



К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Н.Г. БАСОВА

**КВАНТОВЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ:  
от  $10^{-10}$  до  $10^{-18}$**

1. Зачем ?
2. Физическая основа
3. Мазеры
4. Лазерная эпоха
5. Технологии

**Тенденция:**

«СТАБИЛЬНОСТЬ – ТОЧНОСТЬ» в прецизионных частотных измерениях

( для науки, промышленности и космоса),

**в сочетании с компактностью и технологичностью ....**

# ЗАЧЕМ ?

- **НАУКА**

- измерение фундаментальных констант, тесты ОТО, ...
- радиоастрономия, геодинамика, геофизика, ....

- **ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ**

- глобальная синхронизация часов;
- переход от звездного времени к атомному;
- единый эталон времени, частоты и длины, ....

- **СПУТНИКОВАЯ И НАЗЕМНАЯ НАВИГАЦИЯ**

- **ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ И БЕЗОПАСНАЯ СВЯЗЬ, ...**

- **ПРЕЦИЗИОННЫЕ ДАТЧИКИ** – Магнитные поля, Гироскопы, ....

# СИСТЕМА GPS/ГЛОНАСС – ГЕНЕРАТОР КООРДИНАТНО - ВРЕМЕННОГО ПОЛЯ



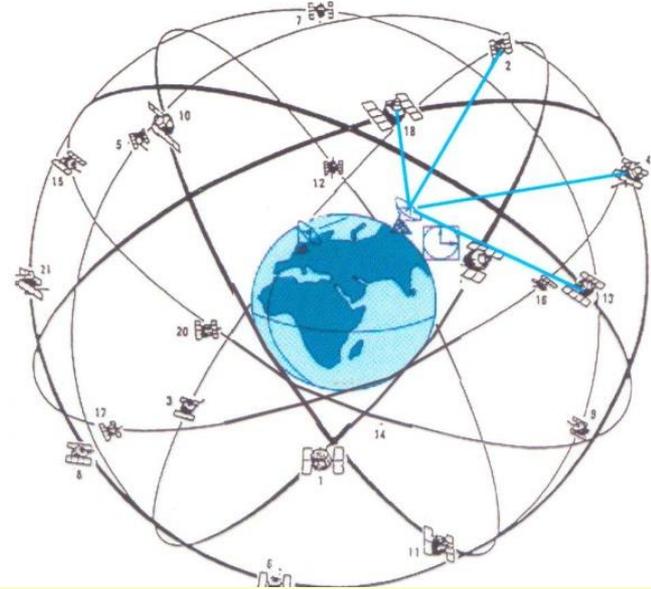
**СЕРДЦЕ ВСЕЙ СИСТЕМЫ –  
ВЫСОКОТОЧНЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ**

и космического базирования.

-  
Основное уравнение:

$$L = c \cdot (t_1 - t_2) ; \quad \Delta t = 1 \text{ нс} : \Delta L = 30 \text{ см}$$

# ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ



- СИНХРОНИЗАЦИЯ ЧАСОВ:  $< 0.1$  нс

- Бортовые Часы:  $5 \cdot 10^{-15}$  ( $\tau = 1$ с),  $5 \cdot 10^{-16}$  ( $\tau = 1$ сут)

- Наземные Часы:  
 $10^{-16} - 10^{-17}$  ( $\tau = 1$ сут,  $T_H = 10$  сут)

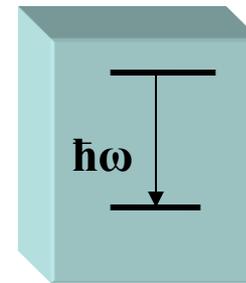
$\Delta L < 10$  см

(Контроль движения при ДТП, .....

# ИДЕАЛЬНЫЙ КВАНТОВЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ

## Первая идея (1873) – James Clerk Maxwell:

*«Наиболее универсальная единица времени могла бы быть реализована на основе периода колебаний специально выбранного света, чья длина волны является единицей длины»*



**– частота определяется переходом между двумя уровнями, хорошо отделенными от соседних, и этот переход происходит в одном изолированном атоме, находящимся в покое.**

# ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ КСЧ :

- ЭТАП 1.

**(1952г. - 1955г.)** - Мазеры (  $\text{NH}_3$ , H ), Эталон на тепловых атомах Cs

- ЭТАП 2.

**с 1965 г.** - Стабилизированные лазеры

**с 1975 г.** - Охлаждение атомов, ионов лазерным излучением,  
захват в ловушки

- ЭТАП 3.

**с 1999 -2000гг.** - Решение проблемы связи диапазонов:

фс Ti:Sa лазер со сверхбыстрым внутрирезонаторным амплитудным модулятором - создал «ФС гребенку оптических частот»

- ЭТАП 4.

**с 2008 г.** – распространение точности по волокну, открытому пространству, .....

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА :

## ТОЧНОСТЬ – ЭТАЛОНЫ (спектроскопы)

- Узкие спектральные линии, не подверженные возмущениям – МАЛЫЕ «ФИЗИЧЕСКИЕ» СДВИГИ !
- Когерентное излучение для регистрации линии
- Длительное усреднение, накопление сигнала

## СТАБИЛЬНОСТЬ - относительные флуктуации частоты

- Активные генераторы с высокой Кратковременной и Долговременной стабильностью:

**ПАРАМЕТР Аллана:**

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\gamma}{\nu} * \frac{III}{C\sqrt{\tau}}$$

**Ключевые Параметры:**

Ширина линии усиления, Сигнал/Шум, Малые дрейфы, ...

# ТОЧНОСТЬ, ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ЧАСТОТЫ:

## Пассивные ГЕНЕРАТОРЫ (спектроскопы):

- Детектирование спектральной линии В ХОЛОДНЫХ АТОМАХ и ИОНАХ В ЛОВУШКАХ или ГЕОМЕТРИИ ФОНТАНА.
- Сигнал обратной связи на ЧАСТОТУ ВНЕШНЕГО ЗАДАЮЩЕГО ГЕНЕРАТОРА.
- **БЮДЖЕТ ОШИБОК** – эффект Доплера, поля (E, H, VBR), соударения, гравитация,...

**Достигли точности  $10^{-17}$  -  $10^{-18}$**  - Сложные, лабораторные системы. Идет борьба за компактизацию и надежность.

## СТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ :

**МАЗЕРЫ** - Активные генераторы с узким спектром и малыми долговременными дрейфами.

Частота периодически синхронизируется по ЭТАЛОНУ.

За 70 лет развития достигли стабильности  $\sim 10^{-16}$  на интервале наблюдения  $\sim 10$  суток. Массо-габаритные параметры и надежность работы в значительной степени удовлетворяют современным требованиям ГЛОНАСС.

# ПРЕДЫСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КСЧ

# ПАССИВНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ КСЧ (Квантовые дискриминаторы на Cs, Rb )

**1937 - магнитный резонанс в молекулярных пучках (Rabi)**

- 1. Пространственная селекция по состояниям в неоднородном H**
- 2. Взаимодействие с переменным магнитным полем (поглощательный переход)**
- 3. Вторая область с неоднородным H: при резонансе частоты переменного поля с квантовым переходом - вторичная дефокусировка для верхнего состояния и регистрировался сигнал снижения интенсивности пучка.**

**1938 – первый эксперимент (но частота резонанса зависела от H и не могла быть использована для часов)**

**1939 -1940 - наблюдался резонанс в Cs на переходе  $^2S_{1/2}$  (с изменением  $F = I + J$ ) без линейной зависимости от H ( Rabi, Zacharias et al).**

**Январь 1945г** : в NY Times описана идея атомных часов на основе квантового дискриминатора и даже возможность их применения для измерения гравитационного смещения частоты света.

**Т.е., в принципе, часы пассивного типа могли бы появиться уже в 1945 г., но их точность не превысила бы точности лучших маятниковых часов.**

**Главное противоречие:** резонанс уширялся при сокращении длины резонатора  $L$  ( $\gamma \sim \tau^{-1}$ ), а для сохранения фазовой когерентности:  $L < \lambda/2$

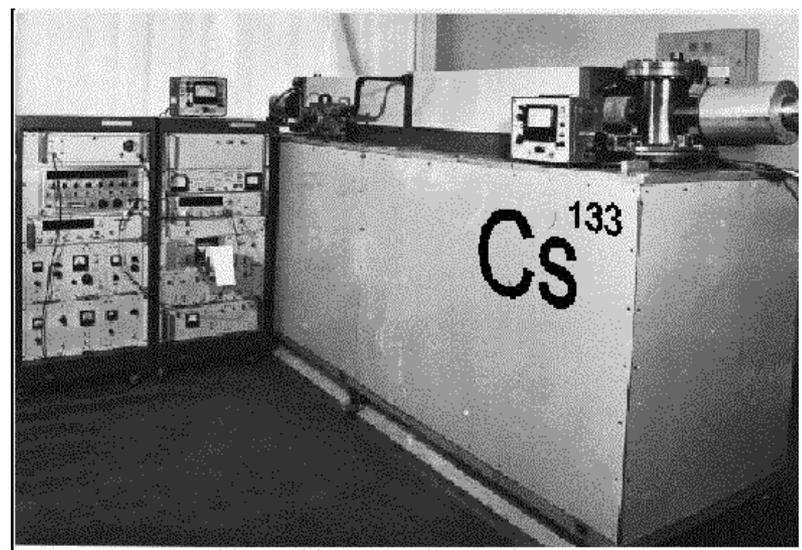
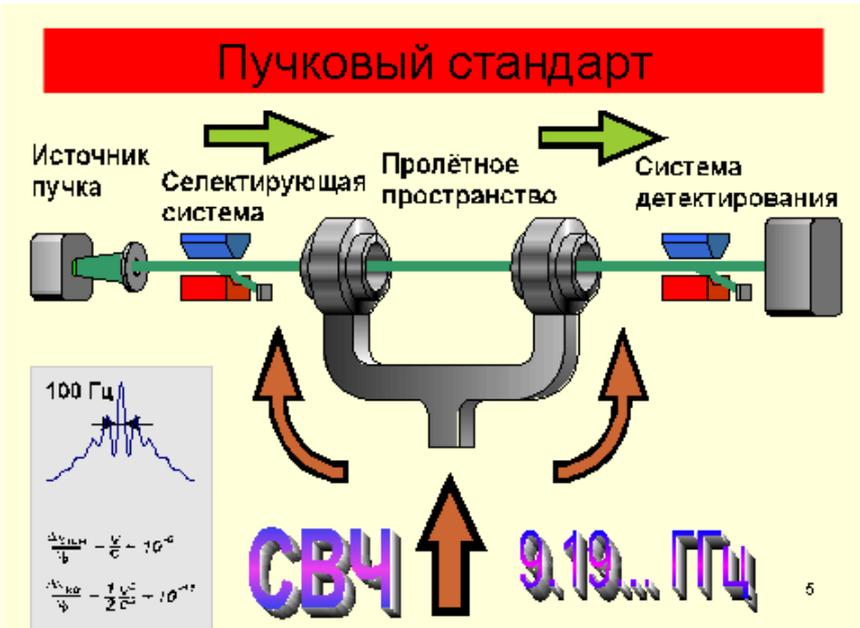
**1946 – 1947 и далее - взрыв публикаций по СВЧ спектроскопии**

**1948 – пассивные часы на  $\text{NH}_3$  (NBS), но стабильность невысока**

**1949 – оптическая накачка для заселения нужного уровня СВЧ перехода (*Kastler, Brossel*). Возросли сигналы линий.**

**1949 / 1950 - последний барьер на пути к точным часам пассивного типа преодолен “методом разнесенных полей” (*Ramsey*).**

- 1954 – идея атомного фонтана (Zacharias )
- 1955 - **первые Cs часы** с разнесенными полями (NBS, NPL)
- 1956 - .... непрерывные усовершенствования Cs часов (десятки лабораторий), время непрерывной работы – **годы**, вместо нескольких часов, стационарные, транспортируемые,...
- 1967 – **Переход с Астрономической на Атомную секунду :**  
**9 192 631 770, 00**  
 колебаний, с периодом, определяемым переходом СТС атома **Cs<sup>133</sup>**



# Активные КСЧ - Молекулярные генераторы

**1952/1954 – открытие нового принципа генерации и усиления эл.- магн. волн; запущены первые  $\text{NH}_3$  МГ ( Басов, Прохоров, Таунс )**

**Заложены основы квантовой радиофизики**

- **1958** – попытка построить квантовый дискриминатор с Cs атомами в колбе (*Kleppner, Ramsey, Goldenberg*).

Узкий резонанс получен в условиях  $\sim 10^2$  соударений со стенками.

Было понято, что с атомами H число столкновений без сбоя фаз можно довести до  $10^4$ , а детектирование лучше проводить по индуцированному излучению.

- **1960 - реализован первый H-мазер !!**

К ПЕРВОМУ МАЗЕРУ  
В СССР

# Н.Г.Басов – даты перед открытием

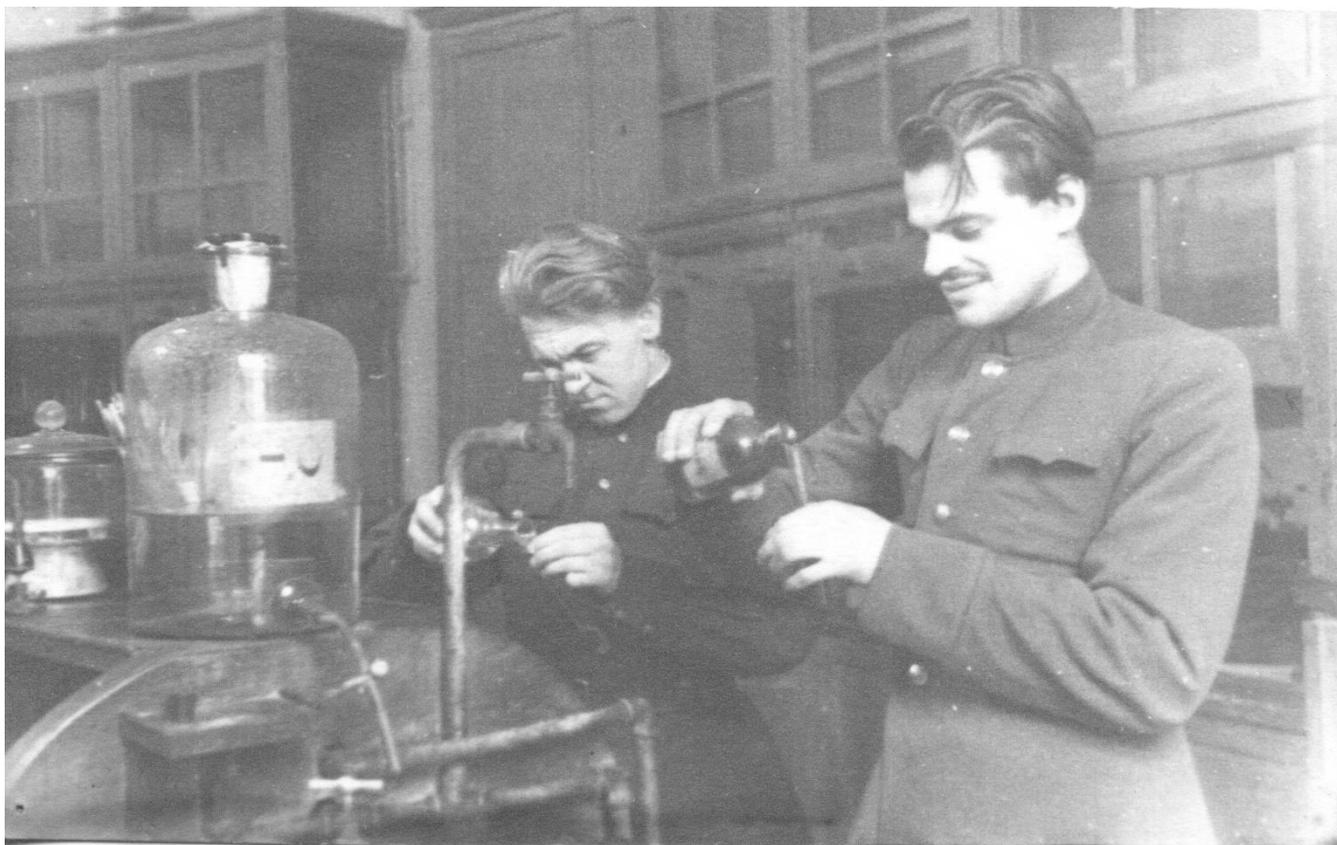
- 1941 г.- окончание школы
- 1941 - до сентября 1946 г. - армия, фронт
- 1946 - 1950 гг.- Москов. Механич. Ин-т боеприпасов (МИФИ)
- 1948 г. - мл.науч. сотрудник ФИАН (поддержка М.А.Леонтовича)
- **1952 – идея изложена в Отчете ФИАН («закрытом»)**
- 1954 - открытая публикация
- .....

«.....Всю войну в вещмешке обитали тонкие, в скромном переплете книги — «Основы теории относительности» — четыре лекции Эйнштейна, прочитанные в Принстоне, и «Квантовая теория излучения» Гайтлера.

Басов зачитывался ими еще со школьной скамьи..... »

**«Может ли ширина спектра излучения атомов быть 'уже спонтанной ширины линии ? »**

В ЛАБ. ХИМИИ Моск.Мех.Ин-та  
(МИФИ), 1946 г.







29.10.1964 г.

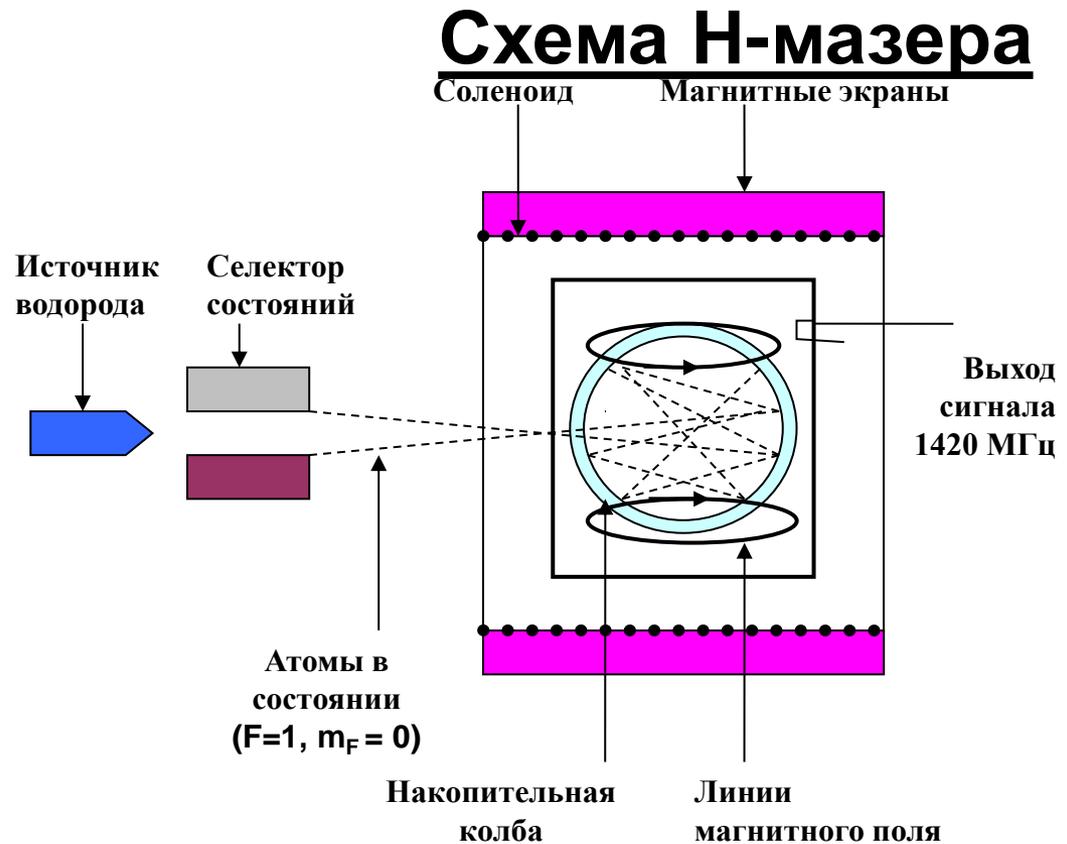


**1958 – 1964 : ЗНАНИЯ , ТЕХНОЛОГИИ  
ПЕРЕДАВАЛИСЬ ВО ВНИИФТРИ, РИРВ,  
ГНИПИ, ....**



**H – МАЗЕРЫ  
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
В РОССИИ**

# Активные Н-мазеры - непрерывно работающие часы:



## Прецизионное хранение и воспроизведение размера единиц частоты и времени в составе эталонных комплексов:

- национальная служба времени и частоты;
- пункты слежения и управления спутниковых радионавигационных систем;
- РСДБ;

# ACTIVE HYDROGEN MASER - 1003M

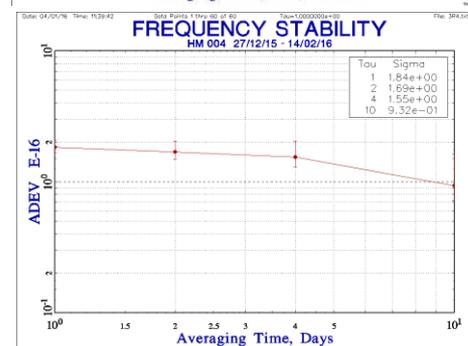
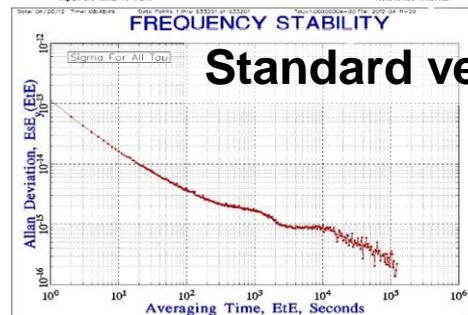
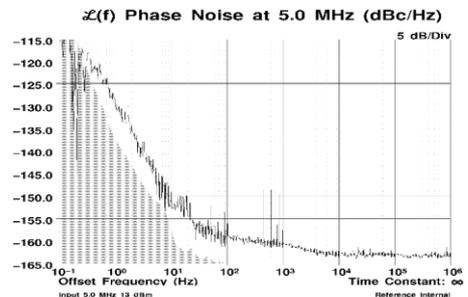


VREMYA-CH<sup>®</sup>  
RUSSIA

- Ведущее российское предприятие (г. Н-Новгород)



Active hydrogen maser  
VCH-1003M



**Standard version** synthesized Freq.

		Standard	Option L
Frequency stability (Allan deviation)	1 s	$\leq 1.5 \times 10^{-13}$	$\leq 8 \times 10^{-14}$
	3600 s	$\leq 1.5 \times 10^{-15}$	$\leq 1 \times 10^{-15}$
	1 day	$\leq 5 \times 10^{-16}$	$\leq 5 \times 10^{-16}$
Frequency drift		$< 3.0E-16$ /day	
Resolution		$1 \times 10^{-16}$	
Frequency control range		$1 \times 10^{-10}$	
Magnetic sensitivity		$\leq 5 \times 10^{-15}$ /Gauss	
Temperature sensitivity		$\leq 1.5 \times 10^{-15}$ / C°	
Phase noise (dBc/Hz)	offset	Standard	Option L
	1 Hz	-118	-130
	10 Hz	-135	-141
	100 Hz	-149	-151
	1000 Hz	-156	-160



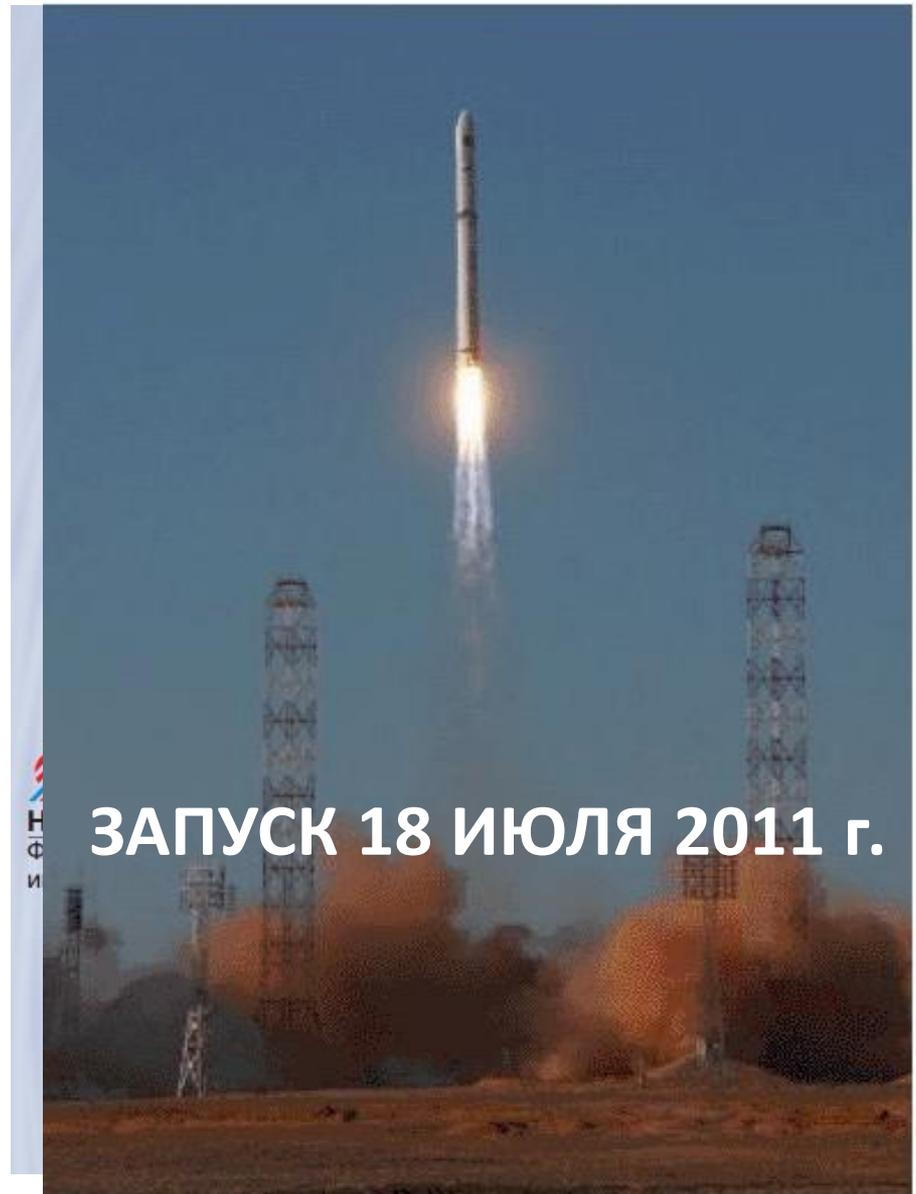
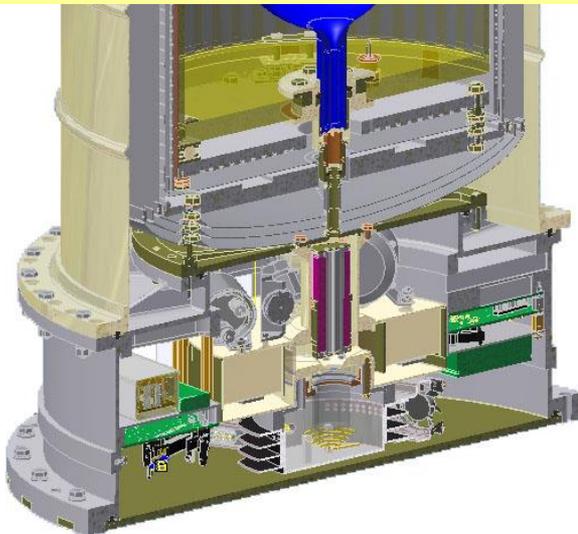
VREMYA-CH<sup>®</sup>  
RUSSIA

# Space projects

# АКТИВНЫЙ БОРТОВОЙ ВОДОРОДНЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА

**.....31 августа 2011 г.**  
**– включение БВСЧ-КТР**  
**VCH-1010 № 005.**  
**Нормальная работа.**  
**Есть захват.**

.....



**ЗАПУСК 18 ИЮЛЯ 2011 г.**

РТ

а"

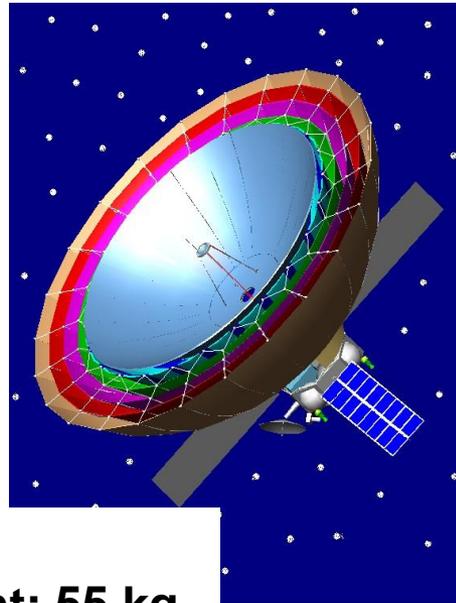
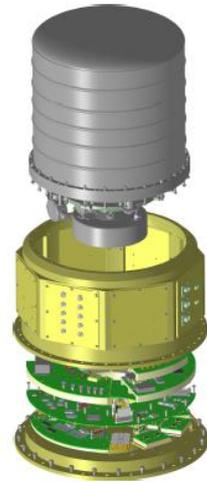
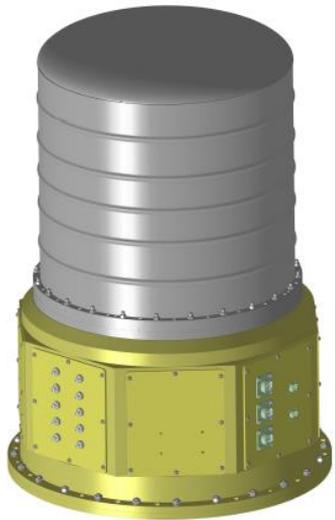
еркало

ызрань

е

овгород

ИАН

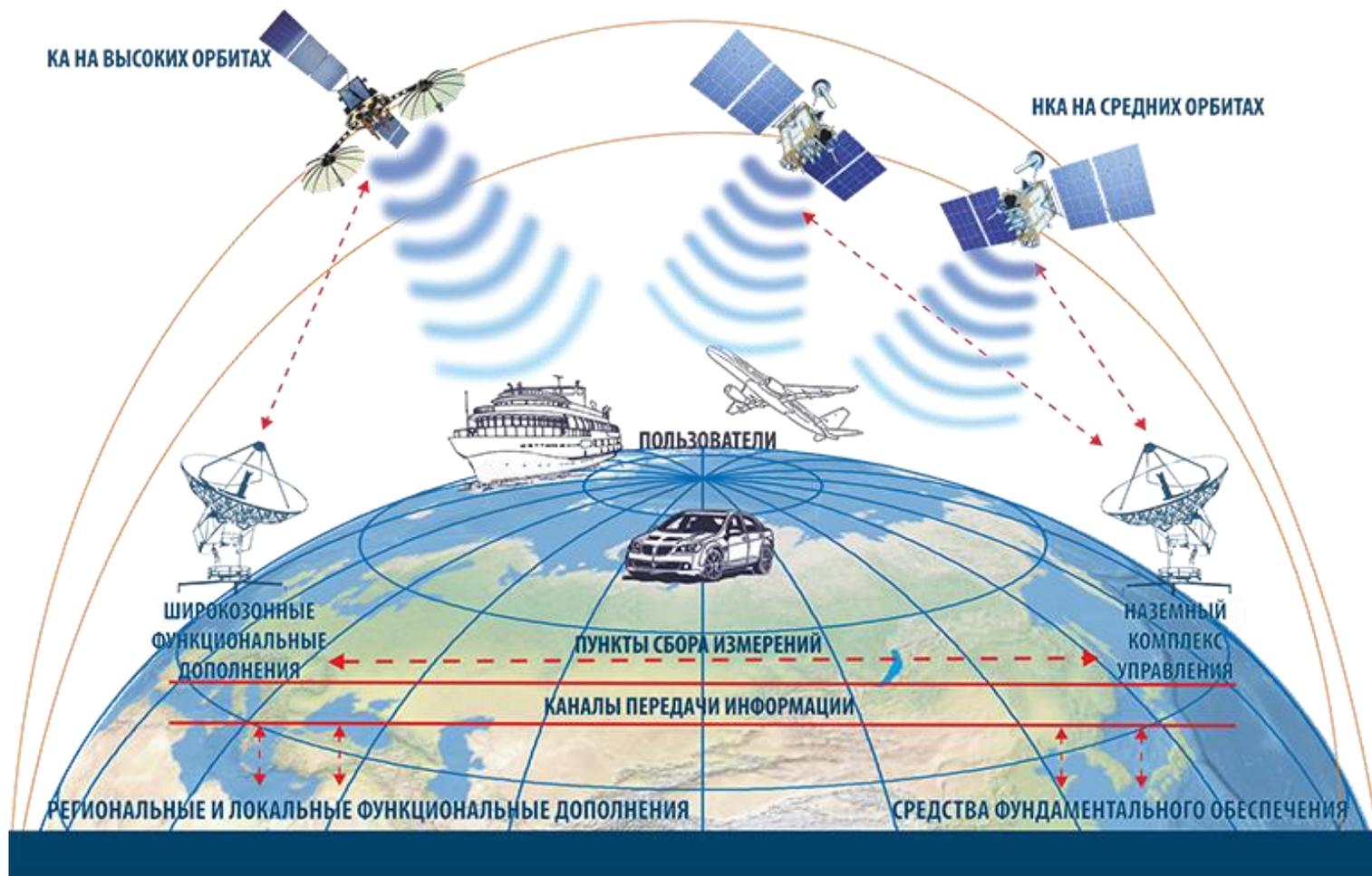


- ✓ Frequency stability
  - $7 \times 10^{-14}$  @ 1 s,
  - $2 \times 10^{-15}$  @ 100 s,
  - $8 \times 10^{-16}$  @ 1000 s.
- ✓ Operational lifetime more than 10 years

**Size:**  
Height 671 mm;  
Diameter 460 mm.

**Weight: 55 kg.**

# Повышение требований к частотно-временным характеристикам ГНСС



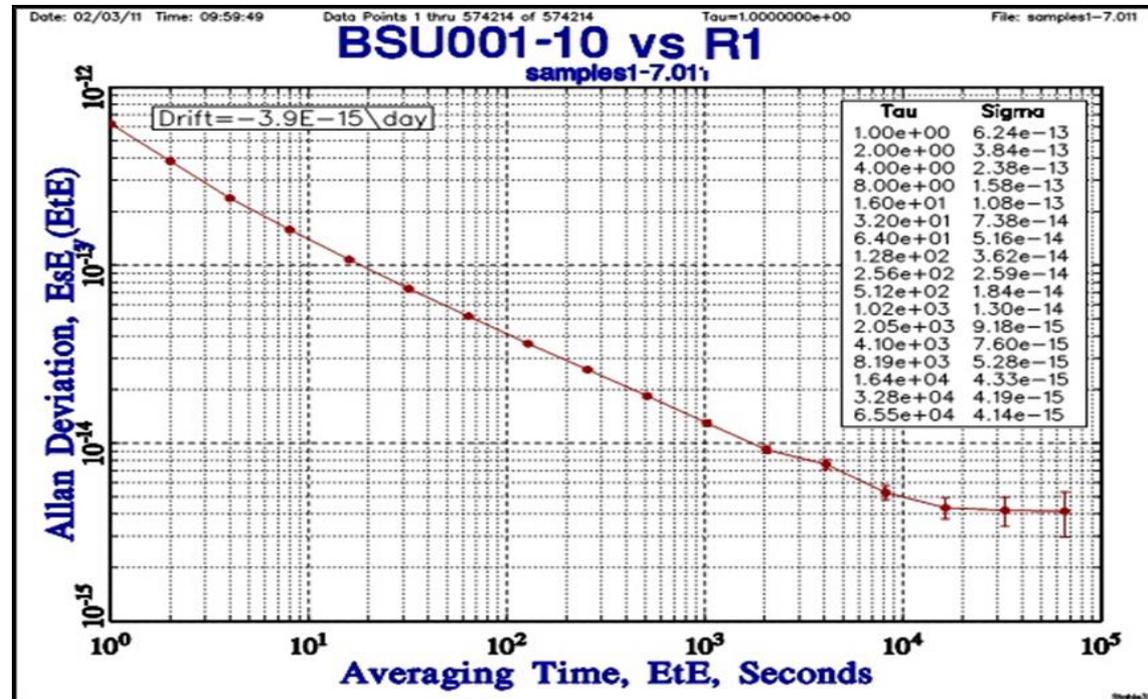


# VCH-1014



Weight – 23 kilo

1 day ADEV <  $5 \times 10^{-15}$





# VCH-1017

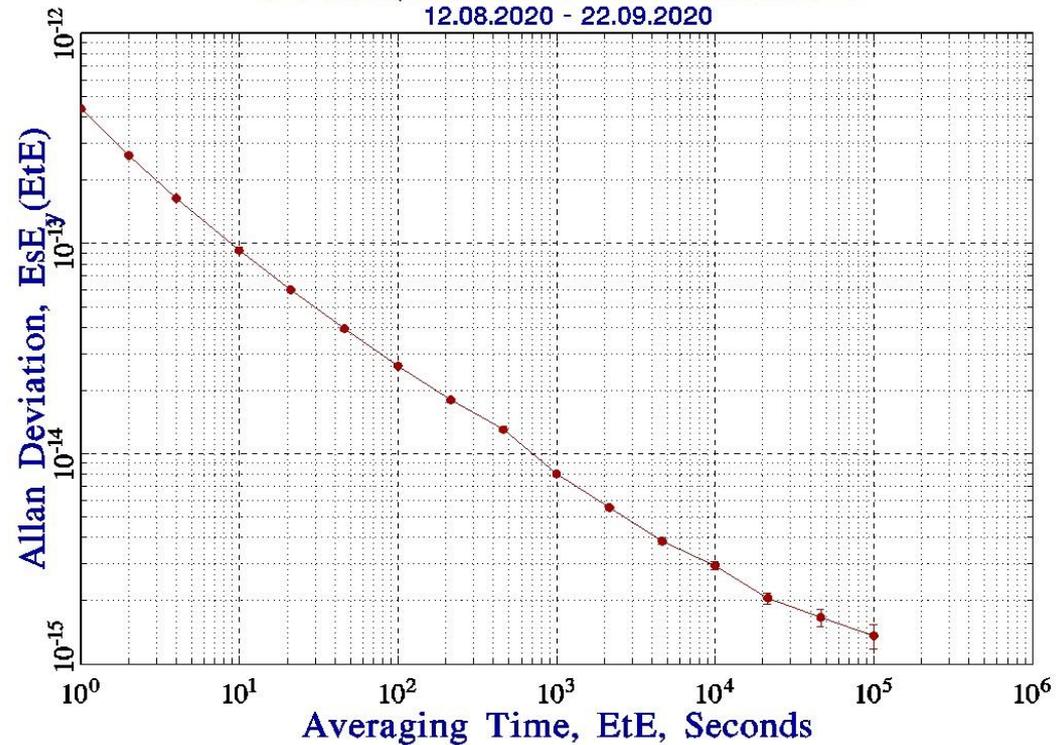


Weight < 12 kilo

1 day ADEV <  $3 \times 10^{-15}$

## FREQUENCY STABILITY

12.08.2020 - 22.09.2020





**VCH-1014**



**23 kilo**

**VCH-1017**



**12 kilo**

**VCH-10...**

**Next generation  
onboard clock**

**8.5 kilo**

# ЛАЗЕРНАЯ ЭПОХА

# Квантовые Стандарты Оптического диапазона (ОСЧ)

- Н.Г.Басов, В.С.Летохов - «Оптические стандарты частоты», УФН, 1968г. (180 ссылок)
- С.Н. Багаев, В.П. Чеботаев - «Оптические стандарты частоты», УФН, 1986г. (181 ссылка)

## Две проблемы:

- генератор со стабилизированной частотой
- «измеритель» частоты ( а не длины волны) колебаний

с 1967г. – по н/время

## Методы выделения узких линий :

- Спектроскопия насыщения,
- Двухфотонная спектроскопия,
- Оптические резонансы Рамси,
- Лазерное охлаждение и удержание атомов, ионов .....

# ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И МАНИПУЛЯЦИЯ ДВИЖЕНИЕМ АТОМОВ

1970 - **Ashkin**, Удержание в атомов в фокусе лазерного поля

1975 - **Haensch, Shawlow**, Допплеровское замедление атомов

- **Wineland, Dehmelt**, Замедление ионов

1977 – **Летохов, Миногин**, Оценка температуры,...

1978 – **Летохов, Балыкин**, Эксперимент с Зеемановским

замедлителем

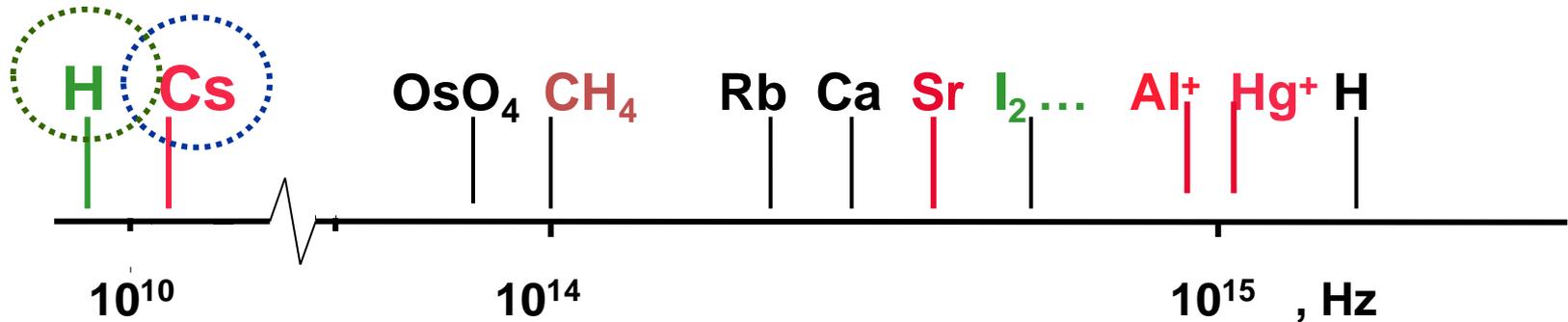
1985- **Chu**, Оптическая патока

1988 – **Philips**,... субДопплеровское охлаждение,  $10^{-6}$  К

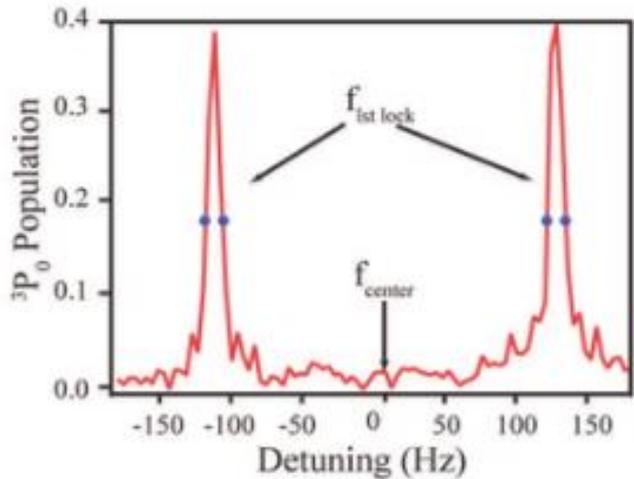
.....

**Нобелевские премии: 1997, 2001 гг.**

# Преимущества оптического диапазона



Sr в оптической решетке, 698 нм

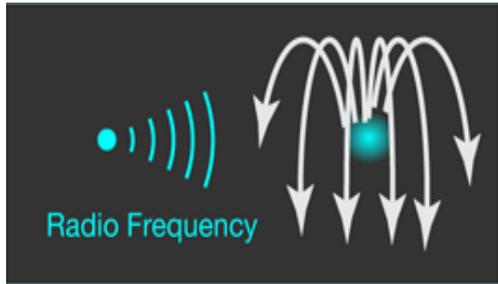


$$Q = f / \delta f$$

$$Q_{opt} \sim 10^{14}$$

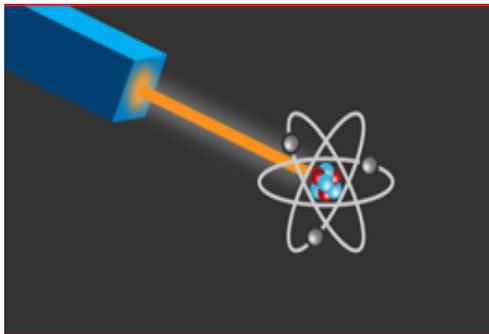
Кратковременная стабильность оптических часов на 2-3 порядка выше, чем у микроволновых часов, следовательно на 4-6 порядков сокращается время измерения интервалов с заданной точностью

# Стандарты Частоты в лазерную эпоху



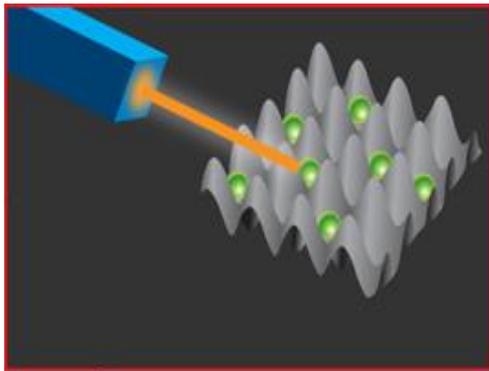
Фонтанного типа  
(микроволновые)

$2 \times 10^{-16}$



Оптические на  
одиночных  
ионах

$< 10^{-17}$



Оптические на  
атомах в решетке

$3 \times 10^{-18}$

# ПЕРВОЕ ВАЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ: Cs ЭТАЛОН «ФОНТАННОГО» ТИПА

**ВНИИФТРИ:  $\Delta\nu/\nu = 1 \times 10^{-15}$  (2010г)**

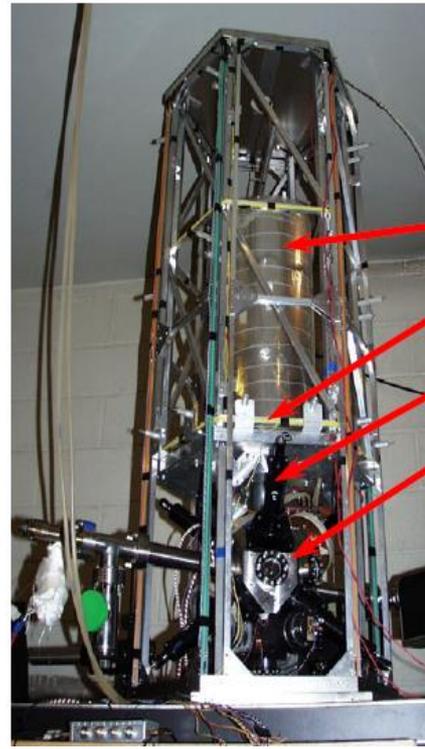


$$\Delta\nu/\nu_0 \sim V^2/2c^2$$

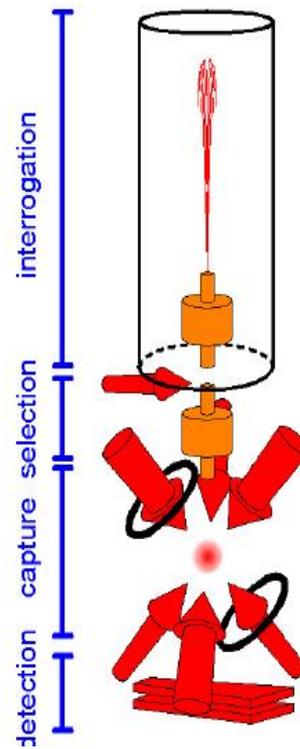
$$\sim (10^{-16} \div 10^{-21})$$

**Cs/ Rb двойной фонтан ( Paris) 1996г.**

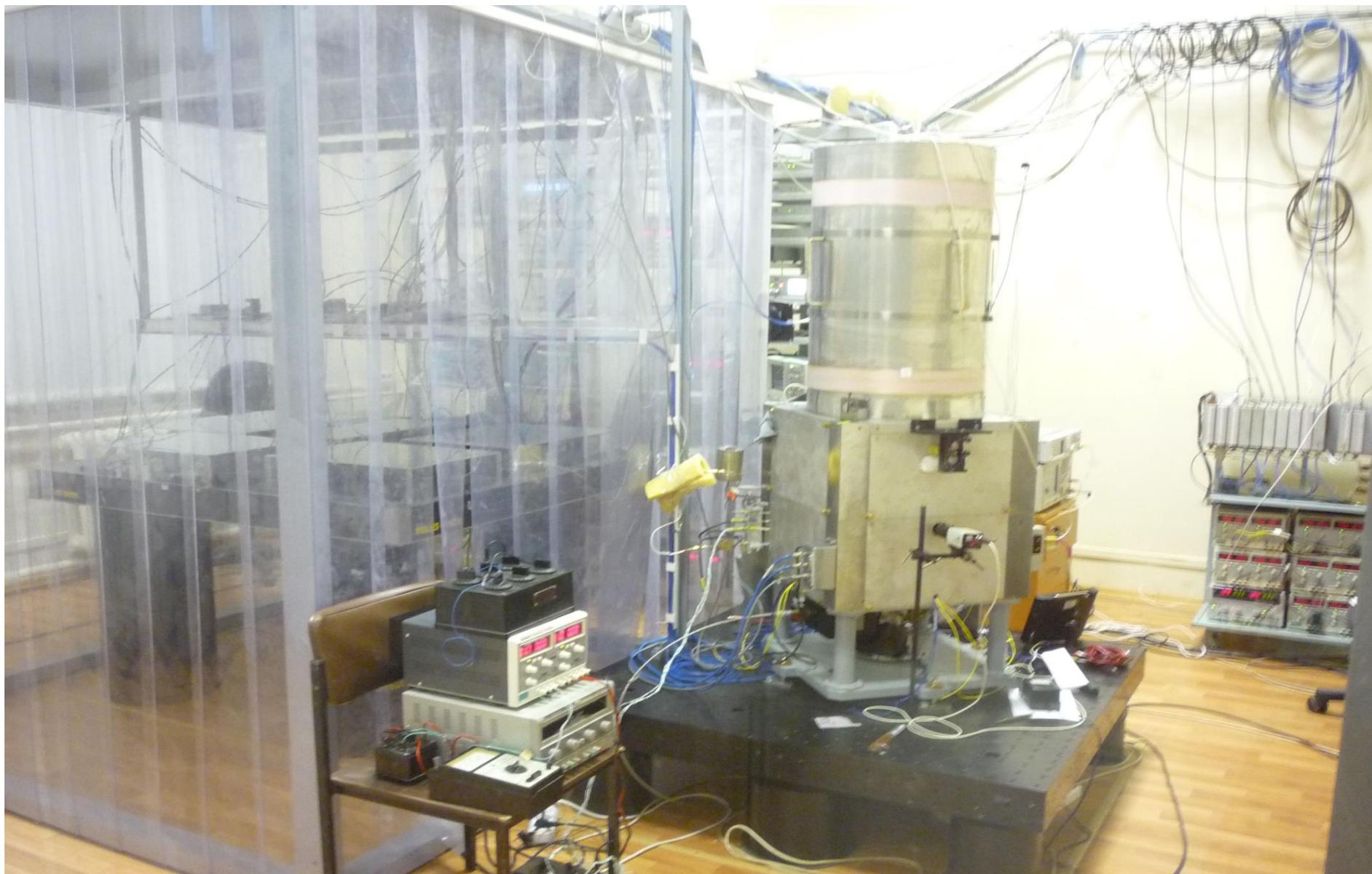
**SYRTE Rb and Cs fountain FO2**



- The 2 outermost shields are removed
- Interrogation region with magnetic and thermal shields
- Compensation coils
- Collimator for molasses beams
- Optical molasses

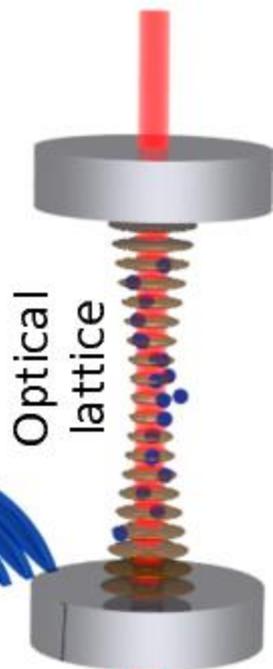


Cs «ФОНТАН» ВНИИФТРИ  $\Delta\nu/\nu = (1-2)\times 10^{-16}$

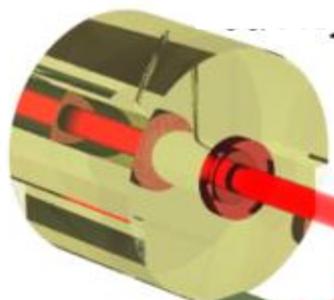


# Оптический квантовый стандарт частоты

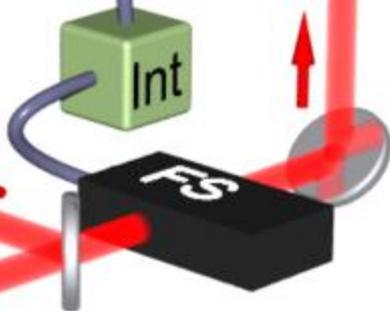
спектроскоп



резонатор



часовой лазер



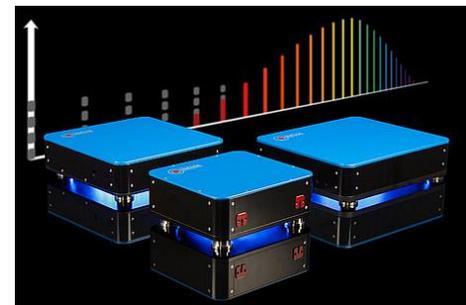
+

вспомогательные  
лазеры для  
охлаждения и  
считывания (~5 шт)



+

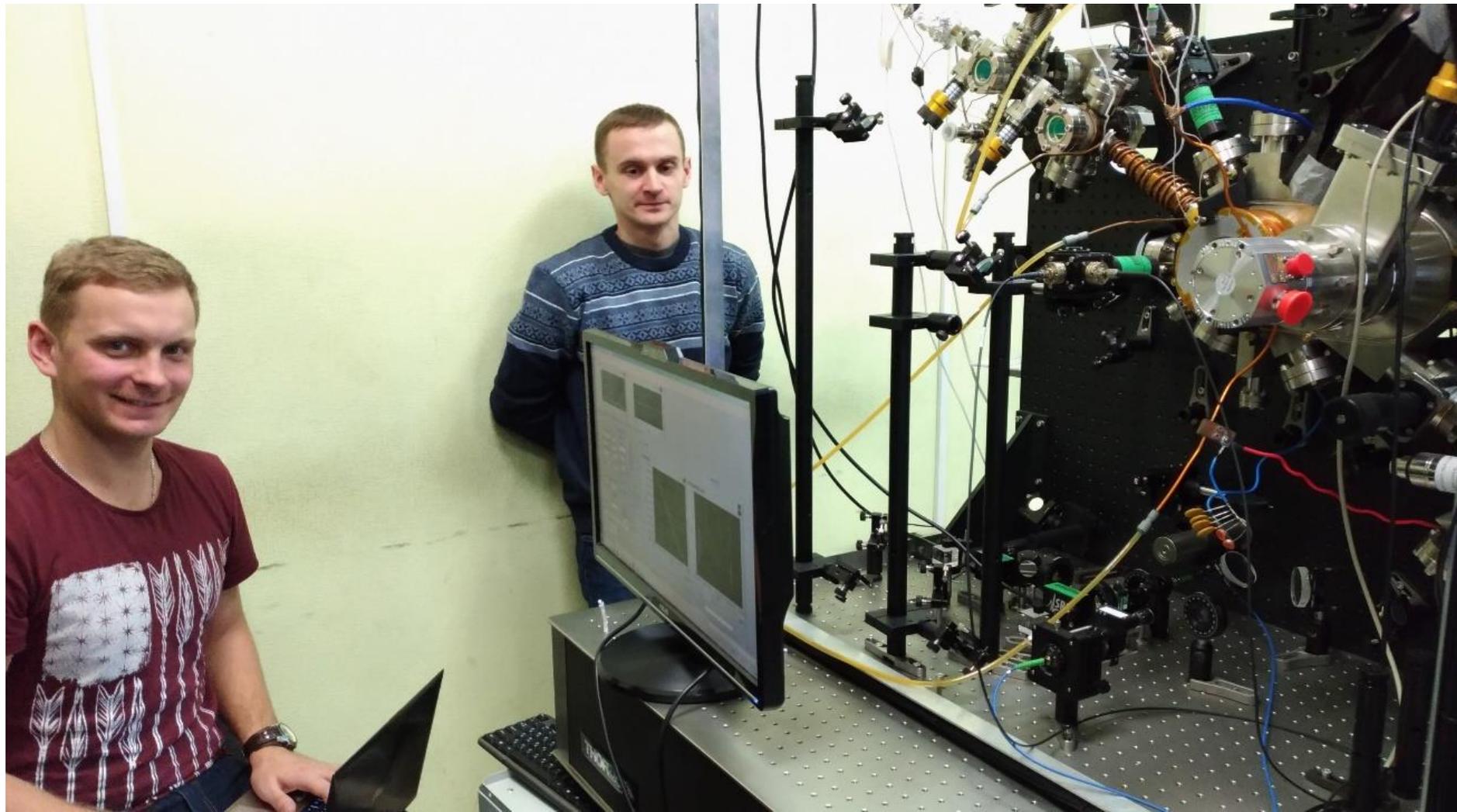
ФСОЧ



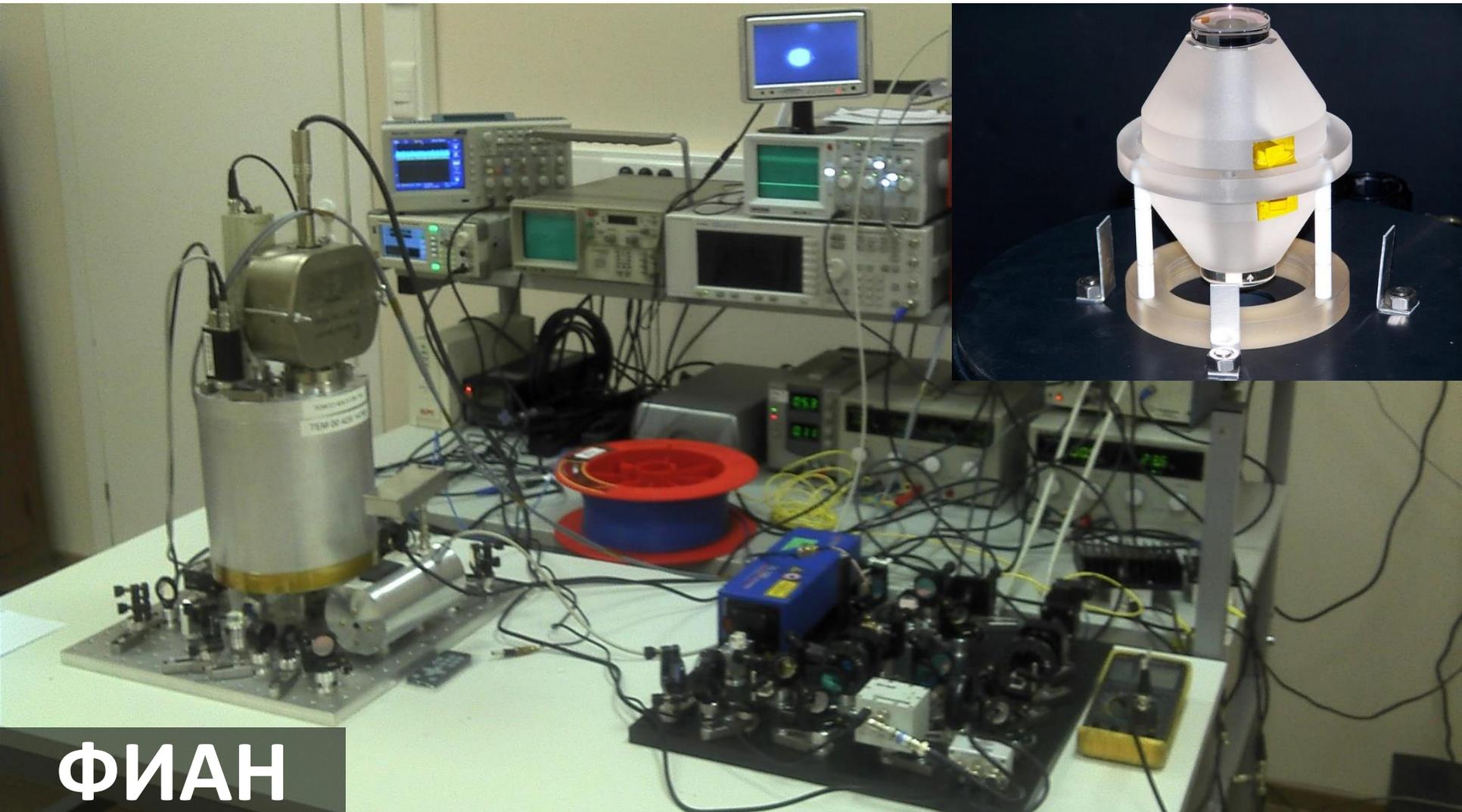
# Оптические часы ВНИИФТРИ

Оптический стандарт на  
ультрахолодных атомах Sr-87 в  
оптической решетке

$$\Delta f / f < 10^{-16}$$

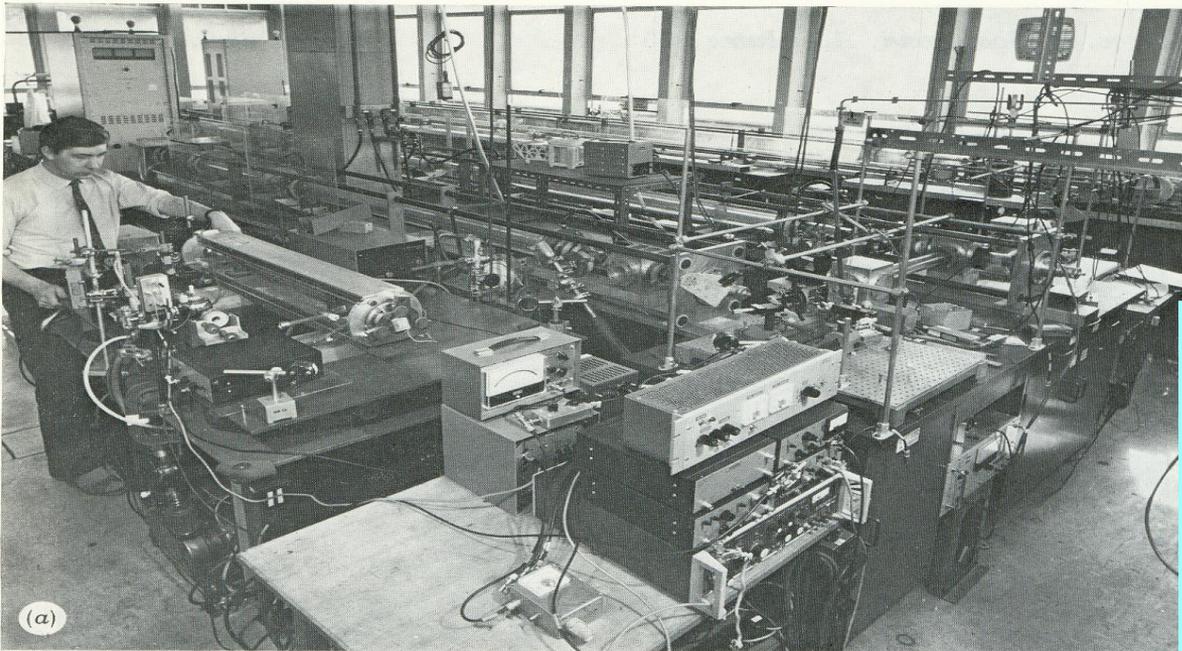


# Ультрастабильные лазерные системы



ФИАН

# РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ СВЯЗИ ДИАПАЗОНОВ



**Типичная Установка для  
Синтеза Оптических  
частот**

**«Радио-Оптическая цепь»**

**(1972 – 1999)**

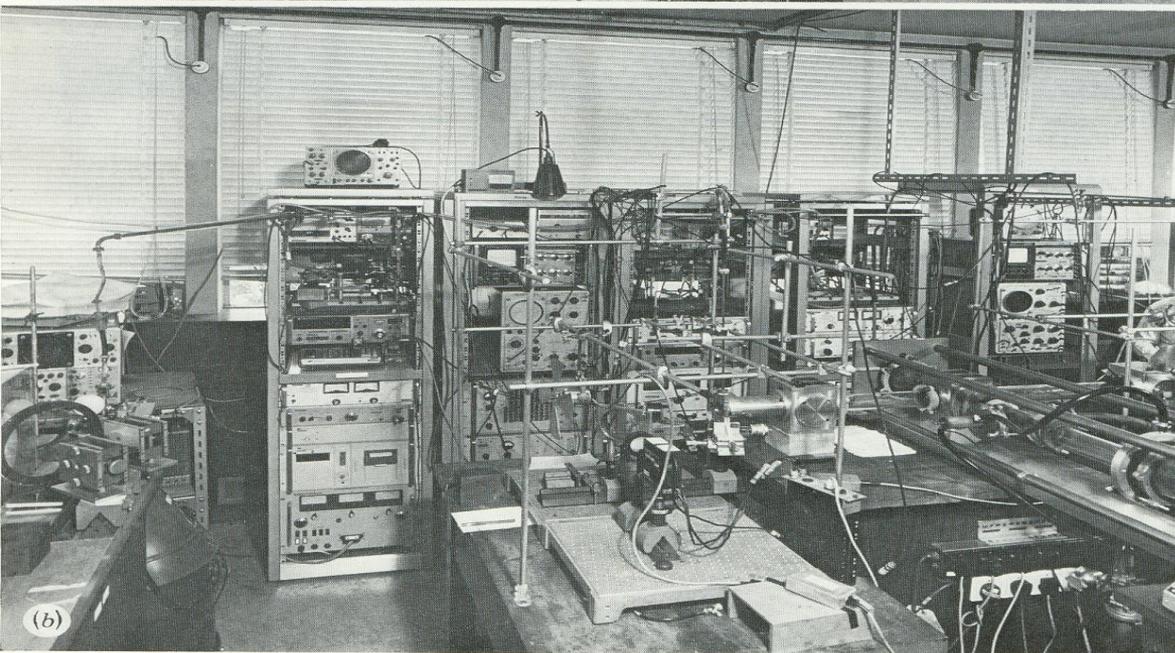
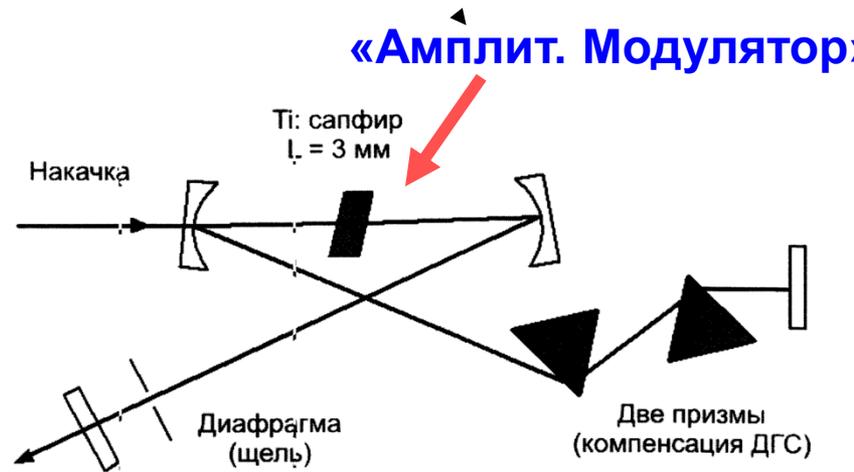
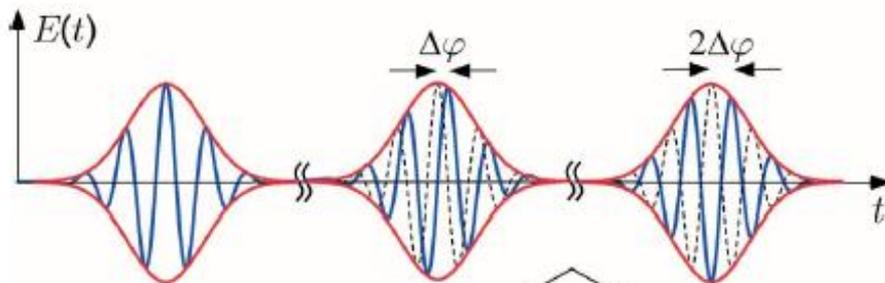


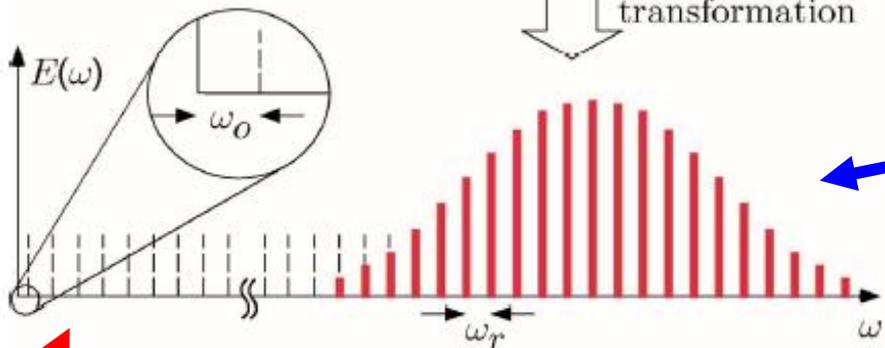
FIGURE 2. For description see facing page.

**ФС Ti:Sa лазер со сверхбыстрым внутрирезонаторным амплитудным модулятором  
создает РАВНОМЕРНУЮ ГРЕБЕНКУ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ.)  
(1999 -2000 гг)**

**Временная область:**



**Частотная область:**



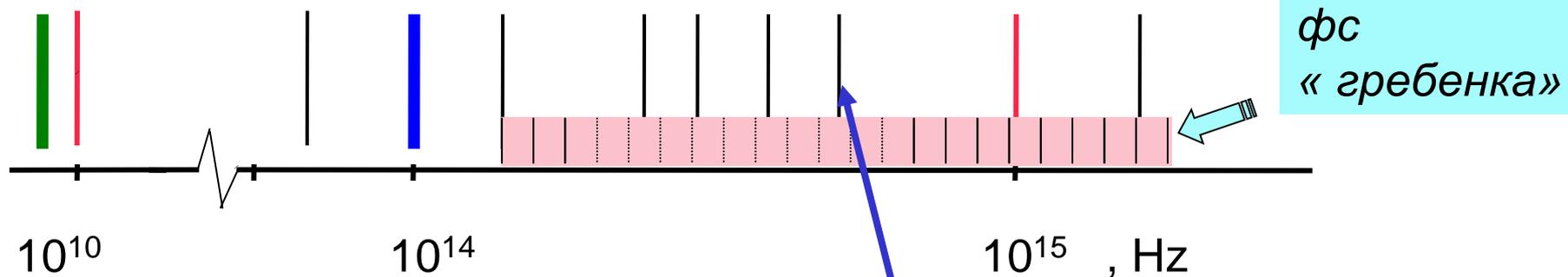
$$f_N = f_{rep} \times N + f_0$$

**Точность этого соотношения  $\sim 10^{-19}$**

$$f_0 = \Delta\phi/T$$

# ФС ОПТИЧЕСКАЯ «ГРЕБЕНКА»: ИЗМЕРИТЕЛЬ / «ДЕЛИТЕЛЬ» ЛАЗЕРНЫХ ЧАСТОТ

H Cs OsO<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, Rb, Ca, Sr, I<sub>2</sub>,... Hg<sup>+</sup>, H



$$f_{\text{rep}} = (v_N - f_{\text{ceo}}) / N$$

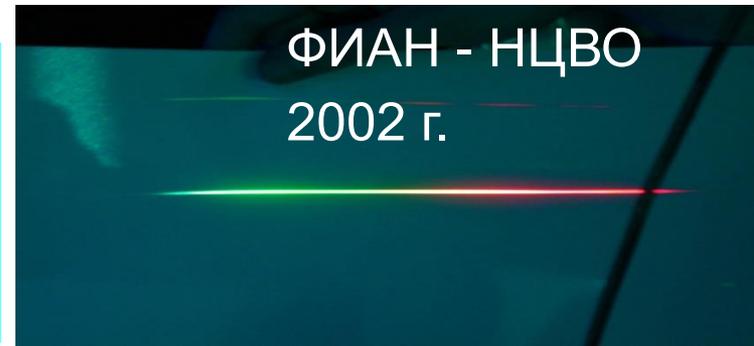
$$v_{\text{лаз}} = v_N + \delta_{\text{биений}}$$

1999 - 2000 : Garching, Boulder

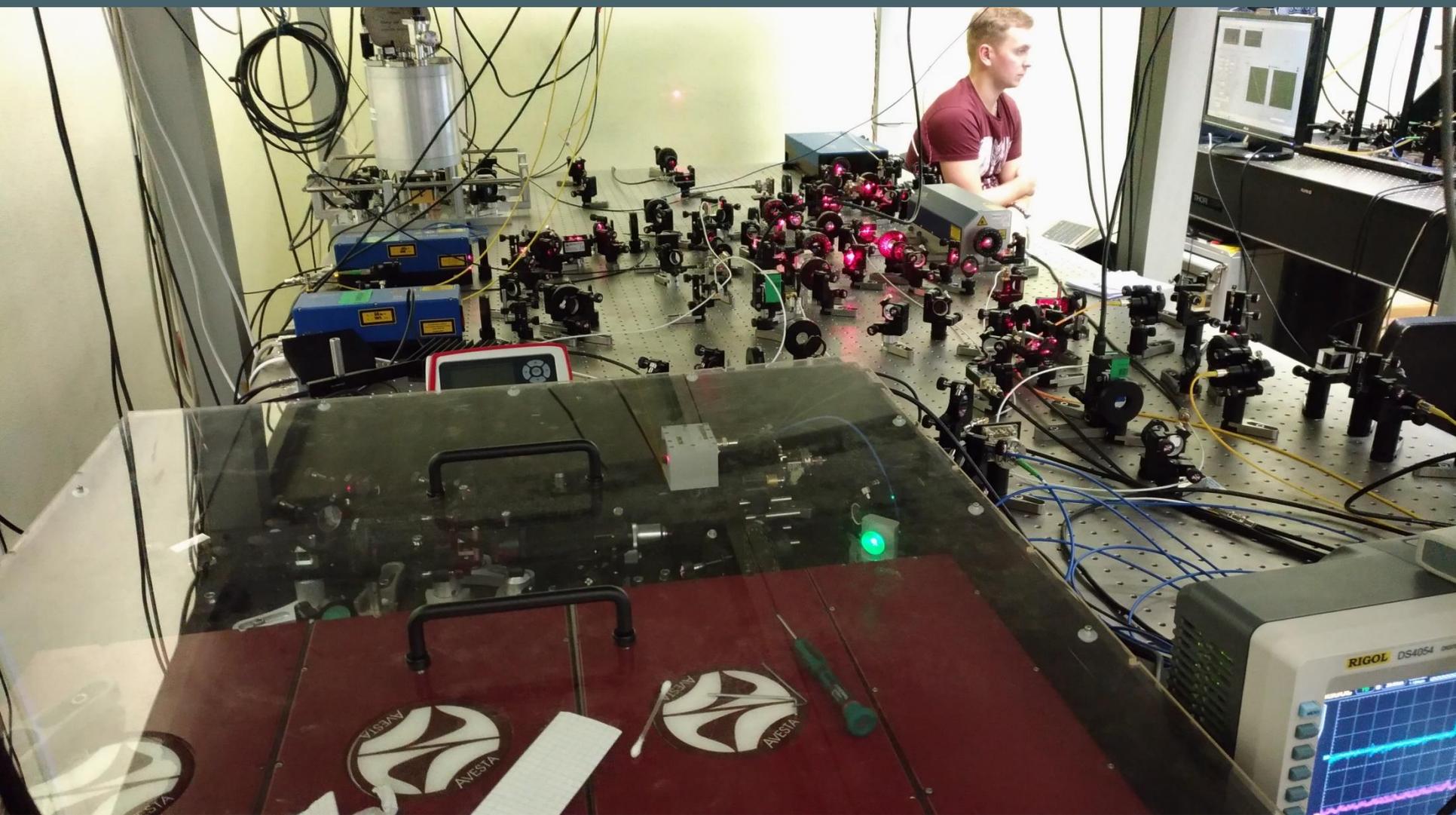
Нобелевская премия 2005 г:

T.Hänsch, J. Hall

ФИАН - ИЦВО  
2002 г.



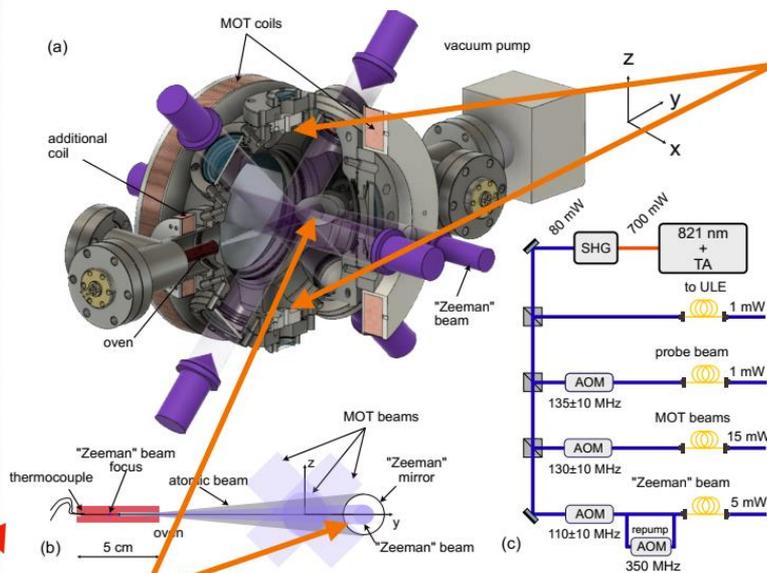
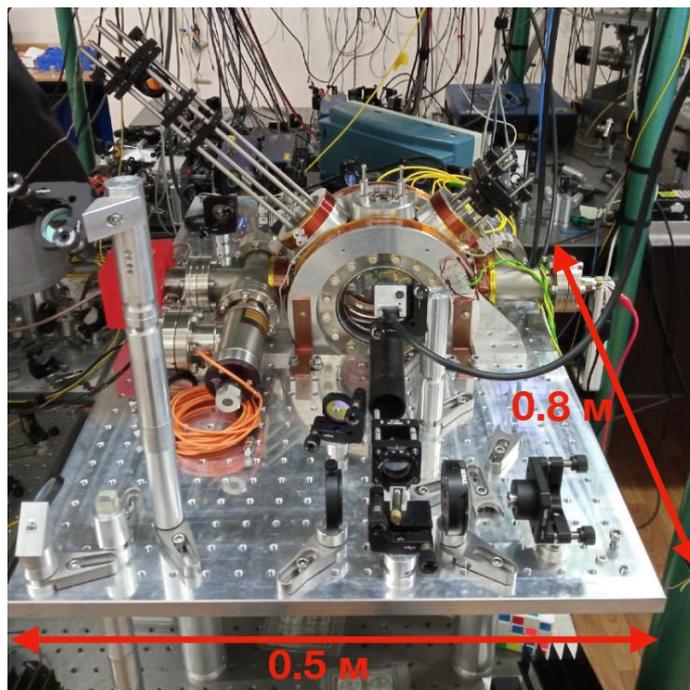
# ФСОЧ: (АВЕСТА-ФИАН-ВНИИФТРИ)



На основе фемтосекундных ВОЛОКОННЫХ лазеров  $\lambda=1.5$  мкм

# ФИАН - КОМПАКТНАЯ СИСТЕМА Оптических часов на атомах Тулия

⇒  $10^{-17}$



**In-vacuum buildup cavity for the optical lattice**  
 Finesse  $\sim 500$ , buildup  $> 100$ , 50-100 mW optical power should be enough for efficient trapping of atoms.

**All-fiber light delivery**  
 Better deceleration direction, less influence on the MOT

**Convergent Zeeman beam**  
 Better deceleration direction, less influence on the MOT

**Large optical access**  
 2 CMOS cameras with collection efficiency  $\sim 1\%$  of scattered light

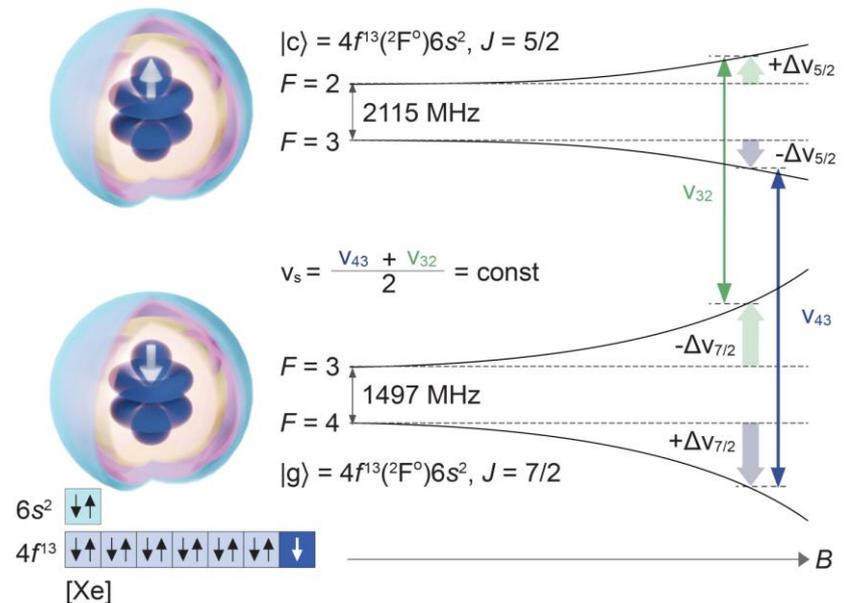
# Преимущества часов на атомах Тулия

1. **Рекордно низкий** сдвиг частоты из-за теплового излучения.
2. Формирование синтетической часовой частоты, **нечувствительной** к магнитному полю.
3. **Удобные длины волн** необходимых лазерных источников – лазерное охлаждение 410 нм и 530 нм, «магическая» оптическая решетка 1064 нм, часовой переход 1.14 мкм.

## Тепловой сдвиг частоты некоторых часовых переходов:

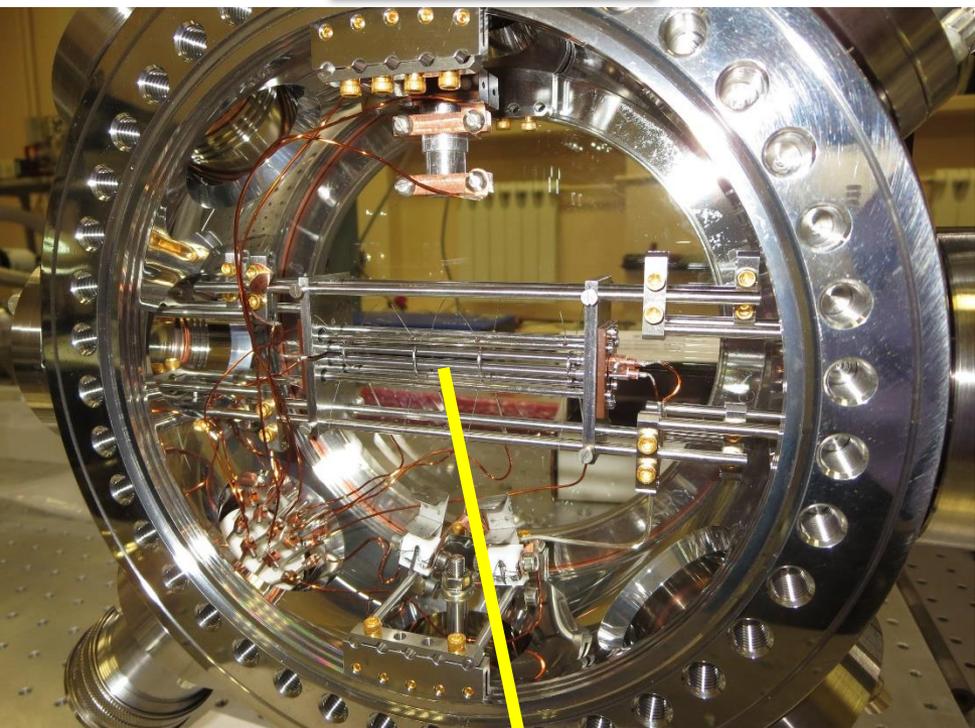
Clock transition	Frequency shift @ 300 K, $10^{-18}$
<b>Tm, 1140 nm</b>	<b>2.3</b>
Sr, 698 nm	-5500
Yb, 578 nm	-2700
Hg, 266 nm	-160
Al <sup>+</sup> , 267 nm	-4
Yb <sup>+</sup> , 467 nm (E3)	-110
Lu <sup>+</sup> , 708 nm	-1.4

## Электронная структура

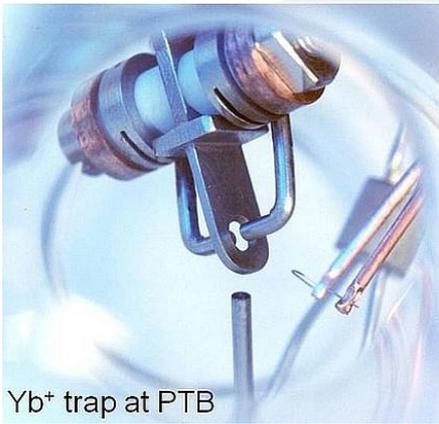


# Компактный ионный стандарт: ФИАН, ИЛФ

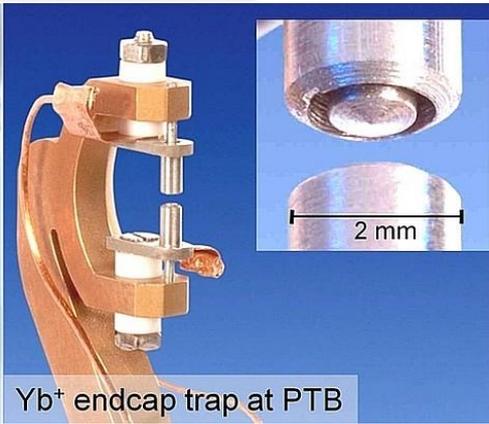
## ФИАН



## ИЛФ-РТВ

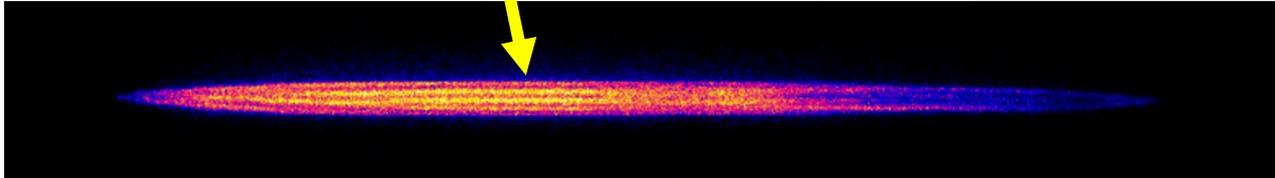


Yb<sup>+</sup> trap at PTB

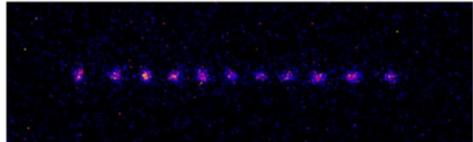


Yb<sup>+</sup> endcap trap at PTB

- Компактная (1-3 дм<sup>3</sup>)
- Вакуум 10<sup>-10</sup> Торр
- Глубокий потенциал (3 эВ)
- Можно миниатюризировать

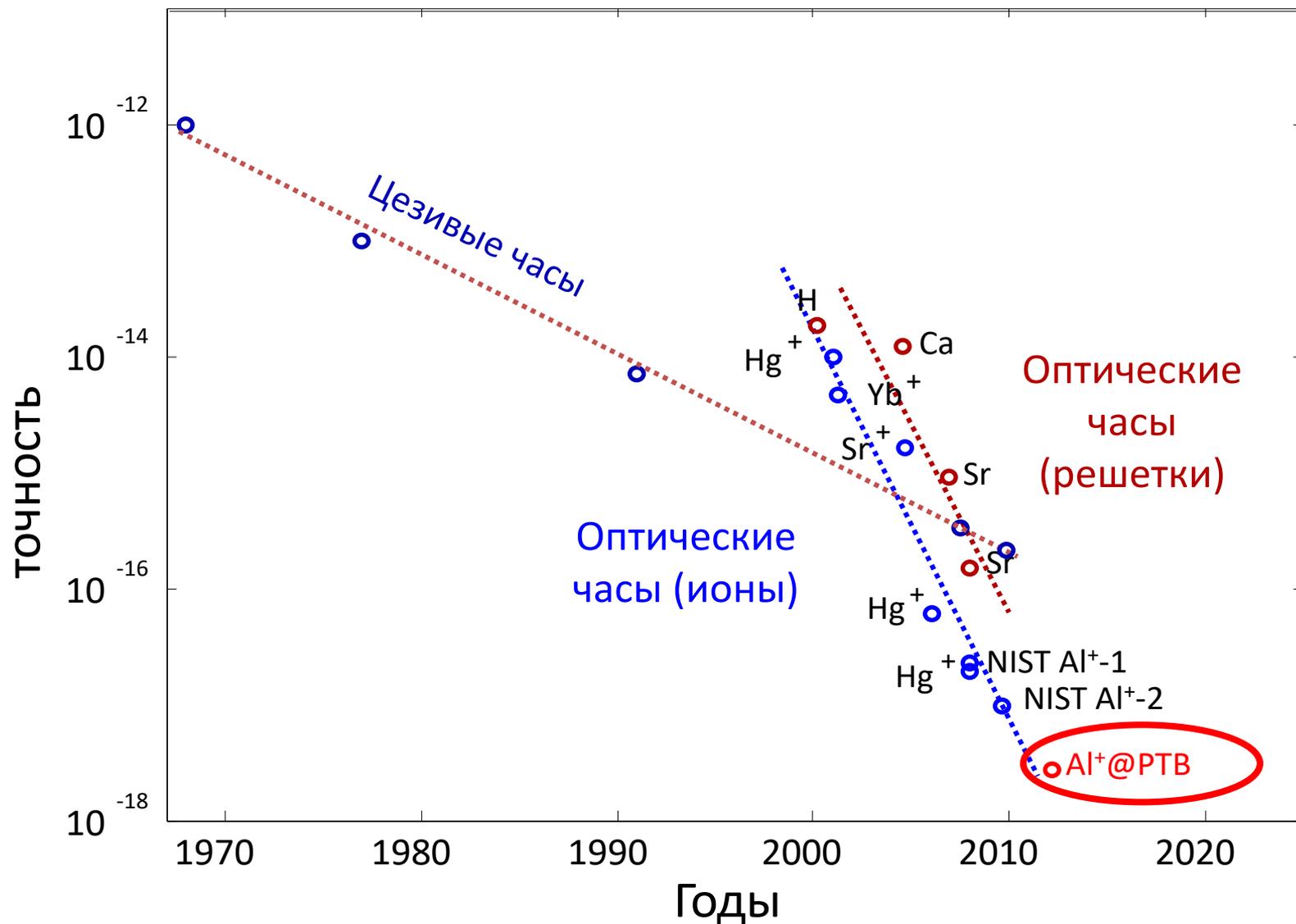


100 мкм



**одиночные ионы Yb<sup>+</sup> в ловушке**

# ИСТОРИЯ ТОЧНОСТИ ЛУЧШИХ ЧАСОВ



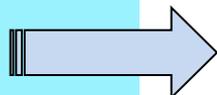


Оптические стандарты частоты в  
фундаментальных исследованиях  
(некоторые примеры)

1961 г. Сентябрь

Т. LXXV, вып. 1

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК



### О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭФФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МОЛЕКУЛЯРНЫХ И АТОМНЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, А. Н. Оравский,  
Г. М. Страховский, Е. М. Чихачев

### II. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ ЧАСТОТЫ И ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ОБЩЕЙ И ЧАСТНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

#### § 1. Возможные схемы опытов по проверке общей теории относительности

Достигнутая в настоящее время в лабораторных условиях высокая абсолютная стабильность частоты молекулярных генераторов порядка  $10^{-10}$  (см. гл. I) позволяет поставить опыты по экспериментальной про-

#### § 2. Опыты 1-го порядка по проверке специальной теории относительности

Высокая относительная стабильность частоты молекулярных генераторов дает возможность поставить релятивистские опыты первого порядка (эффекты, зависящие от величины  $\beta = \frac{v}{c}$  в первой степени) для проверки специальной теории относительности. В настоящее время известно два

### III. ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЭТАЛОНОВ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Создание атомных часов высокой стабильности делает возможным экспериментальную проверку некоторых космологических гипотез, связанных со структурой пространства, времени и природой тяготения.

Рассмотрению этих вопросов посвящена работа Дикке<sup>3</sup>. Результаты этой работы после некоторых предварительных замечаний будут изложены ниже.

1968 г. Декабрь

Том 96, вып. 4

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК



### ОПТИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

Н. Г. Басов, В. С. Летохов

### VII. НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

#### 1. Измерение скорости света

Точность измерения одной из основных физических констант, скорости света, в настоящее время составляет  $10^{-6}$ . Точность измерения скорости света можно существенно повысить с помощью оптического стандарта частоты и схемы абсолютного измерения частоты света. Идея эксперимента проста<sup>19</sup>. Одновременное измерение с высокой точностью частоты и длины

#### 2. Проверка постоянства мировых констант

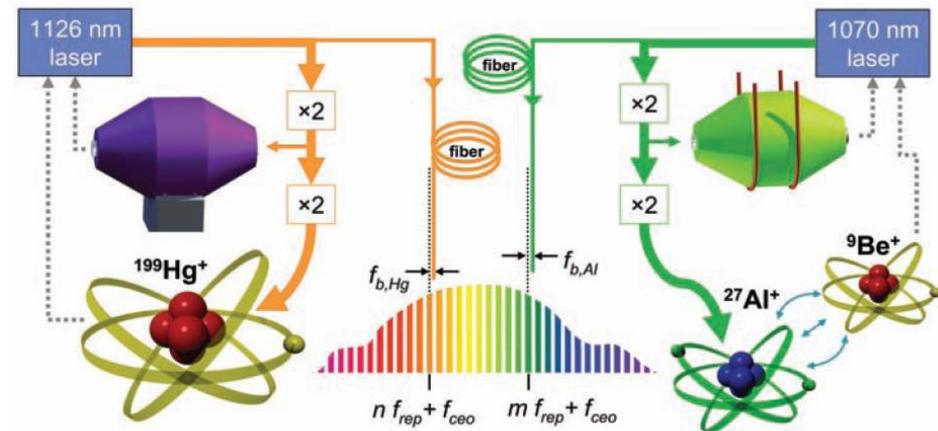
Рассматривая безразмерные комбинации фундаментальных физических констант, включая радиус и возраст Вселенной, Дирак высказал предположение<sup>125</sup> (см. также<sup>126, 127</sup>), что из-за расширения Вселенной физические константы могут меняться со временем.

К этой же гипотезе можно подойти с другой точки зрения<sup>128</sup>. Эле-

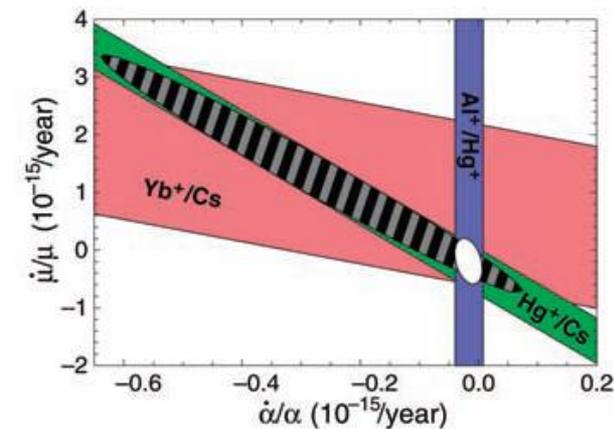
# Поиск дрейфа фундаментальных констант в лаборатории

Отношение оптических частот переходов

**Al<sup>+</sup> / Hg<sup>+</sup>**



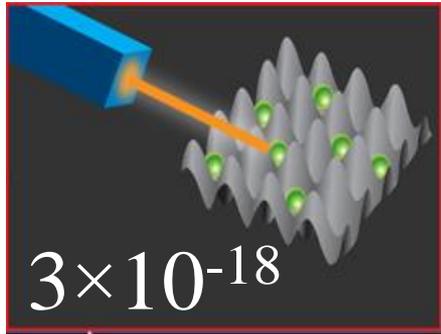
$$\dot{\alpha}/\alpha = -1.6 \pm 2.3 \times 10^{-17} \text{ yr}^{-1}$$



JILA / NIST

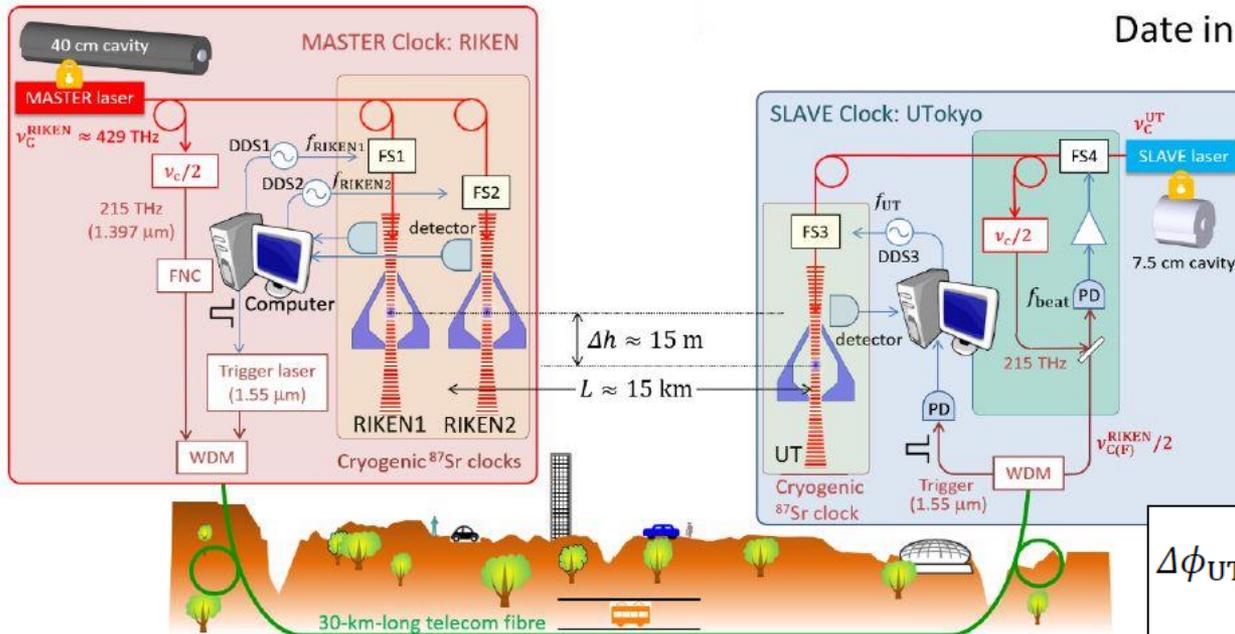
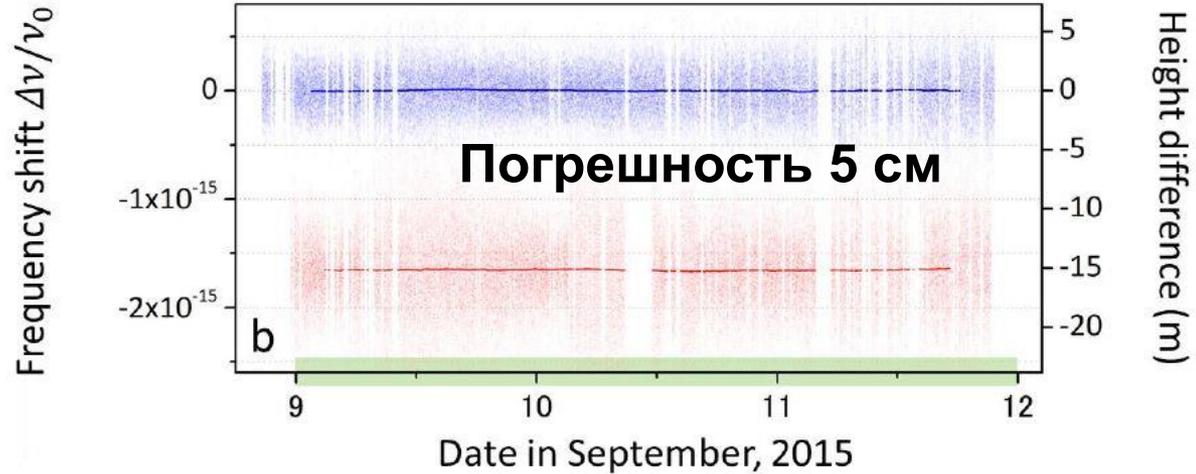
T. Rosenband et al. SCIENCE 319, 1808 (2008)

# Измерение гравипотенциала в реальном времени с помощью синхронно-связанных часов на оптических решетках



$$\Delta h = 3 \text{ см}$$

решетках



Нивелирование:

$$\Delta\phi_{\text{UT-RIKEN1}} = -148.14(6) \text{ м}^2/\text{с}^2$$

Сличение часов:

$$\Delta\phi_{\text{UT-RIKEN1}} \left( = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} c^2 \right) = -148.55(53) \text{ м}^2/\text{с}^2$$

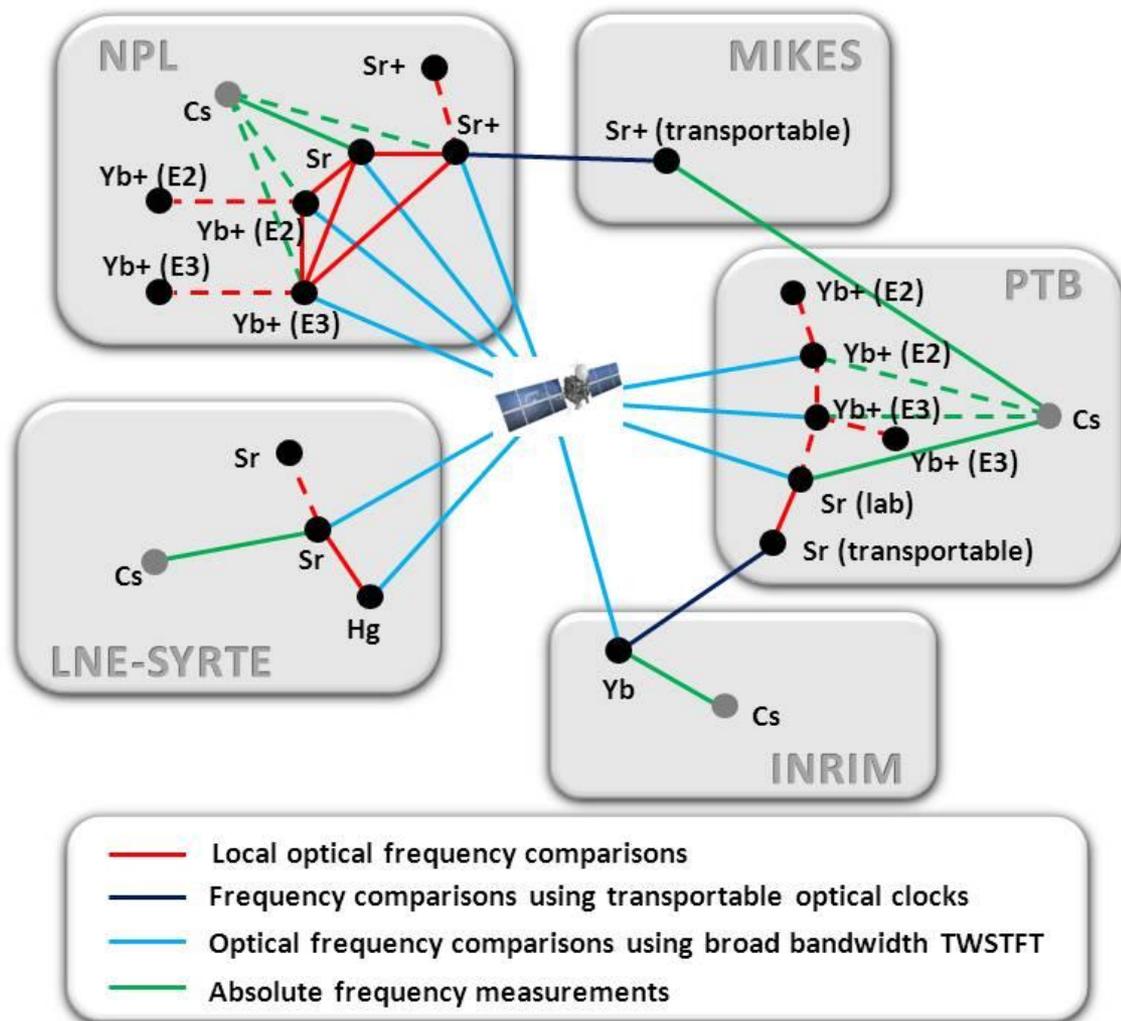
Большинство указанных экспериментов,  
а также синхронизация часов  
в глобальном масштабе требует  
**сличения сигналов**  
оптических стандартов частоты.

# Проект International Timescales with Optical Clocks (ITOC)

<http://projects.npl.co.uk/itoc/>

## Методы сличения:

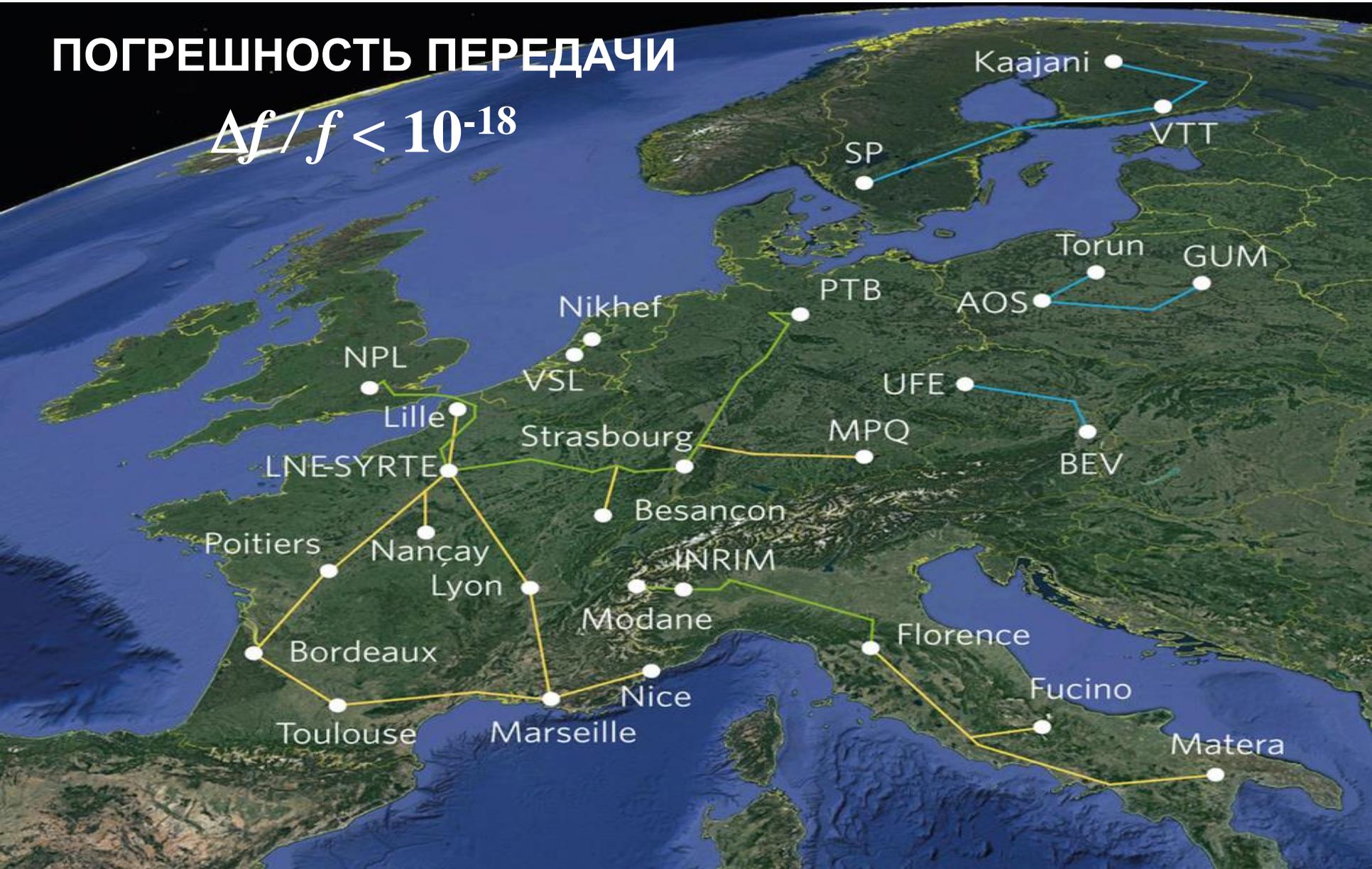
- **Оптоволокно**
- **Транспортируемые стандарты**
- **Открытый канал**



# Стабилизированные оптоволоконные сети для передачи сигналов времени и частоты

## ПОГРЕШНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ

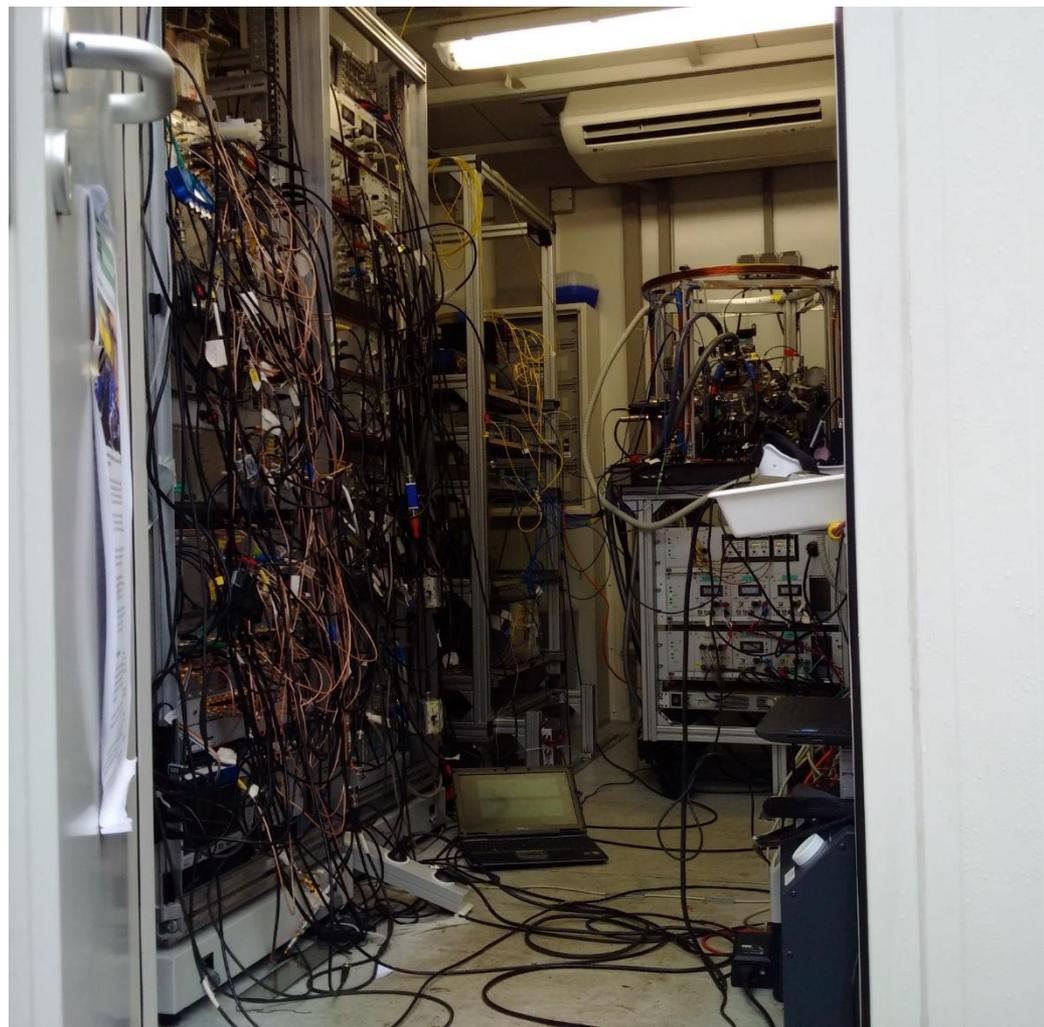
$$\Delta f / f < 10^{-18}$$



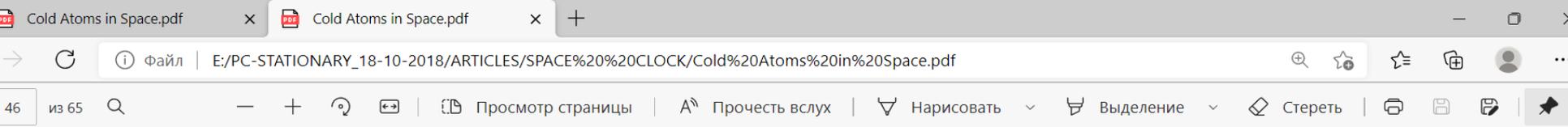
# Транспортируемый стандарт (PTB, Германия)

Относительная погрешность  
воспроизведения частоты

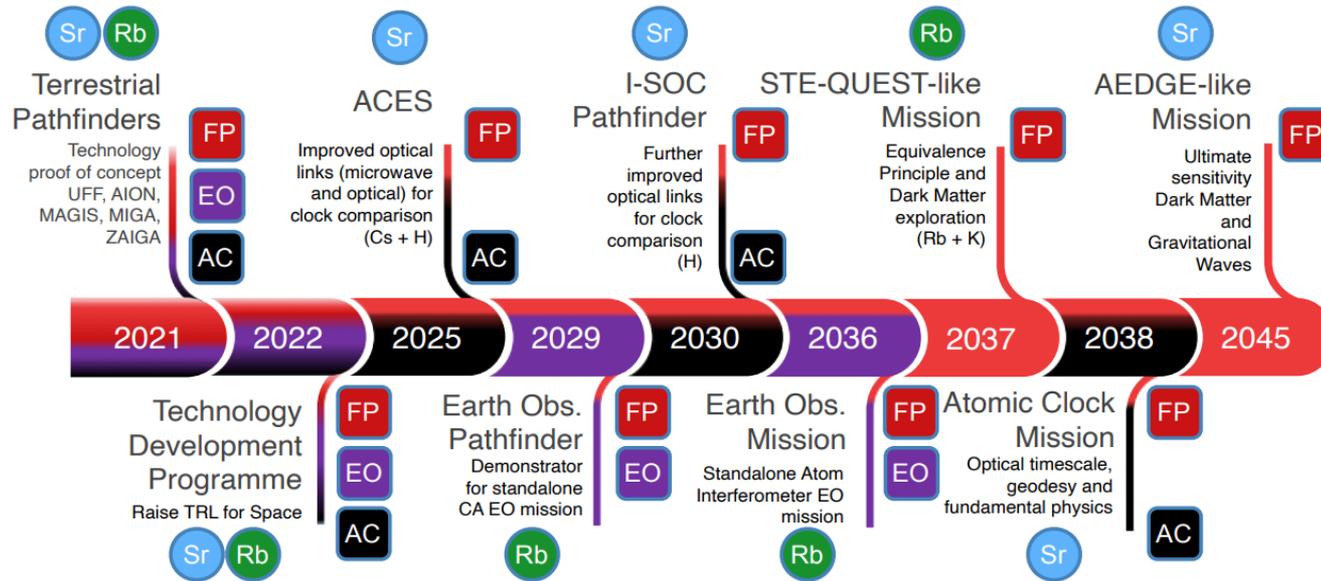
$7 \times 10^{-17}$



# ОПТИЧЕСКИЕ ЧАСЫ $\sim 10^{-18}$ В КОСМОСЕ: ПРОЕКТЫ ДО 2045 г.



## Community Proposal for an ESA Road-Map for Cold Atoms in Space



### Legends:

Main Cold Atom Species



Areas of Relevance



Main Milestone Area (colour coded)

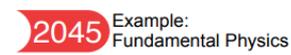


Figure 15. A first draft of the community road-map proposed for discussion with ESA. The figure shows

# БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСОВ ДЛЯ КОСМОСА

Community Workshop Summary and Proposed Road-Map till 2045  
(147 Labs ) [arXiv:2201.07789v1](https://arxiv.org/abs/2201.07789v1) [astro-ph.IM] 19 Jan 2022

- “...Europe is developing key optical clock technology for space, e.g.,
- **cooling lasers, lattice laser**
- the **clock laser, and high-finesse reference cavity,**
- a **clock control unit** to stabilize the laser frequency on the atomic transition

С первых лет лазерной эры Н.Г.Басов  
уделял специальное внимание организации и  
созданию технологического базиса для лазерной  
техники



**Н.Г. Басов**

## **«Лазерный» ФИАН В ТРОИЦКЕ:**

( 1963 – 2000 )гг. - ОКБ ФИАН ( 700 чел.)

( 2000 – 2008 – 2017 ) г. - **ТОП ФИАН + ТЕХНОПАРК**,  
включающий ~ 20 Инновационных компаний

Начиная с 2018 г. - в **ТОП ФИАН** вошли **научные лаборатории** лазерного / спектроскопического профиля из других Отделений ФИАН и ИСАН

( ~ 60 науч. сотрудников )

# НАПРАВЛЕНИЯ

- Фемтосекундные лазеры
- Квантовые стандарты частоты
- Кристаллы и активные структуры для лазеров среднего ИК и УФ диапазонов
- Прецизионная оптика
- .....

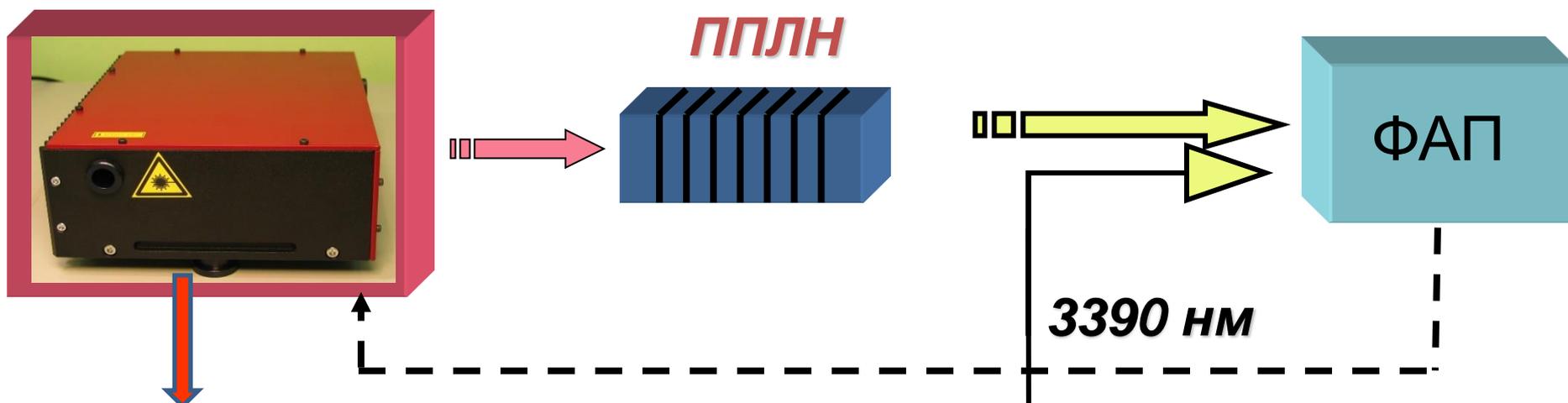
# Среди них:

- I. Задающие генераторы со стабильностью частоты  $10^{-14} - 10^{-15}$  (время усреднения  $\tau = 1\text{с}$  )
  
- II. Миниатюрные приборы :
  - Атомные Часы со стабильностью  $10^{-12}$  / сутки,
  - Атомные Магнитометры
  - Атомные Гироскопы

# Радио-Оптический Задающий Генератор на основе Метанового ОСЧ и ФС Волоконного Лазера

$\text{Er}^{3+}$  ФС система:  
Гребенка частот  
**1000 – 2000 nm**

Гребенка частот  
**3300 – 3400 nm**

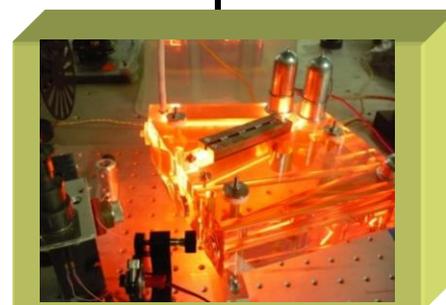


**Выход:**

1) ФС импульсы:  $F_{\text{повт}} \approx 60 \text{ МГц} / 1 \text{ ГГц}$

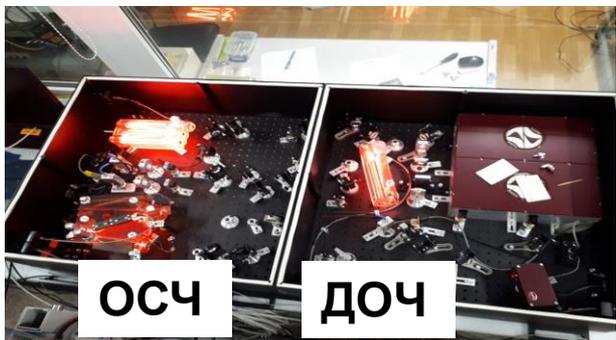
2) Гребенка Радио частот:

$N \times F_{\text{повт}} = 0,06 - 10 \text{ ГГц}$

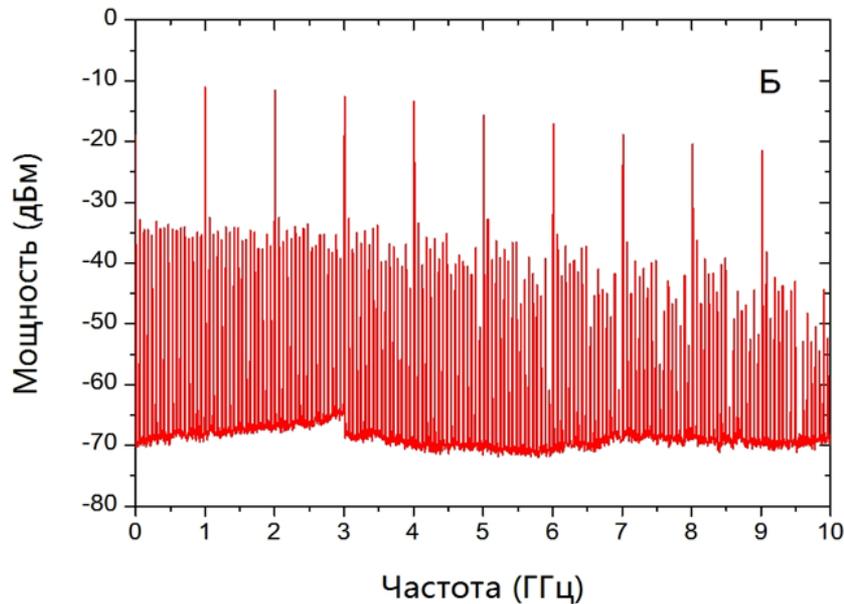
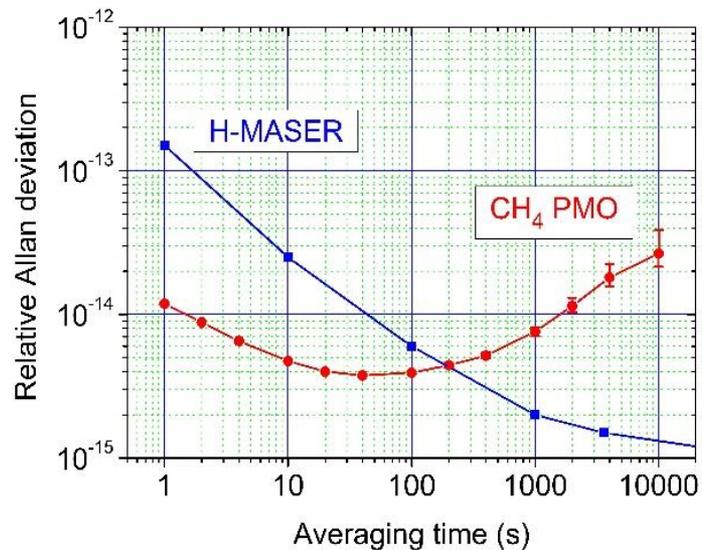


**$\text{CH}_4$  ОСЧ**

# Метановый Фотонный генератор



**СПЕКТР ВЫХОДНОГО СИГНАЛА:  
0.06 -10.0 ГГц**



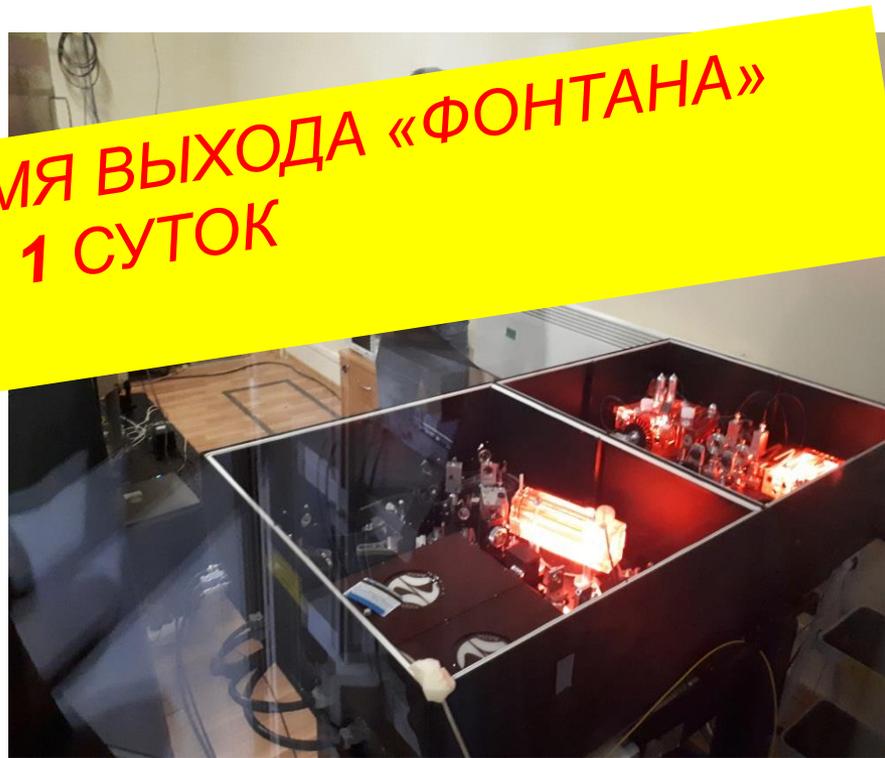
**Стабильность частоты  
на 1.0 ГГц и 9.2 ГГц**

# ЭКСПЕРИМЕНТ на Cs / Rb «ФОНТАНАХ» (во ВНИИФТРИ, 2017г.)



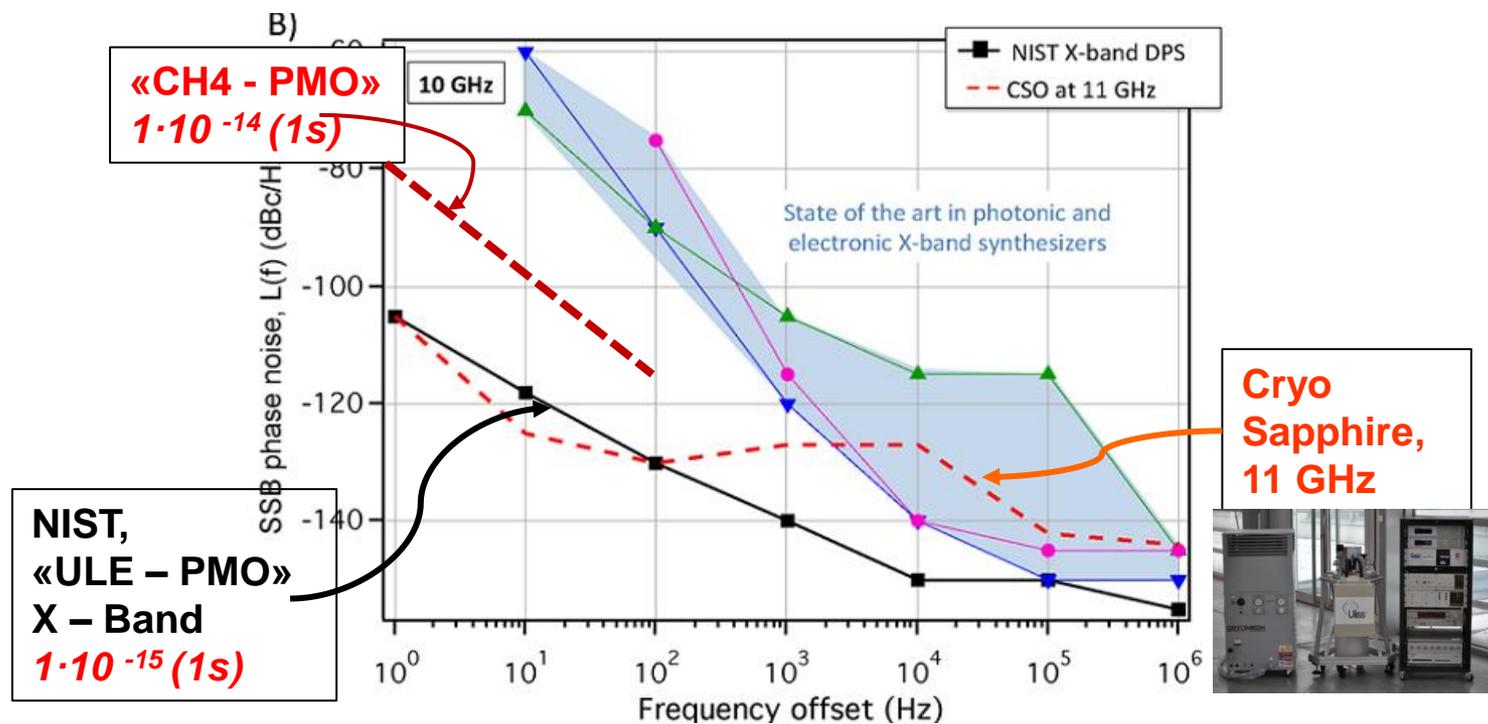
Государственный первичный  
ЭТАЛОН ВРЕМЕНИ  
И ЧАСТОТЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПОЗВОЛЯЕТ СОКРАТИТЬ ВРЕМЯ ВЫХОДА «ФОНТАНА»  
НА ЗАДАННУЮ ТОЧНОСТЬ ДО 1 СУТОК  
ВМЕСТО 2-3 НЕДЕЛЬ



# СВЕРХНИЗКИЕ ФАЗОВЫЕ ШУМЫ ПРИ МАЛЫХ ОТСТРОЙКАХ ОТ НЕСУЩЕЙ

10 GHz

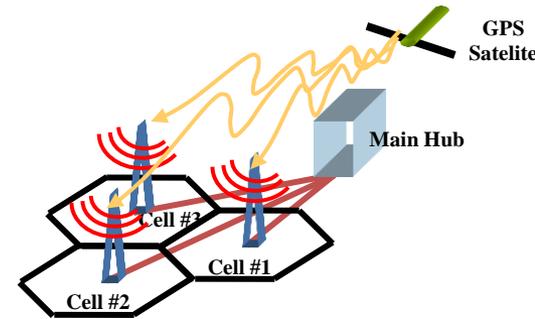


( Laser Photonics Rev. 10,#5 780-790, 2016)

**РАЗРАБОТКА МИНИАТЮРНЫХ  
АТОМНЫХ ЧАСОВ и  
МАГНИТОМЕТРОВ в Троицке  
(ФИАН - ИЛФ СО РАН - ИЗМИРАН)**

# Миниатюрные Атомные часы со стабильностью $10^{(-11...-12)}$ / сутки - в 10000 раз лучше, чем у обычных Кварцевых и при габаритах $\sim 10 \text{ см}^3$ !!!

## Применения:



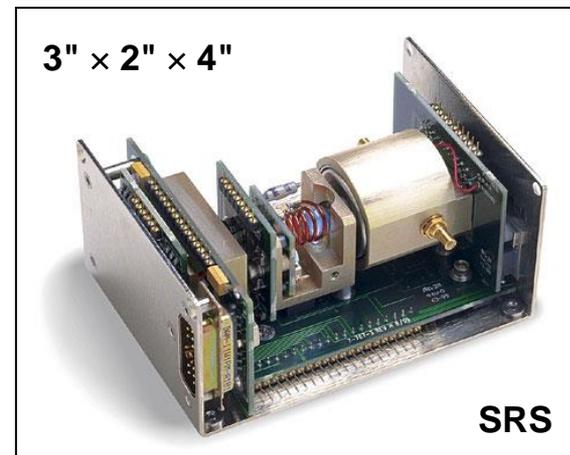
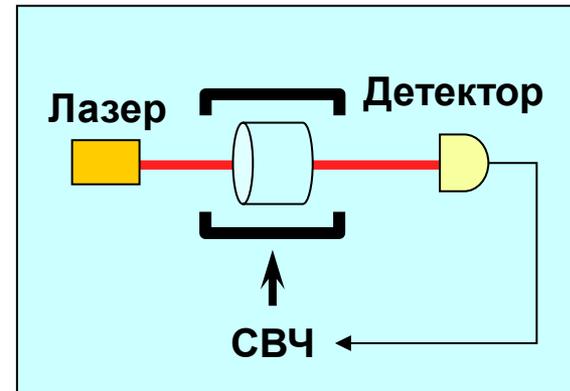
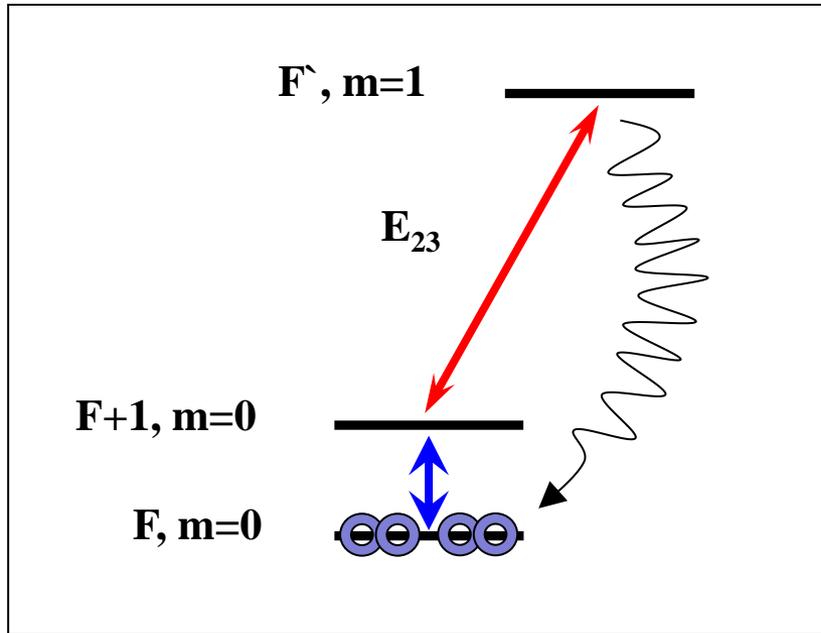
- Коммерческие

- Синхронизация цифровых сетей ( $10^{-11}$  @ 1 день)
- Мобильные телефоны

- Военные

- Снижение помех при приеме сигналов GPS/ГЛОНАСС
- Идентификация
- Скрытная широкополосная связь

# Схема обычных Атомных часов с оптической накачкой

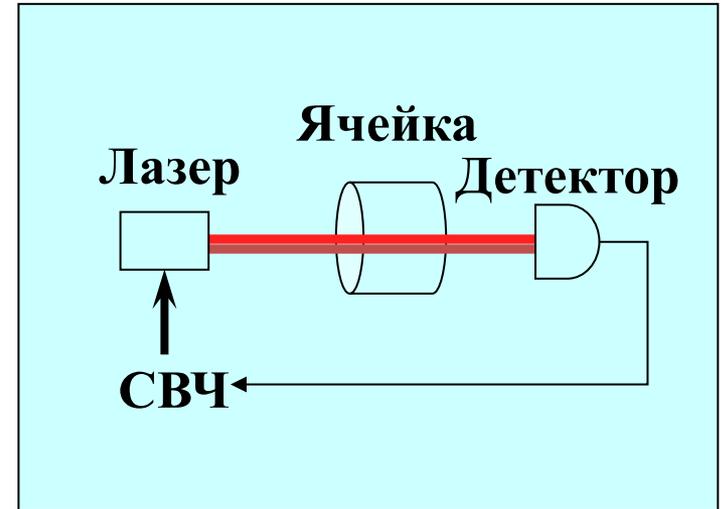
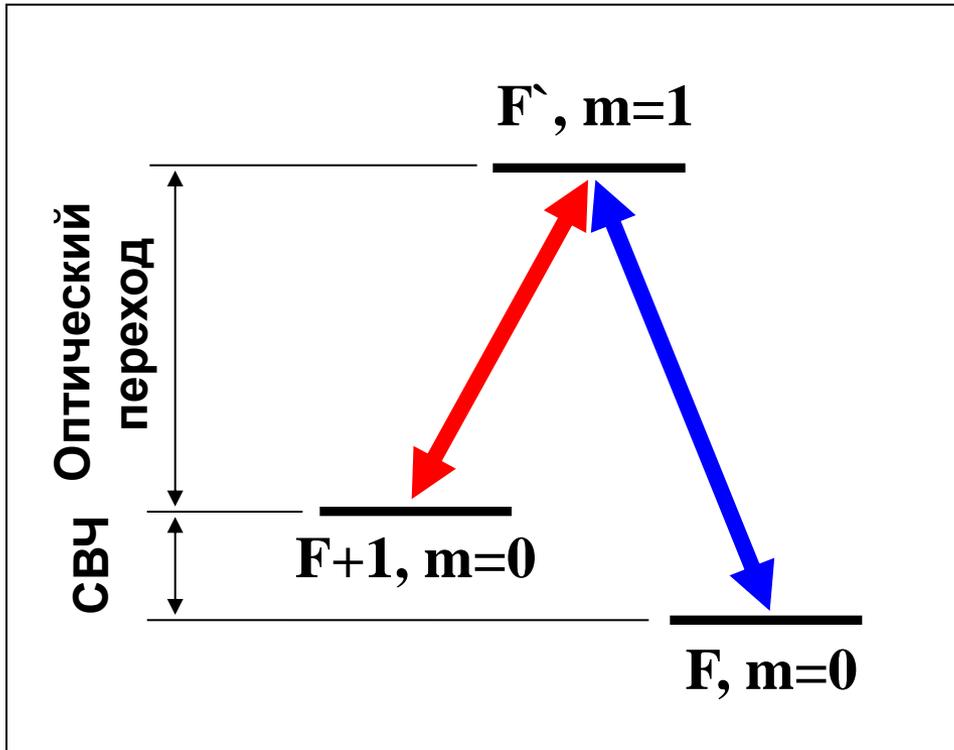


**Недостаток:**

СВЧ резонатор не позволяет уменьшить размер системы

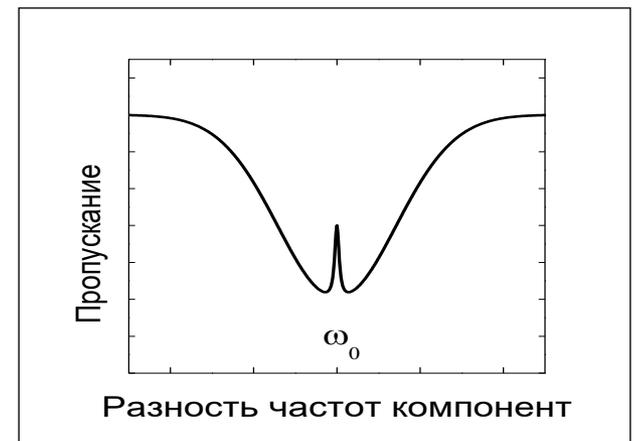
# Схема Атомных часов на основе КПН эффекта

Стабильность  $\sim 10^{-12}$  /сут

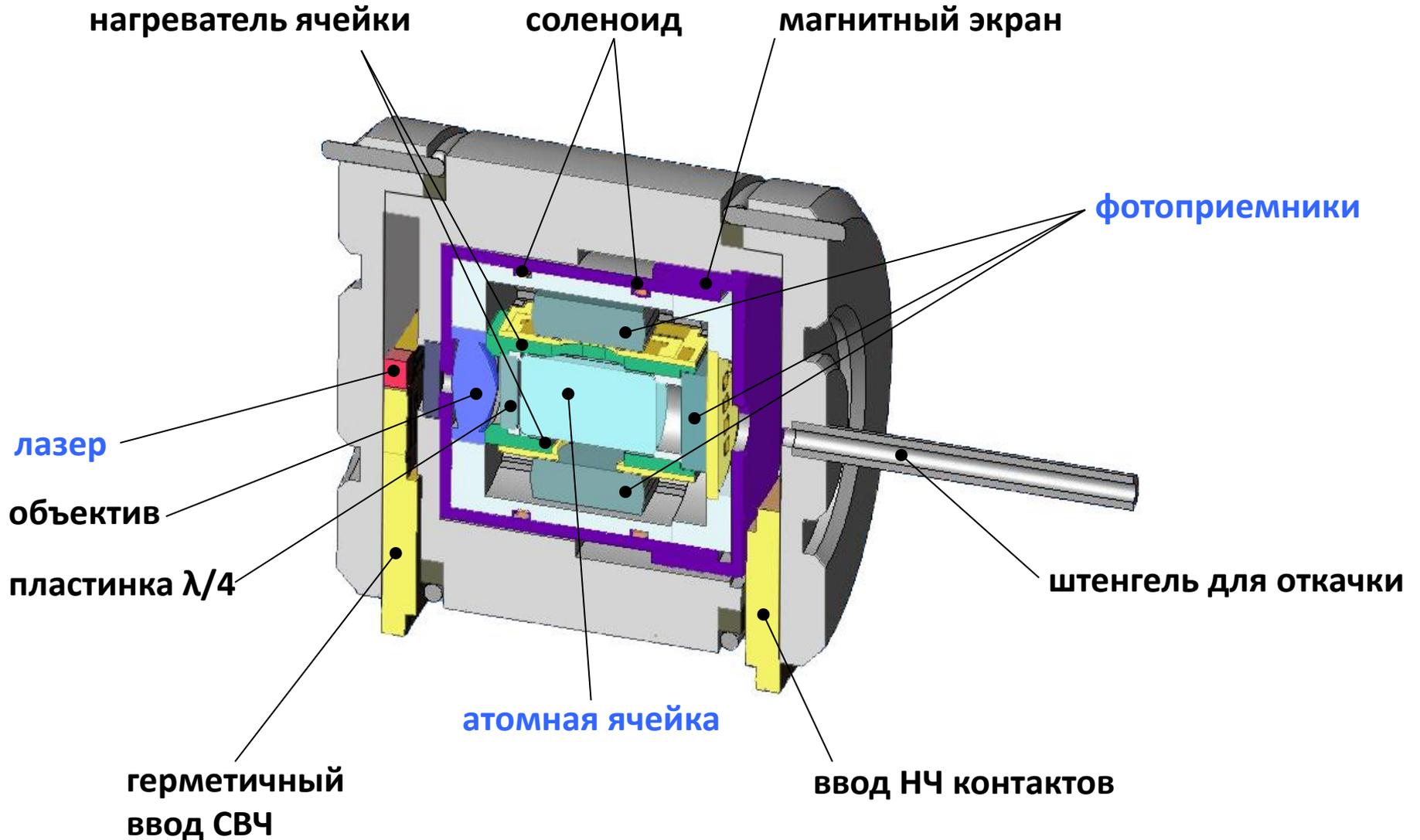


КПН наблюдается когда:

1. Оптические поля скоррелированы по фазе.
2. При точном двухфотонном резонансе:



# Макет квантового дискриминатора



# ВАЖНЕЙШИЙ ЭЛЕМЕНТ – МИНИАТЮРНЫЕ Rb ЯЧЕЙКИ



**ГОИ**

Е.Б. Александров

В.Н. Кулясов

М.В. Балабас



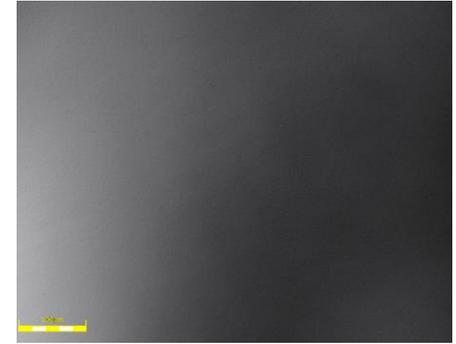
**ФИАН**

ПРЕЦИЗИОННАЯ ОПТИКА В ТОП ФИАН

## Зеркала с малыми потерями:

### Суммарные потери:

- 1550 нм < 5 ppm ( интерферометр Фабри-Перо)  
(отражение ~ 99,999%)
- 3390 нм < 500 ppm

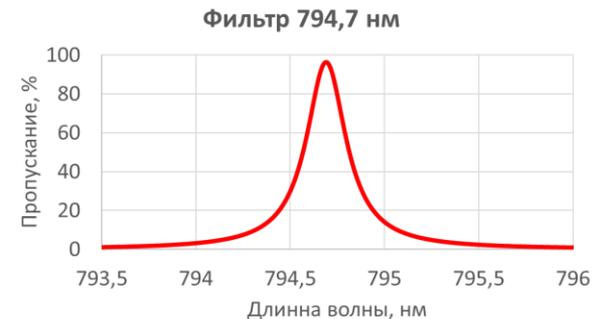
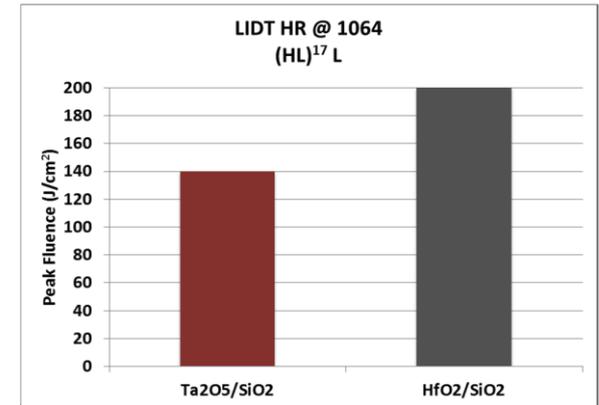


**малое количество  
дефектов**

## Зеркала с высокой лучевой стойкостью:

### Покрyтия со сложным дизайном:

- Дихроичные зеркала
- Чирпированные зеркала
- Просветляющие покрытия
- Фильтры ( ~3Å и T>90% )



# ОДНА ИЗ ПОСЛЕДНИХ СТАТЕЙ Н.Г. БАСОВА, ПОСВЯЩЕННАЯ СТАНДАРТАМ ЧАСТОТЫ

IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics, Dec. 2000, p. 857

## “Quantum Frequency Standards”

### in CONCLUSION :

decades. Fruitful competition between a great variety of QFS systems toward better accuracy, relative stability, reliability, compactness, based on fundamental physical ideas and technological achievements of quantum radiophysics, spectroscopy, electronics, etc., have led to five–six orders better accuracy as compared to the beginning. As there is no one ideal and universal system, different types of most developed quantum frequency standards as well as other respective techniques of the frequency/time keeping “business” will meet demands of science and technology of 21st century.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

## **БЛАГОДАРНОСТИ:**

О.Н. Крохину, И.Г. Зубареву, А.Н. Стародубу, А.В. Виноградову,

Н.Н. Колачевскому

ФГУП «ВНИИФТРИ», ЗАО «Время-Ч», ООО «Авеста», ООО «Флавт»