

Физика ультрахолодных атомов

На пути к созданию радиочастотного стандарта частоты на ионах магния-25

Борисенко А.С., Семериков И.А., Заливако И.В., Хабарова К.Ю.,
Колачевский Н.Н., Сорокин В.Н.

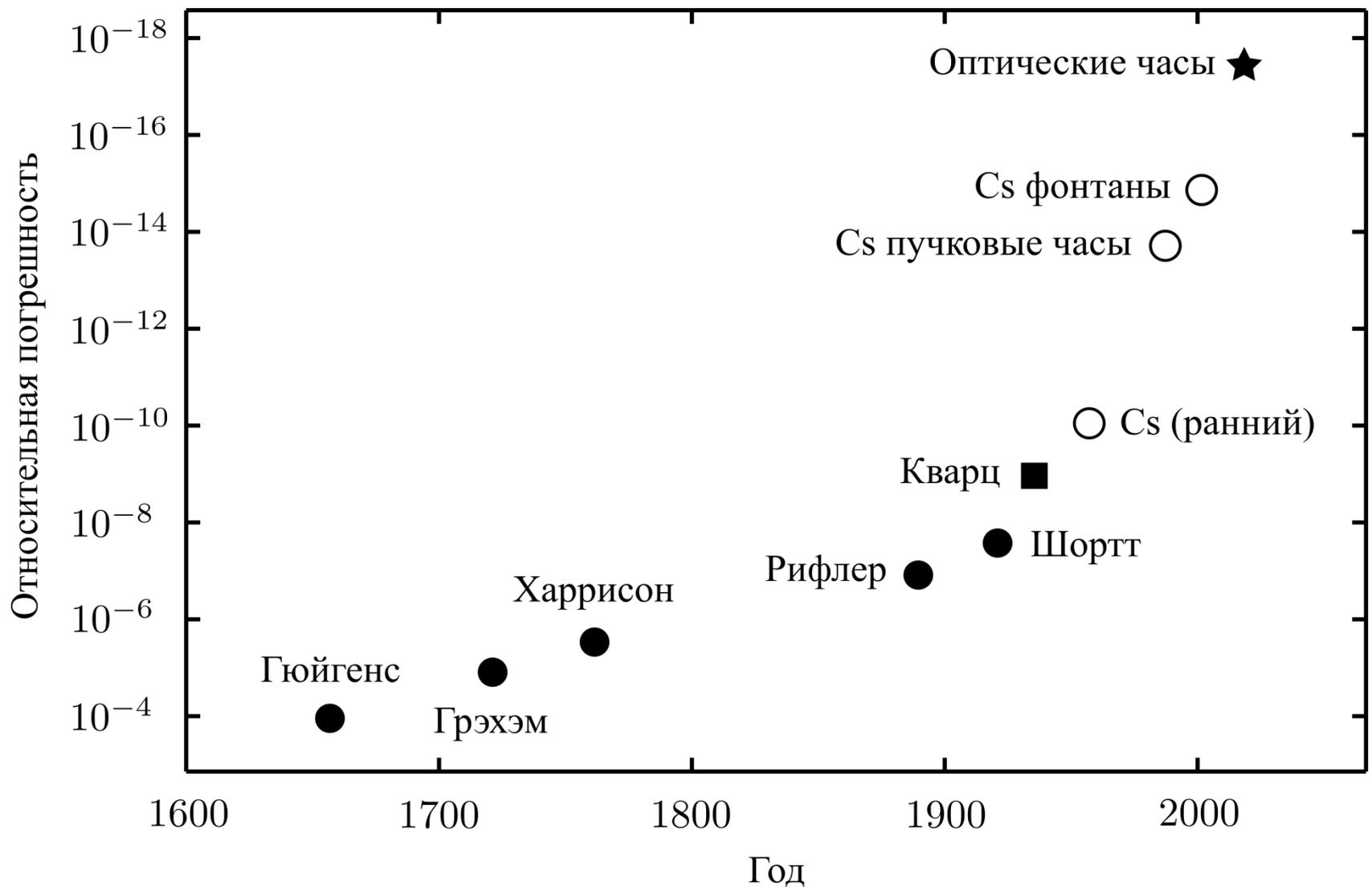


Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук

Учреждение Российской
академии наук
Физический институт
им. П.Н. Лебедева РАН

г. Новосибирск
2016

Стандарты частоты



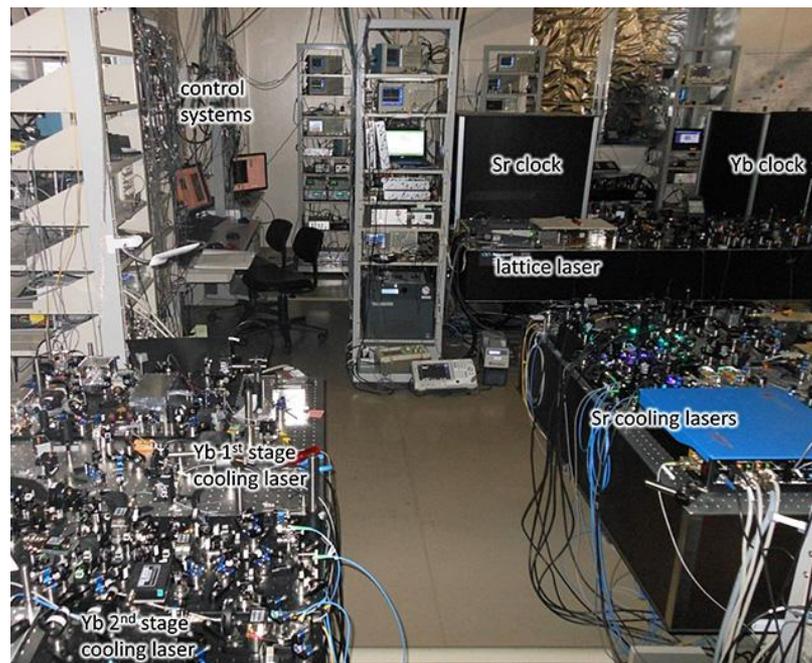
Оптические и радиочастотные стандарты частоты

- **Радиочастотные**

- Электронные схемы
- Относительная простота конструкции
- Мобильность

- **Оптические**

- Максимальная стабильность
- Необходим трансфер в радиодиапазон
- Фемтосекундная гребёнка
- Сложность конструкции



Примеры радиочастотных стандартов частоты

- Цезиевые атомные часы
 - Водородные мазеры
 - Стандарты на рубидиевой ячейке
 - Ионные стандарты микроволнового диапазона
 - ✓ Большое время взаимодействия
 - ✓ Малый рабочий объём → легко контролировать поля
 - ✓ Возможность лазерного охлаждения → малые температуры
 - ✓ Эксперимент в вакууме
- ${}^9\text{Be}^+$, ${}^{43}\text{Ca}^+$, ${}^{137}\text{Ba}^+$, ${}^{113}\text{Cd}^+$, ${}^{171}\text{Yb}^+$, ${}^{199}\text{Hg}^+$

Схема уровней иона $^{25}\text{Mg}^+$

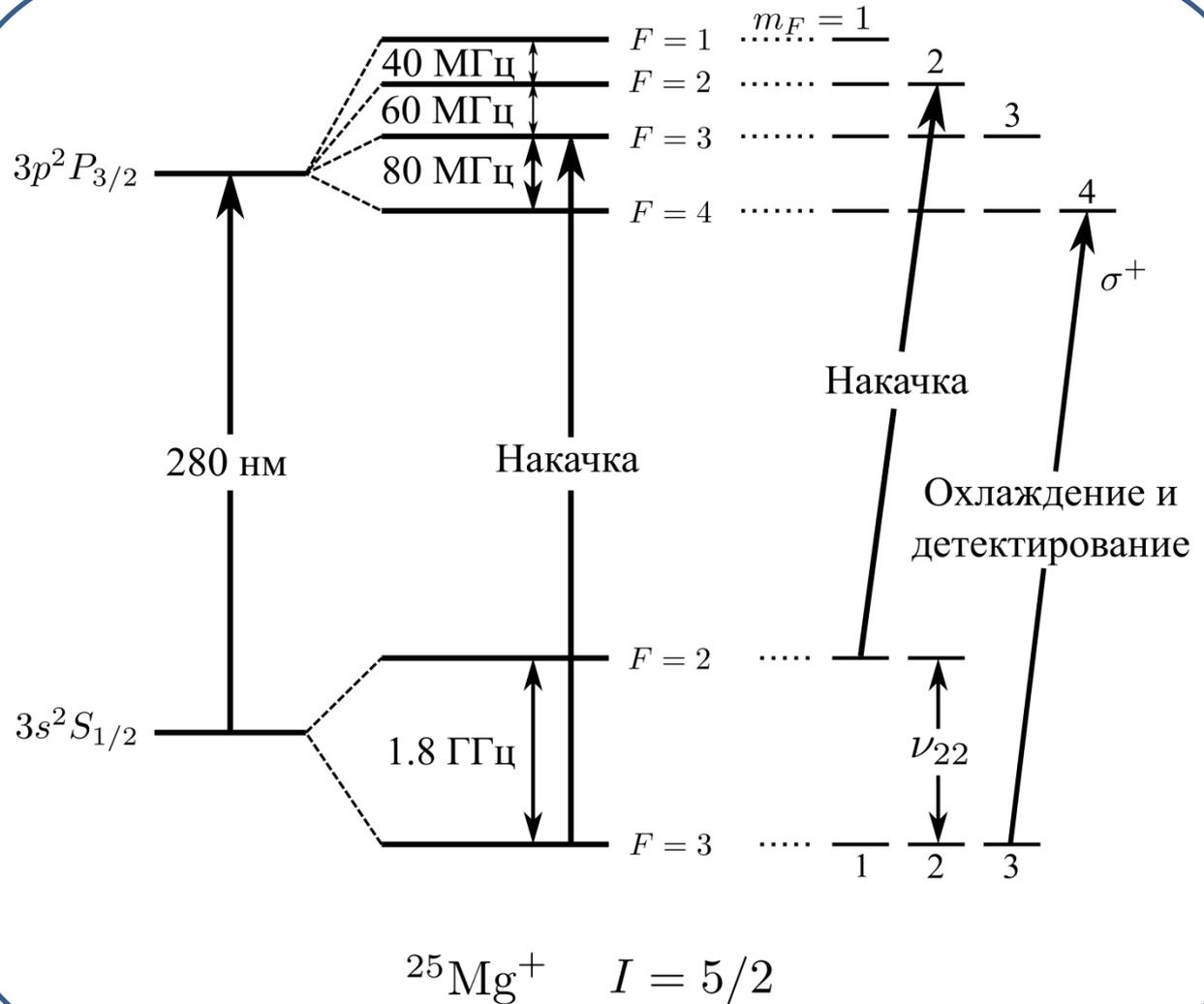
- Ион $^{24}\text{Mg}^+$
 $I=0$ (79%)
- **Ион $^{25}\text{Mg}^+$
 $I=5/2$ (10%)**
- Ион $^{26}\text{Mg}^+$
 $I=0$ (11%)

$$\lambda = 280 \text{ нм}$$

$$I_{\text{sat}} = 250 \text{ мВт/см}^2$$

$$\gamma = 2\pi \cdot 40 \text{ МГц}$$

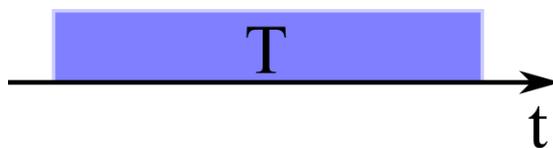
$$T_{\text{min}} = 1 \text{ мК}$$



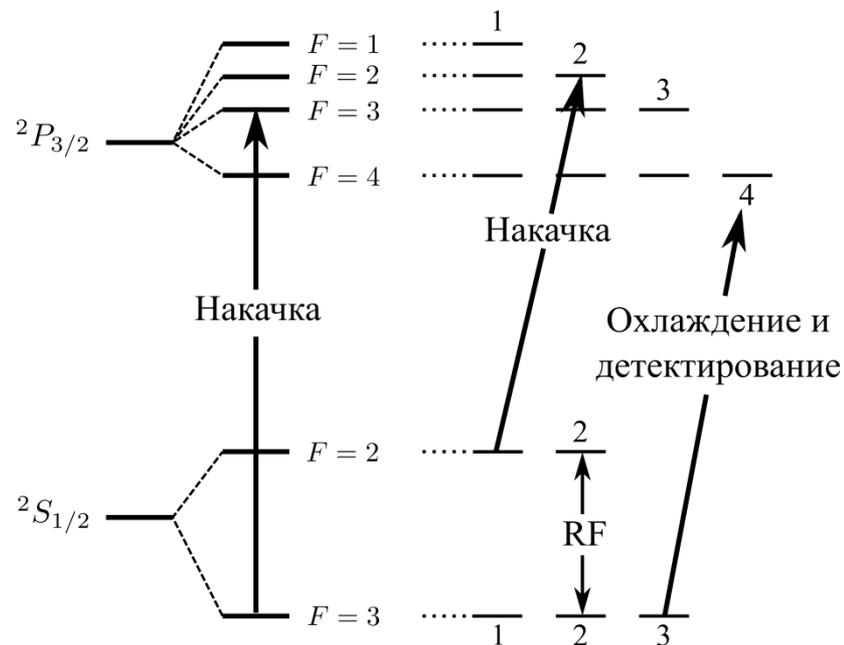
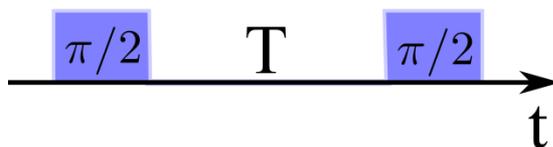
План эксперимента

	Охлаждение	Накачка	Опрос	Детектирование
280 нм	✓			✓
Радиочастота	✓		✓	
280 нм + АОМ		✓		

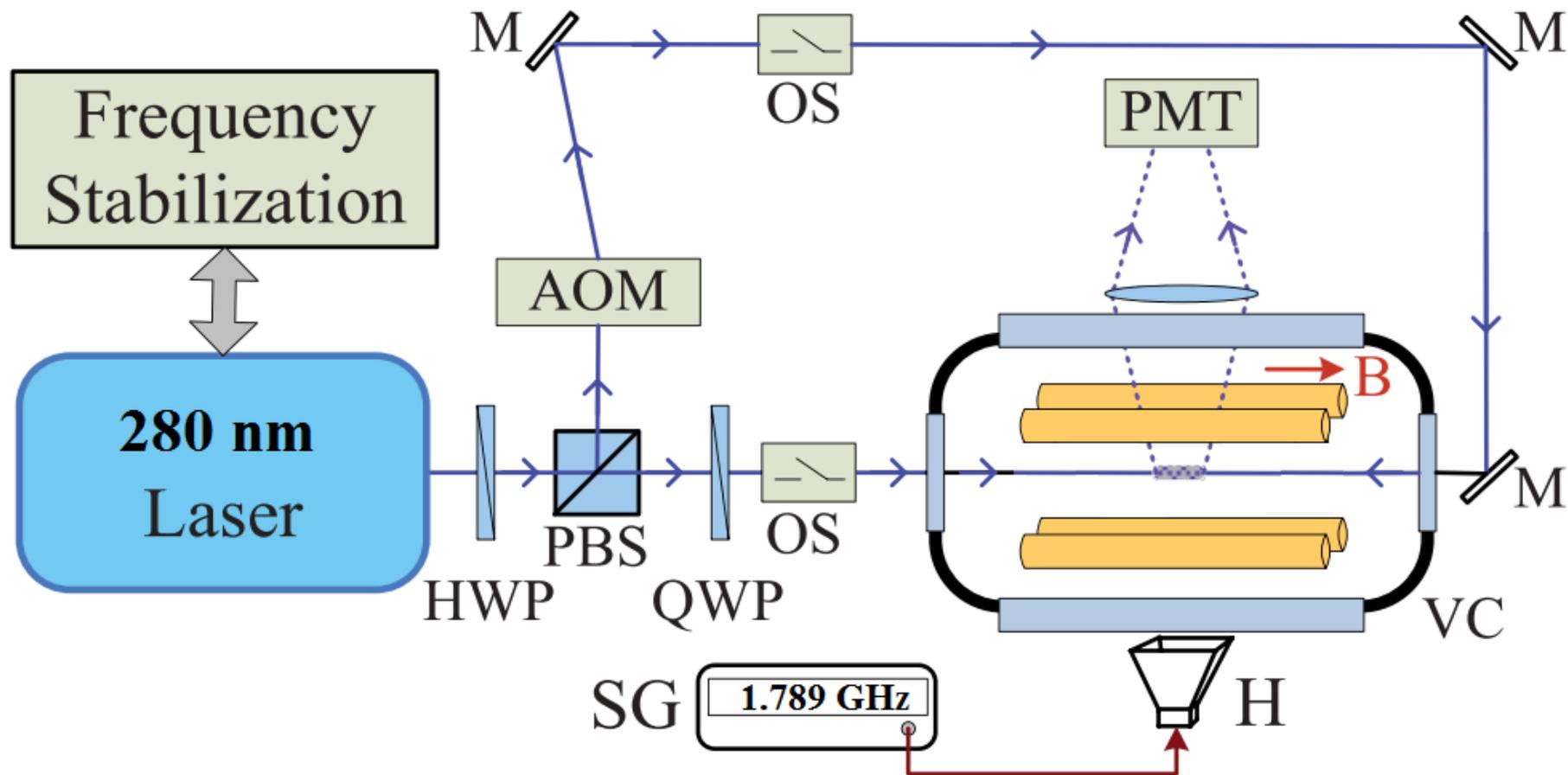
• **Метод Раби**



• **Метод Рэмси**

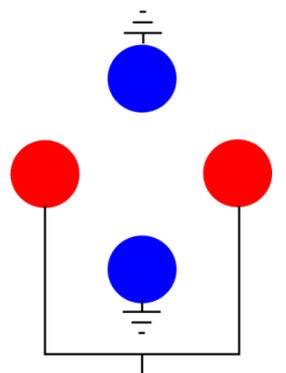


Принципиальная схема установки



Аналогично: J. W. Zhang, Z. B. Wang, Phys. Rev. A, **86**, 022523 (2012)

Линейная квадрупольная ловушка Пауля



$$U_{dc} - V_{ac} \cos \omega t$$

$$\phi = \frac{U_{dc} - V_{ac} \cos \omega t}{2r_0^2} (x^2 - y^2)$$

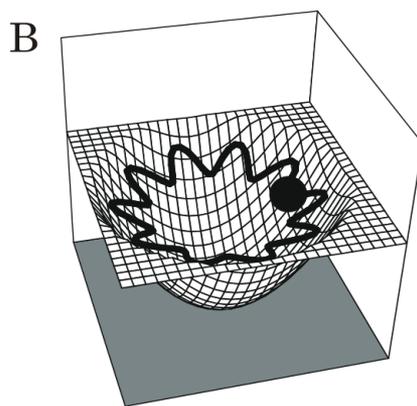
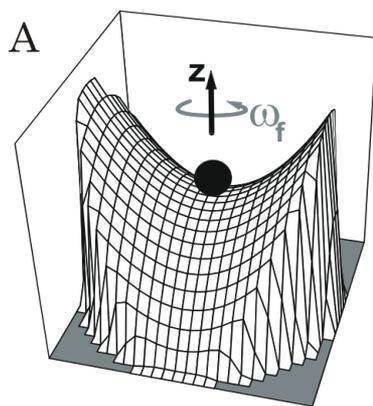
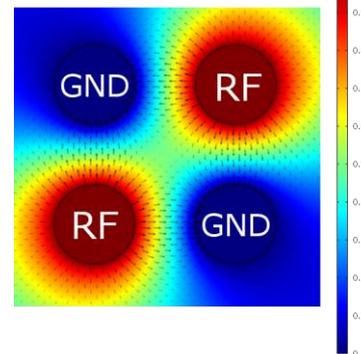


$$a = \frac{4QU_{dc}}{m\omega^2 r_0^2},$$

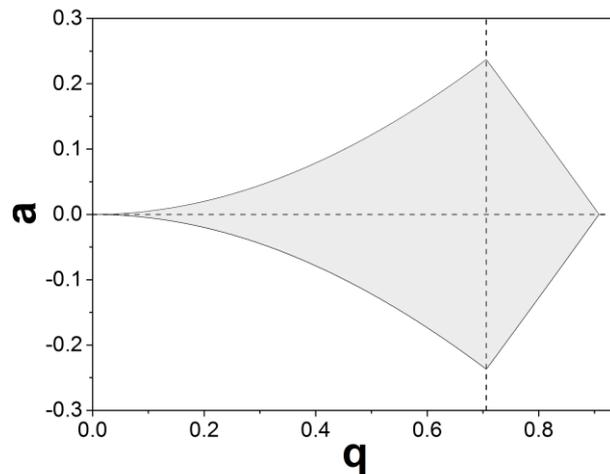
$$q = \frac{2QV_{ac}}{m\omega^2 r_0^2},$$

Электрическое поле

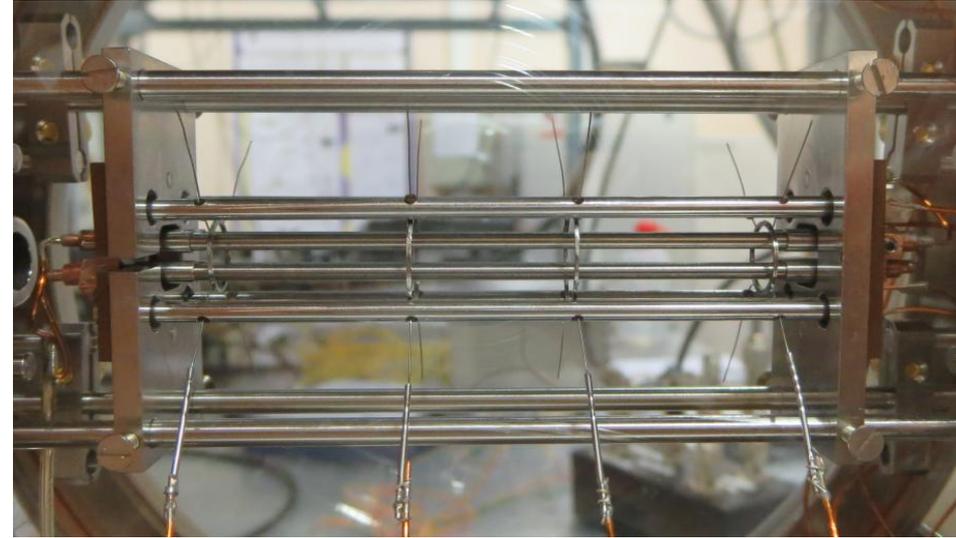
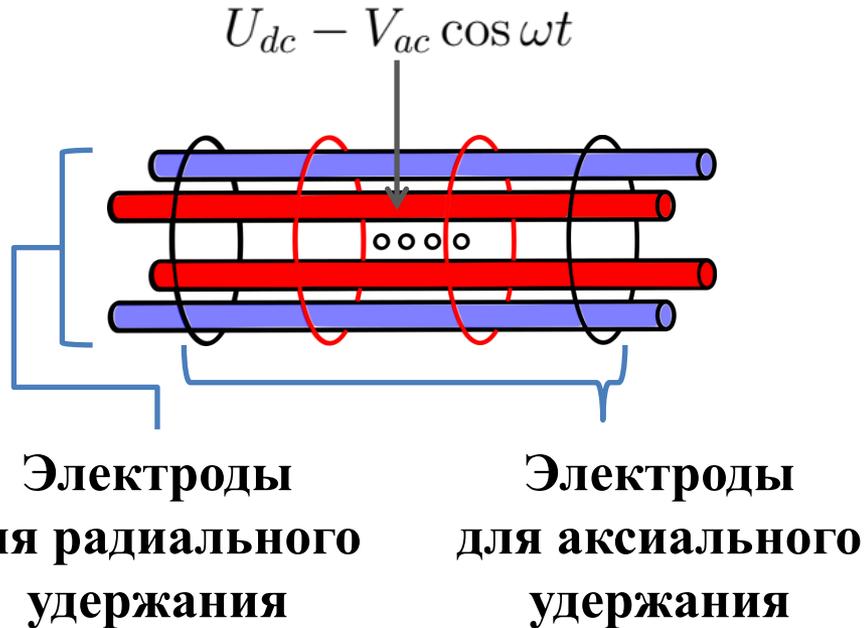
[отн. ед.]



Первая область стабильности



Линейная квадрупольная ловушка Пауля



Рабочие параметры ловушки:

$$\left. \begin{aligned} U_{dc} &= 0 \\ V_{ac} &\approx 500 \text{ V} \\ \omega &= 2\pi \times 18.2 \text{ MHz} \\ U_{AX} &= 2 \text{ kV} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} a &= 0 \\ q &= 0.1 \end{aligned}$$

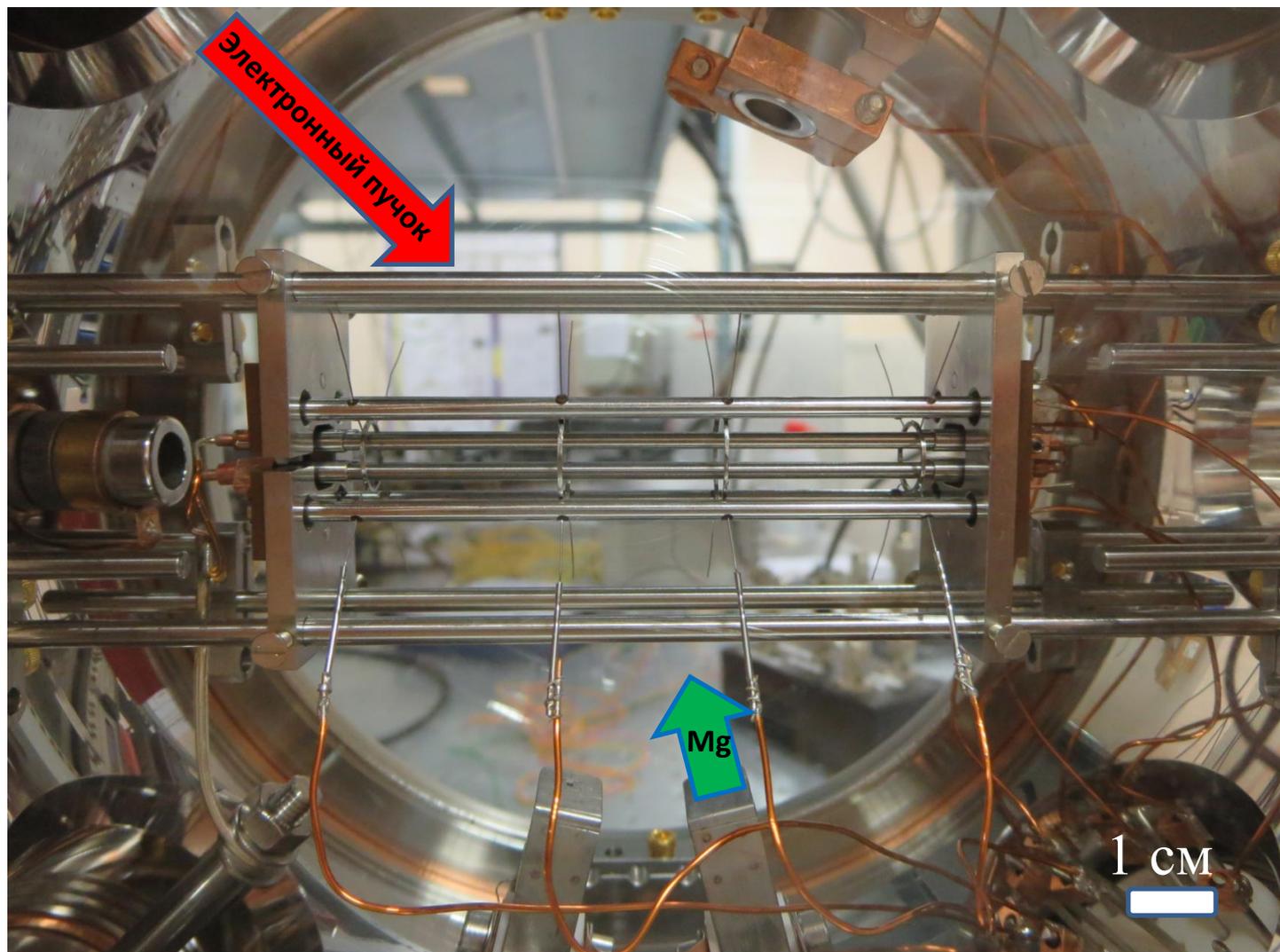
Секулярные частоты $^{25}\text{Mg}^+$

$$\begin{aligned} \Omega_{\text{рад}} &\approx 2\pi \times 1 \text{ MHz} \\ \Omega_{\text{акс}} &\approx 2\pi \times 100 \text{ kHz} \end{aligned}$$

Глубина потенциальной ямы:

$$D \approx 8 \text{ эВ}$$

Экспериментальная установка



Характерный
размер
захватываемого
облака
 $L \sim 100$ мкм



Режим
Лэмба-Дике

Механизмы потерь ионов

- Межионное взаимодействие
- Столкновение с остаточным газом
- Обмен зарядами с молекулами остаточного газа
- Несовершенство удерживающего поля

Численное моделирование динамики ионов в ловушке

Уравнения движения:

$$\frac{d^2 x_k}{dt'^2} + 2q \cos(2t') x_k = \frac{Q^2}{\pi \epsilon_0 \omega^2 m} \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{x_k - x_i}{r_{ik}^{3/2}}$$

$$\frac{d^2 y_k}{dt'^2} - 2q \cos(2t') y_k = \frac{Q^2}{\pi \epsilon_0 \omega^2 m} \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{y_k - y_i}{r_{ik}^{3/2}}$$

$$\frac{d^2 z_k}{dt'^2} + \frac{4\omega_z^2}{\omega^2} z_k = \frac{Q^2}{\pi \epsilon_0 \omega^2 m} \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{z_k - z_i}{r_{ik}^{3/2}}$$

$$a = \frac{4QU_{dc}}{m\omega^2 r_0^2}, \quad q = \frac{2QV_{ac}}{m\omega^2 r_0^2}, \quad t' = \omega t/2$$

x_k, y_k, z_k – координаты k -го иона
 Q – заряд иона
 m – масса иона
 ω – частота переменного поля
 ω_z – частота колебаний вдоль оси z
 r_{ik} – расстояние между ионами
 r_0 – расстояние от поверхности электрода до центра ловушки

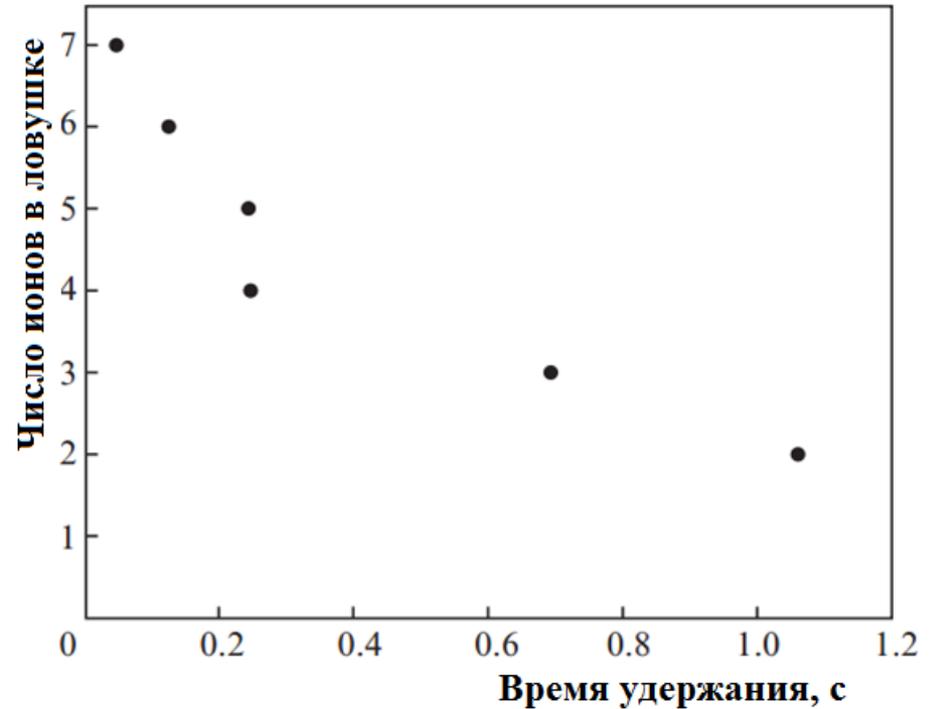
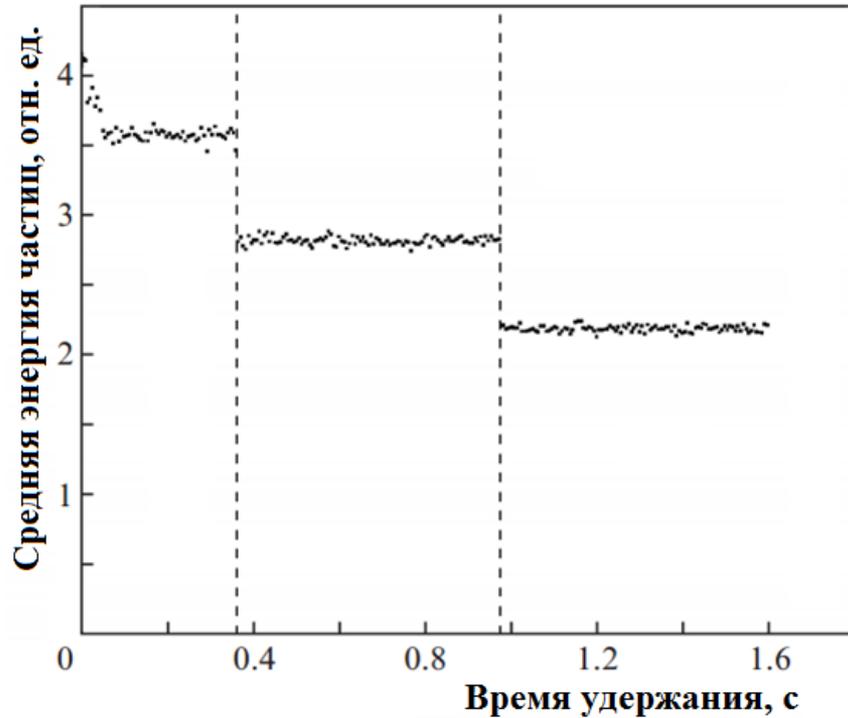
**Взаимодействие с
полем ловушки**

**Межионное
взаимодействие**

Начальные условия:

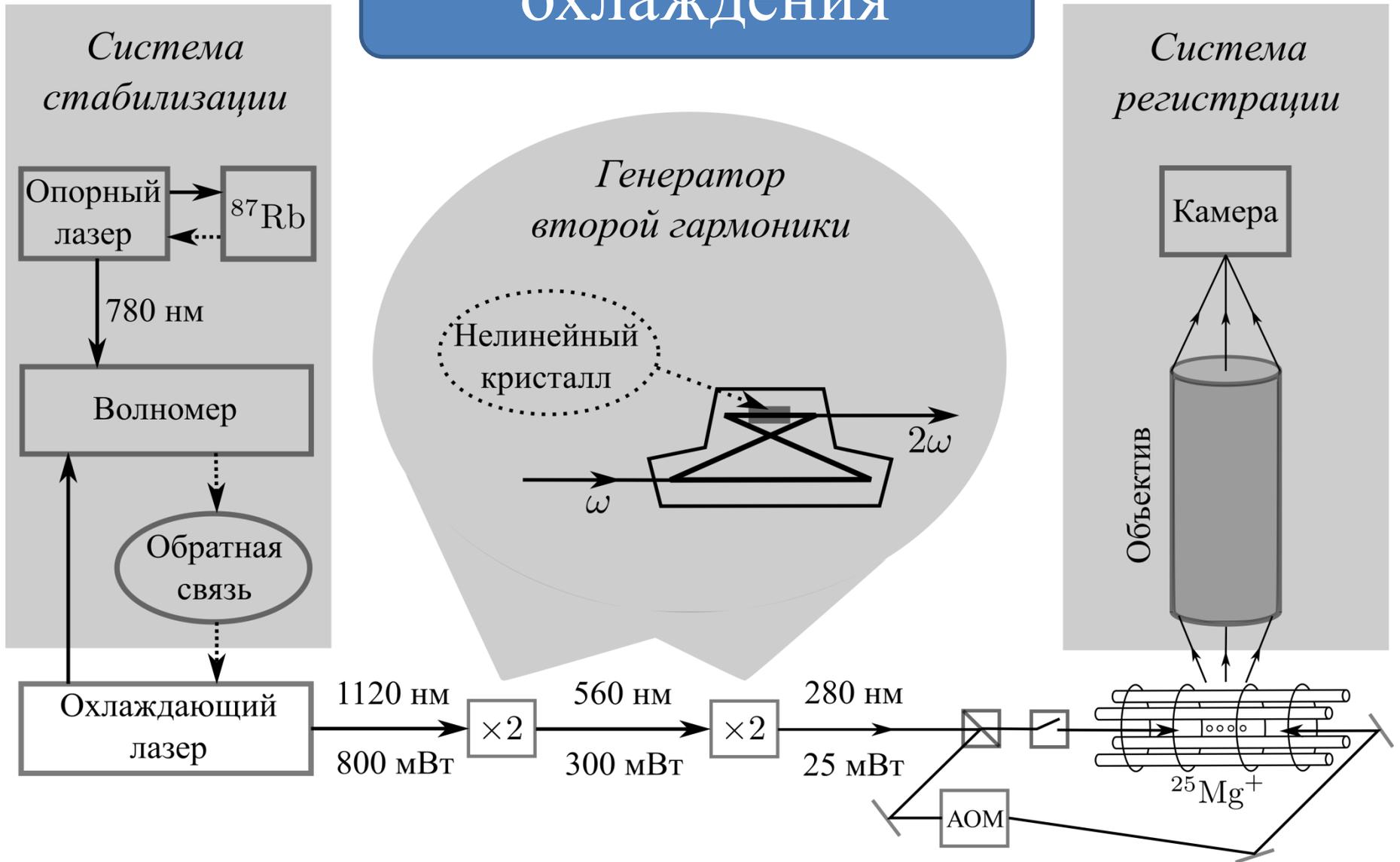
- Координаты – случайные с равномерным распределением
- Скорости – распределение Максвелла с температурой 1000 К

Численное моделирование динамики ионов в ловушке



Аналог испарительного охлаждения

Лазерная система для доплеровского охлаждения



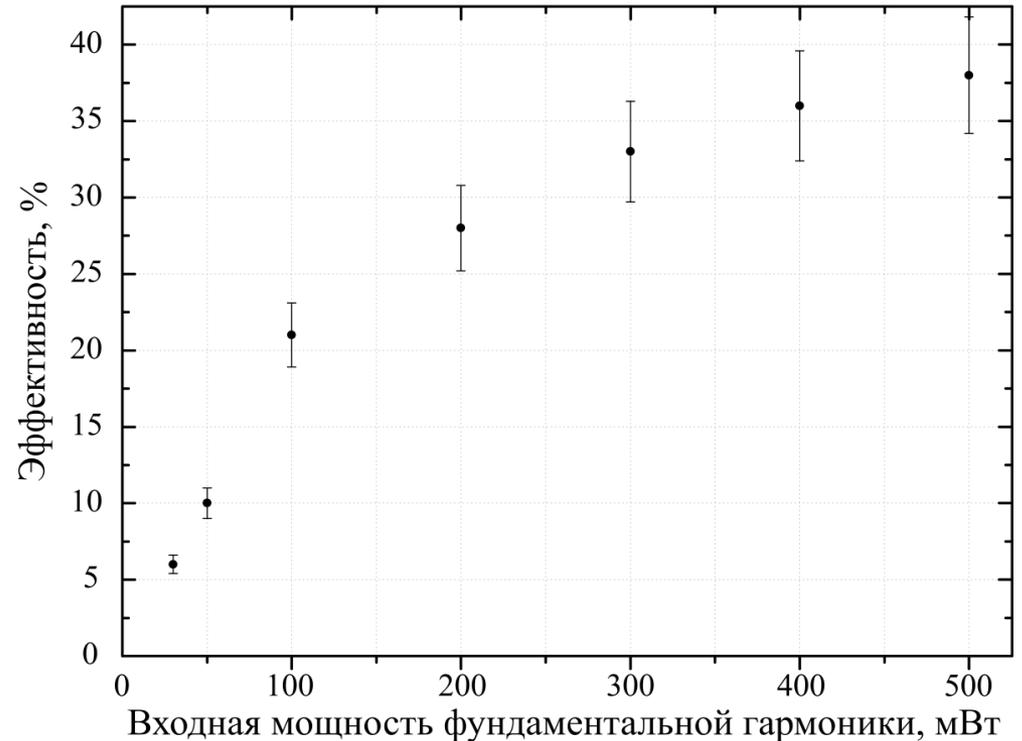
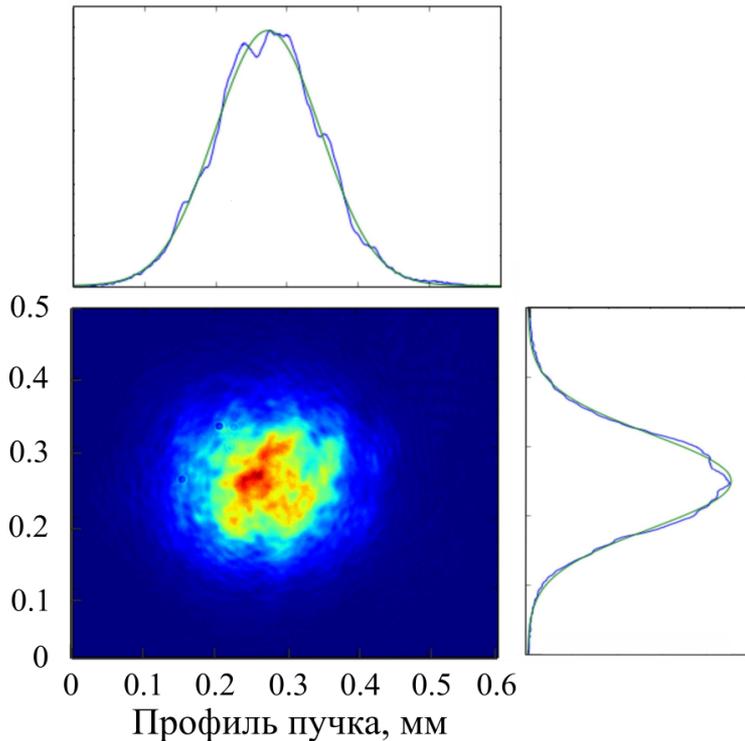
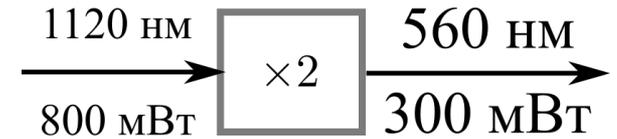
ГВГ 1

Оптически двуосный кристалл LiB_3O_5 (LBO)

Размер кристалла: 3 мм × 3 мм × 15 мм

Некритический синхронизм 1^{го} типа

$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$



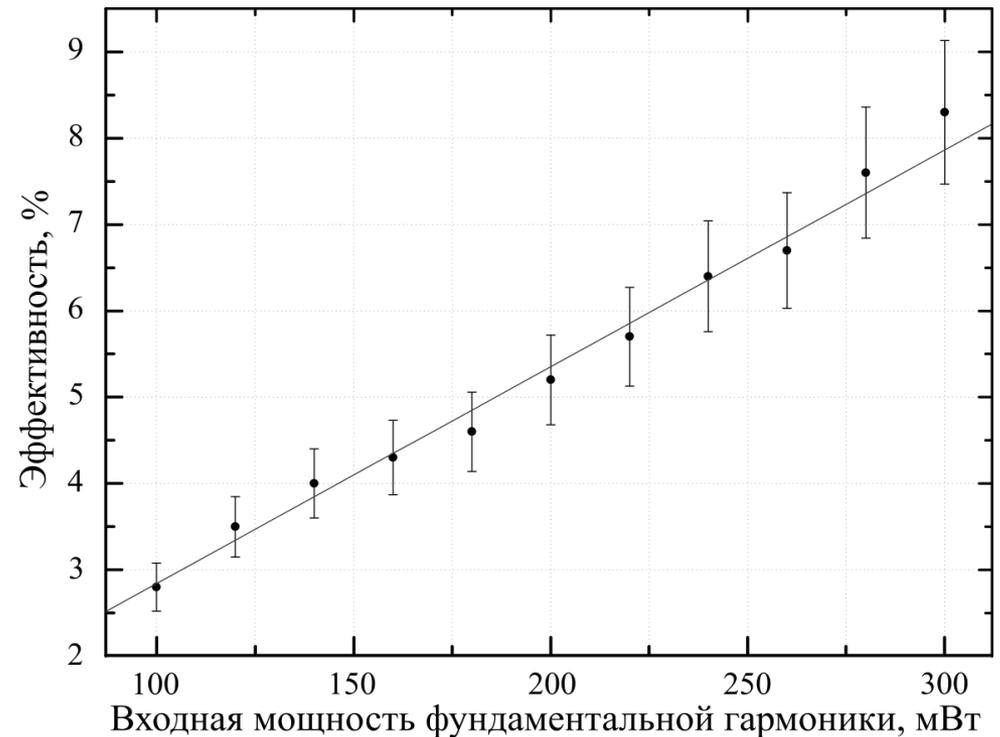
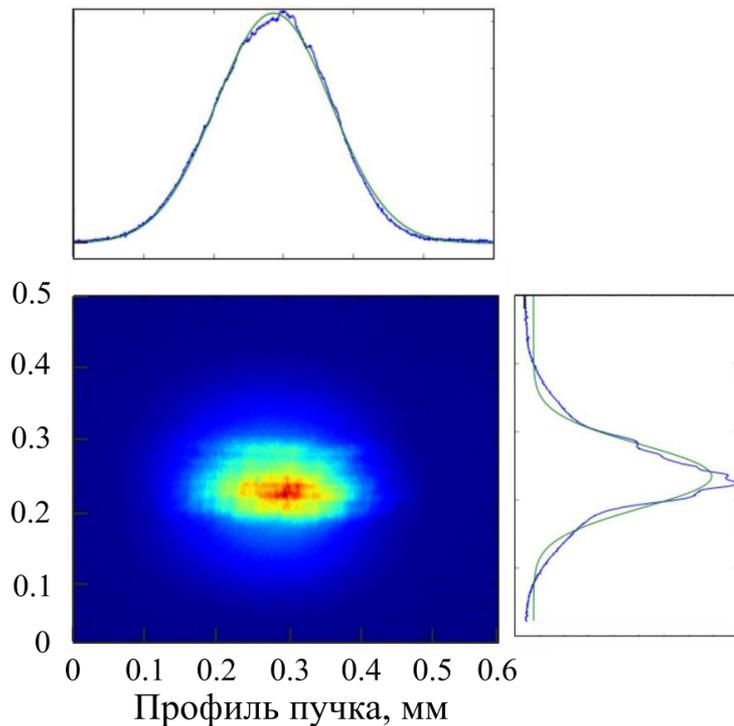
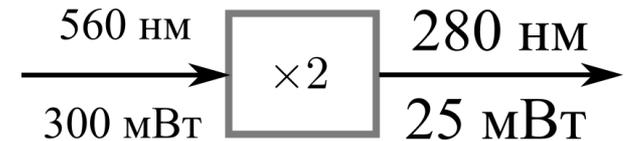
ГВГ 2

Оптически одноосный кристалл BaV_2O_4 (BVO)

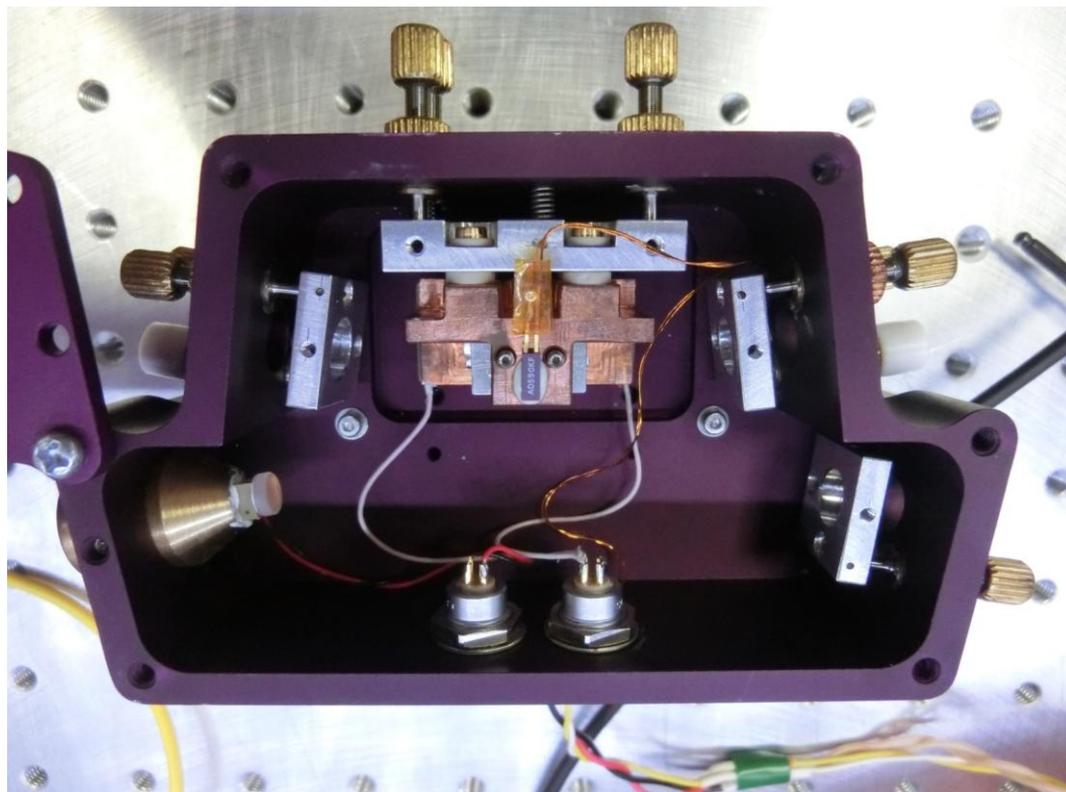
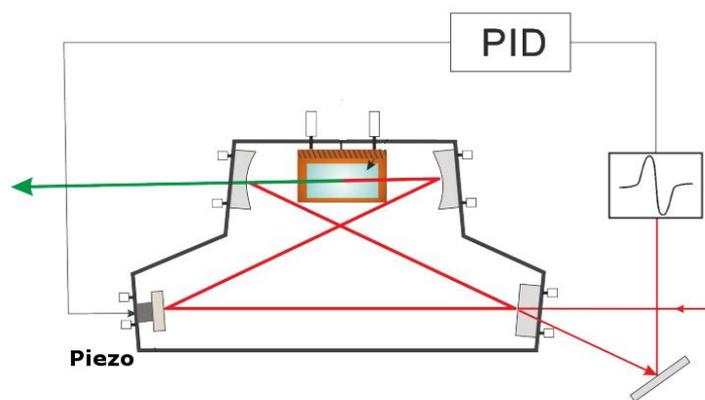
Размер кристалла: 3 мм × 3 мм × 10 мм

Критический синхронизм 1^{го} типа

$\theta = 90^\circ$, $\phi = 44.1^\circ$



ГВГ



Главные особенности:

- ✓ Компактность
- ✓ Привязка до 150 кГц
- ✓ Цельный металлический корпус
- ✓ Высокая эффективность (до 40%)

Предполагаемые ошибки

Относительная неточность
частоты для $^{133}\text{Cd}^+$

- **Квадратичный эффект Доплера**

$$\frac{\Delta\nu^D}{\nu} = -\frac{3k_B T}{2mc^2} - \alpha_m \quad \alpha_m = N_d \frac{k_B T}{mc^2} \quad \Rightarrow \quad 1.5 \times 10^{-15}$$

- **Сдвиг за счёт излучения чёрного тела**

$$\frac{\Delta\nu^{BBR}}{\nu} = -\beta \left(\frac{T_a}{300} \right)^4 \left[1 + \epsilon \left(\frac{T_a}{300} \right) \right]^2 \quad \Rightarrow \quad 1 \times 10^{-16}$$

- **Эффект Зеемана**

$$\frac{\Delta\nu^Z}{\nu} = \frac{2KB\Delta B}{\nu_{00}} \quad \Rightarrow \quad < 3.5 \times 10^{-16}$$

J. W. Zhang, S. G. Wang, Phys. Rev. B (2014) 114:183-187

Спасибо за внимание