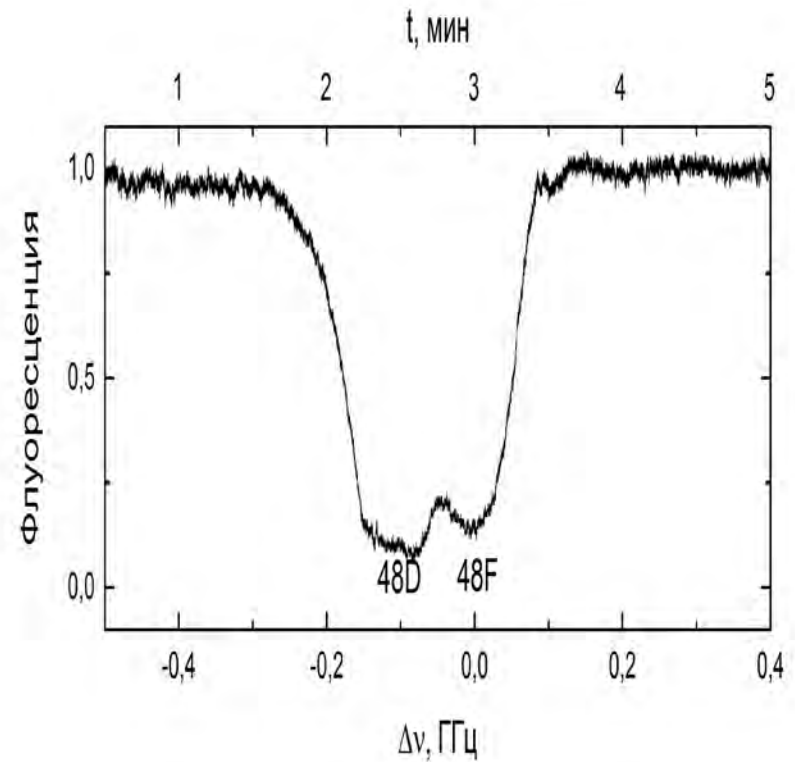
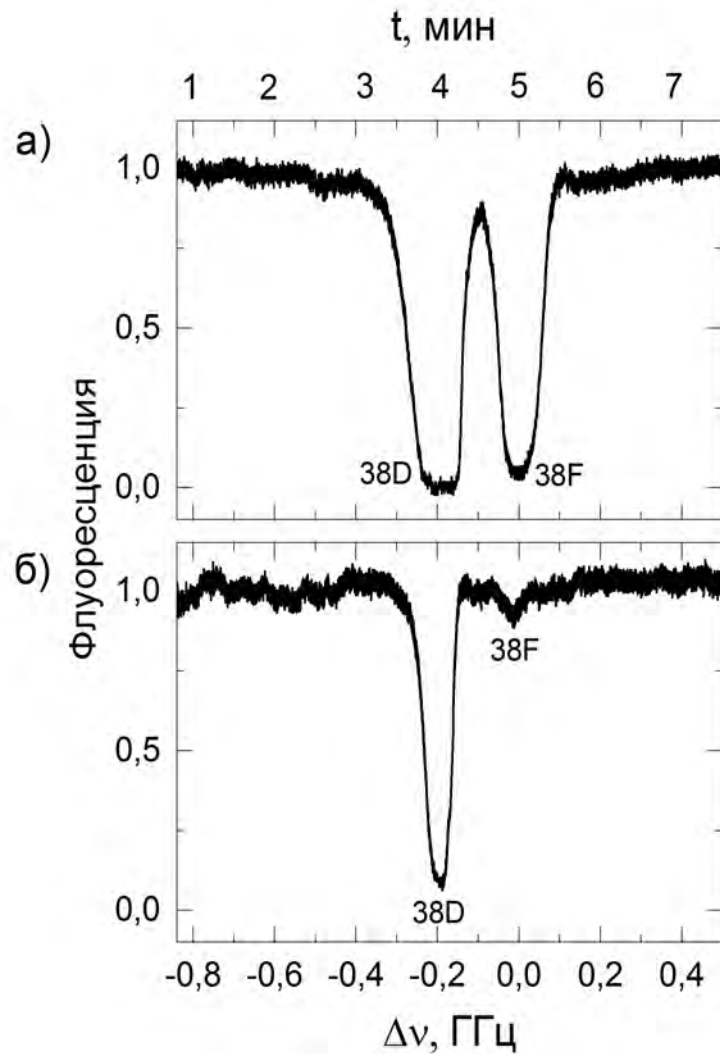
- Puchalski, 2010
43487.1590(8) cm^{-1}
- Yan, 2003
43487.15830(60) cm^{-1}
- Bushaw 2007
43487.15940(18) cm^{-1}
- Наше значение по nS
43487,15739(53) cm^{-1}
- Наше значение по nP
43487,15566(50) cm^{-1}

Потенциал ионизации Li7

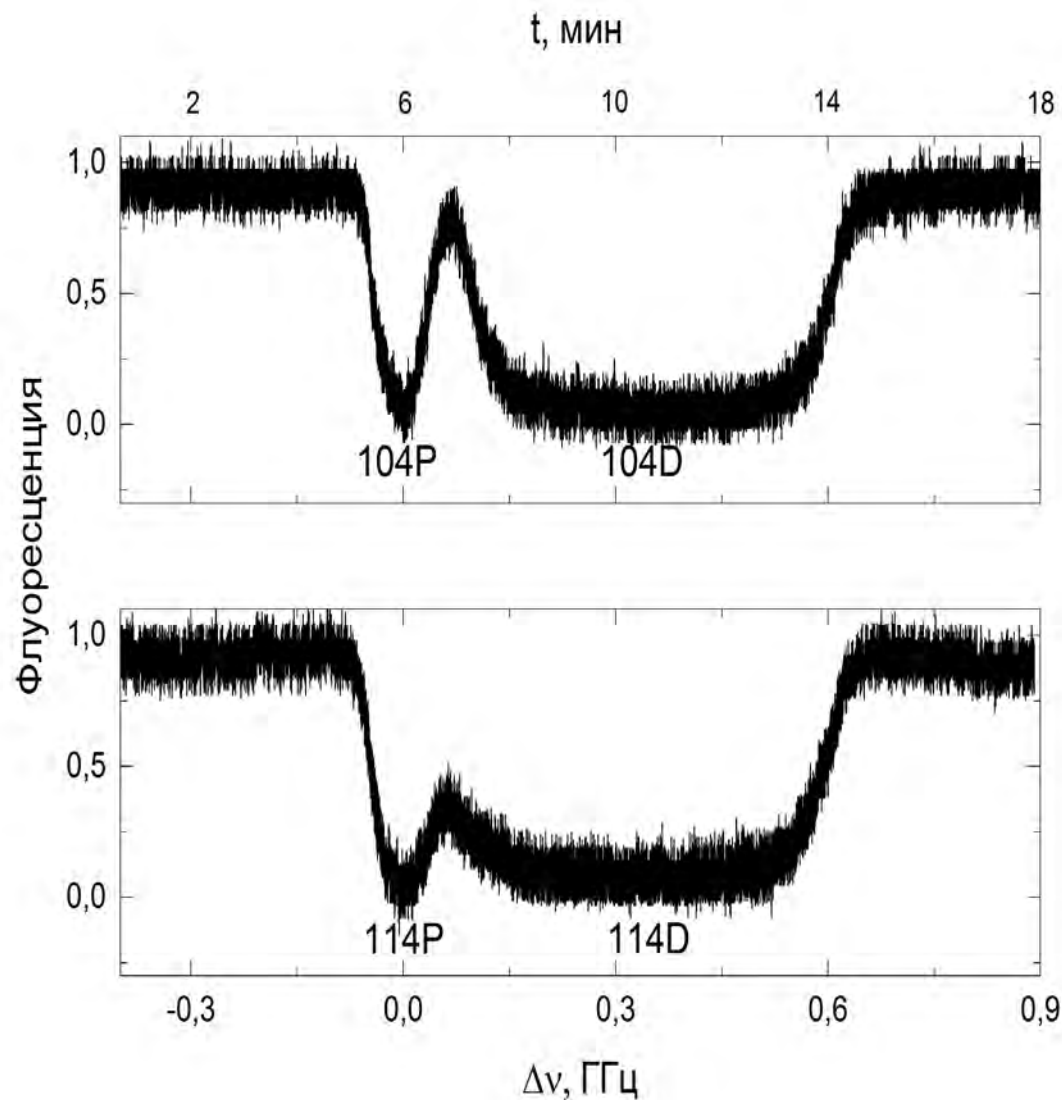
Запрещенные P и F переходы



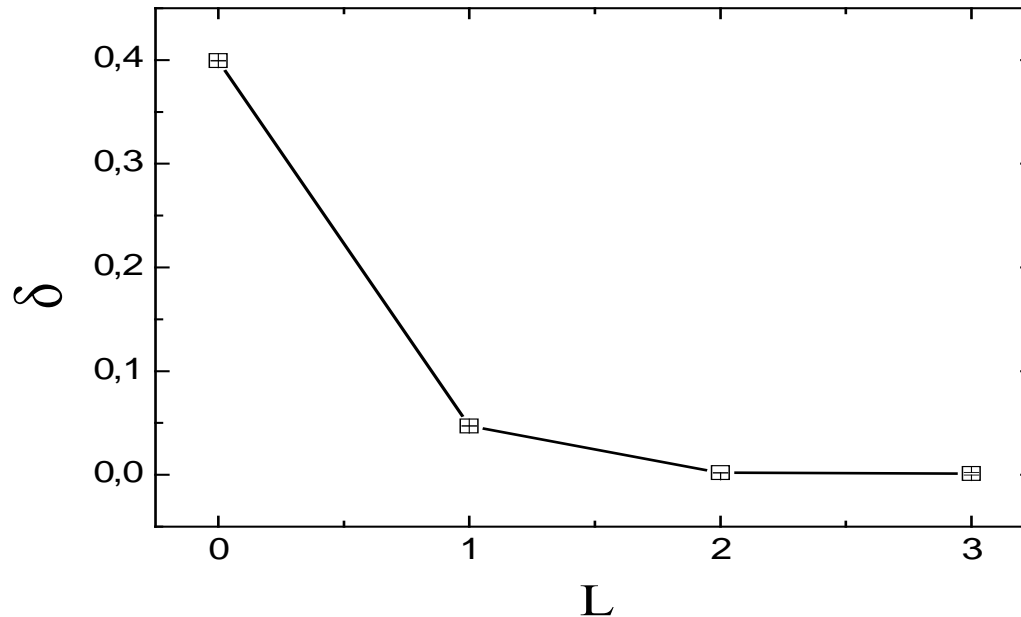
Разрешенные и запрещенные nD и nF переходы



Запрещенные и разрешенные nP и nD переходы

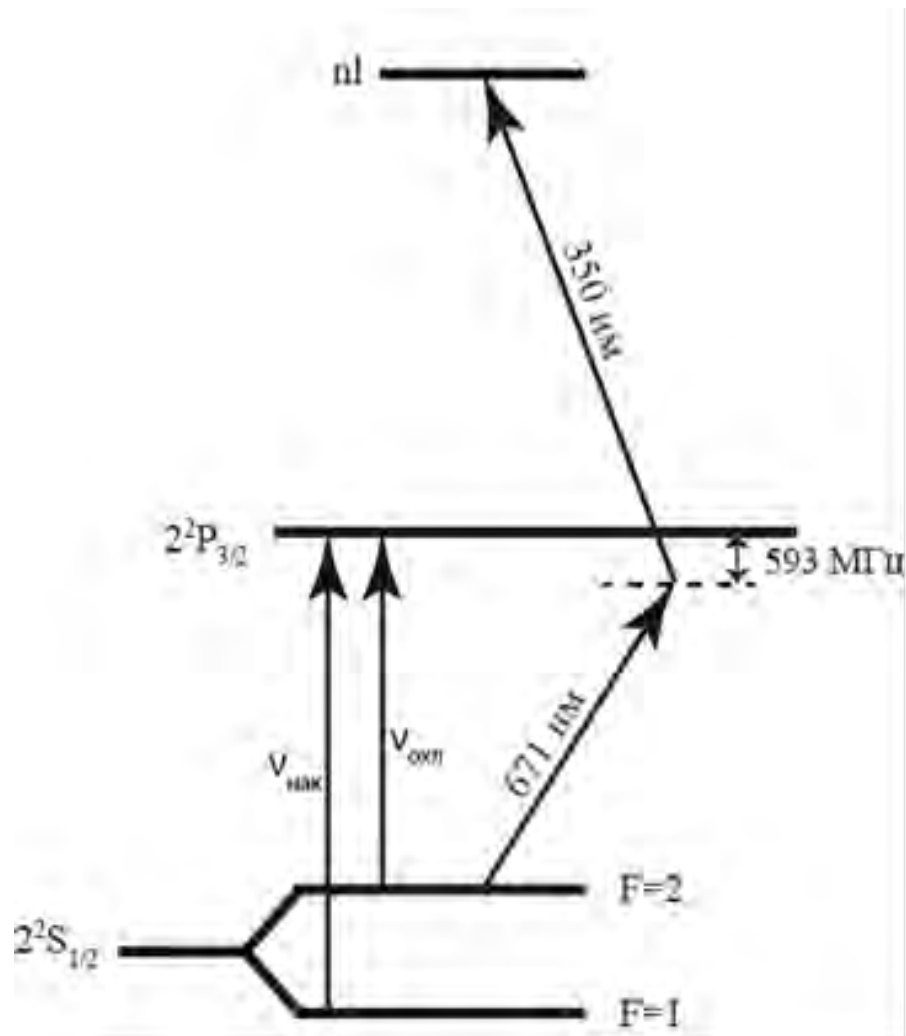


Квантовые дефекты лития 7



L	Наше значение δ	Значение δ из литературы
S	0.39940 ± 0.00028	0.3995101(10)
P	0.04714 ± 0.00017	0.0471665(20)
D	0.00192 ± 0.00017	0.004, 0.00182
F	0.000478 ± 0.000024	0.000147

Схема эксперимента по резонансному двухфотонному поглощению



Различные узкие резонансы в nS и nD конфигурации, пунктирная линия - контур Гаусса

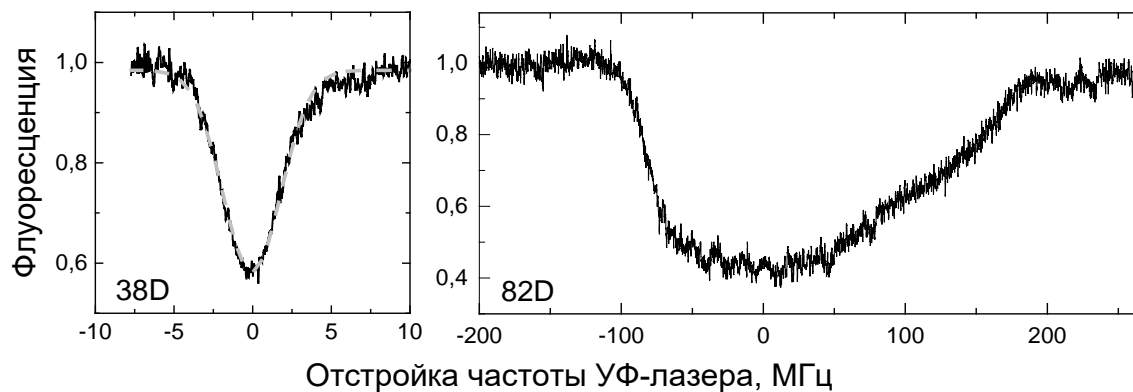
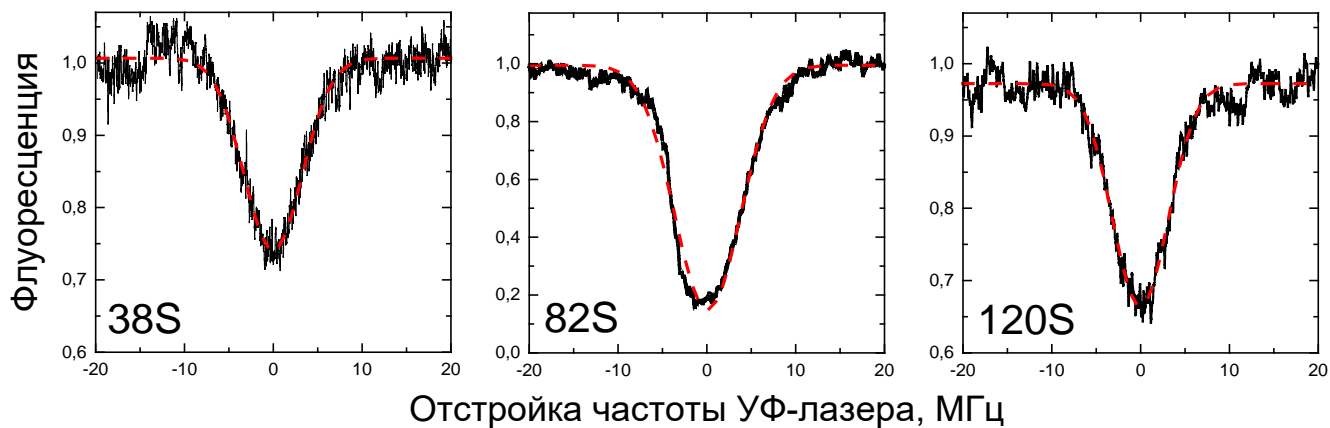
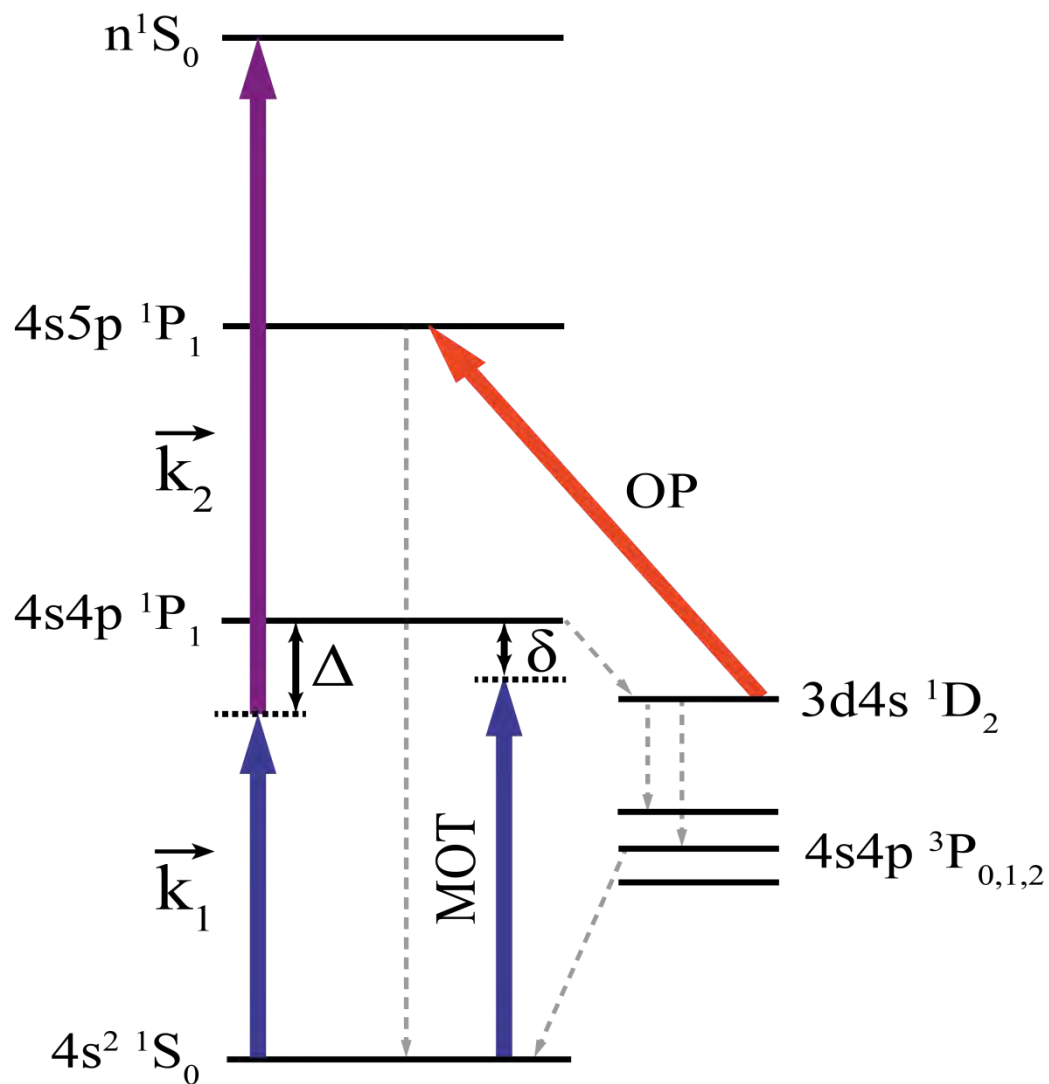
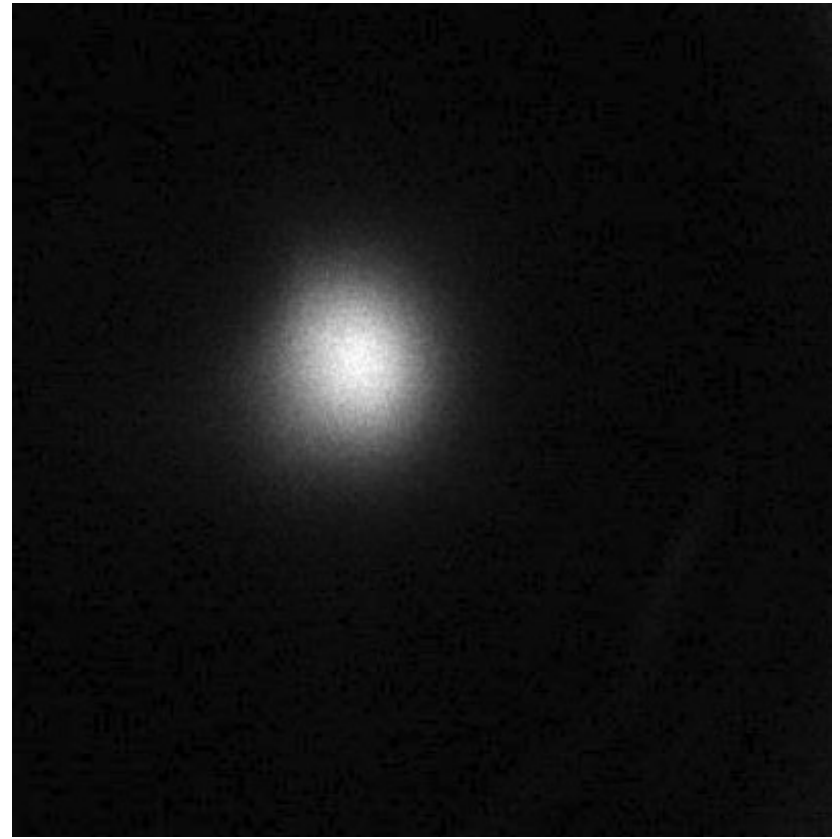
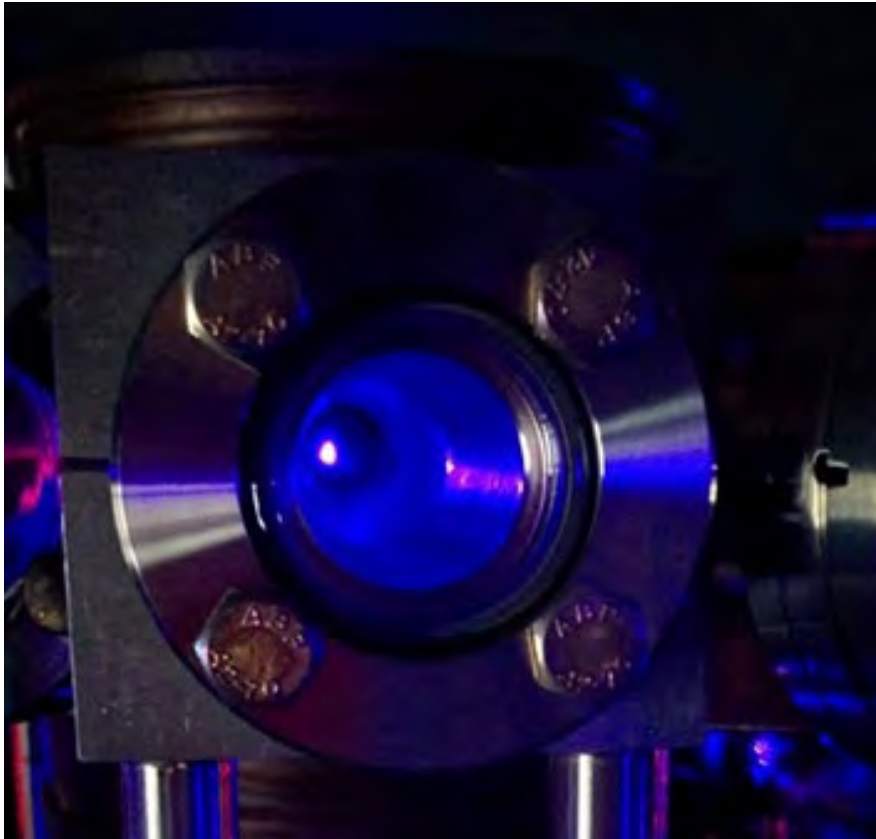


Схема уровней ^{40}Ca



Фотографии облака ультрахолодных атомов ^{40}Ca



Размер облака атомов кальция ~ 2

Потенциал ионизации Ca40

$$E_n = E_I - \frac{R_{Ca}}{\left(n - \delta_0 - \frac{\delta_1}{(n - \delta_0)^2}\right)^2}$$

Порог ионизации из измеренных энергий n^1S_0 -серии	49305.91966(4) cm^{-1}
Порог ионизации из работы [2]	49305.9240(20) cm^{-1}
Квантовый дефект $1S_0$ из измеренных энергий n^1S_0 -серии	$\delta_0 = 2.33801(11)$ $\delta_1 = -0.26(16)$
Квантовый дефект $1S_0$ из работы [1]	$\delta_0 = 2.33793016(300)$ $\delta_1 = -0.114(3)$

1. Gentile T. R. et al. Microwave spectroscopy of calcium Rydberg states //Physical Review A. – 1990. – Т. 42. – №. 1. – С. 440.
2. M. Miyabe, C. Geppert, M. Kato, M. Oba, I. Wakaida, K. Watanabe, and K. D. Wendt, J. Phys. Soc. Jpn. 75, 034302 (2006).

Измерение энергий ридберговских переходов в n^1S_0 состояния и порога ионизации атомов 40Ca^+

Зеленер ББ; Саакян СА; Саутенков ВА; Вильшанская ЕВ; Зеленер БВ; Фортов ВЕ
Письма в ЖЭТФ 12(2019)

Level map ^{40}Ca

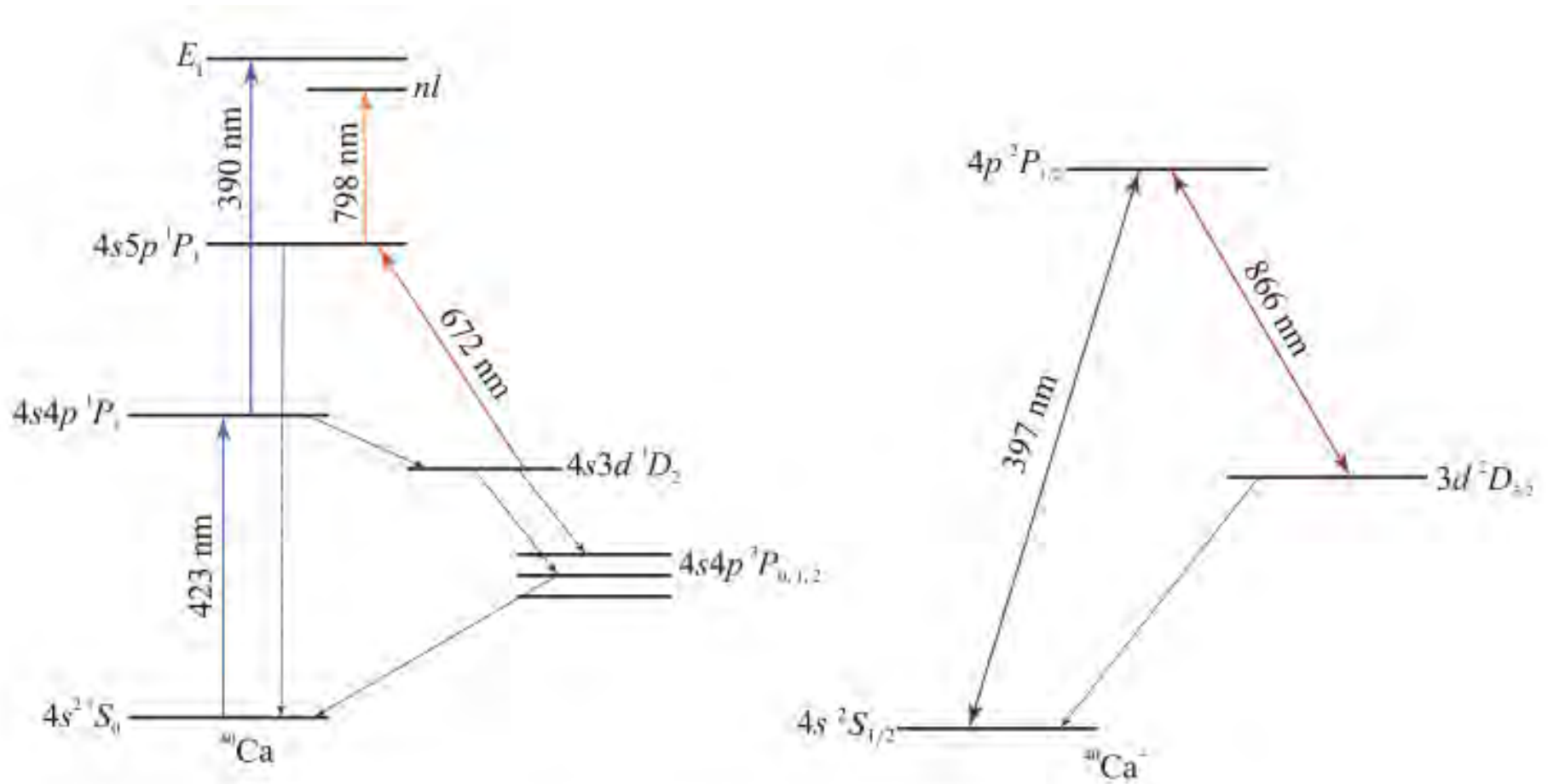


Fig. 1. (Color online) Energy level scheme for the ^{40}Ca atom and $^{40}\text{Ca}^+$ ion.

The spectroscopy of an ultracold plasma using the autoionization effect of Rydberg states

Zelener, B. B., Vilshanskaya, E. V., Saakyan, S. A., Sautenkov, V. A., Zelener, B. V., & Fortov, V. E. (2021). Diagnostics of a Diluted Ultracold Plasma Using the Autoionization Effect of Rydberg States of 40 Ca Atoms. *JETP Letters*, 113(2), 82-85.

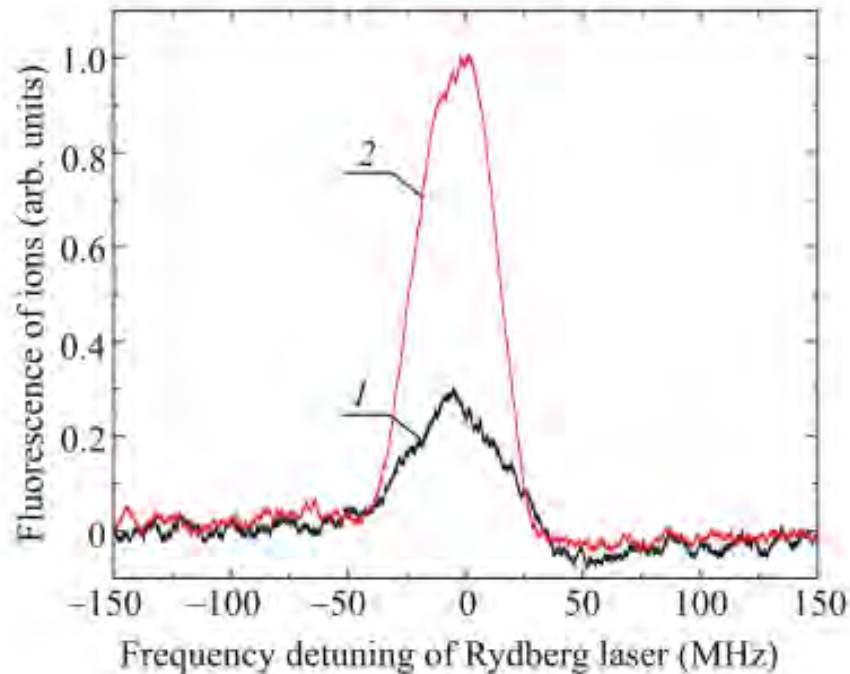


Fig. 2. (Color online) Ion fluorescence resonance at a wavelength of 397 nm upon scanning the Rydberg laser radiation frequency near the 90^1D_2 level. Curve 1 is a resonance in the absence of the ultracold plasma. Curve 2 is a resonance in the presence of laser radiation at a power of $P_{390} = 4$ mW, which generates the ultracold plasma.

The spectroscopy of an ultracold plasma using the autoionization effect of Rydberg states

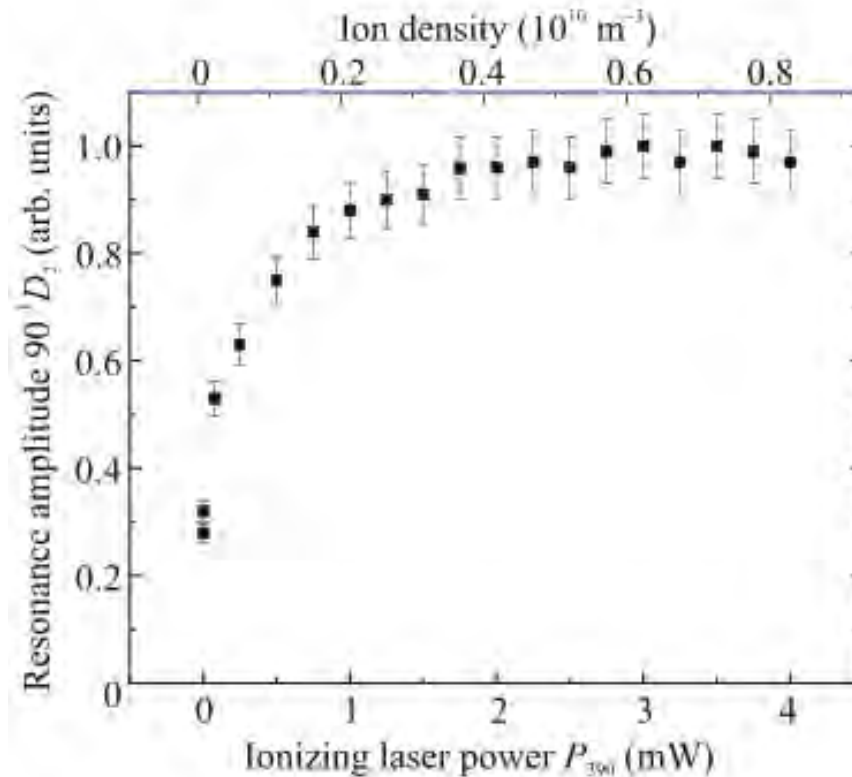
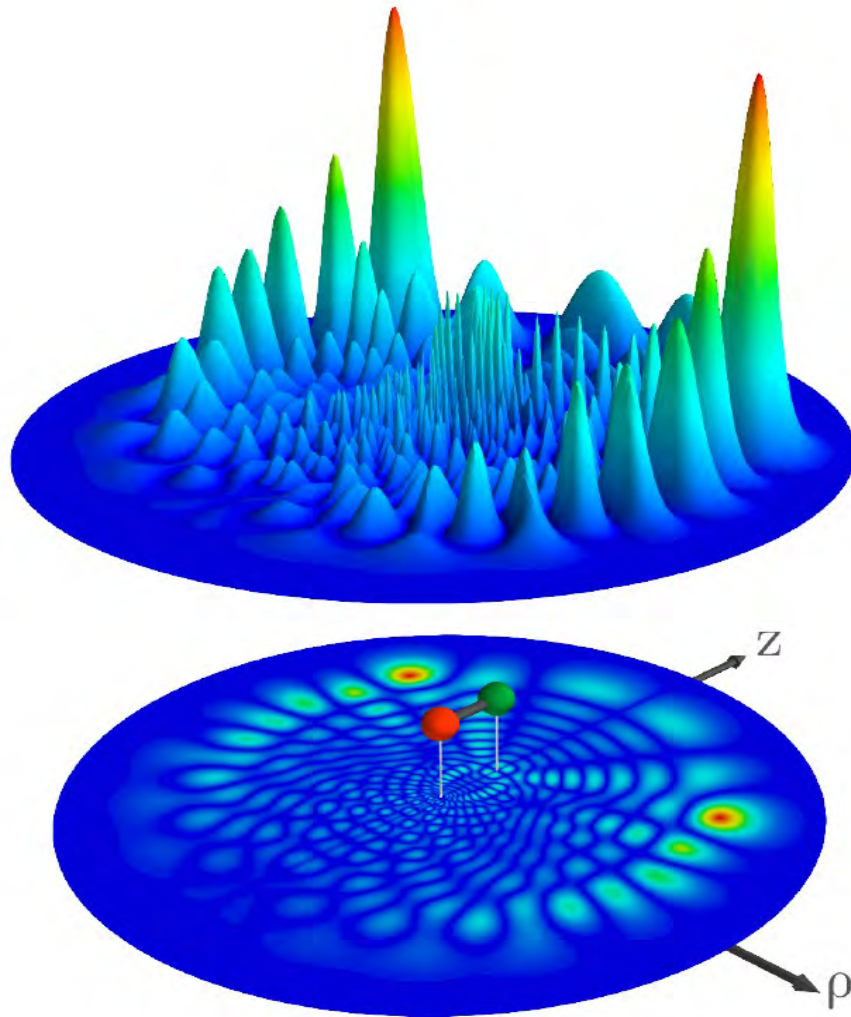


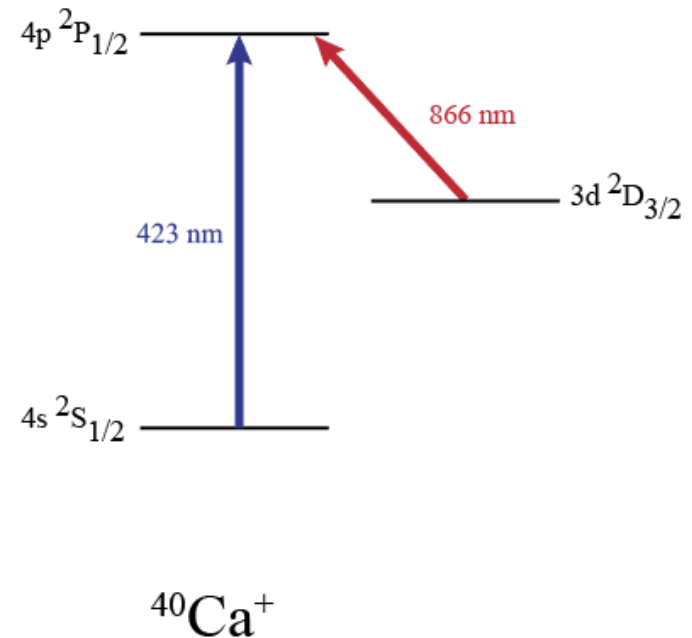
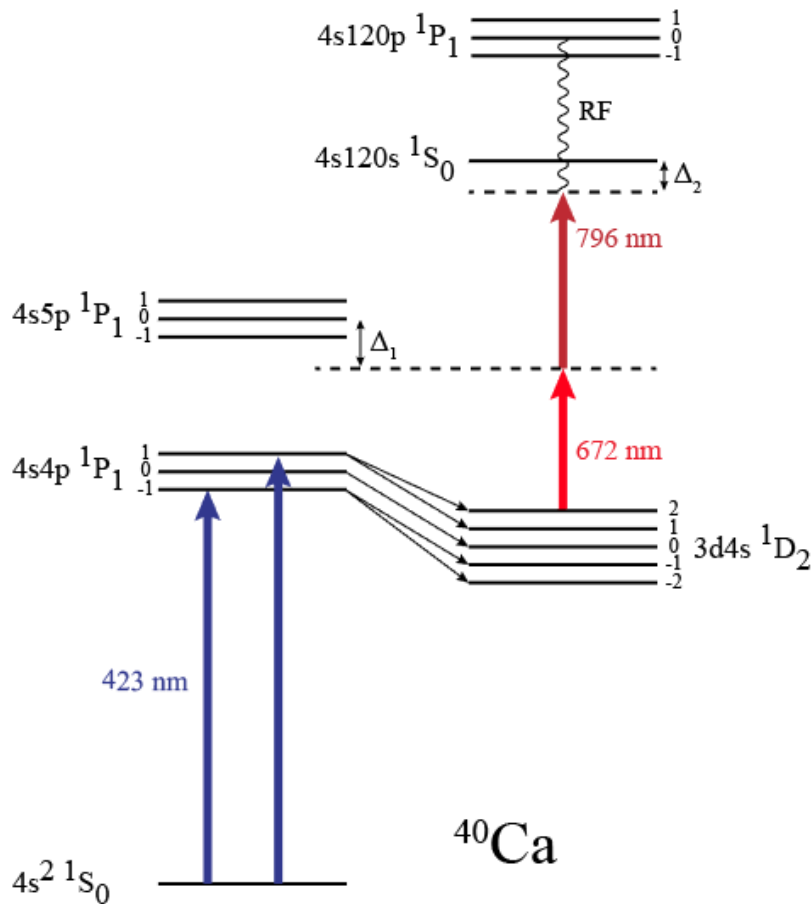
Fig. 3. Resonance amplitude of the Rydberg transition versus the ionizing laser power P_{390} and the ion density in the ultracold plasma.

Бабочка молекула

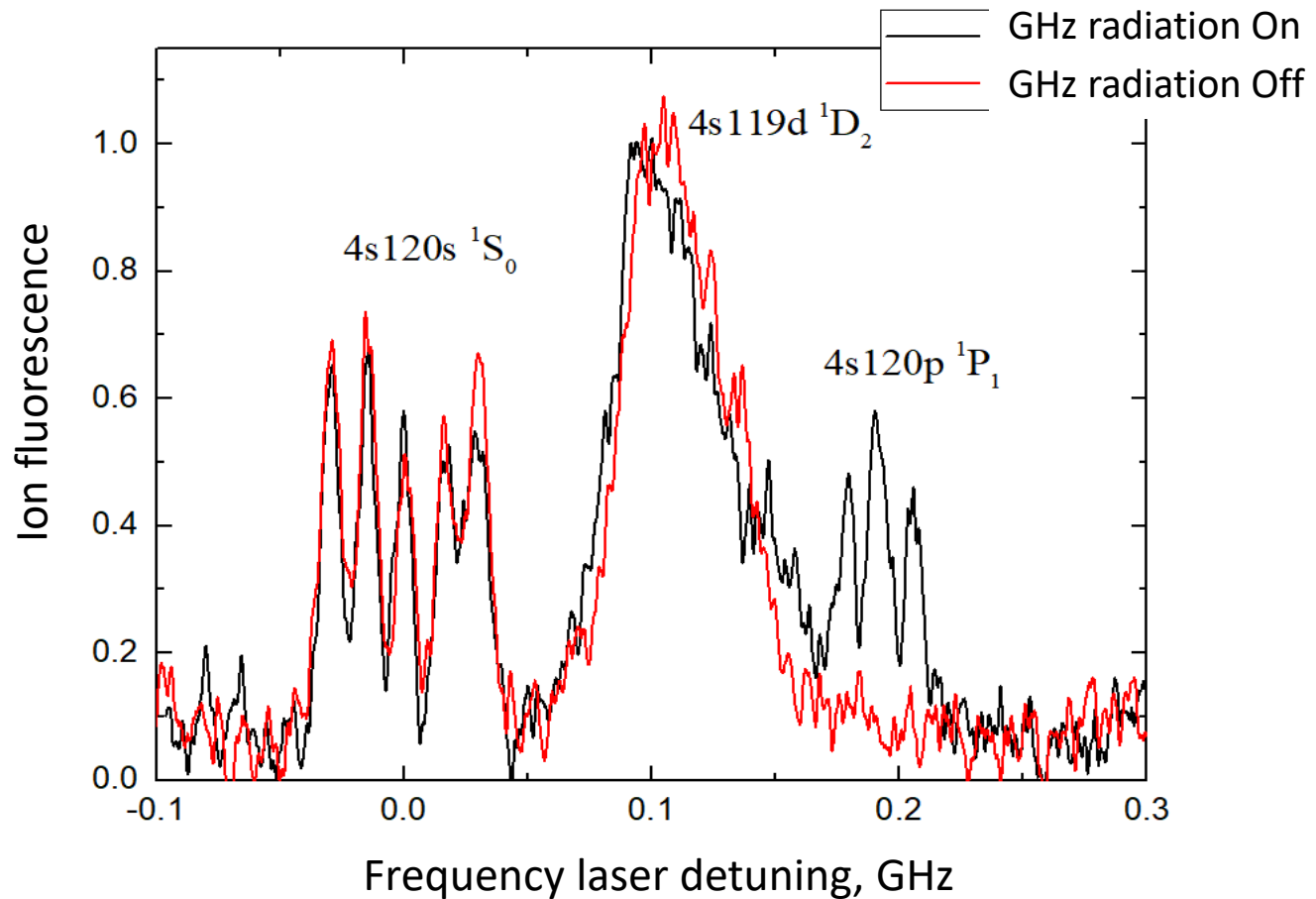


Niederprüm T. et al.
Observation of pendular
butterfly Rydberg molecules
//Nature communications. –
2016. – Т. 7.

The spectroscopy of Rydberg atoms using the autoionization effect of Rydberg states and a microwave field

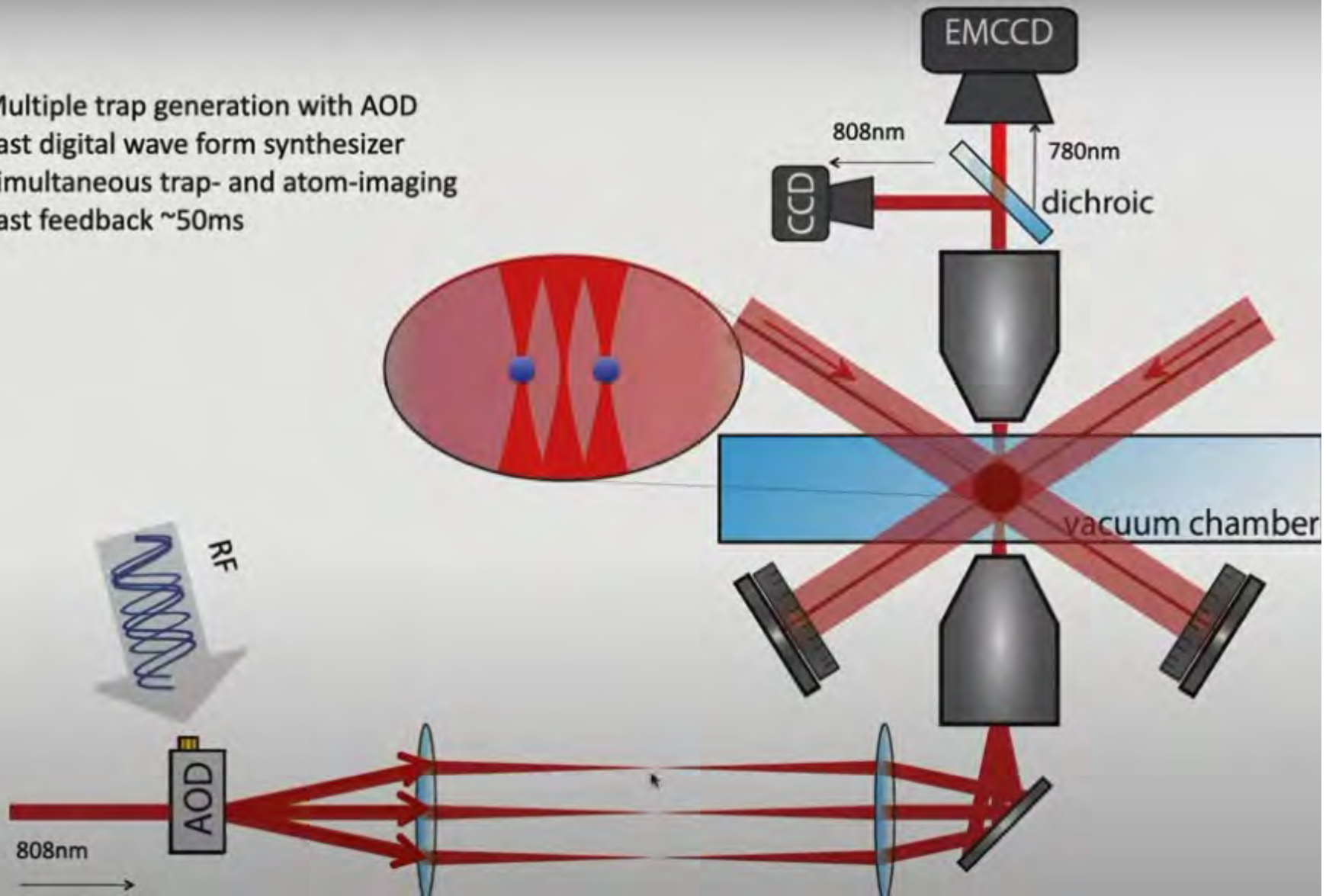


The spectroscopy of Rydberg atoms using the autoionization effect of Rydberg states and a microwave field

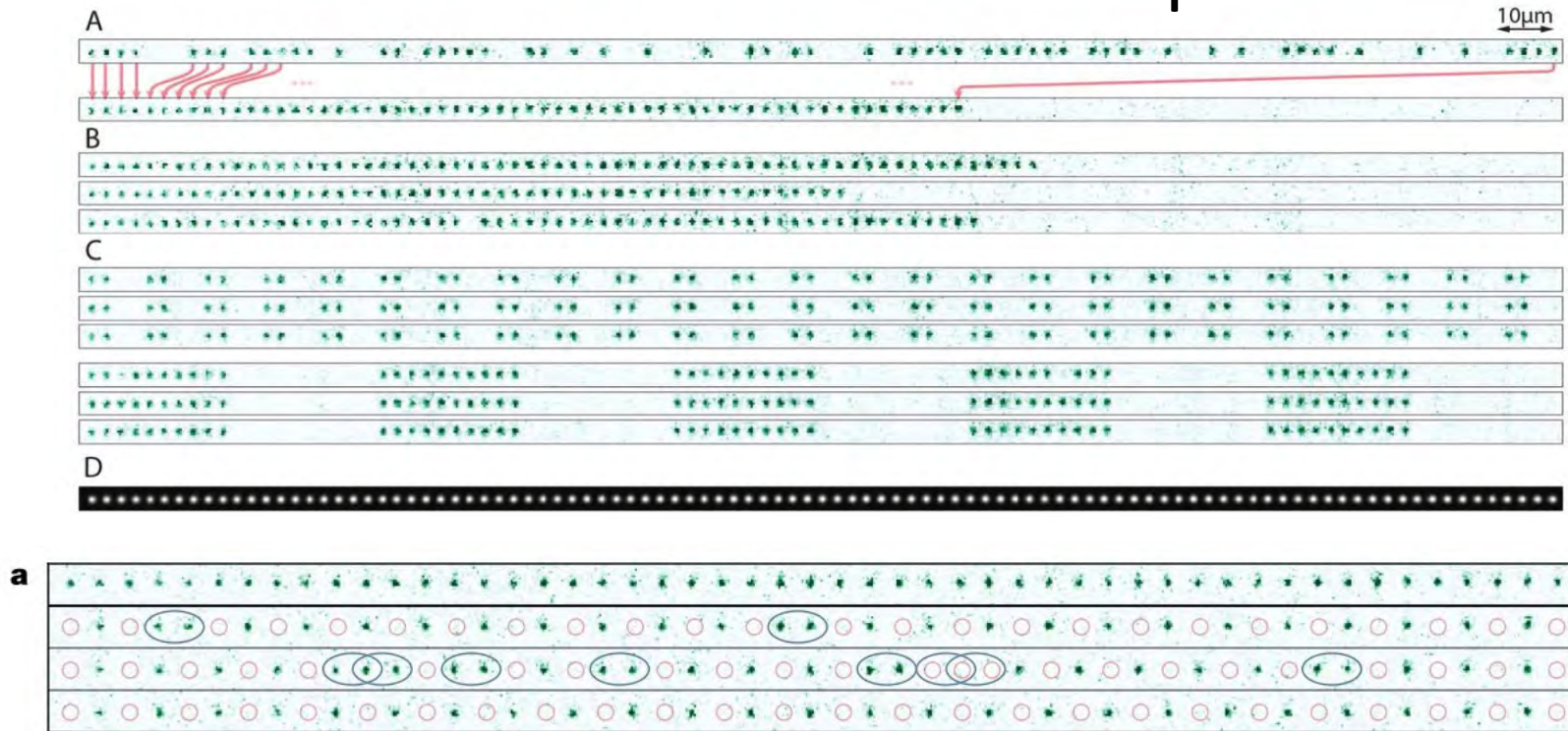


Квантовый симулятор на холодных атомах

- Multiple trap generation with AOD
- Fast digital wave form synthesizer
- Simultaneous trap- and atom-imaging
- Fast feedback $\sim 50\text{ms}$

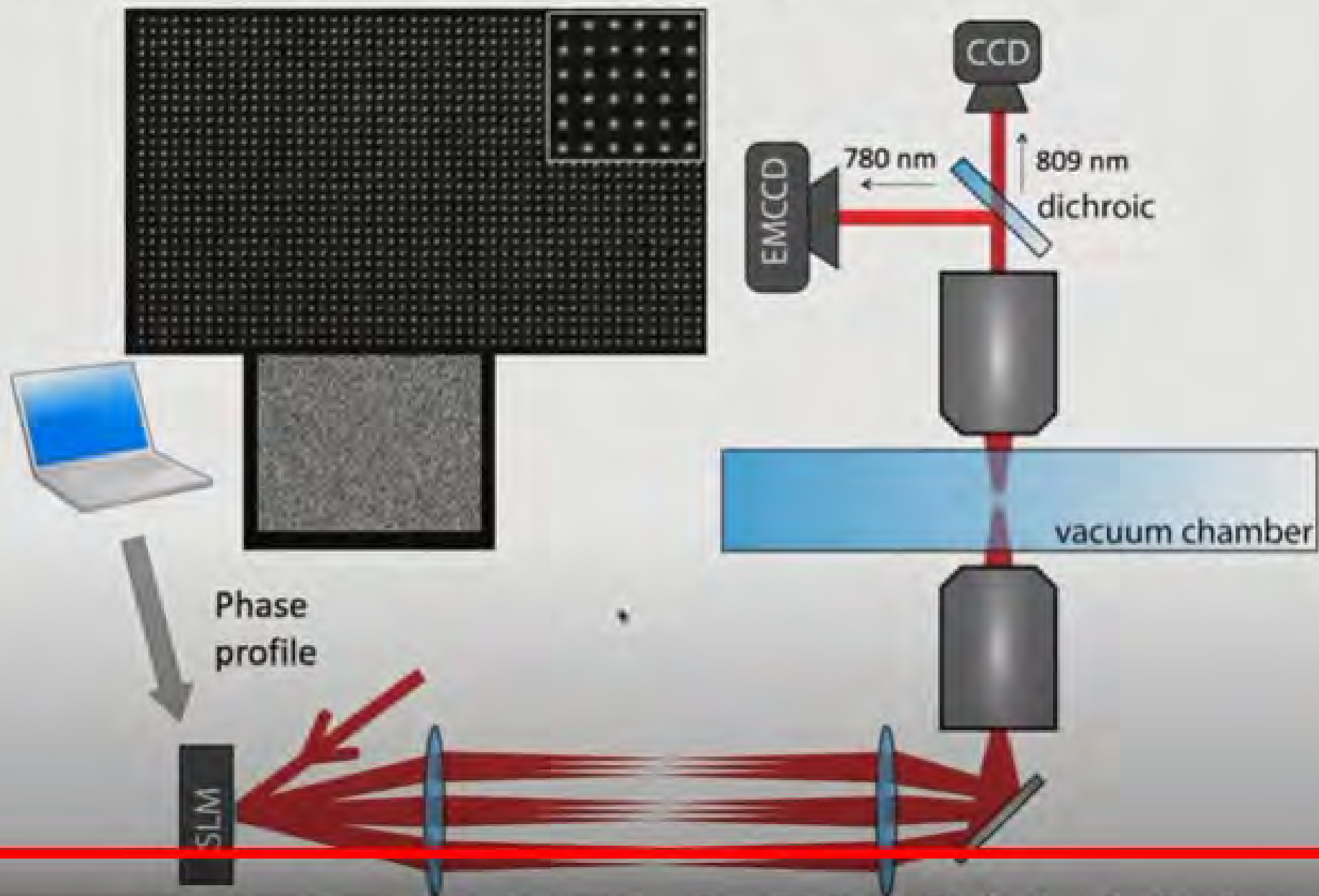


Сборка регулярных массивов атомов для квантового компьютера



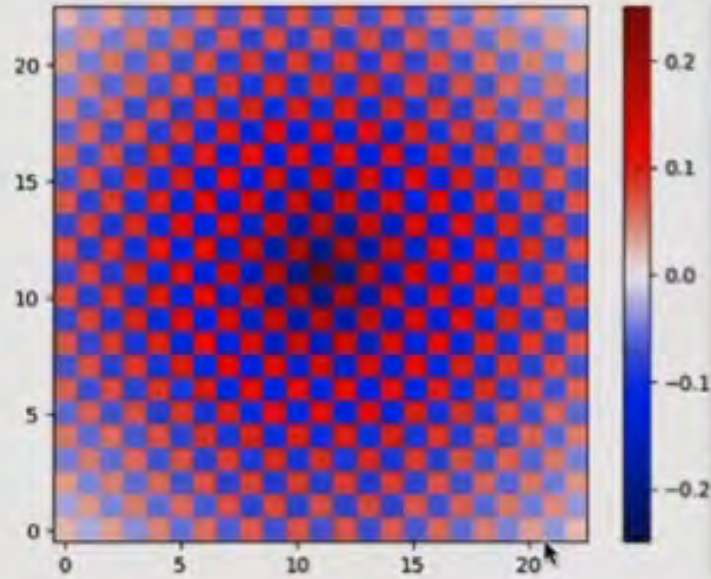
Endres M. et al. Atom-by-atom assembly of defect-free one-dimensional cold atom arrays //Science. – 2016. – C. aah3752.

Tweezer Array Gen 2: powered by an SLM



Ising QPT on 2D square lattice

Correlations $g^2(i, j) = \langle n_i n_j \rangle - \langle n_i \rangle \langle n_j \rangle$



Distribution of defect number

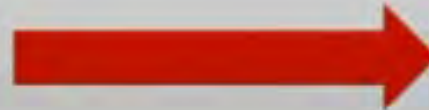
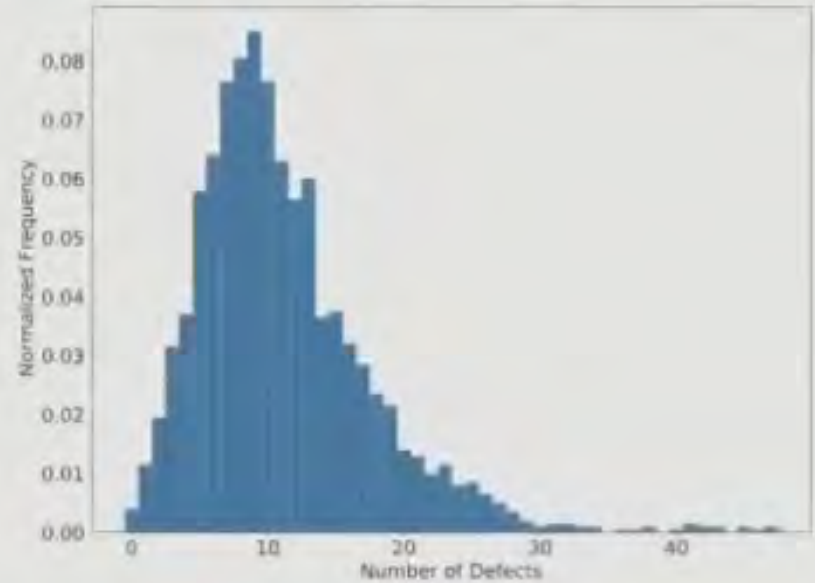


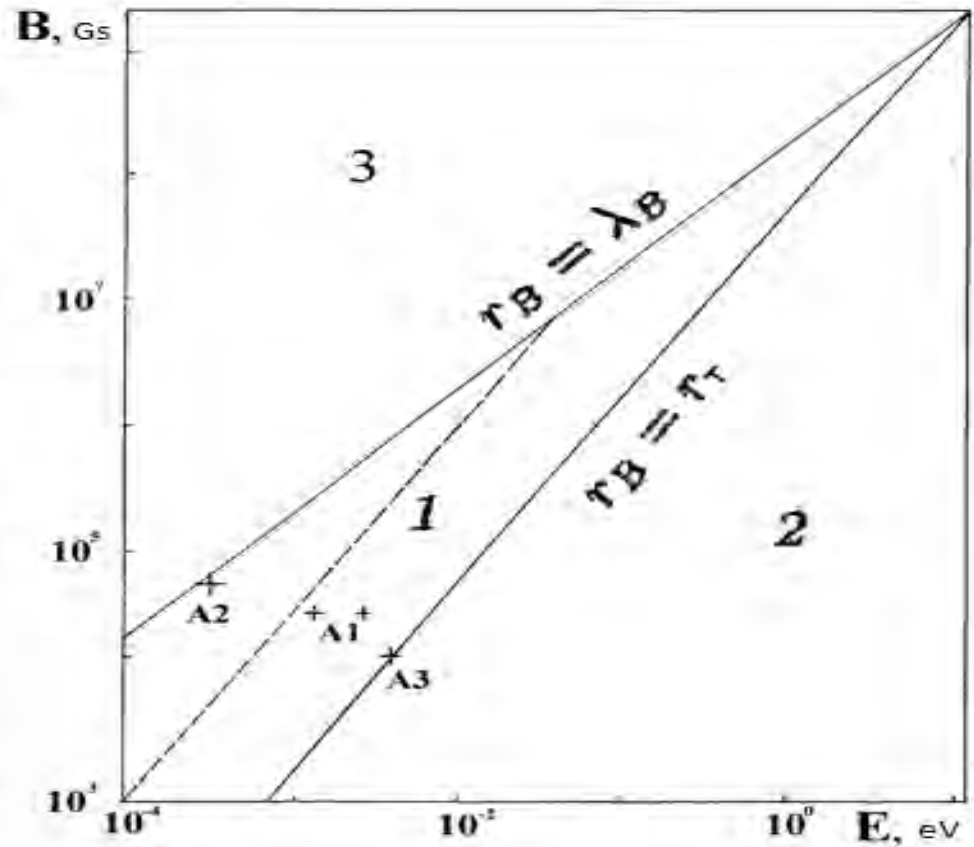
Диаграмма магнитное поле – энергия электрона

$$r_D = \left[\frac{k_b T_e}{4\pi n_e e^2} \right]^{1/2} \quad r_B = \left[\frac{2E}{m_e \omega_B^2} \right]^{1/2}$$

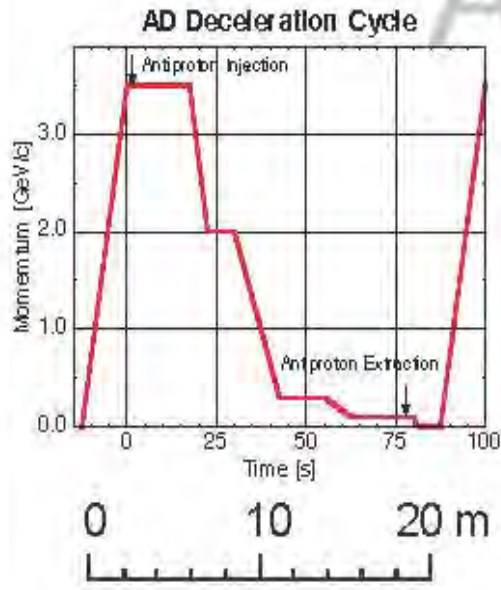
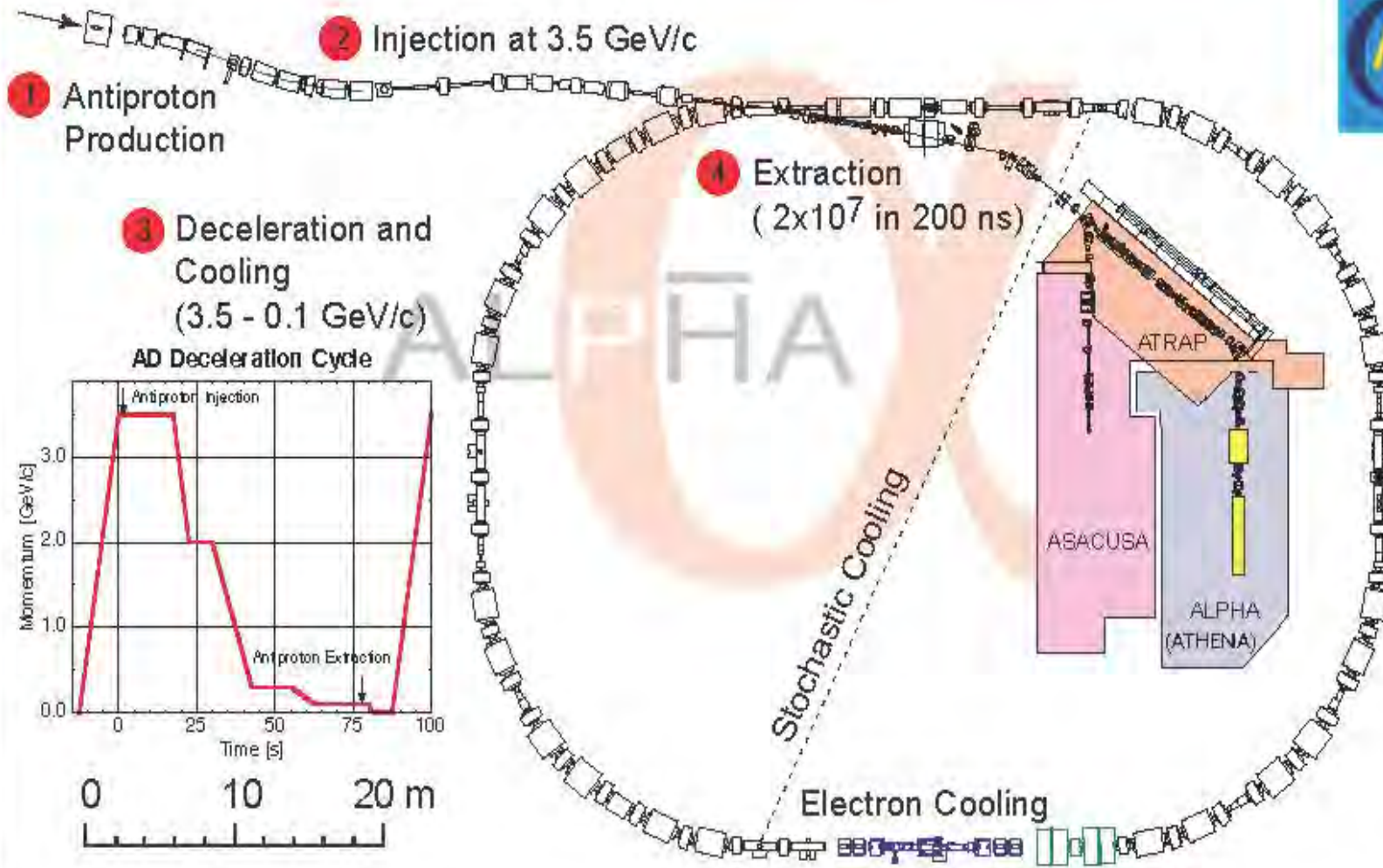
$$B_{cr} = e^3 m_e^2 c / \hbar^3 = 2,35 \cdot 10^9 \text{ Гс}$$

$$\lambda_B = V_e / \omega_B$$

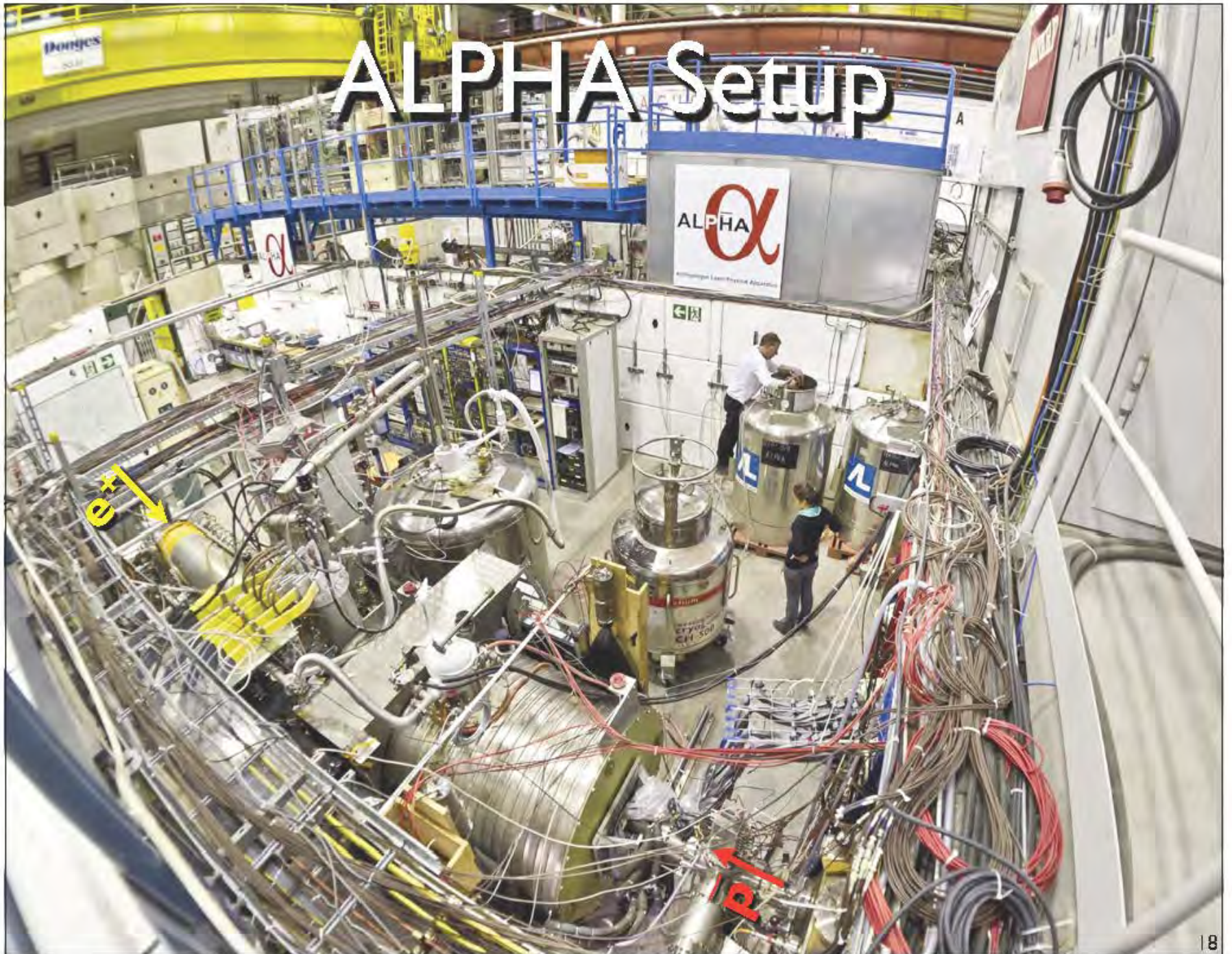
$$\omega_B = \frac{eB}{m_e c} \quad r_T = \frac{e^2}{2E}$$



Antiproton Decelerator



ALPHA Setup



Сравнение с экспериментом

1. A1: $N_H(15K)/N_H(30K)=2,8$; эксп. - 2,6

2. A1-A2: $N_H(4K)/N_H(15-18K)=2,25-4$; эксп. - 4,0

3. A2: $\Delta N_{\bar{H}} = n_e^2 n_p \alpha_B \Delta t \Delta V = 1,3$; эксп. - 1,0

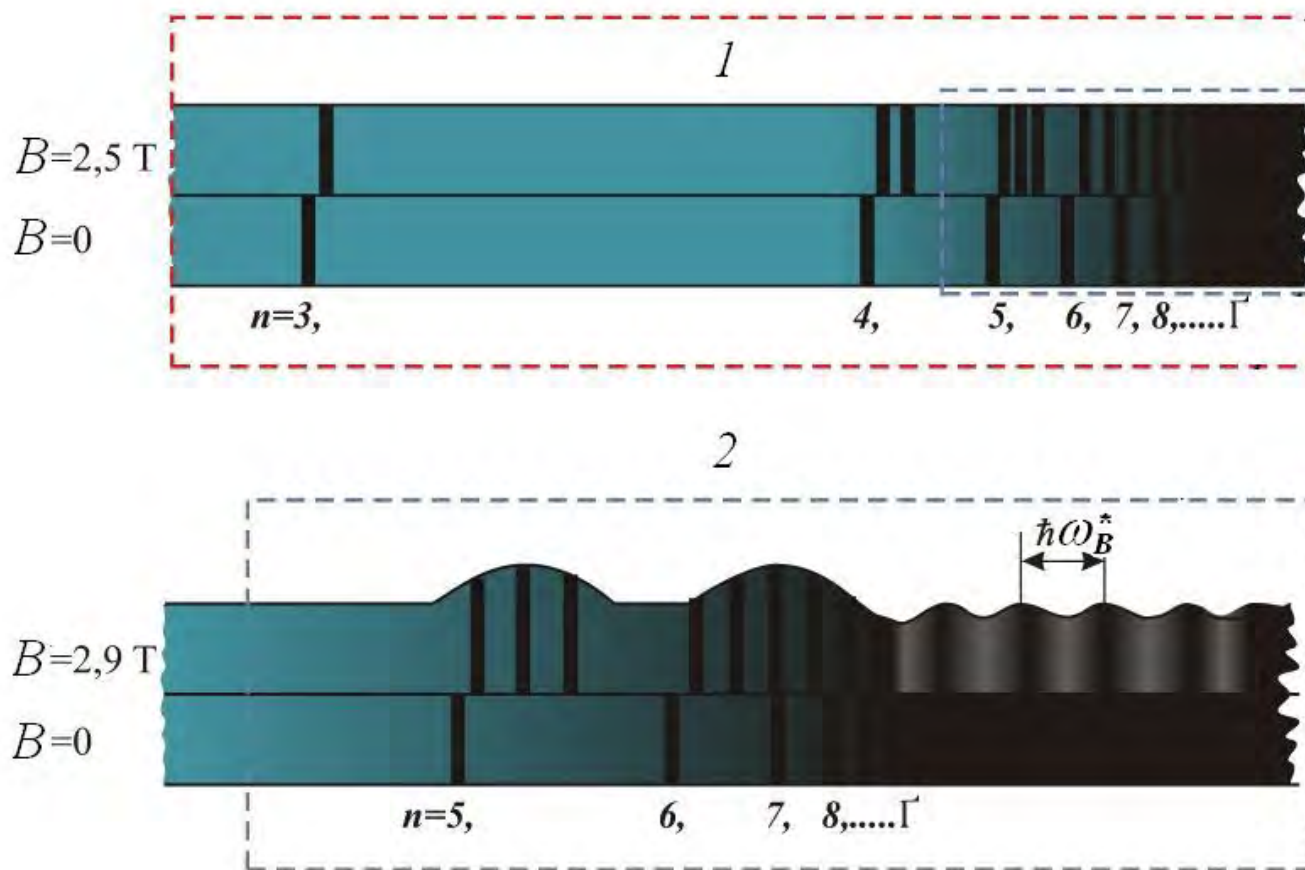
4. A3: $\Delta N_{\bar{H}} = n_e^2 n_p \alpha_B \Delta t \Delta V = (5,2 - 8,1) \times 10^3$; эксп. - 6×10^3

A1: Amoretti M. et al. High rate production of antihydrogen //Physics Letters B. – 2004. – Т. 578. – №. 1. – С. 23-32.

A2: Gabrielse G. et al. Background-free observation of cold antihydrogen with field-ionization analysis of its states //Physical Review Letters. – 2002. – Т. 89. – №. 21. – С. 213401.

A3: Alpha Collaboration et al. Confinement of antihydrogen for 1,000 seconds //Nature Physics. – 2011. – Т. 7. – №. 7. – С. 558-564.

Магнитная стабилизация ридберговских атомов и многочастичных комплексов в ультрахолодной плазме, находящейся в магнитном поле.



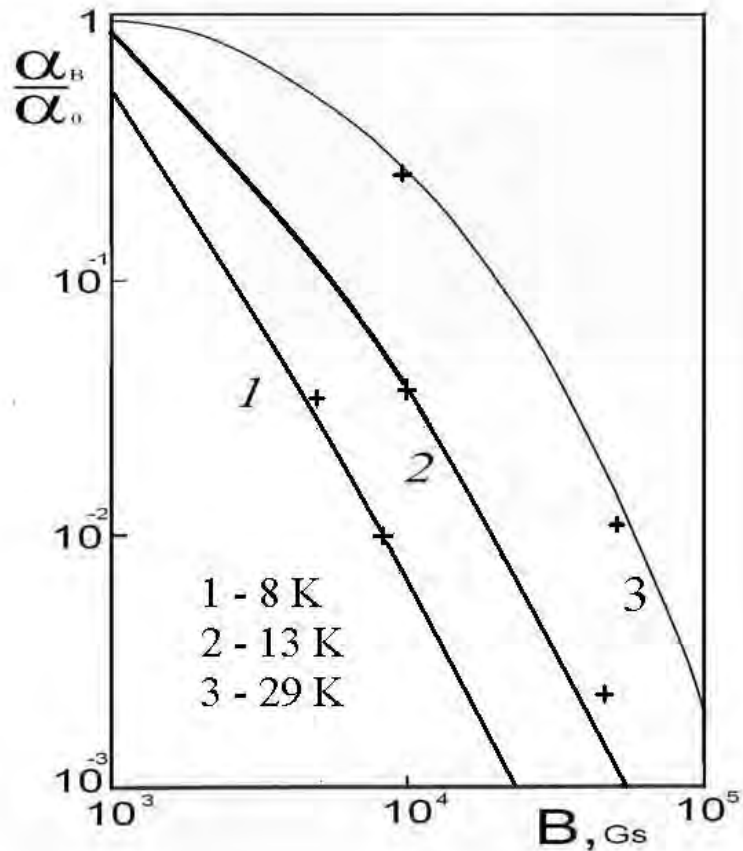
Спектрограммы закиси меди

Коэффициент рекомбинации в сильном магнитном поле

$$\alpha_B = 17,2 \bar{v}_e r_T^5 (r_B / r_T)^2$$

$$\alpha_B \sim T_e^{-3/2} \quad \alpha_B \sim B^{-2}$$

Скорость рекомбинации в зависимости от величины магнитного поля В

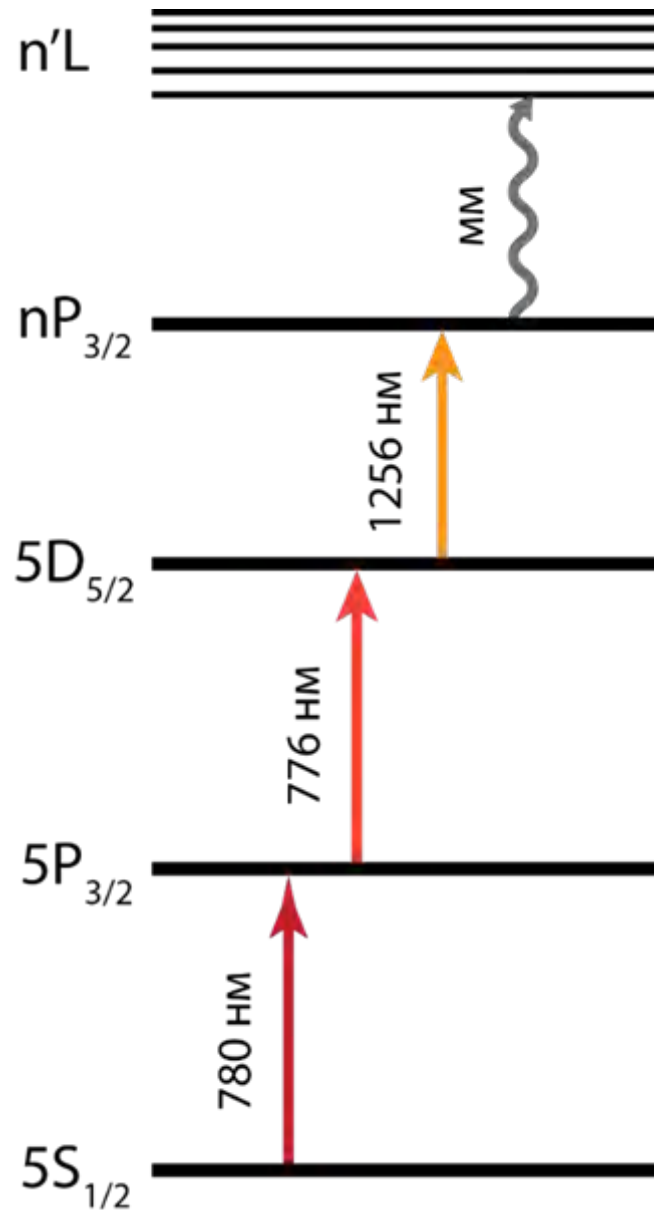


$$\alpha = \left[\frac{n_e^0}{\lambda_e^3} \int_0^{E_0/T} \frac{dE/T}{f(E/T)D(E/T)} \right]^{-1}$$

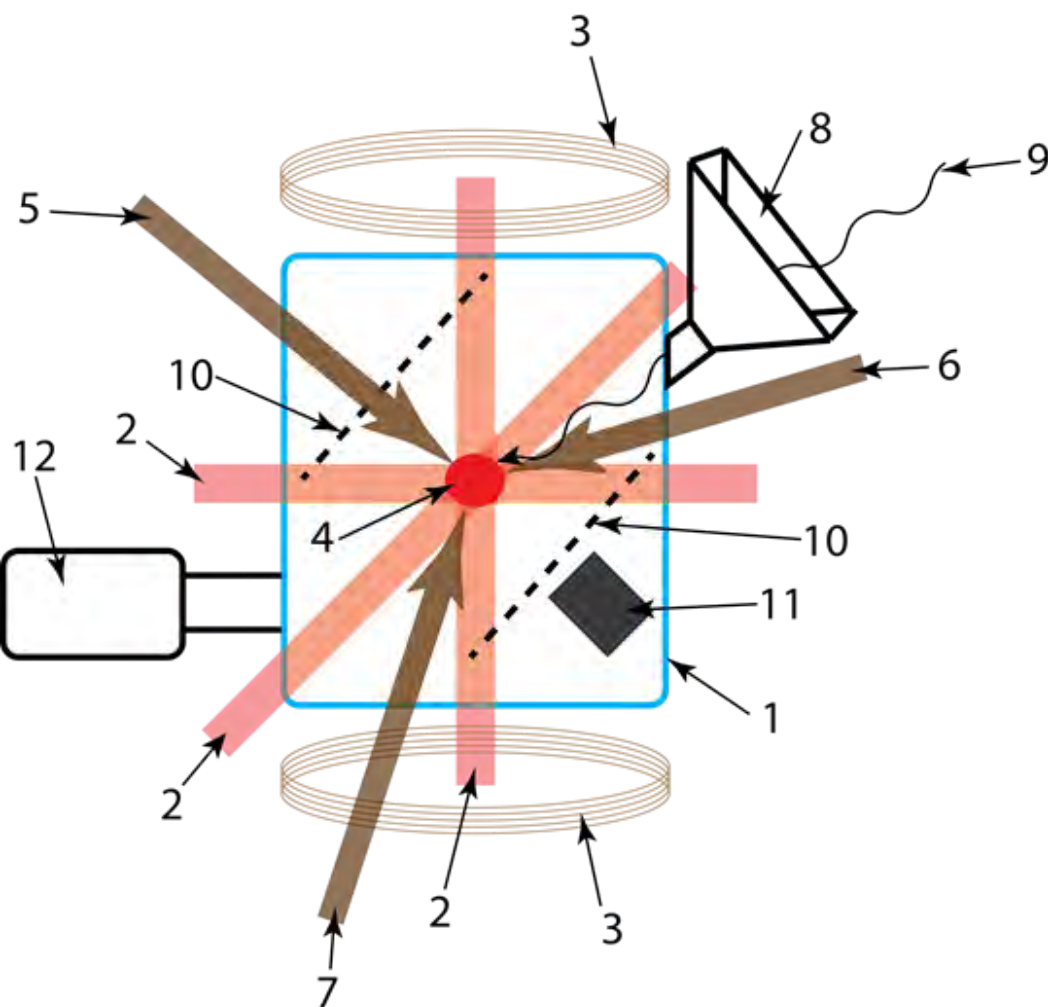
$$\alpha_B/\alpha_0 = 1 - \exp[-(r_B/r_T)^2]$$

Время жизни ультрахолодной плазмы можно увеличить на порядки!

Схема уровней атома рубидия-85

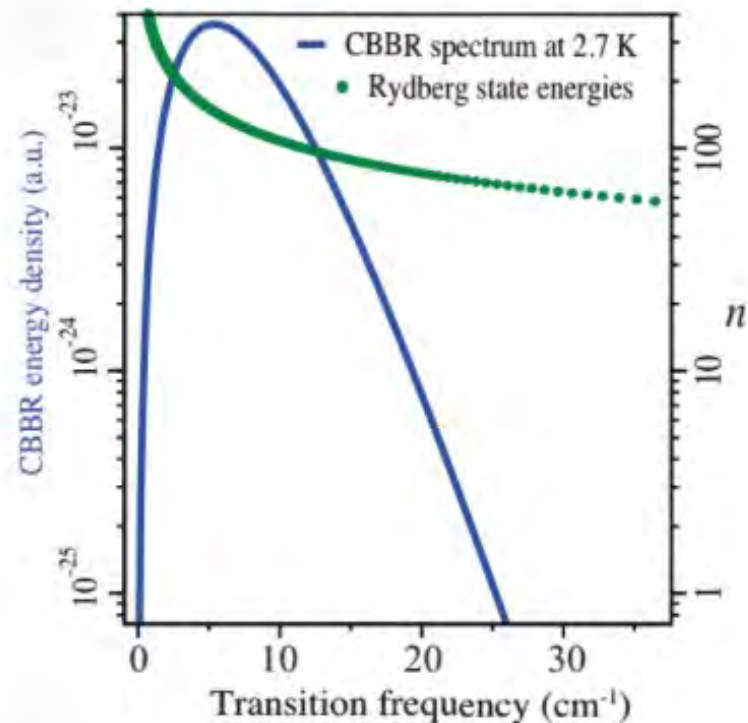
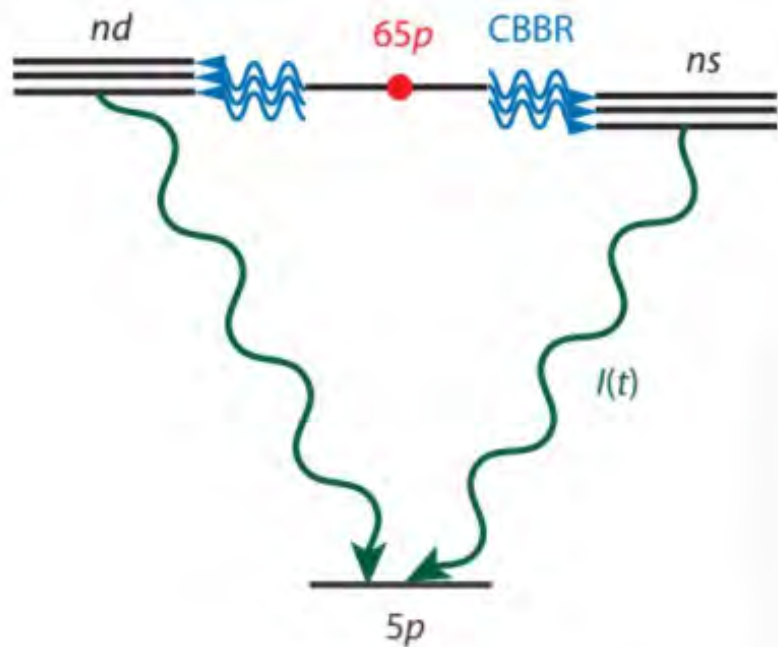


Принципиальная схема детектора.



1 – Кварцевая вакуумная камера; 2 – лазерные пучки, формирующие МОЛ; 3 – катушки формирующие градиент магнитного поля порядка 10-20 Гс/см; 4 – облако ультрахолодных атомов рубидия-87 в МОЛ, область локализации атомного ансамбля; 5, 6, 7 – лазерные пучки, возбуждающие нейтральные атомы рубидия-87 в ридберговские состояния, с длиной волны 780, 776 и 1256 нм; 8 – компактная антенна для концентрации детектируемого микроволнового излучения в области локализации; 9 – микроволновое излучение; 10 – пластины для селективной полевой ионизации ридберговских атомов электрическим полем; 11 – детектор заряженных частиц; 12 – блок ионного насоса и диспенсера – источника атомов рубидия-87

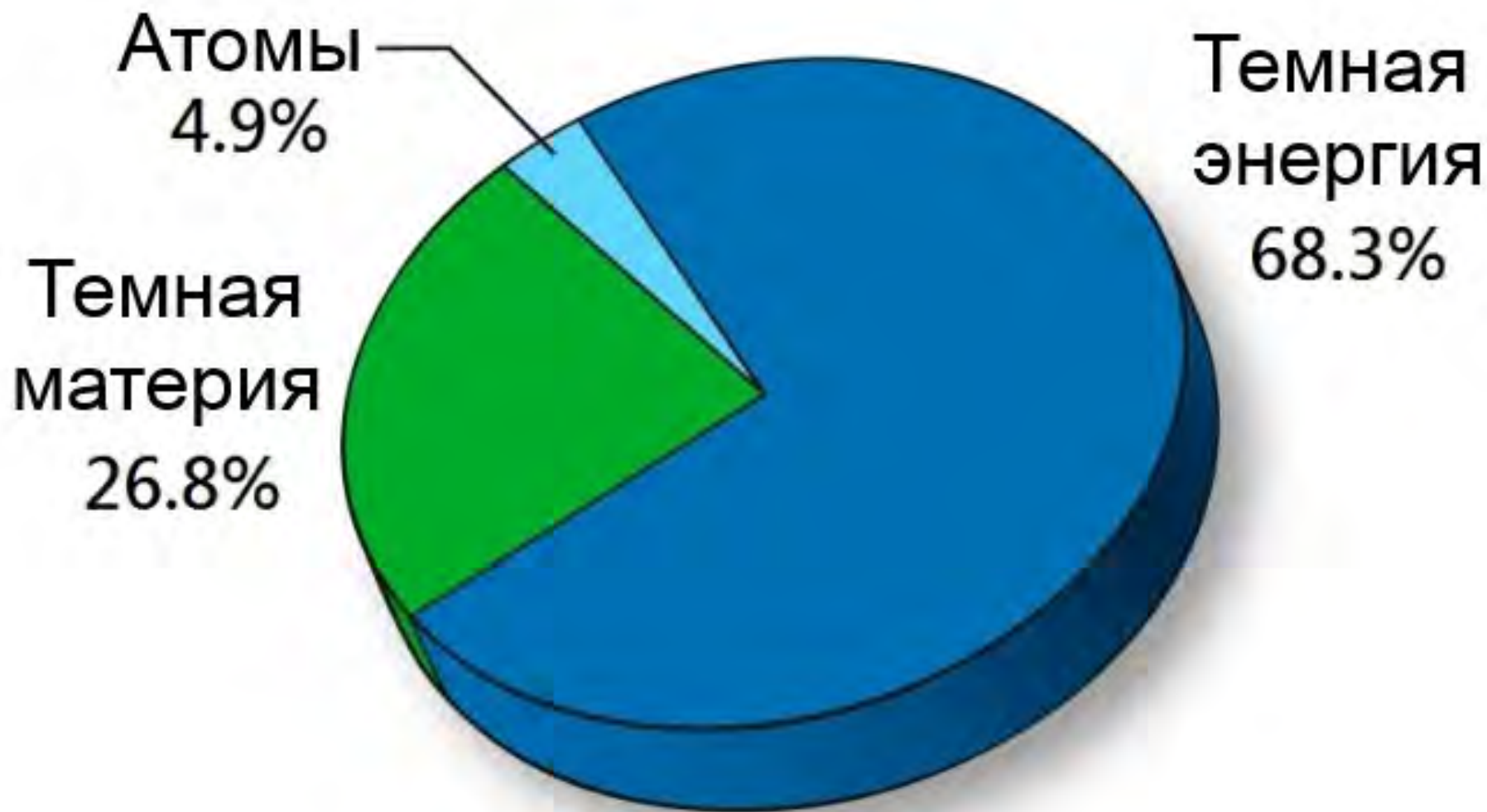
Квантовый детектор будет иметь очень широкий диапазон регистрируемых частот



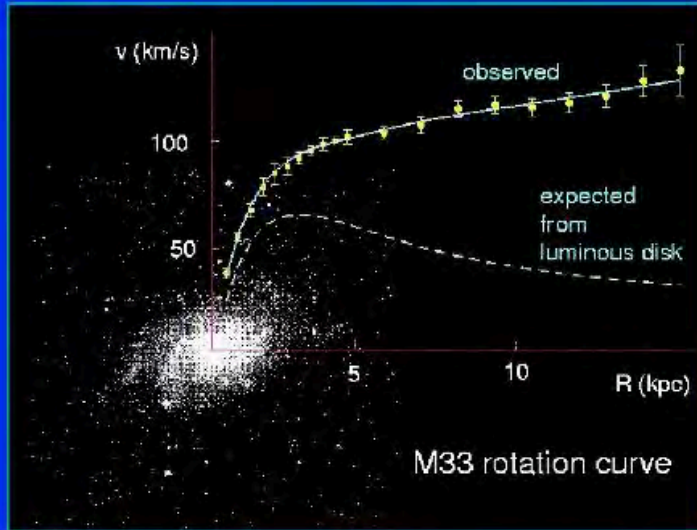
$$0,1 \text{ cm}^{-1} = 2,998 \text{ ГГц} = 100 \text{ мкм}$$

$$10 \text{ cm}^{-1} = 299 \text{ ГГц} = 1 \text{ мм}$$

$$40 \text{ cm}^{-1} = 1199 \text{ ГГц} = 250 \text{ мкм}$$



Тёмная материя



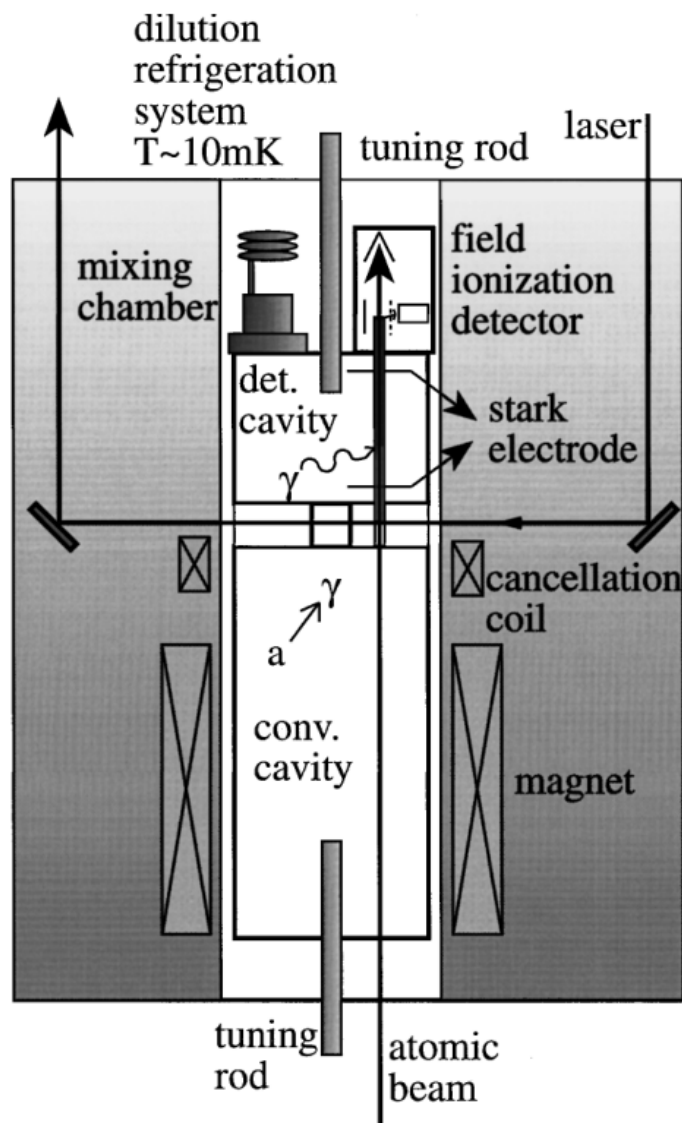
- Плоские ротационные кривые спиральных галактик являются прямым свидетельством наличия большого количества тёмной материи

- Спиральные галактики состоят из центрального ядра и очень тонкого диска и окружены приблизительно сферическим гало из тёмной материи. Скорость движения частиц гало ~ 300 км/сек



Регистрирование аксионов при помощи ридберговских атомов

Ogawa I., Matsuki S.,
Yamamoto K.
Interactions of cosmic
axions with Rydberg
atoms in resonant
cavities via the
Primakoff process
//Physical Review D.
– 1996. – T. 53. – №.
4. – C. R1740.



Спасибо за внимание!

