

Применение лазеров

А.В. Тайченачев

В.И.Тельнов

Лекции по современной экспериментальной физике
Новосибирский Государственный университет

Применения лазеров в науке и технике в ИЛФ СО РАН

А.В. Тайченачев

Институт лазерной физики СО РАН

Институт лазерной физики СО РАН



Основан в 1991 г. В.П. Чеботаевым и С.Н. Багаевым
Сейчас: 100 научных сотрудников, 20 докторов, 40
кандидатов наук, 35 студентов и 15 аспирантов.

Фундаментальная ЛФ

- Лазерные стандарты частоты и времени – сверхточные атомные часы. Цель – относительные точность и стабильность лучше 10^{-18} в лаборатории и 10^{-16} в мобильном варианте. Nd(Yb):YAG/I₂, ультрахолодные атомы ^{24}Mg в оптических ловушках, одиночный ион $^{171}\text{Yb}^+$ в РЧ ловушке.
- Нелинейная лазерная спектроскопия и лазерное охлаждение атомов и ионов в электромагнитных ловушках.
- Экстремально интенсивные поля ($>10^{23}$ Вт/см²) ультракоротких лазерных импульсов ($<10^{-15}$ с) на основе когерентного сложения в многоканальных системах.
- Космические исследования с использованием лазерно–индуцированной плазмы на основе мощного импульсного CO₂ лазера.

Прикладная ЛФ

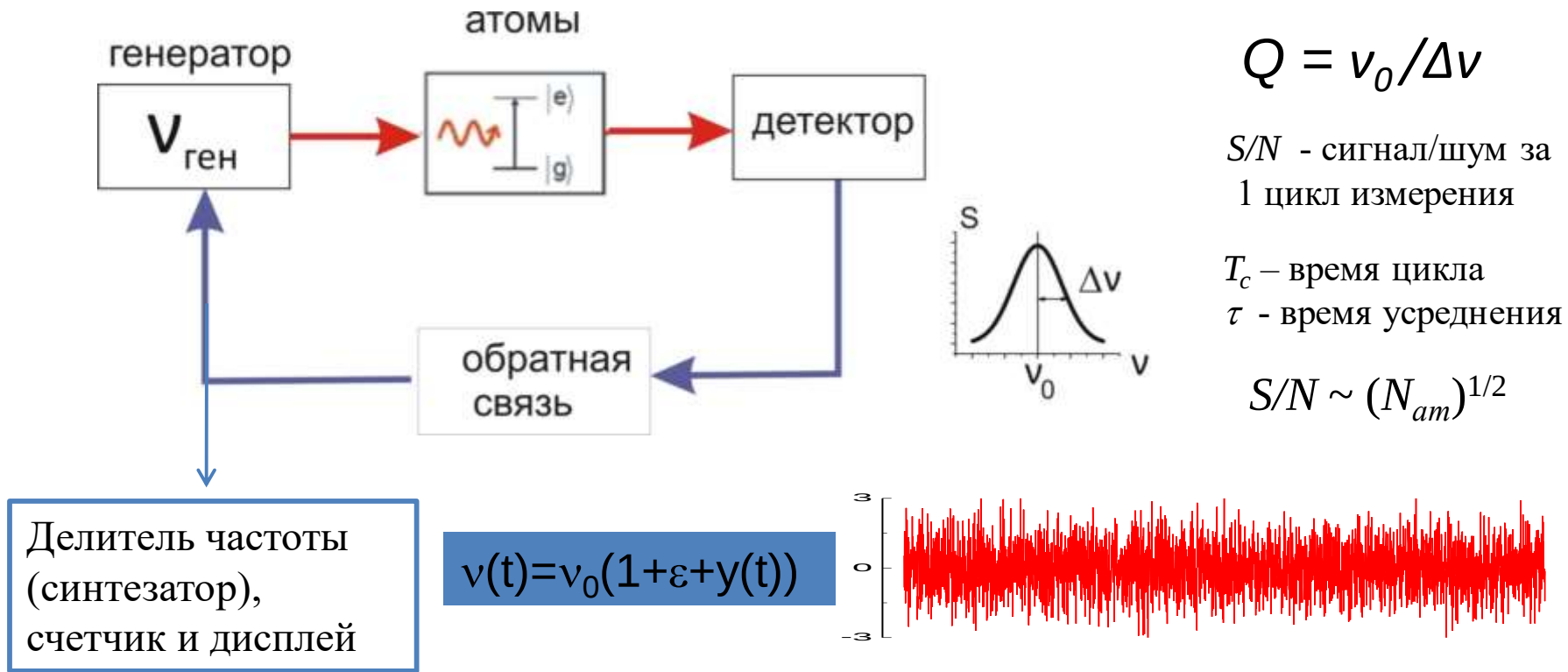
- Миниатюрные атомные часы на основе когерентного пленения населенностей.
- Интерференция волн материи ультрахолодных атомов и квантовая гравиметрия.
- Атомные магнитометры с лазерной накачкой.
- Фемтосекундные синтезаторы частот.
- Лазерно—плазменные технологии упрочения и модификации поверхностей и синтеза новых материалов с использованием мощных импульсно-периодических CO_2 лазеров.
- Лазерно—плазменные методы ускорения заряженных частиц.
- Мощные твердотельные лазерные системы с диодной накачкой.
- Перестраиваемые параметрические генераторы света в среднем ИК диапазоне частот.
- Компактные CO_2 лазеры и их применения.
- Газоразрядные лазеры для медицинских применений.
- Твердотельные лазеры для медицины.
- Лазерная биофизика.
- Автоматизация лазерного эксперимента.

Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры в ИЛФ СО РАН

- Введение.
- Оптические стандарты частоты
- Миниатюрные квантовые стандарты частоты
- Атомные магнитометры с оптической (лазерной) накачкой

Квантовые стандарты частоты (атомные часы).

Основные принципы.



Стабильность частоты: $y(t)$, характеризуется девиацией Аллана:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{Q} \frac{1}{S/N} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}},$$

Точность связана с неопределенностью систематического сдвига ε

Применение атомных часов

- **Навигация**

GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, GALILEO, IRNSS и др.

- **Точная синхронизация процессов**

TAI – международное атомное время

С 1967 г. эталон времени (сек.) и частоты (Гц)

Телекоммуникационные и информационные техн.

Измерение геопотенциала – Хронометрическая геодезия

- **Проверка фундаментальных физ. теорий**

Теория относительности (специальная и общая) $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$

Квантовая электродинамика

Поиск изменений фундаментальных физических констант

Точное измерение физических констант

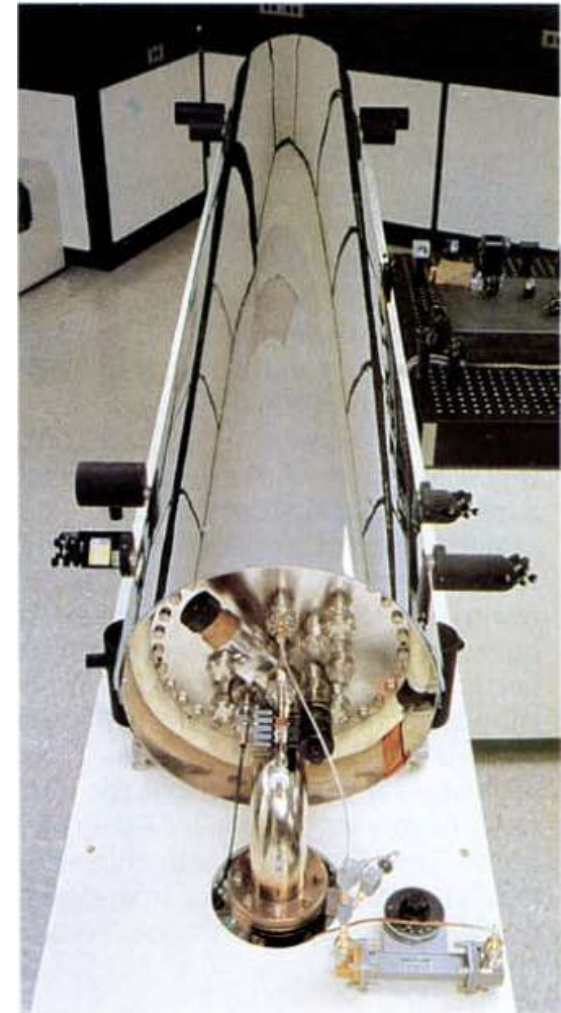
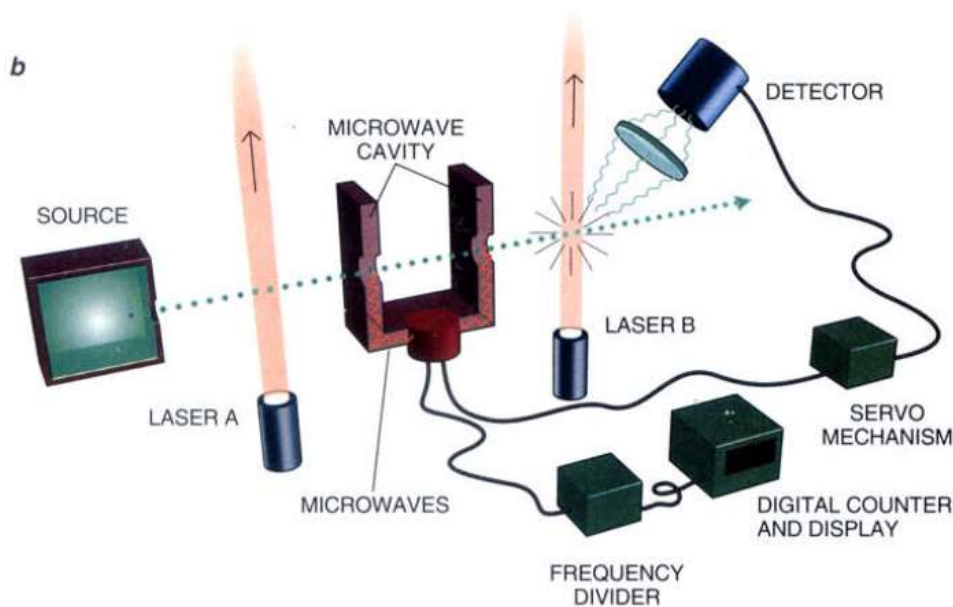


$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (-0.7 \pm 2.1) \times 10^{-17} \text{ yr}^{-1}$$

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} = (0.2 \pm 1.1) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$$

Цезиевые атомные часы пучкового типа

Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.



NIST-7: расстояние между рамсеевскими зонами – 1.53 м; скорость – 230 м/с;
ширина линии – 77 Гц;
рабочая частота – 9.2 ГГц;
(не)стабильность: $10^{-12} \tau^{-1/2}$;
(не)точность: 5×10^{-15} .

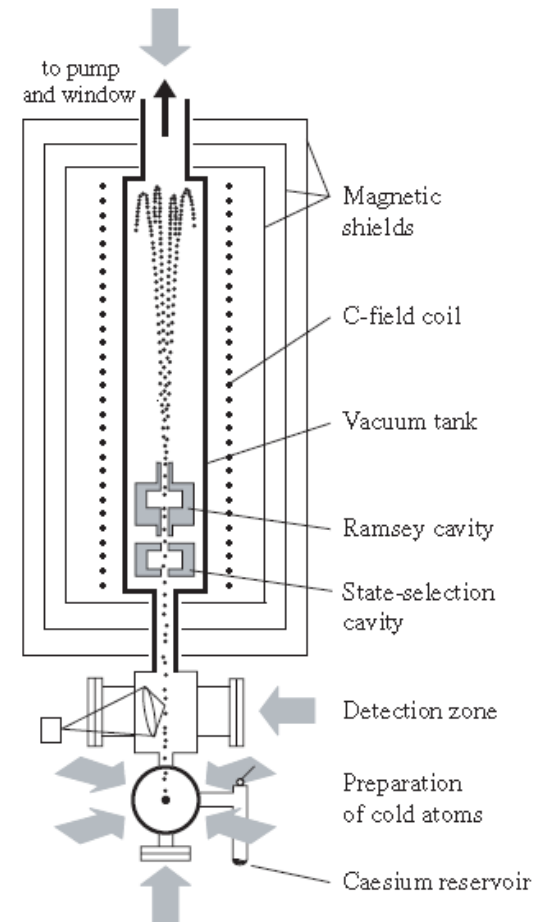
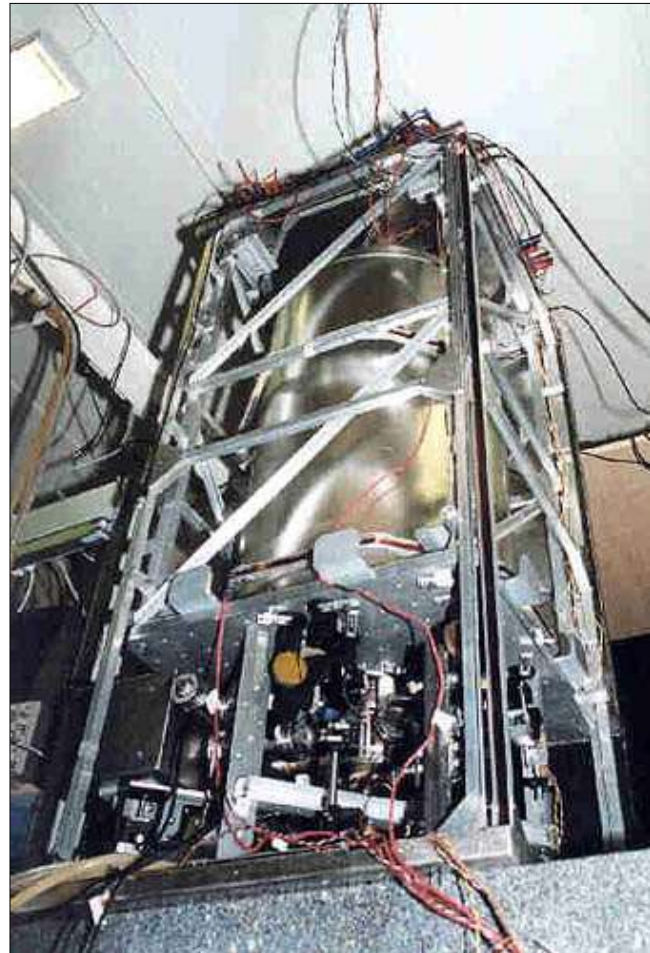
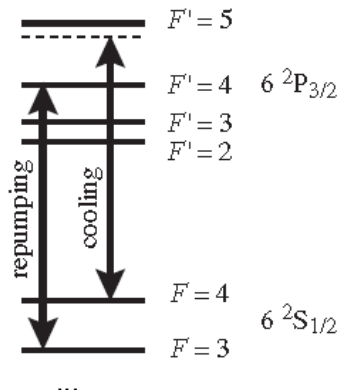
Цезиевые атомные часы фонтанного типа

температура 5 мК;

ширина линии 1 Гц;

стабильность $10^{-14}\tau^{-1/2}$

точность 2×10^{-16}



Атомные часы оптического диапазона.

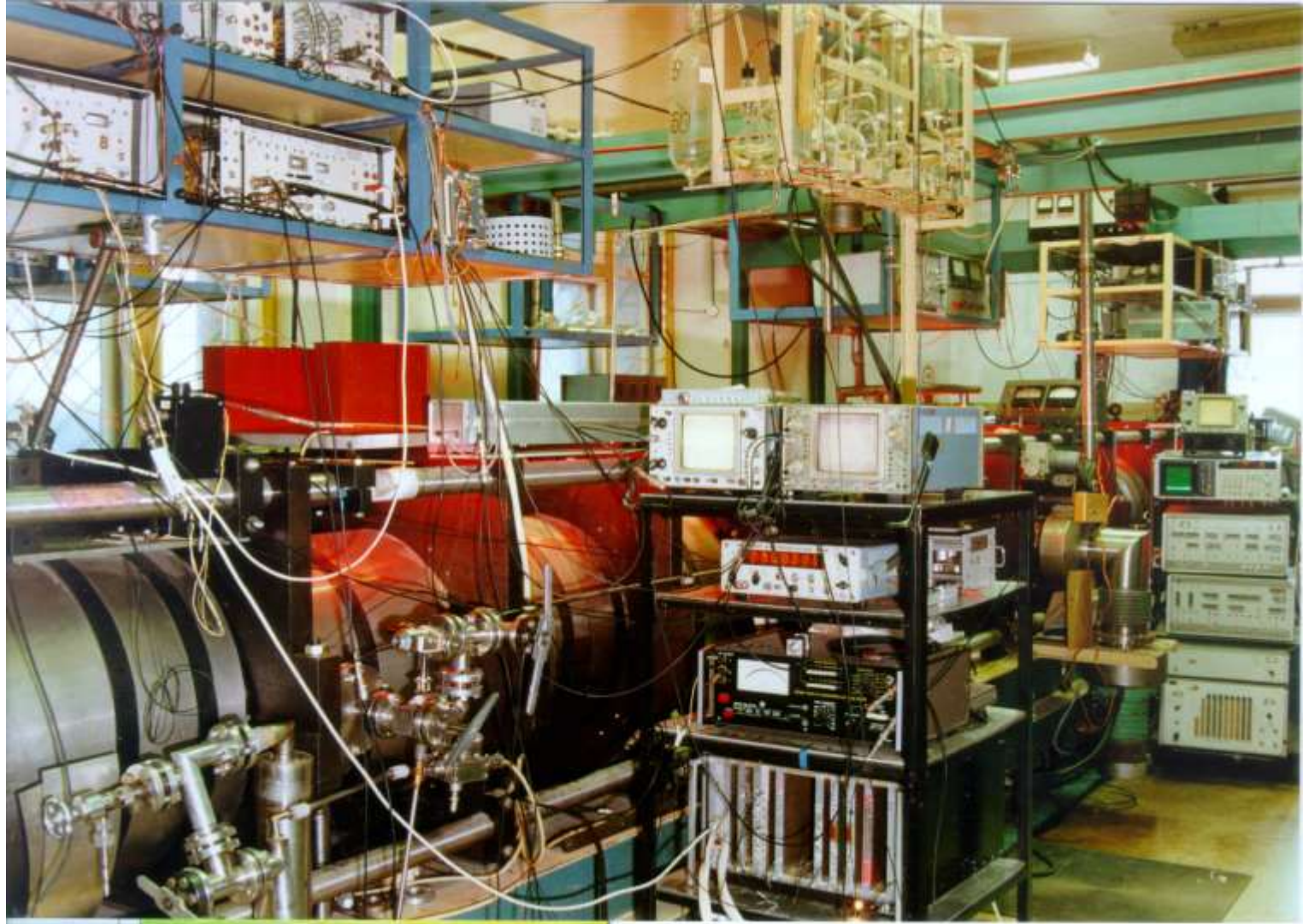
- **Преимущества:**

- При приблизительно одинаковой абсолютной погрешности частоты, относительная точность может быть улучшена на несколько порядков.
- При делении оптической частоты до радиодиапазона относительная точность сохраняется.

- **Недостатки:**

- Пропорционально частоте увеличивается влияние эффекта Доплера и эффекта отдачи → уменьшаются стабильность и точность.
- Деление оптической частоты в 10^5 раз – технически нетривиальный процесс.

**Один из первых оптических стандартов частоты
(He-Ne/CH₄ – резонансы насыщенного поглощения)
в ИЛФ СО РАН**



Первая система деления оптической частоты в радиодиапазон (1981 г.)

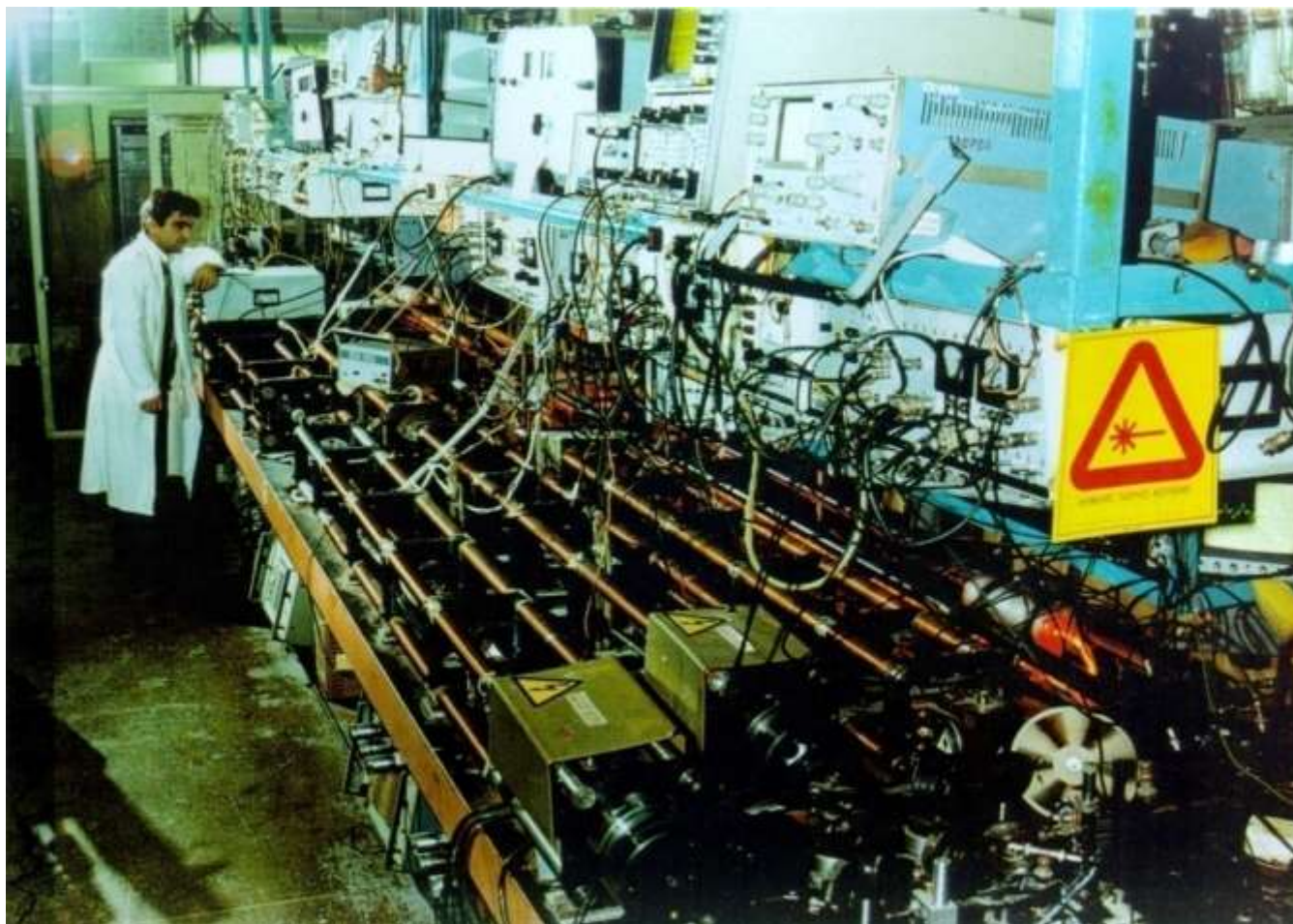
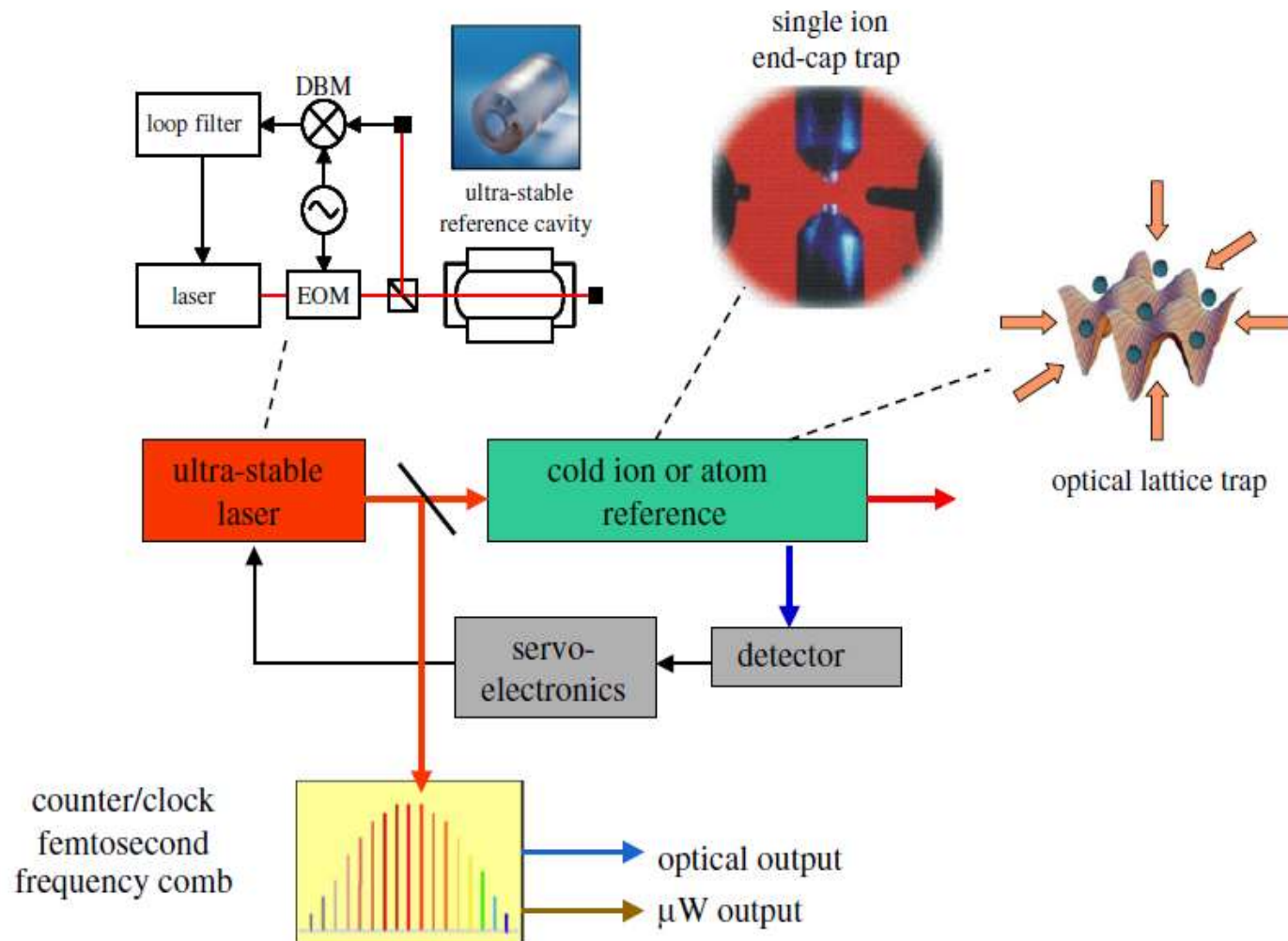
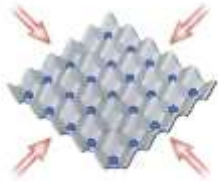


Схема современного оптического стандарта частоты с использованием ультрахолодных атомов или ионов (относительная неопределенность 10^{-17} - 10^{-18})





Ансамбли нейтральных атомов: ^{171}Yb , ^{87}Sr , ^{88}Sr , ^{199}Hg , ^{11}Cd ...



$$^{87}\text{Sr} \quad \Delta\nu/\nu = 8 \times 10^{-19}, \quad \sigma = 4.8 \times 10^{-17}/(\tau)^{1/2} \text{ (JILA, USA, 2019, 2024)}$$

$$^{87}\text{Sr} \quad \Delta\nu/\nu = 7 \times 10^{-18} \text{ (RIKEN, Japan, 2015)}$$

$$^{87}\text{Sr} \quad \Delta\nu/\nu = 1 \times 10^{-17} \text{ (ВНИИФТРИ, 2022)}$$

$$^{199}\text{Hg} \quad \Delta\nu/\nu = 7 \times 10^{-17} \text{ (RIKEN, Japan, 2015)}$$

$$^{169}\text{Tm} \quad \Delta\nu/\nu = 5 \times 10^{-18} \text{ (ФИАН, 2018)}$$

$$^{171}\text{Yb} \quad \Delta\nu/\nu = 1.4 \times 10^{-18}, \quad \sigma = 6 \times 10^{-17}/(\tau)^{1/2} \text{ (NIST, USA, 2018)}$$

Одиночные ионы: Hg^+ , Al^+ , Yb^+ , Sr^+ , Ca^+ , In^+ , Lu^+ ...

$$^{199}\text{Hg}^+ \quad \Delta\nu/\nu = 1.9 \times 10^{-17} \text{ (NIST, USA, 2008)}$$

$$^{88}\text{Sr}^+ \quad \Delta\nu/\nu = 1.1 \times 10^{-17} \text{ (NRC, Canada, 2017)}$$

$$^{171}\text{Yb}^+ \quad \Delta\nu/\nu = 3.2 \times 10^{-18} \text{ (PTB, Germany, 2016) (E3+HRS)}$$

$$^{171}\text{Yb}^+ \quad \sigma = 6.5 \times 10^{-15}/(\tau)^{1/2} \text{ (ИЛФ СО РАН, 2022) (E2)}$$

$$^{171}\text{Yb}^+ \quad \Delta\nu/\nu = 4 \times 10^{-17} \text{ (ФИАН, 2022) (E2) (НСП)}$$

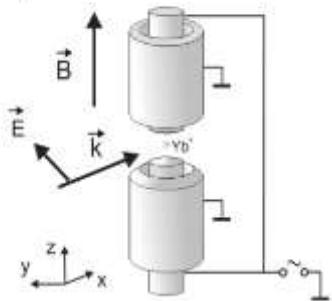
$$^{40}\text{Ca}^+ \quad \Delta\nu/\nu = 3 \times 10^{-18}, \quad 4.8 \times 10^{-18} \text{ (ТОС) (APM, China, 2021-23)}$$

$$^{176}\text{Lu}^+ \quad \Delta\nu/\nu = 6.3 \times 10^{-18} \text{ (CQT, Singapore, 2022) (HRS)}$$

$$^{27}\text{Al}^+ \quad \Delta\nu/\nu = 9.4 \times 10^{-19} \text{ (NIST, USA, 2019) (Quantum logic)}$$

$$\sigma = 1.2 \times 10^{-15}/(\tau)^{1/2}$$

b)



Пионеры оптических часов

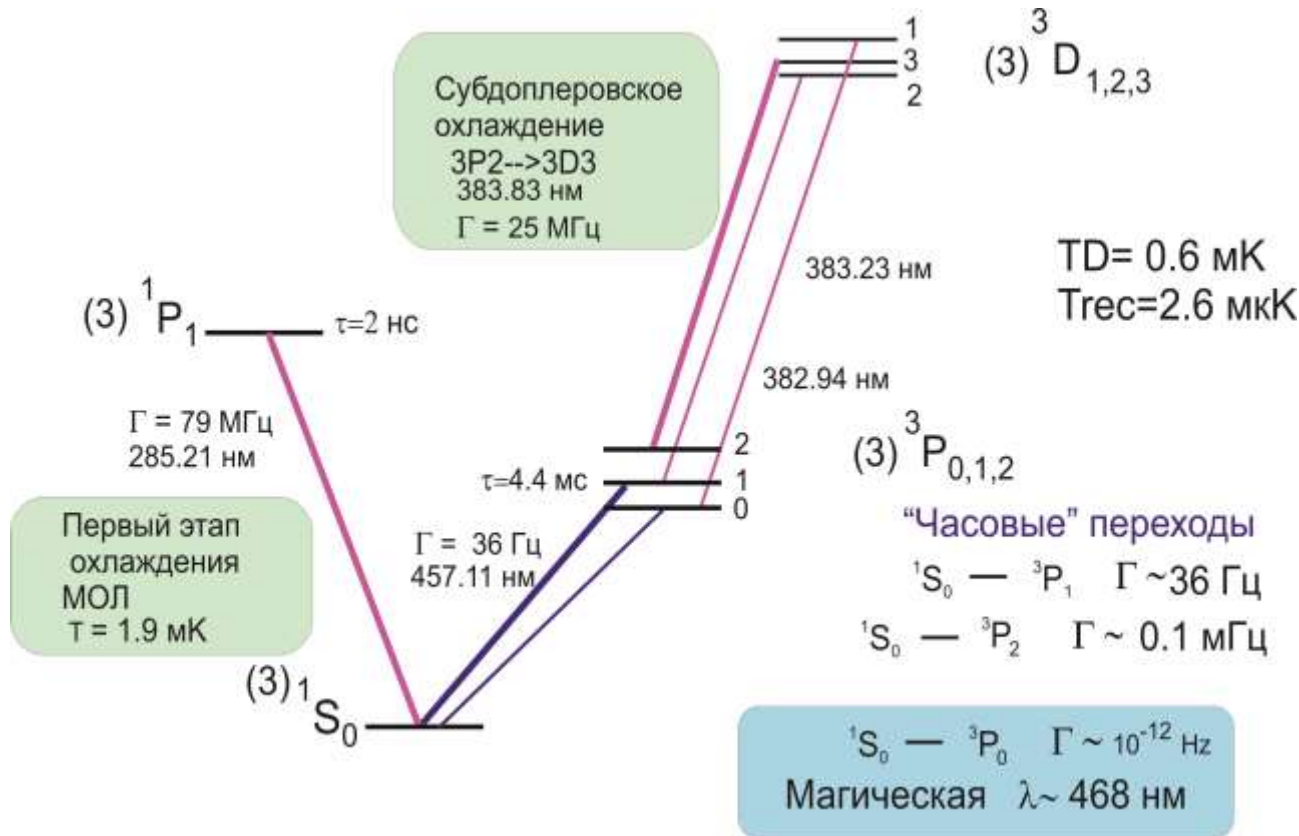


С.Н. Багаев , В.П. Чеботаев,
Дж. Холл, Т. Хэнш, (NP - 2005)
Д. Вайнлэнд (NP - 2012)

Оптические стандарты частоты в ИЛФ СО РАН

Нейтральные атомы магния и
одионочный ион иттербия

Атомы магния являются перспективными для создания стандарта частоты с относительной погрешностью менее 10^{-17}



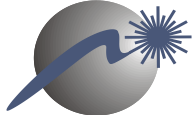
■ Наиболее простой щелочно-земельный атом, для которого реализованы охлаждение и локализация.

Простая структура ($1s2,2s2,2p6,3s2$) – как у Al^+

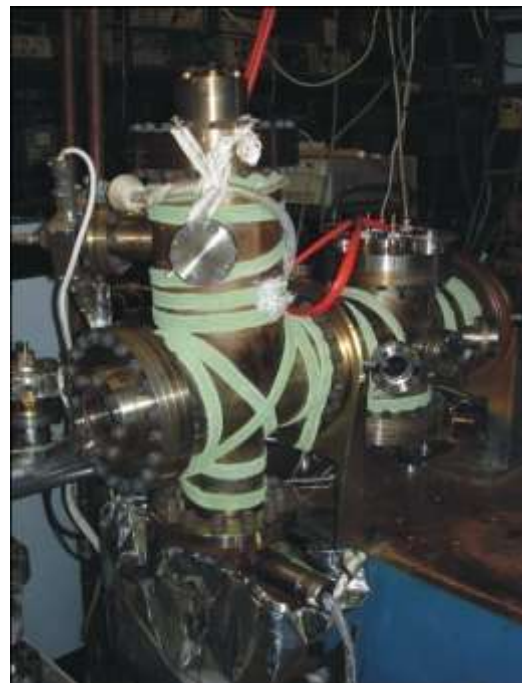
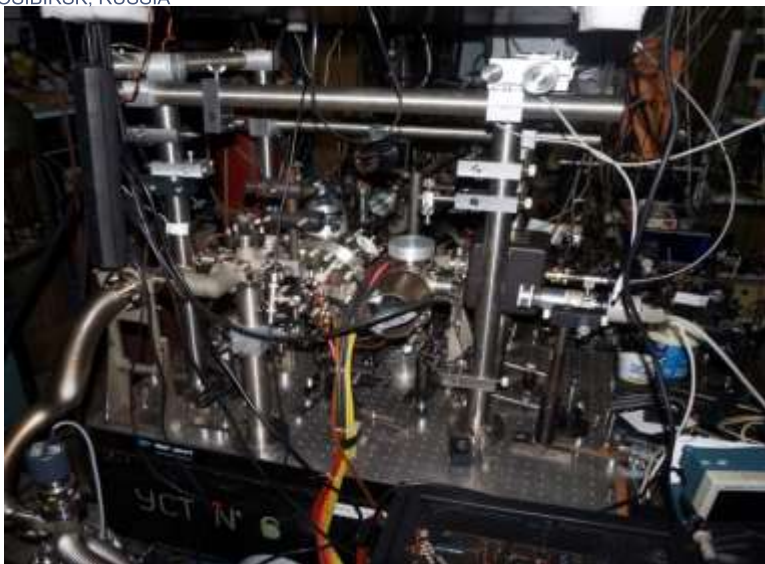
3 изотопа - ^{24}Mg (79%), ^{25}Mg (10%), ^{26}Mg (11%)

■ Узкий $1S_0 \rightarrow 3P_1$ переход (36 Гц)

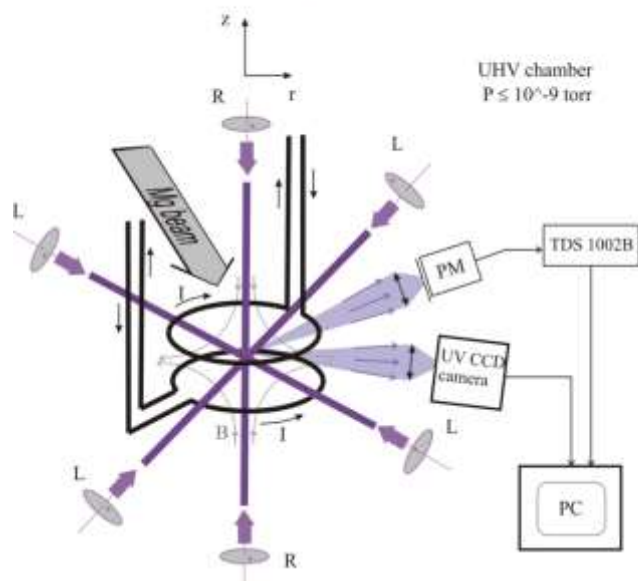
■ Малый VBR сдвиг - -0.26 Гц $(300 \text{ K/T})^4$



Mg MOT



Mg MOT

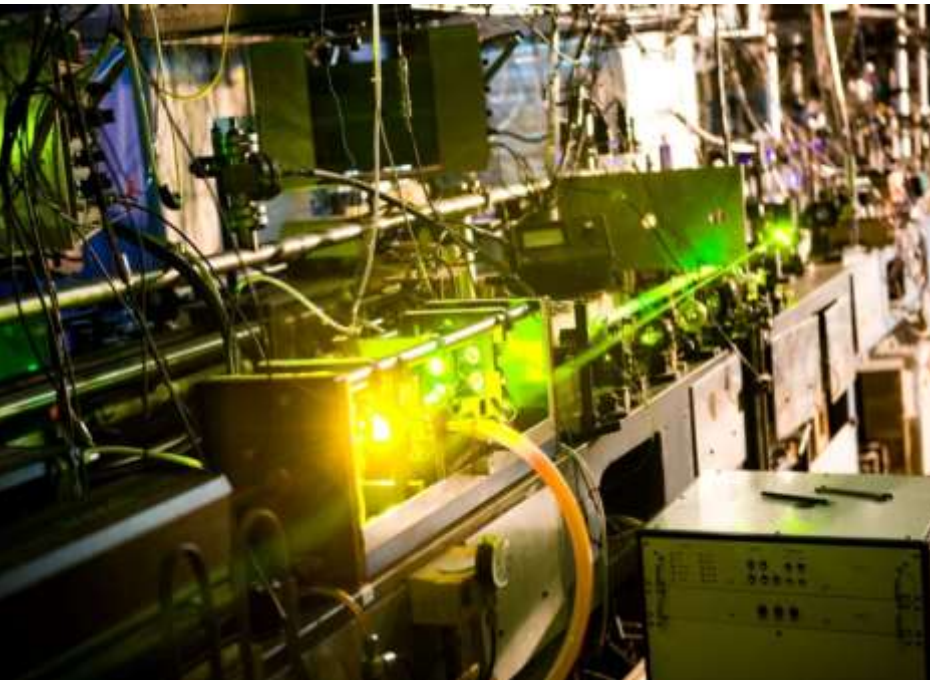


$N_{\text{at}} \sim 10^6 - 10^7$

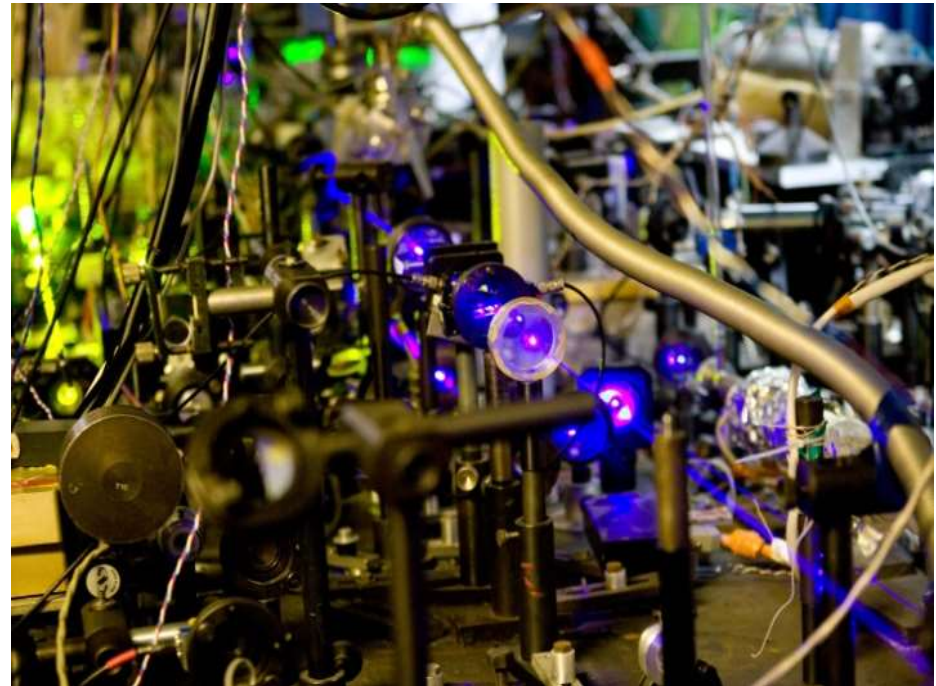
Cloud diameter $\sim 0.2 - 0.5$ mm

$T \sim 3-5$ mK

Laser systems for Mg frequency standard

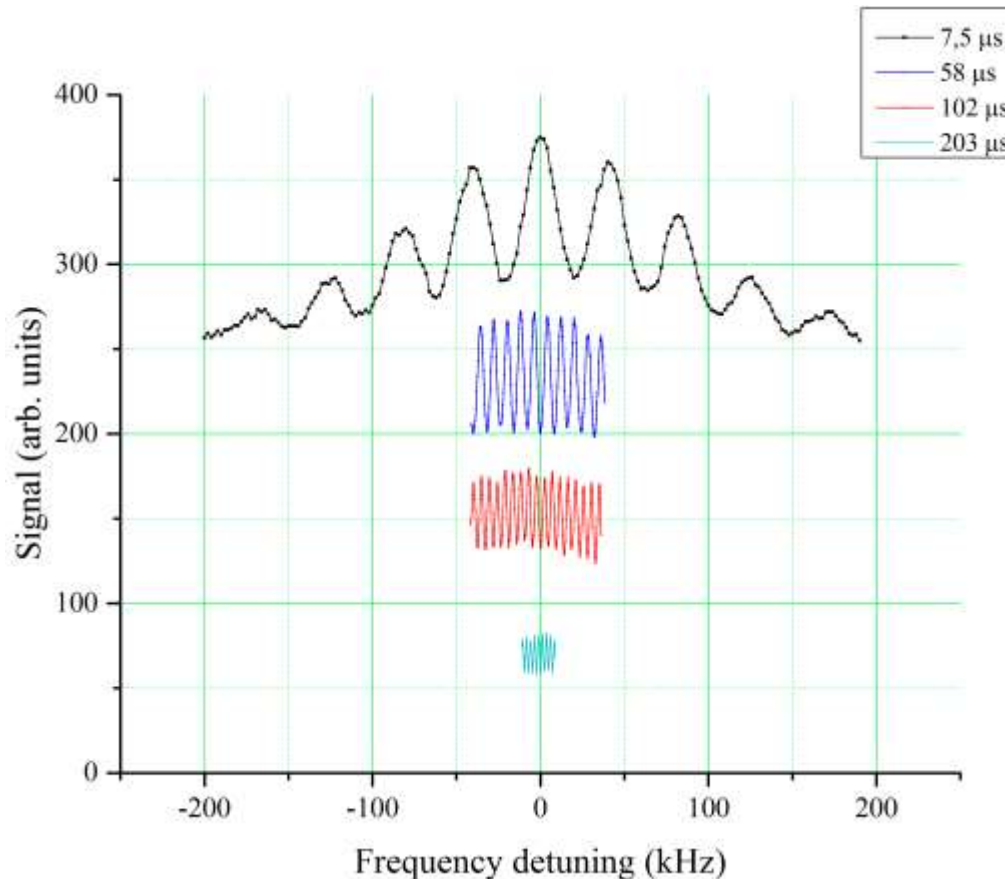


Laser system for laser cooling
based on dye laser/SHG
 $\lambda = 285 \text{ nm}$ $P = 100 \text{ mW}$

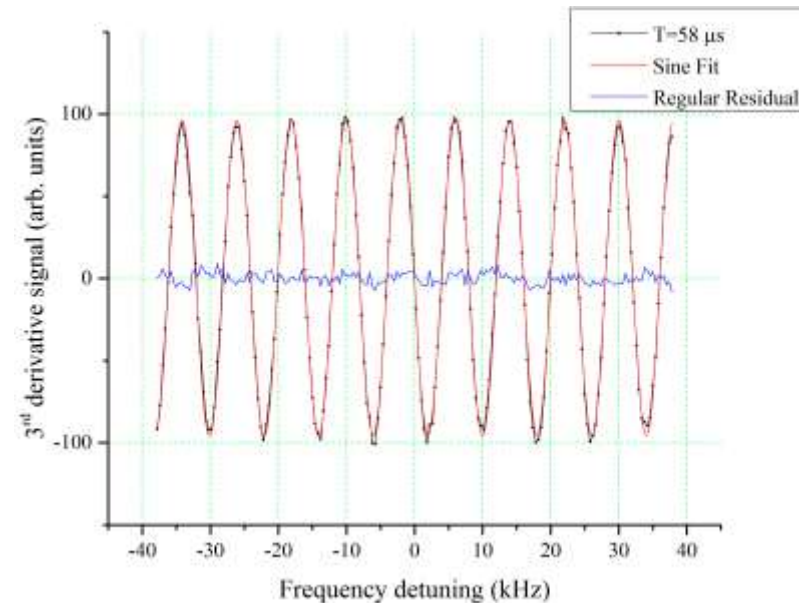


Clock laser system at 457 nm
based on Ti:Sa/SHG
 $P = 150 \text{ mW}$

Ramsey-Bordè resonances with Mg atoms in MOT



3-rd derivative signal used
for frequency stabilization

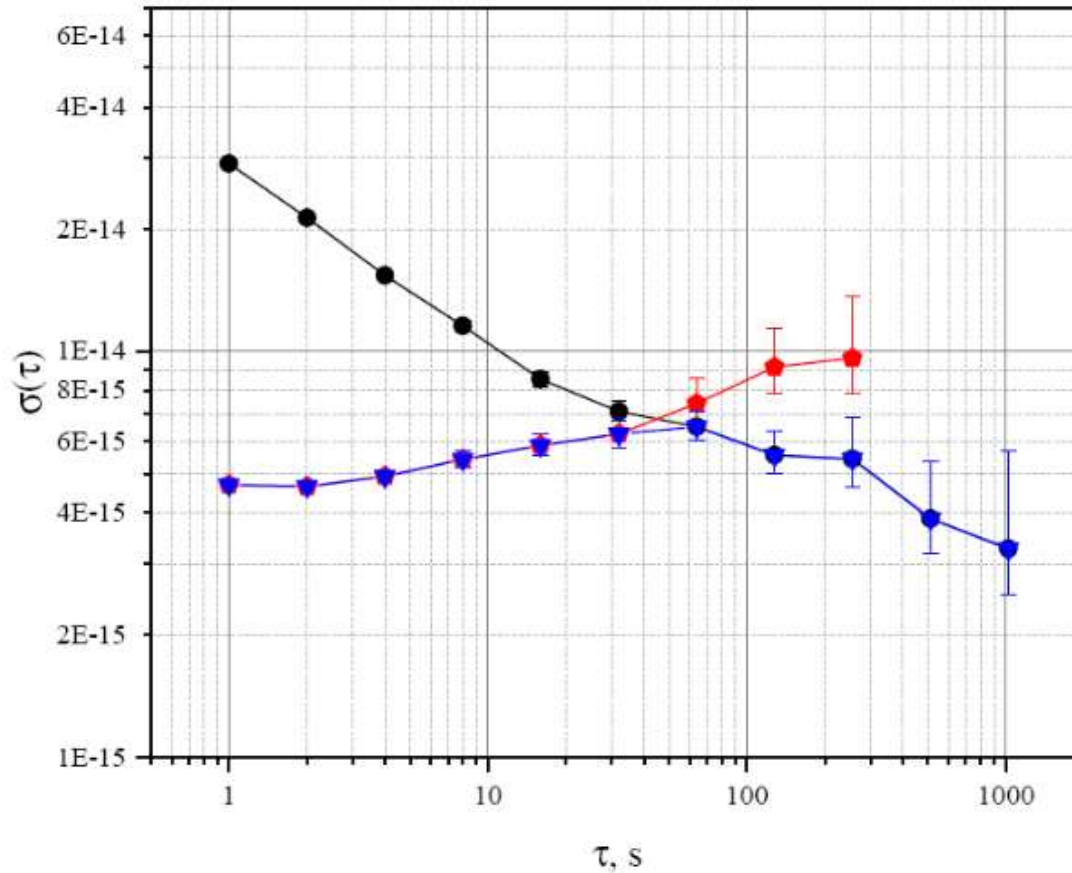


S/N=55
HWHM=2 $\kappa\Gamma_{\text{D}}$

$\gamma < 100 \text{ Hz}$

$Q > 5 \cdot 10^{12}$ $N=10^6$ $T_{\text{cycle}}=20 \text{ ms}$ $\sigma(\tau) \sim 10^{-16} / \tau^{1/2}$ - QPN limit

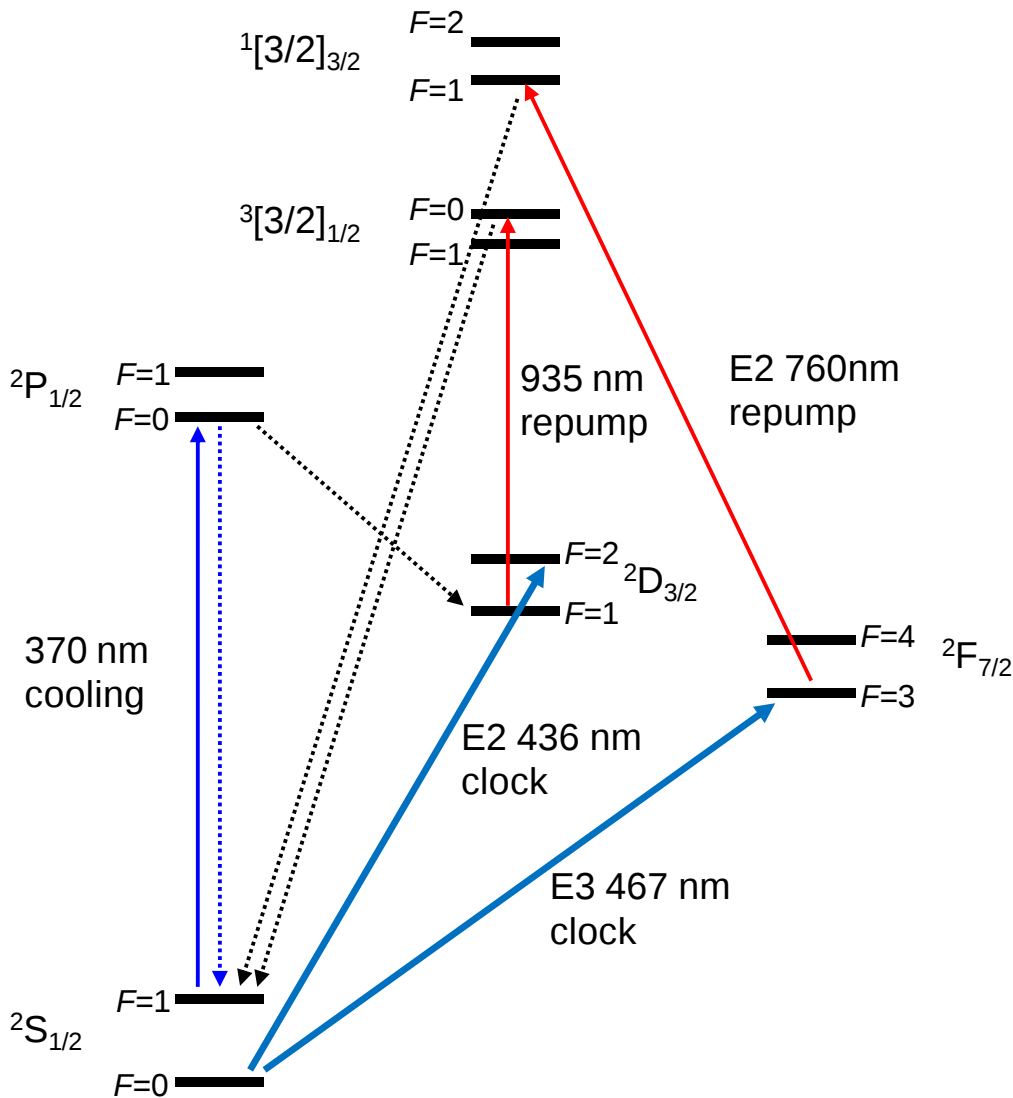
Allan deviation measurement



Black line – Allan deviation with standard frequency is defined by Yb:YAG/I2 etalon laser

Red line - Allan deviation with standard frequency is defined by stable Yb⁺ etalon laser system

Blue line – Allan deviation of Mg frequency standard



Иттербий-171 – уникальный химический элемент, имеет **два сверхузких запрещенных оптических перехода**:

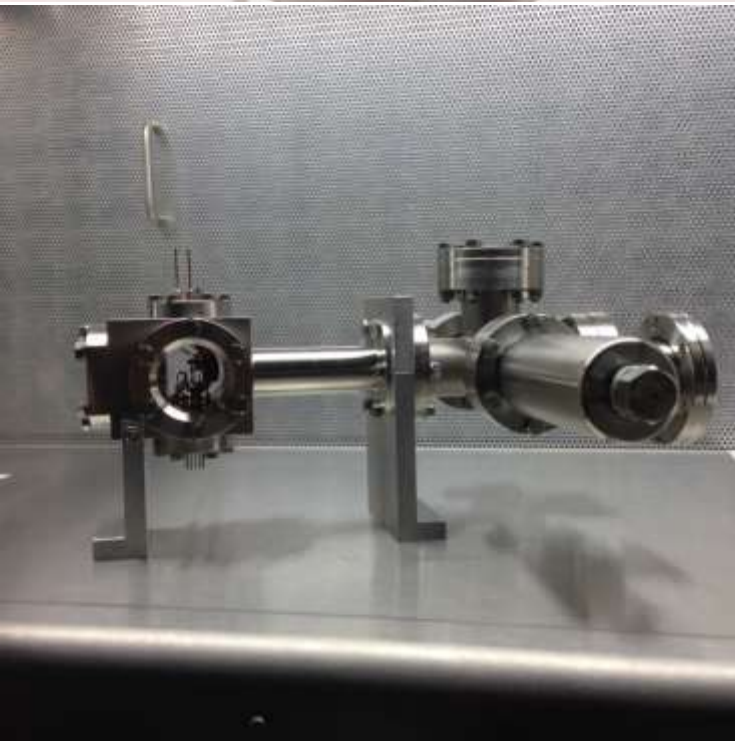
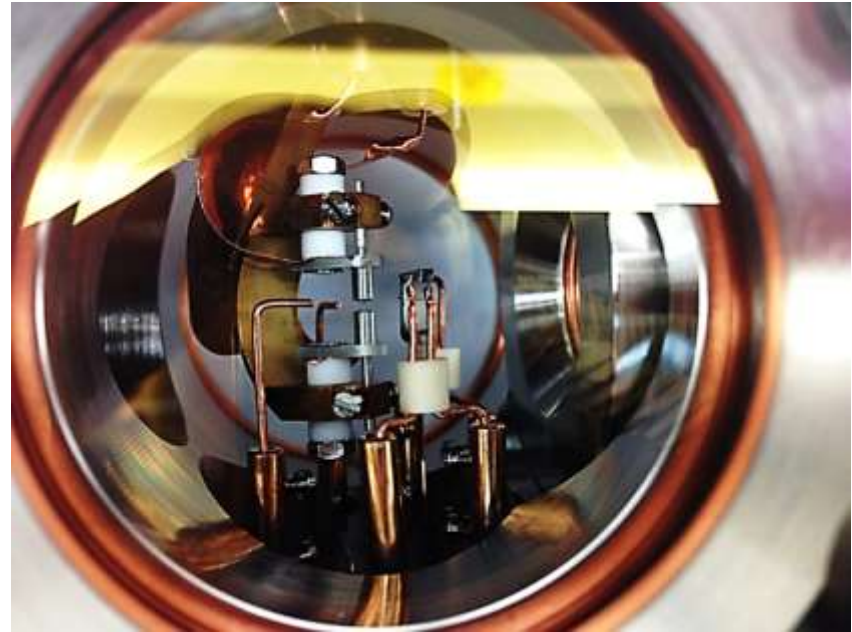
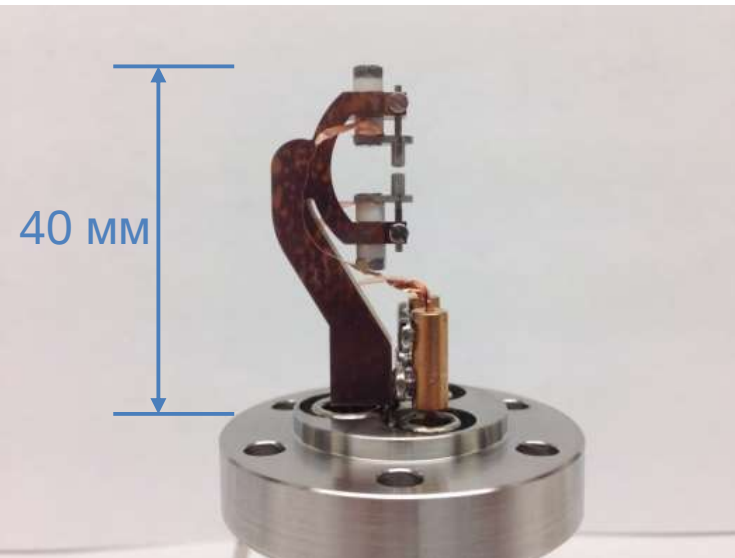
$^2S_{1/2}$ ($F=0$) $\rightarrow$ $^2D_{3/2}$ ($F=2$) электрический квадрупольный переход с естественной шириной линии ~ 3 Гц и длиной волны 436 нм,

$^2S_{1/2}$ ($F=0$) $\rightarrow$ $^2F_{7/2}$ ($F=3$) электрический октупольный переход с естественной шириной линии несколько нГц и длиной волны 467 нм.

Лазерное охлаждение и детектирование иона реализуется на дипольном переходе $^2S_{1/2}$ ($F=1$) $\rightarrow$ $^2P_{1/2}$ ($F=0$) с естественной шириной 23 МГц и длиной волны 370 нм. Для снятия заселенности уровней $^2D_{3/2}$ и $^2F_{7/2}$ используются перекачивающие лазеры на длинах волн 935 нм и 760 нм соответственно.



- Создана РЧ ловушка.
- Созданы лазерная система для охлаждения ионов и система оптического детектирования ионов в ловушке по флуоресценции.
- Отработаны принципы лазерного охлаждения, захвата и удержания в РЧ ловушке одиночных ионов иттербия.
- Разработана лазерные системы для возбуждения часовых переходов.
- Эксперименты по спектроскопии квадрупольного перехода. Оценка стабильности.



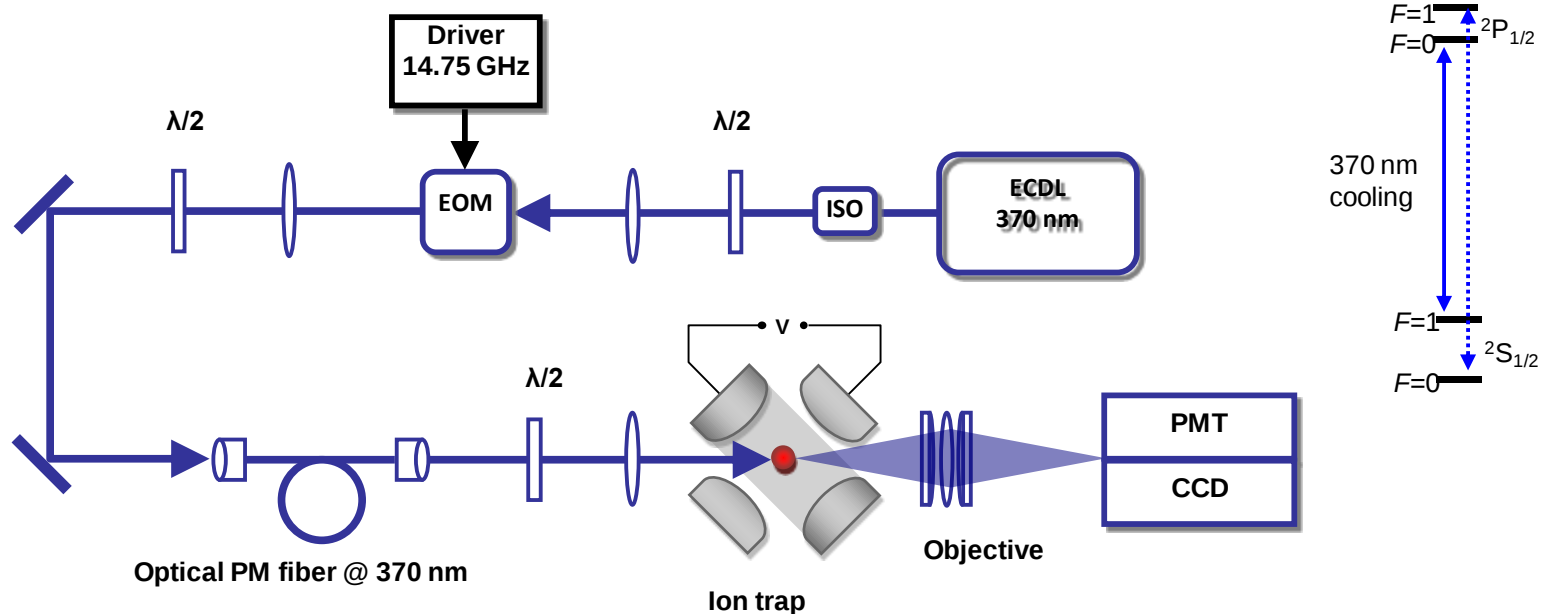
Электроды ловушки, печь для испарения атомов иттербия, дополнительные электроды используются для подачи постоянного напряжения, компенсирующего несимметричность поля в ловушке вследствие неидеальности конструкции или присутствия паразитных полей.

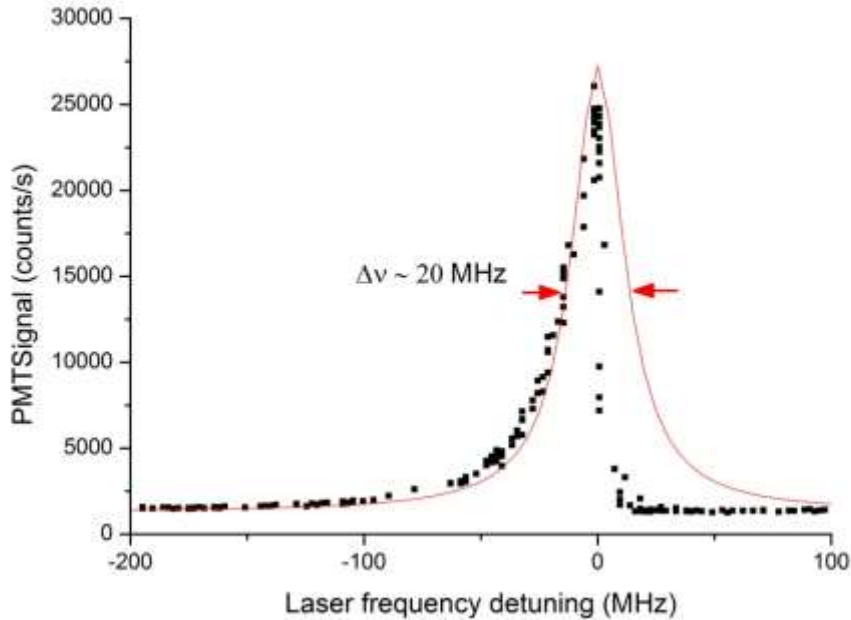
Ионная ловушка с вакуумной системой.
Уровень вакуума $< 5 \cdot 10^{-10}$ Торр.



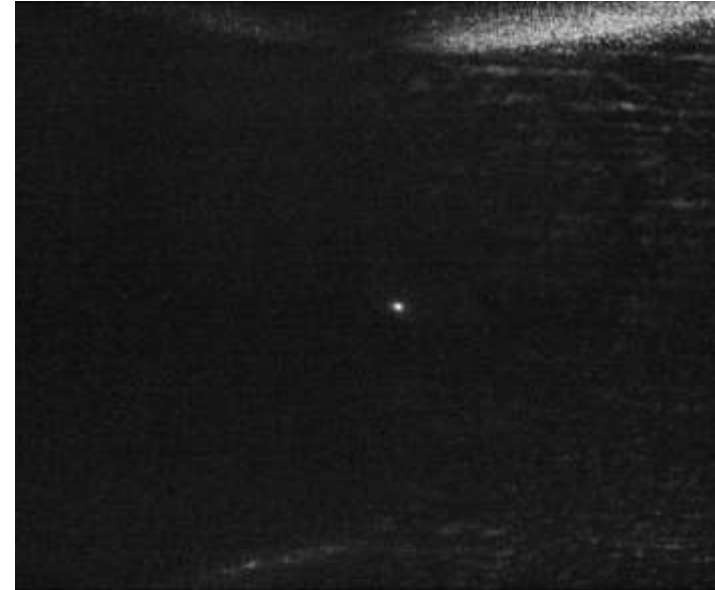
Допплеровское охлаждение и детектирование иона производится с помощью модулированного по частоте излучения на длине волны 370 нм. Излучение диодного лазера (Toptica DL Pro) модулируется ЭОМ на частоте 14.75 ГГц для генерации спектральной составляющей, возбуждающей сверхтонкую компоненту охлаждающего перехода $^2S_{1/2}$ ($F=0$) $\rightarrow$ $^2P_{1/2}$ ($F=1$), которая не возбуждается резонансным охлаждающим излучением. Относительная интенсивность модуляционных компонент составляет $\sim 1\%$ от несущей. Для охлаждения используется 3 мВт излучения, сфокусированного в перетяжку размером 50 мкм.

Излучение флуоресценции от иона, индуцированное охлаждающим лазером, проецируется с помощью многолинзового объектива на ФЭУ и на ПЗС камеру.





Спектр сигнала флуоресценции



Ион Yb-171 в ловушке

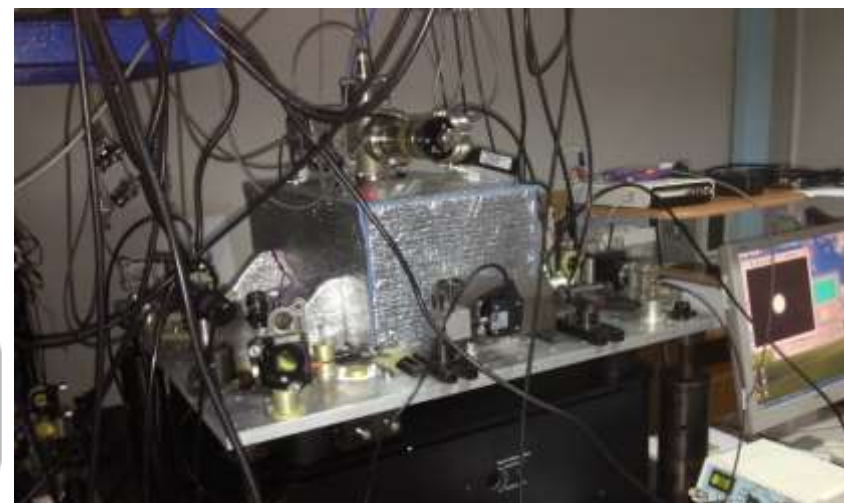
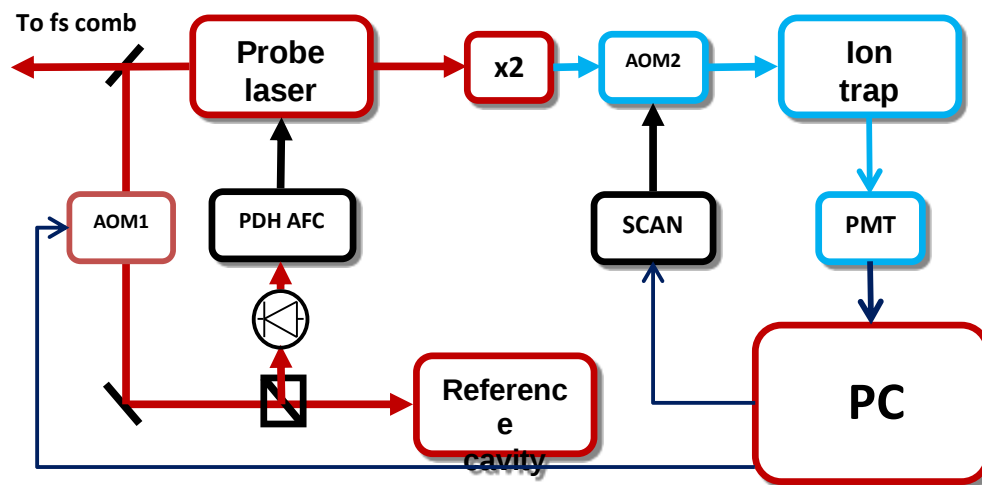
Лазерное охлаждение до доплеровского предела (для $^{171}\text{Yb}^+$: $T_D = 0.37 \text{ мК}$) позволяет локализовать ион в режиме Лэмба-Дике (среднее смещение $d < \lambda/\pi \sim 117 \text{ нм}$)

Кросс-корреляционный метод используется для детектирования и компенсации микродвижения иона, вызванного смещением из центра ловушки паразитными полями.



Для возбуждения квадрупольного часового перехода $^2S_{1/2} (F=0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F=2)$ используется излучение второй гармоники диодного лазера с внешним резонатором с длиной волны 871 нм.

Высокая кратковременная стабильность и узкая линия излучения достигаются путем стабилизации частоты лазера по резонансам отражения высокодобротного ULE интерферометра. Долговременная стабильность системы достигается с помощью подстройки частоты AOM на максимум сигнала вероятности возбуждения часового перехода одиночного иона, локализованного в радиочастотной ловушке.



Острота опорного эталона F
 $\sim 3.5 \cdot 10^5$

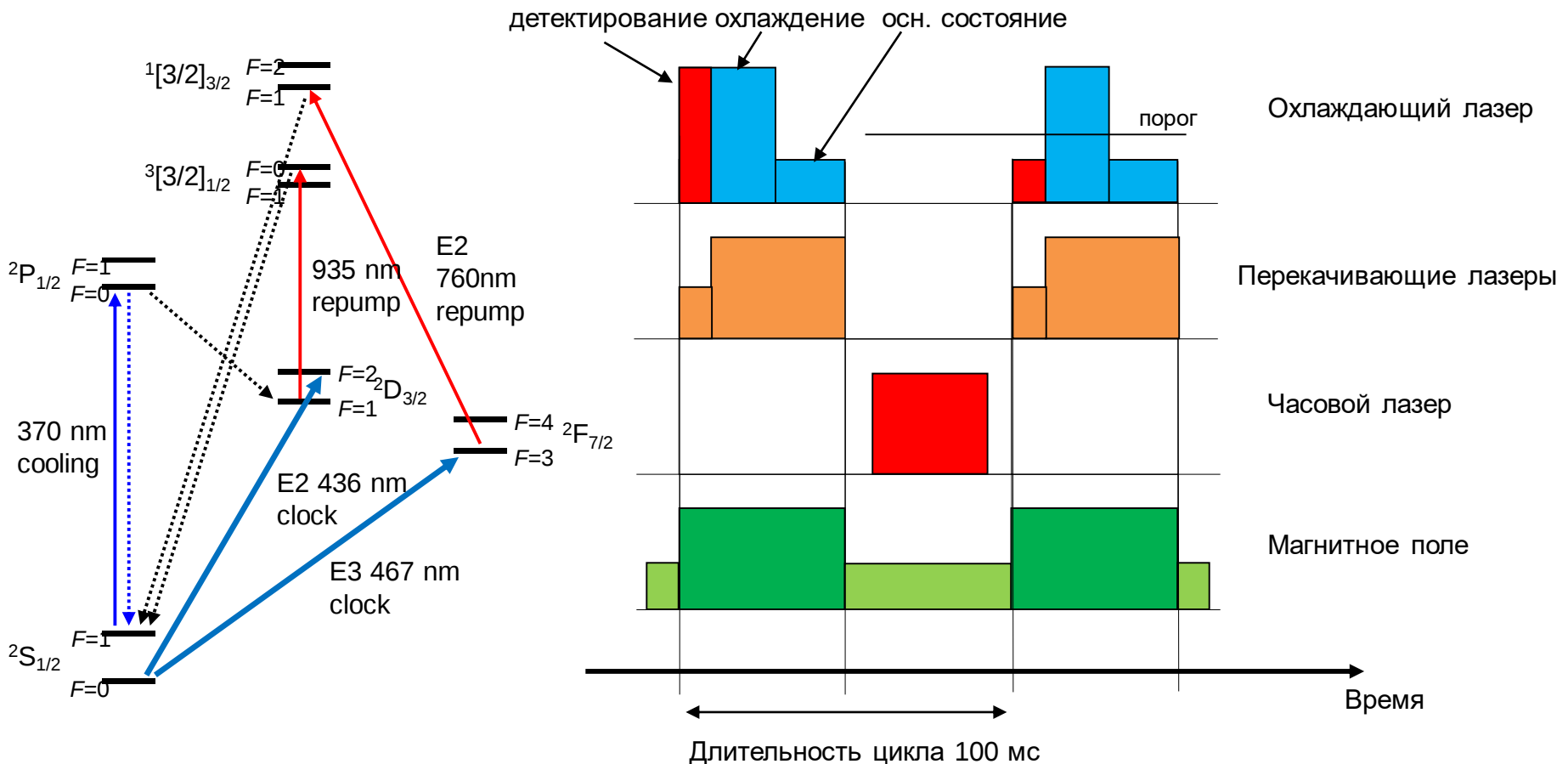
Ширина пика $\delta\nu = 4.2$ кГц

Для подавления низкочастотных колебаний опорный эталон размещен в вакуумной камере на системе подвесов, камера установлена на пассивной виброизоляционной плите.

Для уменьшения термического дрейфа температура эталона стабилизирована вблизи т.н. «нулевой точки», где CTE = 0 ($T = 26^\circ \text{C}$).



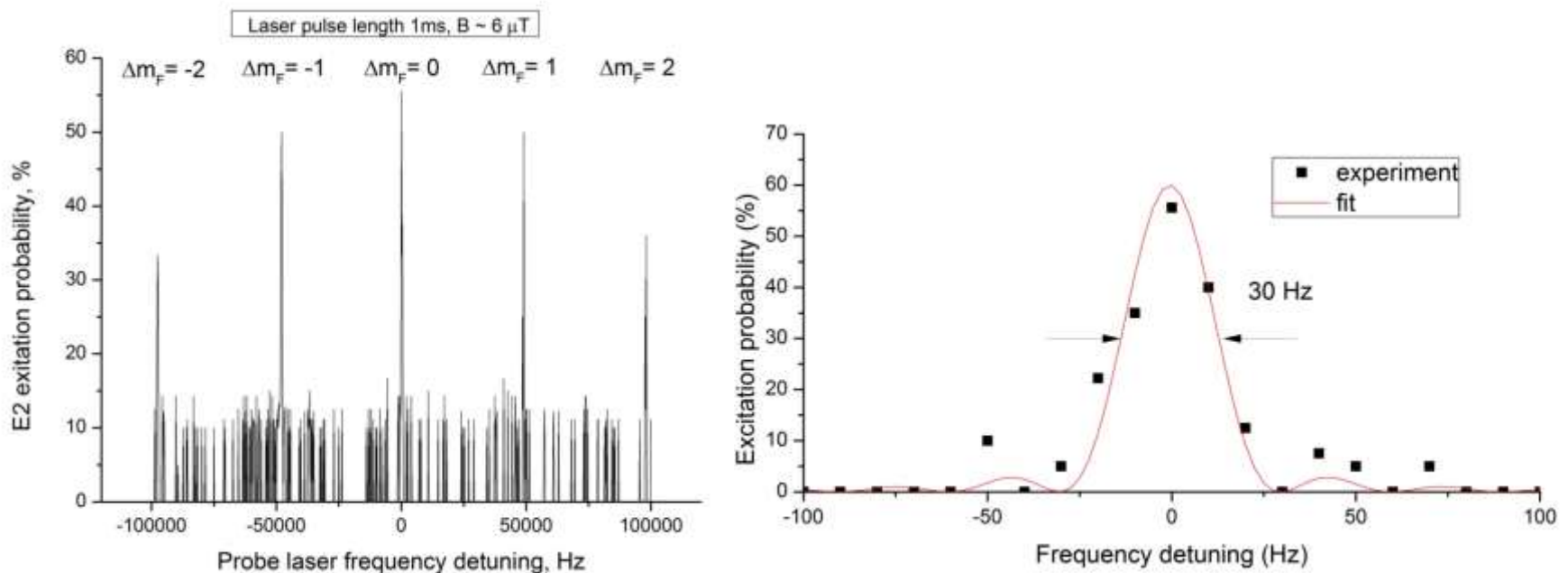
Подготовка и опрос энергетических состояний иона производится с помощью специально подобранной последовательности лазерных импульсов. Вероятность возбуждения энергетического уровня $^2D_{3/2}$ ($F=2$, $m_F=0$) (т.н. квантовые скачки) регистрируется как функция частоты "часового" лазера.



Временная последовательность возбуждения и детектирования часового перехода $^{171}\text{Yb}^+$



Детектированный спектр возбуждения квадрупольного перехода состоит из нескольких резонансов, которые содержат информацию о состоянии иона, его движении в ловушке и взаимодействии с окружающей средой. Ширина зарегистрированного резонанса на центральной частоте перехода составляет около 30 Гц.



Спектр возбуждения квадрупольного перехода $^2S_{1/2} (F=0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F=2)$ иона иттербия-171. Слева: спектр магнитных подуровней перехода; справа: спектр центральной компоненты $\Delta m_F=0$.



Menlo Systems FC1500-250-WG Er-fiber optical frequency comb generator. $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-14}$. $\sigma_y(\tau) = 5 \times 10^{-13}$ @ 1 s



$^{171}\text{Yb}^+$ OFS



$$f_{\text{beat}} = \nu_{\text{Clock}} - (n \cdot f_{\text{rep}} + 2 \cdot f_{\text{ceo}})$$

$$\sigma_y(\tau), \nu_{\text{E2}} = 2 \cdot \nu_{\text{Clock}}$$



Yb :YAG/I₂ laser frequency standard, $\Delta\nu/\nu \approx 3 \times 10^{-13}$, $\sigma_y(\tau) = 3 \times 10^{-15}$ @ 1000 s

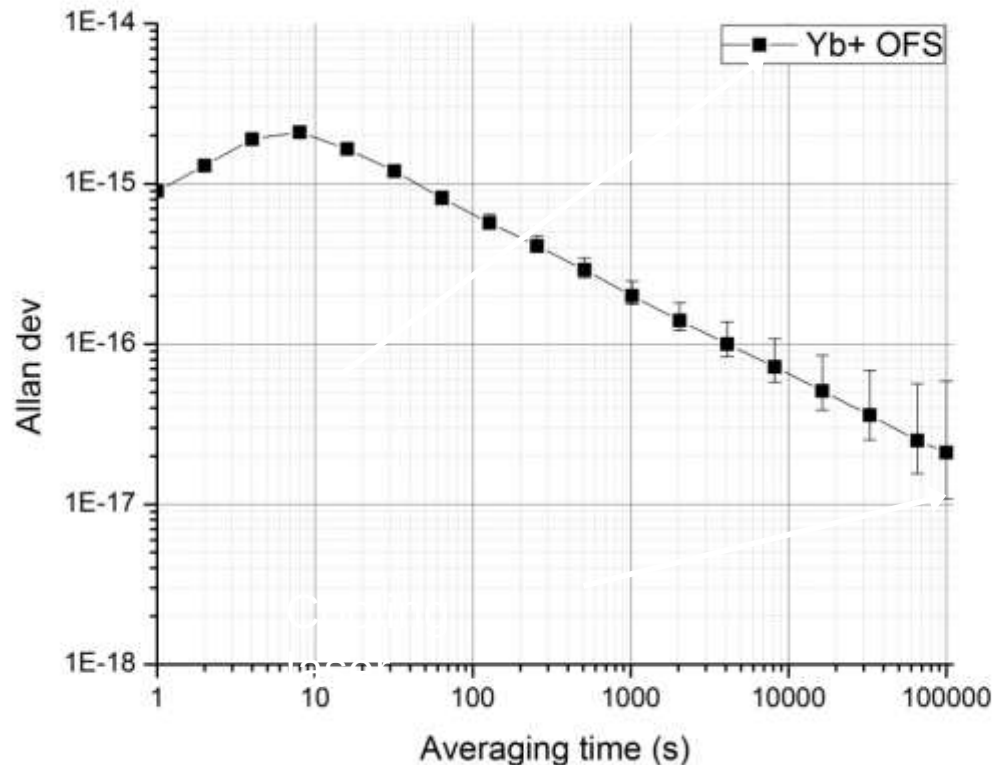


Active Hydrogen Maser VCH-1003M, $\Delta\nu/\nu \approx 2 \times 10^{-13}$, $\sigma_y(\tau) = 1.5 \times 10^{-15}$ @ 1000 s



Кратковременная нестабильность ОСЧ в основном определяется шириной линии зондирующего лазера, стабилизированного по опорному эталону. За счет дрейфа частоты зондирующего лазера $\sigma_y(t)$ достигает максимума на $t \approx 80t_c$ (или $t \approx 1.5t_{\text{servo}}$) и при включении системы стабилизации частоты лазера по резонансу уменьшается как $t^{-1/2}$ для $t > 100t_c$. При корректном выборе коэффициентов петли обратной связи долговременная стабильность ограничена только квантовыми флуктуациями и не зависит от частотных шумов лазера.

С учетом наблюдаемой зависимости $\sigma_y(t) \sim t^{-1/2}$ для созданного ОСЧ суточная нестабильность составляет $\sim 10^{-17}$.





Аналогичные системы в разное время создавались в нескольких ведущих зарубежных лабораториях. В таблице приведены характеристики стабильности Yb⁺ - ОСЧ на квадрупольном и октупольном переходах. Для сравнения приведены данные по наиболее стабильному на данный момент ионному оптическому стандарту на основе Al⁺. Как следует из приведенных данных, стабильность разработанного ОСЧ не уступает зарубежным аналогам. Более высокую стабильность демонстрируют технически гораздо более сложные системы на октупольном переходе иона иттербия и ионе алюминия.

ОСЧ	$\sigma_y(\tau)$
¹⁷¹ Yb ⁺ квадруполь (ИЛФ СО РАН, 2020)	$6.5 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau(s)}$
¹⁷¹ Yb ⁺ квадруполь (PTB, Germany, 2015)	$8 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau(s)}$
¹⁷¹ Yb ⁺ квадруполь (NPL, UK, 2015)	$1 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau(s)}$
¹⁷¹ Yb ⁺ октуполь (PTB, Germany, 2016)	$5 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau(s)}$
²⁷ Al ⁺ (NIST, USA, 2019)	$1.2 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau(s)}$



← Управляющая электроника

← Ионная ловушка
Управление циклом

← Лазерный блок

Первый в РФ оптический стандарт частоты на одиночном ионе

Планы на будущее

- Магний: реализация субдоплеровского охлаждения, загрузка в оптическую решетку на магической длине волны, магнито-индуцированная спектроскопия $0 \rightarrow 0$ перехода в решетке, гипер-Рамси.
- Иттербий: спектроскопия октупольного перехода, реализация обобщенной рамсиевской спектроскопии и спектроскопии синтетической частоты.
- Теория: разработка и исследование новых методов прецизионной спектроскопии ультрахолодных атомов, исследование полевых сдвигов частоты различной природы и разработка методов их минимизации, новые методы лазерного охлаждения.
- Ионы: компактные транспортируемые атомные часы (10^{-17} - 10^{-18}), релятивистская геодезия; многоионные ловушки, квантовая информатика и квантовая метрология; многозарядные ионы; ядерные часы; выход на уровень 10^{-19} - 10^{-20} .
- Нейтральные атомы: атомные интерферометры – высокочувствительные датчики гравитации, ускорений и вращений. Магний, рубидий, цезий, БЭК.

Миниатюрные атомные часы и магнитометры

А

Для чего нужны миниатюрные атомные часы?

Б

МАЧ на основе явления КПН

В

Новое направление – Миниатюрные оптические часы

Г

Для чего нам миниатюрные атомные магнитометры?

Д

Миниатюрные МОН в ИЛФ СО РАН

Атомные часы – что это за коробочка?

“Атомные часы — прибор для измерения времени, в котором в качестве периодического процесса используются собственные колебания, связанные с процессами, происходящими на уровне атомов или молекул.” (с)

Википедия



На выходе: электрический переменный сигнал с точно заданной частотой f , стабильной во времени.

Как правило, частота лежит в радиодиапазоне: 5, 10 или 100 МГц.

Типы квантовых стандартов частоты (КСЧ)

лабораторные



оптический КСЧ на основе
холодных атомов магния
(ИЛФ СО РАН)

транспортируемые

оптический КСЧ на основе
холодных атомов
стронция
(РТВ)



миниатюрные



$M < 100\text{ г}$
 $P \leq 5\text{ Вт}$
 $V < 0.1\text{ л (100 см}^3\text{)}$

компактные



микроволновый стандарт
“DSAC” от NASA

$M = 16\text{ кг}$
 $P = 45\text{ Вт}$
 $V = 17\text{ л}$

С.Н. Багаев, В.П. Чеботаев, УФН **148**, 143 (1986).

А.В. Тайченачев, В.И. Юдин, С.Н. Багаев, УФН **186**, 193 (2016).

Применения миниатюрных атомных часов

$M < 100 \text{ г}$

$P \leq 1 \text{ Вт}$

$V < 0.1 \text{ л (100 см}^3\text{)}$

Спутниковая навигация для наземных объектов

Инерциальная (беспутниковая) навигация

Системы навигации в дальнем космосе

Системы связи (5G), высоко защищённые

Интерферометрия со сверхдлинной базой в космосе

Зондирование на земле, под водой и в космосе



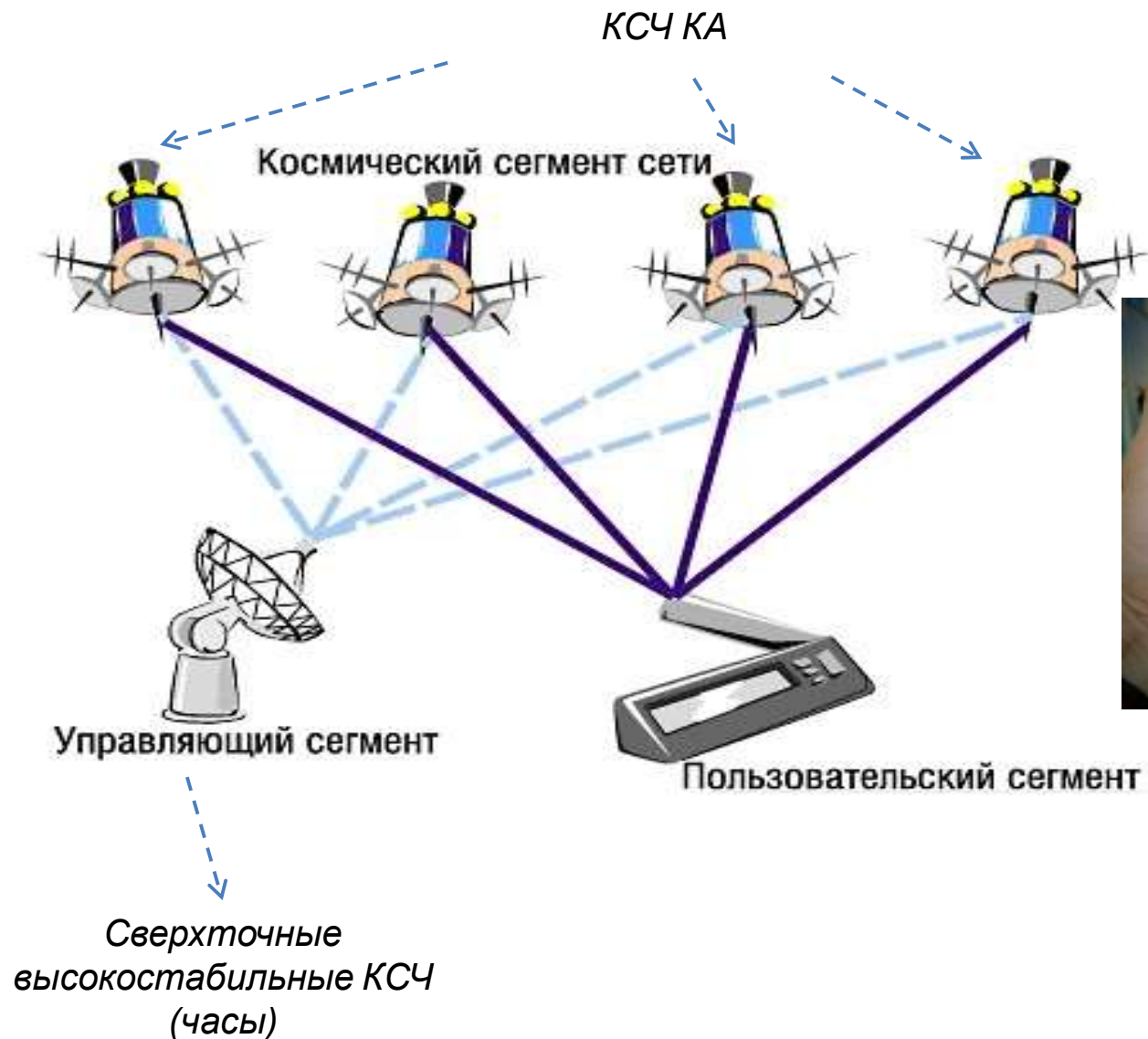
G.W. Hein, "Status, perspectives and trends of satellite navigation", *Satellite Navigation* **1**, 22 (2020).

D. Devani et al., "Gravity sensing: cold atom trap onboard a 6U CubeSat", *CEAS Space Journal* **12**, 539 (2020).

D.K. Oi et al., "Nanosatellites for quantum science and technology", *Contemp. Phys.* **58**, 25 (2017).

Robert Lutwak, "Tactical Atomic Clocks", Presentation 2019 (Microchip Technology Inc.)

Примеры применения МАЧ



GPS приёмники с МАЧ

Примеры применения МАЧ



Примеры проектов с использованием МАЧ на основе КПН:

CHOMPTT (Europe) – отработка принципов навигации в дальнем космосе

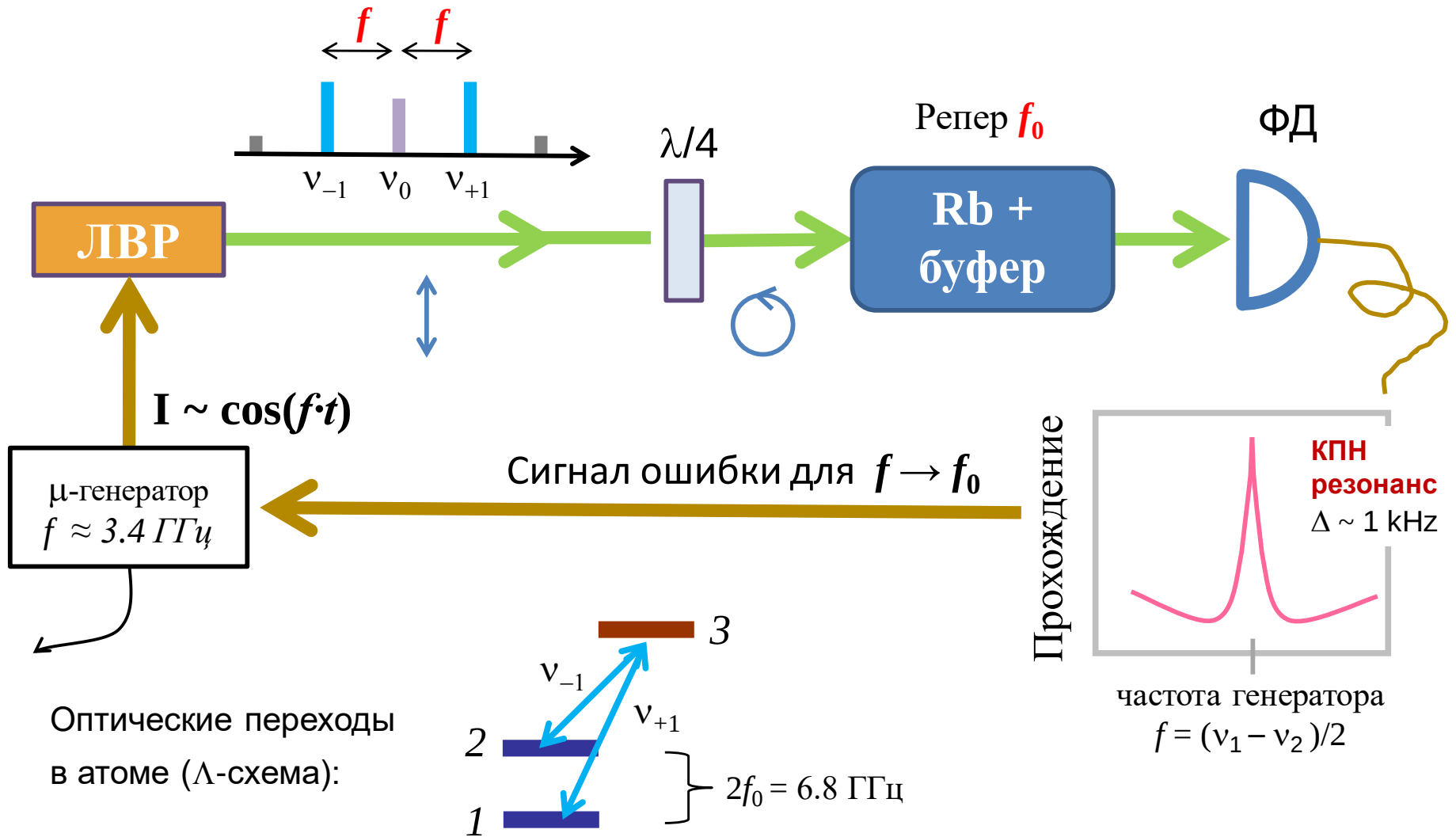
SPATIUM (Japan) – исследования ионосферы Земли

MAXWELL (USA, план на 2021) – одна из задач: тестирование КПН атомных часов для будущих систем навигации, в том числе в дальнем космосе

EQUULEUS (Japan, план на 2021) – изучение околоземной плазмы

CAPSTONE (USA, план на 2021) – отработка принципов навигации на лунной орбите для будущих пилотируемых миссий на Луну

Устройство МАЧ-КПН



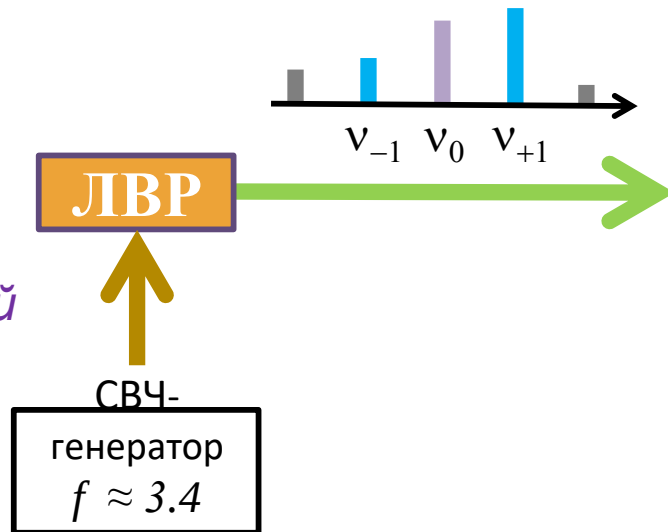
Стабильность частоты МАЧ

Факторы, влияющие на **долговременную** стабильность МАЧ:

Дрейфы таких параметров, как:

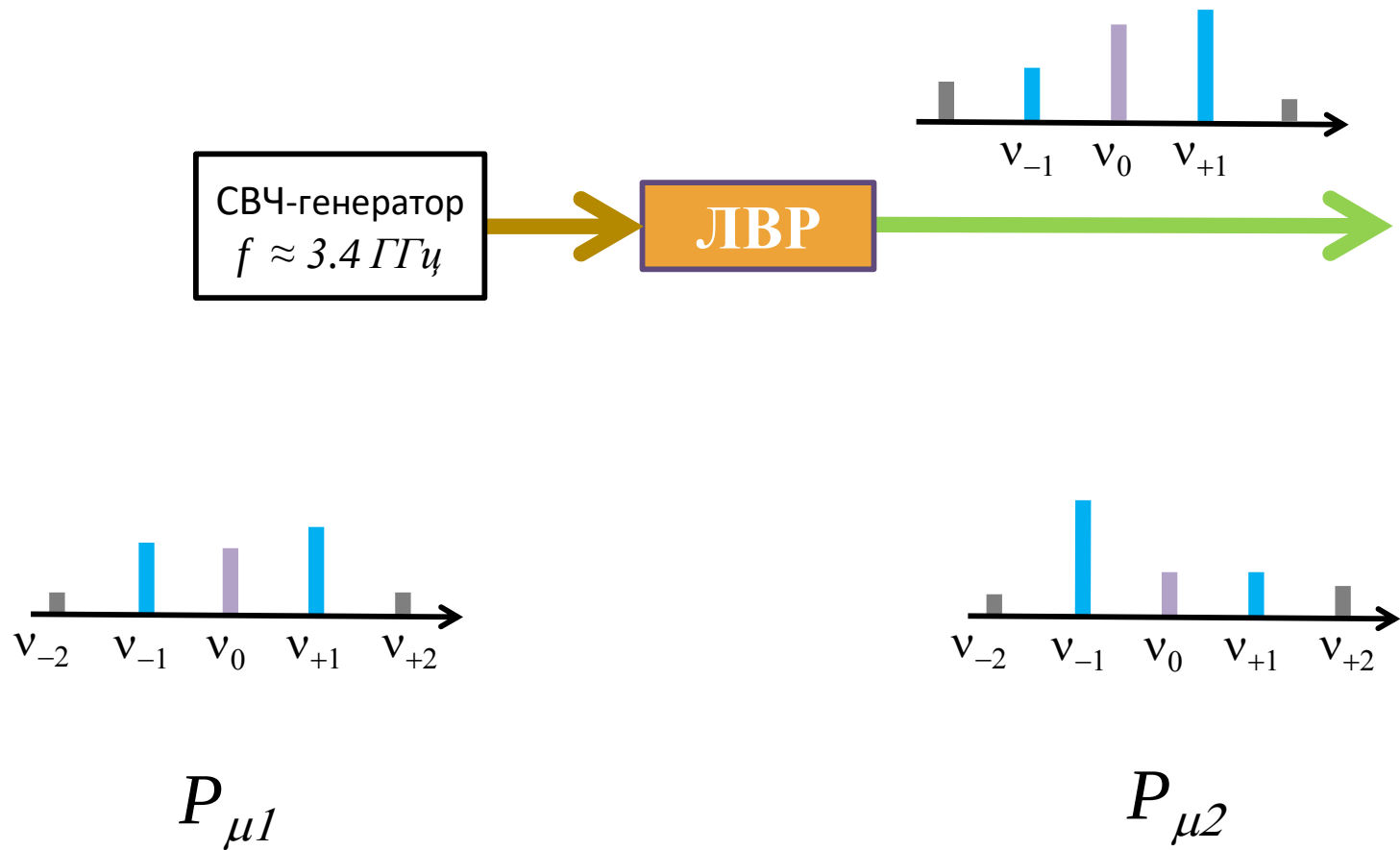
- Мощность лазерного пучка (P)
- Оптическая частота пучка (ω_0)
- Мощность СВЧ-генератора
- Магнитное поле в ячейке (внешнее + соленоид)
- Температура атомов
- Изменение давления буфера вследствие проницаемости стенок ячейки

*Световой
сдвиг*



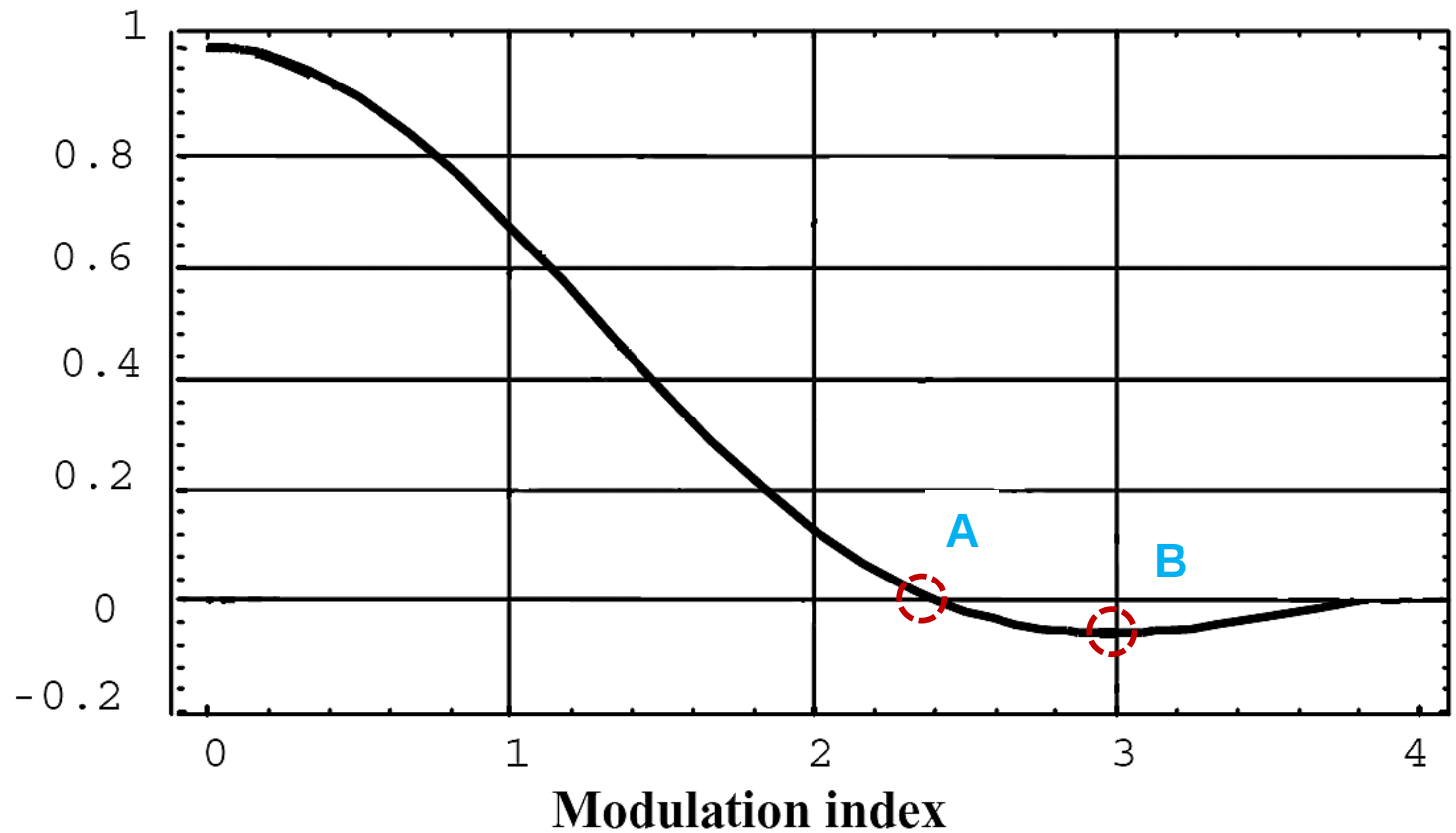
Влияние СВЧ-мощности на резонанс КПН

Изменение мощности СВЧ-модуляции (3.4 ГГц) приводит к изменению картины спектрального состава излучения ЛВР:



Влияние СВЧ-мощности на резонанс КПН

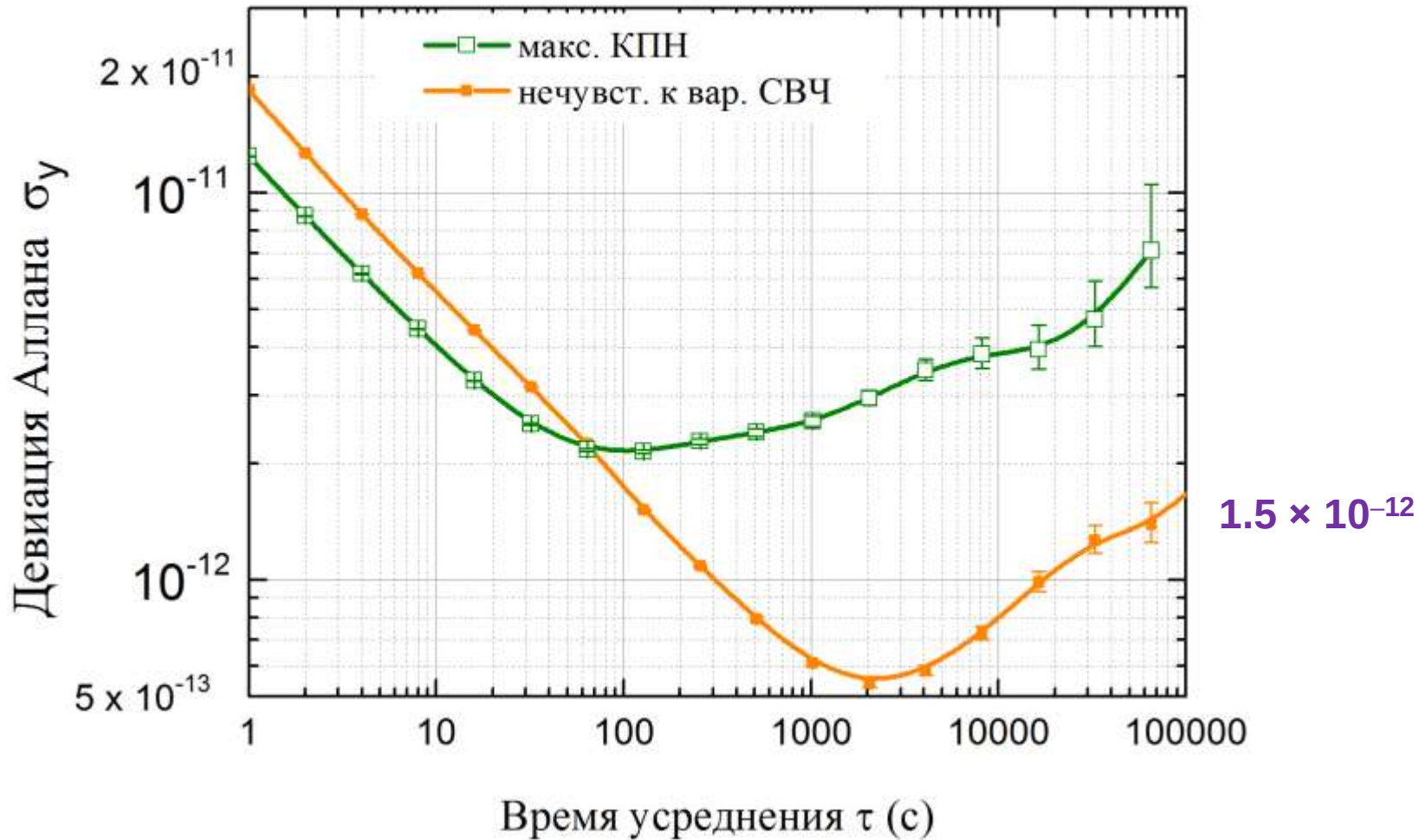
Зависимость сдвига частоты КПН-резонанса от СВЧ-мощности (индекса ЧМ) :



(мощность СВЧ-модуляции)

Стабильность частоты при различных P_μ

Девияция Аллана атомных часов, разработанных в ИЛФ СО РАН:



МАЧ-КПН в Институте лазерной физики СО РАН

Сравнение современных атомных КПН-часов



Microchip Tech.
(USA)



AccuBeat
(Israel)



ELECSNP
(China)



VNIIFTRI & ILP
(Russia)

45 cm³

5 W

3×10^{-11} @ 1 s

1.5×10^{-12} @ 24 h

32 cm³

1.2

2×10^{-10} @ 1 s

?

63 cm³

2 W

3×10^{-10} @ 1 s

3×10^{-11} @ 24 h

60 cm³

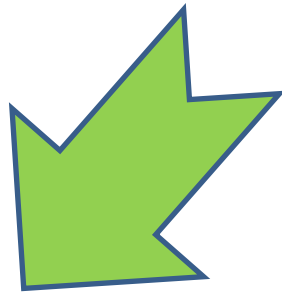
0.3 W

2×10^{-11} @ 1 s

1.5×10^{-12} @ 24 h

Будущее МАЧ

Пути развития миниатюрных атомных часов



- Улучшения **параметров** резонанса КПН
- Подавления **сдвигов** частоты
- Переход в **оптическую область частот**
- перенос стабильности частоты в радио диапазон

Общее требование: сохранение малых габаритов и низкого энергопотребления

Атомные магнитометры: Применения

Области применения

Биология: биомagnetизм растений, клеточные исследования

Космические исследования: сейсмология, магнитосфера

Медицинская диагностика: МКТ, МЭГ и другие

Поиск полезных ископаемых

Поиск частиц Тёмной Материи и ЭДМ частиц

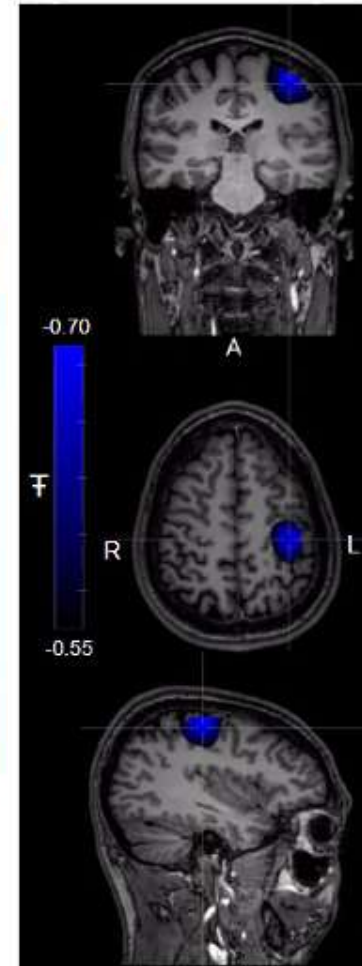
Навигация



Атомные магнитометры: Применения

Магнитная энцефалография (МЭГ)

Matthew Brookes, "Workshop on Optically Pumped Magnetometers", 2021



$$\delta B \leq 50 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$$

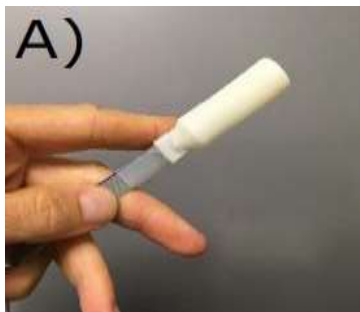
$$\Delta f \geq 200 \text{ ГГц}$$

МОН vs SQUID

Современные атомные магнитометры для медицины



[**QuSpin Inc.**] *J. Osborne et al.*,
SPIE Proc. **10548**, 105481G (2018)



[Mechanical Engineering & **Fieldline Inc.**]
V. Gerginov et al., SPIE Proc. **11296**,
112963C (2020)

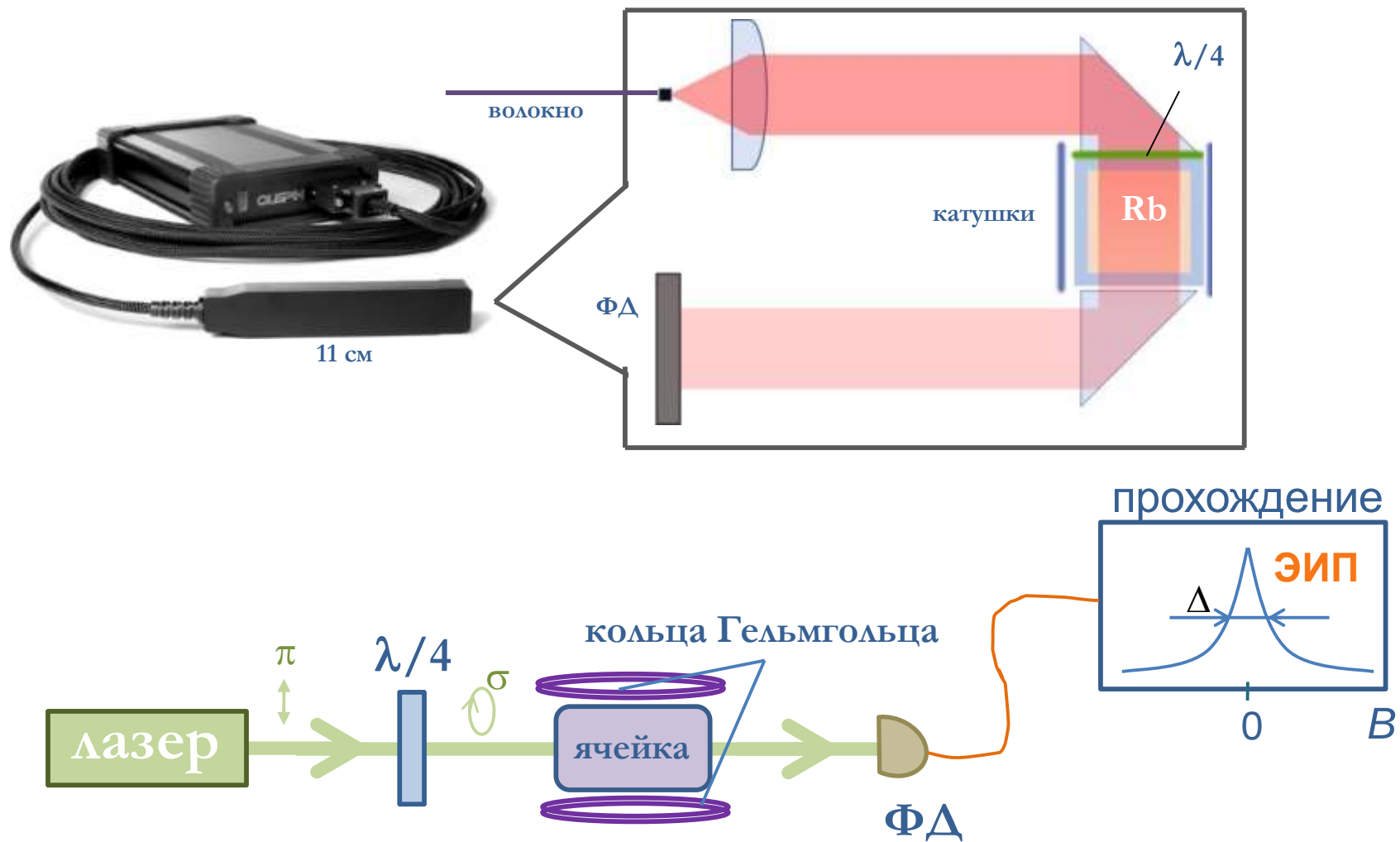


Пример SQUID магнитометра
<https://www.universite-paris-saclay.fr/en>

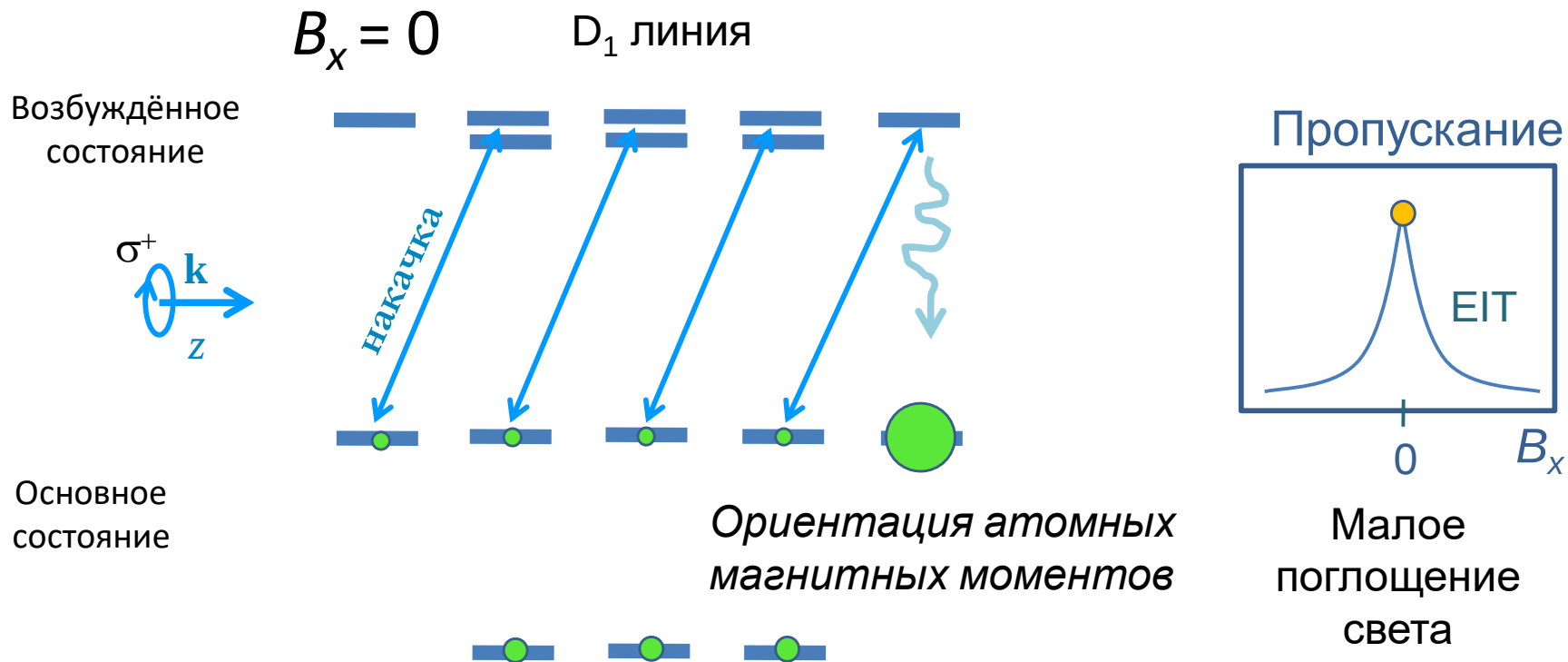
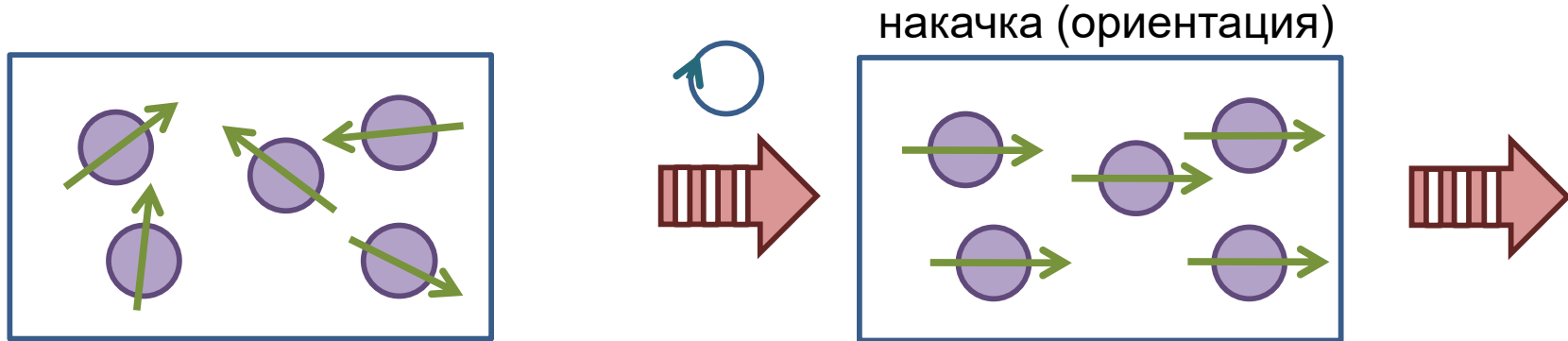
Преимущества: Не требуются криогенные температуры, габариты, вес, мобильность

Магнитные сенсоры для медицины

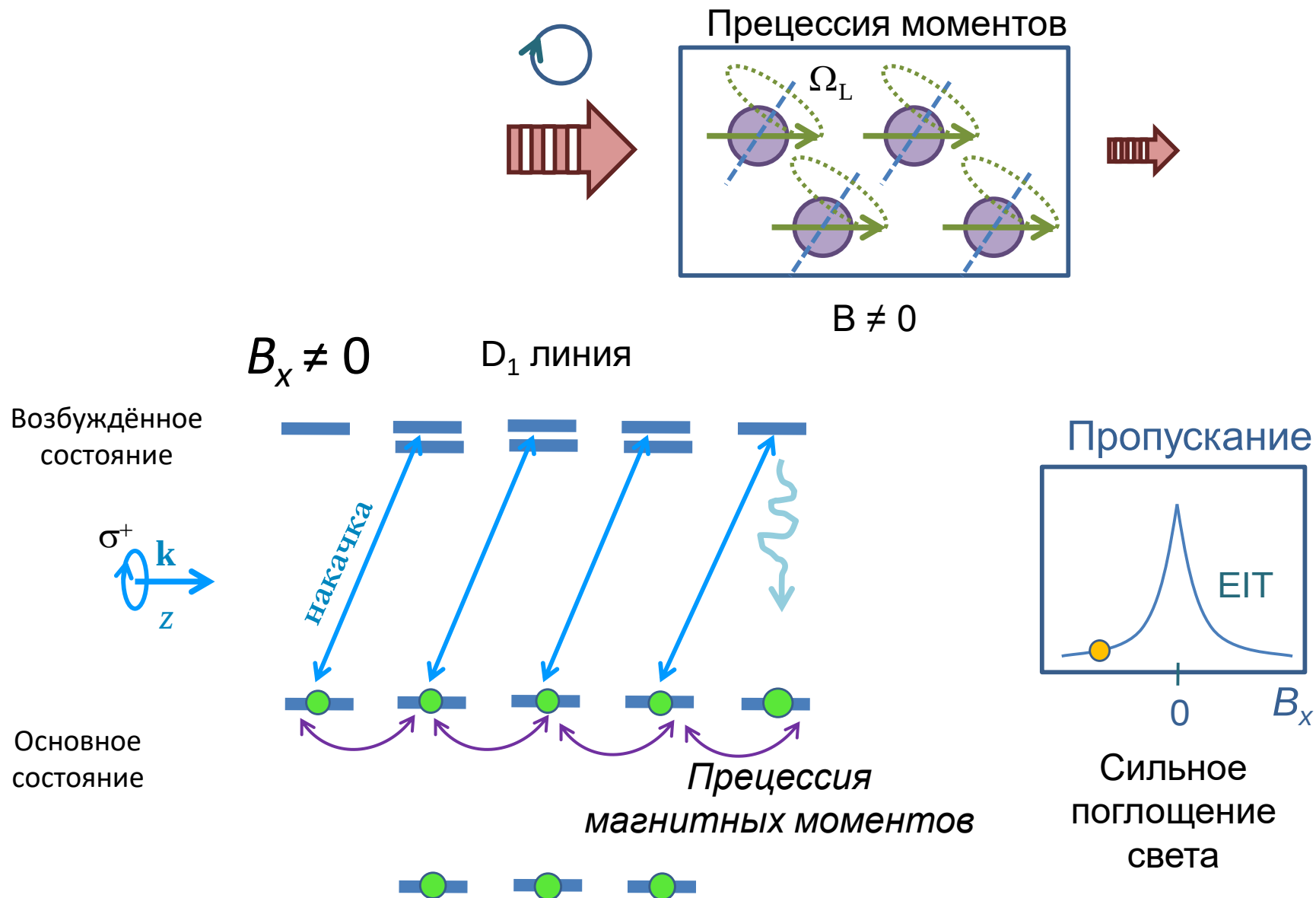
Принцип действия сенсоров на основе **эффекта Ханле**



Магнитооптический резонанс



Магнитооптический резонанс



Комм. магнитные сенсоры для медицины

Особенности режима SERF:



QuSpin Inc., Gen 1



FieldLine Inc.



TwinLeaf LLC

⊕ Малая ширина резонанса: $\text{FWHM} \sim 50 - 100 \text{ нТл}$ ($0.5 - 1 \text{ мГц}$)

Как следствие, высокая чувствительность около $50 - 100$

⊖ $\text{фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$

⊖ Относительно высокая температура: **$150 - 200^\circ\text{C}$**

Малый диапазон измерений:

⊖ не более **50 нТл** ($\text{Земное поле} / 1000$)

Высокое **тепловыделение**, особенно в многоканальном режиме

Новые схемы атомной магнитометрии

Высокочувствительная магнитометрия **вне рамок SERF:**

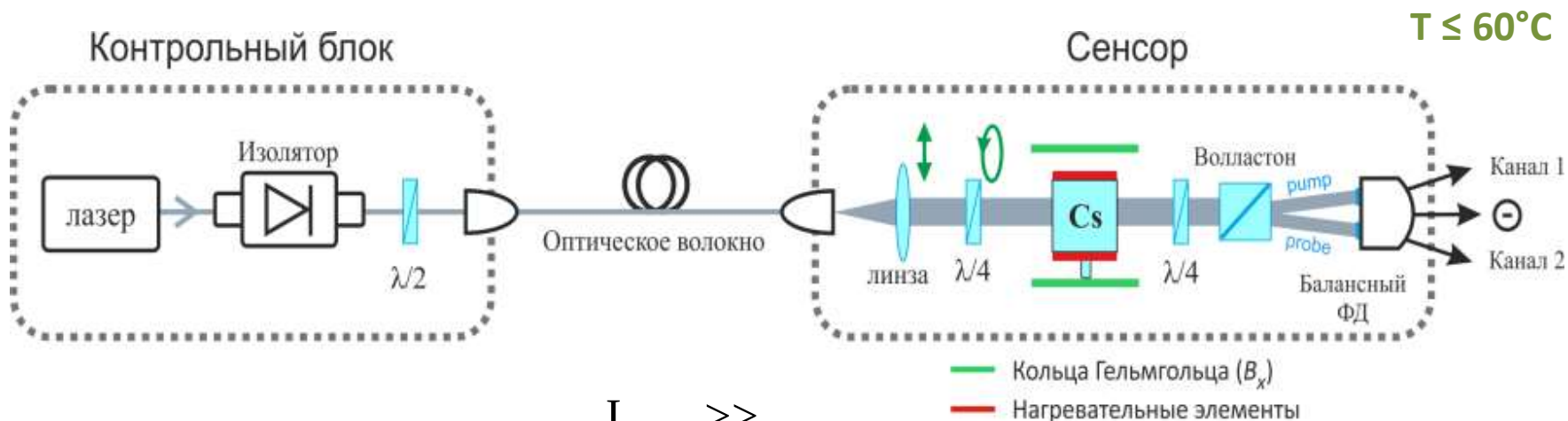
$$\delta B \approx \frac{\text{FWHM}}{\text{SNR}}$$

$$\text{SNR} \sim \text{Contrast}$$

Стандартные схемы Ханле-сенсоров с одним линейно или циркулярно поляризованным пучком демонстрируют невысокий контраст резонансов при невысоких температурах (на уровне **60°C** и ниже) в маленьких ячейках (**0.1 см³**).

Требуется разработка новых схем спектроскопии атомов щелочных металлов, пригодных для миниатюрных сенсоров с невысокой T атомов.

ЭИА-Ханле сенсор



$$E(t, z) = E_{\text{pump}}(z) \vec{e}_{+1} e^{-i\omega t} + E_{\text{probe}}(z) \vec{e}_{-1} e^{-i\omega t} + c.c.$$

$I_{\text{pump}} \gg I_{\text{probe}}$

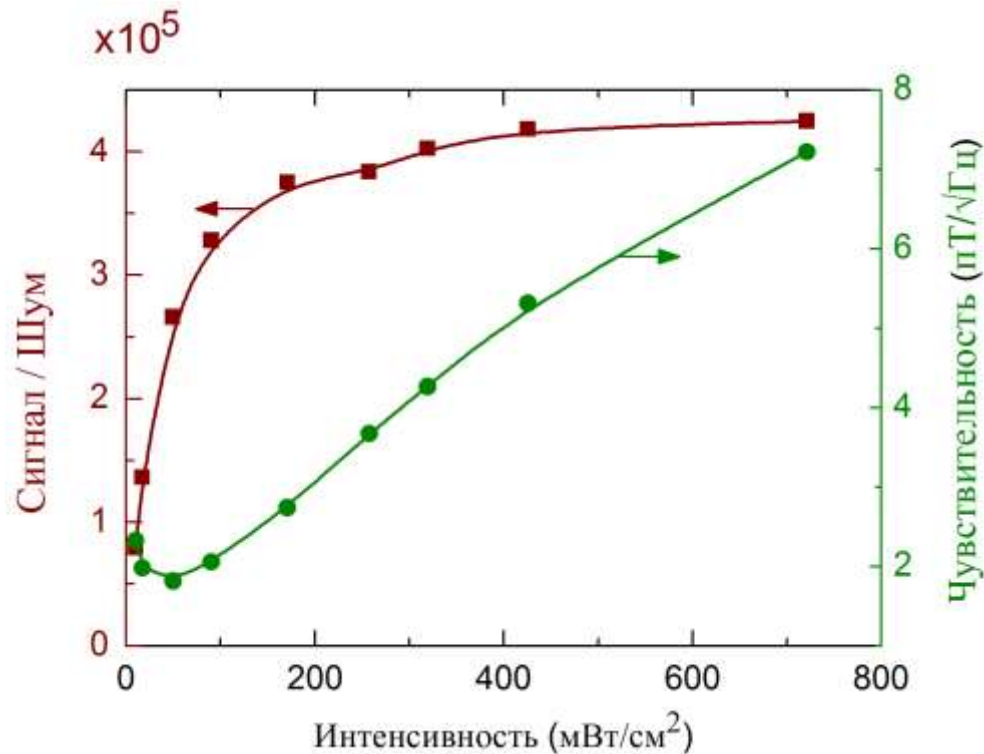
$\bigcirc \quad \varepsilon \approx 40^\circ$

*D.V. Brazhnikov et al.,
Physical Review A,
vol. 106, 013113 (2022).*



ЭИА-Ханле сенсор

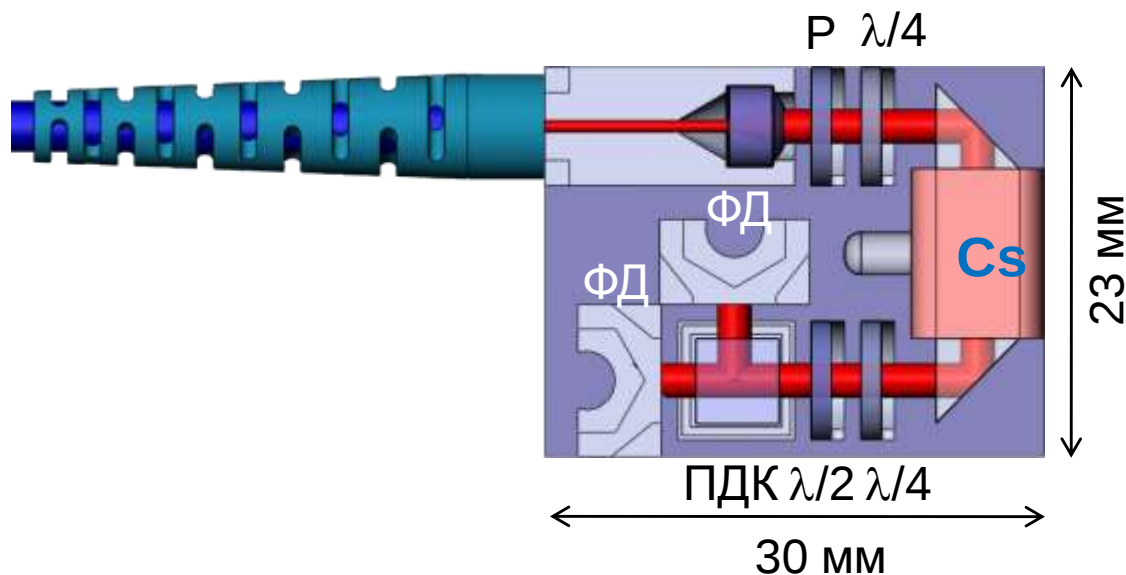
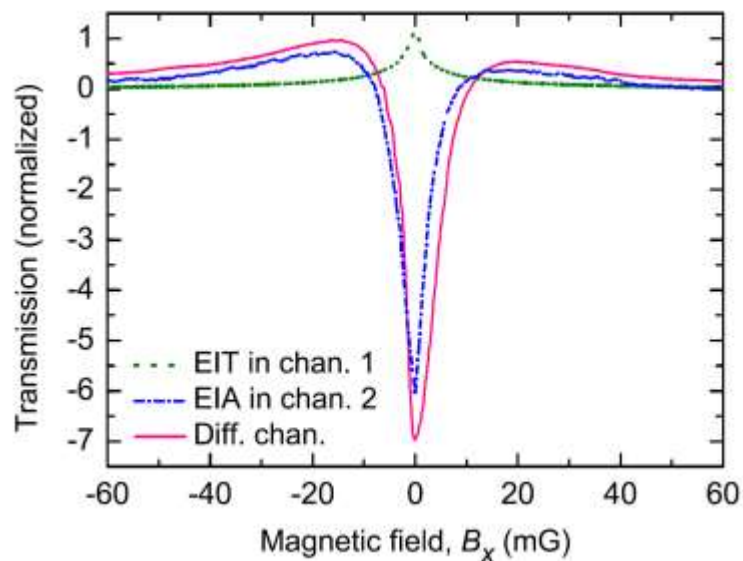
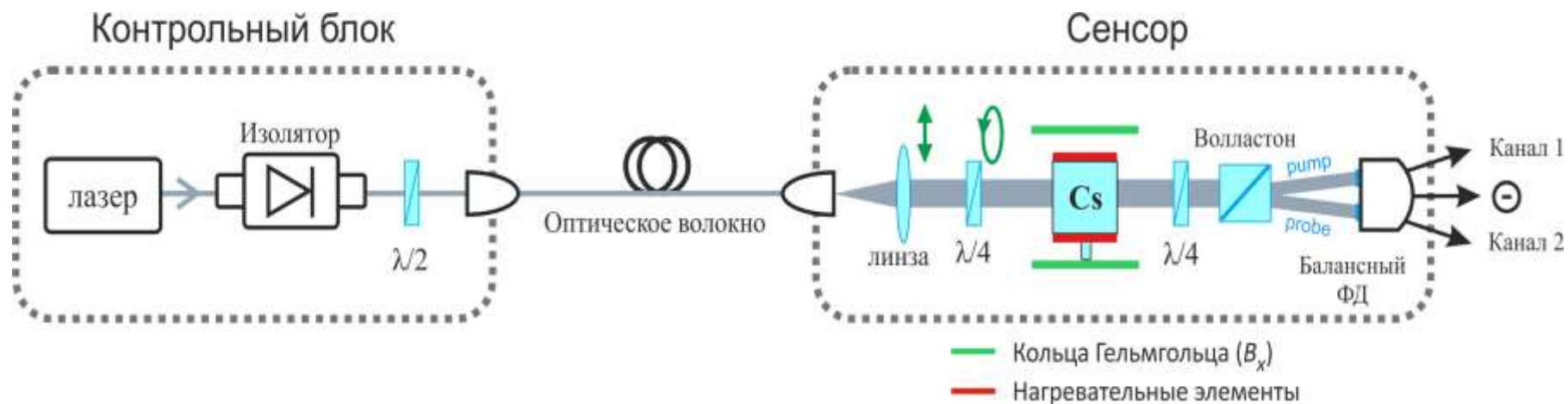
Чувствительность:



$\delta B \approx 1 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$, а в пределе дробового шума = $50 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$

ЭИА-Ханле сенсор

Пути улучшения чувствительности: Разностный канал БФД



Спасибо за внимание!