



# **Metrology of $\omega$ и $t$ – hot topics**

## **Microwave range**

- Fountains
- Chip size atomic clocks

## **Optical range**

- Ions in the traps
- Atoms in lattices (magic wavelength)

## **Comb generator**

# **CHIP SIZE ATOMIC CLOCKS (CSAC) WITH DIODE LASERS**

V.L. Velichansky

P.N. Lebedev Institute of Physics,  
Russian Academy of Science  
119991, Moscow, Leninsky Prospect, 53  
email: vlvlab@fsl1.lpi.troitsk.ru

**S.A. Zibrov\*, S.V.Kargapoltsev\*, O.N. Kozlova\*, A.V.Taichenachev\*\*,  
G.V. Romanov\*, V.I.Yudin\*\*, V.V. Vassiliev\*, V.L Velichansky\***

*\*P.N.Lebedev Institute of Physics, Moscow, Russia*

*\*\*Institute of Laser Physics, Novosibirsk, Russia*

*NIST (Leo Hollberg),*

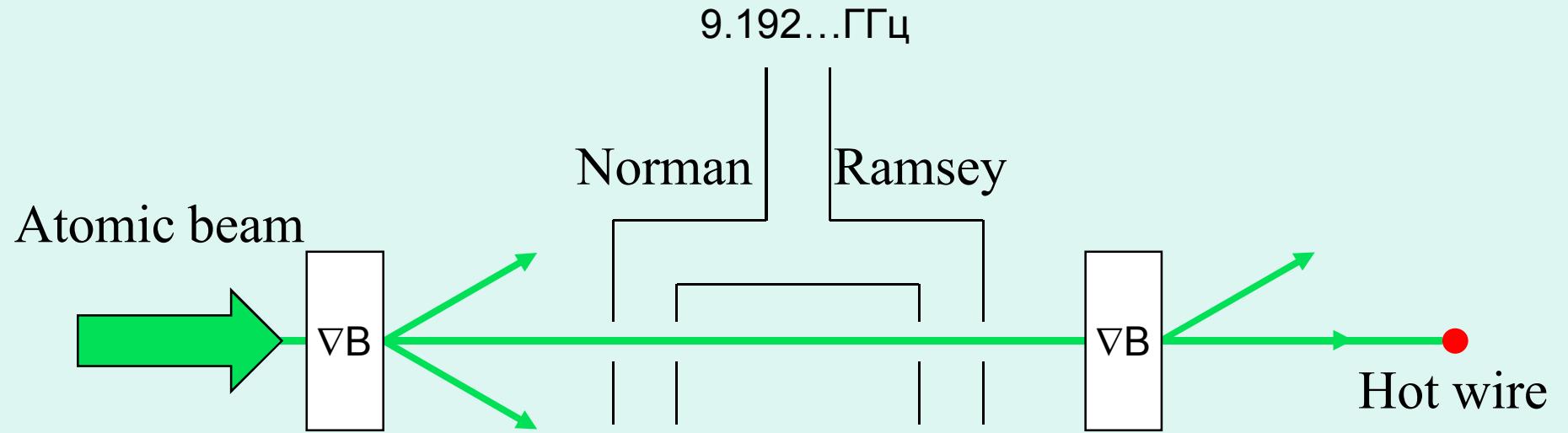
*SYMMETRICOM (R. Lutwak)*

*UNIVERSITE LAVAL, Quebec (J. Vanier)*

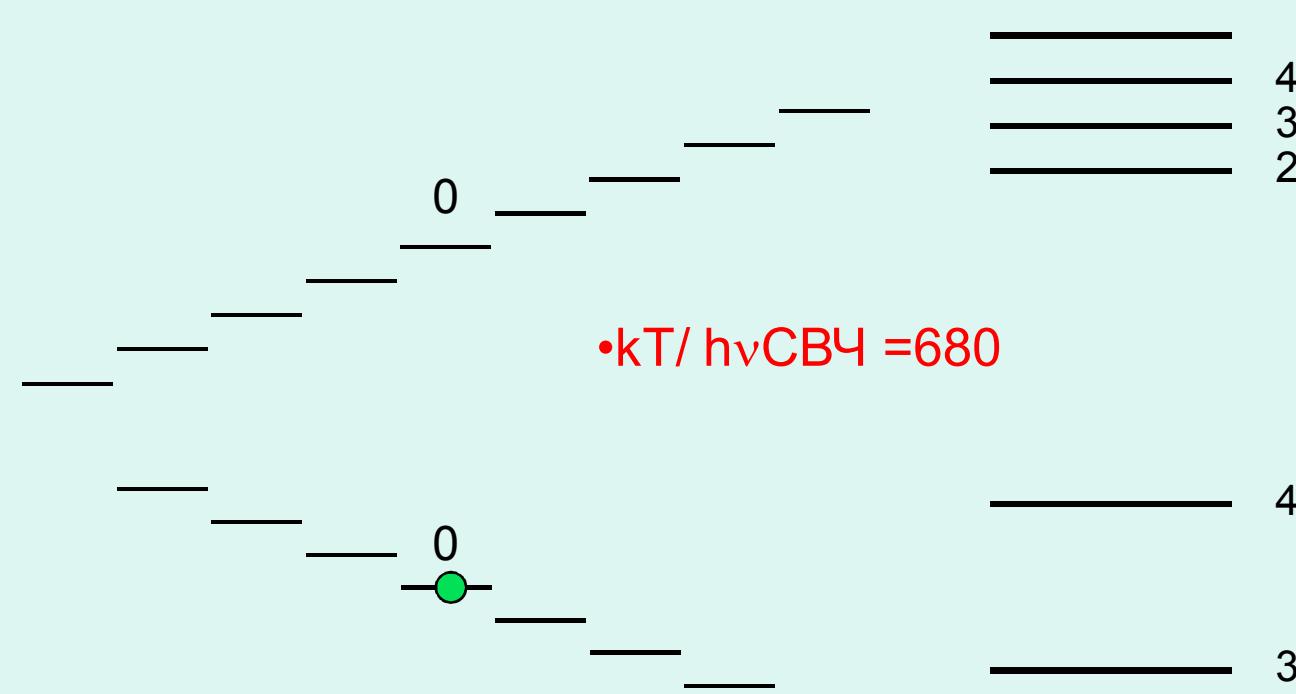
*HONEYWELL (D.W.Youngner)*

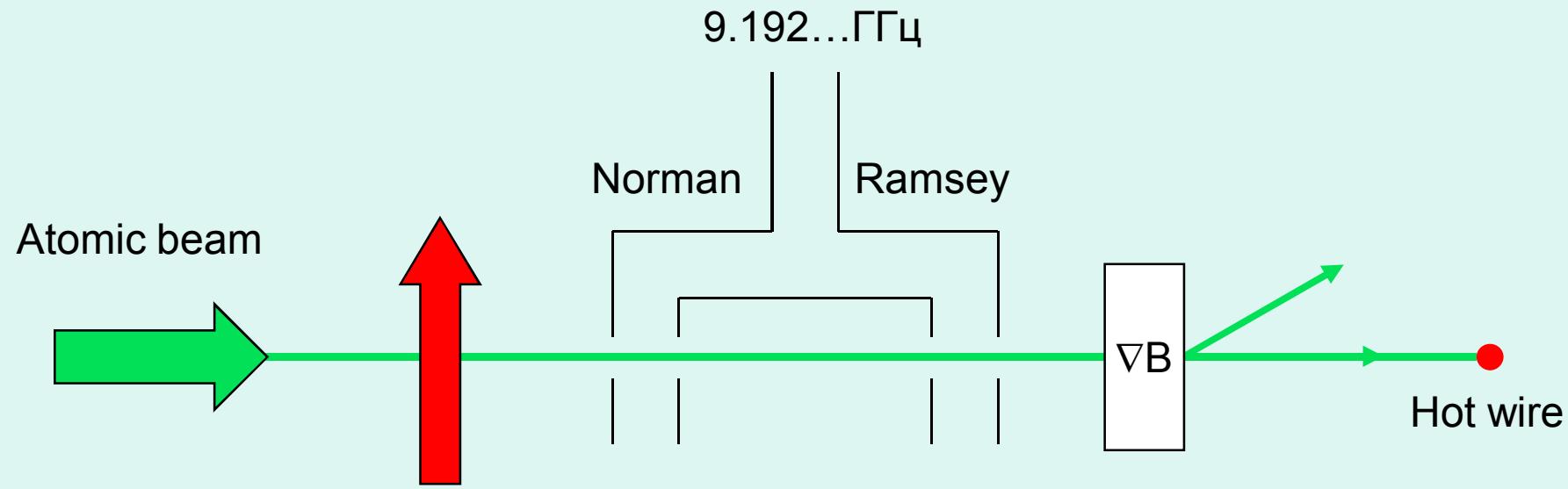
## **OUTLINE**

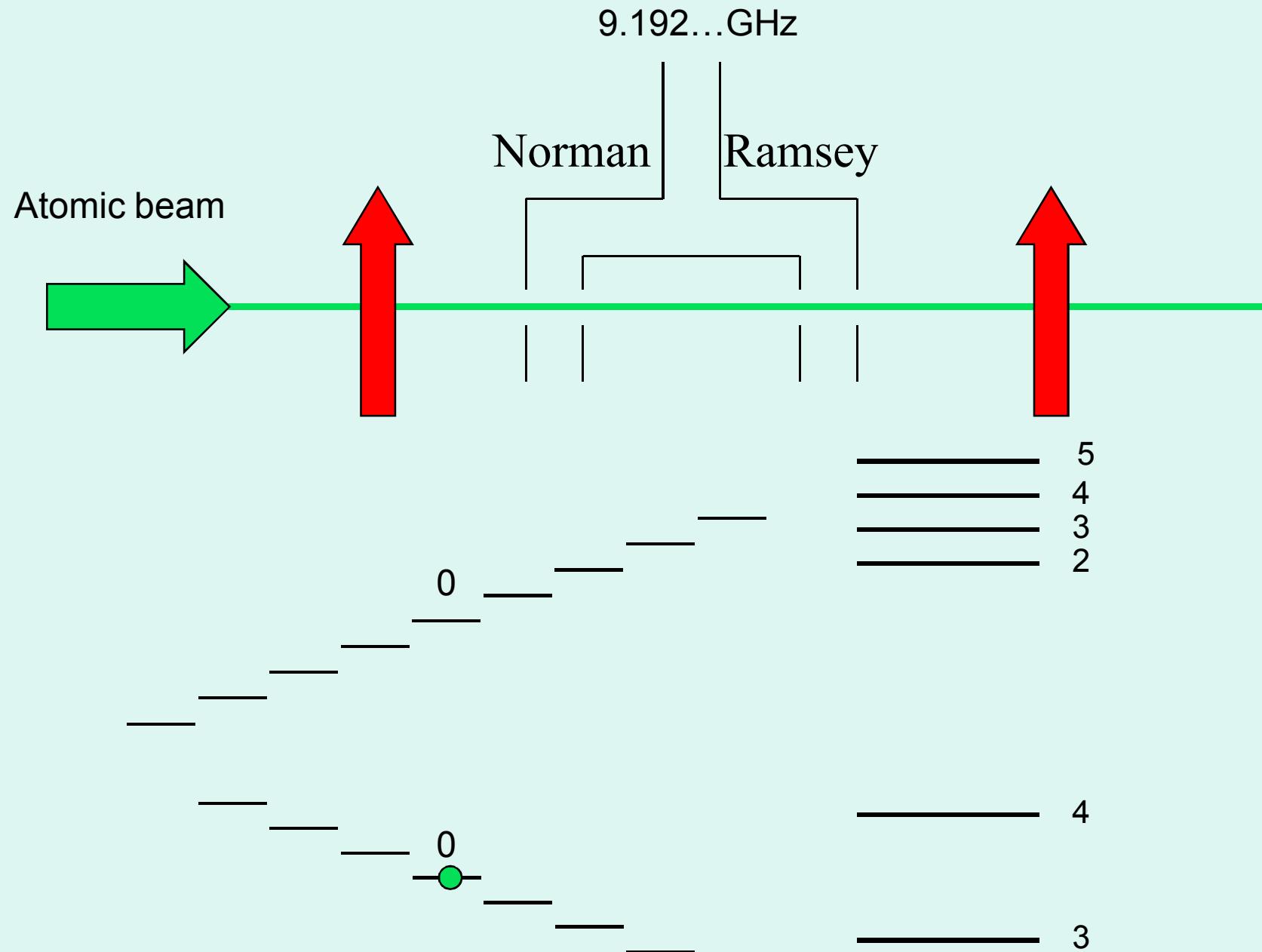
- 1. Introduction: lasers and microwave frequency standards**
- 2. Motivation: long-term stability (quartz vs atomic clocks)**
- 4. Coherent Population Trapping**
- 5. Bichromatic radiation**
- 6. Small cells**
- 7. Problems and possible solutions. Problems in Russia**
- 8. First CSACs**
- 9. Applications**
- 10. Summary**

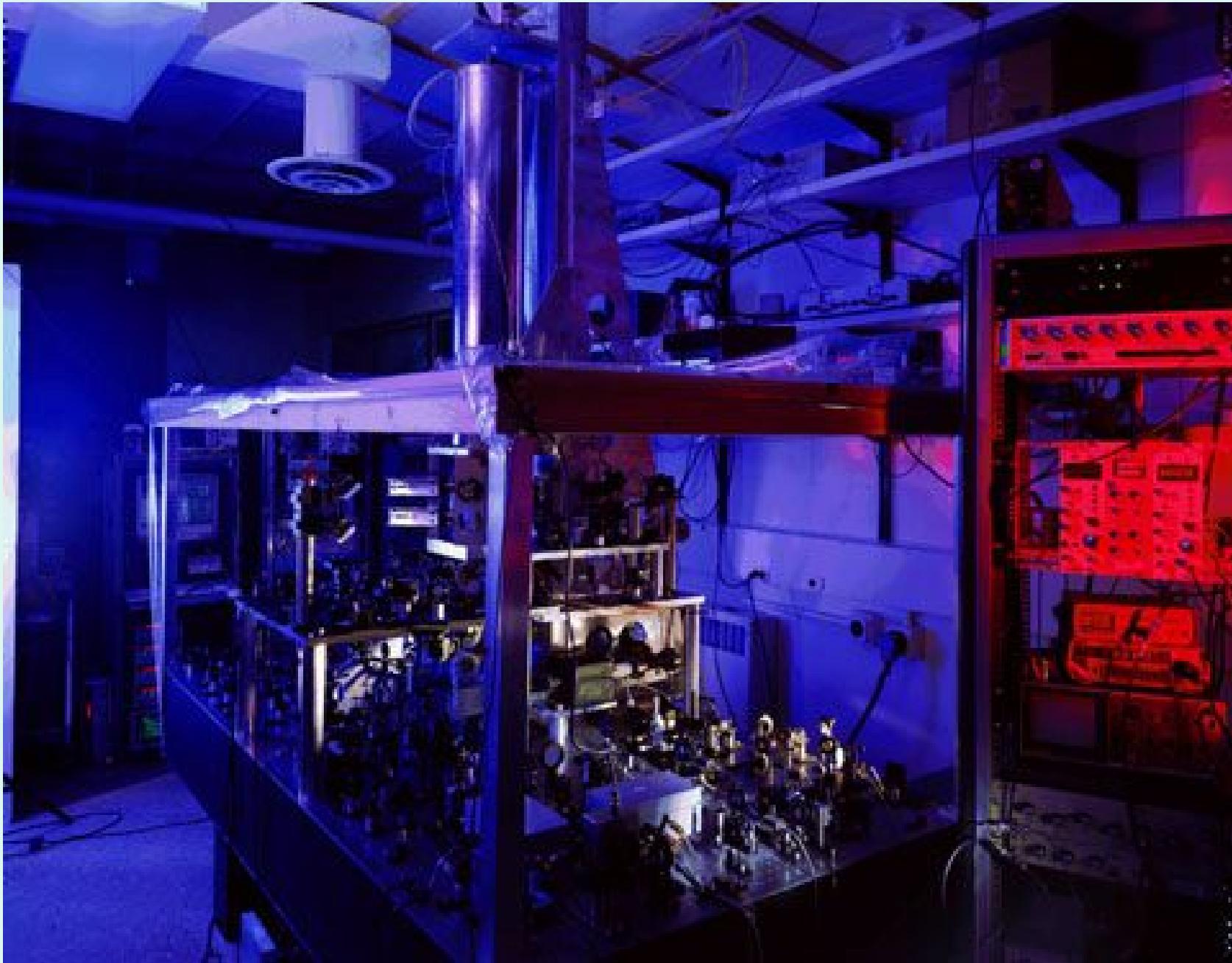


$$\cdot kT / h\nu_{\text{СВЧ}} = 680$$

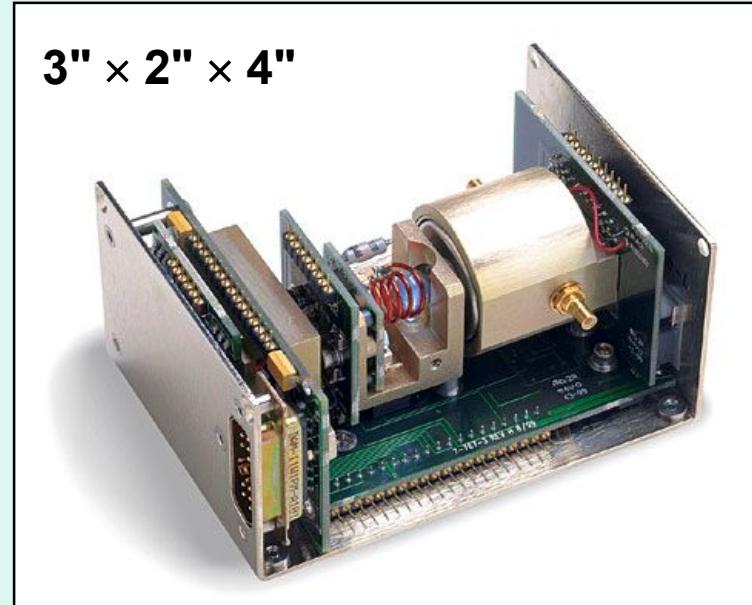
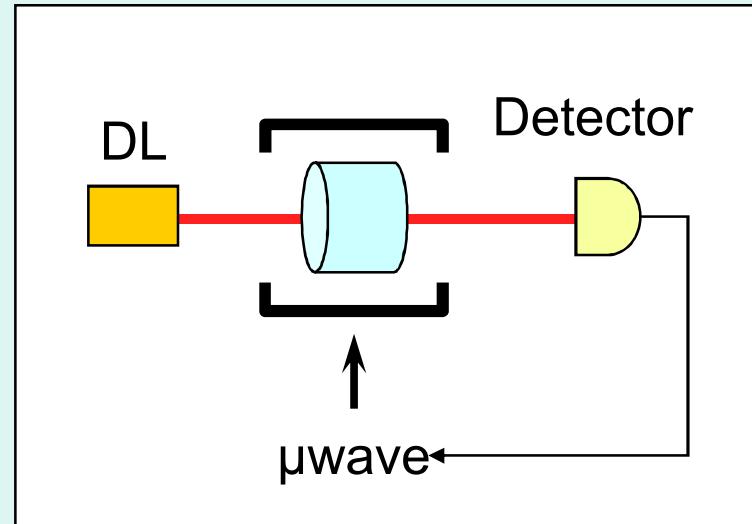
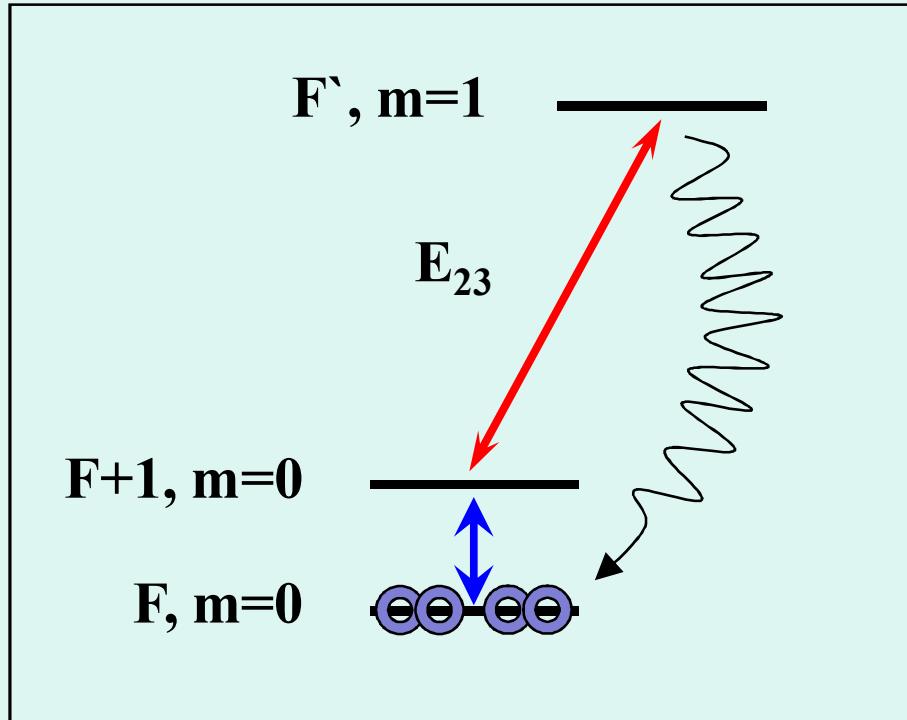








# Atomic clocks with optical pumping



## Drawback:

Microwave cavity does not allow to decrease further dimensions

## **High precision quartz clocks**

Volume	> 50 cm <sup>3</sup>
Power consumption	≈ 3 W
Stability per hour	10 <sup>-10</sup>

## **Atomic (CPT)clocks (*DARPA*)**

Volume	> 1 cm <sup>3</sup>
Power consumption	≈ 30 mW
Stability per hour	10 <sup>-11</sup>

**IS IT POSSIBLE TO EXCLUDE THE MICROWAVE CAVITY?**

**(To throw it away?!)**

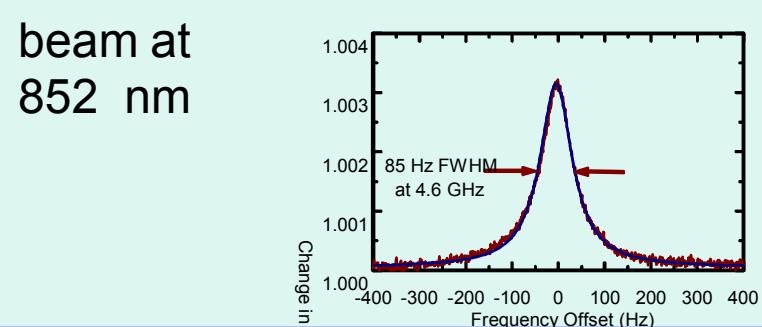
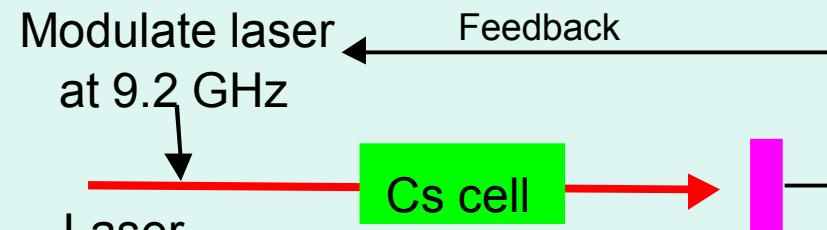
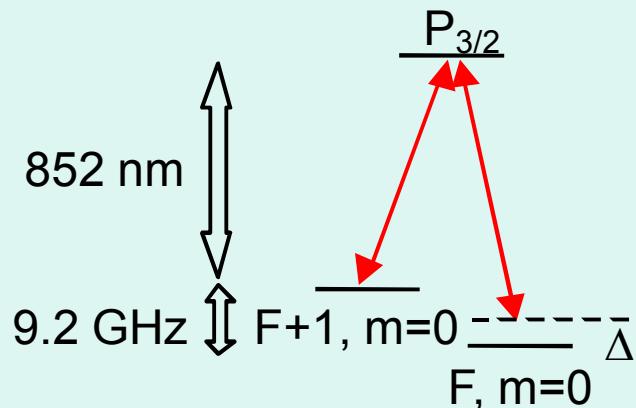
**CAN LASERS HELP TO SOLVE THIS PROBLEM?**

# All-Optical CPT Excitation

( Arimondo '76; Ezekiel, early '80's; Velichansky '91; Hemmer '93; Cyr '93; Vanier '98; etc.)

## All-optical atomic clock:

- Resonance is excited using two coherent optical fields:  
 $\Delta f = 9.2 \text{ GHz}$ ; uses non-linear optical properties of the atoms
- As the difference frequency is scanned over the atomic resonance, the light absorption changes

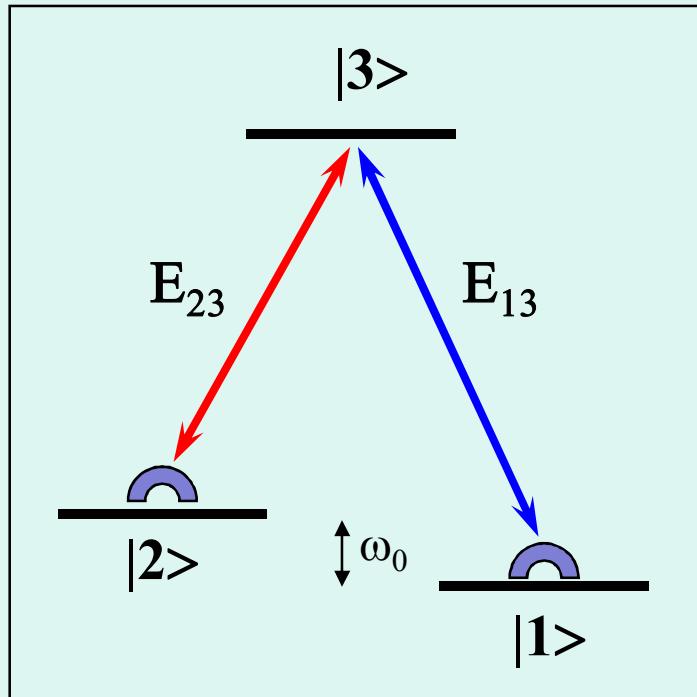


Time and Frequency Division, Magnetic Technology Division

Physics  
University of Colorado at Boulder

# Coherent Population Trapping (CPT)

$\Lambda$  - scheme



CPT is observed when:

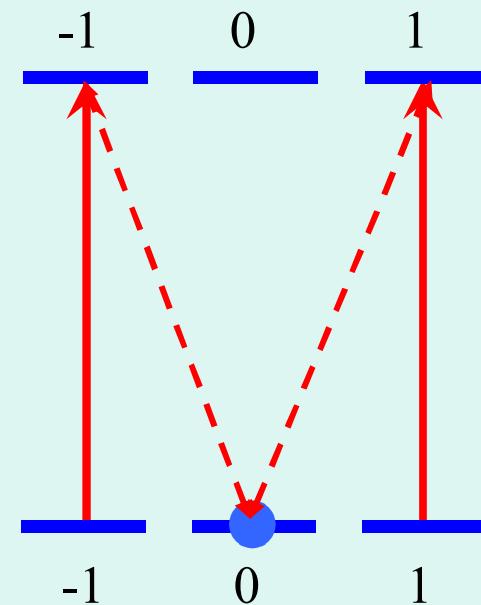
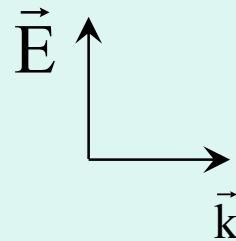
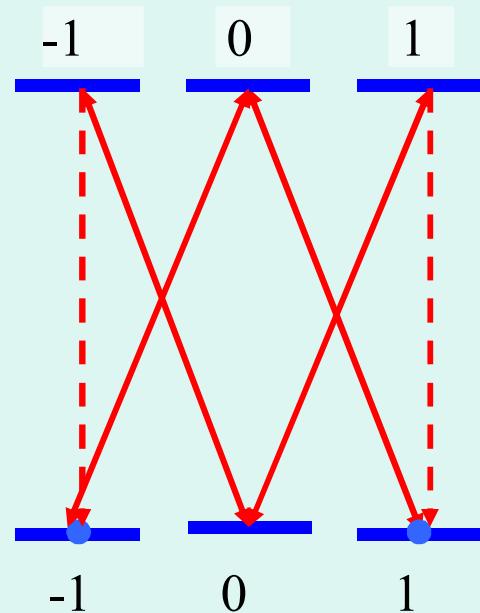
1. Two fields are phase correlated.
2. At the two photon resonance:

$$\omega_{23} - \omega_{13} = \omega_0 = (E_{F_2m} - E_{F_1m})/\hbar$$

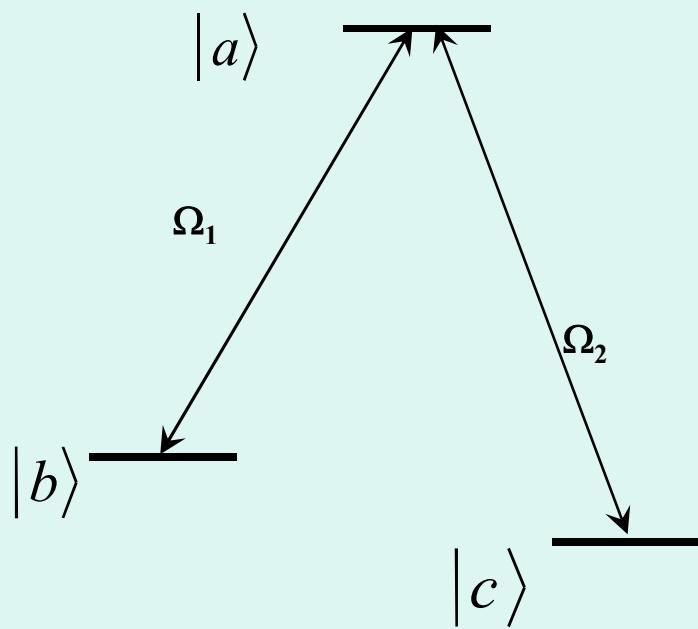
**Alzetta, G., Gozzini, A., Moi, L., Orriols, G.,**  
Nuovo Cimento B, 36B/2, No.1, 1976

Обзоры по КПН:

- Агапьев Б.Д., Горный М.Б., et al УФН, Том 163, 1993.
- Arimondo E., Progress in Optics, V. 35, 1996.
- Fleischhauer M., Imamoglu A., and Marangos J. P., Rev.Mod.Phys. 77, 2005.



Quantization Axis



$$i\hbar|\dot{\Psi}(t)\rangle = \hat{H}|\Psi(t)\rangle$$

$$\hat{H}=-(\hbar/2)\{\Omega_1(|a\rangle\langle b|+|b\rangle\langle a|)+\Omega_2(|a\rangle\langle c|+|c\rangle\langle a|)\}$$

$$\Omega_i=d_iE_i/\hbar$$

$$|\Psi(t)\rangle=c_a(t)|a\rangle+c_b(t)|b\rangle+c_c(t)|c\rangle$$

$$\dot{c}_a=i(\Omega_1c_b+\Omega_2c_c)/2$$

$$\dot{c}_b=i\Omega_1c_a/2$$

$$\dot{c}_c=i\Omega_2c_a/2$$

$$|\Psi(0)\rangle=\frac{\Omega_2|b\rangle-\Omega_1|c\rangle}{\sqrt{\Omega_1^2+\Omega_2^2}}=c_b(0)|b\rangle+c_c(0)|c\rangle=|\Psi(t)\rangle=|-\rangle$$

$$\Omega_1c_b=\Omega_2c_c$$

	$c_a a\rangle$	$c_b b\rangle$	$c_c c\rangle$
$\Omega_1 a\rangle\langle b $	0	$\Omega_1c_b a\rangle$	0
$\Omega_1 b\rangle\langle a $	$\Omega_1c_a b\rangle$	0	0
$\Omega_2 a\rangle\langle c $	0	0	$\Omega_2c_c a\rangle$
$\Omega_2 c\rangle\langle a $	$\Omega_2c_a c\rangle$	0	0

$$i\hbar(\dot{c}_a|a\rangle+\dot{c}_b|b\rangle+\dot{c}_c|c\rangle)=-\frac{\hbar}{2}\big[(\Omega_1c_b+\Omega_2c_c)|a\rangle+\Omega_1c_a|b\rangle+\Omega_2c_a|c\rangle\big]$$

$$\dot{c}_a|a\rangle+\dot{c}_b|b\rangle+\dot{c}_c|c\rangle=\frac{i}{2}\big[(\Omega_1c_b+\Omega_2c_c)|a\rangle+\Omega_1c_a|b\rangle+\Omega_2c_a|c\rangle\big]$$

$$i\hbar \left| \dot{\Psi}(t) \right\rangle = \hat{H} \left| \Psi(t) \right\rangle$$

$$\hat{H}=-(\hbar/2)\{\Omega_1(\left|a\right\rangle\langle b\right|+\left|b\right\rangle\langle a\right|)+\Omega_2(\left|a\right\rangle\langle c\right|+\left|c\right\rangle\langle a\right|)\}$$

$$\Omega_i=d_iE_i/\hbar$$

$$\left|\Psi(t)\right\rangle=c_a(t)\left|a\right\rangle+c_b(t)\left|b\right\rangle+c_c(t)\left|c\right\rangle$$

$$\dot{c}_a=i(\Omega_1c_b+\Omega_2c_c)/2$$

$$\dot{c}_b=i\Omega_1c_a/2$$

$$\dot{c}_a=i\Omega_2c_a/2$$

$$c_a(0)=0$$

$$c_b(0)=\Omega_2/\sqrt{\Omega_1^2+\Omega_2^2}$$

$$c_c(0)=-\Omega_1/\sqrt{\Omega_1^2+\Omega_2^2}$$

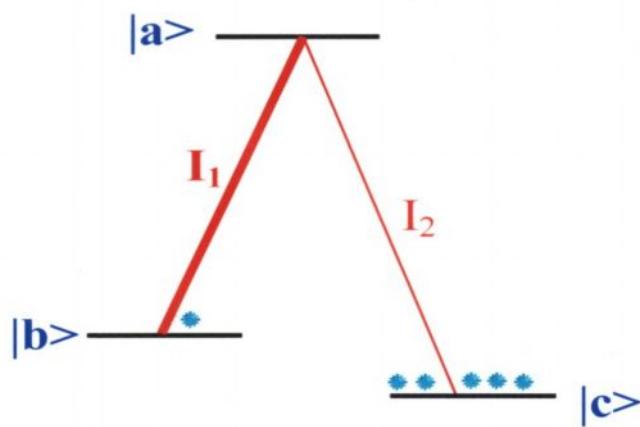
$$\left|\Psi(0)\right\rangle=\frac{\Omega_2\left|b\right\rangle-\Omega_1\left|c\right\rangle}{\sqrt{\Omega_1^2+\Omega_2^2}}=c_b(0)\left|b\right\rangle+c_c(0)\left|c\right\rangle=\left|\Psi(t)\right\rangle=\left|-\right\rangle$$

$$\Omega_1c_b=\Omega_2c_c$$

$$|\psi(t)\rangle = \frac{\Omega_2}{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}} |b\rangle - \frac{\Omega_1}{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}} |c\rangle \exp[i\phi(t)]$$

$$\phi(t) = (k_2 - k_1)z - (\omega_2 - \omega_1)t$$

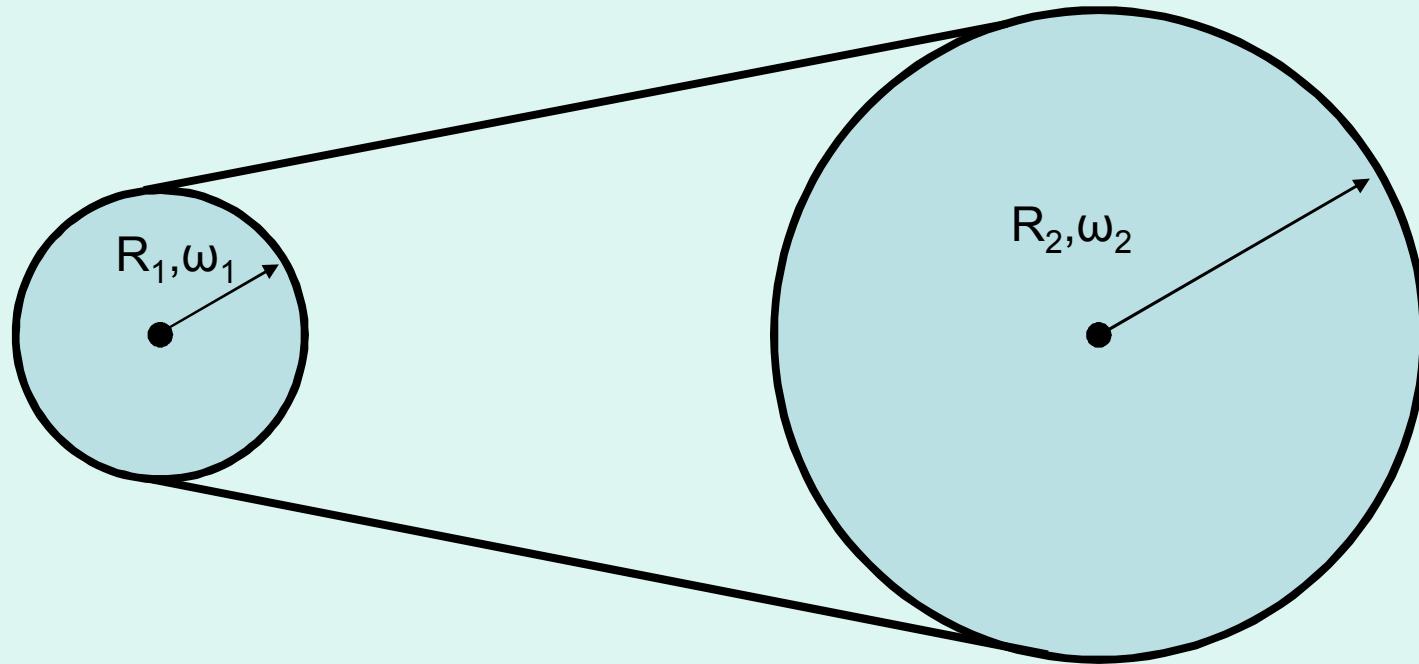
$$\Omega_1 C_b = \Omega_2 C_c \rightarrow \frac{|C_b|^2}{|C_c|^2} = \frac{|\Omega_2|^2}{|\Omega_1|^2} = \frac{E_2^2}{E_1^2} = \frac{I_2}{I_1}$$



# DETECTION OF CPT RESONANCE

- Peak in transmission
- Dip in fluorescence (contrast is higher,  
*signal is smaller*)
- Absorption in separated fields (CPT+  
*Norman Ramsey*)
- Absorption in pulsed fields
- Maser (*stimulated microwave emission*)

*J. Vanier, Appl. Phys. B 81, 421-442 (2005)*



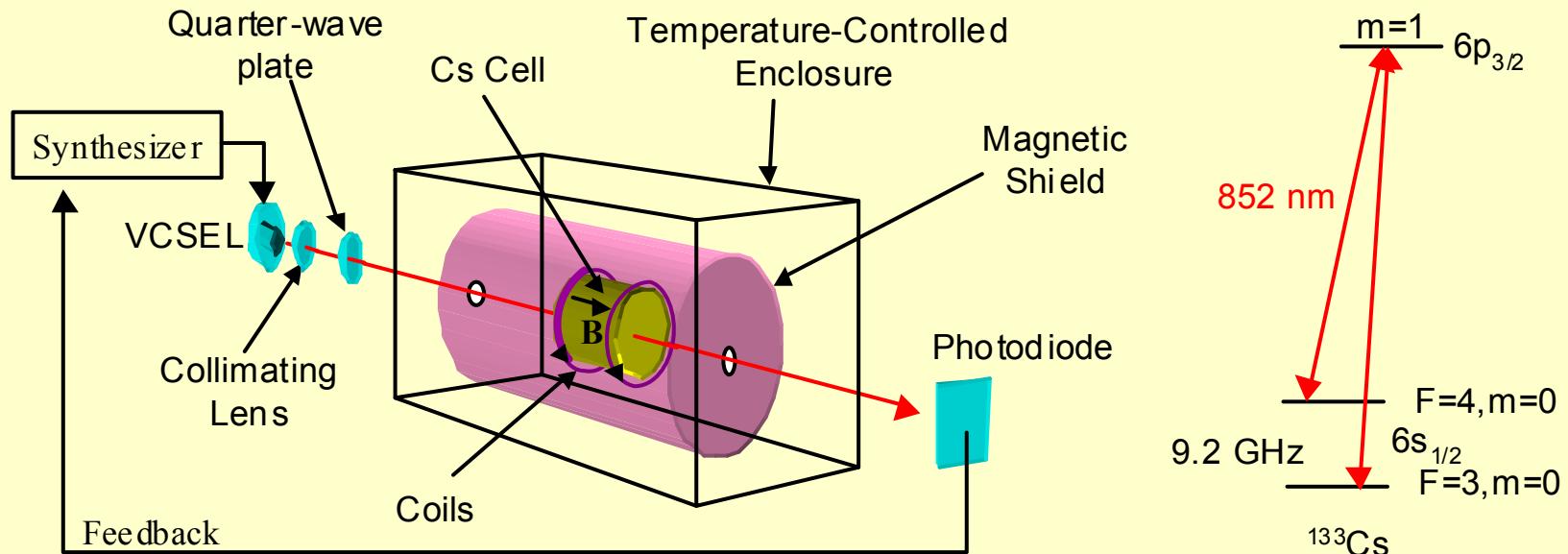
$$\omega_2 = (R_1/R_2) \cdot \omega_1$$

Decorrelation of phase noises is more dangerous than the noises itself. The linewidth of the components is not important if it is smaller than HF splitting.

## **PRODUCING BICHROMATIC RADIATION**

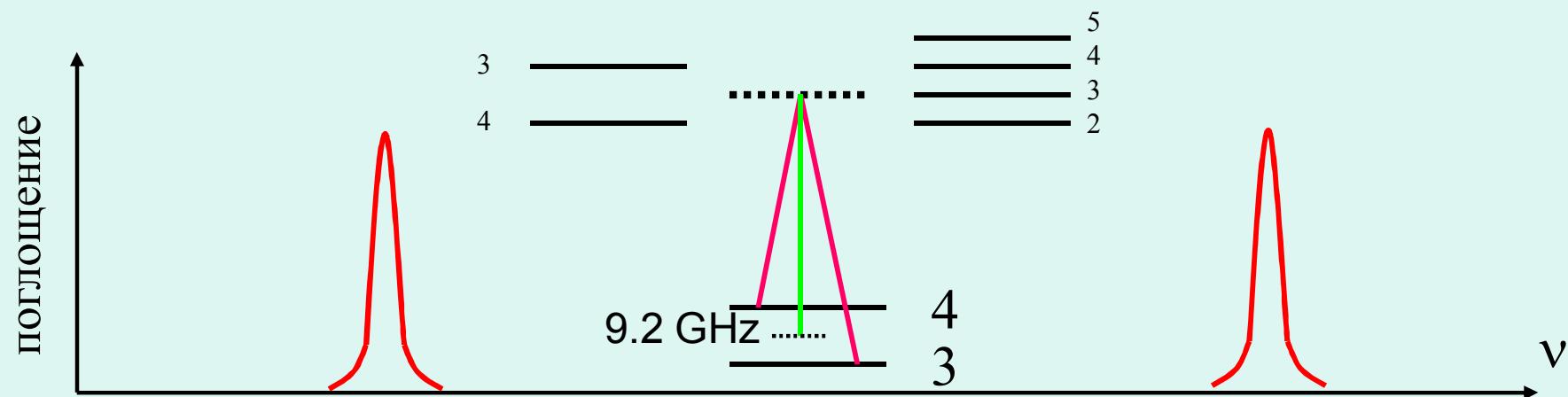
- 1) Two phase-locked lasers
- 2) Independent phase-locking of two lasers to harmonics of comb oscillator
- 3) Modulation of laser radiation with EOM;
- 4) Two longitudinal modes of the same laser
- 5) Direct  $\mu$ wave current (and FM) modulation of a DL
- 6) Single mode master DL, and an injection locked DL with modulation of the pumping current;
- 7) Two independent DL with a phase shifted current modulation
- 8) Two independent highly coherent ECDLs

# CPT Clock: Implementation

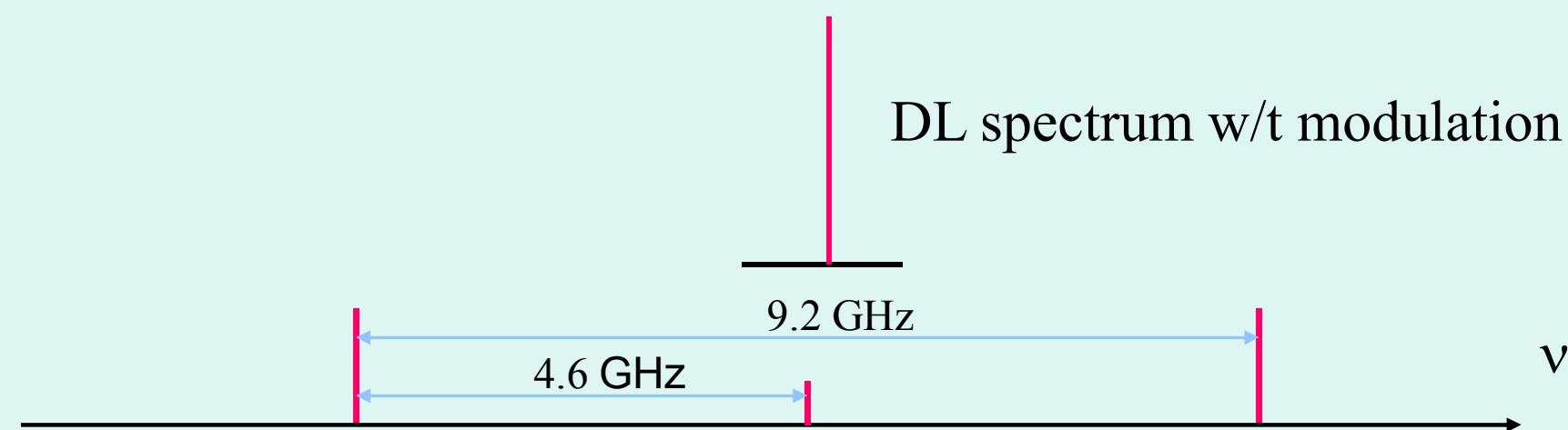


- Cell contains Cs at its vapor pressure and 60 Torr Ne buffer gas
- Laser modulated at 4.6 GHz which creates 1<sup>st</sup> order sidebands spaced by 9.2 GHz

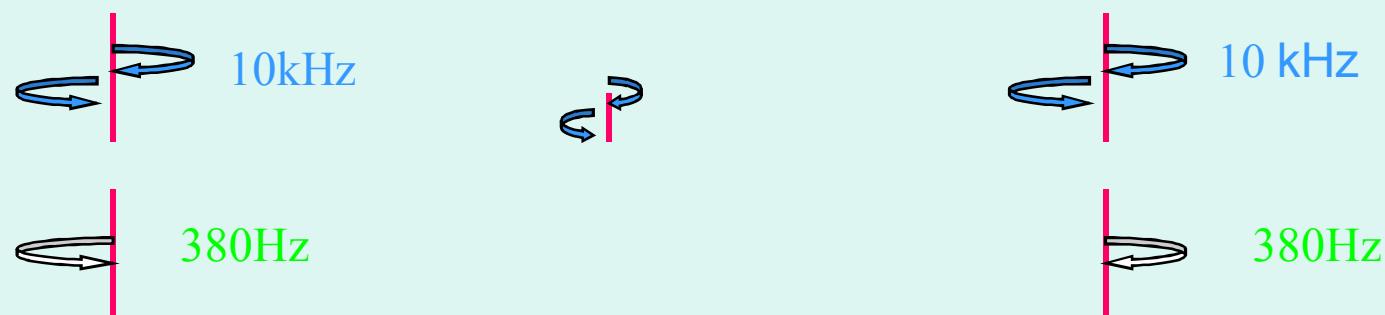
**Could be compact, of low power (<<100 mW) and easily aligned**



DL spectrum w/t modulation



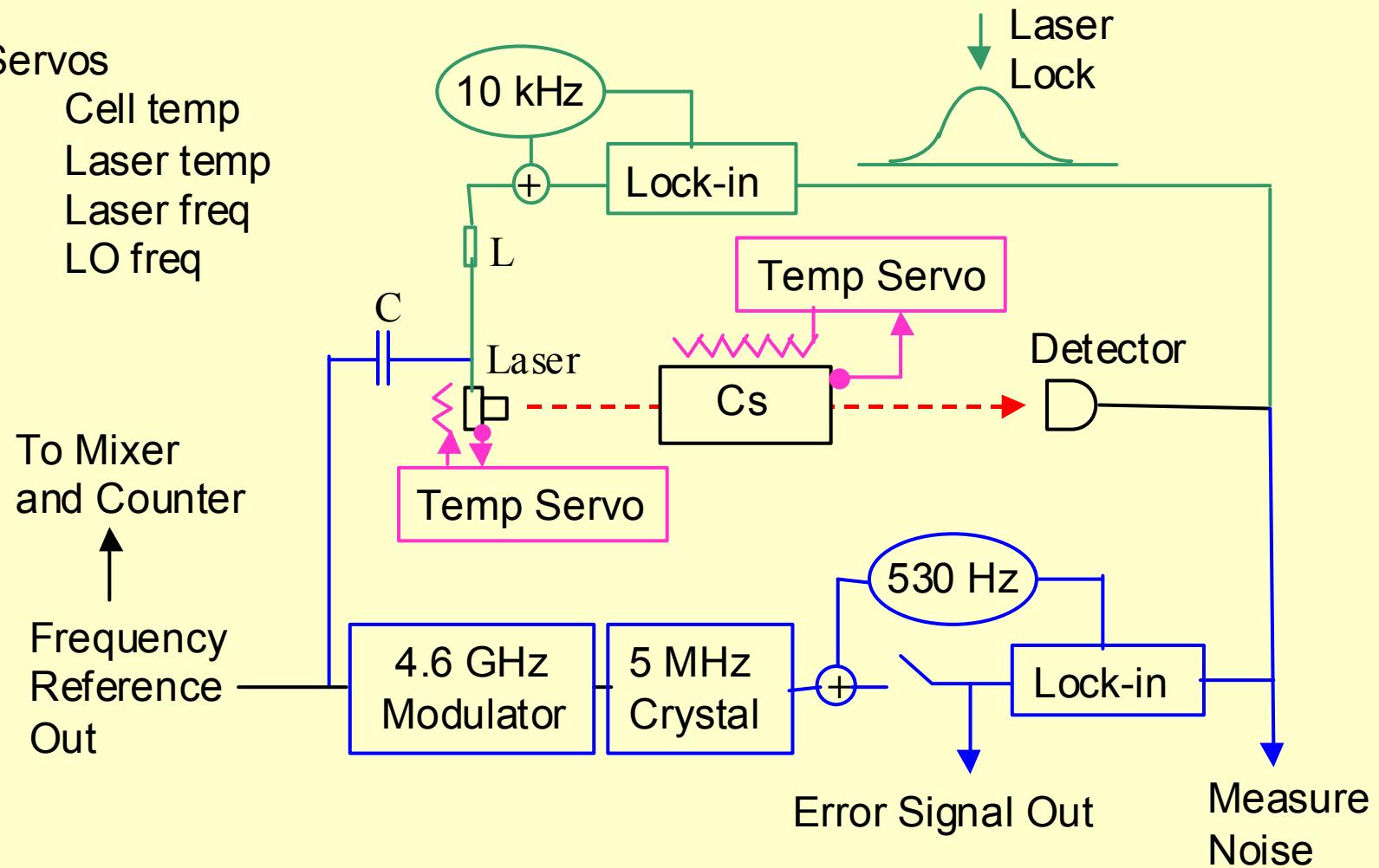
DL spectrum w/ FM modulation



# Electronics, Servos and Measurement

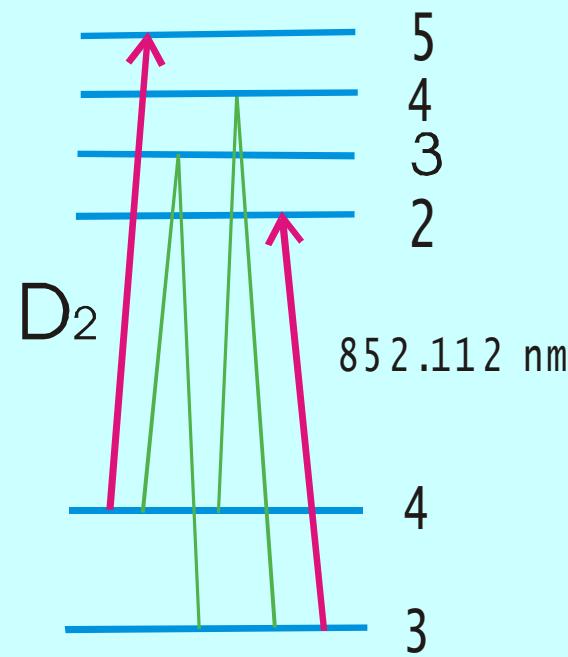
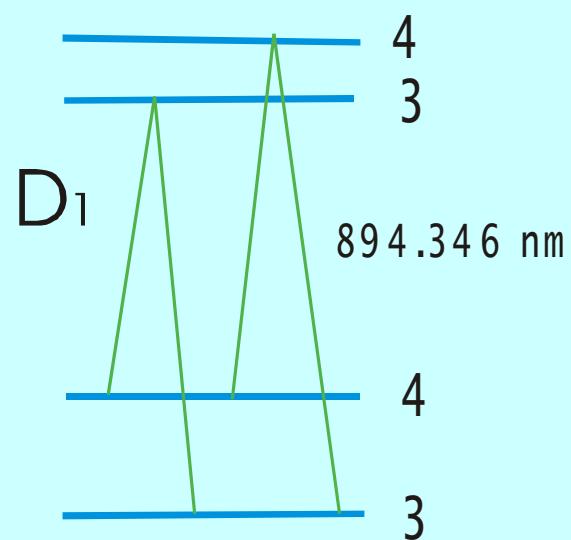
## Servos

- Cell temp
- Laser temp
- Laser freq
- LO freq



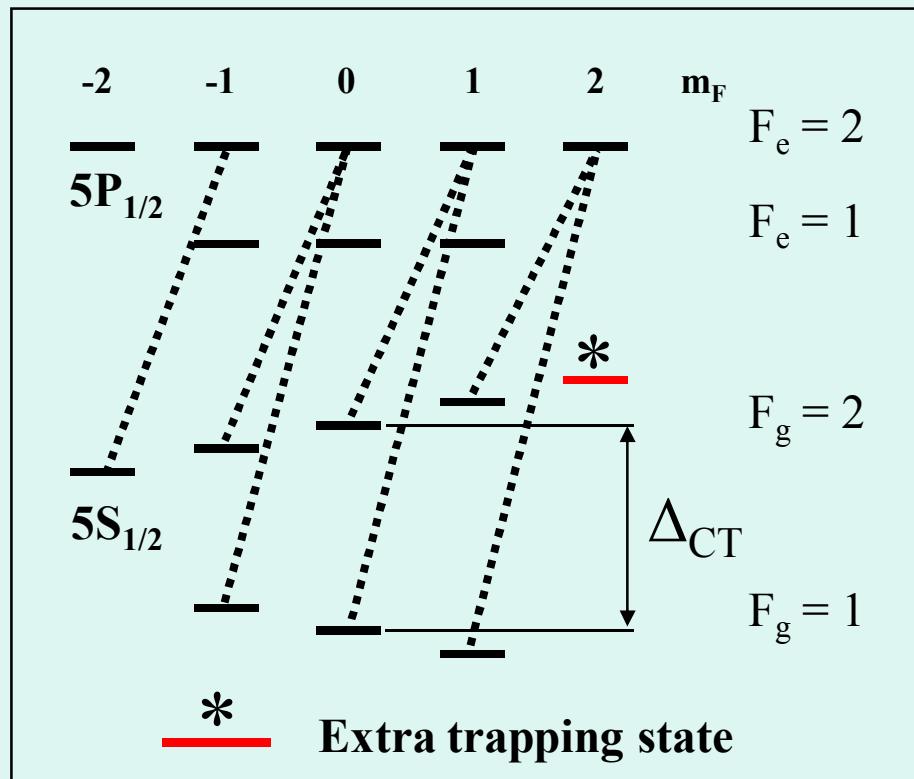
Cycling transitions destroy coherence.

$D_1$  is better than  $D_2$



## Traditional scheme of observation the CPT-resonance

D<sub>1</sub> line of <sup>87</sup>Rb



Bichromatic field in  $\sigma-\sigma$  case:  
 $\Delta m=1$  for optical transitions

Atomic clocks utilize  $m=0 \rightarrow m=0$   
microwave transition

The DRAWBACK: extra trapping  
state

Looking for alternative schemes:

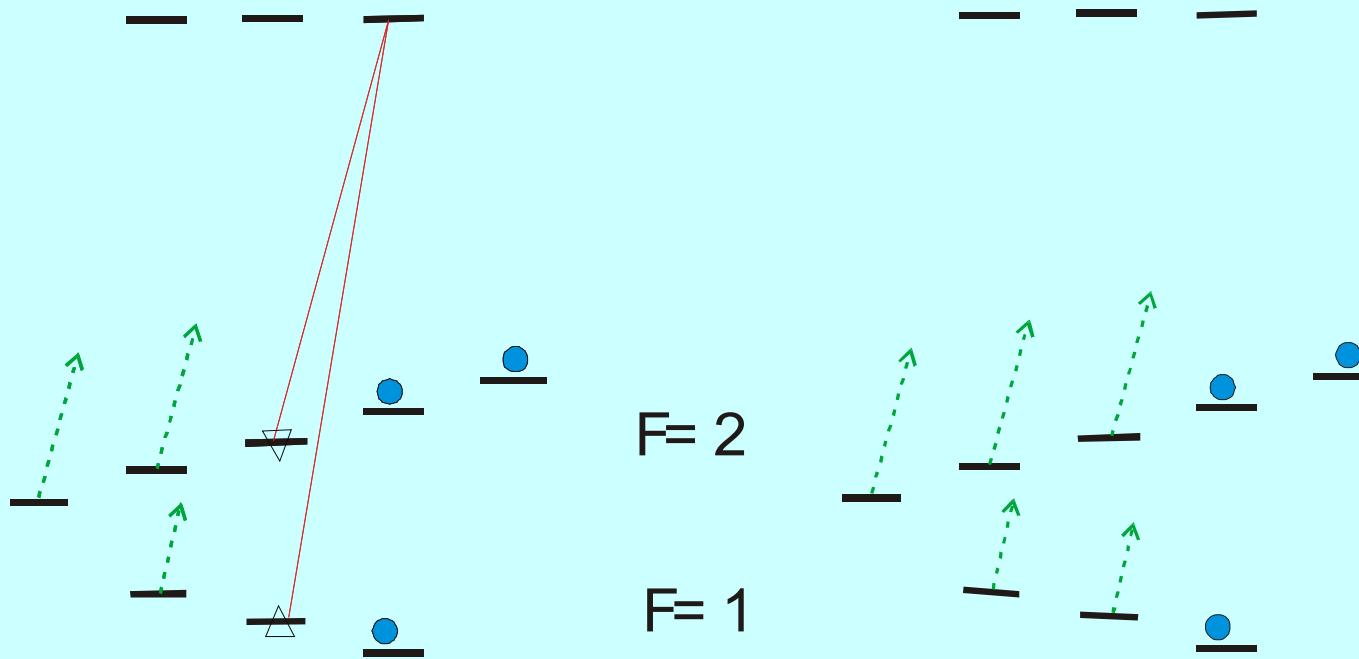
1. Y.-Y. Jau, E. Miron et al., Phys. Rev. Lett., 93, 16 (2004).
2. S.V. Kargapol'tcev et al., JETP Letters, Vol. 80, No. 4 (2004).
3. S. Zibrov, I. Novikova et al., Phys. Rev. A 72, 011801R (2005).
4. T. Zanon, S. Guerandel et al., Phys. Rev. Lett. 94, 193002 (2005).

$\sigma$ - $\sigma$  case: dark states are present both

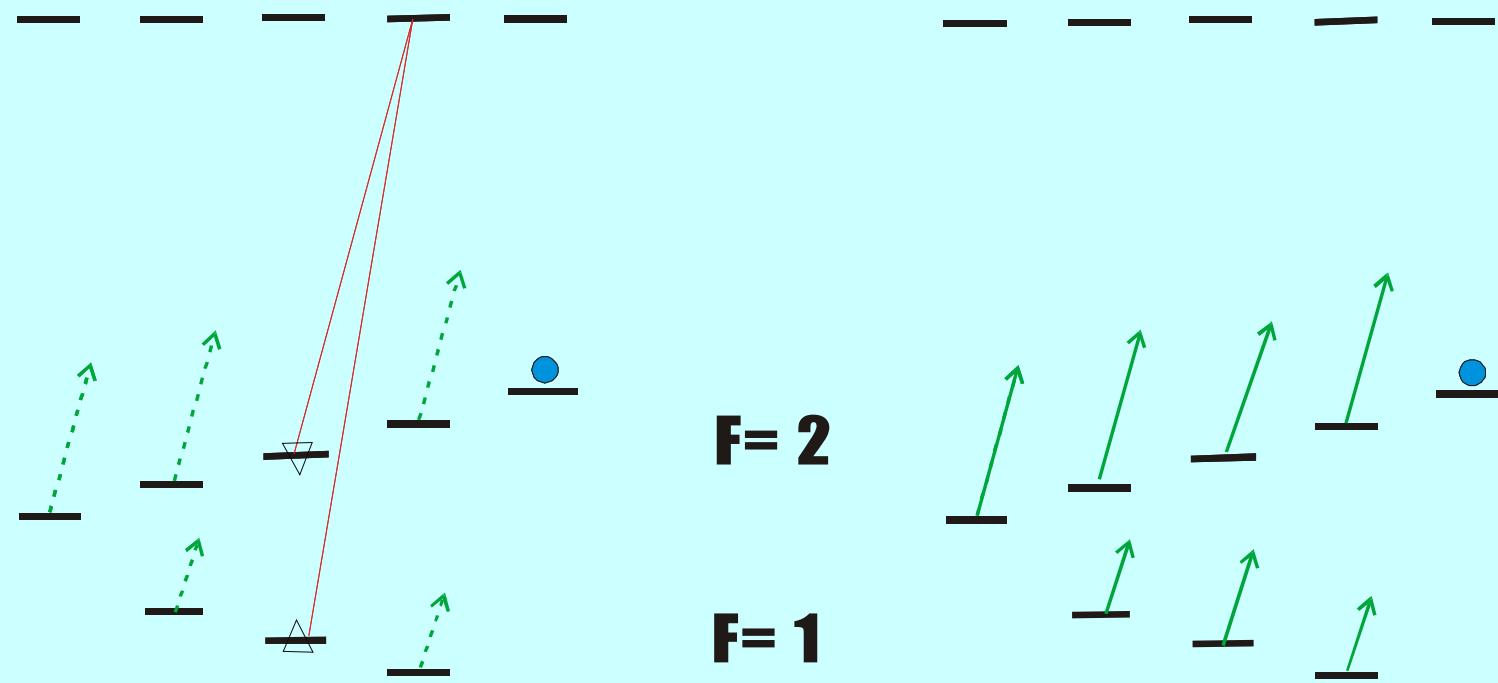
in resonance

and

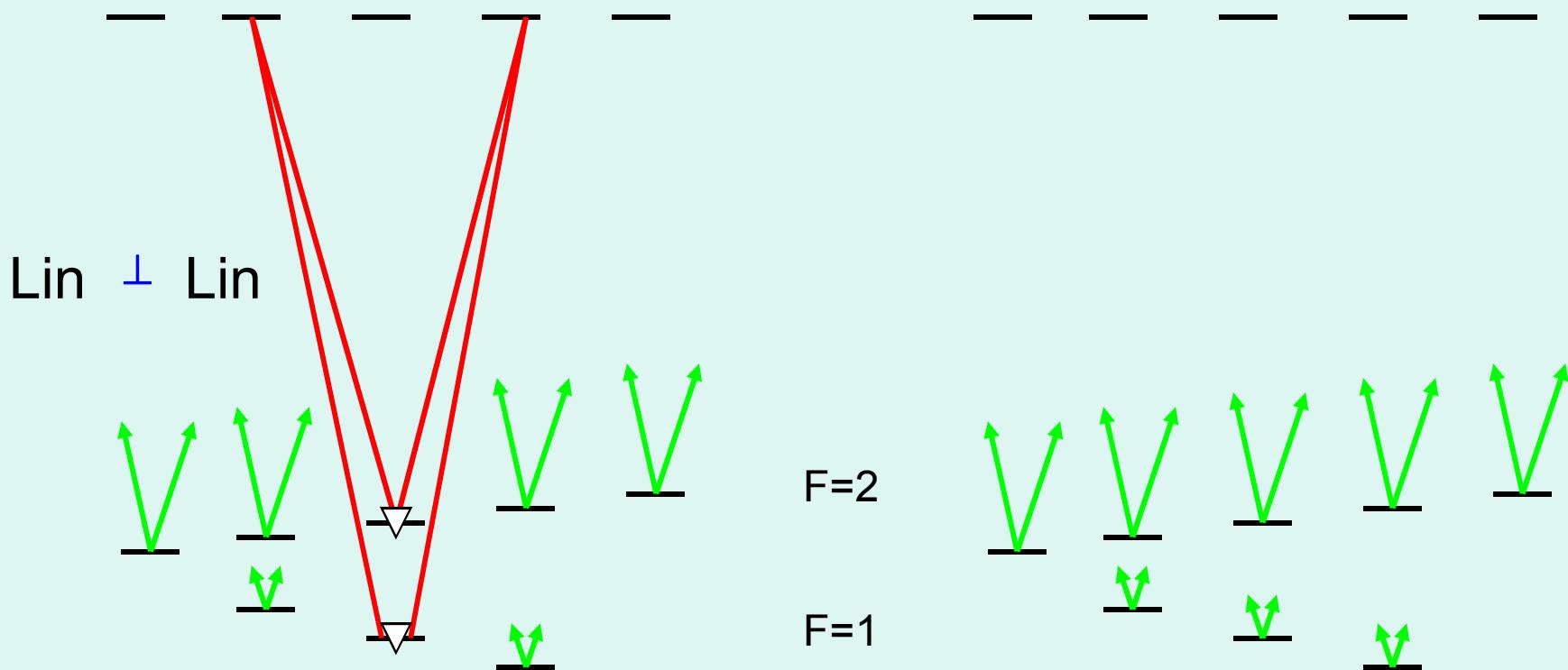
out of resonance

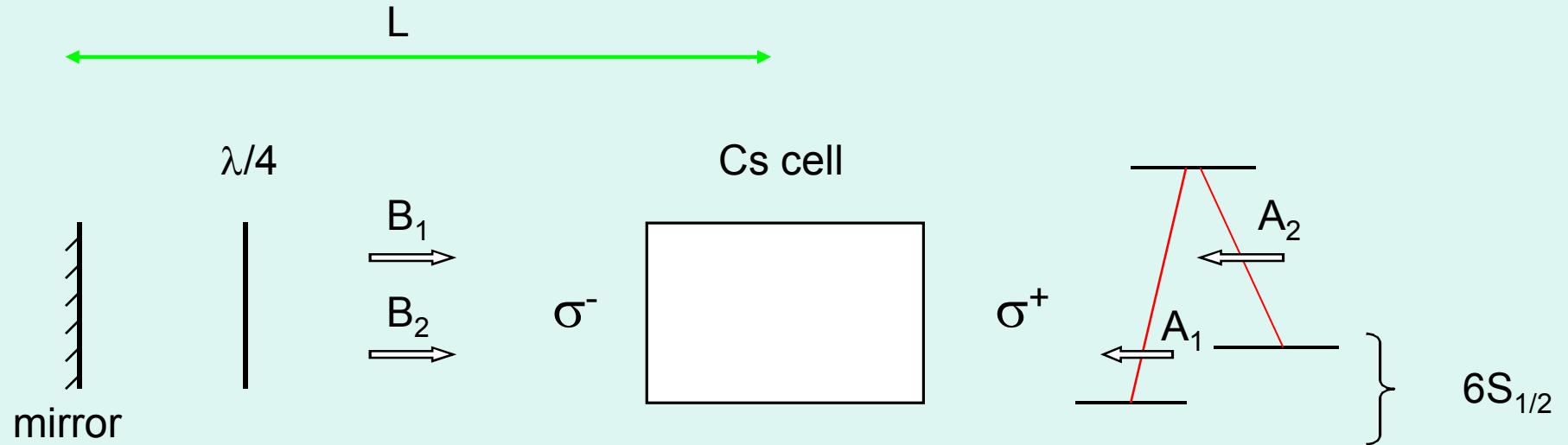


$\sigma$ - $\sigma$  case: dark states are present both in resonance and out of resonance



$\text{lin} \perp \text{lin}$ : no dark states out of Raman resonance





$$(B_1/B_2) = -(A_1/A_2)$$

phase incursion:

$$2L(k_1 - k_2) = \pi + 2\pi n$$

Minimum distance to mirror:

$$L_{\min} = \pi / (2|k_1 - k_2|)$$

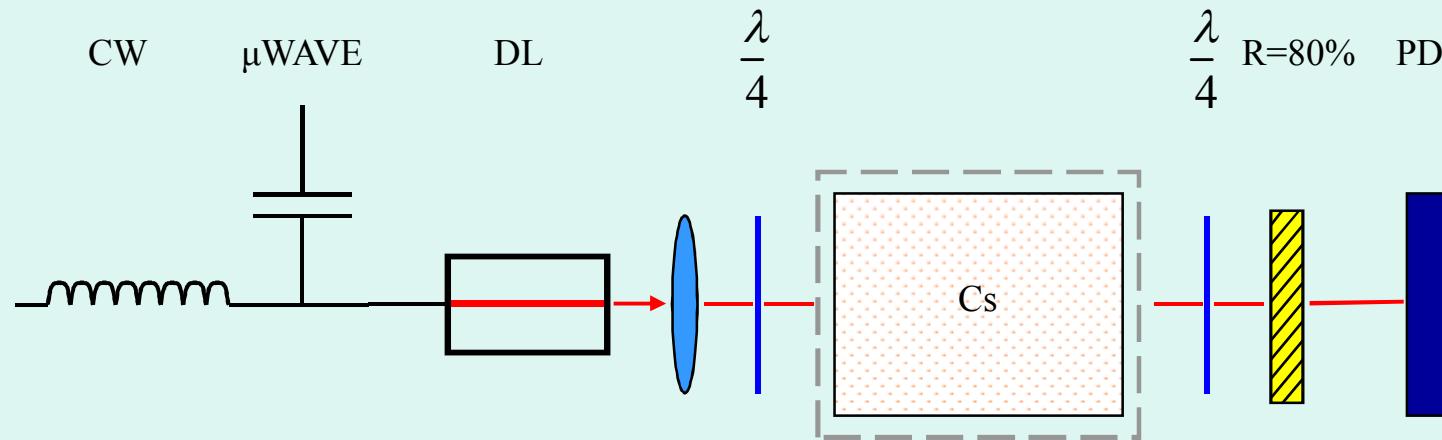
Minimum L for Cs:

$$L_{\min} = 0.8 \text{ cm}$$

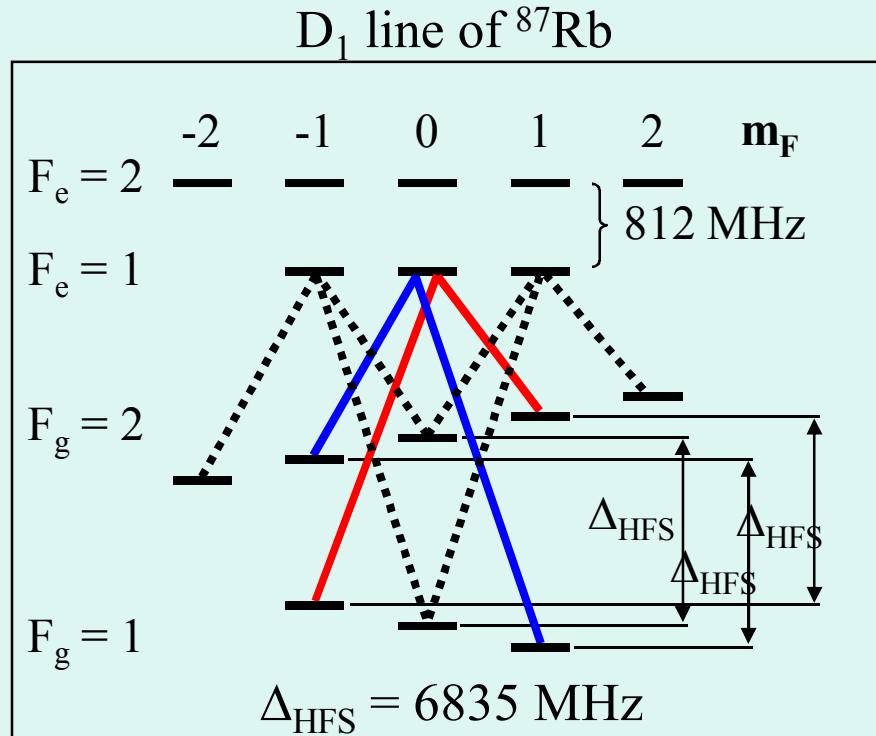
# КВАНТОВЫЙ ДИСКРИМИНАТОР ДЛЯ КПН ЧАСОВ

А.В.Тайченачев, В.И. Юдин, В.Л.Величанский, С.В.Каргапольцев, Р.Винандс, Дж.

Китчинг, Л.Хольберг «Высокооконтрастные темные резонансы на D<sub>1</sub> линии  
щелочных металлов в поле встречных волн» Письма в ЖЭТФ, **80** (2004) 265



# A New Lin || Lin Excitation Scheme

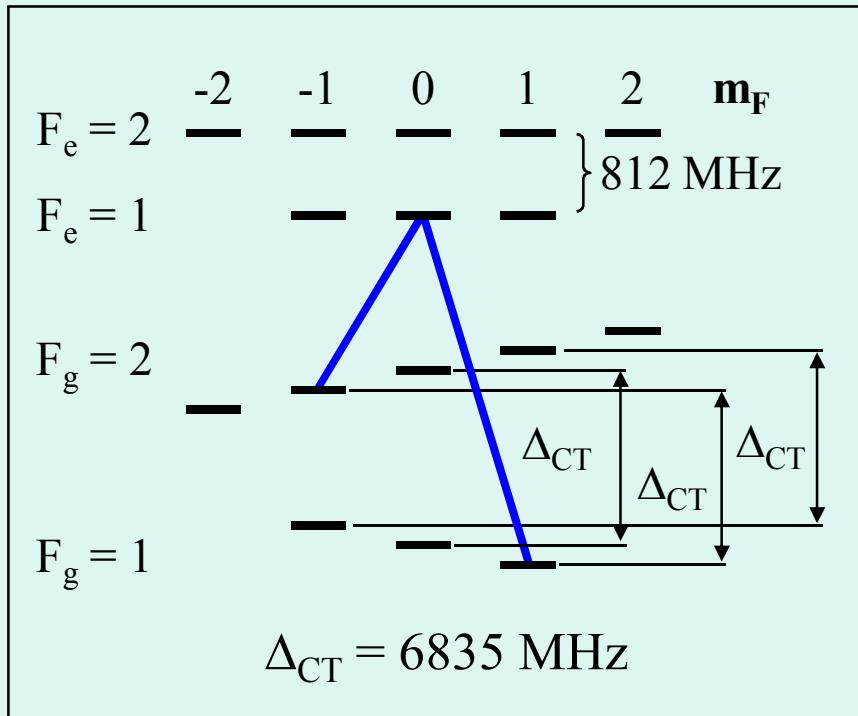


Resonance insensitive to magnetic field is formed by two  $\Lambda$  – systems:  
 $|F_g=1, m_F=+1\rangle - |F_g=2, m_F=-1\rangle$  and  
 $|F_g=1, m_F=-1\rangle - |F_g=2, m_F=+1\rangle$

- Excitation occurs with two linearly polarized light fields tuned to the  $D_1$  line of  $^{87}\text{Rb}$  and separated by 6.835 GHz.
- Only in case of  $F_g = 1$  and 2,  $F_e = 1$  and a condition of good isolation from the other hyperfine state. No trap states!
- Level  $F_e = 2$  is separated from  $F_e = 1$  by 812 MHz and does not contribute to the build up of the ground state coherence.

# Lin||Lin схема

Только для  $D_1^{87}\text{Rb}$



- КПН резонанс формируется двухчастотным лазерным излучением. Линейные поляризации спектральных компонент одинаковы.
- Чистое суперпозиционное состояние образуется на магнитных подуровнях  $F_g = 1, 2$ , при условии что верхние СТ подуровни спектрально разрешены

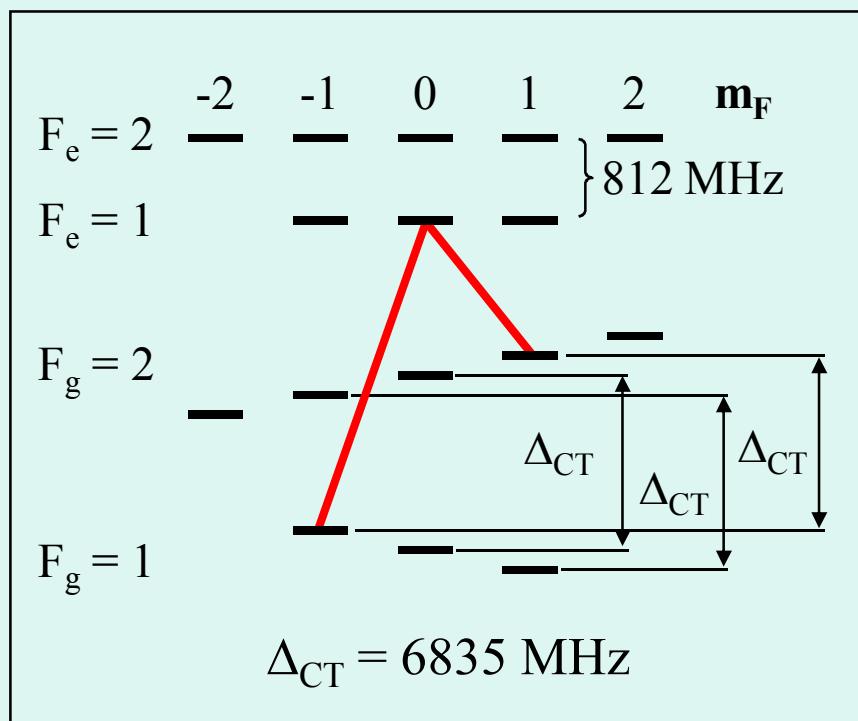
НЕТ ловушек

Две  $\Lambda$  системы:

$|F_g=1, m_F=+1\rangle - |F_g=2, m_F=-1\rangle$  и

## Lin||Lin CXEMA

ТОЛЬКО для D1 линии  $^{87}\text{Rb}$

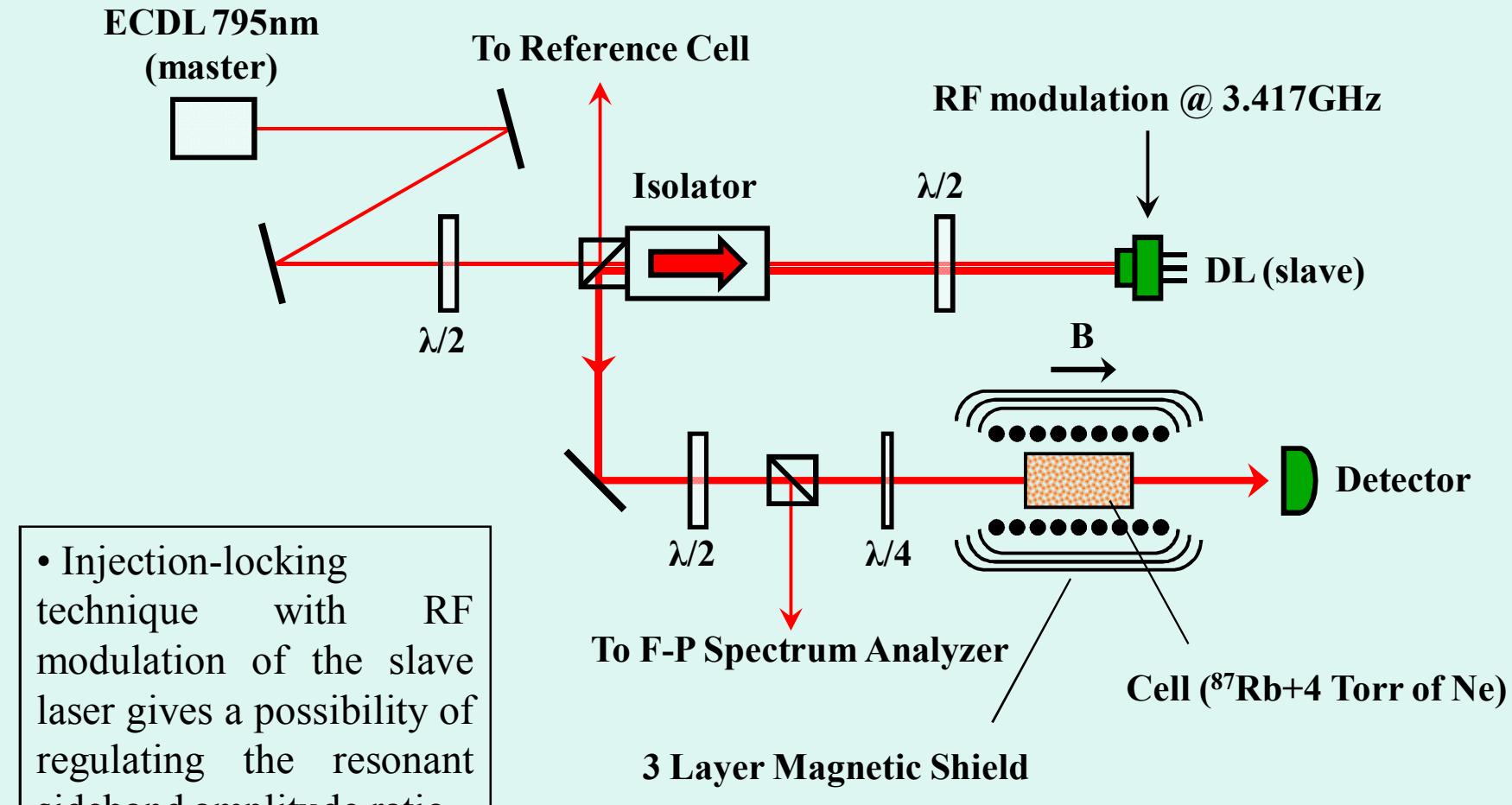


- Слабочувствительно к магнитному полю
- Столкновительное уширение должно быть меньше 812 МГц

НЕТ ЛОВУШЕК

|and  $|F_g=1, m_F=-1\rangle - |F_g=2, m_F=+1\rangle$

# Experimental Setup





**Wavelength  
Linewidth  
Output power**

**795 nm  
< 1 MHz  
10 mW**

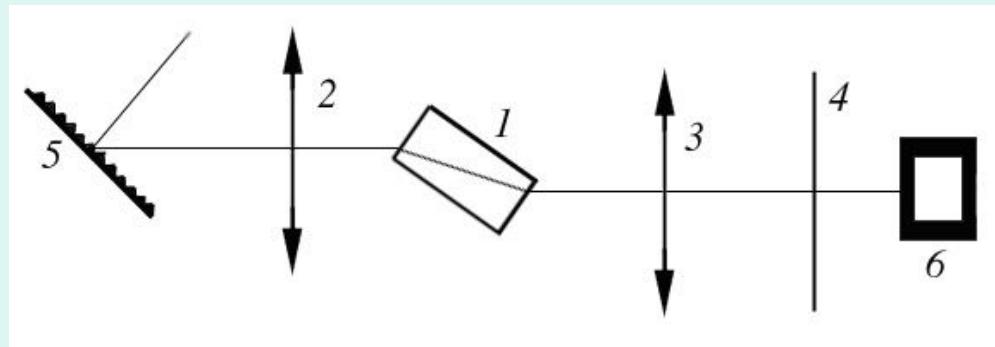
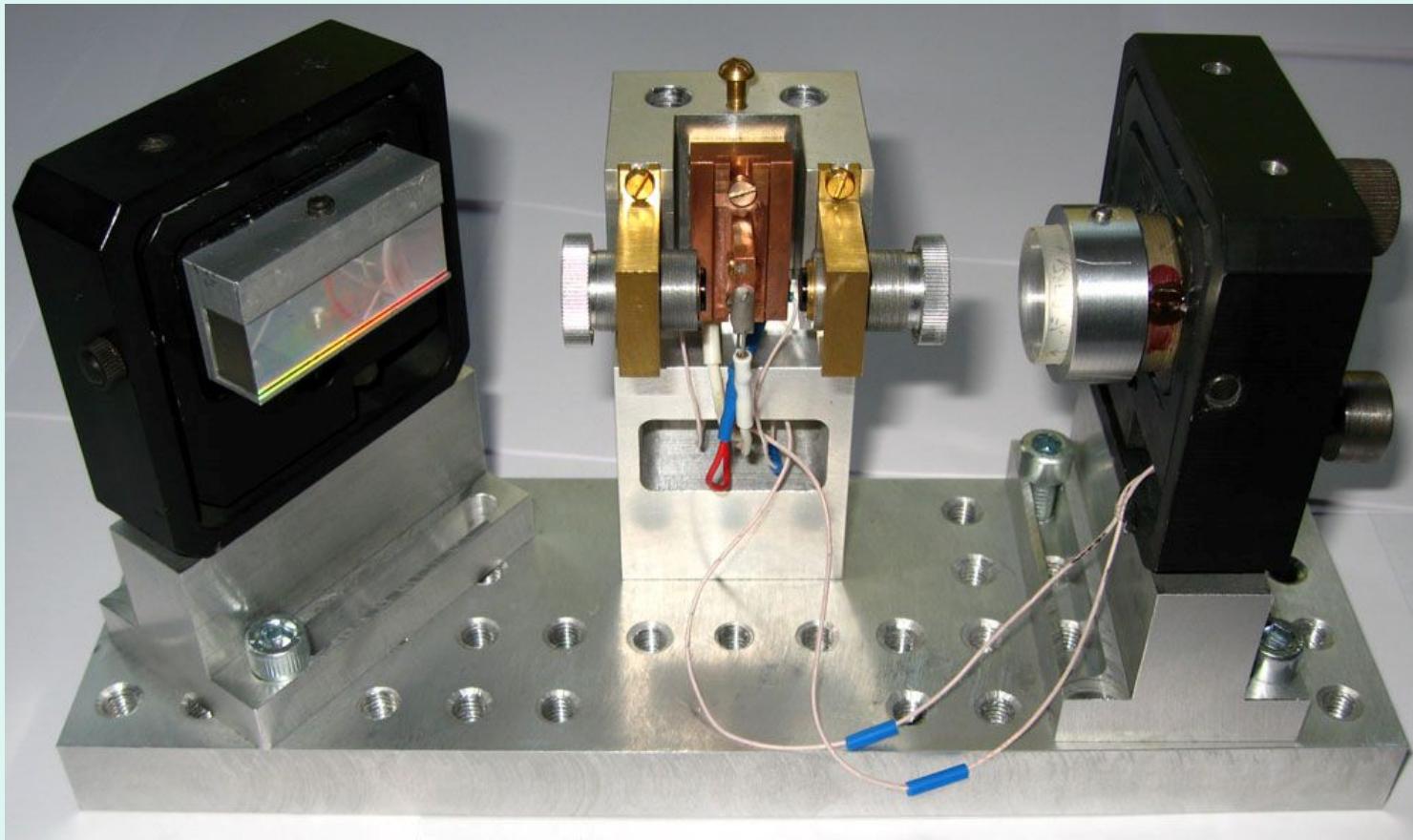
**Continuos tuning range  
with PZT only  
with PZT and current**

**>6 GHz  
>30 GHz**

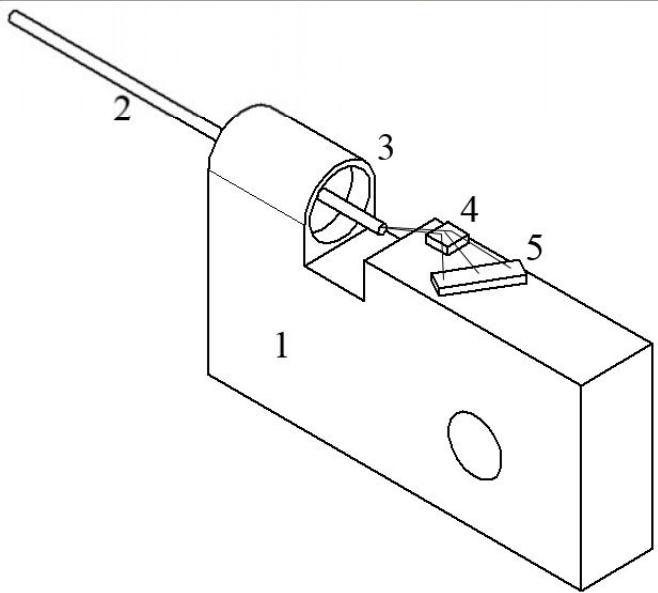
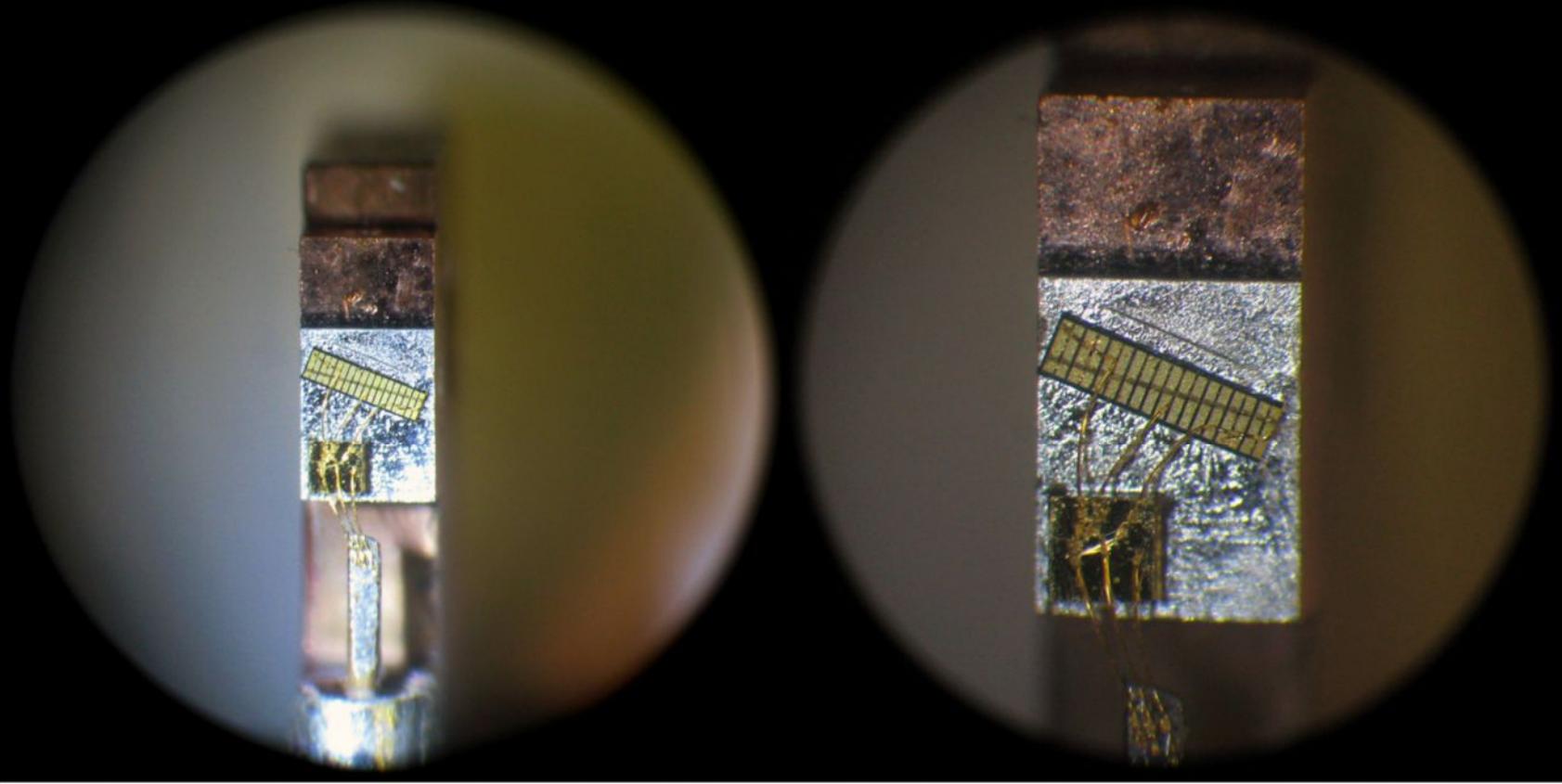
**Coarse tuning range**

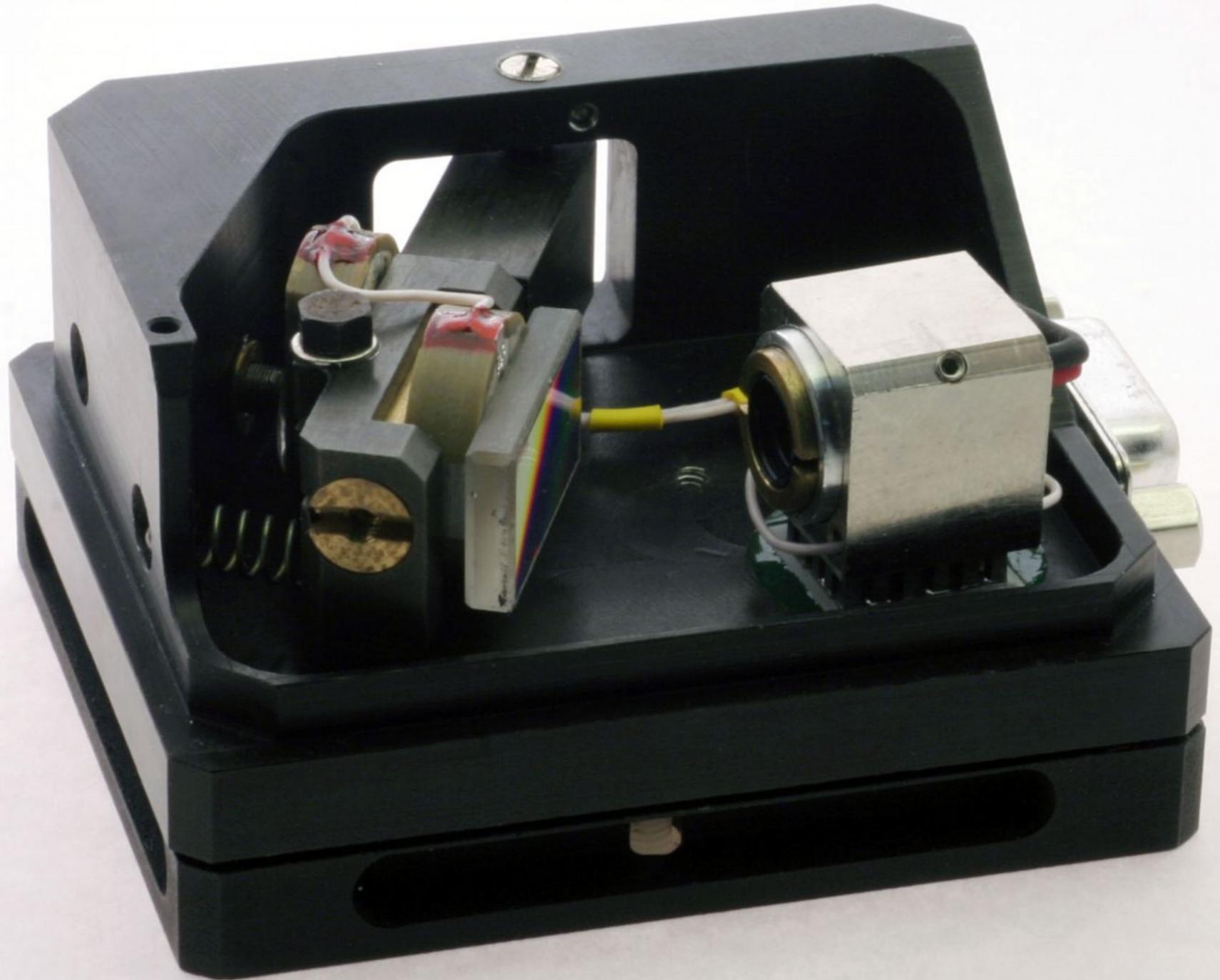
**2nm**

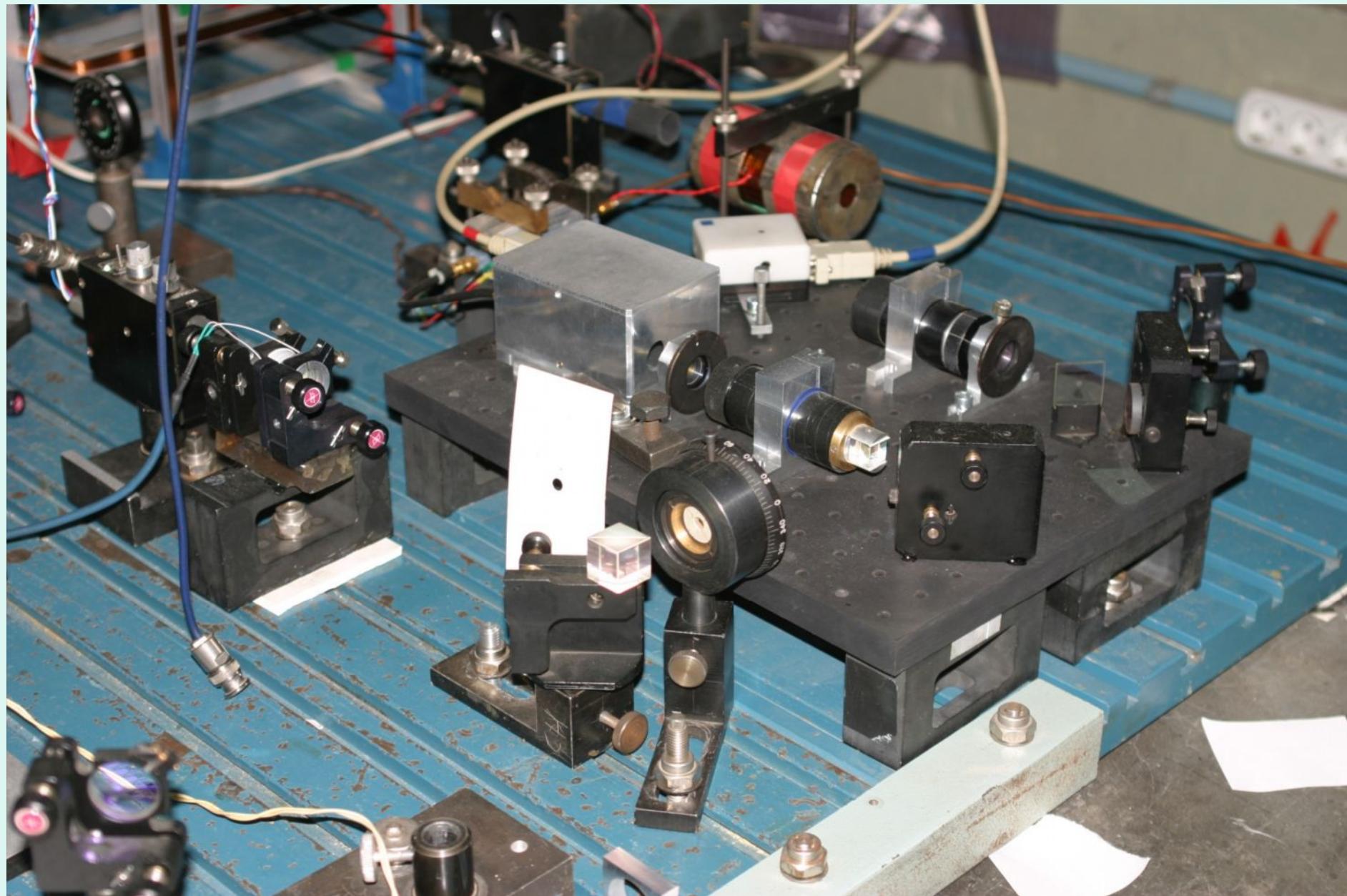
**V.V.Vassiliev: [vvv@okb.lpi.troitsk.ru](mailto:vvv@okb.lpi.troitsk.ru)**



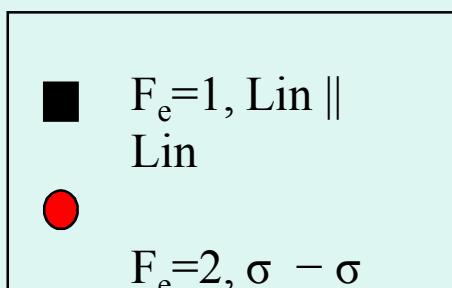
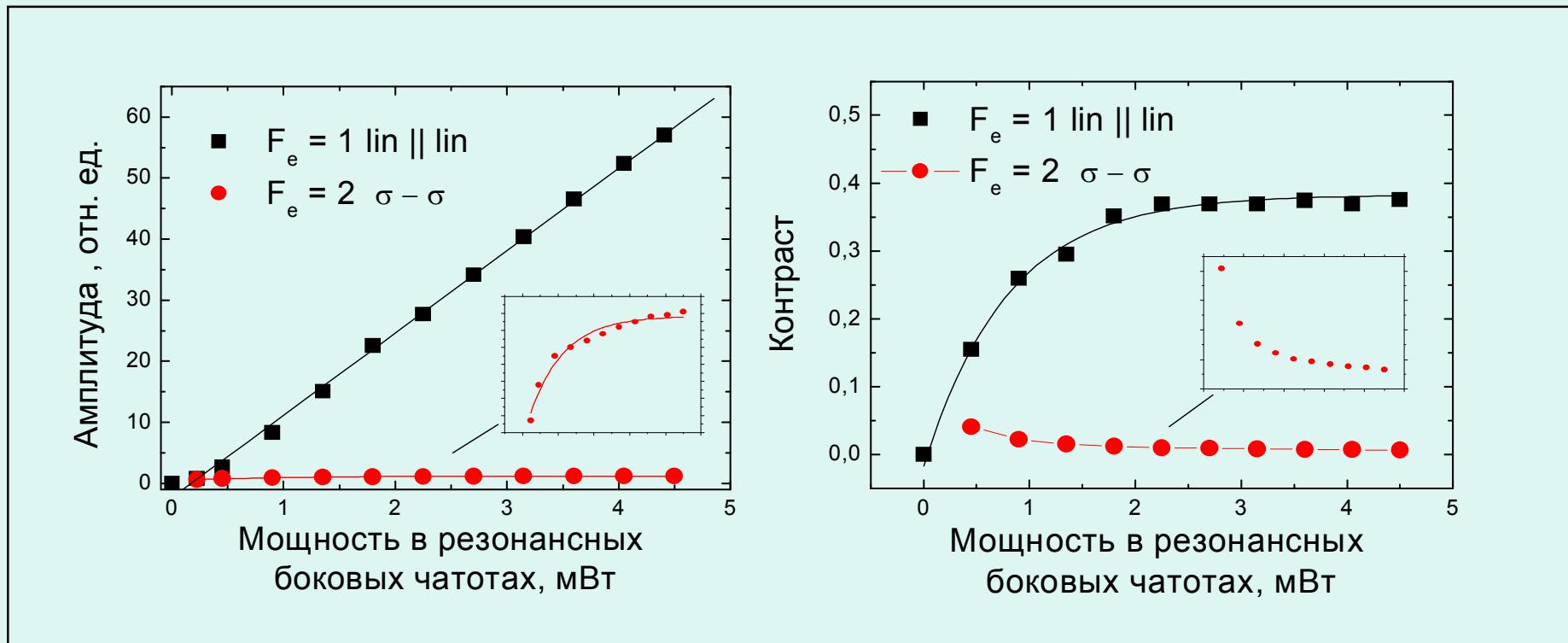
**SUPERLUMDIODES**





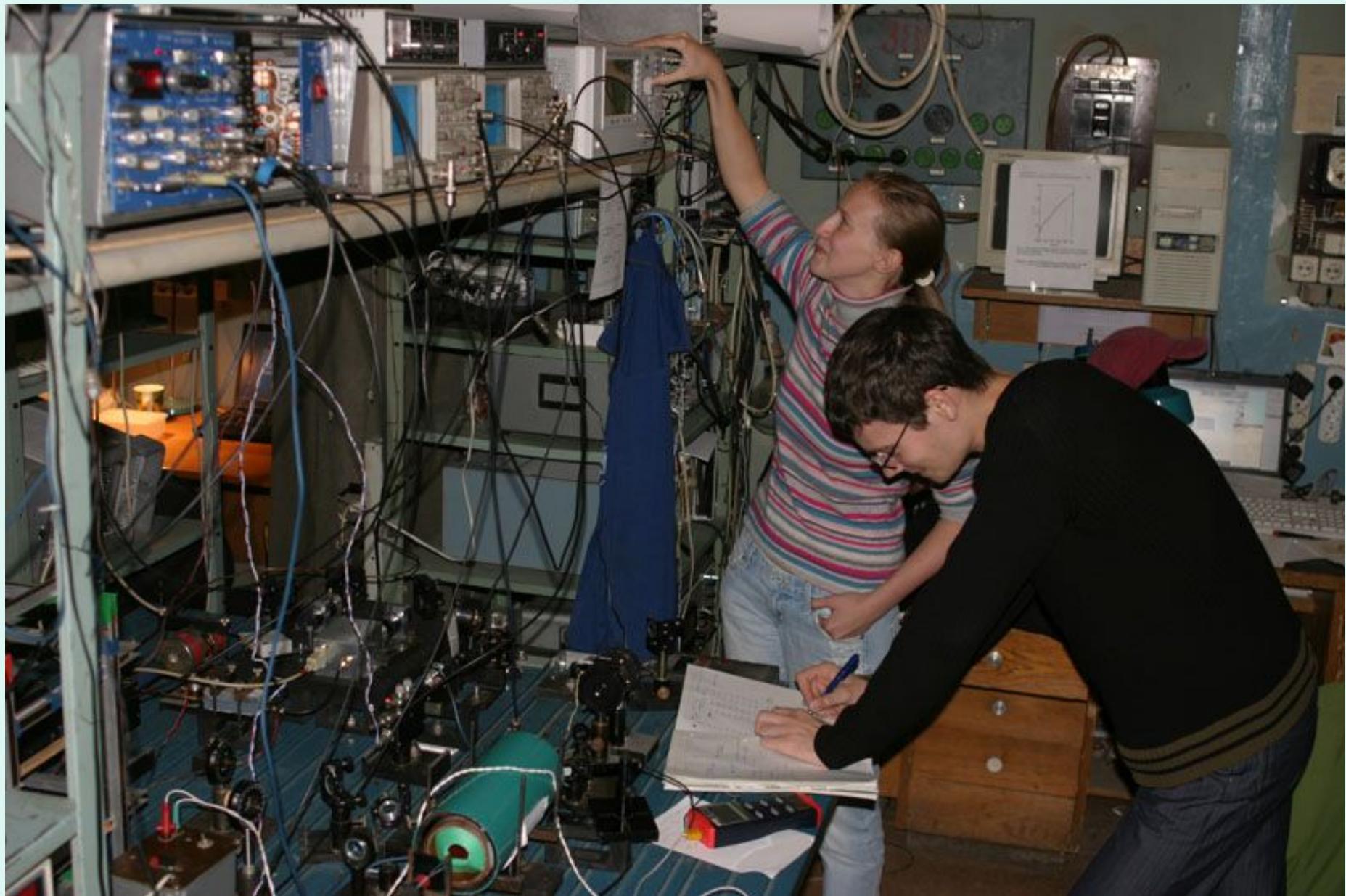


# TRADITIONAL SCHEME VS NEW ONE

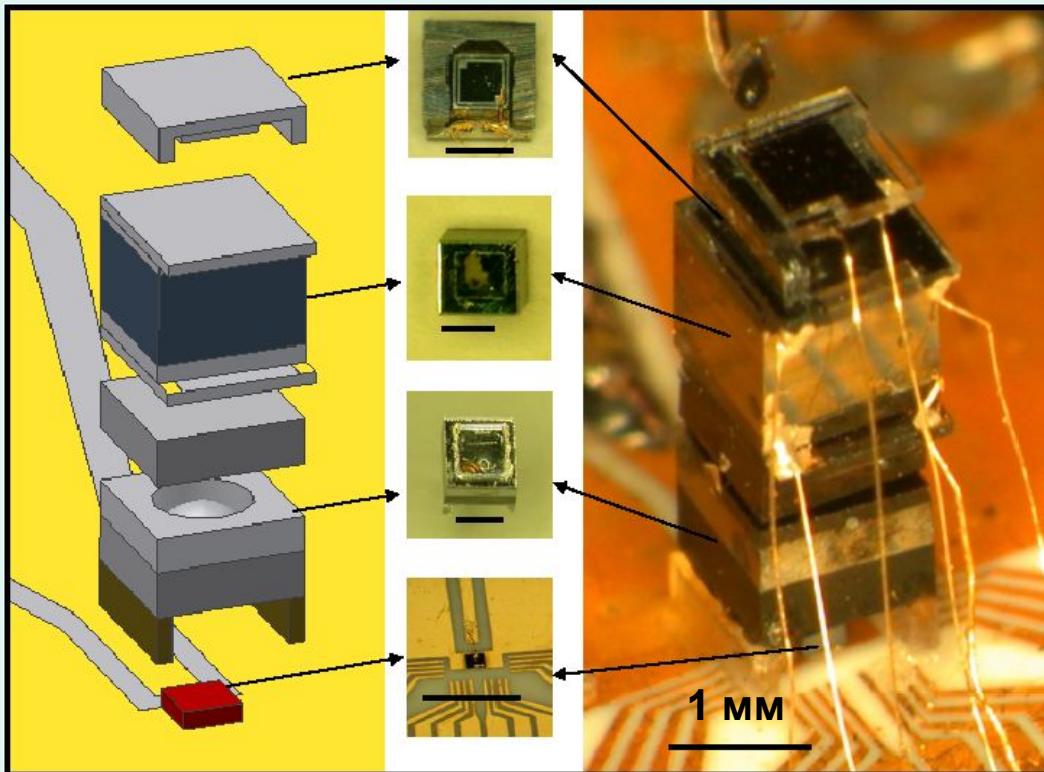


$T = 40^\circ\text{C}$ . Ячейка:  $^{87}\text{Rb} + 4$  тора Ne, ( $d = 2,5 \text{ cm}$ ,  $L = 4 \text{ cm}$ )

A.V. Taichenachev, et al "On the unique possibility to increase significantly the contrast of dark resonances on D1-line of  $^{87}\text{Rb}$ ", JETP Letters, issue 82/7, p. 449, 2005.



# Миниатюрные атомные часы и магнитометры (NIST)



**Volume:**  
9.5 mm<sup>3</sup>  
**Cell volume:**  
0.81 mm<sup>3</sup>  
**Power consumption:**  
75 mW  
**Stability:**  
 $\sigma_y(1s) = 3 \times 10^{-10}$

1. Knappe S. et al Appl. Phys. Lett. 85, 1460 (2004)
2. Knappe S. et al, Optics Express, 13, 1249 (2005).
3. Schwindt P.D.D. et al, Appl. Phys. Lett., 85, 6409 (2004).

Svenja Knappe, Vishal Shah, Peter D. D. Schwindt, Leo Hollberg, and John Kitching

“A microfabricated atomic clock”, *Applied Physics Letters* **85**, 1460 (2004)

### Cesium chip-scale atomic clock.

Short term stability	$2,5 \cdot 10^{-10} \cdot \tau^{-1/2}$
Linewidth	7,1 kHz
Linewidth broadening	<ul style="list-style-type: none"><li>1) Power broadening</li><li>2) Diffusion of atoms to walls</li><li>3) Spin exchange collisions</li></ul>
Amplitude	0,91%
Noise	<ul style="list-style-type: none"><li>1) Shot noise</li><li>2) Extra AM noise of a DL</li><li>3) AM noise of a DLF</li></ul>
Laser power	12 mW
Beam diameter	0,25 mm
Power consumtion	73 mW
Volume	9,5 mm <sup>3</sup>

Svenja Knappe, Vishal Shah, Peter D. D. Schwindt, Leo Hollberg, and John Kitching  
 Optics Express, **13** (2005) 1249  
**Rubidium chip-scale atomic clock.**

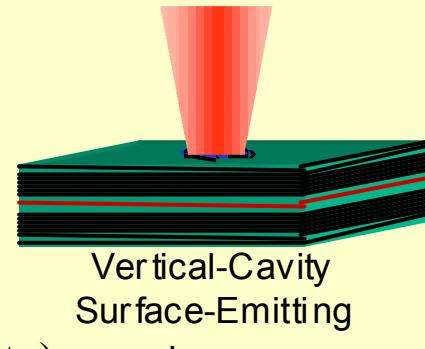
Short term stability	$4 \cdot 10^{-11} \cdot \tau^{-1/2}$
Linewidth	9,3 kHz
Broadening	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Power broadening</li> <li>2) Diffusion of atoms to walls</li> <li>3) Spin exchange collisions</li> </ol>
Amplitude	4,6 %
Background	25 %
Noise	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Shot noise</li> <li>2) Extra AM noise of a DL</li> <li>3) FM noise of a DL</li> </ol>
Laser power	3,5 mW
Beam diameter	0,125 mm
Power consumption	195 mW
Volume	12 mm <sup>3</sup>

# Laser Requirements for Clock Applications

- Useful wavelengths: 852 nm, 895 nm, 780 nm, 795 nm
- Low DC power dissipation (low operating current)
- High modulation efficiency
- Low cost for mass-produced devices
- Single longitudinal mode       $\Rightarrow$  avoid mode hops (reliability)  
                                         $\Rightarrow$  easy to acquire optical lock
- Single polarization mode
- Reasonable transverse mode structure

Flexible specs:

- Large linewidth (up to 50 MHz) does not appear to limit clock performance significantly
- Power requirement very low ( $\sim 10 \mu\text{W}$ )



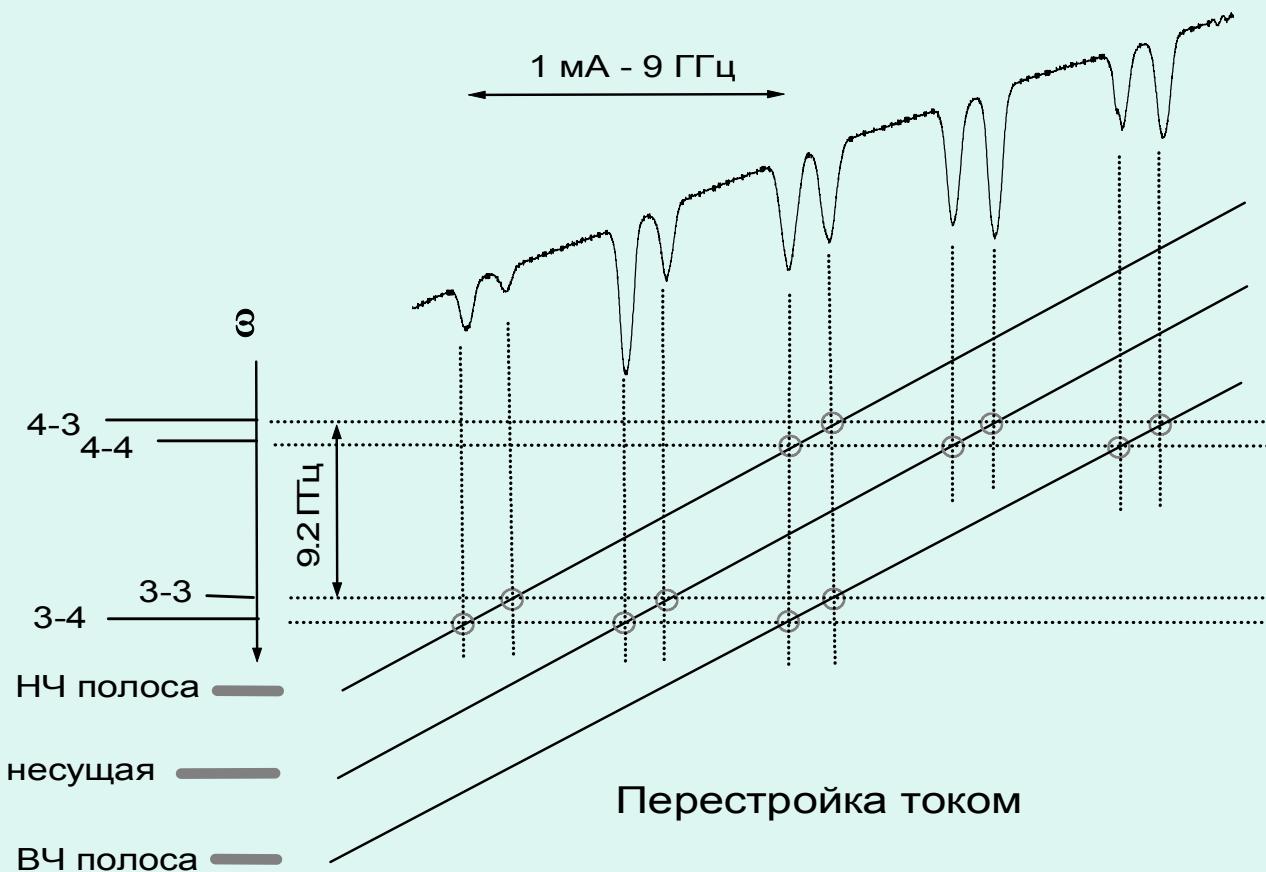
**VCSELS with transverse mode selection seem an excellent choice**

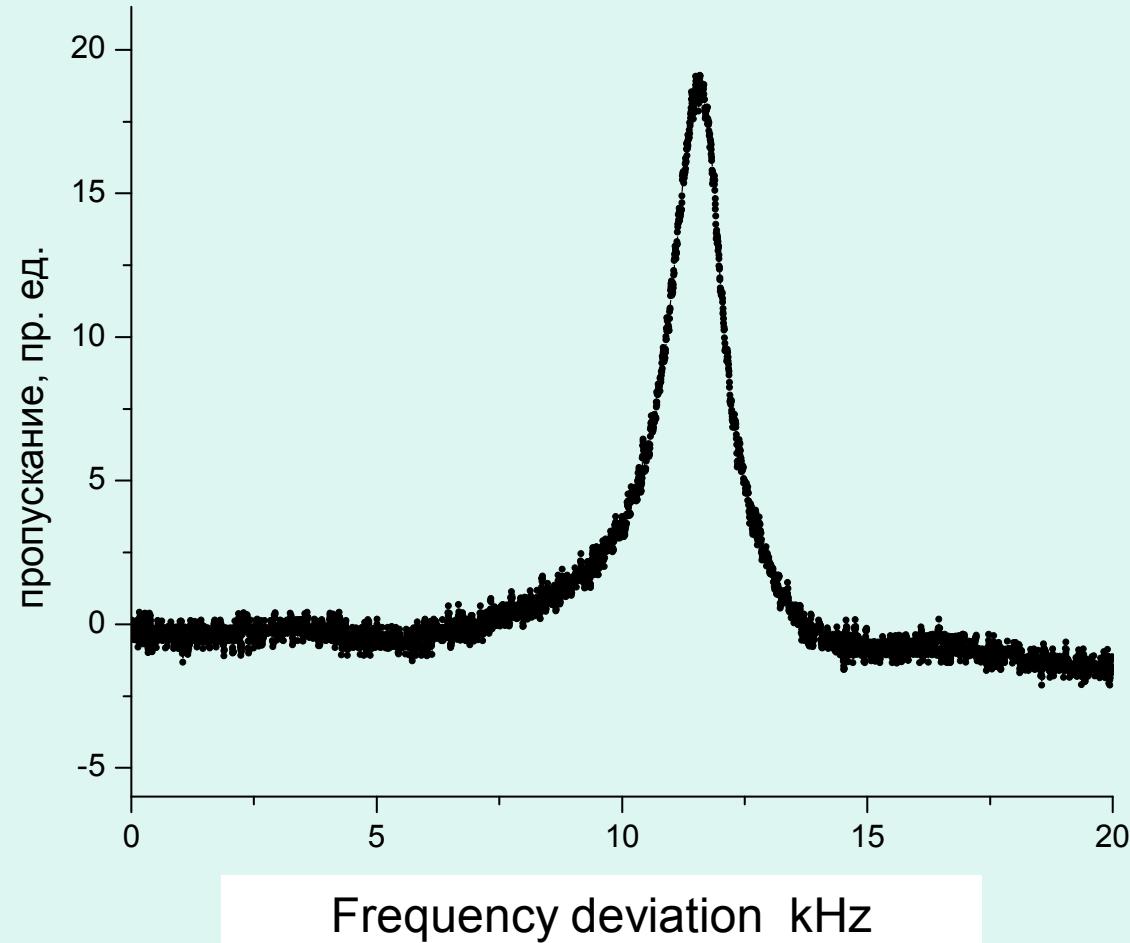
**Currently no reliable commercial suppliers**

		VCSEL	SCDL
1.	$\lambda = 895 \text{ nm (D}_1/\text{Cs)}$	+?	+++?
	$\lambda = 795 \text{ nm (D}_1/\text{Rb)}$	++	++++
2.	$100\mu\text{W} < P_{\text{cw}} \leq 1 \text{ mW}$	++	+++
3.	$f_0 \geq 5 \text{ GHz}$	++++	+?
4.	$\text{FM eff } \eta_{\text{cвч}} \geq 50\%$	++++	++
5.	<b>DYN. SINGLE MODE</b>	+++++	+
6.	<b>NO MODE HOPPING</b>	+++++	+
7.	$\Delta v \leq 500 \text{ MHz}$	++	++++
8.	<b>FUND. TRANSV. MODE</b>	+?	+++++
9.	<b>STABLE POLAR.</b>	+?	+++++
10.	<b>LARGE DIVERGENCE</b>	-	+++
11.	<b>SYMMETR. FIELD</b>	++++	?
12.	<b>BLACK HOLES</b>	++++	-

## Solitary DLs

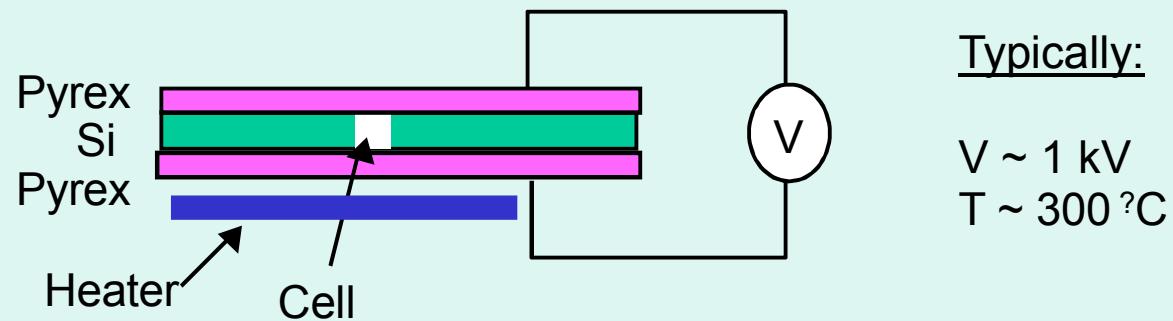
- VCSELs
- Development of single-mode DL with a short ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ) cavity for small atomic clocks based on CPT ( $\lambda = 895$  or  $795 \text{ nm}$ )
- Noise and modulation properties of a short cavity DL





# Si/Glass Cells using Anodic Bonding

- Bond Si to glass using combination of high voltage and elevated temperatures



- Some possible problems with elevated temperature:
  - Outgassing material from glass can oxidize Cs
  - Diffusion of Cs into glass
  - Cs in vapor form escaping from cell before bonding
- Low temperature bonding process advantageous

Kn S.Knappe, V. Velichansky, H.G. Robinson, J. Kitching, and L. Hollberg.:  
Review of Scientific Instruments, 2003, Vol. 74, No. 6, p.3142.

## Rb cell



*A. Architecture*

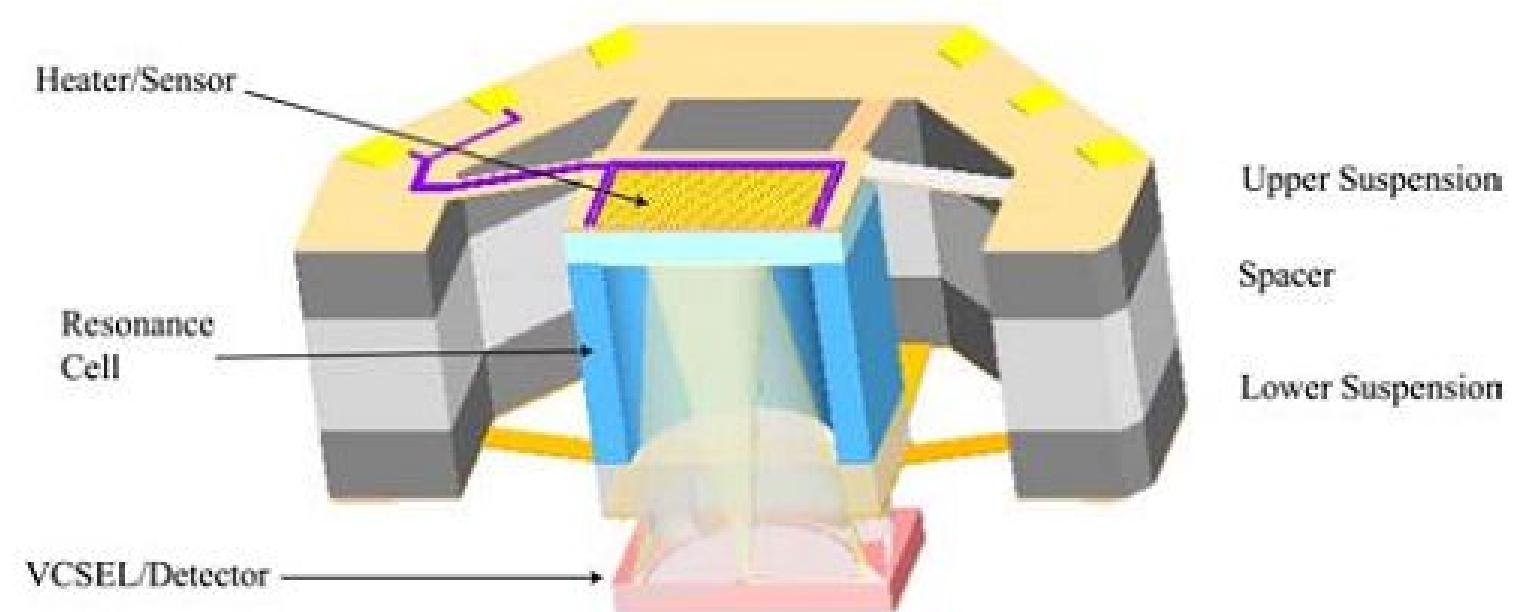
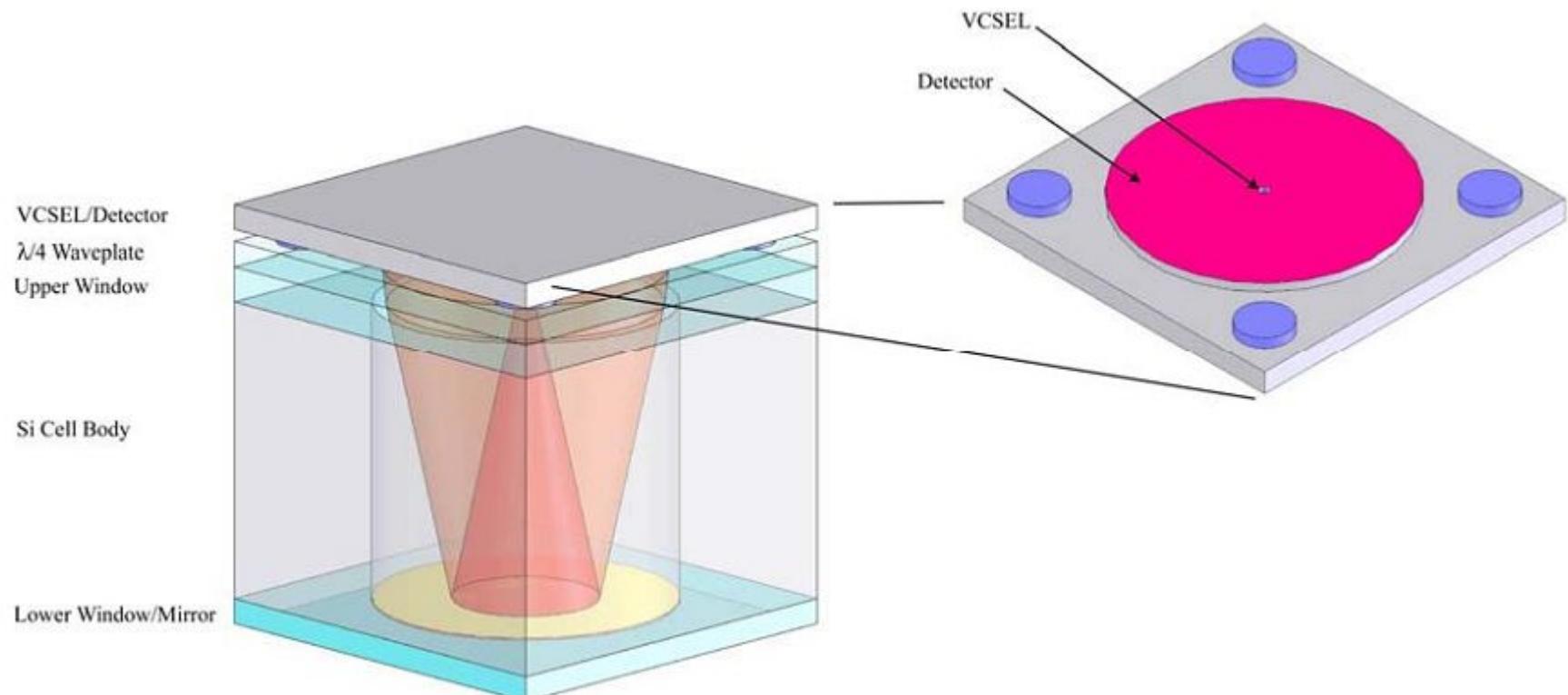
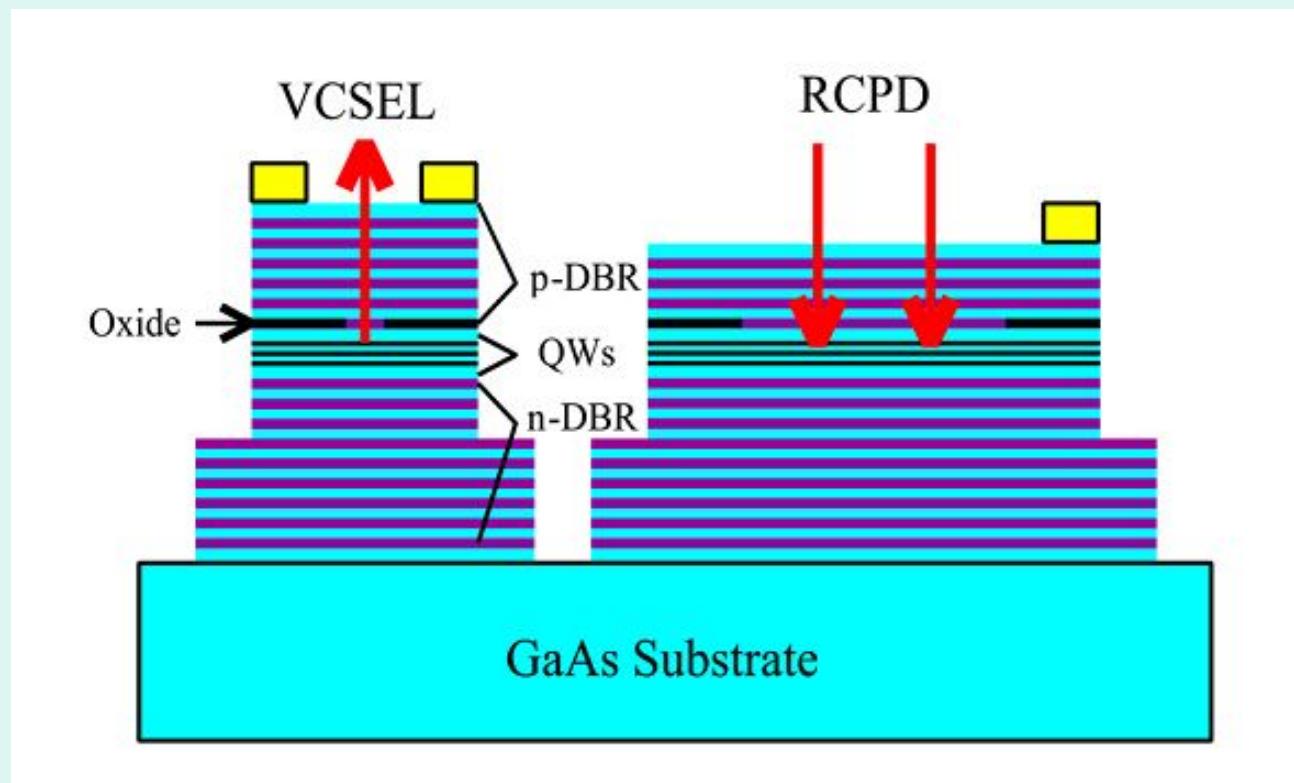
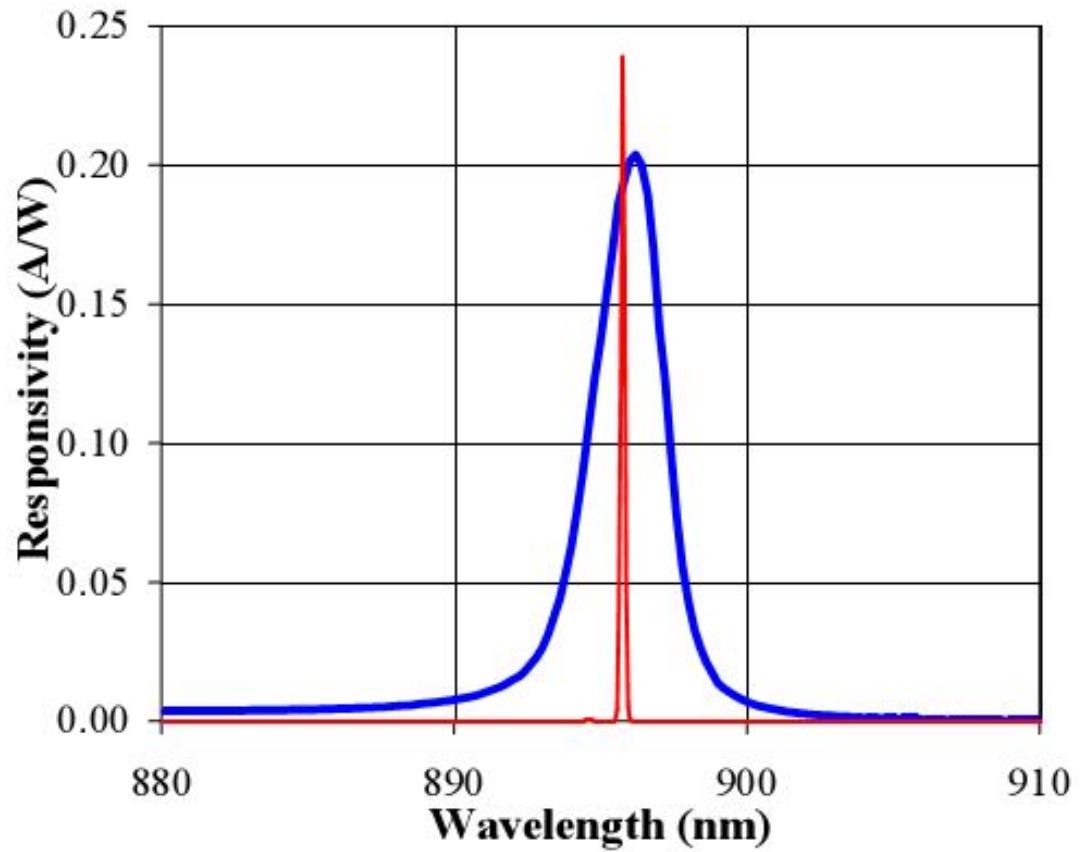
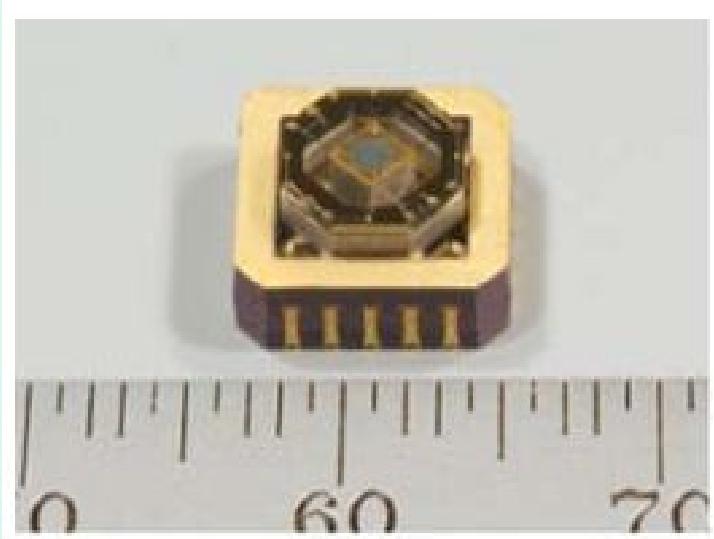


Figure 1. Physics Package Architecture

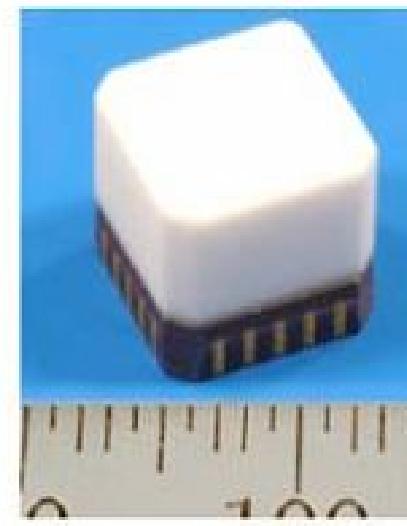








(a)



(b)

Figure 2. Physics package in ceramic LCC

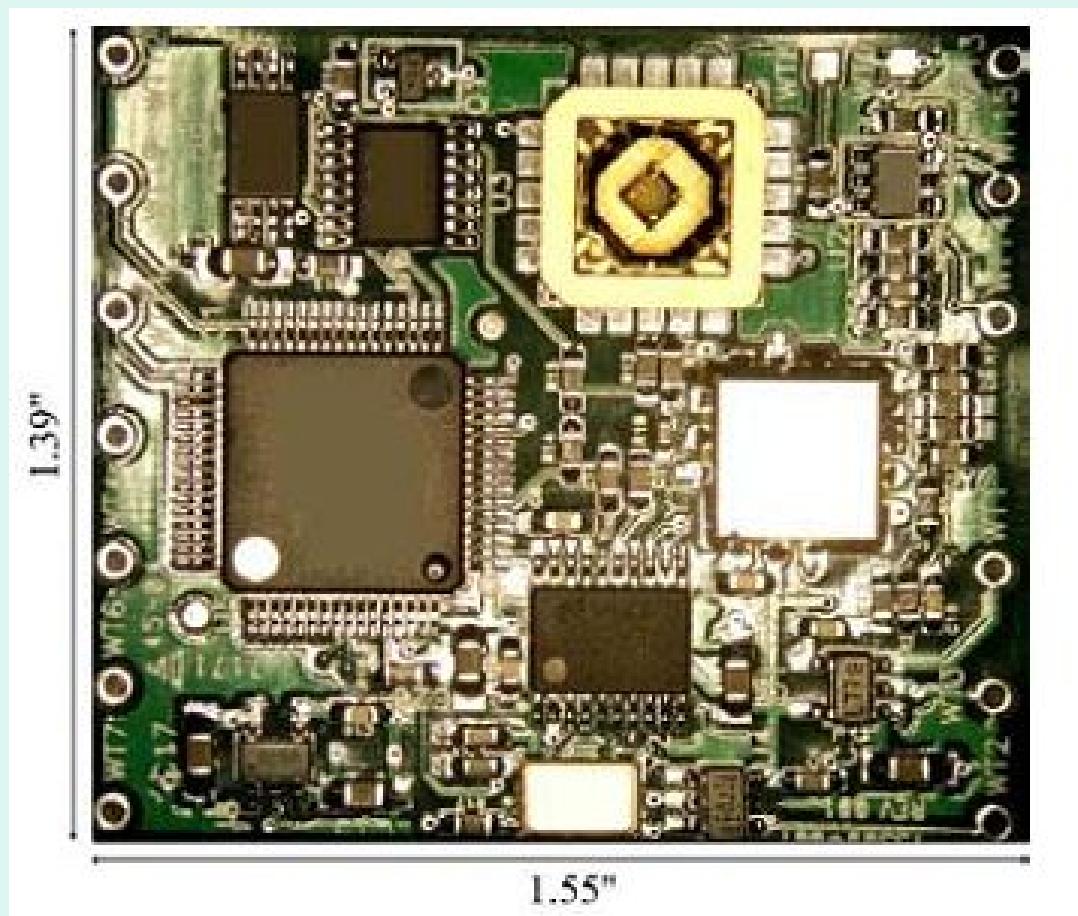


Figure 5. MAC Prototype PCB

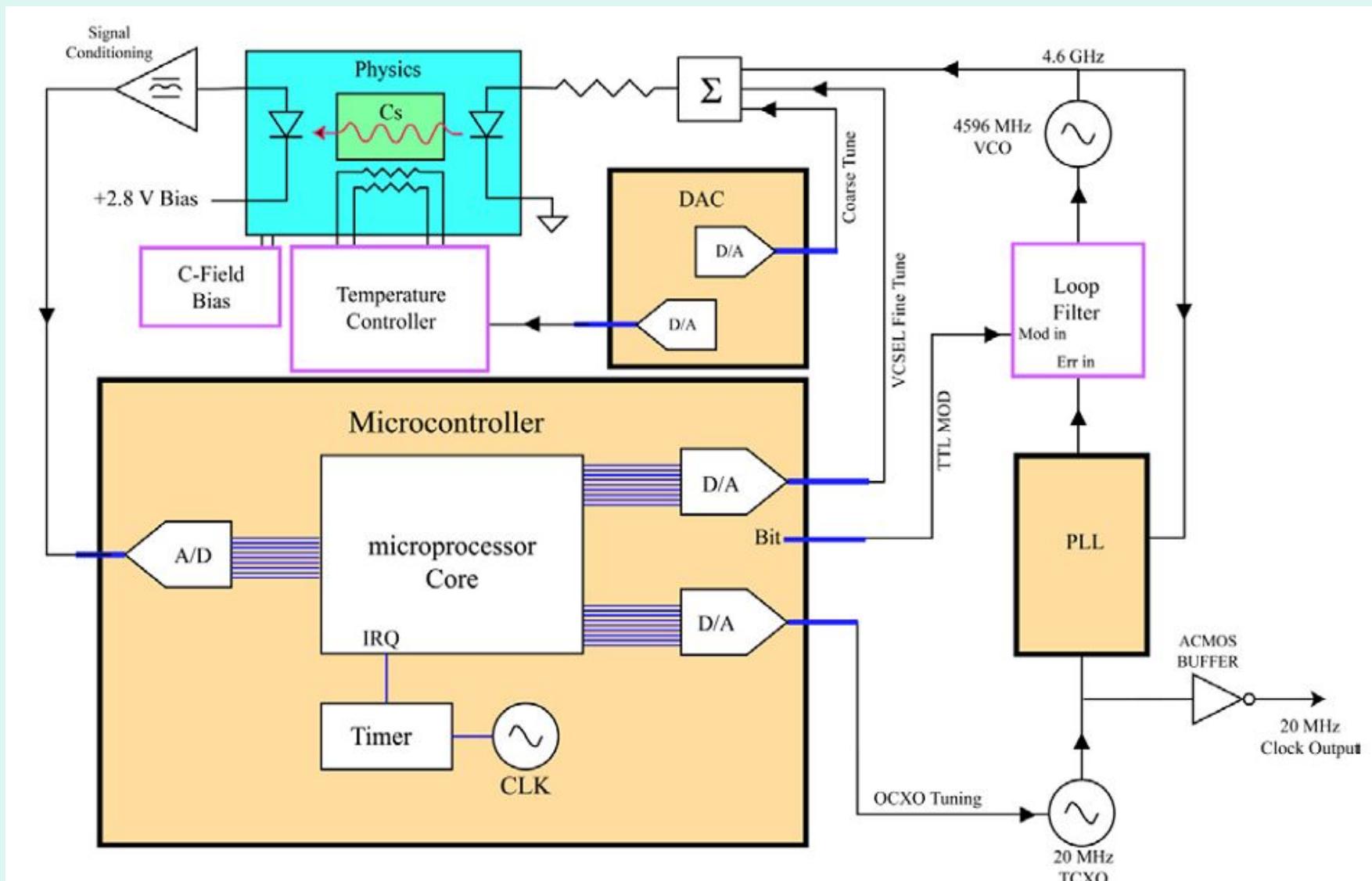
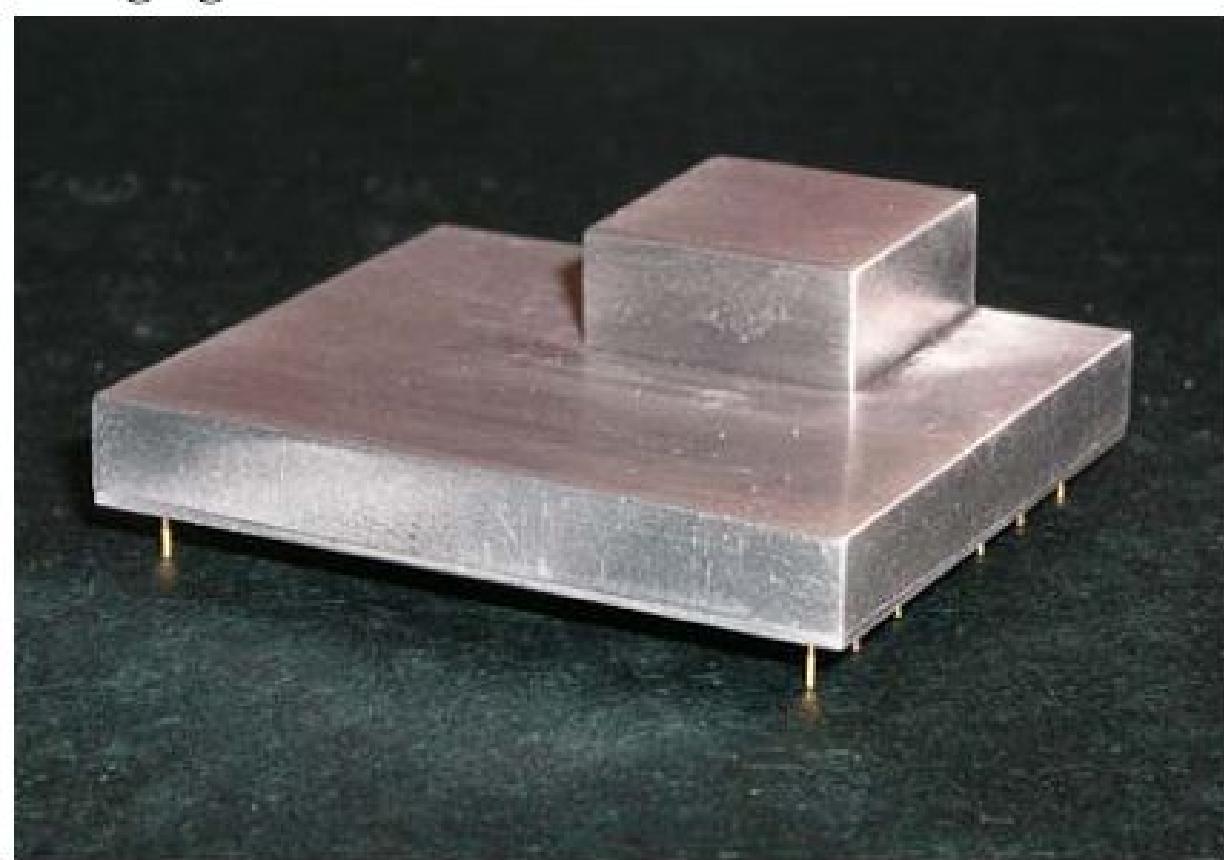
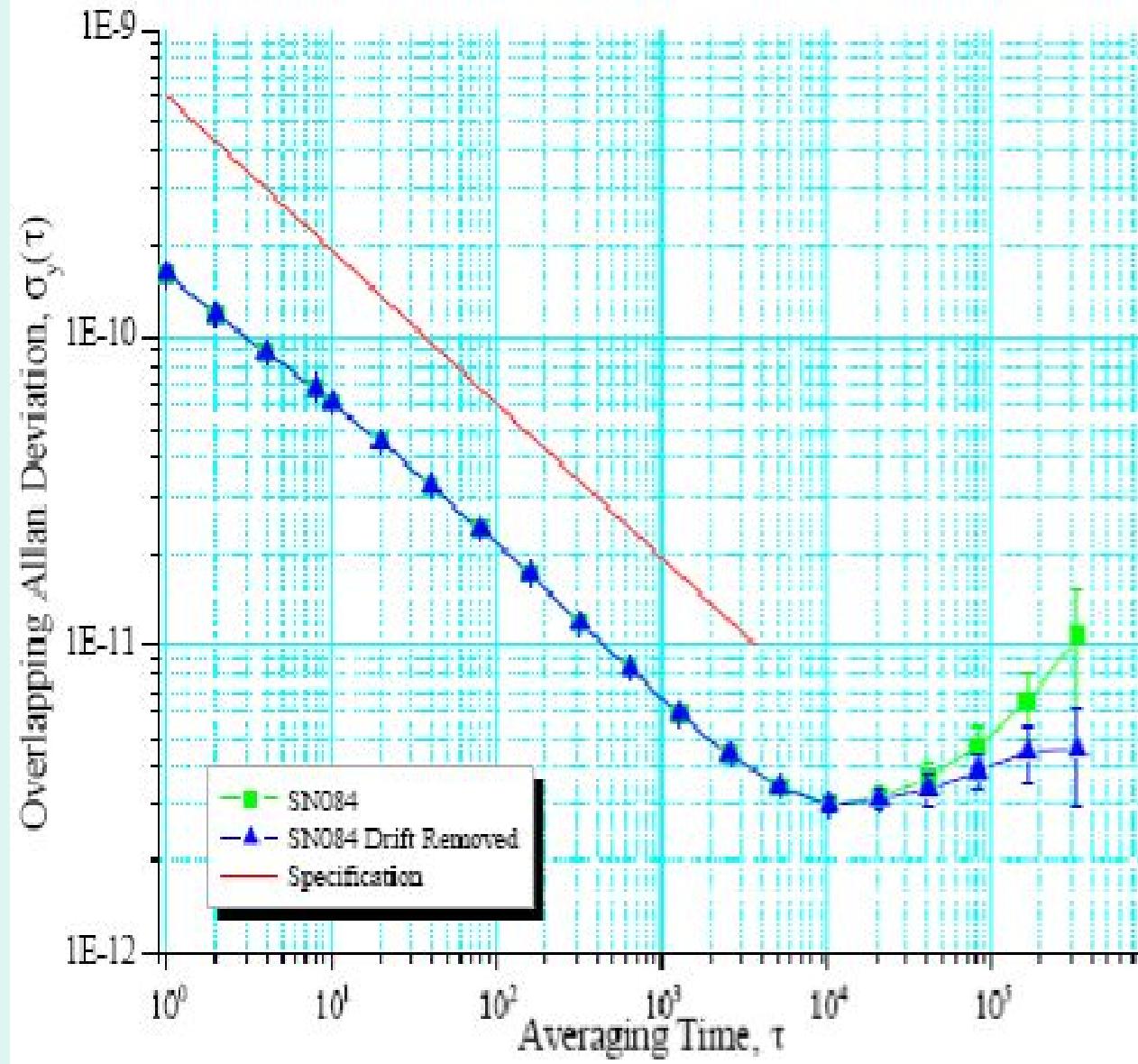


Figure 4. MAC block diagram





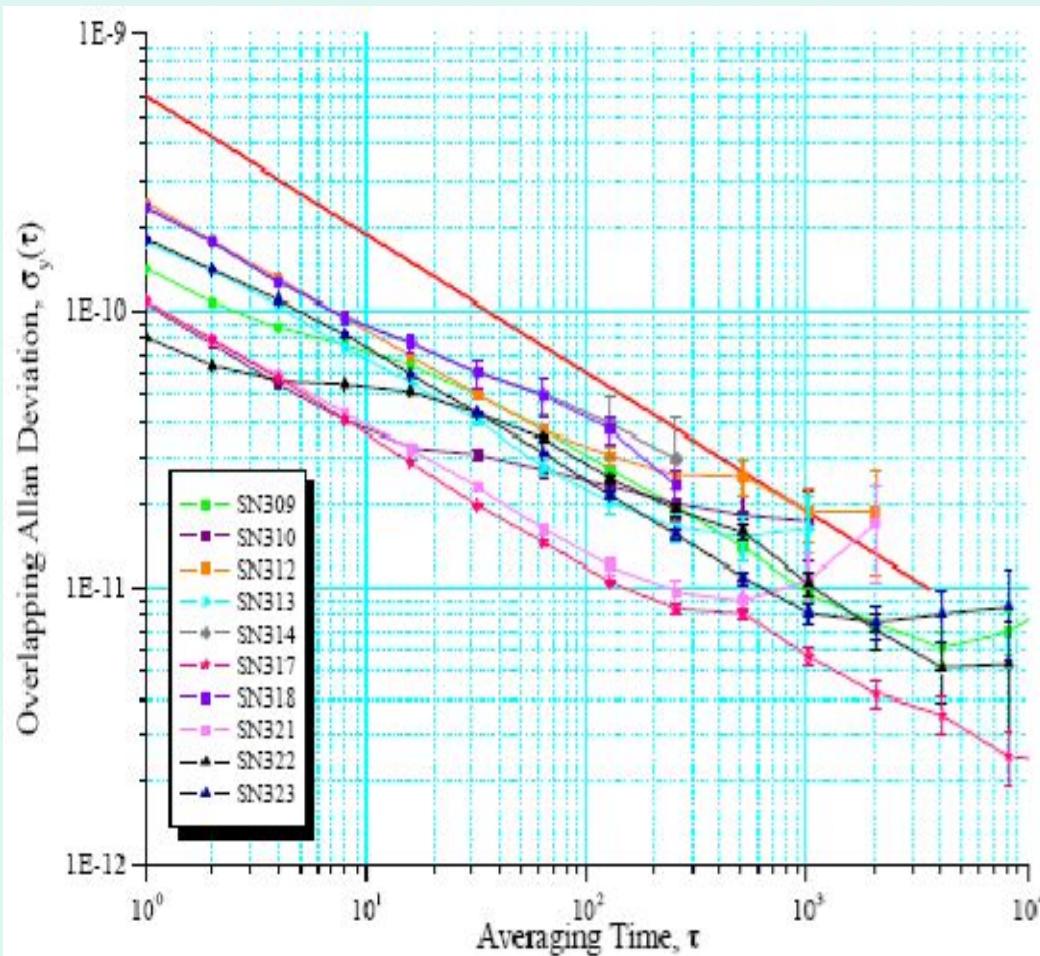


Figure 8. Collected STS data for 10 MACs

Figure 8 shows the stability data for 10 pre-production prototype MACs. All units exhibit  $\sigma_y(\tau) < 3 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$  out to averaging intervals of  $\tau > 100$ s. Because the phase data was

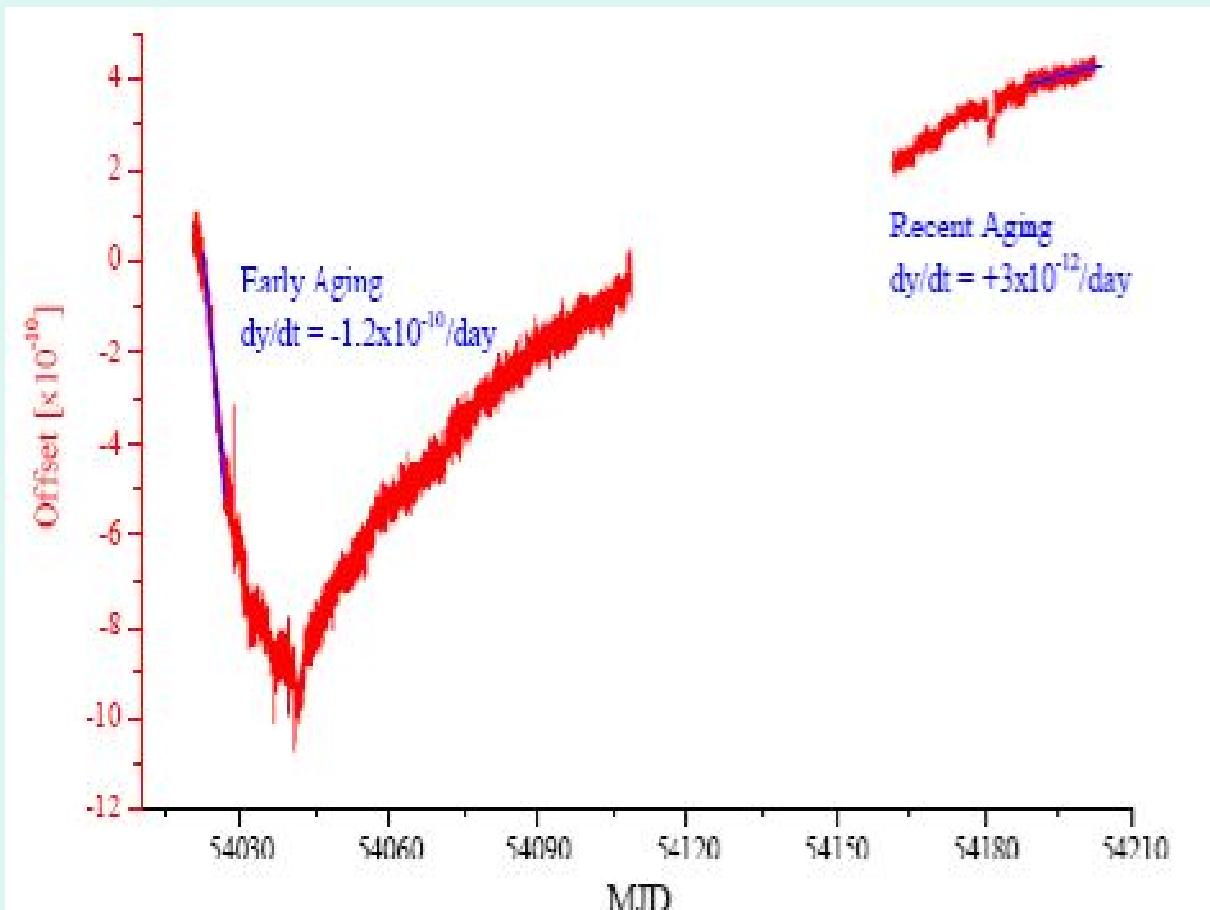


Figure 9. Long-term aging of SN084

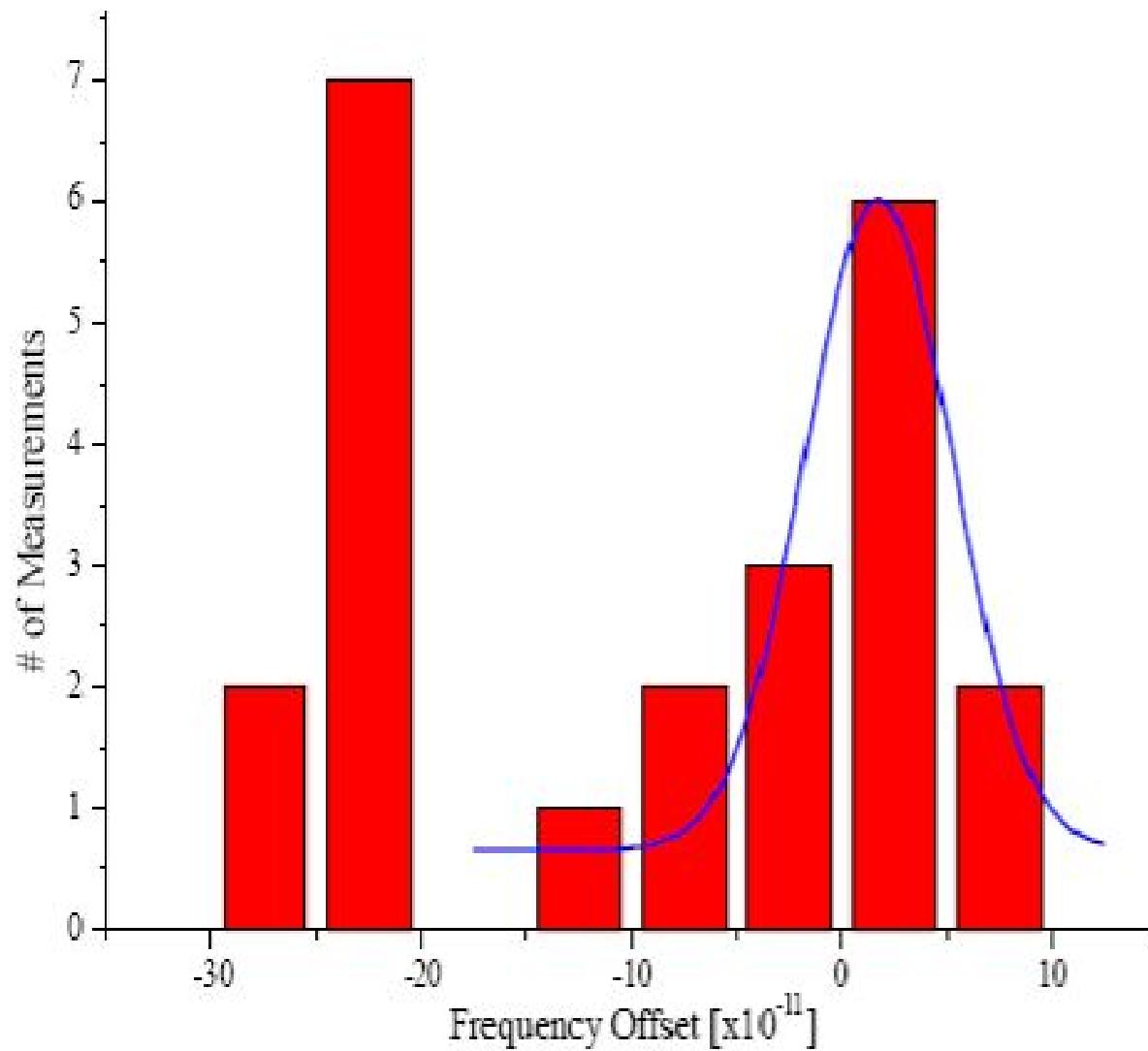


Figure 11. Histogram of Retrace values from Figure 10

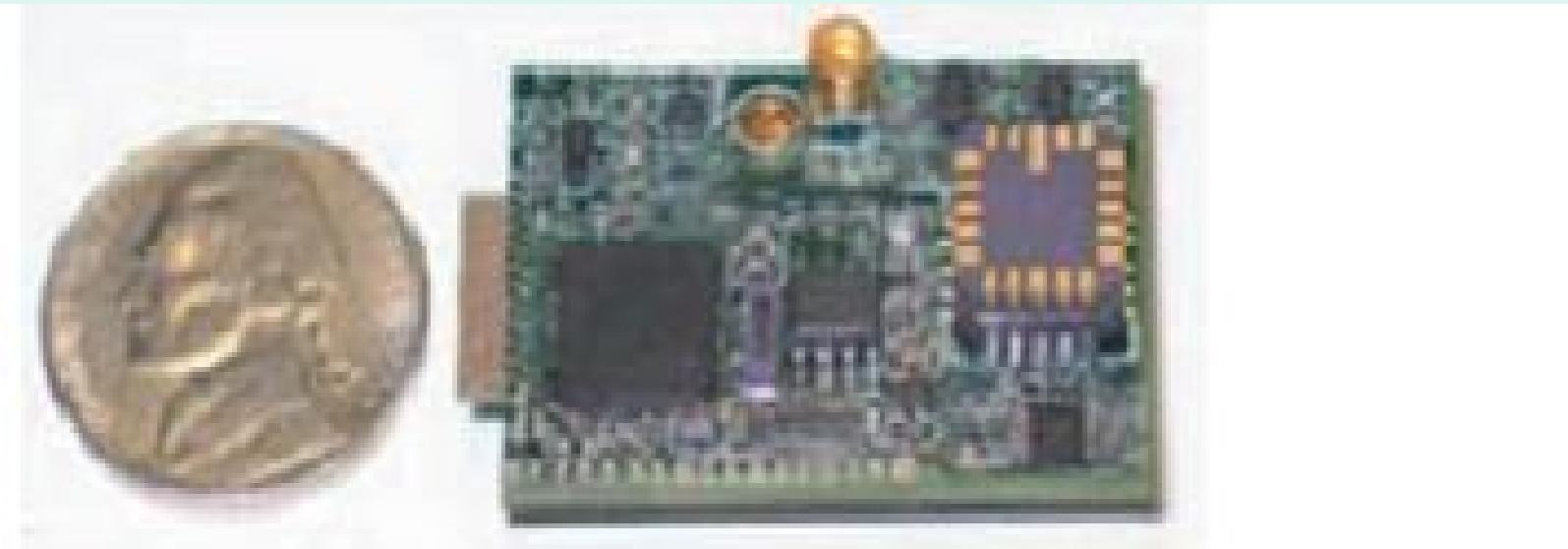


Figure 9: Photograph of Honeywell's complete Chip-Scale Atomic Clock next to a US 5¢ piece.

$$\sigma = 5 \cdot 10^{-12} / \text{час} \quad V = 1,7 \text{ см}^3 \quad P_{\text{потр}} = 57 \text{ мВт}$$

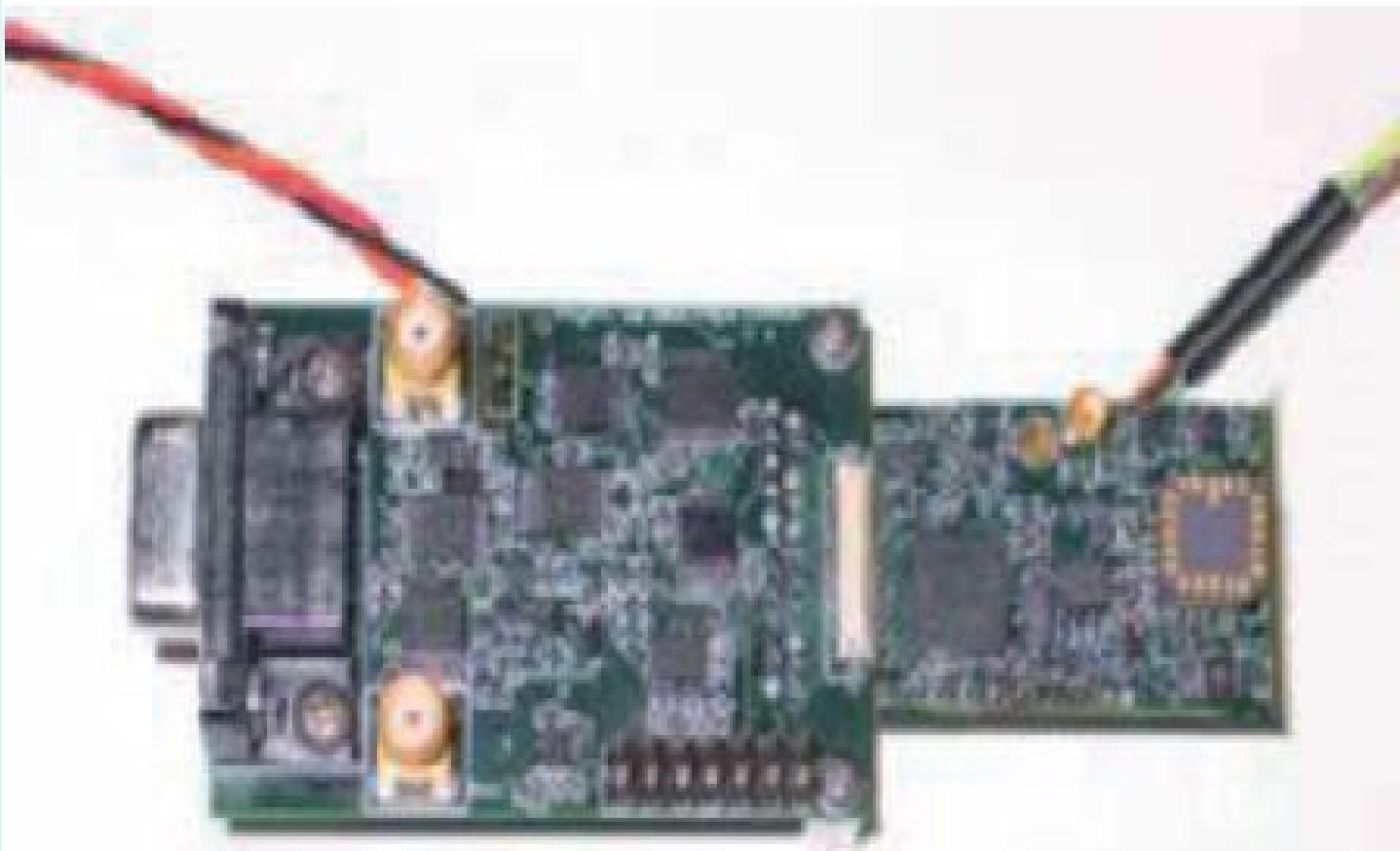


Figure 13: The GPS board plugged directly into the clock board.

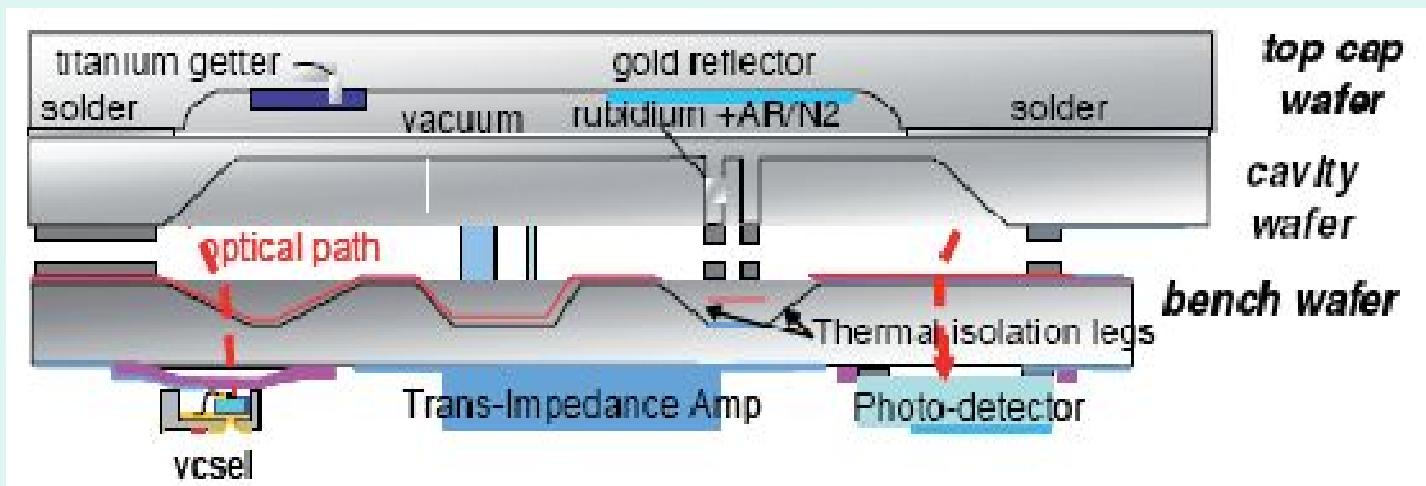
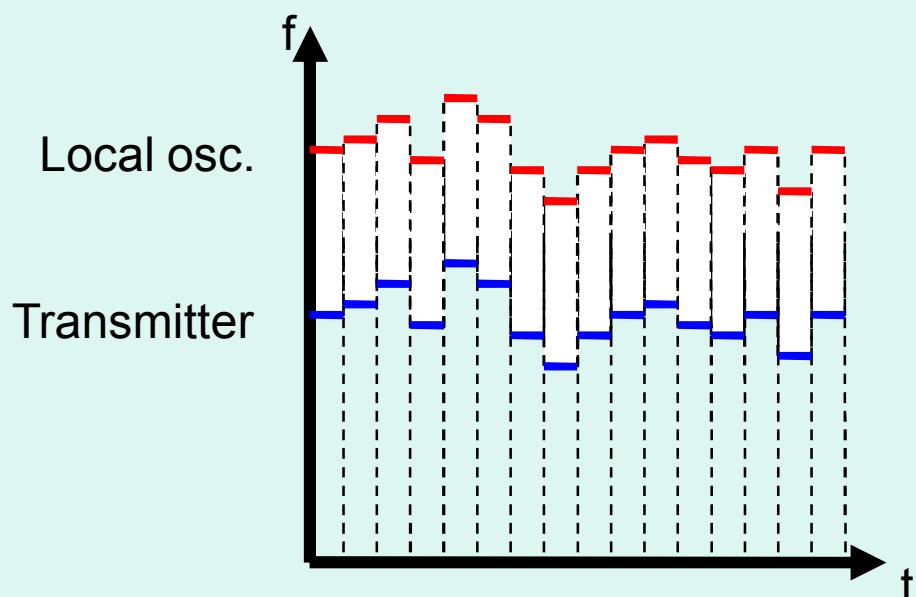


Figure 2: Schematic cross-section of the Honeywell Chip-Scale Atomic Clock

# Applications

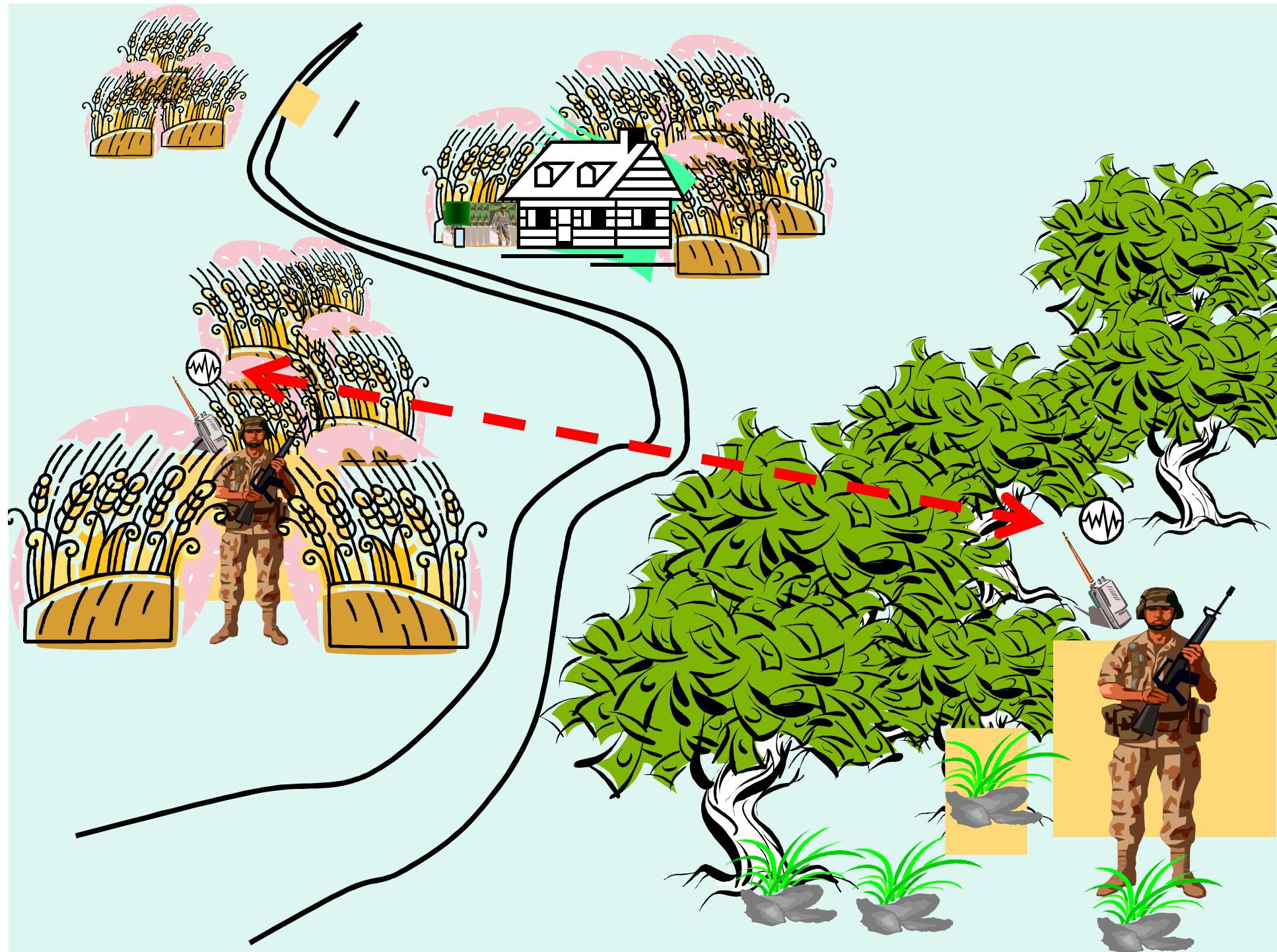


## Broadband communication systems



- Commercial
  - Digital network synchronization ( $10^{-10}$  @ 1 day)
  - Advanced GPS, wireless
  - Low power, remote operation
- Military
  - Anti-jam GPS
  - Identify, friend or foe (IFF)
  - Secure communications
    - Signal acquisition
    - autonomy period
  - Surveillance
  - Bistatic radar

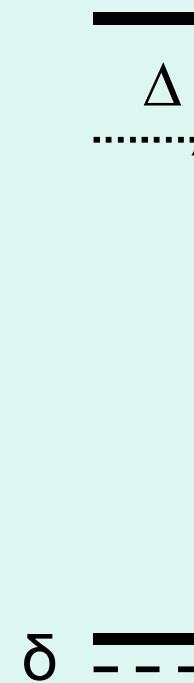
CSACs with good long-term stability in a compact, low-power, low-cost package may open completely new avenues for application of frequency references



# ОПТИЧЕСКИЕ СДВИГИ



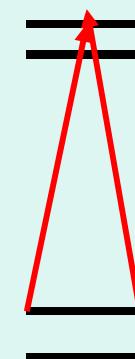
$$\delta \sim \Omega^2 \Delta / (\gamma^2 + \Delta^2)$$



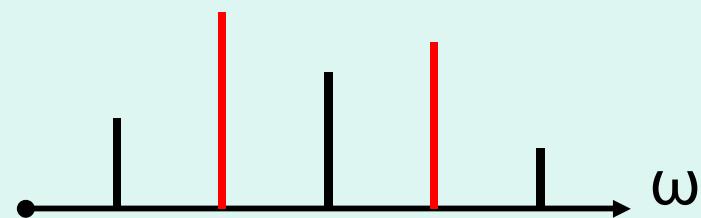
Если всего три уровня и два поля, то собственные Опт. Сдв. отсутствуют, причем для любых отстроек.



Сдвиг появляется из-за других уровней



Сдвиг появляется из-за несущей и высших боковых полос



## SUMMARY OF OUR RECENT RESULTS

- Two techniques which are free of trapping states and improve parameters of CPT resonance have been proposed
- Short cavity diode laser can be used in small size atomic clock
- The old statement “**a combination of antirelaxation coating and buffer gas does not improve practically  $\Lambda$  resonance**” has been rechecked in small cavities and confirmed
- A SubkHz  $\Lambda$  resonance has been displayed in the ARC spherical cells with diameter of 9 mm.

Is it not a medieval approach? Natural economy?  
Does it make sense to proceed to work on CSAC?

## MAIN STEPS

- L. Moi et al, CPT 1976
- S. Ezekiel et al, “Raman clock”, Na beam 1987
- A. Akulshin et al, CPT w/ free running DL 1991
- M. Tetu et al, “All optical...” 1993
- D. Meshede et al, Buffer gas: 50 Hz 1997
- R. Wynands et al, VCSEL + CPT 1999
- L. Hollberg et al, VCSEL + SMALL clock 2001
- J. Kitching et al, Small Cs clock 2004
- H. Robinson et al, Small Rb magnetometer 2004
- V.Yudin et al,  $\sigma+$  -  $\sigma-$  2004
- S. Knappe et al, Small Rb clock 2005
- S.Zibrov et al lin || lin  $^{87}\text{Rb}$  2006

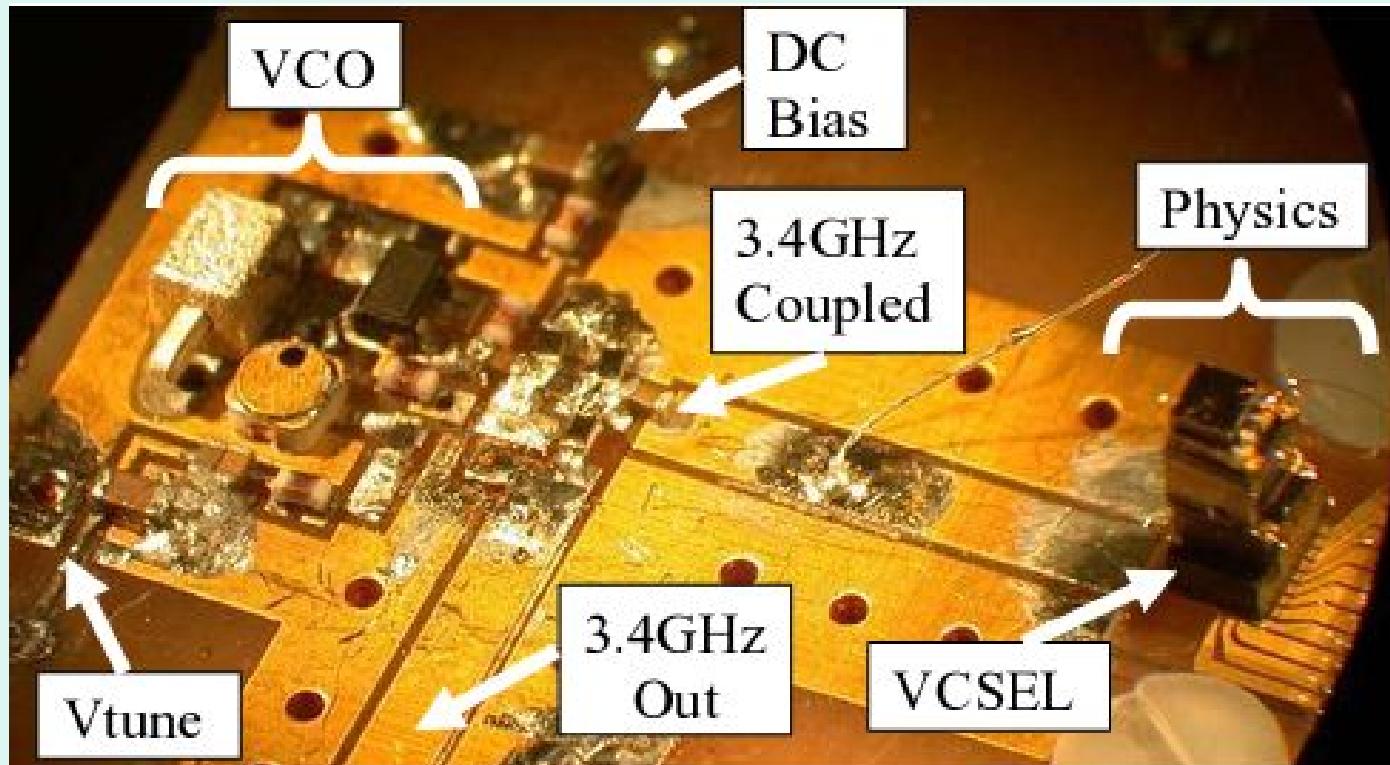
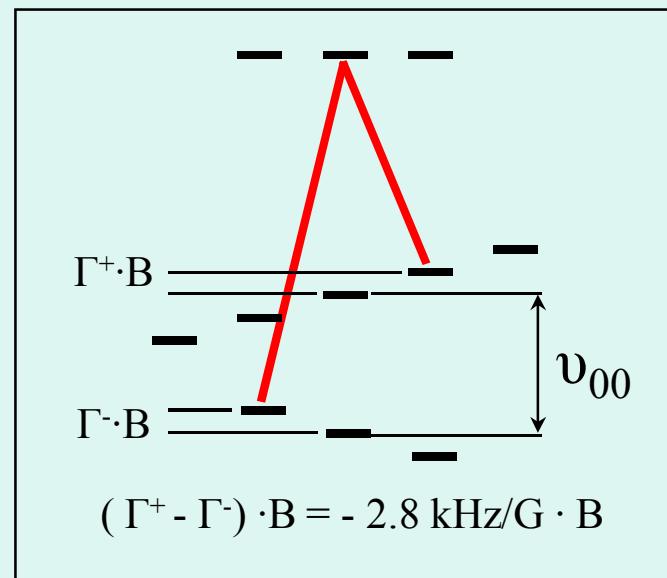
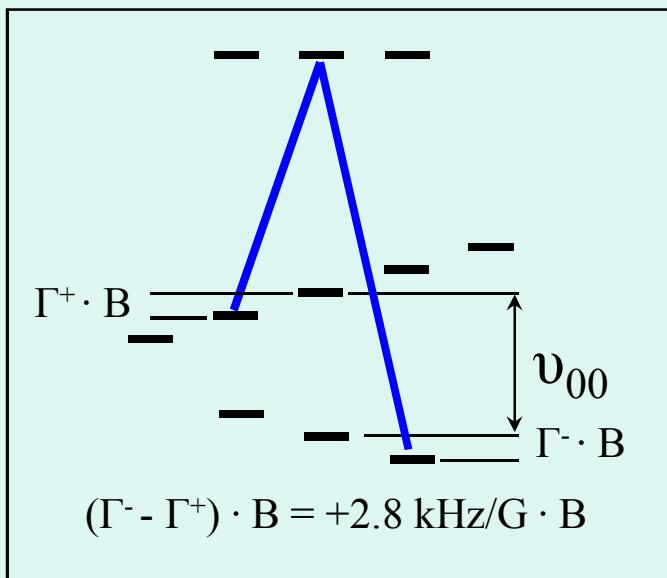
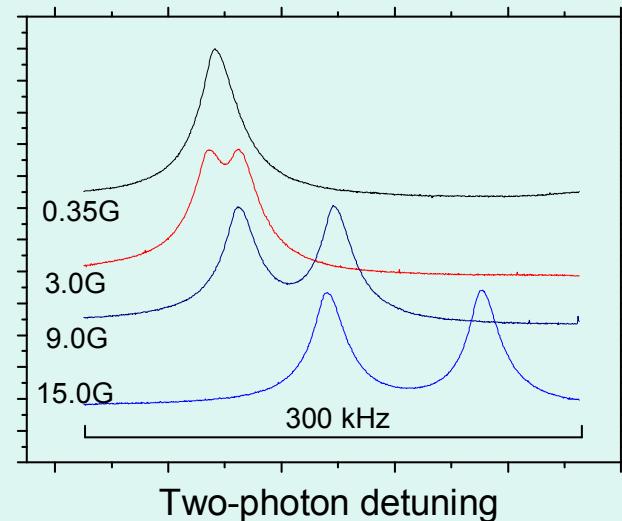


Figure 7. Photograph of the VCO integrated with the NIST physics package. Inputs are DC bias and tune voltage for the VCO and laser bias, photodetector bias, and heater current for the physics package. Outputs are stabilized 3.4 GHz, photodetector signal, and thermal sensor voltage.

## EVOLUTION OF CENTRAL PEAK IN MAGNETIC FIELD



Из-за небольшого отличия g-факторов для двух сверхтонких подуровней основного состояния, обусловленного вкладом спина ядра, центральный резонанс расщепляется на два.



# **ЭФФЕКТ КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТЕЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МЕТРОЛОГИИ**

**В.В. Васильев<sup>1</sup>, Я.О. Дудин<sup>1</sup>, С.А. Зибров<sup>1</sup>, О.Н.Козлова<sup>2</sup>,  
Г.В.Романов<sup>2</sup> А.В. Тайченачев<sup>3,4</sup>, В.И. Юдин<sup>3,4</sup>,  
В.Л. Величанский<sup>1,2</sup>**

*1 - ФИАН, 2 – МИФИ, 3 - Институт лазерной физики СО РАН, 4 - НГУ*

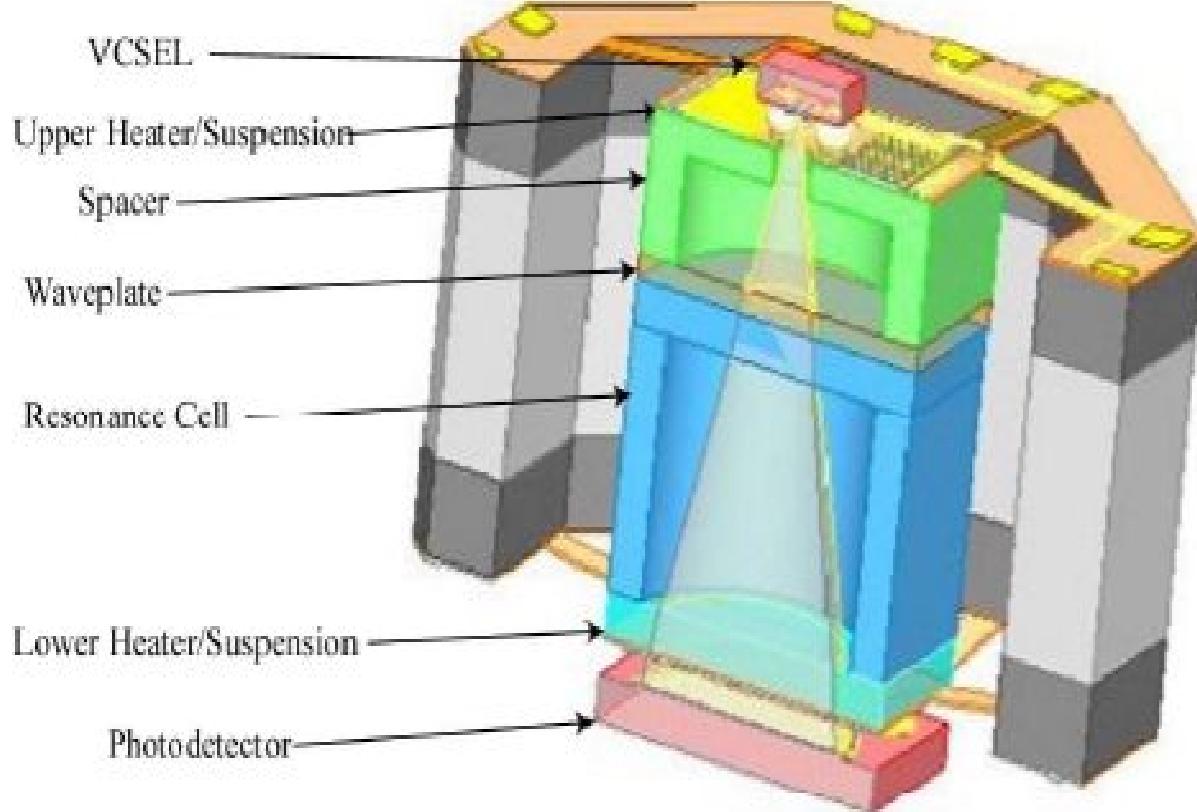
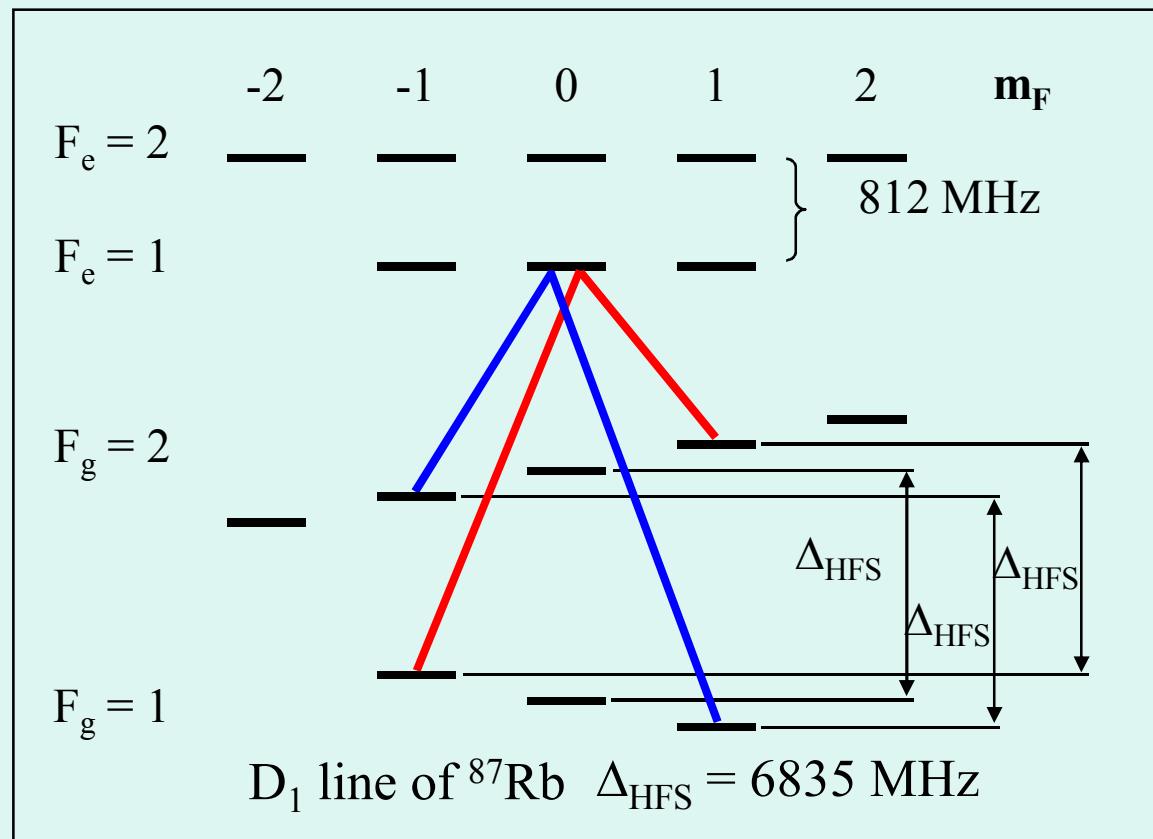


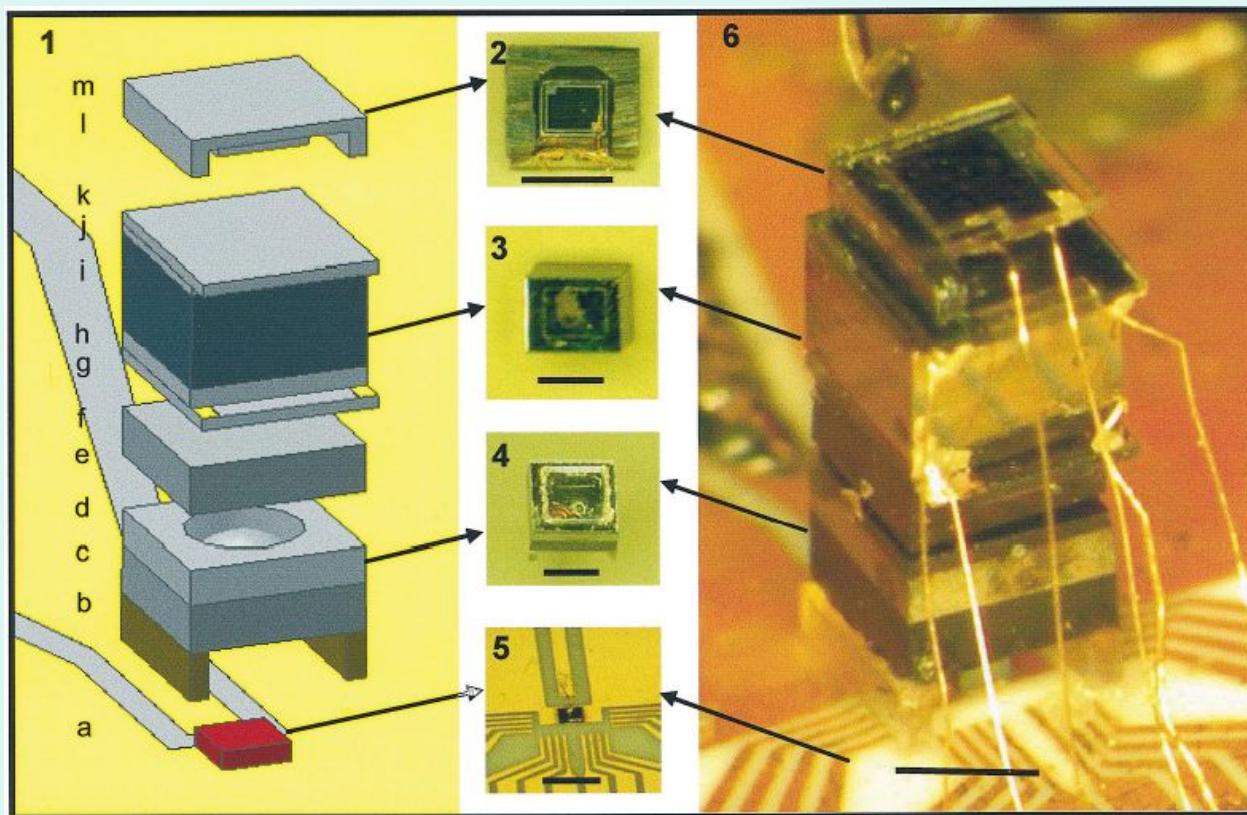
Figure 1. Second-generation Physics package

## Новая Lin || Lin схема

A.V. Taichenachev V.I. Yudin, V.L. Velichansky, S.A. Zibrov "On the unique possibility to increase the contrast of dark resonances on D<sub>1</sub> line of <sup>87</sup>Rb" Pisma v ZhETF, **82**(2005)449;

С.А.Зибров, В.Л.Величанский, А.С.Зибров, А.В.Тайченачев, В.И.Юдин,  
«Экспериментальное исследование темного.....» Письма в ЖЭТФ, **82** (2005)534





- a) laser (VCSEL)
- d) lens 0.375 mm
- e)  $\lambda/4$  (quartz, 0.07 mm)
- i) Cell (Si 1mm)

- b) glass 0.125 mm
- c,f) neutral filters 0.5 mm
- h,j) glass 0.2 mm
- g,k) glass 0.125mm +heater 30 nm
- l) Si 0.375 mm
- m) glass 0.125 mm

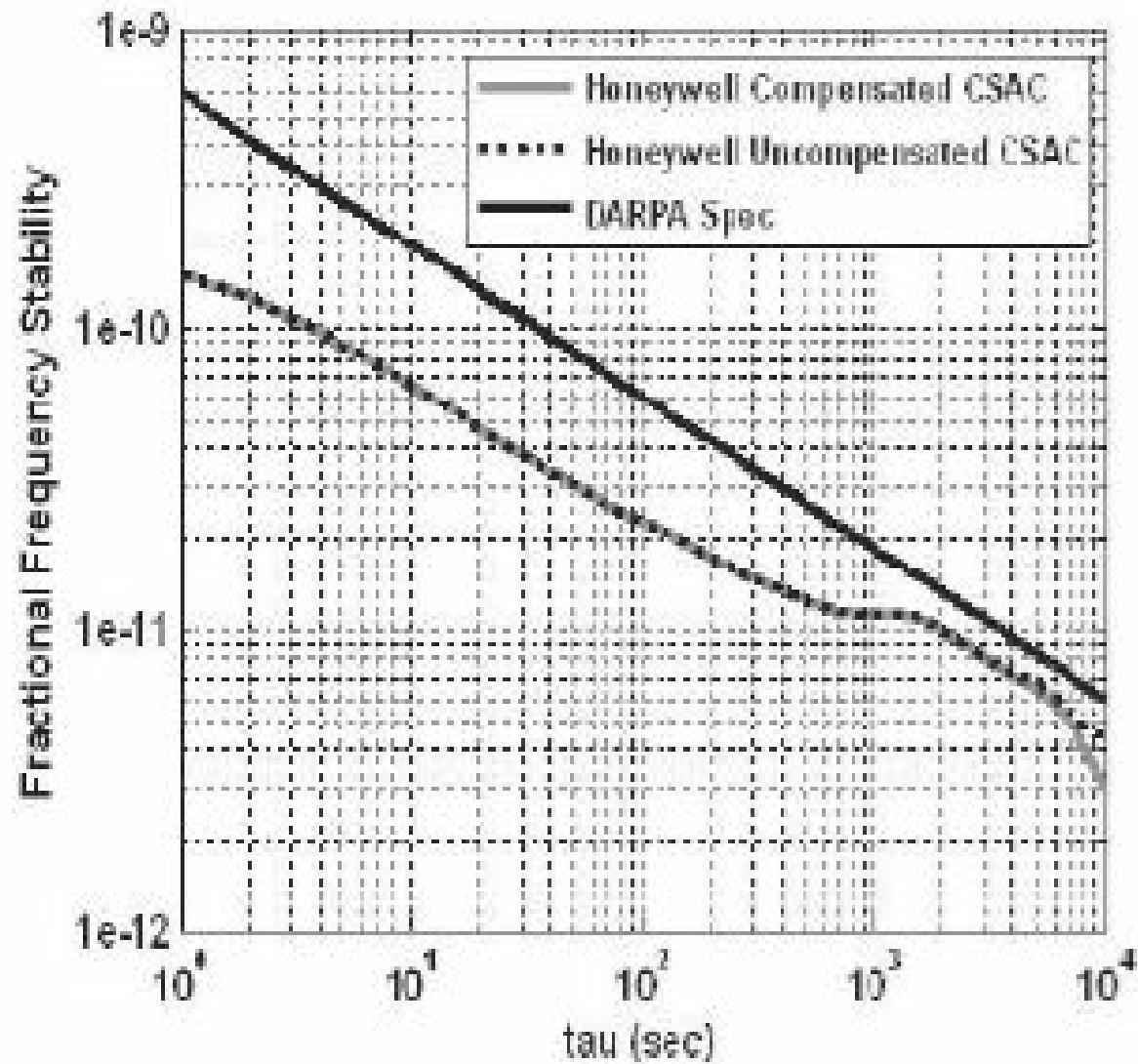


Figure 10: Allan Deviation of Honeywell's CSAC.

## CONCLUSIONS

With the advances made through DARPA's CSAC program, the technical feasibility and marketability of Chip-Scale Atomic Clocks are no longer questioned. CSACs are being tested in a variety of end-user applications, they are being well-received, and they are being transitioned into production.

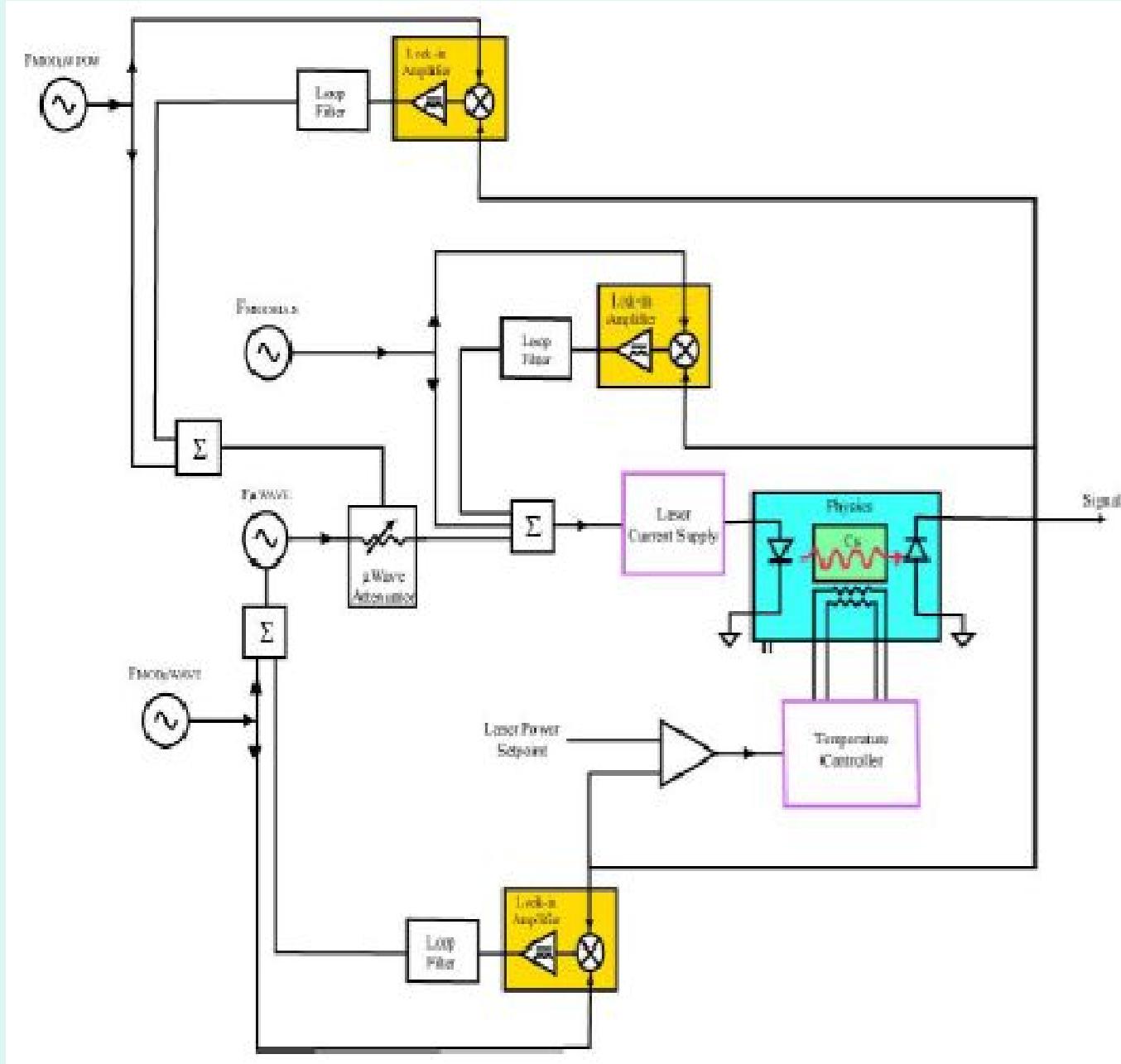


TABLE I. MAC POWER BUDGET

System	Component	Power
Signal Processing	MicroController	20 mW
	16-Bit DACs	13 mW
	Analog	8 mW
Physics	Heater Power	7 mW
	VCSEL Power	3 mW
	C-Field	1 mW
Microwave/RF	4.6 GHz VCO	32 mW
	PLL	20 mW
	10 MHz TCXO	7 mW
	Output Buffer	1 mW
Power Regulation & Passive Losses		13 mW
Total		125 mW

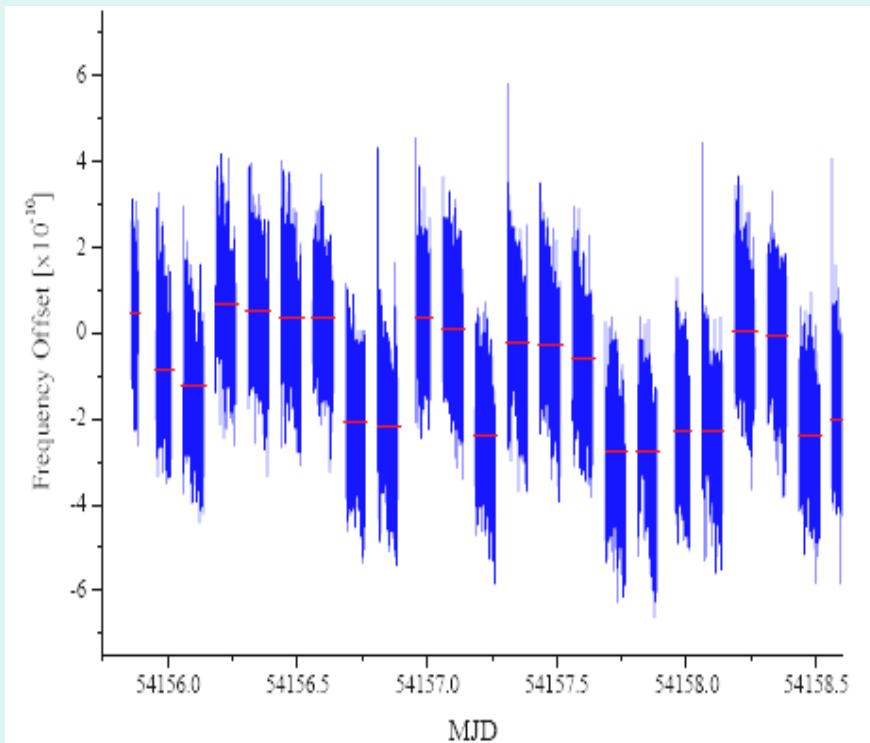


Figure 10. SN312 Retrace data

# **ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ АТОМНЫХ КПН-ЧАСОВ**

- 1. ДЛИНА ВОЛНЫ:**  $\lambda = 894,3 \text{ нм } (D_1 / Cs)$
  - 2. МОЩНОСТЬ:**  $P_{cw} = 1 \text{ мВт}$
  - 3. ЧАСТОТА РЕЛАКС. КОЛ.**  $f_0 = 5 \text{ ГГц}$
  - 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЧ МОДУЛ.**  $\eta_{\text{свч}} = 50\%$
  - 5. ДИНАМИЧЕСКАЯ ОДНОЧАСТ.**
  - 6. ОТСУТСТВИЕ ПЕРЕКЛ. МОД**
  - 7. ШИРИНА ЛИНИИ ГЕНЕРАЦИИ**  $D_n? 100 \text{ МГц}$
  - 8. ОСНОВНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ МОДА**
  - 9. УСТОЙЧИВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ**
  - 10. БОЛЬШАЯ РАСХОДИМОСТЬ**
- СИММЕТРИЧНОЕ ПОЛЕ (предпочтительно)**

# Источники шумов

- Дробовой и технический шумы тока накачки
- Дробовой шум в излучении лазера
- Шумы разделения мод (продольных в обычных лазерах, поляризации – в VCSEL)
- Флуктуации и дрейф температуры лазера
- Флуктуации и дрейф температуры ячейки
- Преобразование частотных флюкт. лазера в амплитудные
- Фазовые шумы СВЧ генератора
- Амплитудные шумы СВЧ генератора
- Оптические сдвиги

# Метрология $\omega$ и $t$ – горячие направления

## I. СВЧ диапазон

- Фонтаны
- Малогаритные атомные КПН-часы

## II. Оптический диапазон

- Ионы в ловушках
- Атомы в решетках (**магическая длина волны**)

## III. Генератор Гребенки частот

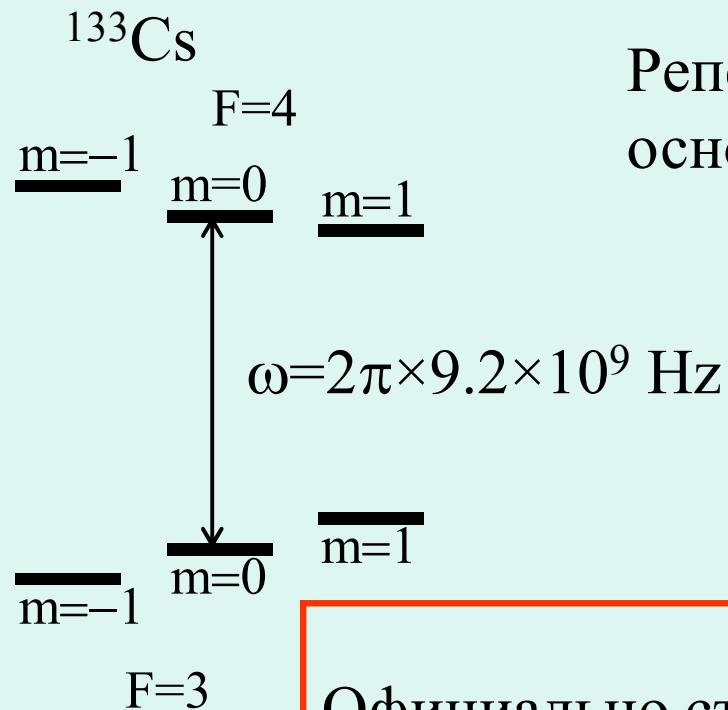
## Лучшие прецизионные кварцевые генераторы

Объем	$> 50 \text{ см}^3$
Энергопотребление	$\approx 3 \text{ Вт}$
Стабильность за час	$10^{-10}$

## Атомные (КПН)часы (*ТЗ DARPA*)

Объем	$> 1 \text{ см}^3$
Энергопотребление	$\approx 30 \text{ мВт}$
Стабильность за час	$10^{-11}$

# Первичный СВЧ стандарт



Репер – 0-0 переход между СТ подуровнями  
основного состояния Cs или Rb

Официально стабильность порядка

$$\frac{\Delta \text{Щ}}{\text{Щ}} \sim 10^{-14} - 10^{-15}$$

Ширина линии в фонтане порядка 1Гц. Частота  $\sim 10^{10}$ .  
Чтобы достичь  $10^{-15}$  надо «привязываться» к вершине  
опорного резонанса с точностью  $10^{-6}$  ОЧЕНЬ ТРУДНО!

# ОПТИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ

Последние 15 лет два основных направления:

- 1. Одиночный ион в ловушке**
- 2. Охлажденные атомы.**

В оптическом диапазоне частота  $10^{14} - 10^{15}$  и более реально достичь

$$\frac{\Delta \text{Щ}}{\text{Щ}} \sim 10^{-15} - 10^{-16}$$

В ПЕРСПЕКТИВЕ:

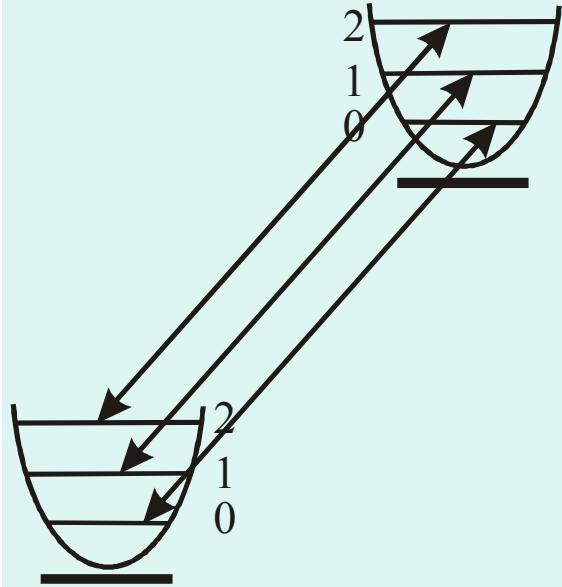
$$\frac{\Delta \text{Щ}}{\text{Щ}} \sim 10^{-17} - 10^{-18}$$

# ПЛАН

- Метрология  $\omega$  и  $t$  – горячие направления
- Дипольные ловушки на **магической  $\lambda$**
- Кварцевые генераторы и КПН часы
- КПН на пальцах
- Требования к бихроматическому излучению
- Контраст:  $D_2$ ,  $D_1$  – ловушечные состояния
- Мини-дискриминатор
- Оптические сдвиги
- Миничасы – **made in Honeywell**



# ИОНЫ В ЛОВУШКЕ



## ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА:

1. Для глубоких потенциальных ям нет эффектов Доплера и отдачи. Переходы происходят только между подуровнями с одинаковыми  $n$ .  
 $\Omega_{\text{probe}} < \omega_{\text{vib}}$
2. Потенциал совпадает для всех колебательных уровней: нет сдвигов частоты

Ширина линии  $\sim 6\text{Гц}$

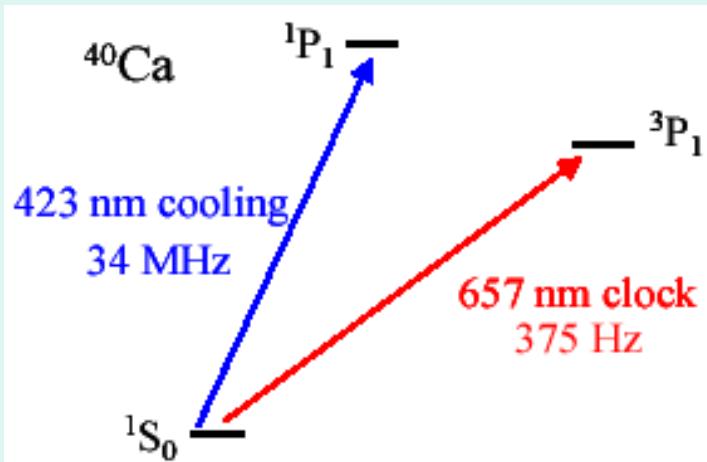
Лучшие результаты (W. H. Oskay, et al., PRL 97, 020801 (2006)):

Оптический стандарт на УФ переходе одиночного, laser-cooled иона ртути имеет относительную погрешность частоты менее  $7.2 \times 10^{-17}$ .

## ОСНОВНЫЕ НЕДОСТАТКИ:

Из-за кулоновского взаимодействия можно работать только с одним ионом в ловушке: большое время детектирования резонанса.

# АТОМЫ



РЕПЕР – интеркомбинационный переход  
 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$  в атомах щел.-зем элементов

Лучшие результаты для Ca (PTB, NIST):  
 $10^{-15}$  за 1 с

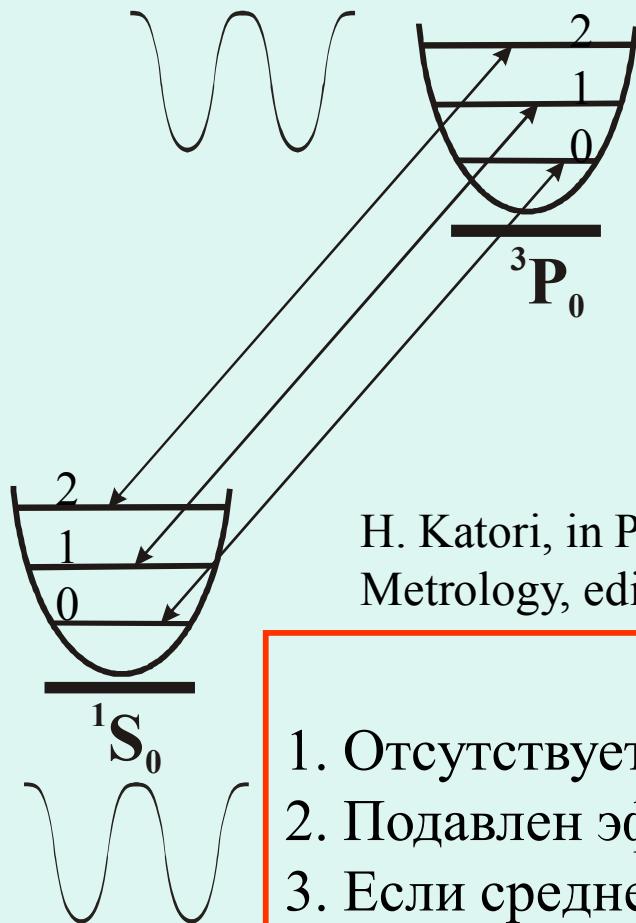
**ГЛАВНОЕ ДОСТОИНСТВО:**  
Много атомов – большой сигнал

## ГЛАВНЫЕ НЕДОСТАТКИ:

Для свободных атомов эффекты Доплера и отдачи приводят к асимметрии и сдвигу резонанса. Ширина резонанса недостаточно мала (400 Гц).

**Такие стандарты едва ли могут конкурировать со стандартами на одиночных ионах**

## Оптическая дипольная ловушка: магическая $\lambda$



Для магической  $\lambda$  квадратичные Stark сдвиги в основном ( $^1S_0$ ) и возбужденном ( $^3P_0$ ) состояниях равны, так что частота перехода между колебательными подуровнями не зависит от интенсивности и равна невозмущенному значению.

Yb – 759 нм; Sr – 813 нм; Ca – 700 нм; Mg – 460 нм

H. Katori, in Proceedings of the Sixth Symposium on Frequency Standards and Metrology, edited by P. Gill (World Scientific, Singapore, 2002), pp. 323–330.

### ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

1. Отсутствует Доплеровское уширение
2. Подавлен эффект отдачи
3. Если среднее число атомов в одной яме меньше 1, нет столкновительного сдвига, но ям много!

Таким образом, здесь сочетаются преимущества ионной ловушки и нейтральных атомов (их много).

## Solitary DLs

- Low frequency AM noise in red DL (together with Datex Ohmeda for applications in Oxymetry)
- Development of single-mode DL with a short ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ) cavity for small atomic clocks based on CPT ( $\lambda = 895$  or  $795 \text{ nm}$ )
- Noise and modulation properties of a short cavity DL