

「重力波研究交流会」

日 時： 平成21年12月4日(金)

場 所： 東京大学本郷キャンパス理学部1号館

光格子時計の紹介と今後の展望について

東京大学大学院工学系研究科香取研究室

JST-CREST

高本 将男

Outline

- 時間・周波数標準のイントロダクション：“原子時計”
 - 現在の秒の定義：“セシウム原子時計”
 - 次世代の原子時計：“イオン時計” or “光格子時計”
- “レーザー冷却 & トラップ”の原理
- 光格子中の極低温原子の超精密分光
 - 周波数安定化光源の開発
- “光格子時計”のパフォーマンスの評価
 - 絶対周波数測定 (OLC vs. Cs clock (SI second))
 - 2台の光格子時計間の直接周波数比較 (1D vs. 3D)
- 今後の展望: 水銀光格子時計, クライオ光格子時計
- まとめ

Outline

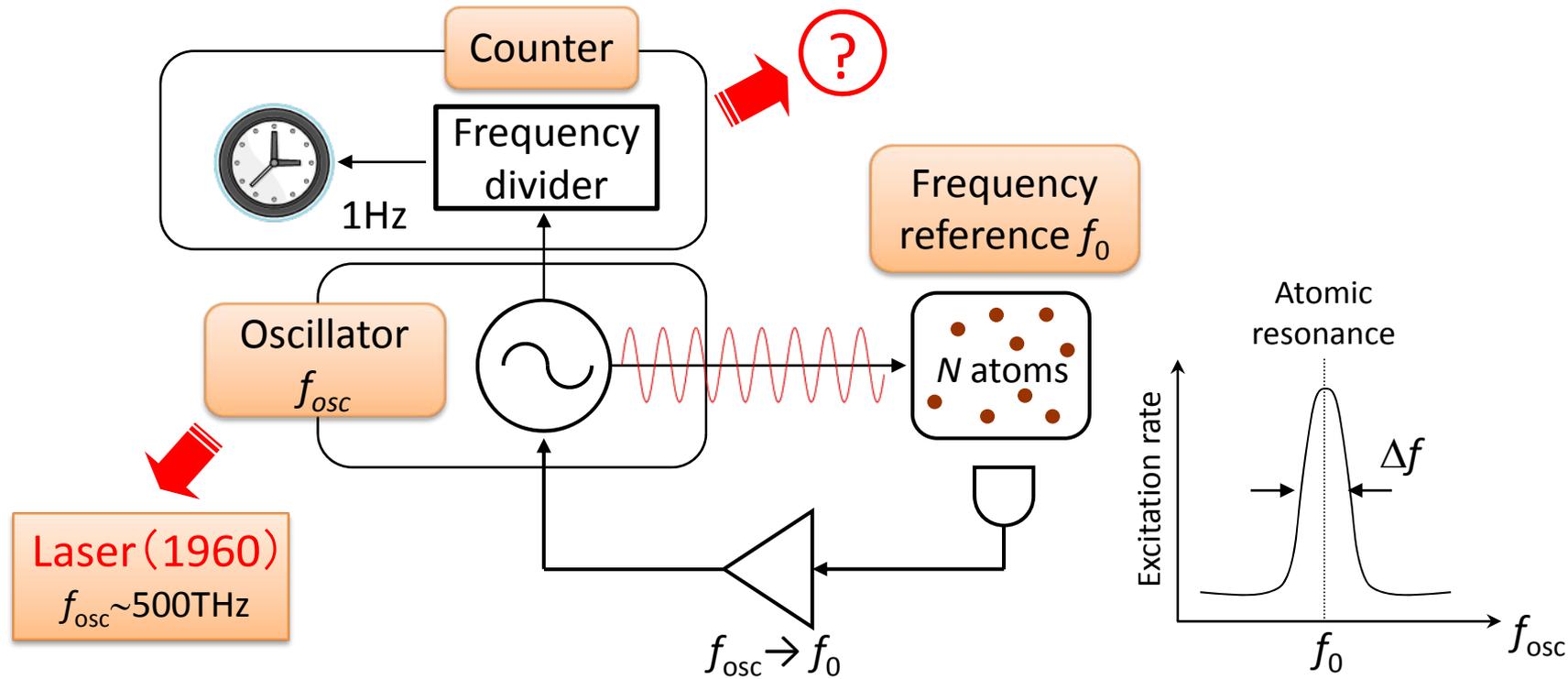
- 時間・周波数標準のイントロダクション：“原子時計”
 - 現在の秒の定義：“セシウム原子時計”
 - 次世代の原子時計：“イオン時計” or “光格子時計”
- “レーザー冷却 & トラップ”の原理
- 光格子中の極低温原子の超精密分光
 - 周波数安定化光源の開発
- “光格子時計”のパフォーマンスの評価
 - 絶対周波数測定 (OLC vs. Cs clock (SI second))
 - 2台の光格子時計間の直接周波数比較 (1D vs. 3D)
- 今後の展望: 水銀光格子時計, クライオ光格子時計
- まとめ

時計研究の意義

- 時間・周波数：最も精密に計測できる物理量
 - “1秒の定義”はSI単位系のかなめ(長さ、電圧も時間・周波数に還元)
 - GPSによる測位・電波時計・ネットワークの同期, 電波天文学・VLBI
 - 精密分光: 量子力学への貢献、相対論検証、物理定数の恒常性
- 周波数計測とは：基準となる時計との比較
 - 現在の“秒”の定義であるCs原子時計との周波数比較
 - 15桁強の周波数計測が実現
- 近年の周波数計測・伝送技術の発展
 - 光周波数コム: 光周波数のシンセサイザー (Hänsch, Hall, 2005年ノーベル賞)
⇒ 19桁の周波数比較を実現
(L. Ma et al., Science 303, 1843 (2004))
 - 光ファイバによる高安定・高精度長距離周波数伝送
⇒ 19桁で長距離(251km)周波数伝送を実現
(N. R. Newbury et al., Opt. Lett. 32, 3056 (2007))
(Fiber link & comb : I. Coddington et al., Nature Photonics 1, 283 (2007))

これらのツールの性能をいかにすには、より正確かつ安定な時計 ($\delta f/f_0 \rightarrow 10^{-19}$) が必要

原子時計の仕組み



原子時計の性能

- 正確さ $\frac{\delta f}{f_0}$ (δf : 外乱による周波数シフト)

- 安定度 (アラン分散) $\sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{Q} \frac{1}{S/N} = \frac{\Delta f}{f_0} \frac{1}{\sqrt{N\tau}}$

e.g. セシウム原子泉時計

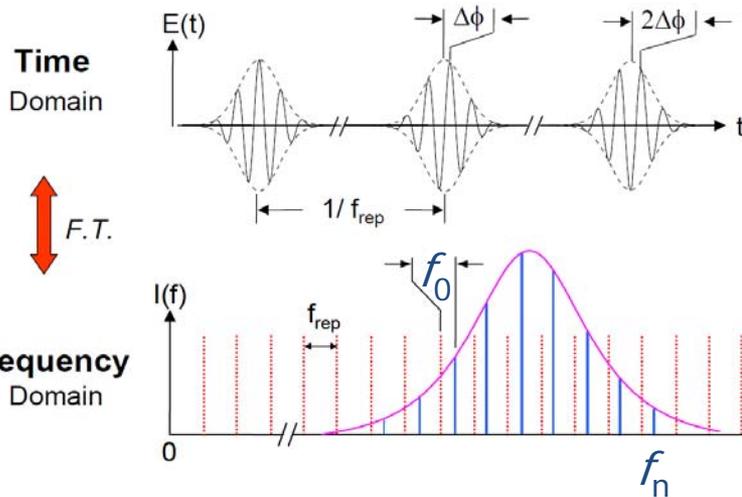
$$\frac{\delta f}{f_0} = 3 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_y(\tau) = 4 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau}$$

$\tau = 10,000 \text{ s}$ の積算時間で
 3×10^{-16} の安定度に到達

光周波数コムー 周波数軸上の“ものさし”

モード同期超短パルスレーザー



The Fourier transformation between time and frequency axes

$$f_n = n f_{\text{rep}} + f_0 \quad , \quad f_0 = (\Delta\phi/2\pi) f_r$$

Ref.: Th. Udem *et al.*, *Phy. Rev. Lett.*, 82, 3568 (1999).

Ref.: D. J. Jones *et al.*, *Science*, 288, 635 (2000).

周波数軸上に等間隔に並ぶモードにより、光周波数 f_n ($\sim 100\text{THz}$) をラジオ周波数 f_{rep} ($\sim 100\text{MHz}$) まで分周できる

10^{-19} の精度での周波数比較がすでにデモンストレート済み

Ref.: L. Ma *et al.*, *Science* 303, 1843 (2004)

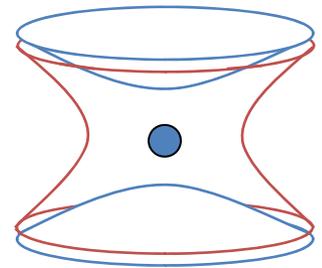
(T. W. Hänsch & J. L. Hall: the Nobel prize in Physics 2005)

光時計の有力な候補

単一イオン時計

– Hg⁺(NIST), Yb⁺(NPL,PTB), Sr⁺(NPL,NRC), Al⁺(NIST), In⁺(MPQ)...

イオントラップ中に強く束縛することによるドップラーシフトの抑制
衝突シフトがない

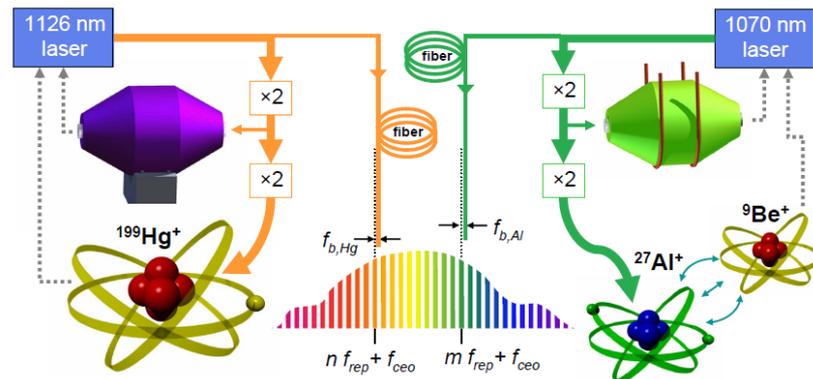


Very accurate clock : 正確さ (Accuracy) $\delta f / f_0 \sim 10^{-18}$

Al⁺-Hg⁺ イオン時計間の17桁の周波数比較 (NIST):
T. Rosenband, et al., *Science* 319, 1808 (2008)

Frequency Ratio of Al⁺ and Hg⁺ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place

T. Rosenband,^{*} D. B. Hume, P. O. Schmidt,[†] C. W. Chou, A. Bruschi, L. Lorini,[‡] W. H. Oskay,[§] R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker,^{||} S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, J. C. Bergquist



光格子中の原子集団を用いる時計「光格子時計」

– Sr (Tokyo, JILA, SYRTE, PTB, LENS, NICT, NPL, NIM),
Yb(NIST, NMIJ/AIST, INRIM, Washington, KRISS), Hg(Tokyo, SYRTE)

光の定在波の作るシュタルクポテンシャルを利用し、各格子点に強く束縛された中性原子 ($N \sim 10^6$ 個) を同時観測することにより、

ドップラーシフトの抑制

原子間の衝突シフトの抑制

$N=10^6$ 個の原子による高い安定度

「単一イオン時計」を 10^6 台同時にオペレート

e.g.) 18桁の安定度を得るには、

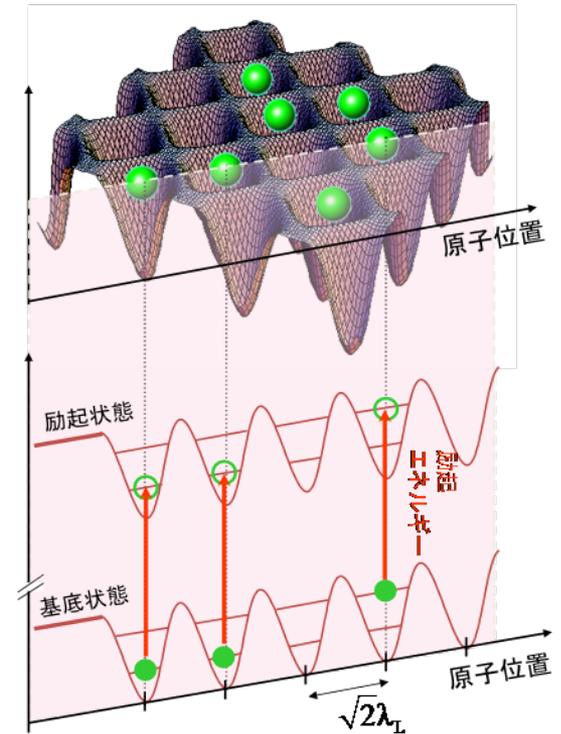
$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx \frac{\delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N}}$$

$$= \frac{1\text{Hz}}{10^{15}\text{Hz}} \frac{1}{\sqrt{1/\text{s} \times 10^6\text{s}}} = \frac{1\text{Hz}}{10^{15}\text{Hz}} \frac{1}{\sqrt{10^6/\text{s} \times 1\text{s}}}$$

単一イオンを10日間積算

10^6 個の原子を1秒間積算

18桁レベルで正確かつ高安定な原子時計

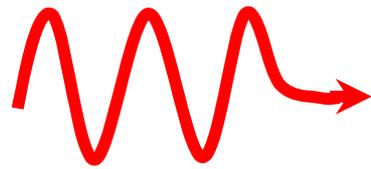


Outline

- 時間・周波数標準のイントロダクション：“原子時計”
 - 現在の秒の定義：“セシウム原子時計”
 - 次世代の原子時計：“イオン時計” or “光格子時計”
- “レーザー冷却 & トラップ”の原理
- 光格子中の極低温原子の超精密分光
 - 周波数安定化光源の開発
- “光格子時計”のパフォーマンスの評価
 - 絶対周波数測定 (OLC vs. Cs clock (SI second))
 - 2台の光格子時計間の直接周波数比較 (1D vs. 3D)
- 今後の展望: 水銀光格子時計, クライオ光格子時計
- まとめ

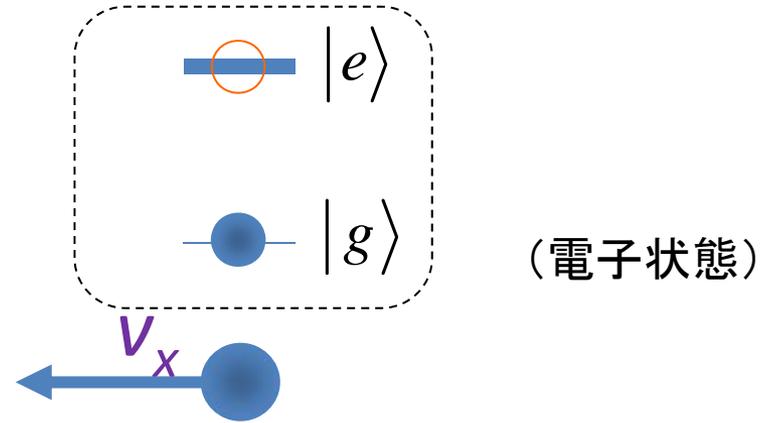
レーザー冷却:

Momentum exchange between atom and photon



光子の運動量

$$p = h/\lambda$$



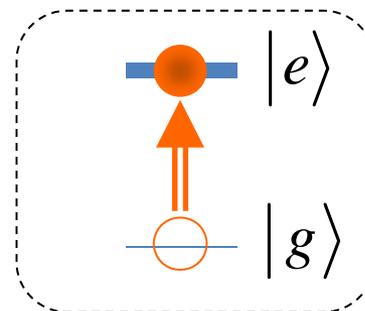
(電子状態)

原子の運動量

$$p = mv_x$$

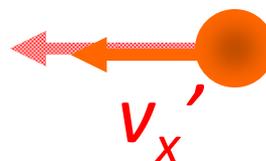
レーザー冷却:

Momentum exchange between atom and photon



(電子状態)

光子の吸収



原子の運動量

$$p' = mv_x - h/\lambda$$

1 光子の吸収による速度変化:

$$\Delta v_x = v_x' - v_x = (h/\lambda)/m \sim \text{cm/s}$$

N 光子の吸収放出:

$$N\Delta v_x = N (h/\lambda)/m \sim 100 \text{ m/s} @ N=10^4$$

レーザー光による熱原子の減速

$$\frac{1}{2}k_B T = \frac{1}{2}mv_x^2$$

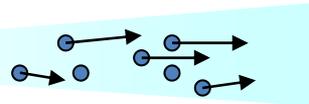
原子オーブン

$$T = 800 \text{ K}$$



原子の速度

$$v \sim 300 \text{ m/s}$$



原子に共鳴した
レーザー光



$$ma = \frac{\Delta p}{\Delta t} \approx \frac{h/\lambda}{2\tau} \Rightarrow a \approx \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}/461 \text{ nm}}{(1.5 \times 10^{-25} \text{ kg}) \times 2 \times 5 \text{ ns}} = 10^6 \text{ m/s}^2 \gg g$$

大きな減速

$$T = \frac{v_0}{a} \sim 0.3 \text{ ms}$$

停止時間

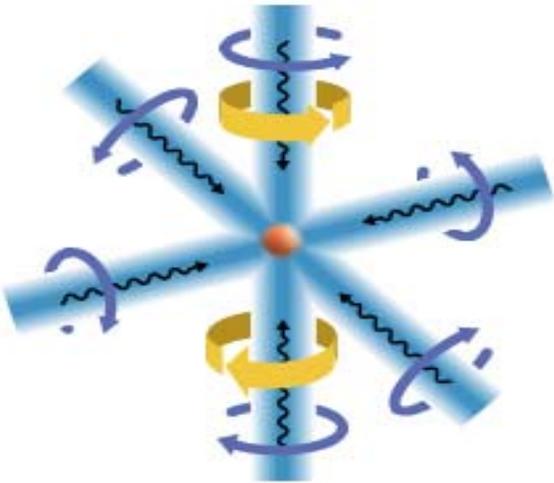
$$L = \frac{1}{2}aT^2 \sim 4 \text{ cm}$$

停止距離

小さな真空槽内で熱原子の運動を止めることができる

Laser cooling and trapping of atomic gas

- Manipulation of atomic motion with photon momentum
- $T \sim 10^{-6}$ K, $n \sim 10^{12}/\text{cm}^3$ ultracold atoms



The Nobel Prize in Physics 1997
S. Chu , C. C-Tannoudji , W. D. Phillips
"for development of methods to cool and trap atoms with laser light"

The Nobel Prize in Physics 2001
E. A. Cornell, W. Ketterle, C. E. Wieman
"for the achievement of BEC in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates"

どの元素が精密分光に向いているか?

Periodic Table of the Elements

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn								

■ hydrogen
■ alkali metals
■ alkali earth metals
■ transition metals
■ poor metals
 nonmetals
■ noble gases
■ rare earth metals

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

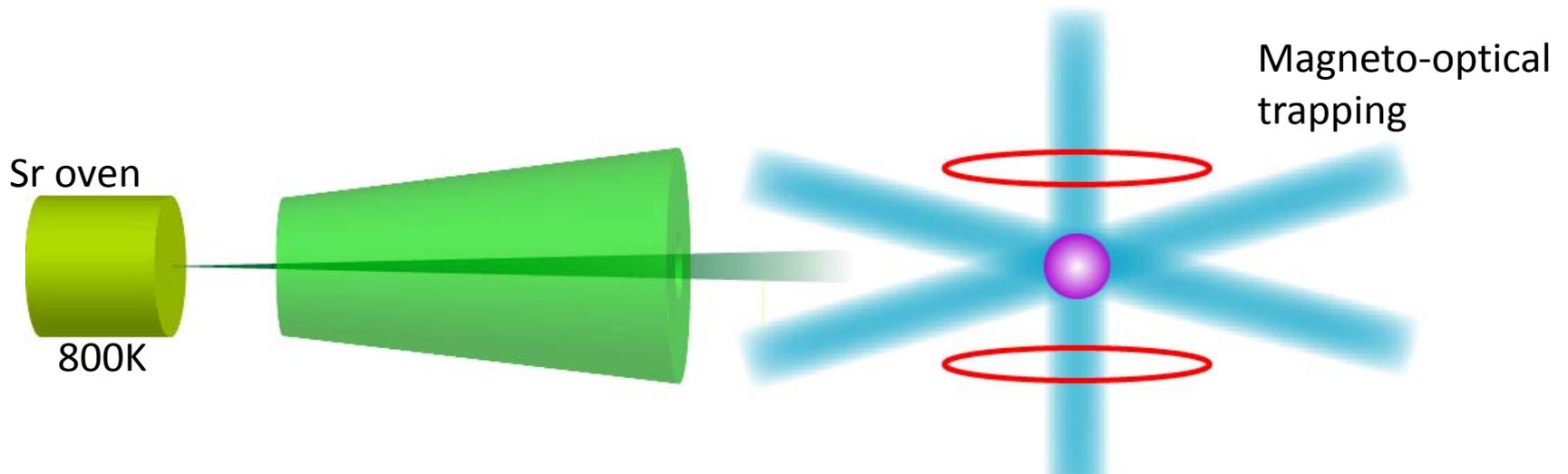
Alkali metals

Ground state has an electronic spin
 Easy to manipulate with B-field
 Magnetic trapping & Creation of BEC
 Popular elements for laser cooling

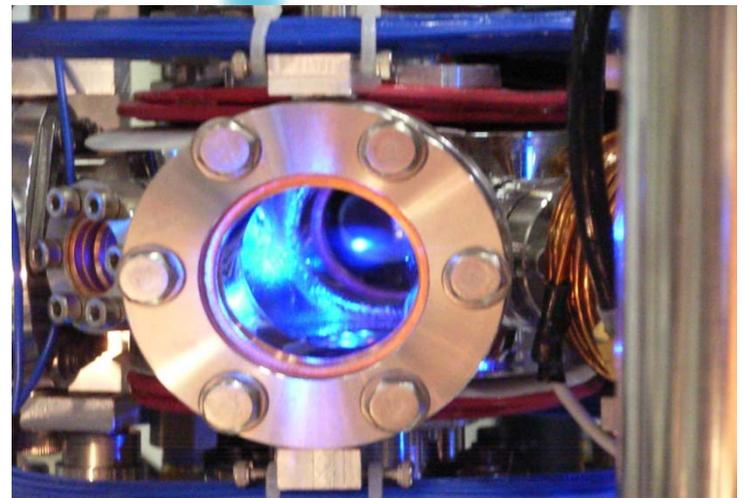
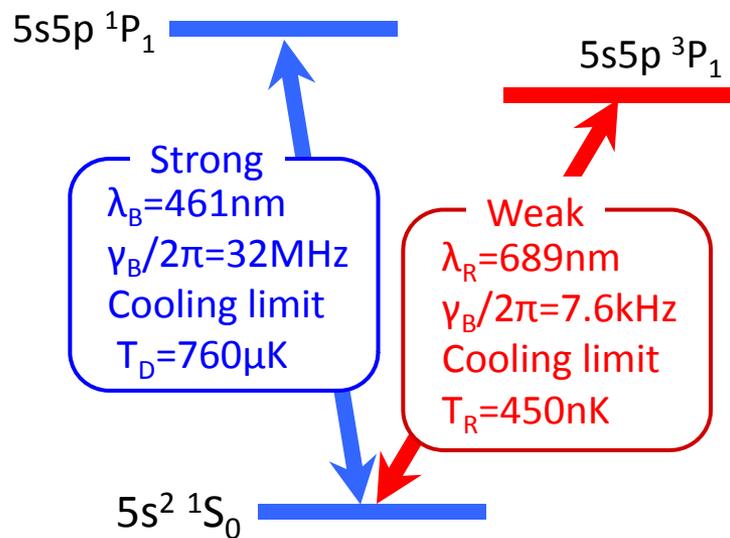
Alkali earth metals

Ground state has no electronic spin
 Immune to B-field fluctuation
 Spin flipping transition:
 weak transition = high resolution
 Suitable for precision measurement

Sr原子のレーザー冷却とトラップ



Sr energy diagram



Cooling on strong transition ($^1S_0 - ^1P_1$)

$T \sim 1\text{mK}$

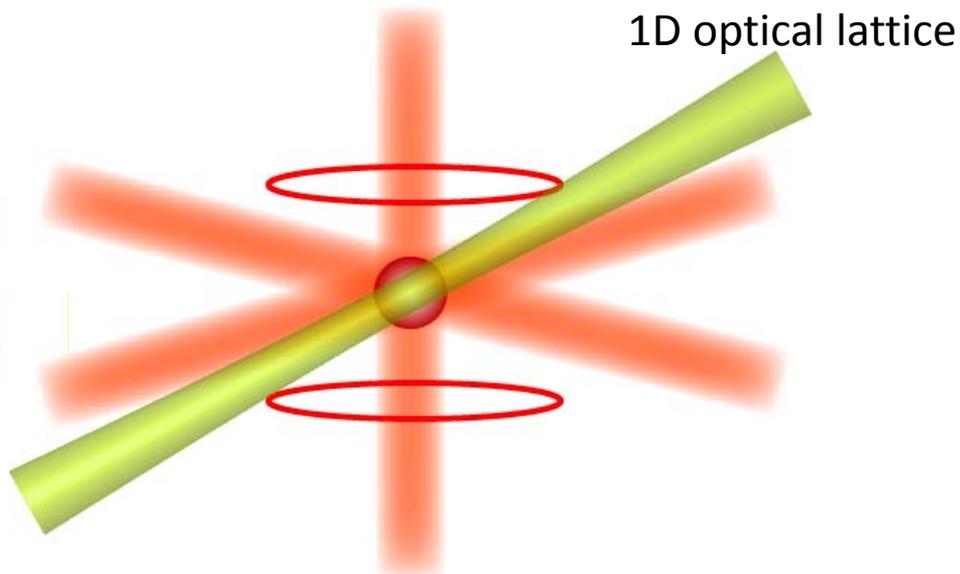
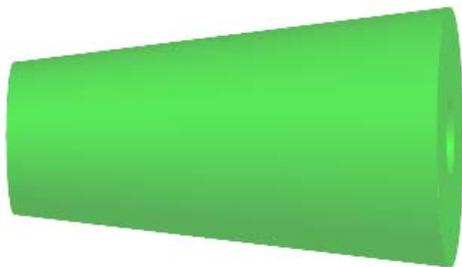
$N \sim 10^8$

Sr原子のレーザー冷却とトラップ

Sr oven



800K



Sr energy diagram

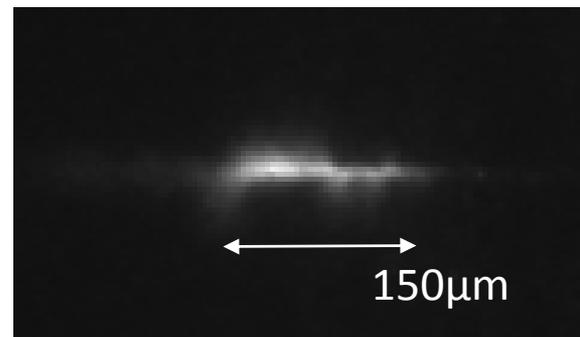
$5s5p\ ^1P_1$

$5s5p\ ^3P_1$

Strong
 $\lambda_B=461\text{nm}$
 $\gamma_B/2\pi=32\text{MHz}$
Cooling limit
 $T_D=760\mu\text{K}$

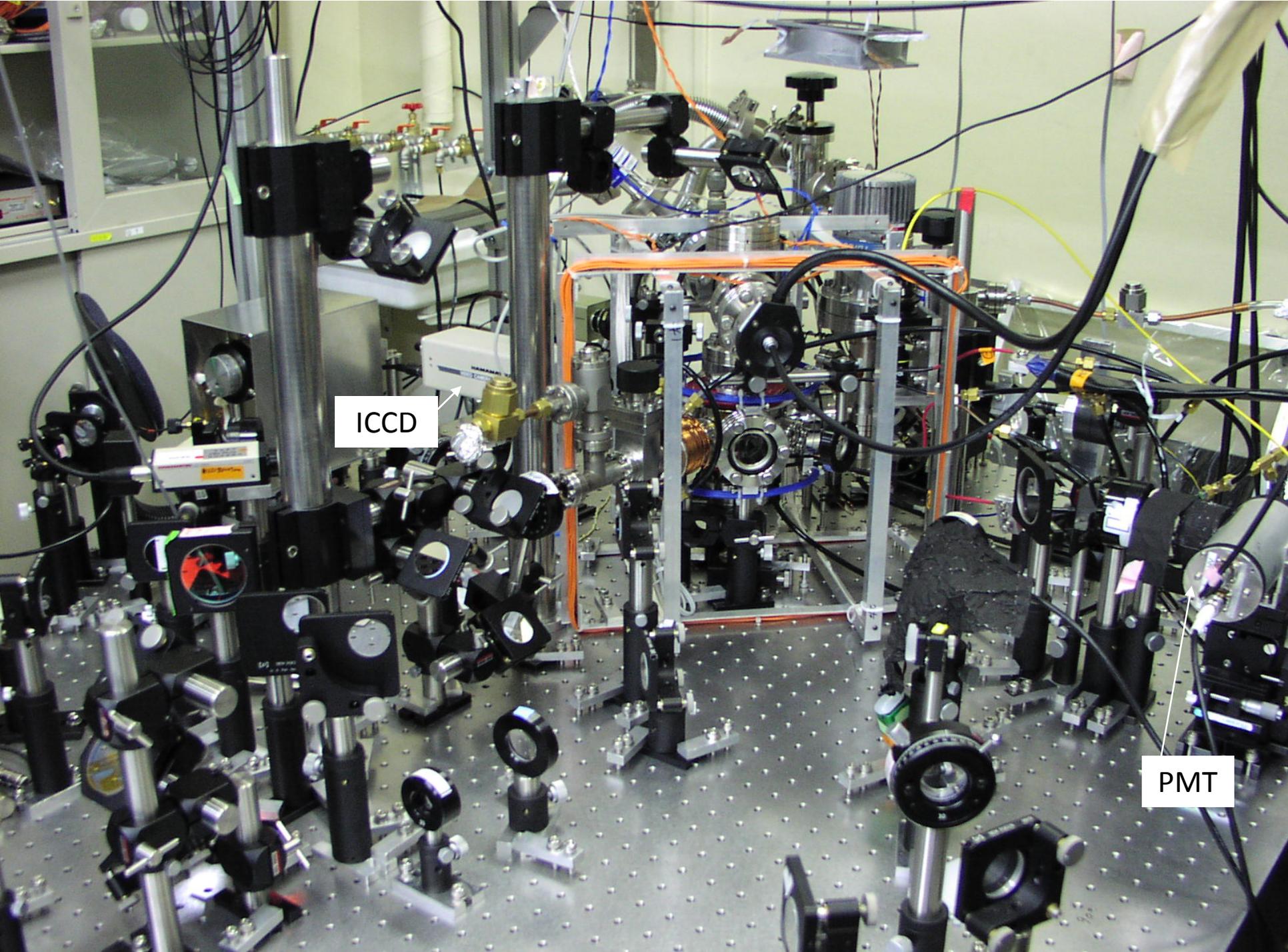
Weak
 $\lambda_R=689\text{nm}$
 $\gamma_R/2\pi=7.6\text{kHz}$
Cooling limit
 $T_R=450\text{nK}$

$5s^2\ ^1S_0$



Trapping in 1D optical lattice

$T\sim 2\mu\text{K}$ $N\sim 10^4$



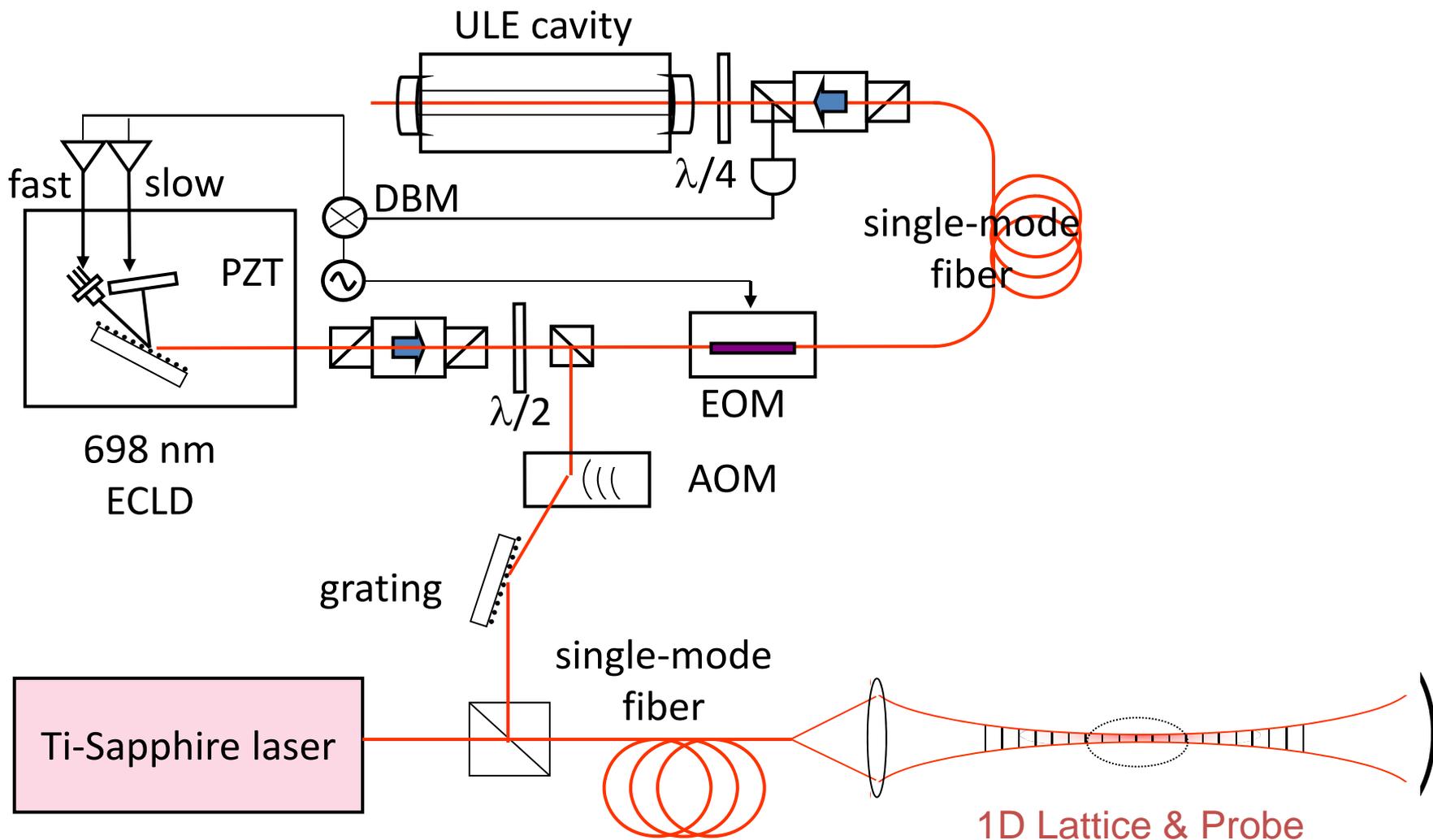
ICCD

PMT

Outline

- 時間・周波数標準のイントロダクション：“原子時計”
 - 現在の秒の定義：“セシウム原子時計”
 - 次世代の原子時計：“イオン時計” or “光格子時計”
- “レーザー冷却 & トラップ”の原理
- 光格子中の極低温原子の超精密分光
 - 周波数安定化光源の開発
- “光格子時計”のパフォーマンスの評価
 - 絶対周波数測定 (OLC vs. Cs clock (SI second))
 - 2台の光格子時計間の直接周波数比較 (1D vs. 3D)
- 今後の展望: 水銀光格子時計, クライオ光格子時計
- まとめ

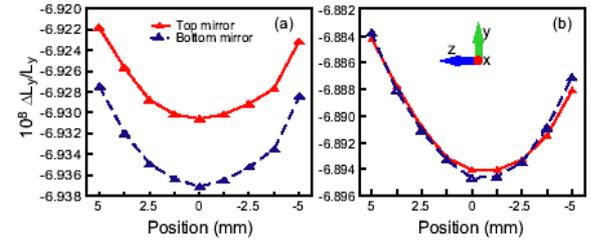
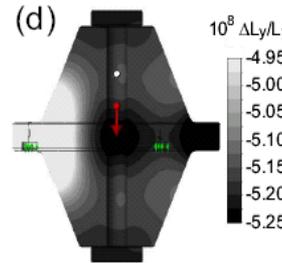
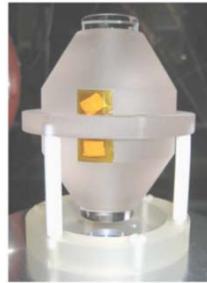
時計遷移分光用高安定化レーザーシステム



振動ノイズへの感度の低い共振器のデザイン

▪ JILA

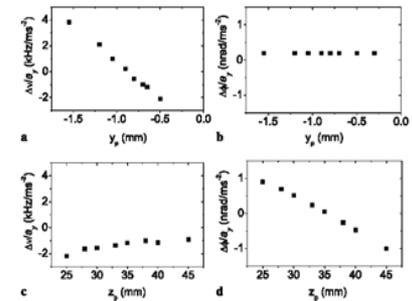
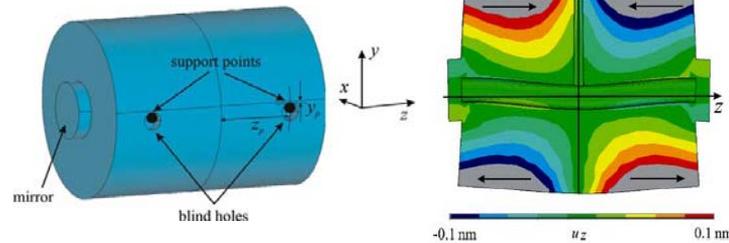
Vertical cavity: (JILA) M. Notcutt *et al.*, Opt. Lett. 30, 1815 (2005)
A. D. Ludlow *et al.*, Opt. Lett. 32, 641 (2007)



$$k_{\text{ver}} 10 \text{ kHz}/(\text{ms}^{-2})$$

▪ PTB

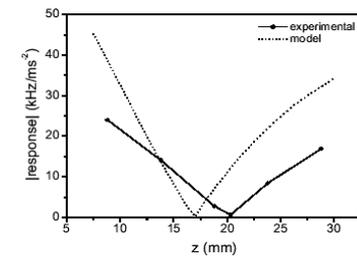
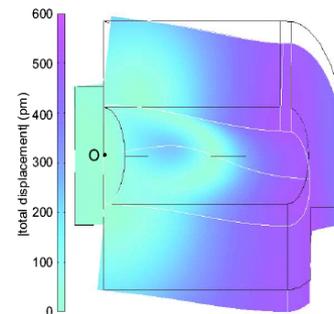
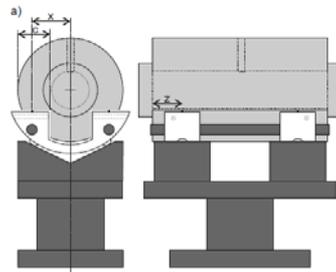
(PTB) T. Nazarova *et al.*, Appl. Phys. B: Lasers Opt. 83, 531 (2006)



$$k_{\text{ver}} 1.5 \text{ kHz}/(\text{ms}^{-2})$$

▪ NPL

Cut-out cavity: (NPL) Webster *et al.*, PRA 75, 011801 (2007)

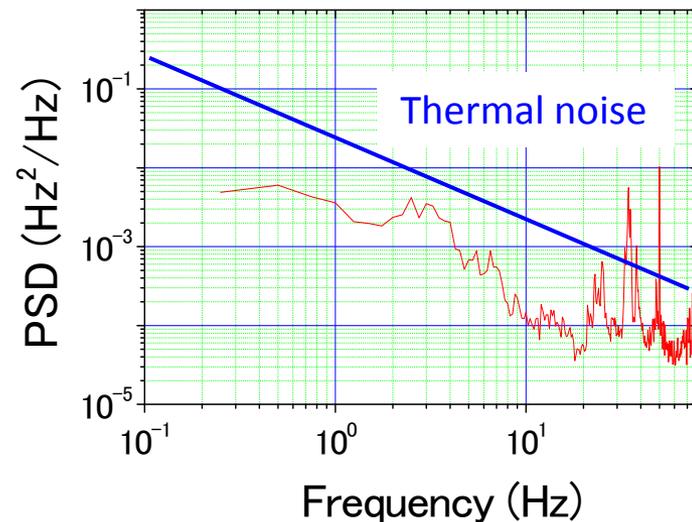
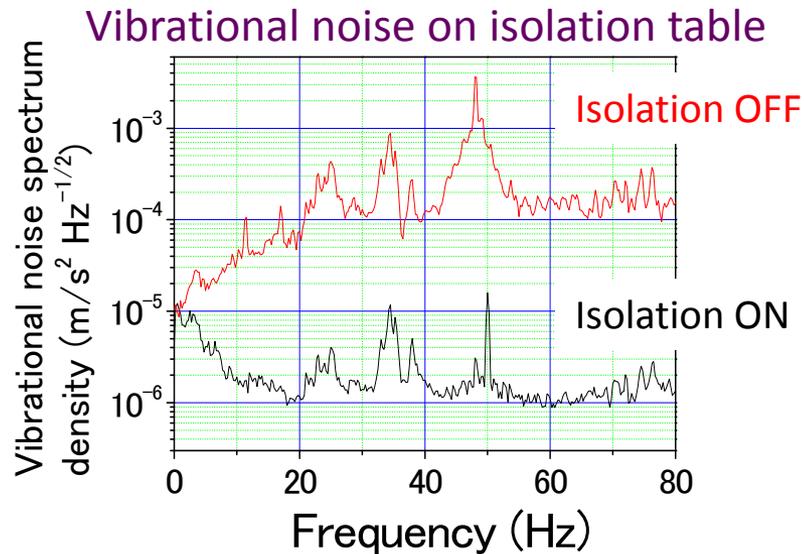
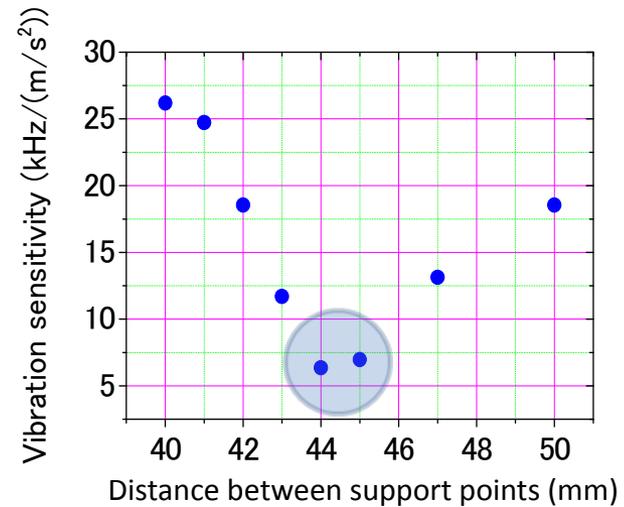


$$k_{\text{ver}} 0.1 \text{ kHz}/(\text{ms}^{-2})$$

振動ノイズへの感度の低い共振器のデザイン



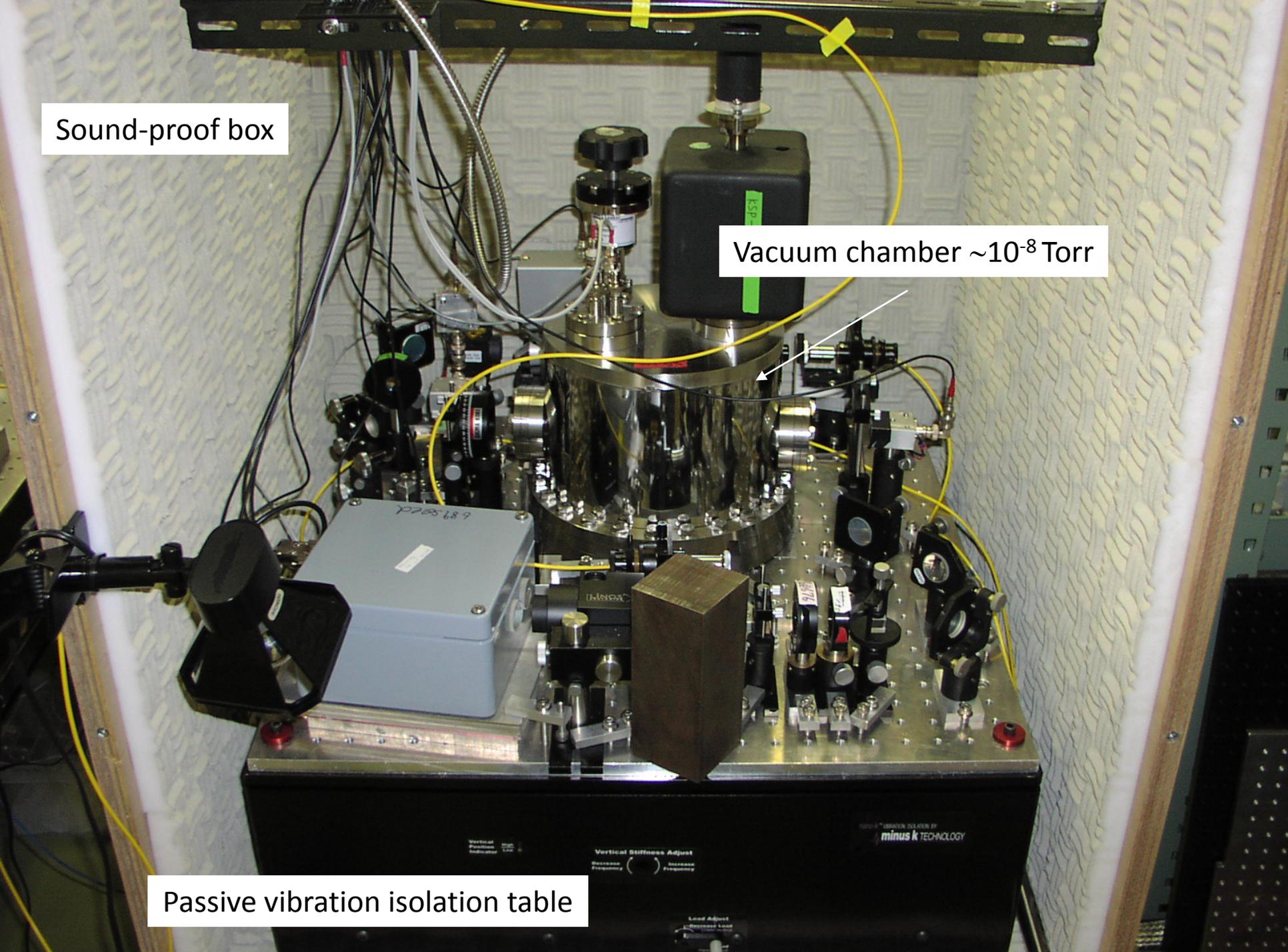
Vibration insensitive optical cavity with cut-out design: (NPL) Webster *et al.*, PRA 75, 011801 (2007)



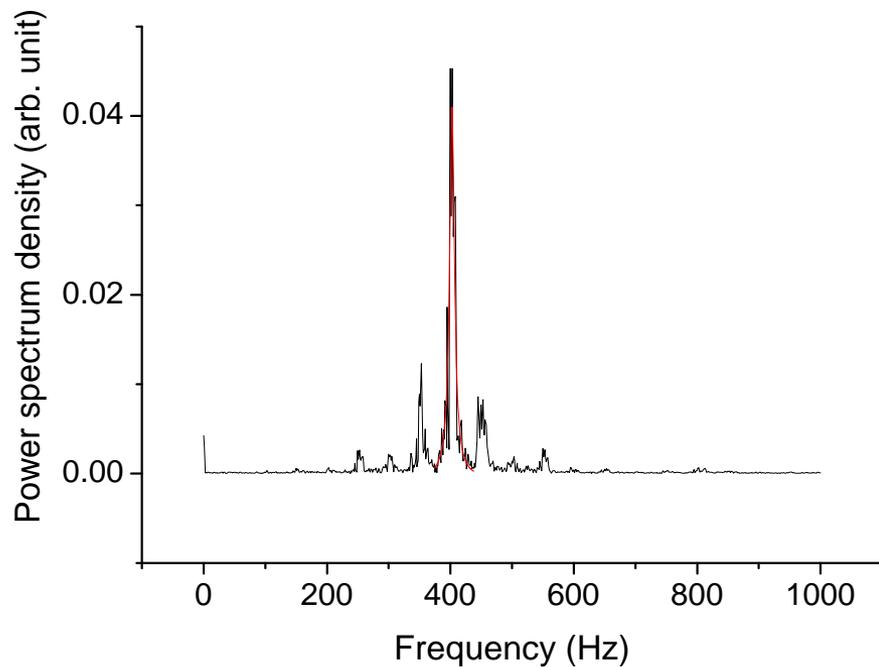
Sound-proof box

Vacuum chamber $\sim 10^{-8}$ Torr

Passive vibration isolation table

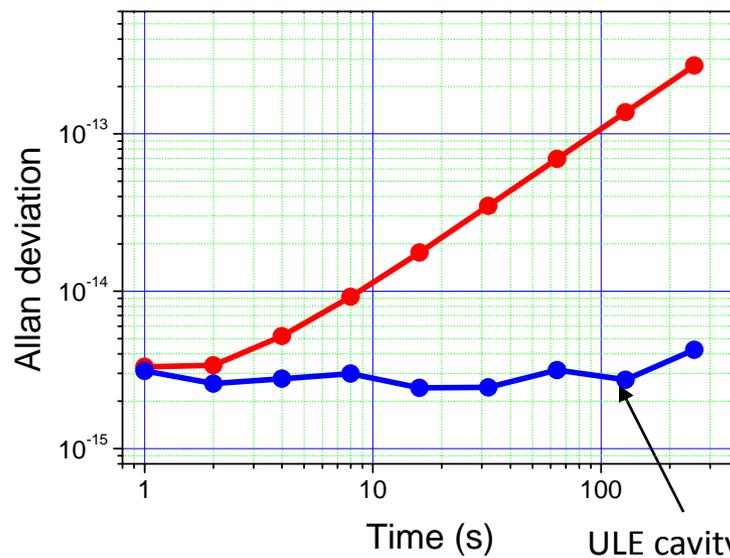


時計レーザーの性能評価



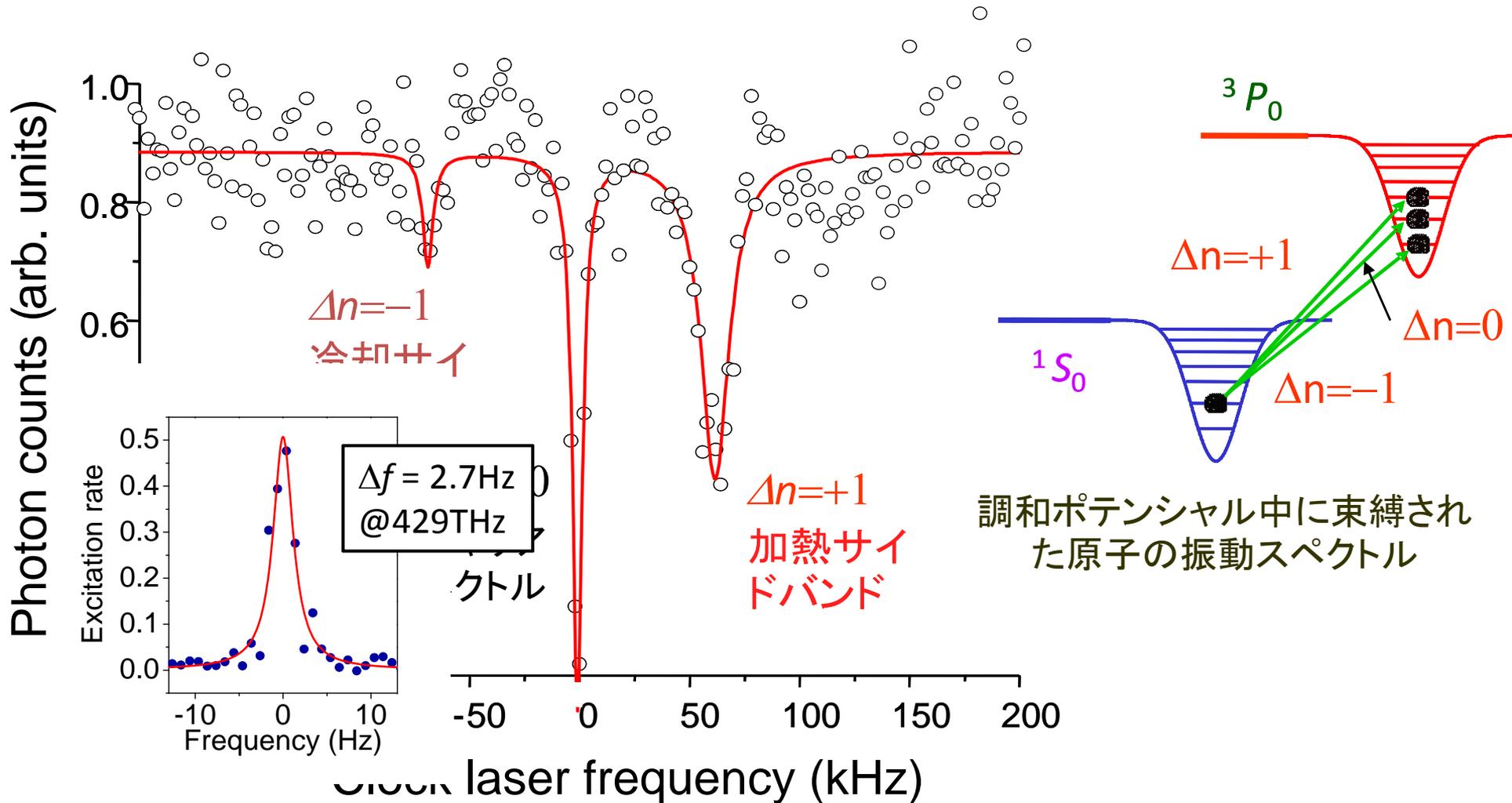
$$\Delta f_{beat} = 9.6 \text{ Hz} \quad (RBW = 1.25\text{Hz})$$

Allan deviation of the beat note between two lasers stabilized to vibration insensitive & sensitive cavities

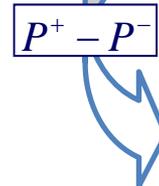
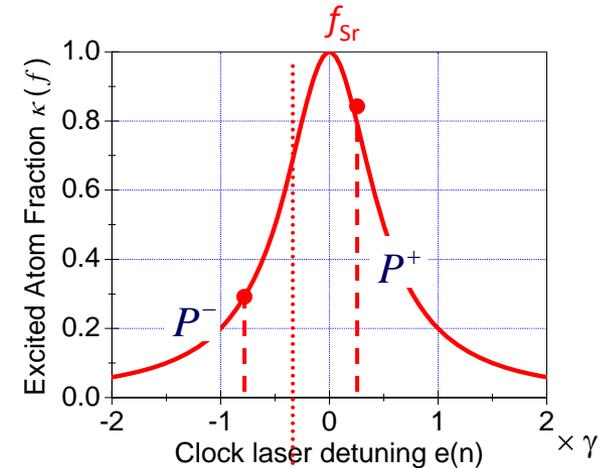
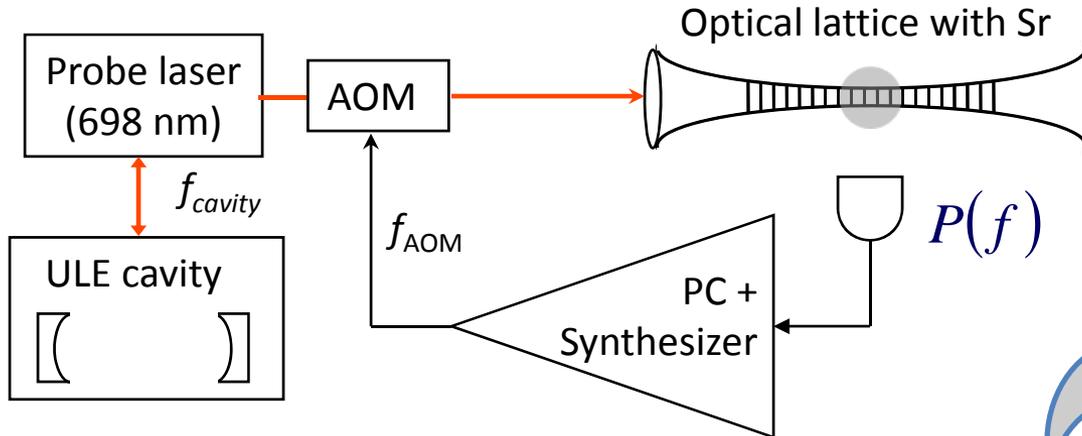


ULE cavity drift of 0.1-0.3 Hz/s due to thermal expansion is subtracted

光格子中の原子の精密分光



時計遷移への時計レーザーの周波数安定化

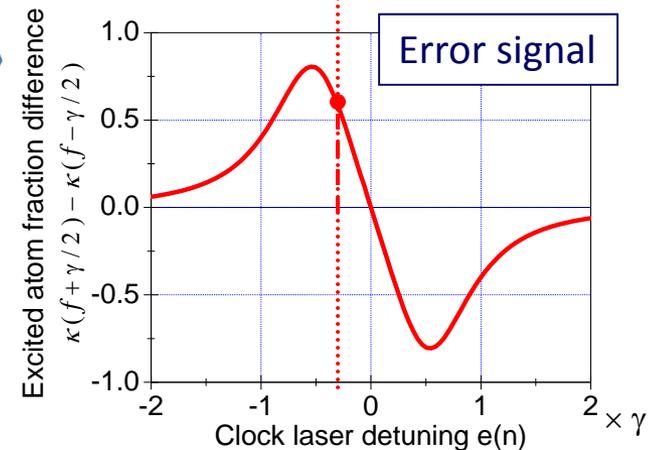


Digital servo loop with PC control

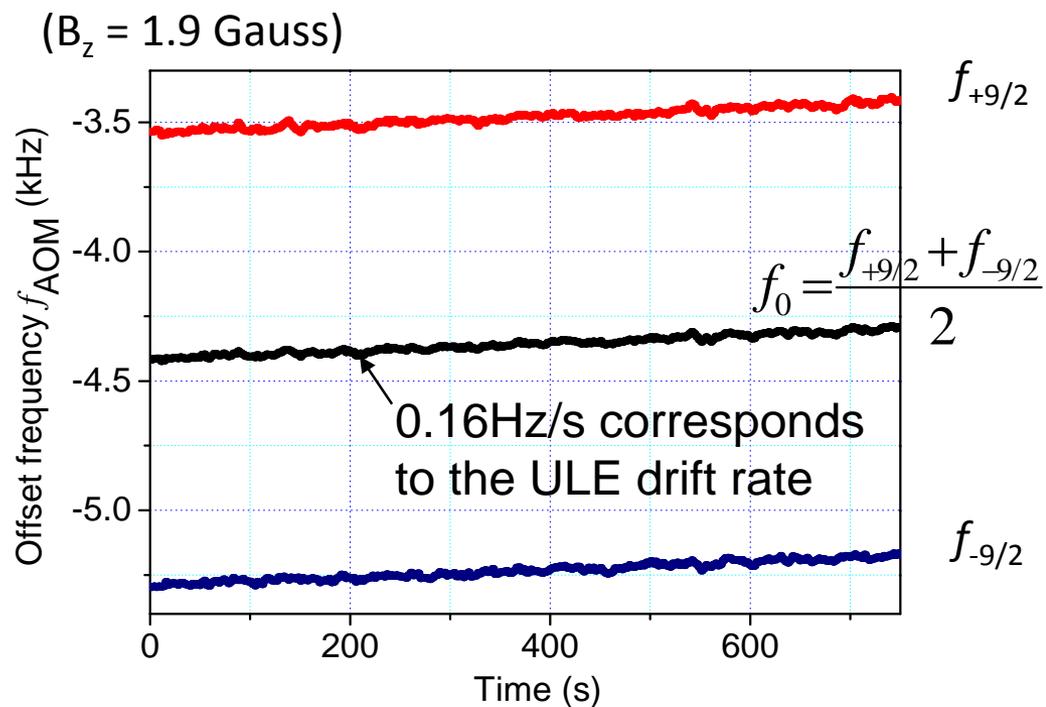
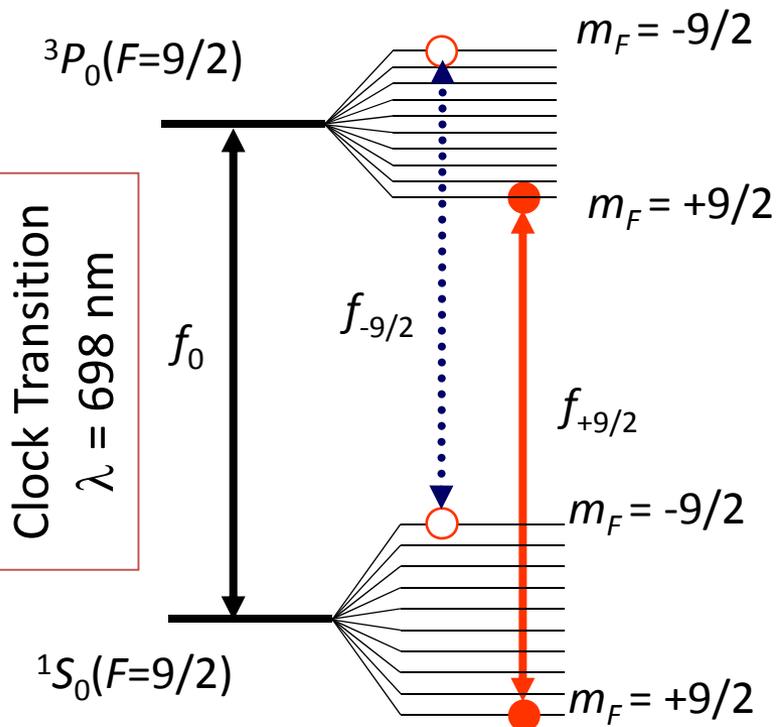
$$\begin{aligned}
 f_{Sr}(t_n) &= f_{cavity}(t_n) + f_{AOM}(t_n) \\
 f_{AOM}(t_n) &= f_{AOM}(t_{n-1}) + g \times \frac{\gamma}{2} \times (\kappa_+ - \kappa_-) \\
 &= f_{AOM}(t_{n-1}) + g \times \frac{\gamma}{2} \times e(n) \\
 &= f_{AOM}(t_0) + g \times \frac{\gamma}{2} \times \sum_{i=0}^n e(i)
 \end{aligned}$$

1st order integral feedback

Critical damping at $g=1$



時計遷移への時計レーザーの周波数安定化



Output : Atomic resonance frequency f_0

Outline

- 時間・周波数標準のイントロダクション：“原子時計”
 - 現在の秒の定義：“セシウム原子時計”
 - 次世代の原子時計：“イオン時計” or “光格子時計”
- “レーザー冷却 & トラップ”の原理
- 光格子中の極低温原子の超精密分光
 - 周波数安定化光源の開発
- “光格子時計”のパフォーマンスの評価
 - 絶対周波数測定 (OLC vs. Cs clock (SI second))
 - 2台の光格子時計間の直接周波数比較 (1D vs. 3D)
- 今後の展望: 水銀光格子時計, クライオ光格子時計
- まとめ

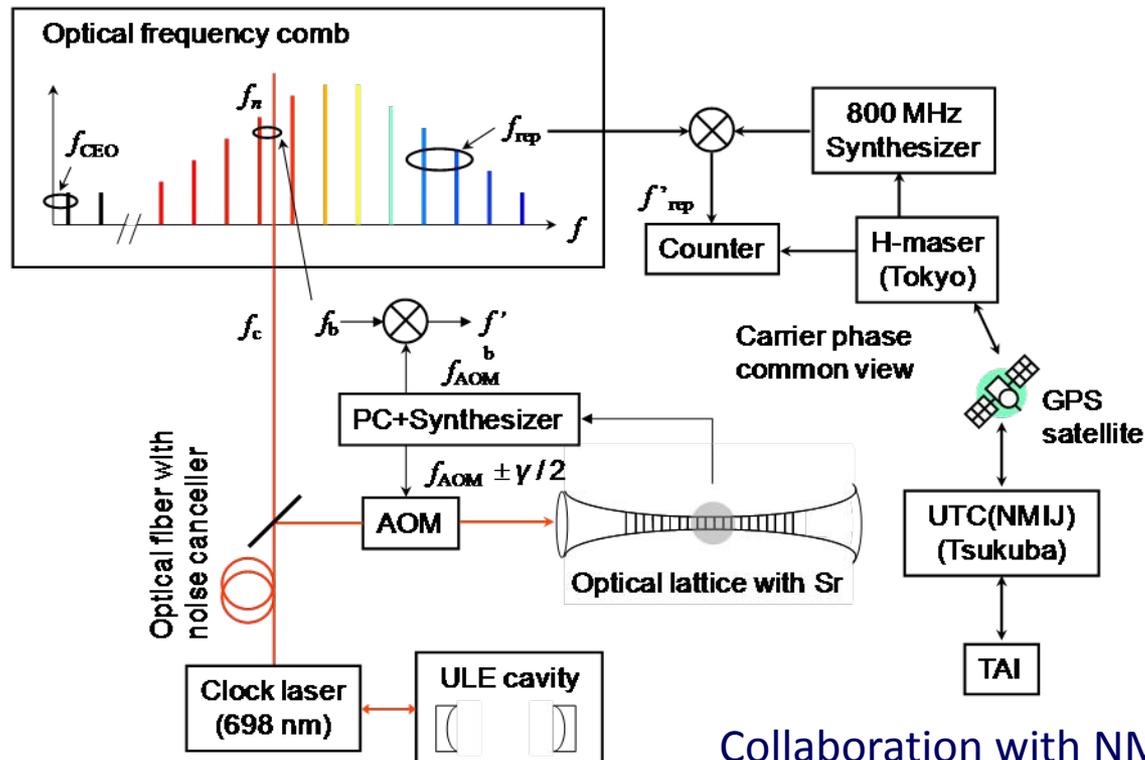
光格子時計の絶対周波数測定

絶対周波数測定

現在の“秒”の定義であるセシウム原子時計(TAI:国際原子時)に基づき
光格子時計の周波数を測定する

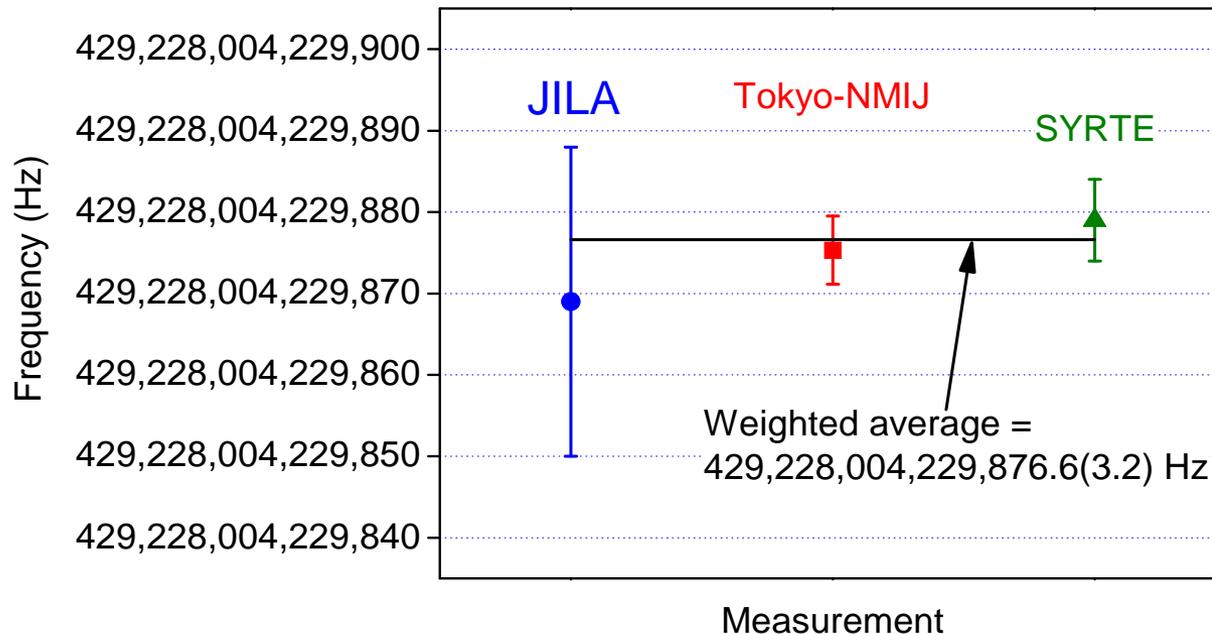
第1回、2回目の測定 (2005,2006):

東大一産総研(つくば)間をGPSリンクでつなぐ



Collaboration with NMIJ/AIST in Tsukuba

3グループによる ^{87}Sr 光格子時計の絶対周波数測定 (2006)



$$\Rightarrow \Delta f / f_0 = 7.5 \times 10^{-15}$$

- JILA:** A.D. Ludlow, M.M. Boyd, T. Zelevinsky, S.M. Foreman, S. Blatt, M. Notcutt, T. Ido, and J. Ye, PRL 96, 033003 (2006)
- Tokyo-NMIJ:** M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, Y. Fujii, M. Imae, and H. Katori, J. Phys. Soc. Jpn. 75, 104302 (2006).
- SYRTE:** R.L. Targat, X. Baillard, M. Fouche, A. Bruschi, O. Tcherbakoff, G. D. Rovera, and P. Lemonde, PRL 97, 130801 (2006).

1 σ で互いのデータが一致

“秒”の二次表現

2006年10月14-15日に行われた
第17回時間・周波数諮問委員会(CCTF)
において、4つの光時計が“秒”の二次
表現に採択された。

「秒の二次表現」

“秒”の再定義の有力な候補種

4つの候補

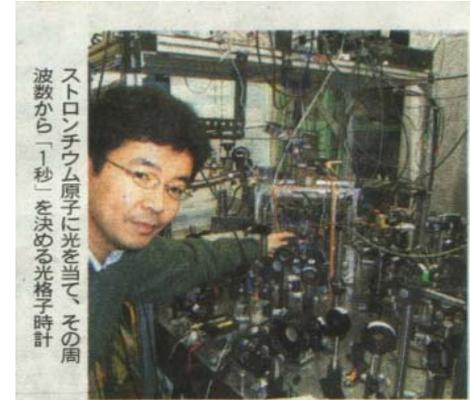
イオン時計 (Hg⁺, Yb⁺, Sr⁺)

Sr 光格子時計

RECOMMENDATION ADOPTED BY THE
INTERNATIONAL COMMITTEE FOR WEIGHTS AND MEASURES

RECOMMENDATION 1 (CI-2006):
Concerning secondary representations of the second

- the unperturbed optical $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$ transition of the $^{88}\text{Sr}^+$ ion with a frequency of $f_{^{88}\text{Sr}^+} = 444\ 779\ 044\ 095\ 484\ \text{Hz}$ and a relative uncertainty of 7×10^{-15} ,
- the unperturbed optical $5d^{10}\ 6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2D_{5/2} (F=2)$ transition of the $^{199}\text{Hg}^+$ ion with a frequency of $f_{^{199}\text{Hg}^+} = 1\ 064\ 721\ 609\ 899\ 145\ \text{Hz}$ and a relative standard uncertainty of 3×10^{-15} ,
- the unperturbed optical $6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2)$ transition of the $^{171}\text{Yb}^+$ ion with a frequency of $f_{^{171}\text{Yb}^+} = 688\ 358\ 979\ 309\ 308\ \text{Hz}$ and a relative standard uncertainty of 9×10^{-15} ,
- the unperturbed optical transition $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$ of the ^{87}Sr neutral atom with a frequency of $f_{^{87}\text{Sr}} = 429\ 228\ 004\ 229\ 877\ \text{Hz}$ and a relative standard uncertainty of 1.5×10^{-14} .



ストロンチウム原子に光を当て、その周波数から「1秒」を決める光格子時計

世界中の「1秒」決める!?

東大の光格子時計

世界中の時計が示す1秒を決める「標準器」について、東京大学で開発中の光格子時計が次世代候補に浮上した。10日からフランスで開かれる国際度量衡委員会で正式候補として承認される。

光格子時計のデータは原理的には、1000億年に1秒以下の誤差しか出ない。標準時間の基になる次の標準器が最終的に決まるのは10年以上先だが、五つの候

の期待が高まっている。光格子時計は東大大学院工学系研究科の香取秀徳・助教が2001年に発表した。何本ものレーザーを格子状に交差させて、その間にストロンチウム原子1万個を固定する。この原子が吸収・放射する光の周波数を基に1秒を決める。周波数を測定する時の誤差がくわずかあるため、原子の数を増やして精密にするほど時間が正確にな

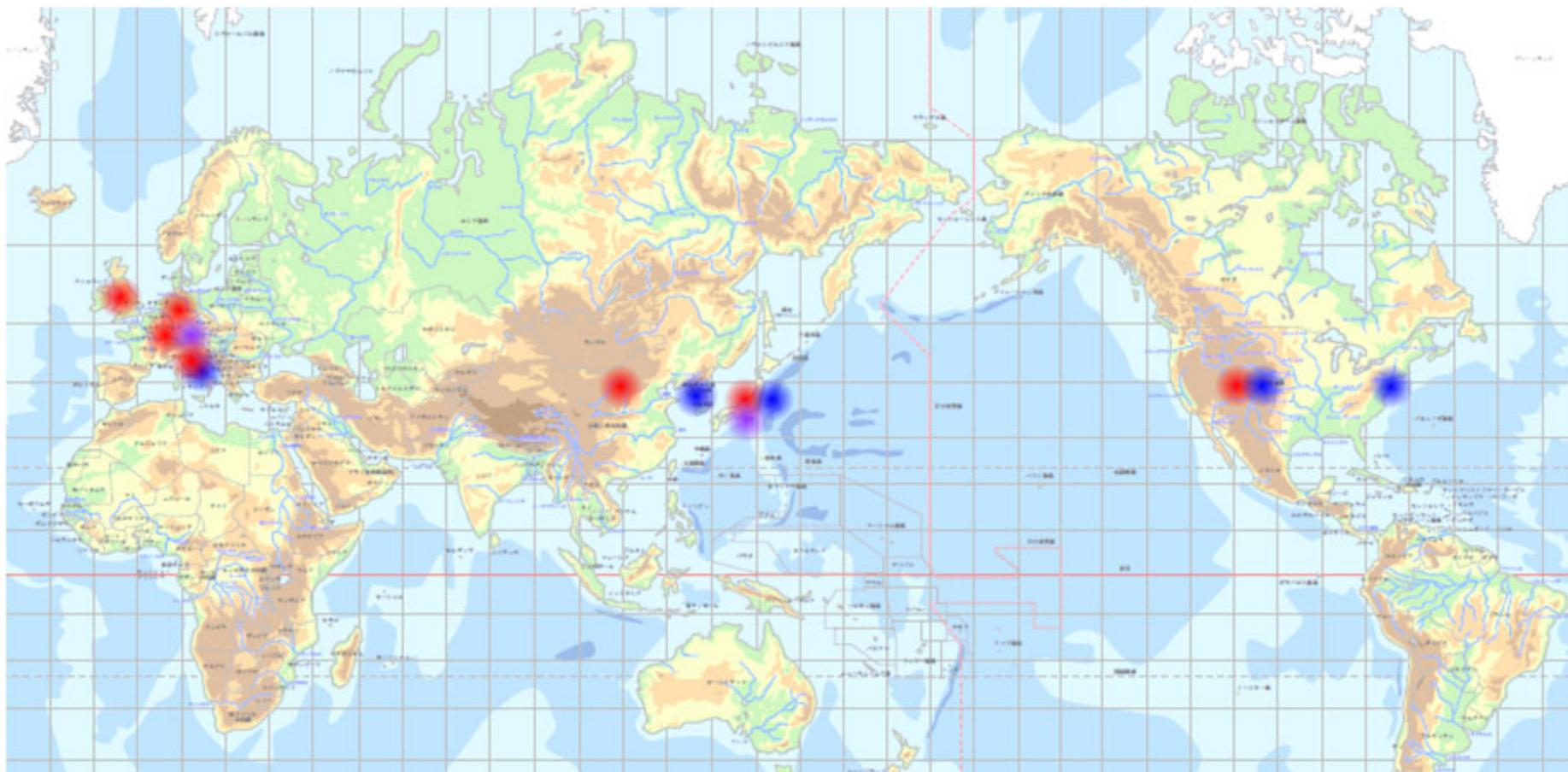
補の中では最高性能になる可能性があり、採用

標準器候補に浮上

候補に挙がる水銀やイッテルビウムを使った欧米発の次世代時計では、原子が1個だが、光格子時計は最終的に原子100万個の活用を目指す。

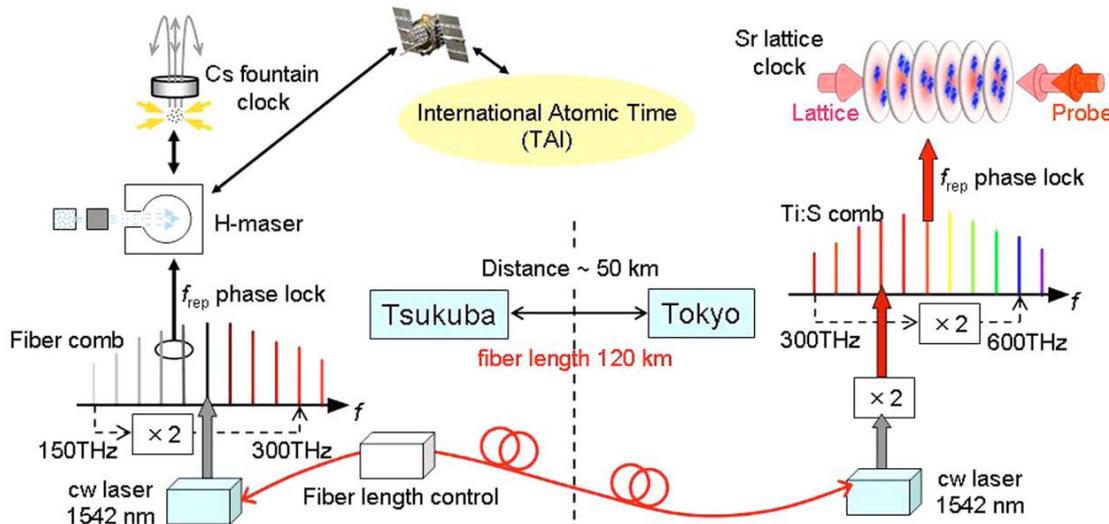
正確さに注目した米、仏の研究所が光格子時計の手法で良好なデータを出したため、発表から5年で候補に浮上した。産業技術総合研究所計測標準研究部門は大嶋新一・主幹研究員は「将来性のある技術で、海外での研究も加速しており、有力な次世代候補になりうる」と話している。

光格子時計

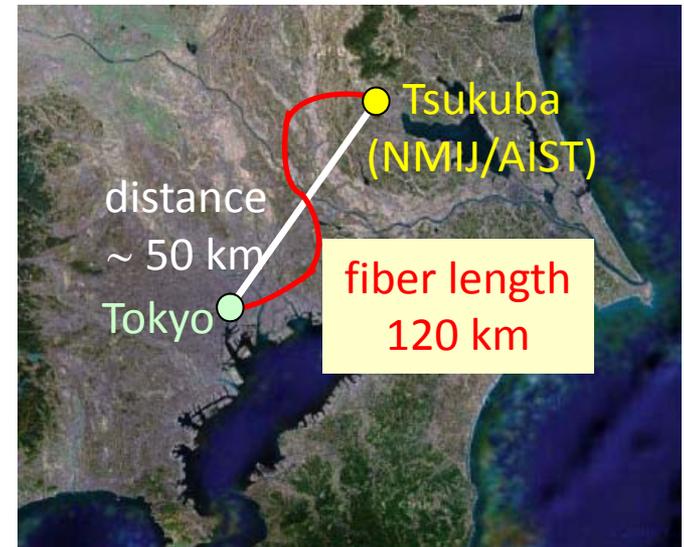


- Sr Tokyo(日), JILA(米), SYRTE(仏), NICT(日), LENS(伊), PTB(独), NPL(英), NIM (中)
- Yb NIST(米), NMIJ/AIST(日), INRIM(伊), Washington(米), KRISS(韓), Tokyo(日)
- Hg Tokyo(日), SYRTE(仏)

120km coherent fiber link for frequency measurement of Sr lattice clock (2008-09, collaboration with NMIJ&ILS/UEC)



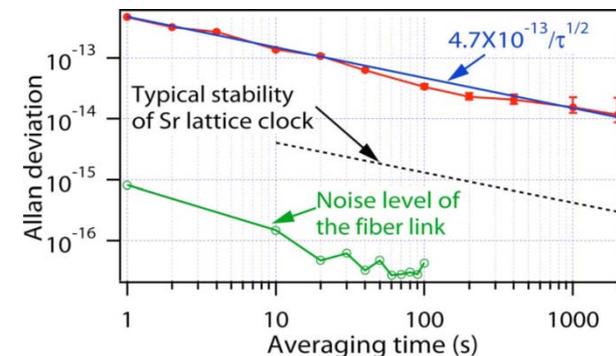
Fiber link in the experiment



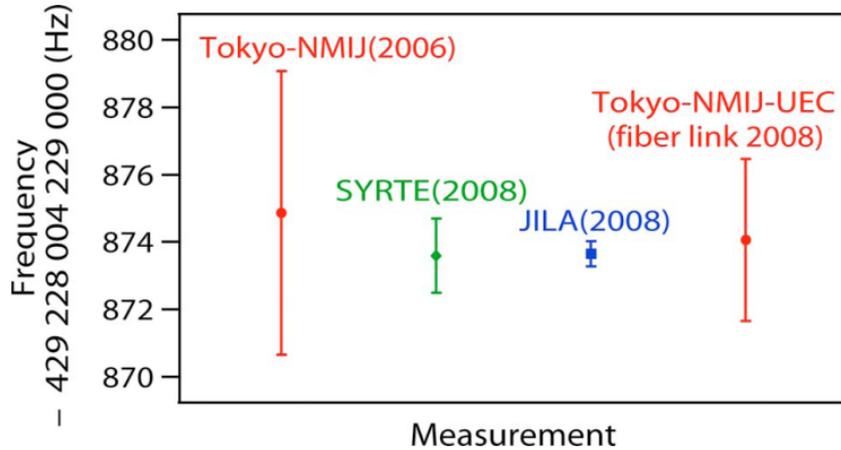
“Measuring the frequency of a Sr optical lattice clock using a 120 km coherent optical transfer”, F. -L. Hong *et al.*, Opt. Lett. 34, 692 (2009).

★ The ILS/UEC fiber length control system: M. Musha *et al.*, Opt. Exp. 16, 16459 (2008).

Fiber link stability:
 8×10^{-16} @ 1 s



3グループによるSr光格子時計の 絶対周波数測定結果 (2008)



Tokyo-NMIJ (2006): J. Phys. Soc. Jpn. 75, 104302 (2006)

SYRTE (2008): Eur. Phys. J. D, 48, 11-17 (2008)

JILA (2008): Metrologia 45, 539 (2008)

Tokyo-NMIJ-UEC (2009): Opt. Lett. 34, 692 (2009)

Boulder/Paris/Tokyoの光格子時計の周波数が高い正確さ($\sim 6 \times 10^{-16}$)で一致、国際原子時の不確かさでほぼ制限されている

ref.) Yb lattice clock

^{174}Yb (boson): 518 294 025 309 217.8(0.9)Hz (1.5×10^{-15})
(NIST) N. Poli et al., PRA 77, 050501 (2008)

^{171}Yb (fermion): NIST, NMIJ

2台の光格子時計を直接周波数比較することにより、セシウム時計に制限されない性能評価

ref.) 光-光 周波数比較

NPL (2004): $\text{Sr}^+ - \text{Sr}^+$, PTB(2005): $\text{Yb}^+ - \text{Yb}^+$, NIST(2008): $\text{Al}^+ - \text{Hg}^+$, JILA(2008): $\text{Sr} - \text{Ca}$, NIST(2009): $\text{Al}^+ - \text{Al}^+$

Outline

- 時間・周波数標準のイントロダクション：“原子時計”
 - 現在の秒の定義：“セシウム原子時計”
 - 次世代の原子時計：“イオン時計” or “光格子時計”
- “レーザー冷却 & トラップ”の原理
- 光格子中の極低温原子の超精密分光
 - 周波数安定化光源の開発
- “光格子時計”のパフォーマンスの評価
 - 絶対周波数測定 (OLC vs. Cs clock (SI second))
 - 2台の光格子時計間の直接周波数比較 (1D vs. 3D)
- 今後の展望: 水銀光格子時計, クライオ光格子時計
- まとめ

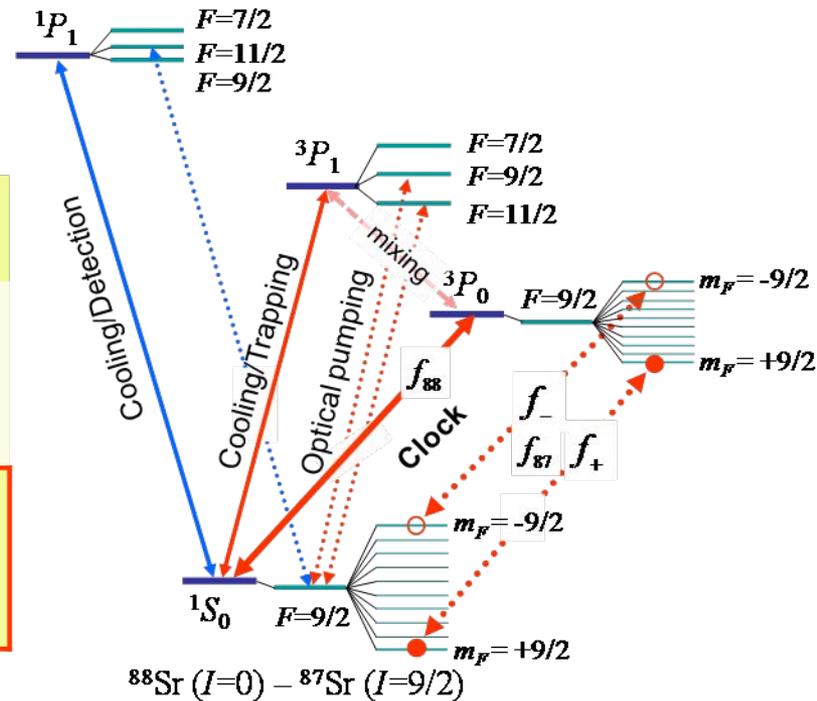
光格子時計の設計

多数個の原子を用いることによる高い安定度 ⇔ 原子間衝突シフトによる不確かさ

原子の量子統計性を利用した衝突シフトの除去

		Quantum statistics	
Atoms in a site		Fermion ($F \neq 0$)	Boson ($J=0$)
Lattice geometry	1D (2D)	◎Pauli blocking (Spatially uniform polarization)	× Cold collisions $1 \leq g^{(2)} \leq 2$
	3D	△vector shifts? (Polarization rotation of lattice)	◎Mott insulator state ◎Better S/N ? (Larger # of atoms)

Single occupancy lattice

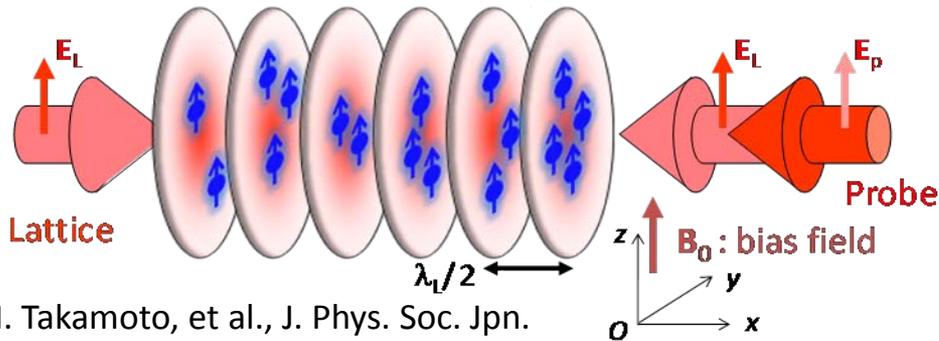


1次元光格子中のスピン偏極フェルミ粒子 (^{87}Sr) を用いる光格子時計

3次元光格子中に1原子ずつトラップされたボース粒子 (^{88}Sr) を用いる光格子時計

それらの間での周波数比較による性能評価

スピン偏極フェルミ粒子を用いる 一次元光格子時計 (^{87}Sr)



平均場によるエネルギーシフト

$$E = 4\pi\hbar^2 a n g^{(2)}(0) / m$$

同種フェルミ粒子間の相関関数 : $g^{(2)} = 0$
 \rightarrow 同種フェルミ粒子同士は衝突できない
 (Pauli blocking)

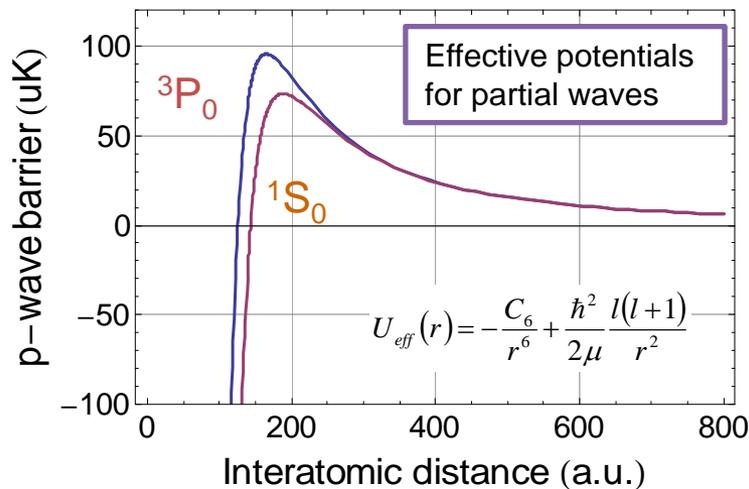
極低温 ($3\mu\text{K}$) では、 p 波 ($l=1$) 以上の
 散乱は寄与しない

原子間の同一性を保ちながら励起することが重要



光格子中でレーザーと相互作用する原子の
 コヒーレンスをいかに維持するか

M. Takamoto, et al., J. Phys. Soc. Jpn.
 75, 104302 (2006)

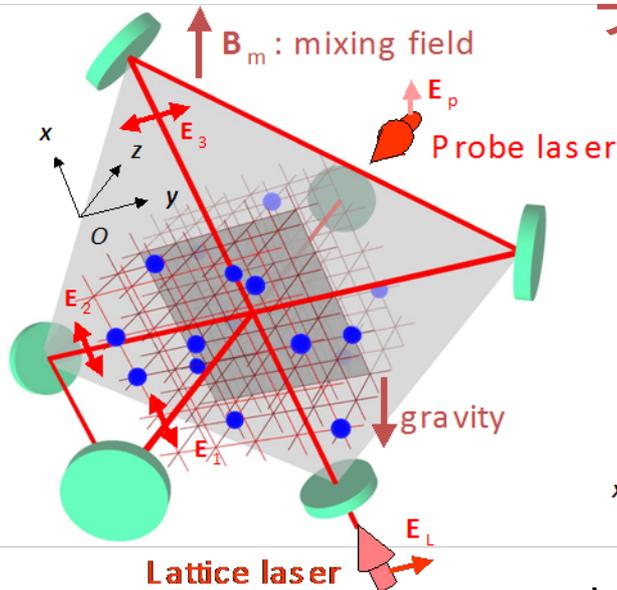
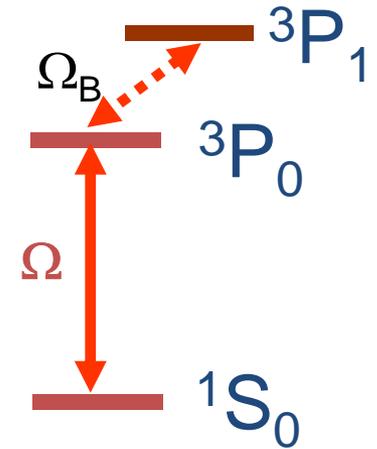


Proposal with Cs fountain clock : K. Gibble
 and B. J. Berhaar, PRA 52 (1995) 3370
 Demonstration with Li : S. Gupta et al.,
 Science 300 (2003) 1723

三次元ボソン光格子時計 (^{88}Sr)

3次元の格子ポテンシャルに、ボース粒子を1個ずつ配置し、原子間の衝突シフトを阻止

核スピンのかわりに、外部磁場(\mathbf{B}_m)を印可することにより $1S_0$ - $3P_0$ 遷移を可能にする
(Taichenachev et al., PRL 2006)



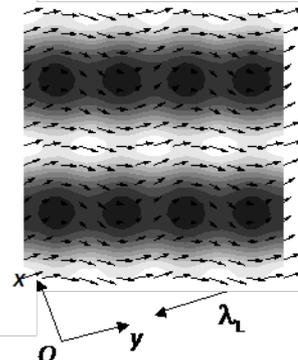
ラビ周波数 $\Omega = 9 \text{ Hz}$

$$|\mathbf{B}_m| = 2.34 \text{ mT}, \delta |\mathbf{B}_m| = 0.6 \mu\text{T}$$

2次のゼーマンシフト: $\Delta_B = -129 (0.06) \text{ Hz}$

$$I_p = 400 \text{ mW/cm}^2, \delta I_p = 2 \text{ mW/cm}^2$$

プローブ光の光シフト: $\Delta_L = -7.5 (0.04) \text{ Hz}$



Lattice polarization

光共振器中の三次元光格子

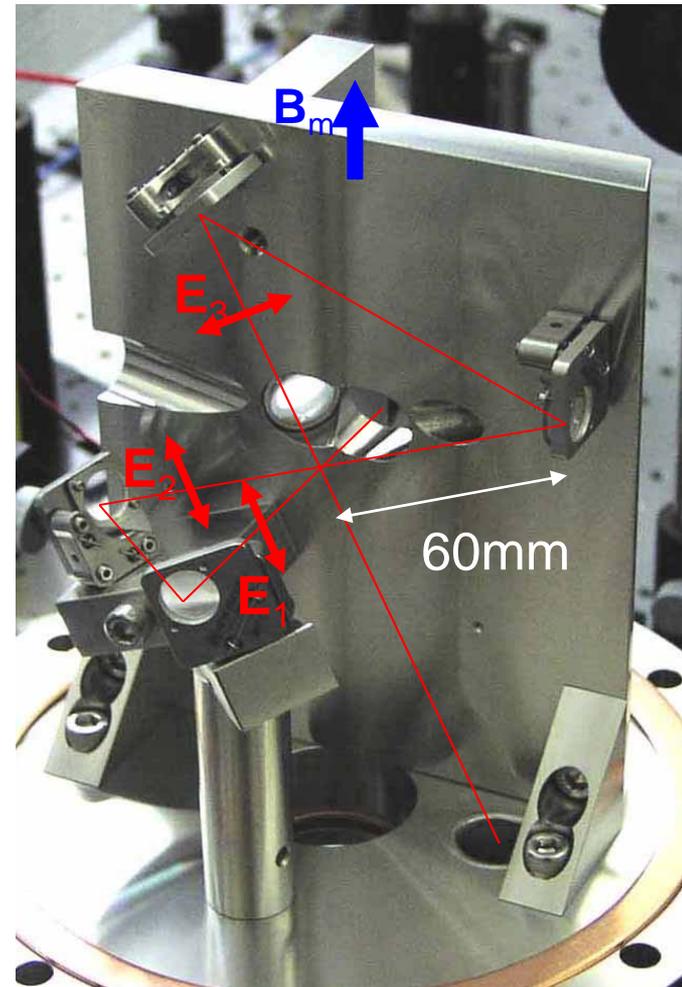
Volume: $520\mu\text{m} \times 520\mu\text{m} \times 260\mu\text{m}$
Lattice density: $7 \times 10^{12}/\text{cm}^3$
of lattice sites: 6×10^7
Power enhancement: 17
Lattice intensity: $33 \text{ kW}/\text{cm}^2$
Potential depth: $130E_r$ ($20\mu\text{K}$)

3D Lattice

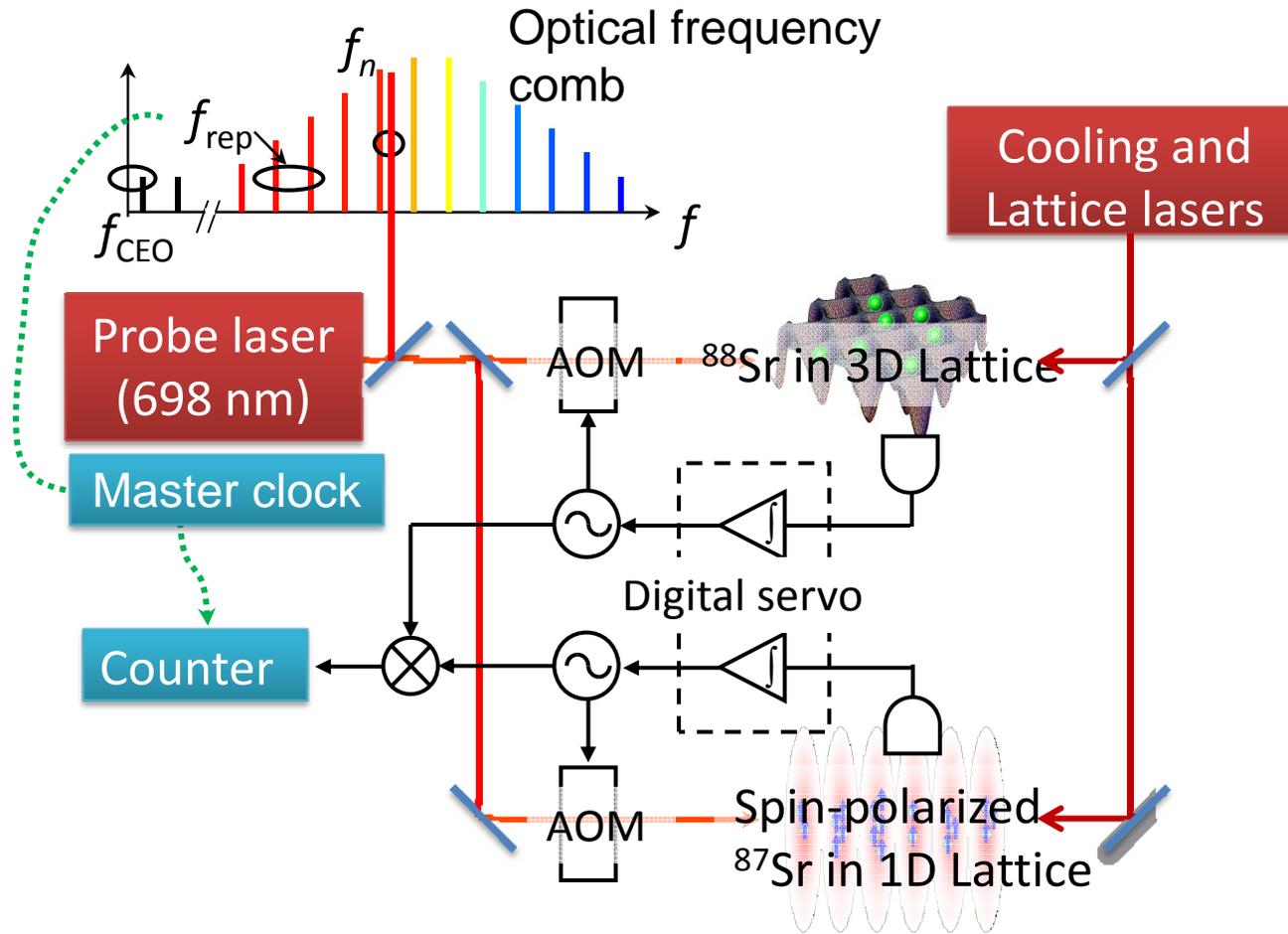
$$N = 10^5$$

$$T = 4\mu\text{K}$$

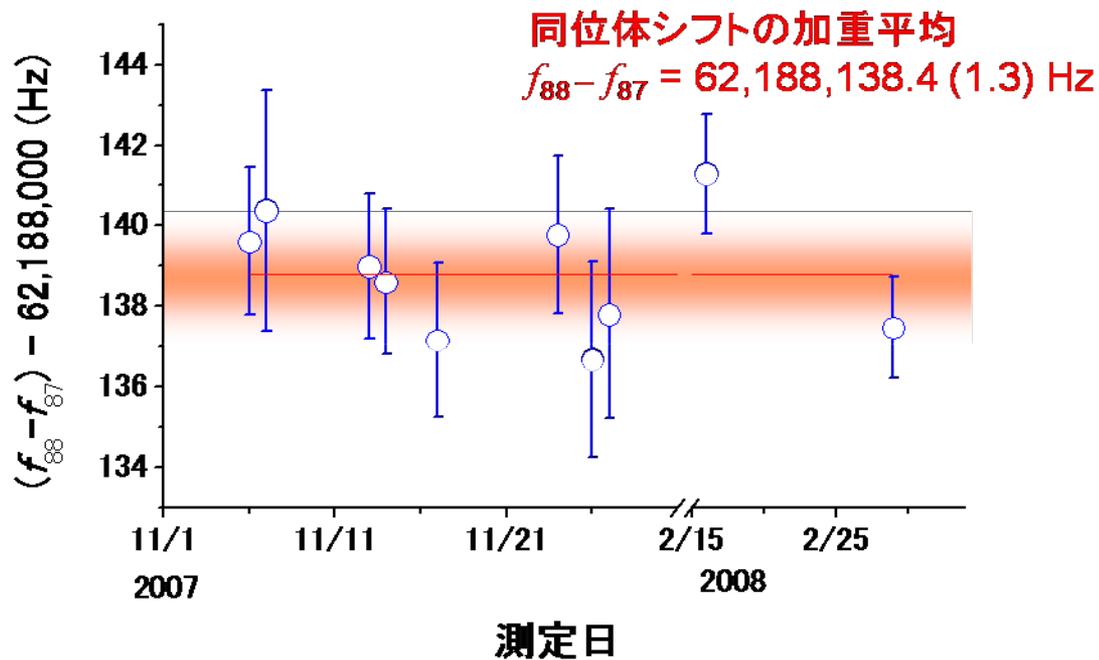
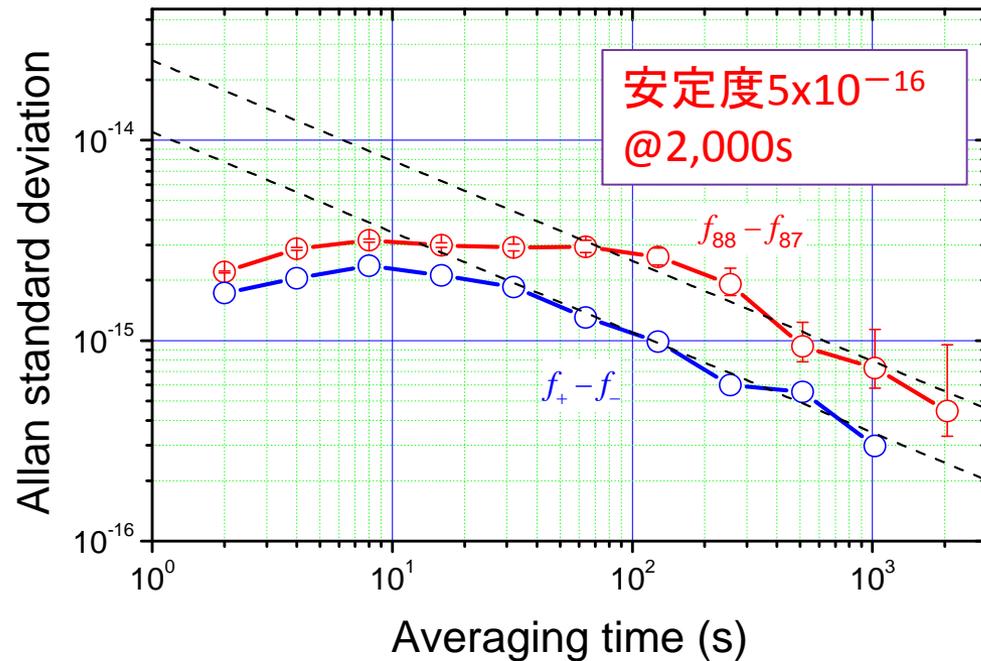
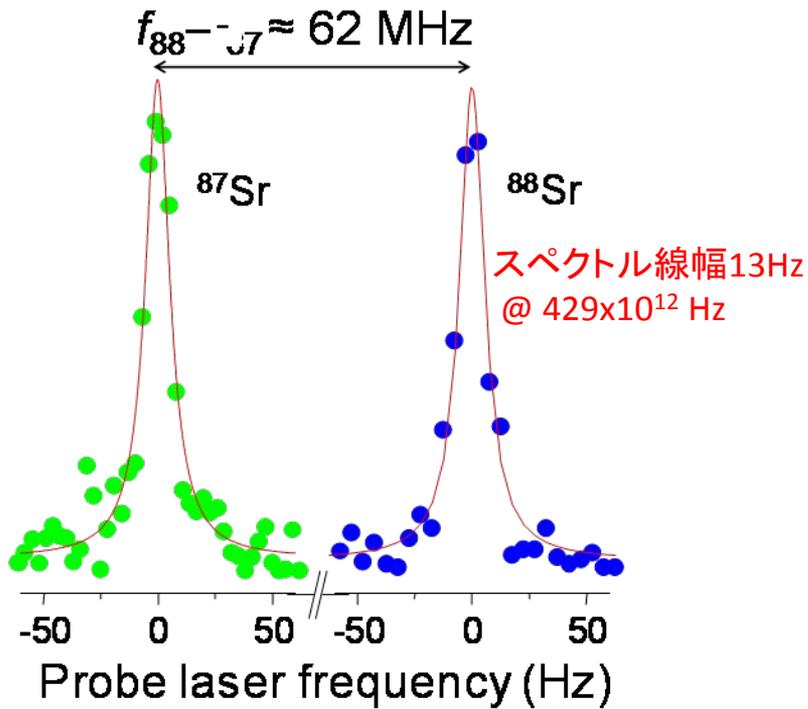
\longleftrightarrow
 $500\mu\text{m}$



2台の光格子時計の周波数比較 —SI リミットを越える周波数比較の実現—



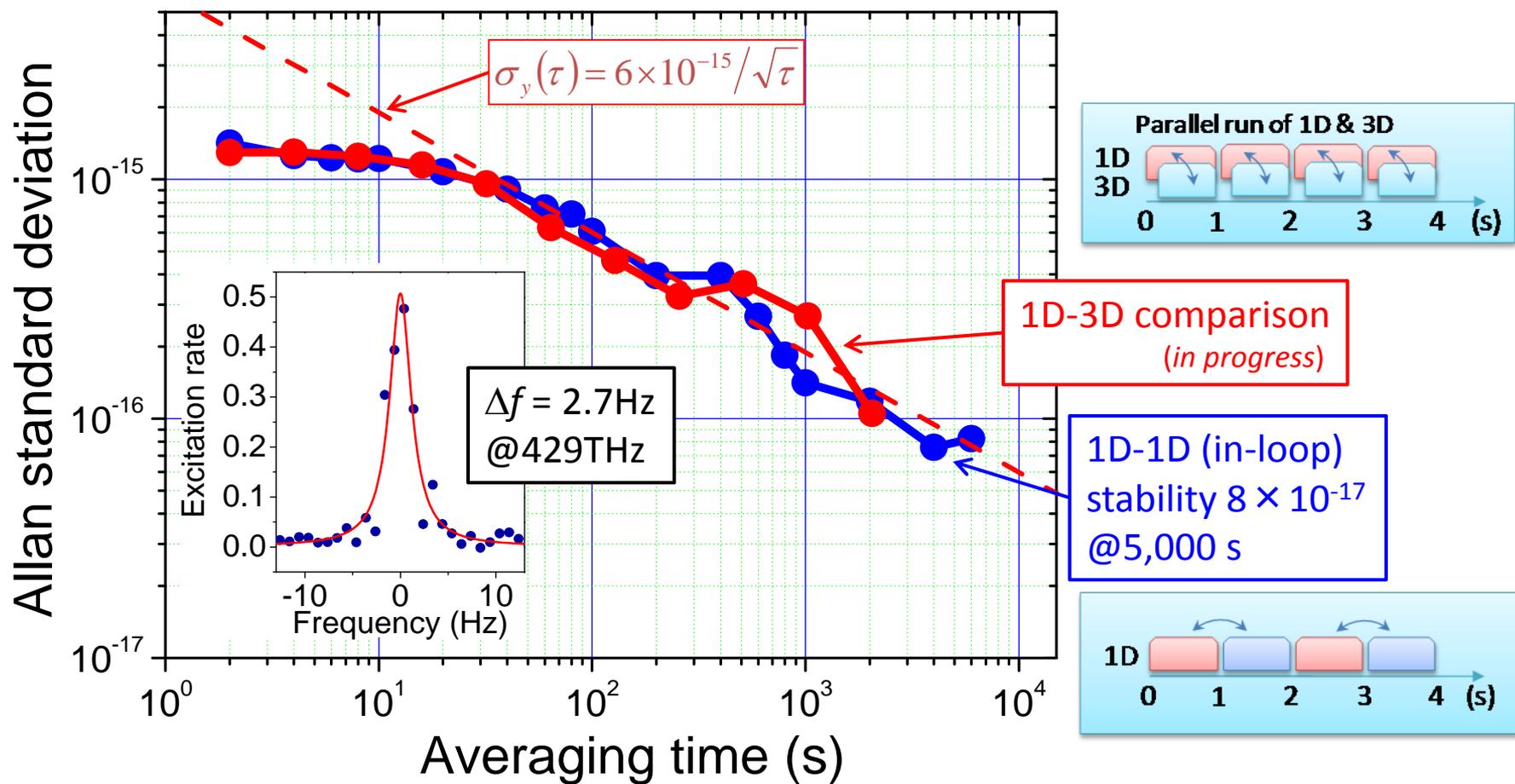
“Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions,”
T. Akatsuka, M. Takamoto, and H. Katori, *Nature Physics* 4, 954 (2008)



不確かさ評価

	^{87}Sr (1D)	^{88}Sr (3D)	
不確かさ要因	補正 (不確かさ) Hz	補正 (不確かさ) Hz	
スカラー光シフト	-0.22 (0.33)	-0.23 (1.09)	
ベクトル光シフト	0 (0.01)	0 (0.014)	
4次の光シフト	-0.017 (0.015)	-0.12 (0.10)	
プローブ光シフト	0.03 (0.001)	7.48 (0.36)	
黒体輻射シフト	2.4 (0.2)	2.4 (0.2)	T = 301(5) K
2次のゼーマンシフト	0.772 (0.01)	128.61 (0.31)	
衝突シフト	0.4 (0.3)	-0.034 (0.3)	
合計	3.37 (0.49)	138.11 (1.25)	
同位体シフト $f_{88}-f_{87}$	62,188,138.4 (1.3)		

1D & 3D 光格子時計の現在の安定度 (with vibration insensitive optical cavity)



Outline

- 時間・周波数標準のイントロダクション：“原子時計”
 - 現在の秒の定義：“セシウム原子時計”
 - 次世代の原子時計：“イオン時計” or “光格子時計”
- “レーザー冷却 & トラップ”の原理
- 光格子中の極低温原子の超精密分光
 - 周波数安定化光源の開発
- “光格子時計”のパフォーマンスの評価
 - 絶対周波数測定 (OLC vs. Cs clock (SI second))
 - 2台の光格子時計間の直接周波数比較 (1D vs. 3D)
- 今後の展望: 水銀光格子時計, クライオ光格子時計
- まとめ

さらなる正確さの改善に向けて $<10^{-17}$ ($<0.04\text{Hz}$)

不確かさ評価

不確かさ要因	^{87}Sr (1D)	^{88}Sr (3D)
	補正 (不確かさ) Hz	補正 (不確かさ) Hz
スカラー光シフト	-0.22 (0.33)	-0.23 (1.09)
ベクトル光シフト	0 (0.01)	0 (0.014)
4次の光シフト	-0.017 (0.015)	-0.12 (0.10)
プローブ光シフト	0.03 (0.001)	7.48 (0.36)
黒体輻射シフト	2.4 (0.2)	2.4 (0.2)
2次のゼーマンシフト	0.772 (0.01)	128.61 (0.31)
衝突シフト	0.4 (0.3)	-0.034 (0.3)
合計	3.37 (0.49)	138.11 (1.25)
同位体シフト $f_{88}-f_{87}$	62,188,138.4 (1.3)	

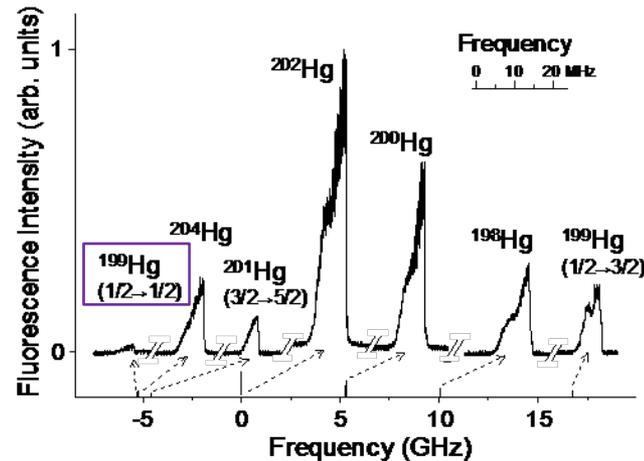
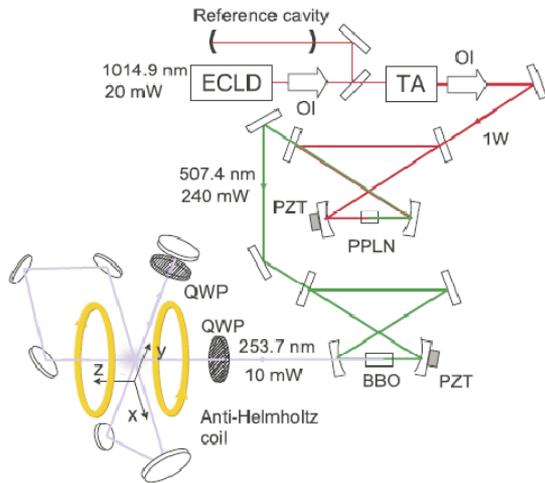
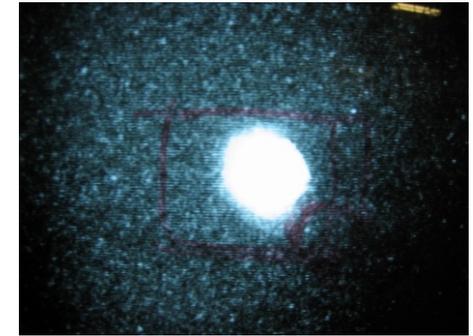
T = 301(5) K

一桁小さくする
必要がある

水銀原子の磁気光学トラップ

	^{199}Hg	^{87}Sr
Contributor	Attainable uncertainty (mHz)	
BBR	0.2	3
$\delta\nu/\delta\nu_0$	$\sim 10^{-19}$	$\sim 10^{-18}$

$\Delta T = 0.1\text{K}$
@300K



MOT of neutral Hg atoms and prospects for optical lattice clocks

H. Hachisu, K. Miyagishi, S. G. Porsev, A. Derevianko, V. D. Ovsianikov, V. G. Pal'chikov, M. Takamoto and H. Katori, Phys. Rev. Lett. 100, 053001 (2008)

Spectroscopy of Hg clock transition in MOT

M. Petersen, R. Chicireanu, S. T. Dawkins, D. V. Magalhaes, C. Mandache, Y. Le Coq, A. Clairon, and S. Bize, Phys. Rev. Lett. 101, 183004 (2008)

Toward test of α variation by frequency comparison with Sr lattice clock

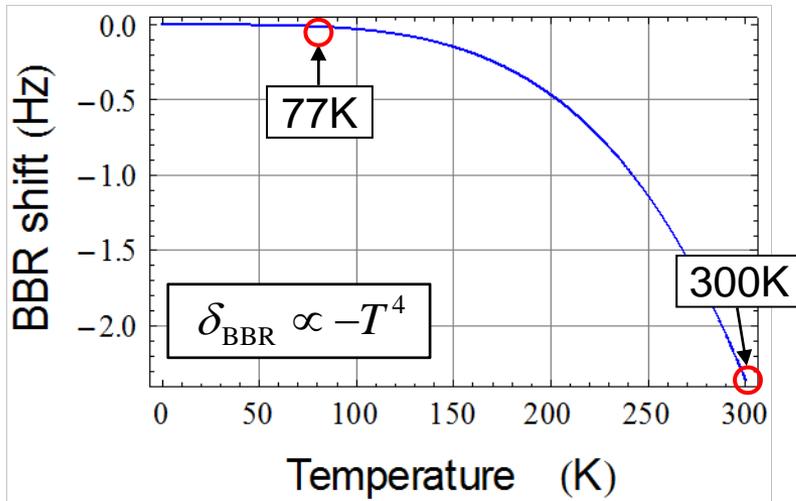
Sr原子の黒体輻射シフト

- Calculated value for BBR of Sr at 300 K

$$\delta_{\text{BBR}} = -2.354(32)\text{Hz}$$

S. G. Porsev and A. Derevianko,
PRA 74, 020502 (2006)

- Temperature dependence of BBR



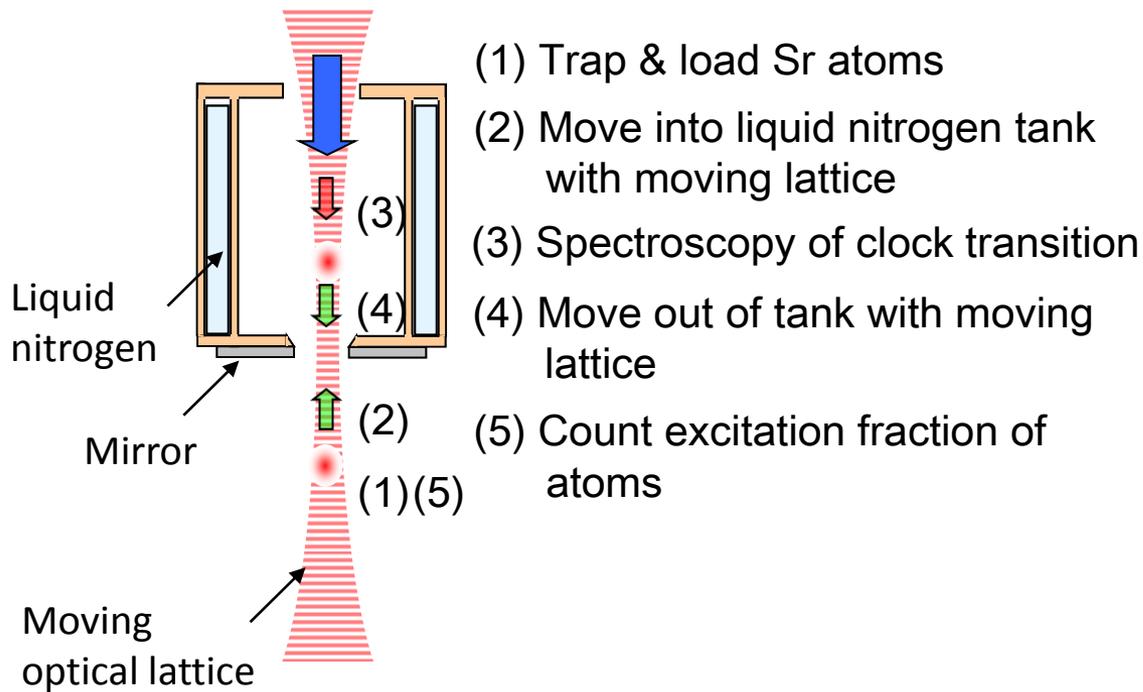
Temperature (K)	BBR shift (uncertainty) (Hz)
300 ($T=\pm 5$)	2.4 (0.2)
77 ($T=\pm 5$)	0.010 (0.005)

$$\delta\nu/\nu_0 \sim 10^{-17}$$

➡ $\delta\nu/\nu_0 \sim 10^{-19}$ @ 77 K ($T=\pm 0.1$ K)

- Cryogenic setup (77K with liquid Nitrogen) for Sr lattice clock
- Measure BBR shift by comparing frequency with room-temperature Sr lattice clock

クライオSr光格子時計



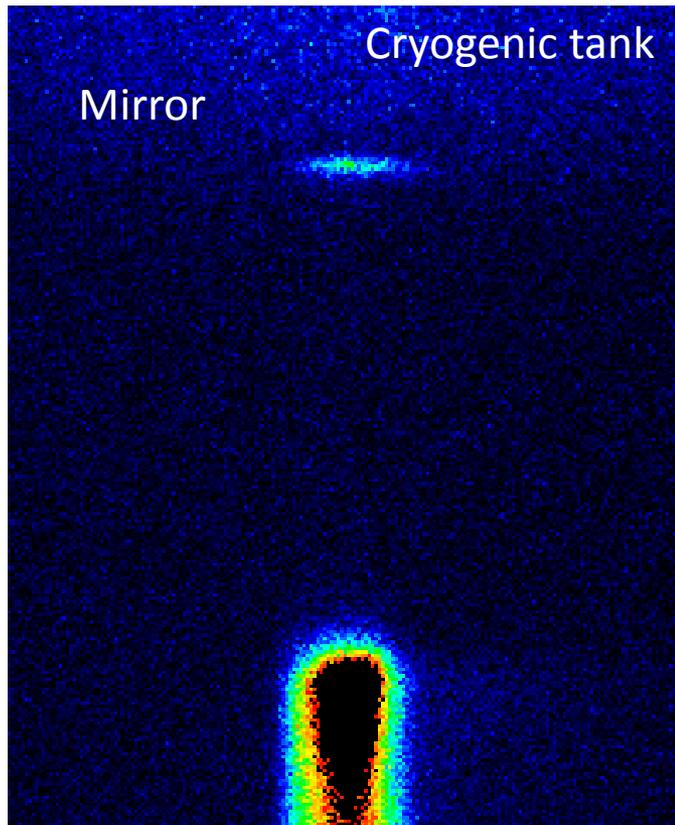
Blackbody radiation shift $\propto T^4$

At room temperature (300K) 2.4Hz

At liquid nitrogen temperature (77K) 10mHz

10^{-19} uncertainty achievable with $\Delta T=0.1K$

ミラーMOT & クライオタンクへの 移動光格子による原子の輸送



- 移動速度: 24 cm/s
- 移動距離: 2.1 mm



10^5 atoms were transferred
into cryogenic tank

- Clock excitation in cryogenic tank
& frequency comparison with room
-temperature Sr lattice clock
- Directly measure 2.4Hz BBR shift

まとめ

- “光格子時計”
 - 18桁で安定かつ正確な光時計が実現可能な系
- 光格子時計の絶対周波数測定
 - 3グループの値がTAIで制限される正確さで一致
- 1D & 3D光格子時計間の直接周波数比較
 - SI limitを超える光格子時計の性能評価が可能となった
- 更なる正確さ向上に向けて: Hg光格子時計、クライオSr光格子時計
- 更なる安定度向上に向けて: 時計レーザーの安定度向上、QND、レーザー発振等のスキームの検討

The group



Univ. of Tokyo/CREST

H. Katori

M. Takamoto(RA: Sr-1D)

H. Hachisu (JST/PD: Hg,
Cryogenic Sr, Atom chip)

T. Takano (JST/PD: Sr-3D)

K. Totsuka (M2: Sr-3D)

K. Hashiguchi (M2: Sr)

I. Ushijima (M1: Atom chip)

S. Nonaka (M1: Hg)

C. Kusunoki, R. Chiba,

I. Yoshimine, E. Wakakuwa



AIST/NMIJ (Freq. Link)

F. -L. Hong, M. Imae, Y. Fujii

2004-