



Оптический стандарт частоты на основе ультрахолодных атомов магния: текущее состояние и перспективы.

А.Н. Гончаров^{1,2,3}, А.Э. Бонерт¹, Д.В. Бражников^{1,2}, М.А.Тропников^{1,2},
О.Н.Прудников¹ и А.В.Тайченачев^{1,2}, С.Н. Багаев^{1,2}

¹*ФГБУН Институт лазерной физики СОРАН*

²*Новосибирский национальный исследовательский гос. университет*

³*Новосибирский государственный технический университет*



State of the art in frequency standards

Primary Frequency Standard - ^{133}Cs in microwave $\nu = 9.19 \text{ GHz}$

Relative uncertainty – 2×10^{-16} (NIST, BNM-SYRT, PTB , *VNIIFTRI,*)

Метр – длина пути которую проходит свет в вакууме за **1/299 792 458** сек (практическая реализация – через длины волн стабильных лазеров с точно измеренной частотой) - **1983 г.**

Секунда – продолжительность равная **9192631770** периодам колебания излучения , резонансного переходу между двумя сверхтонкими подуровнями основного состояния атома ^{133}Cs (цезия) – **1967 г.**

Optical frequency standards with cooled and trapped atoms and ions

Q – factors – $10^{13} - 10^{14}$

Atoms: Ca, Mg, ^{171}Yb , ^{87}Sr , ^{88}Sr , Hg (^{171}Yb $\Delta\nu/\nu \sim 1.6 \times 10^{-18}$)

Single ions: Hg^+ , Al^+ , Yb^+ , Sr^+ , In^+ ... (Yb^+ $\Delta\nu/\nu \sim 3.2 \times 10^{-18}$)

Direct link between microwave and optical frequencies with

femtosecond laser comb

$$\Delta(\nu_{opt}/\nu_{micro}) < 10^{-18}$$

Toward primary optical time/frequency standard

Сен. 2006, Международный Консультативный Комитет «времени и частоты» (ССТФ) принял 4 вида оптических часов как 'вторичных стандартов времени' – кандидатов на переопределение «секунды»

Hg+, Yb+, Sr+ (ion trap clocks)

Sr lattice clock

Главное преимущество оптических стандартов в том, что высокая стабильность может быть получена за короткие времена усреднения, те можно существенно быстрее проводить точные измерения

Эффекты движения атомов – Doppler (1st, 2nd), отдача, пролетные эффекты являются основными ограничителями точности стандартов частоты

$$\Delta\nu/\nu \sim v/c \sim (T)^{0.5}$$

Практически весь прогресс связан с контролем движения – охлаждение и локализация

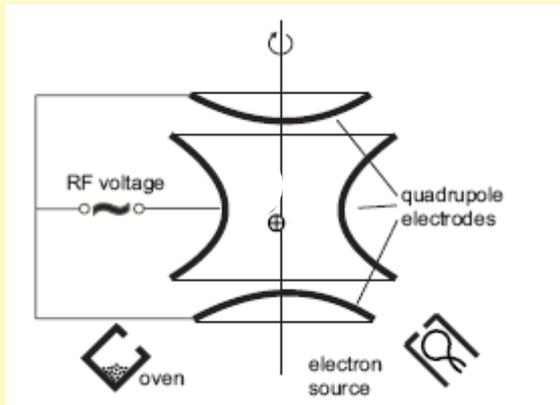
Для высокой точности стандарта необходимо работать с холодными атомами, лучше с ультрахолодными, еще лучше с локализованными в пространстве с размерами менее λ - режим Лэмба -Дике

Одиночные ионы

Hg⁺, Al⁺, Yb⁺, Sr⁺, In⁺...

Выше контроль движения

Выше точность

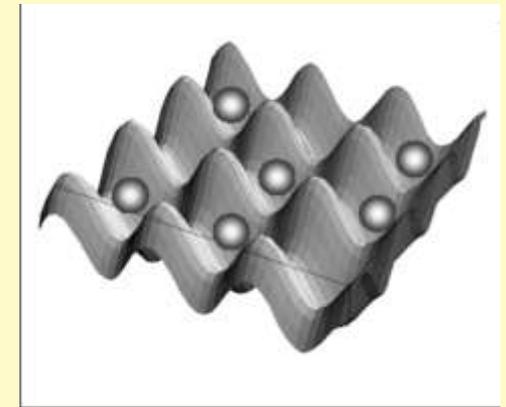


Щелочно-земельные атомы
Ca, Mg, ¹⁷⁴, ¹⁷³Yb, ⁸⁷, ⁸⁸Sr, Hg ...

Лучше S/N $N_{at} \sim 10^4 - 10^6$

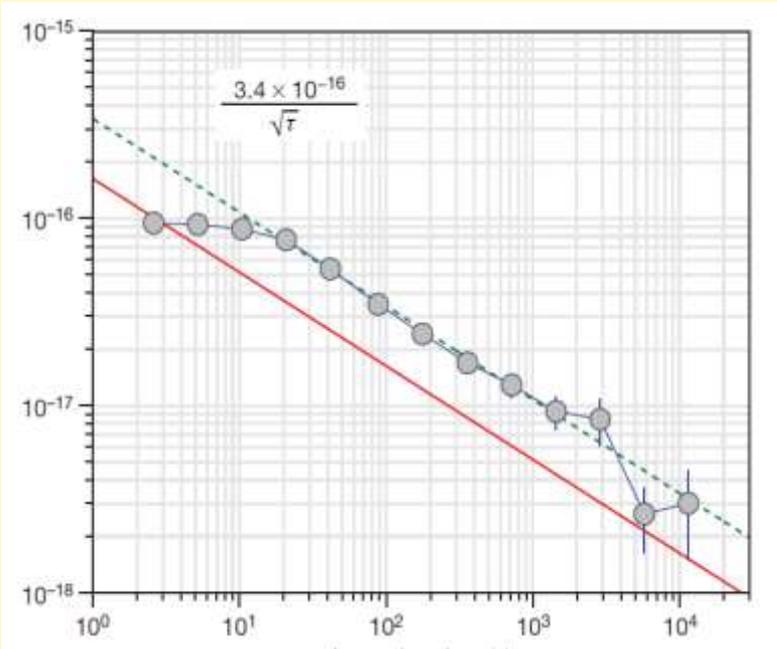
Выше стабильность σ (τ)

Optical lattice

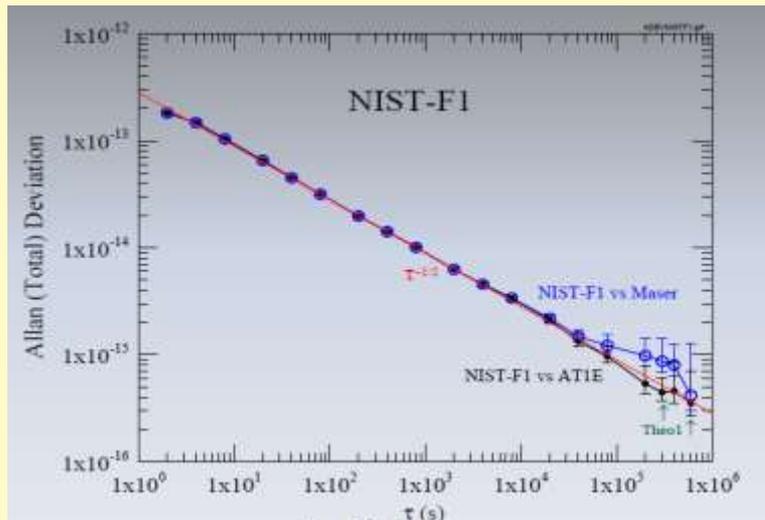


H. Katori et.al., Recoil-Free Spectroscopy of Neutral Sr Atoms in the **Lamb-Dicke Regime**, PRL 91, 053001 (2003)

Sr - standard



B.J. Bloom et.al., Nature 506,71(2014)



Yb - стандарт

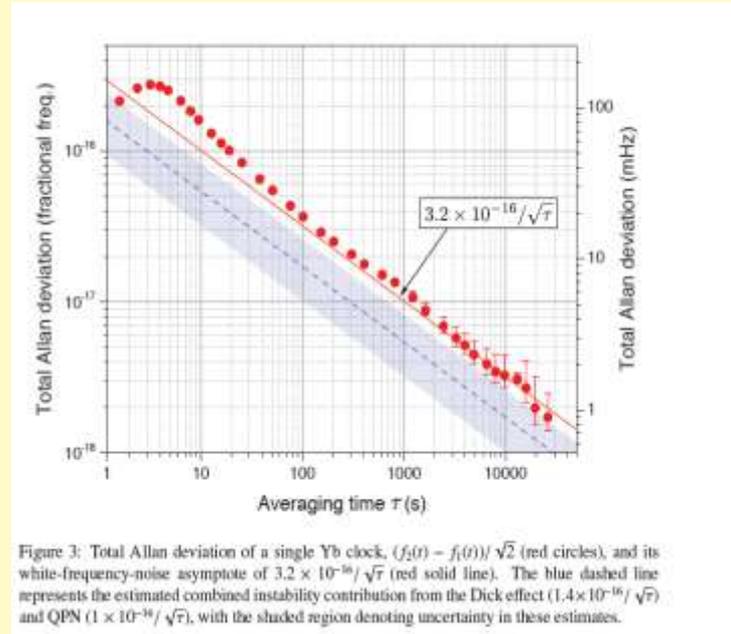


Figure 3: Total Allan deviation of a single Yb clock, $(f_2(t) - f_1(t)) / \sqrt{2}$ (red circles), and its white-frequency-noise asymptote of $3.2 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau}$ (red solid line). The blue dashed line represents the estimated combined instability contribution from the Dick effect ($1.4 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau}$) and QPN ($1 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau}$), with the shaded region denoting uncertainty in these estimates.

N. Hinkley et.al., Science 341,1215(2013)

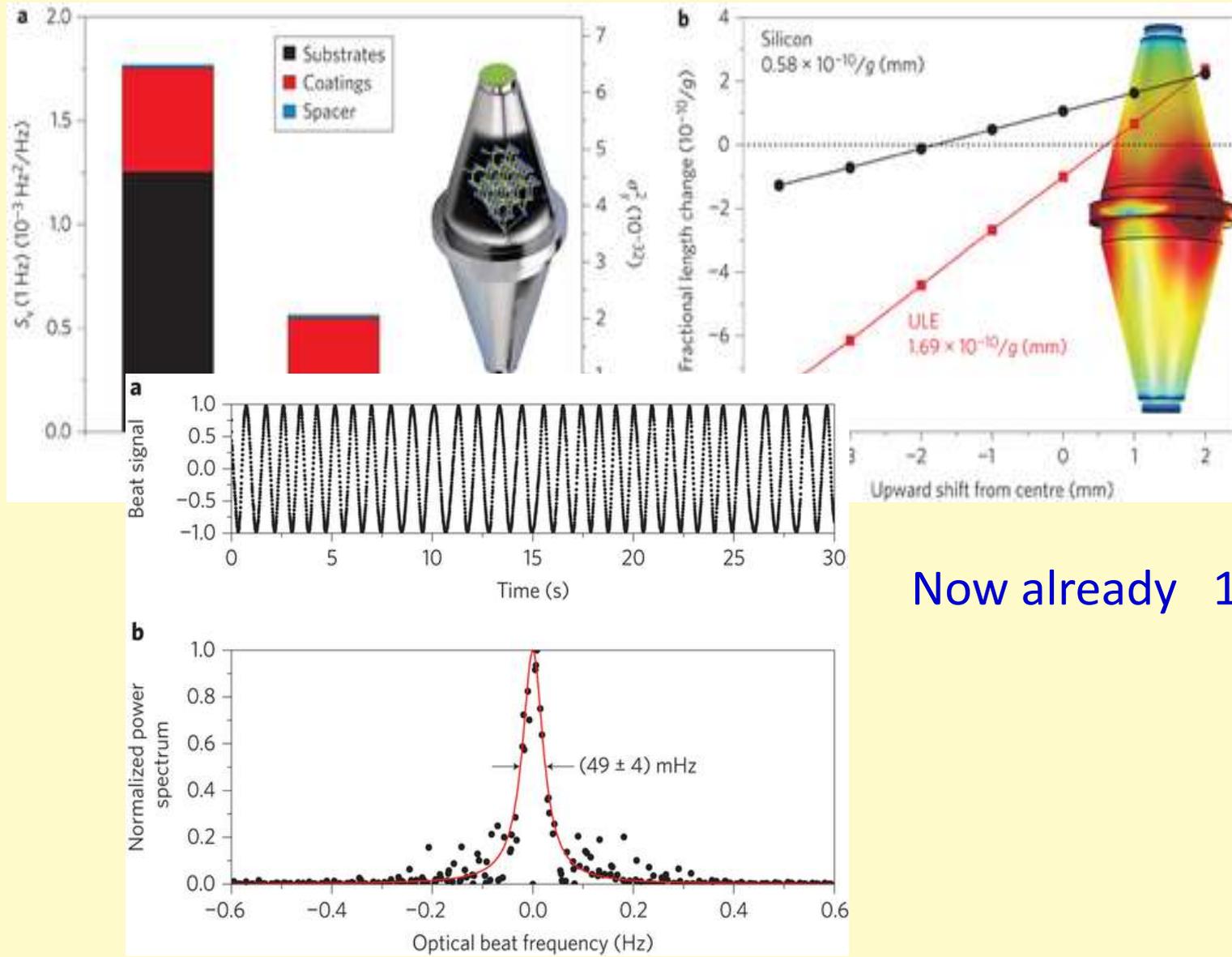
Ч1-1003М

1 с	$2 \cdot 10^{-13}$
10 с	$3 \cdot 10^{-14}$
100 с	$7 \cdot 10^{-15}$
1 ч	$2 \cdot 10^{-15}$
1 сут	$1 \cdot 10^{-15}$

A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity

[U. Sterr](#), [F. Riehle](#), [M. J. Martin](#), [L. Chen](#), [J. Ye](#),

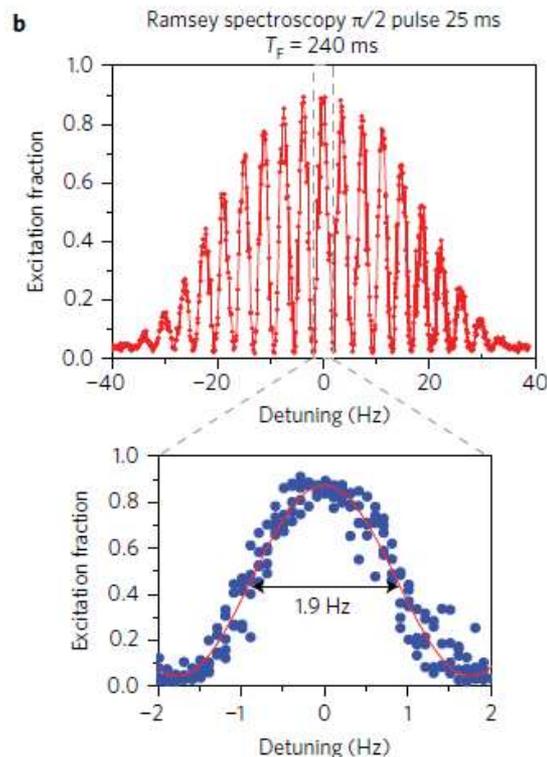
Nature Photonics, v.6, 687–692, (2012)



Now already 10 mHz!

Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles

M. Schioppo^{1,2,3}, R. C. Brown¹, W. F. McGrew^{1,2}, N. Hinkley^{1,2}, R. J. Fasano^{1,2}, K. Beloy¹, T. H. Yoon^{1,4}, G. Milani^{1,5,6}, D. Nicolodi¹, J. A. Sherman¹, N. B. Phillips¹, C. W. Oates¹ and A. D. Ludlow^{1*}



$$6 \times 10^{-17} / \sqrt{\tau}$$

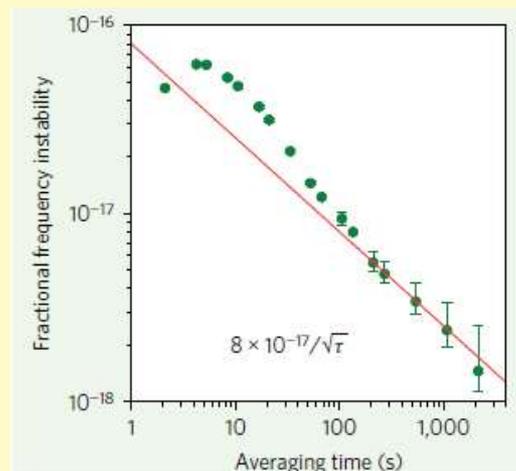
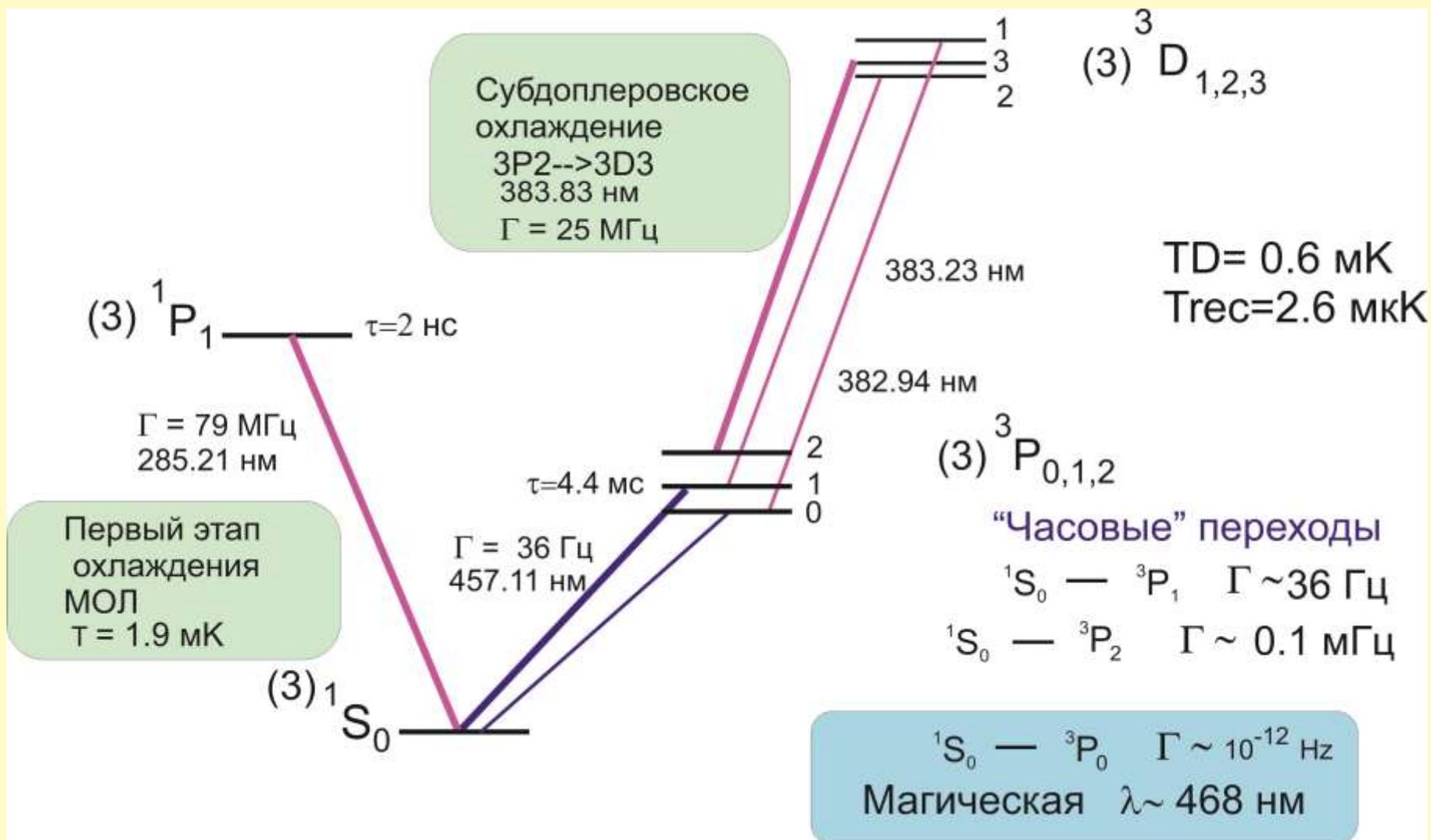


Схема уровней магния



Атомы магния являются перспективными для создания оптического стандарта частоты с погрешностью менее 10^{-16}

- Наиболее простой щелочно-земельный атом, для которого была реализовано охлаждение и локализация.



Простая структура ($1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2$) – как у Al^+
3 изотопа - ^{24}Mg (79%), ^{25}Mg (10%), ^{26}Mg (11%)

- Узкий $1S_0 \rightarrow 3P_1$ переход (36 Гц)
- Малый VBR сдвиг - -0.26 Гц (300 K/T)⁴
- Интересная 2-е система для изучения столкновений

- Сложность лазерных систем



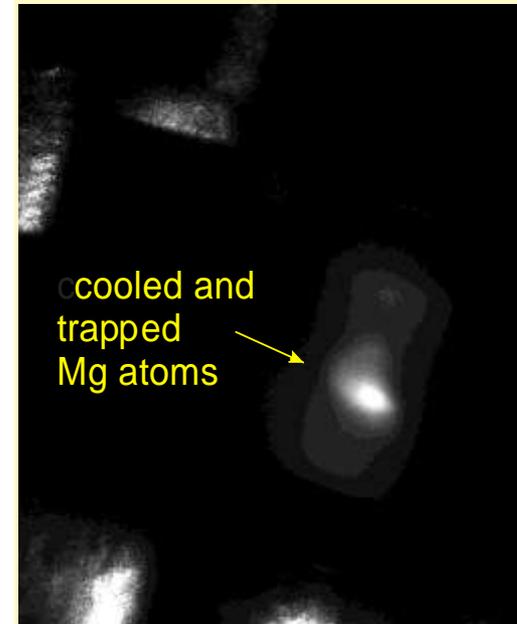
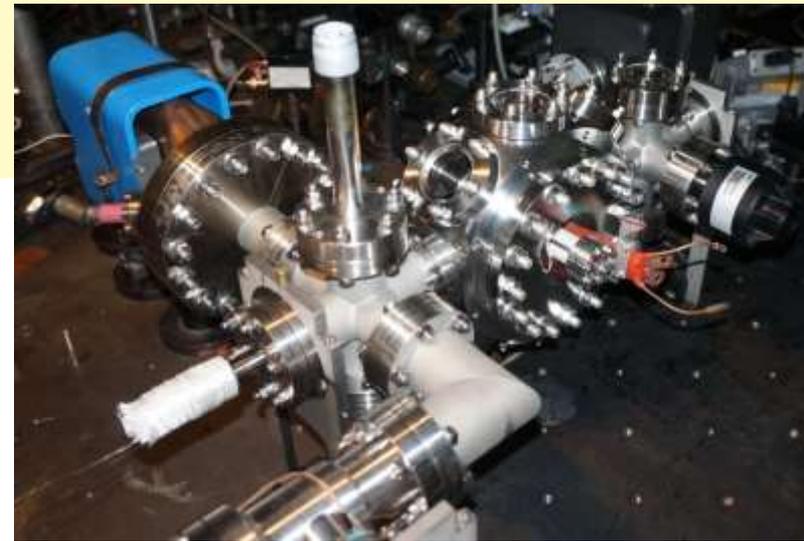
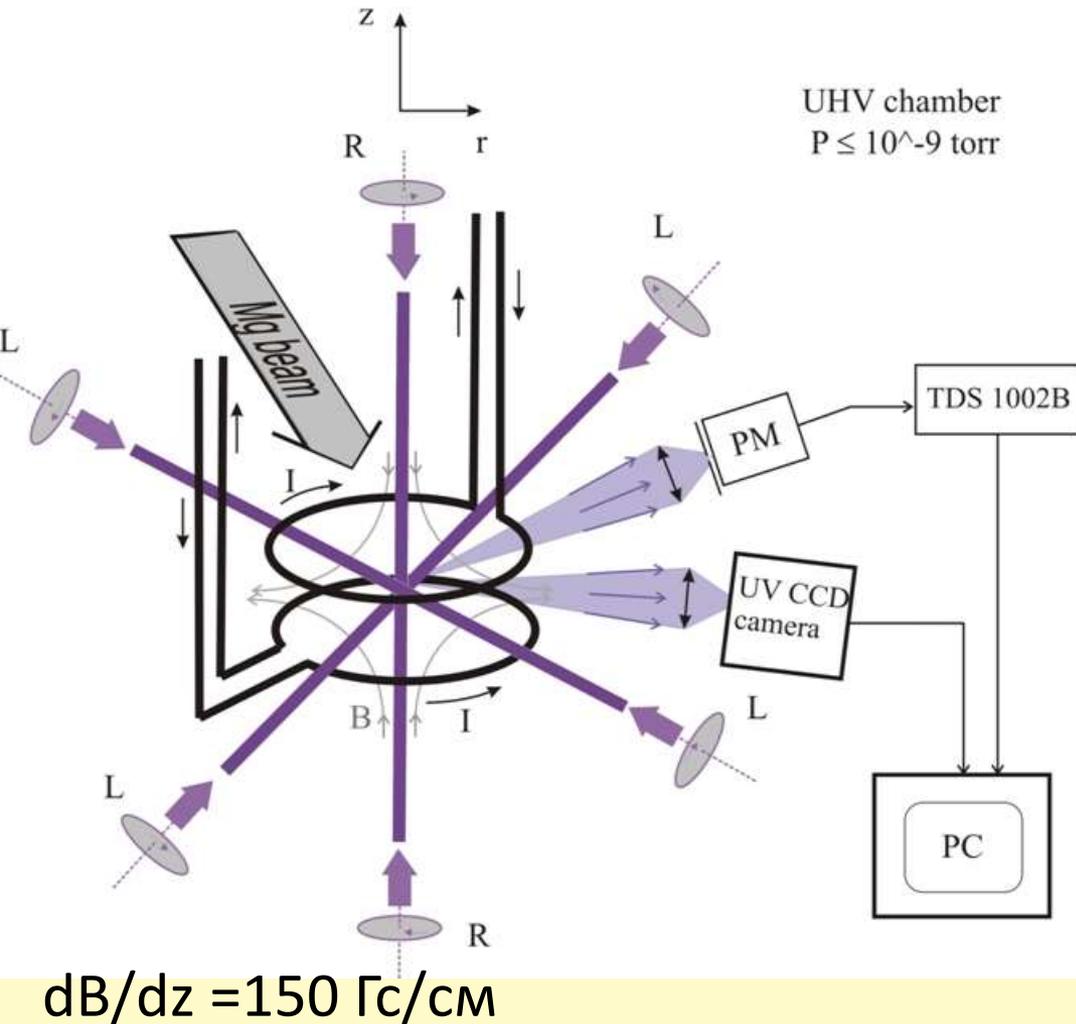
- Сложность реализации «субдоплеровского» охлаждения

▪ связанного с большой величиной эффекта отдачи $\delta/2\pi = h/(2M \lambda^2) = 39.6 \text{ KHz}$

относительно большая величина квадратичного эфф. Зеемана $-217(11) \text{ MHz/T}^2$

Атомы Mg локализуются и охлаждаются в магнито-оптической ловушке

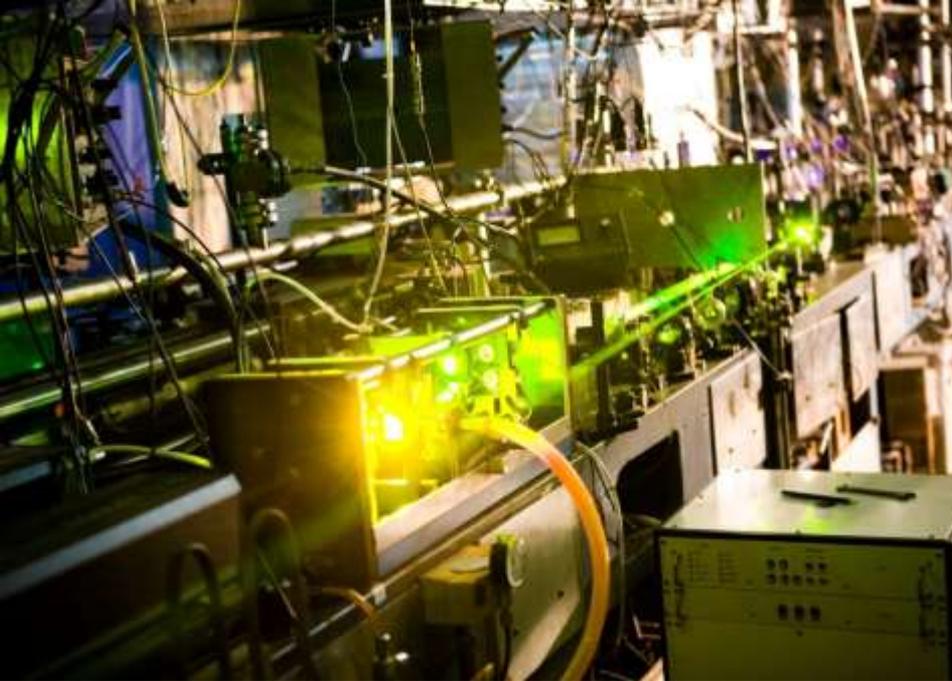
Mg MOT



$N_{\text{at}} \sim 10^6 - 10^7$

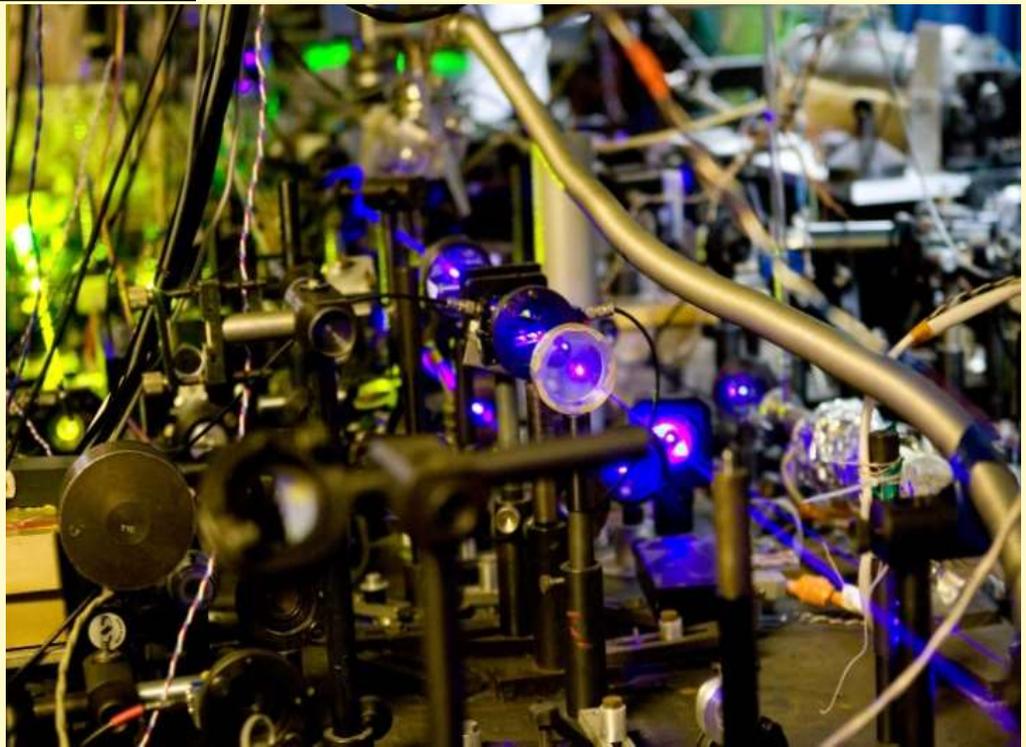
Диаметр облака $\sim 0.2 - 0.5 \text{ mm}$

$T \sim 3 - 5 \text{ mK}$



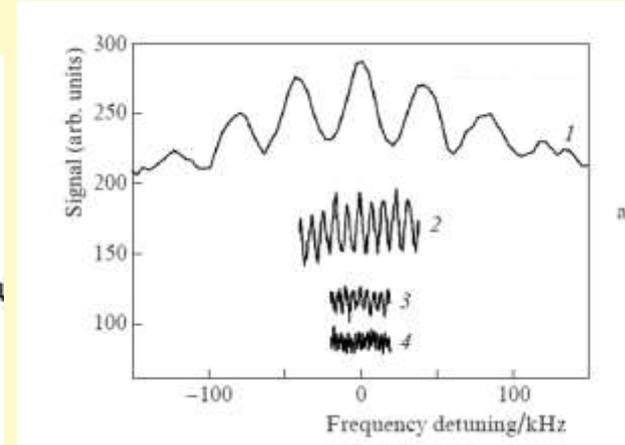
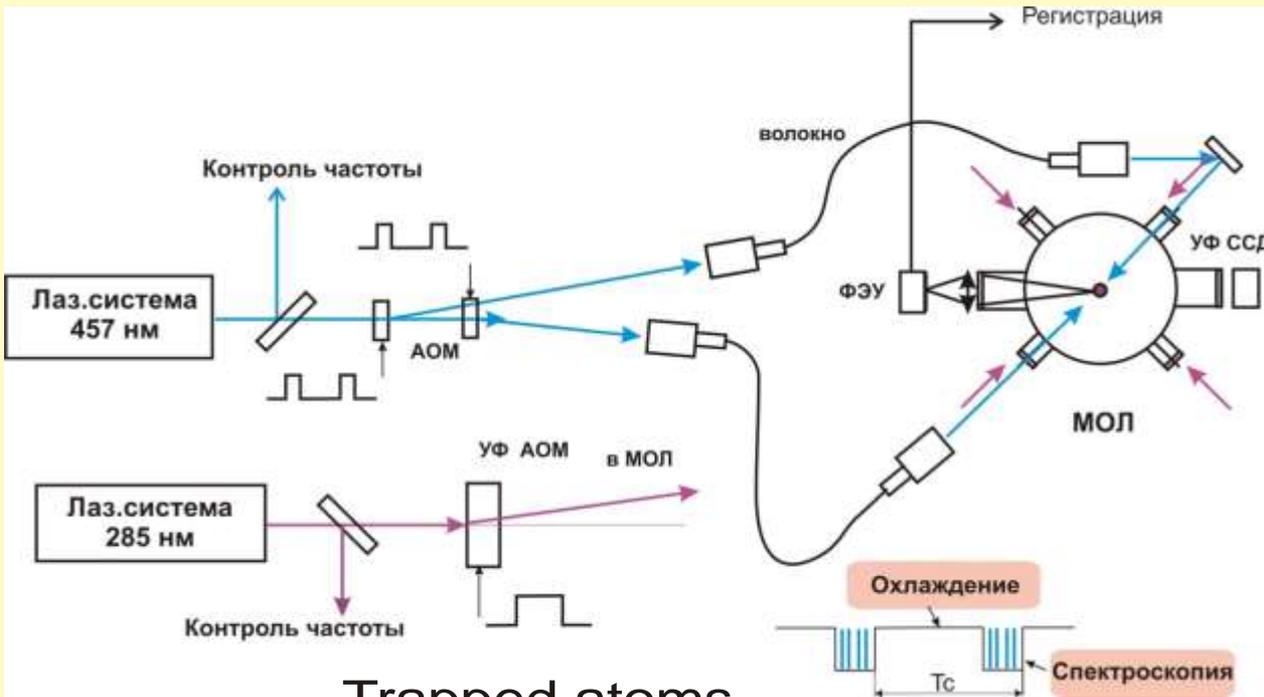
Лазерная система для охлаждения
магния на основе лазера на красителях
 $\lambda = 285 \text{ nm}$ $P=100 \text{ mW}$

«Часовая система» на 457 nm
на основе Ti:Sa/SHG
 $P=150 \text{ mW}$

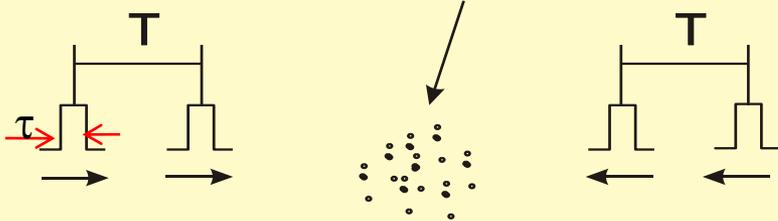


Узкие оптические резонансы наблюдаются в сигнале флуоресценции с уровня 1P1 при взаимодействии атомов с разнесенными во времени полями на длине волны 457 нм

Схема установки



Trapped atoms

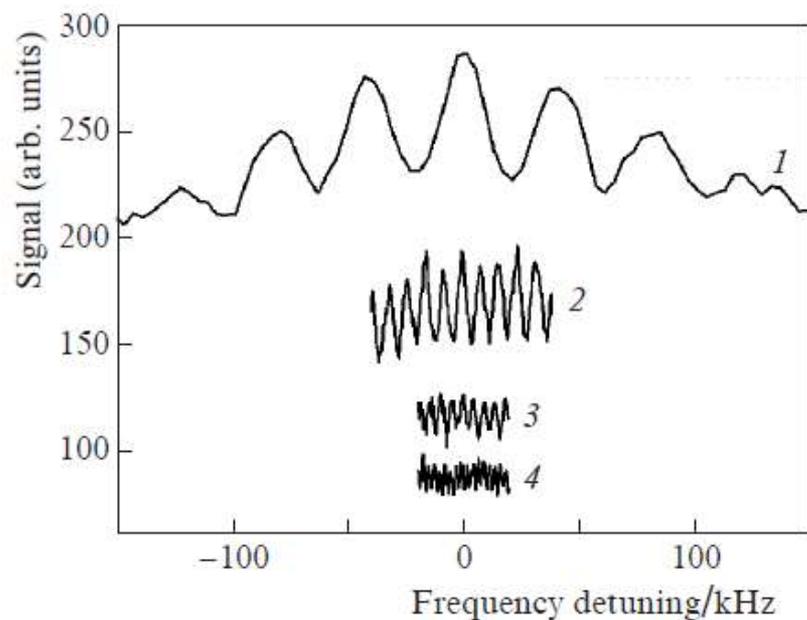


$$S = A \cos[2 T_{\text{eff}} (\Delta\omega \pm \delta) + \phi]$$

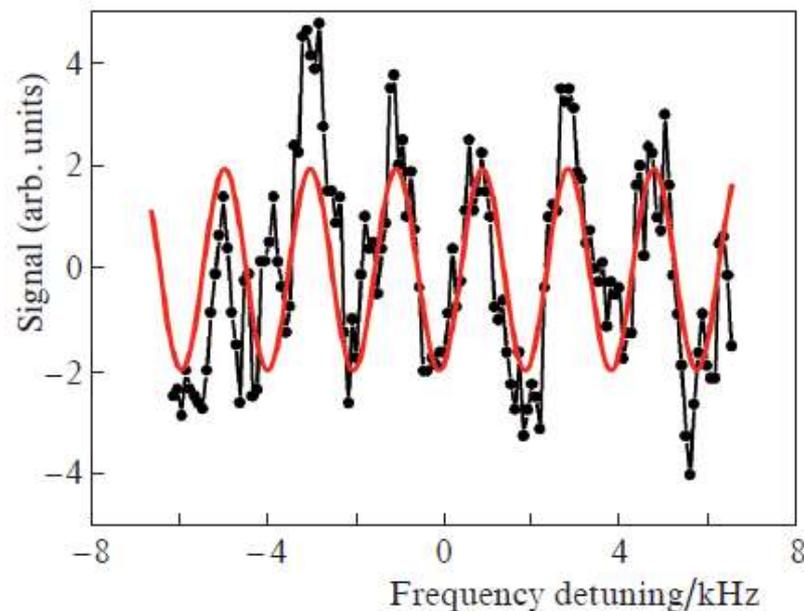
$$\text{Разрешение } \Delta\nu = 1/4T_{\text{eff}}$$

$$T_{\text{eff}} = 4/\pi \tau + T$$

$$\Delta\omega = \omega_L - \omega_0$$



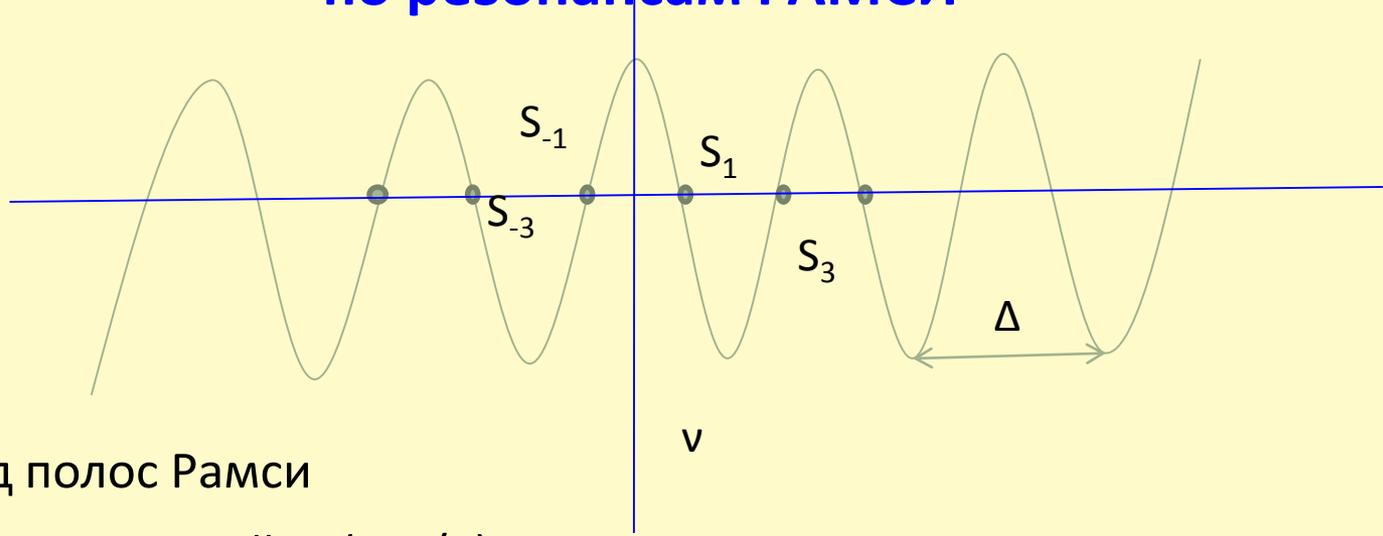
a



b

Рис.5. Резонансы в разнесенных во времени полях для задержек между импульсами $T = 7.5$ (1), 58 (2), 102 (3) и 201 мкс (4) (a) и полосы Рамси при $T = 246$ мкс; сплошная кривая – аппроксимация синусоидальной функцией $2\text{Sin}(2\pi\Delta/1.95)$ с периодом 1.95 кГц, полуширина полосы (HWHM) 500 Гц, представлены прямые записи резонансов за один проход, 200 точек на запись при времени усреднения для каждой точки 0.1 с (б).

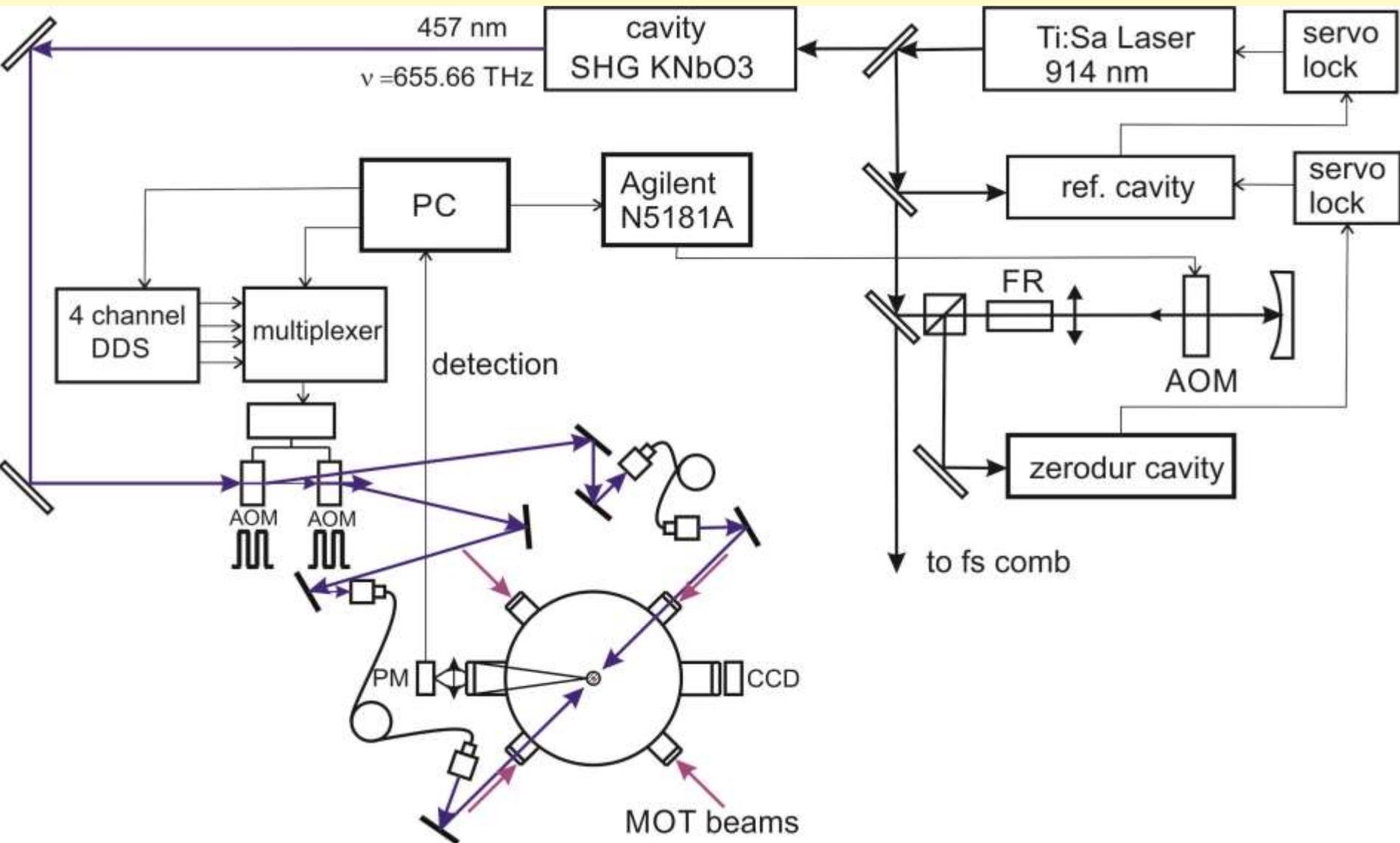
Стабилизация частоты по резонансам РАМСИ

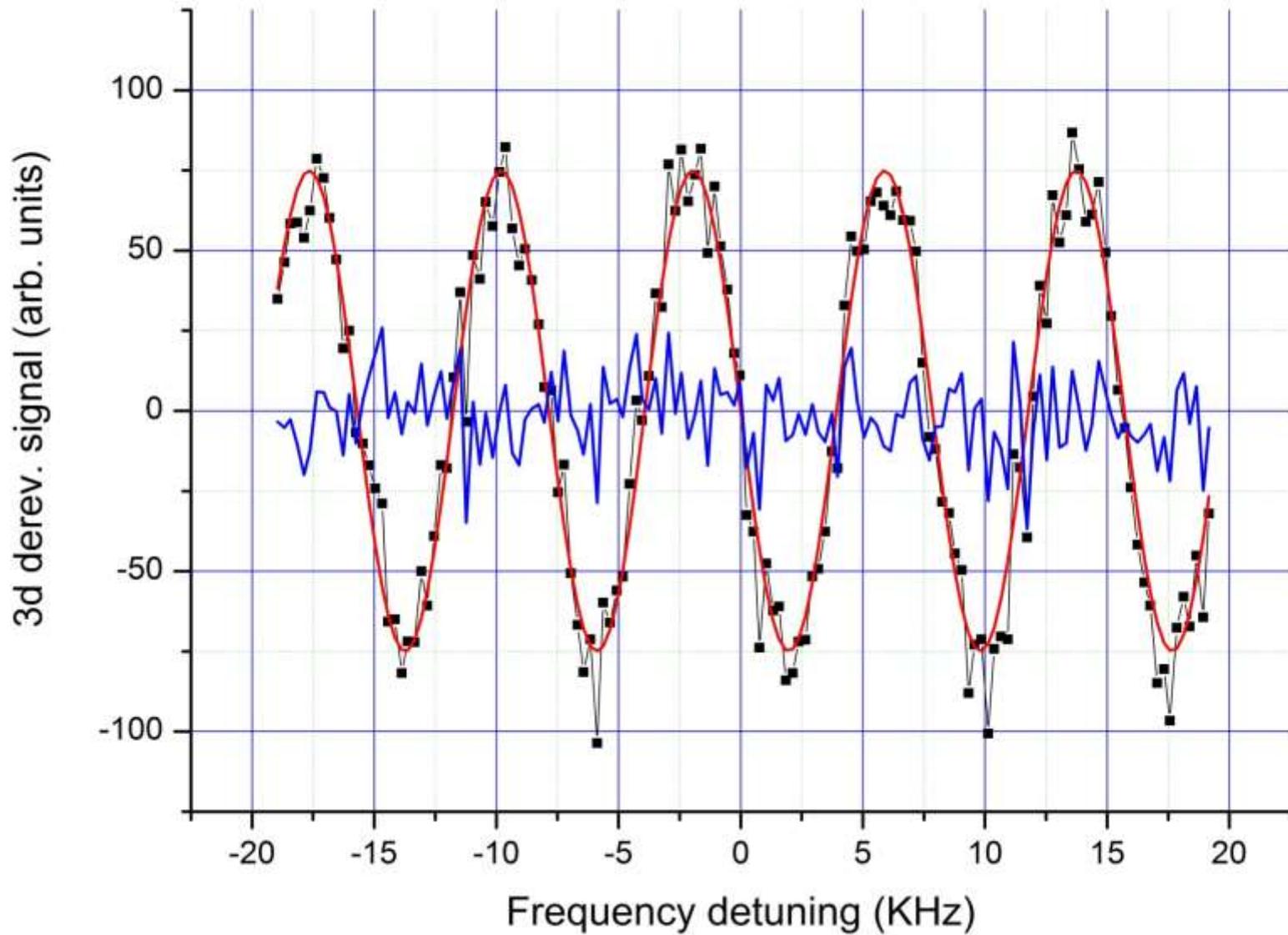


Δ - период полос Рамси

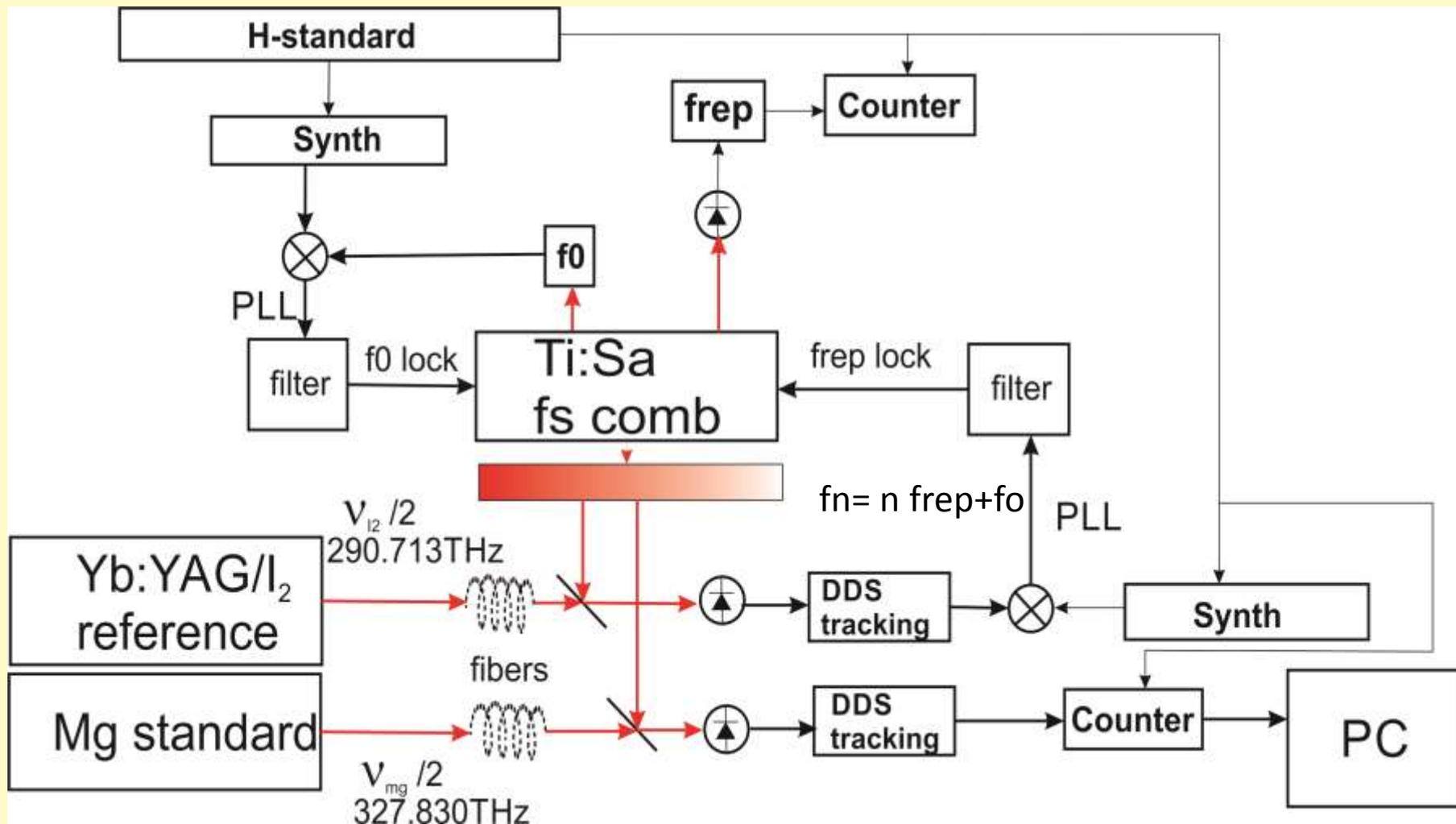
Сигнал S_n – при отстройке ($n \Delta/4$)

$dS_3 = (S_{-3} - 3S_{-1} + 3S_1 - S_3)$ – сигнал ошибки



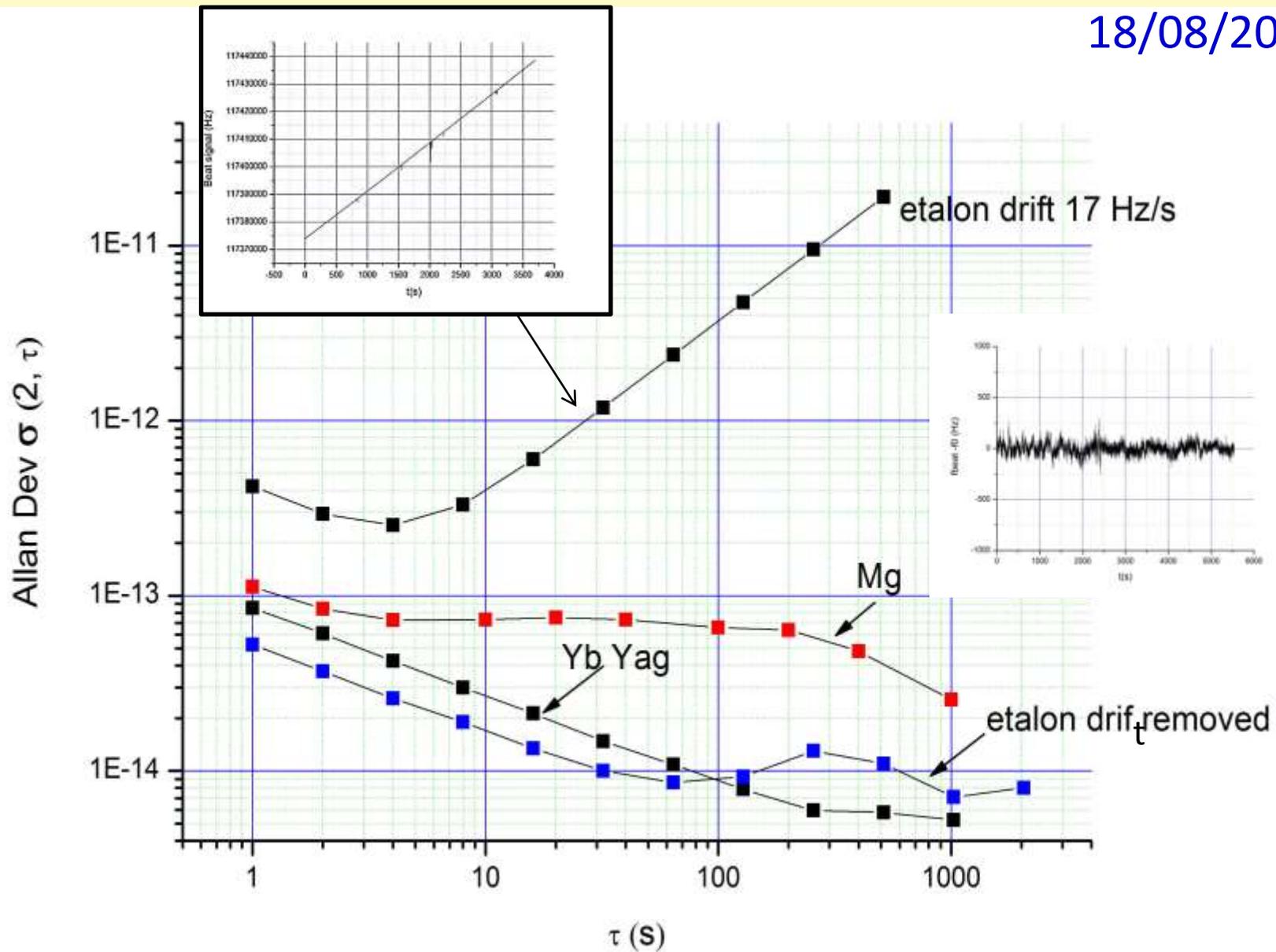


Измерение стабильности с помощью Tisa fs «комба»

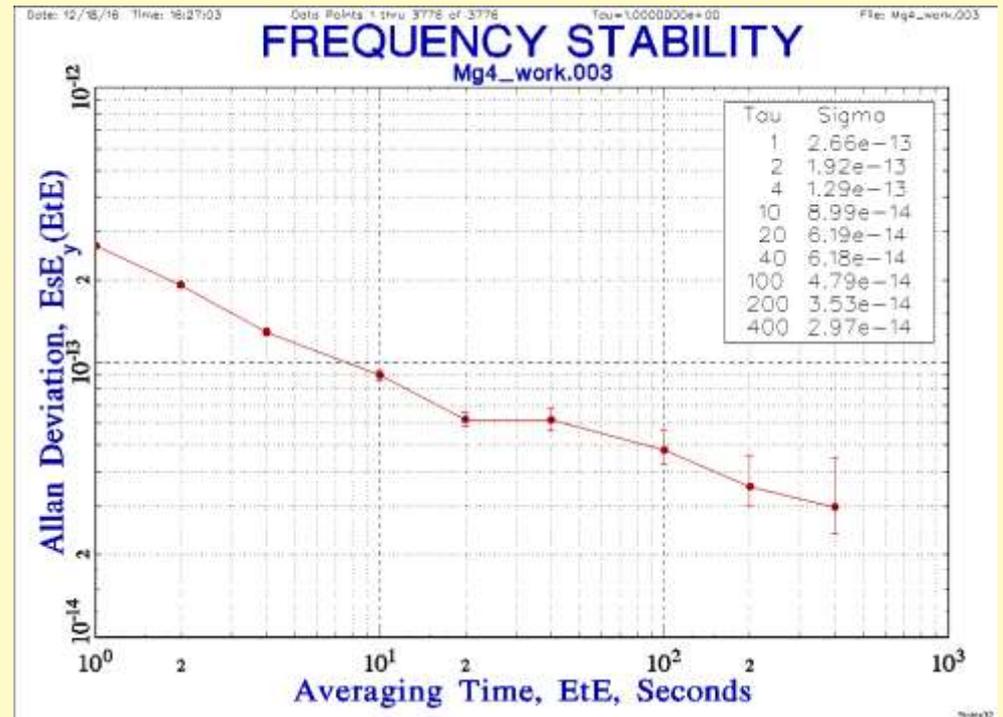
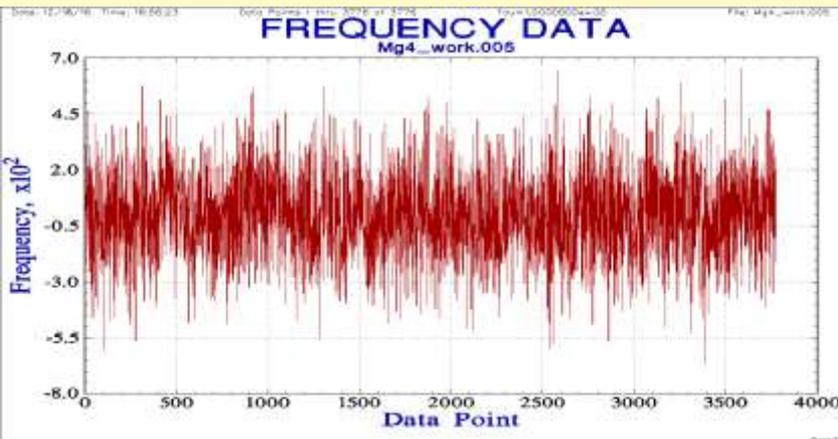


Результат предварительных измерений стабильности частоты

18/08/2016



1/12/2016



предельная точность будет ограничивается остаточным эффектом Доплера
ожидаемая точность и долговременная стабильность
 $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-14} - 10^{-15}$

A N Goncharov et. al. An optical frequency standard based on ultracold magnesium atoms, Journal of Physics: Conference Series, 2017

Цель - охладить атомы до температуры порядка 10 мкК,
локализовать их в оптической решетке,
создать стандарт частоты на основе
ультрахолодных атомов магния с относительной
погрешностью частоты $\Delta\nu/\nu = 10^{-17}$ - 10^{-18}

PRL 115, 240801 (2015)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
11 DECEMBER 2015

Towards a Mg Lattice Clock: Observation of the 1S_0 - 3P_0 Transition and Determination of the Magic Wavelength

A. P. Kulosa,¹ D. Fim,¹ K. H. Zipfel,¹ S. Rühmann,¹ S. Sauer,¹ N. Jha,¹ K. Gibble,^{1,2} W. Ertmer,¹ E. M. Rasel,¹
M. S. Safronova,^{3,4} U. I. Safronova,⁵ and S. G. Porsev^{3,6}

¹*Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany*

²*Department of Physics, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802, USA*

³*Department of Physics and Astronomy, University of Delaware, Newark, Delaware 19716, USA*

⁴*Joint Quantum Institute, NIST and the University of Maryland, College Park, Maryland 20899, USA*

⁵*Department of Physics, University of Nevada, Reno, Nevada 89557, USA*

⁶*Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188300, Russia*

(Received 5 August 2015; published 9 December 2015)

$$V_{12} = \alpha\sqrt{I} |\mathbf{B}| \cos\theta,$$

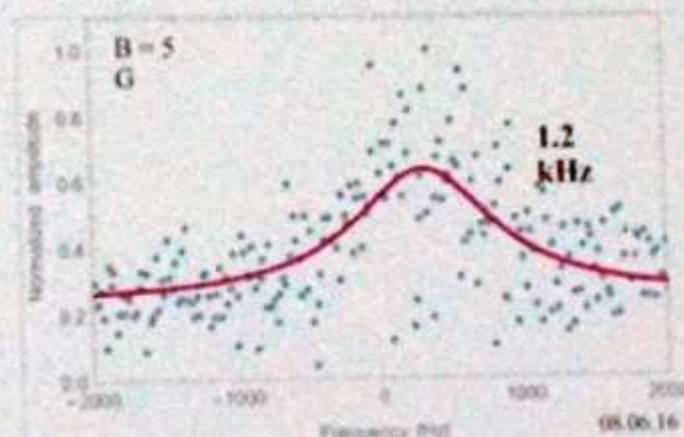
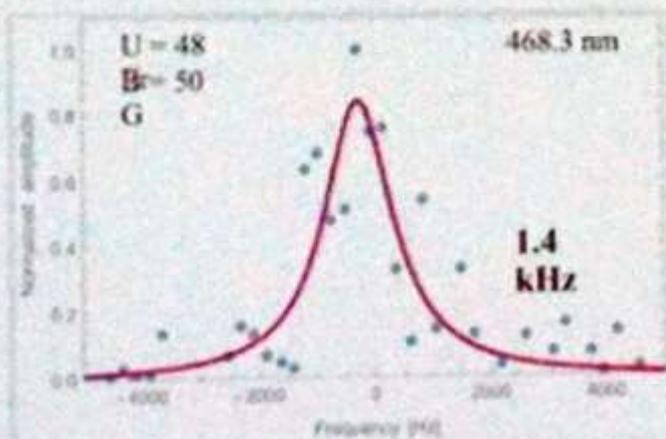
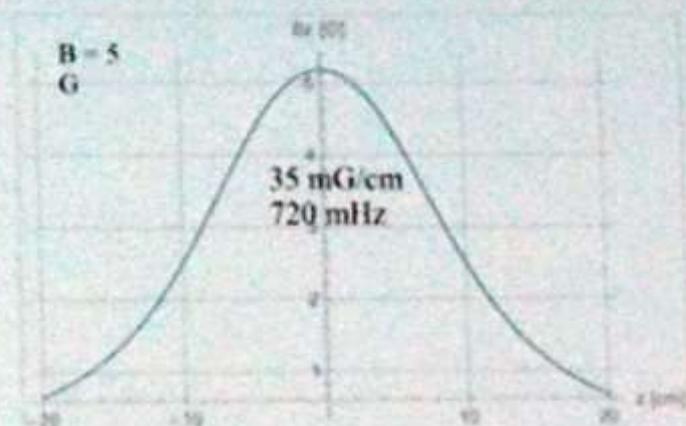
1000 атомов при температуре 4 мкК в решетке на переходе $1S_0$ - $3P_0$

горизонтальная решетка на 468 нм 10 Вт $w_0 \rightarrow 80$ мкм $I = 100$ кВт/см², 60 Эр P = 8 hк

Спектроскопия на запрещенном переходе 7 вт/см² $w_0 = 300$ мкм Магнитное поле - 250 G Частота Раби 250 Гц

current experiments (preliminary)

- 10 W circulating power
corresponding to 60 recoil energies
(before 2-2.5 W or 10-15 recoil energies)
- lower magnetic fields 5-50 G / new
magnetic coils
- tunneling contribution \sim Hz
- observed linewidth \sim kHz



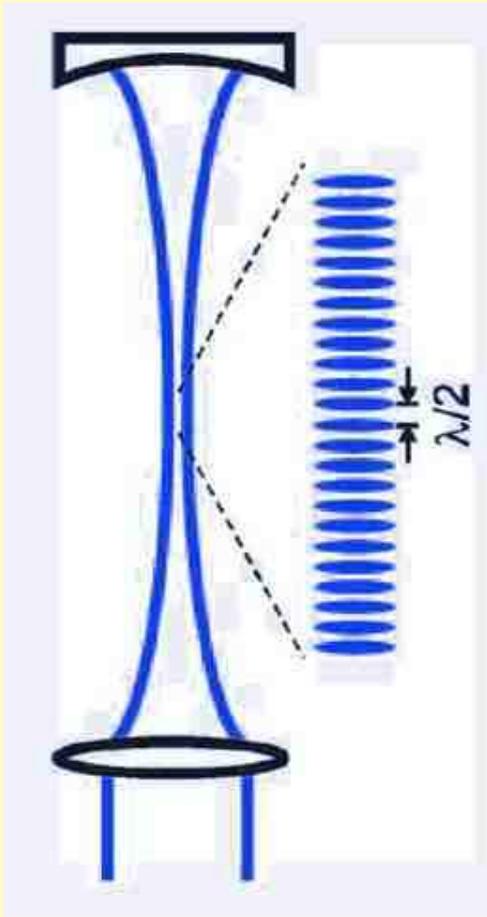
ОПТИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА

Для перехода $1S_0 \rightarrow 3P_0$ – сильно запрещенный, магнито-индуцированная спектроскопия

Плотность мощности излучения на «магической» длине волны 468 нм для локализации атомов магния с $P < 10 \text{ h}\kappa$
 $I = 100 \text{ кВт/см}^2$

Излучение - 2-а гармоника Ti:Sa на 936 нм или п/п лазера

Такая плотность мощности может быть получена внутри оптического резонатора длиной 0.5 м – $w_0 = 0.1 \text{ мм}$ с добротностью $Q = 100$ при мощности падающего на резонатор лазерного излучения 0.5 Вт



Higher-order effects on uncertainties of clocks of Mg atoms in an optical lattice

V.D. Ovsianikov, S.I. Marmo, S.N. Mokhnenko and V.G. Palchikov

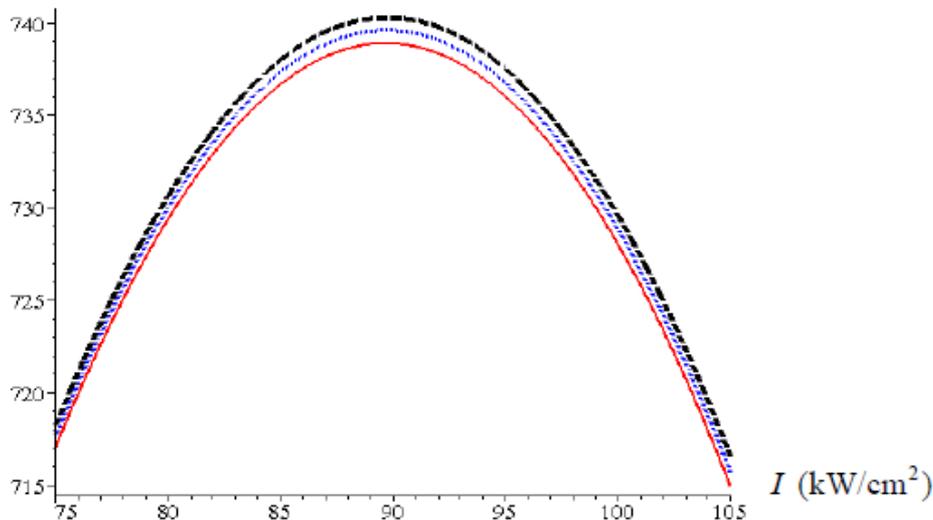
Novosibirsk, MPLP-2016, August 22-26

$$\varepsilon = \arctan(b/a)$$

$$\xi = \sin 2\varepsilon$$

$$\Delta\nu_{cl}^{latt}(n, \xi, I) = c_{1/2}(n)I^{1/2} + c_1(n, \xi)I + c_{3/2}(n, \xi)I^{3/2} + c_2(\xi)I^2$$

$\Delta\nu$ (mHz)

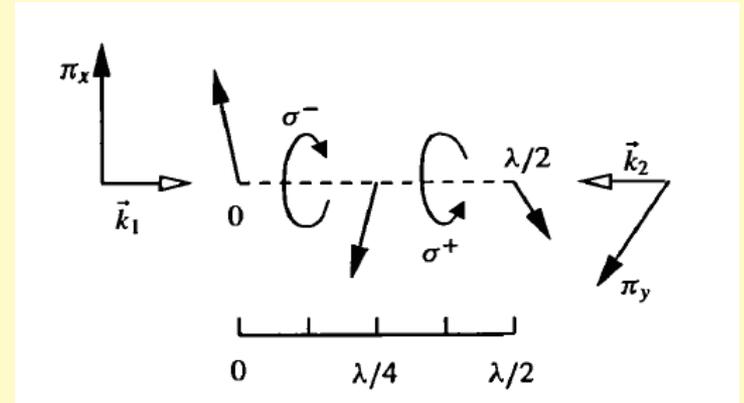
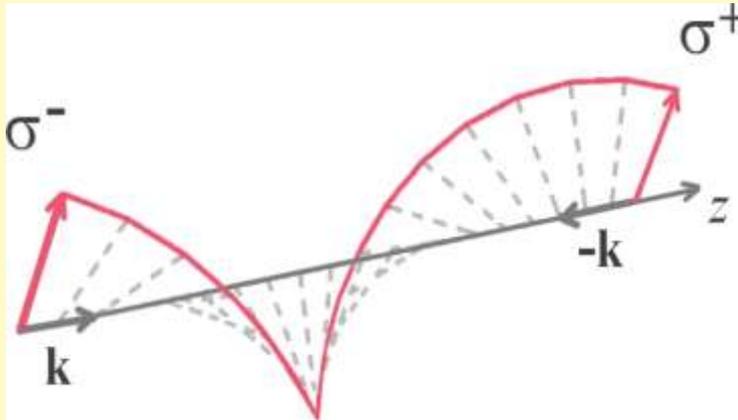


$\delta = -44.54$ (red solid), $\delta = -44.56$ (blue dotted)
and $\delta = -44.58$ MHz (black dashed line)

ATOM	Mg
$c_{1/2}$, mHz(kW/cm ²) ^{-1/2}	-4.03
$c_1(\xi=0)$, mHz(kW/cm ²) ⁻¹	-0.18 - 0.0096 <i>i</i>
$c_1(\xi=\pm 1)$, mHz(kW/cm ²) ⁻¹	-2.82 - 0.0141 <i>i</i>
$c_{3/2}(\xi=0)$, mHz(kW/cm ²) ^{-3/2}	0.163 + 0.0087 <i>i</i>
$c_{3/2}(\xi=\pm 1)$, mHz(kW/cm ²) ^{-3/2}	2.55 + 0.0128 <i>i</i>
$c_2(\xi=0)$, mHz(kW/cm ²) ⁻²	-0.111 - 0.006 <i>i</i>
$c_2(\xi=\pm 1)$, mHz(kW/cm ²) ⁻²	-1.73 - 0.0087 <i>i</i>

Субдоплеровское охлаждение в поле с градиентом поляризации на переходе ${}^3P_2 - {}^3D_3$

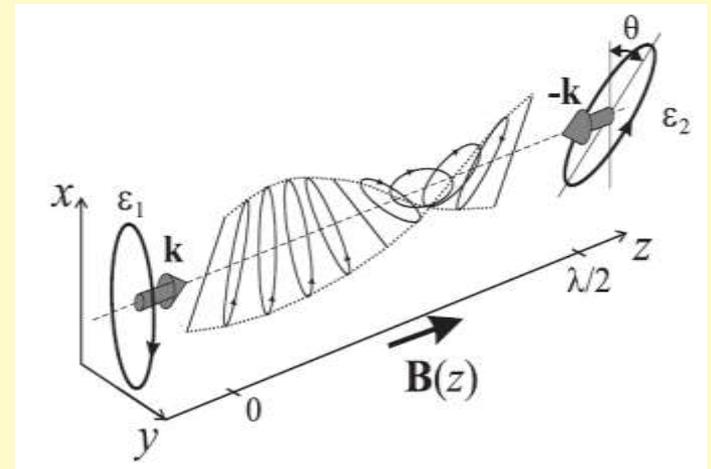
1D конфигурация светового поля, образованного встречными σ^+ и σ^- плоскими монохроматическими волнами и в конфигурации $Lin \perp Lin$

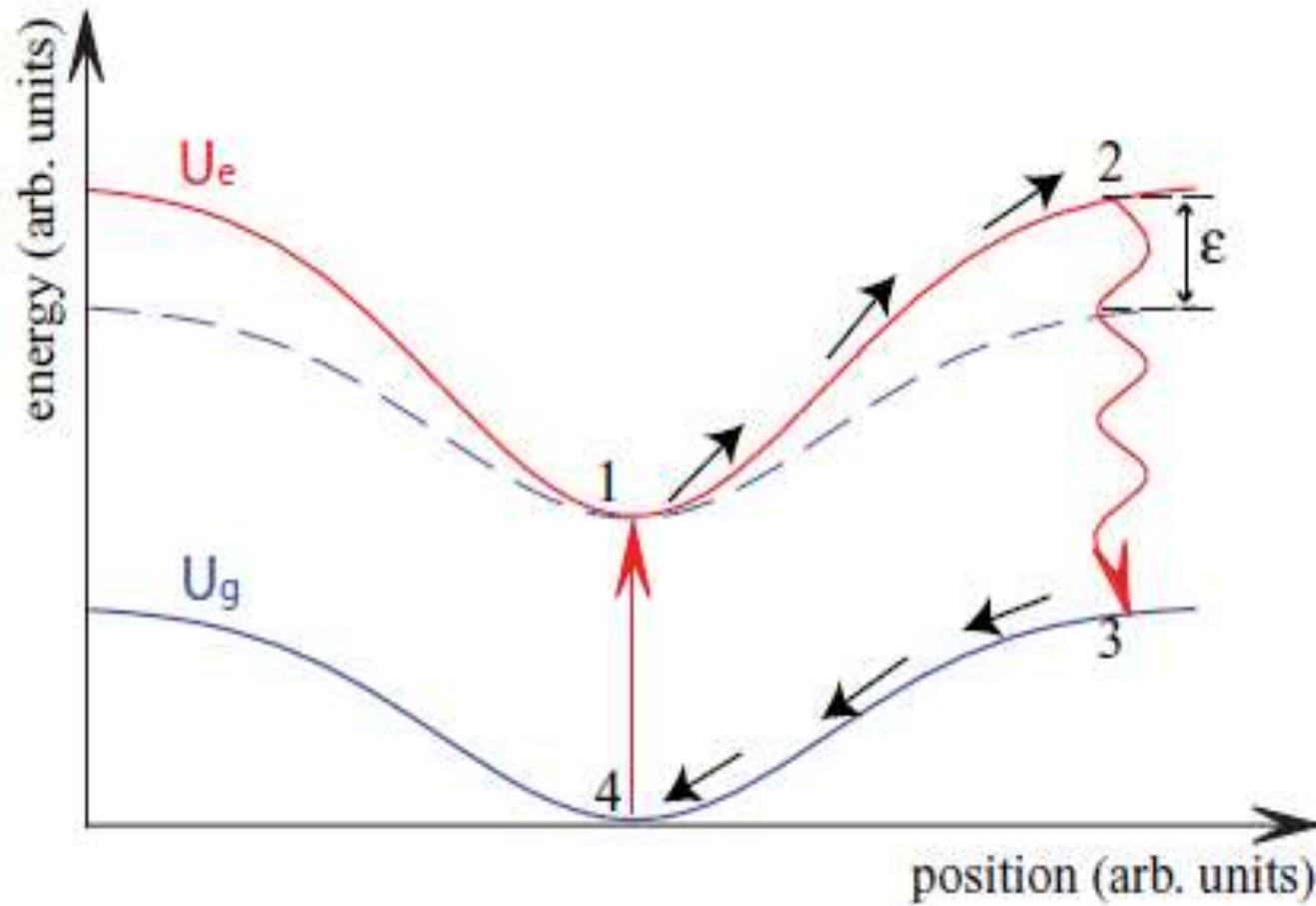


D.V. Brazhnikov et.al., Laser Physics, Vol. 24, No. 7, 074011 (2014).

O. N. Prudnikov et. al., PRA **92**, 063413 (2015)

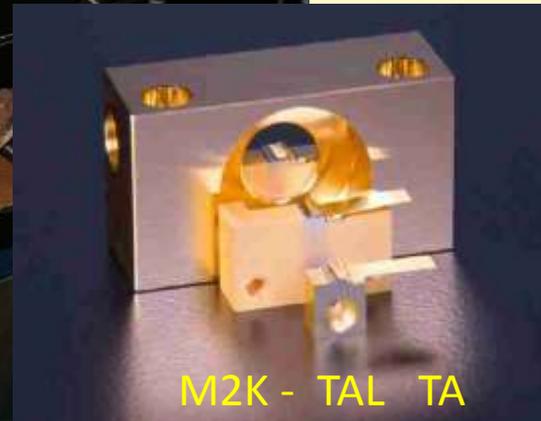
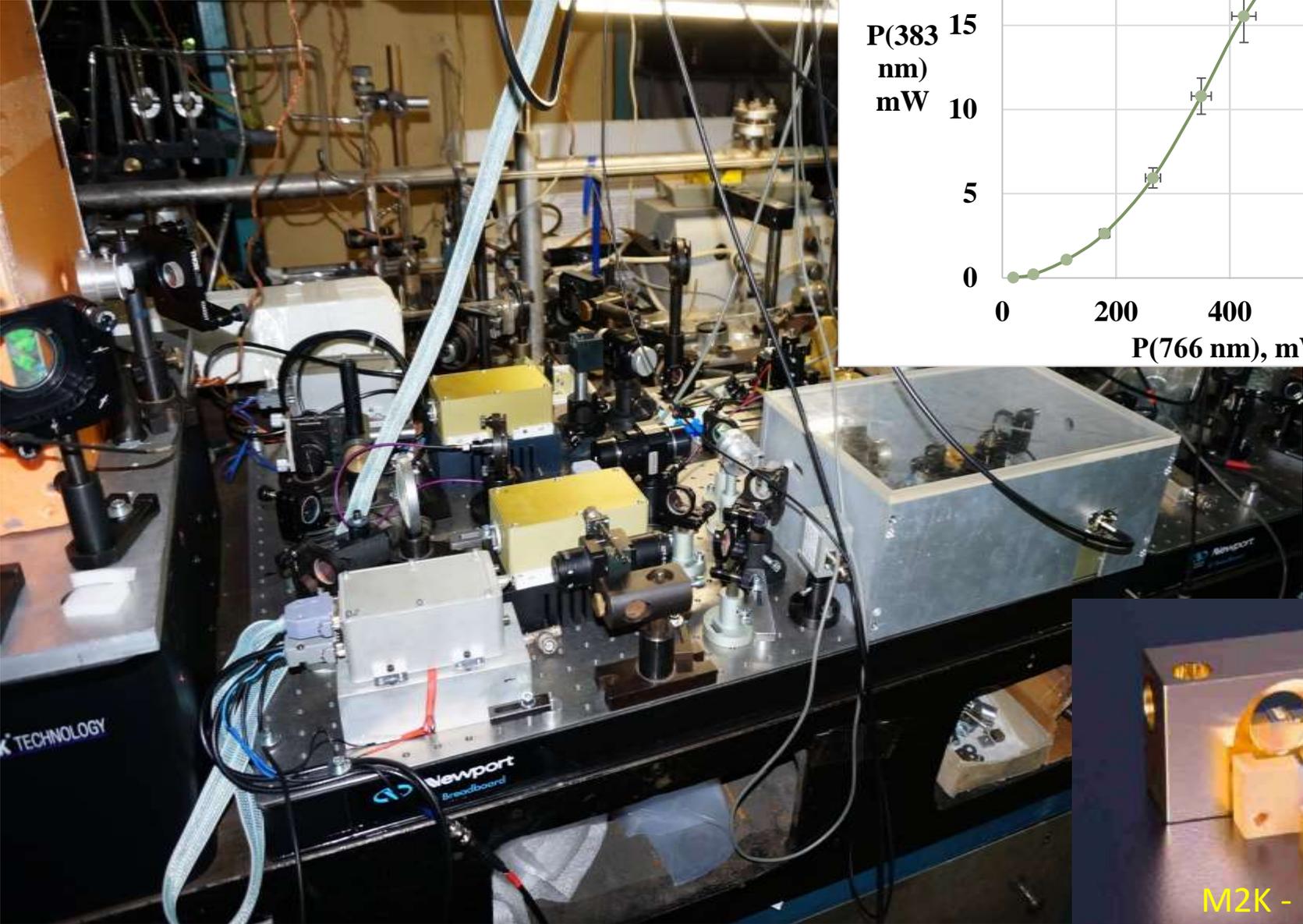
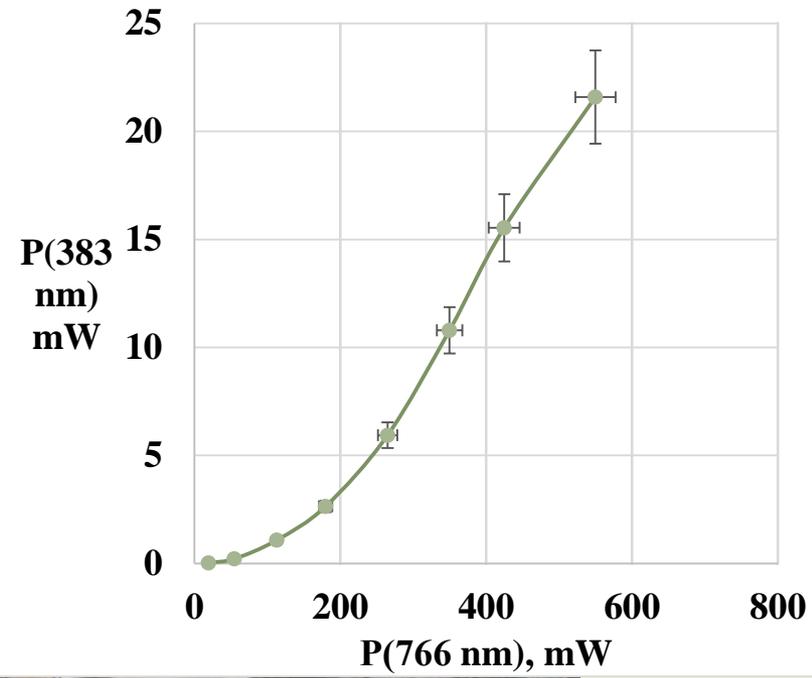
O. N. Prudnikov et. al., Quantum Electronics **46** (7), 661 (2016)



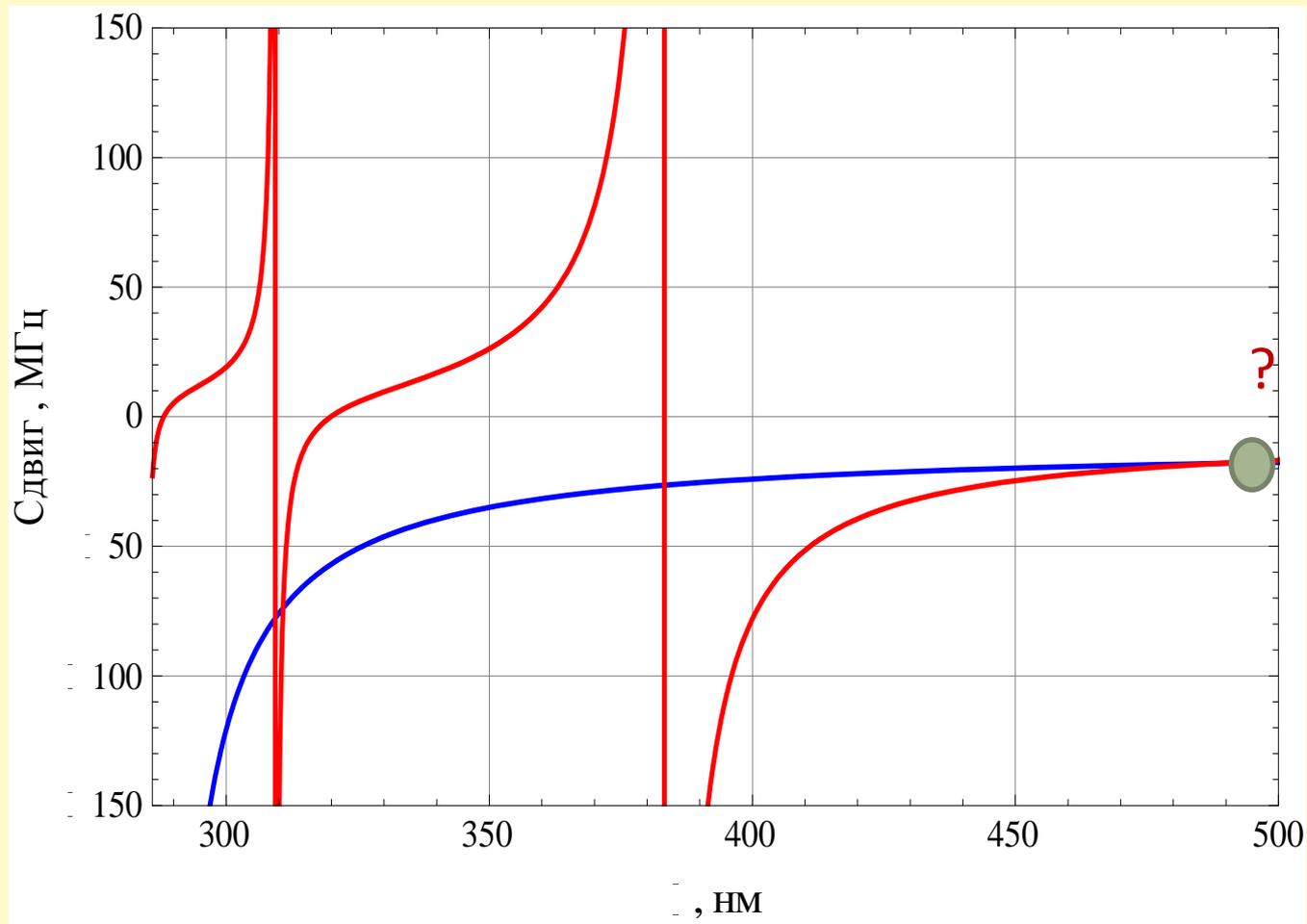


PHYSICAL REVIEW A **84**, 063417 (2011)
Laser-driven Sisyphus cooling in an optical dipole trap Vladyslav V. Ivanov*

Laser system for Mg second stage cooling ($\lambda=383\text{nm}$)



1S0 -> 3P1 m=0 -> m=0



Оценки $I = 50 \text{ kW/cm}^2$ при точности $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-17}$
точность установки поляризации
 $\Delta\alpha \sim 10^{-3} \text{ rad}$

Заключение

- Мы представили результаты по спектроскопии сверхвысокого разрешения холодных атомов магния в МОЛ на переходе $1S_0 - 3P_1$ со спектральным разрешением ~ 500 Гц. Проведена стабилизация частоты лазера по узким резонансам холодных атомов магния. В этом случае мы ожидаем получение относительной погрешности частоты стандарта на уровне 10^{-14} - 10^{-15} и долговременной стабильности $\sim 10^{-16}$ за сутки. Проведены предварительные результаты по измерению метрологических характеристик стандарта с помощью комб синтезатора на основе титан-сапфирового фс - лазера. В настоящий момент стабильность ограничена дрейфом опорного интерферометра.
- Дальнейшие улучшения параметров стандарта мы связываем с глубоким охлаждением атомов магния и их локализацией в оптической решетке .
Были предложены новые схемы охлаждения атомов магния до температуры порядка 10 мкК.
Созданы лазерные системы для субдоплеровского охлаждения атомов магния.

Работа выполнялась при финансовой поддержке:

РФФИ (гранты 15-02-06087, 15-32-20330) , РНФ (грант 16-12-00054), президентского гранта

6689.2016.2, НИР « Стандарт – Оптика –ИЛФ»

Работа поддерживалась:

НИР « Стандарт – Оптика –ИЛФ»

РФФИ (грант # 15-02-06087, 15-32-20330)

РНФ (грант# 16-12-00054)

Грант президента # 6689.2016.2

Особая благодарность коллегам :

Сергею Кузнецову - проведение измерений с помощью фемтосекундного комба

Степану Игнатовичу - за опорный Yb:Yag/I2 лазер

Вадиму Васильеву, Сергею Фарносову, Николаю Квашнину – за поддержку с электронными системами



Спасибо за внимание