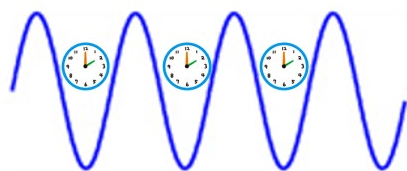




Q-LEAP 人材育成プログラム
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム

Hamiltonian



光格子時計 PART II

理化学研究所
山口 敦史

$|0\rangle + |1\rangle$

7. 精度

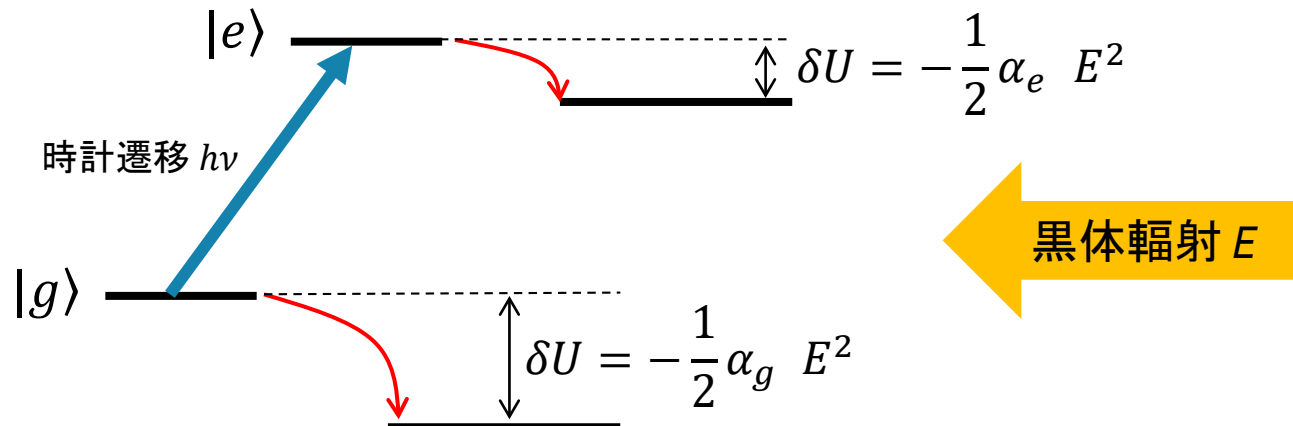
ストロンチウム光格子時計@理化学研究所のエラーバジェット

周波数シフト要因	補正值 (10^{-18})	不確かさ (10^{-18})
Quadratic Zeeman shift	117.0	0.9
Blackbody radiation shift	54.2	0.9
Lattice light shift	0	4.0
Travelling wave contamination	0	2.3
Clock light shift	0.047	0.023
First-order Doppler shift	0	0.5
AOM chirp and switching	0	<0.2
Servo error	0	3.5
Density shift	0.9	4.2
Systematic total	172.3	7.2

I. Ushijima *et al.*, Nature Photonics 9, 185 (2015)

7. 精度

黒体輻射(Black body radiation: BBR)シフトとは？



黒体輻射の電場強度 (Stefan-Boltzmann law):

$$\langle E^2 \rangle_T = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{8\alpha^3}{\pi} \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\omega/k_B T} - 1} = \frac{4(\alpha\pi)^3}{15} (k_B T)^4 \quad \alpha: \text{微細構造定数}$$

$$\text{黒体輻射シフト} \quad h \Delta\nu_{\text{BBR}} = -\frac{1}{2} (\alpha_e - \alpha_g) \langle E^2 \rangle \propto (\alpha_e - \alpha_g) T^4$$

黒体輻射の波長は室温(300 K)で、 $10\mu\text{m}$ ぐらい

→ 魔法波長でないので、ライトシフトが発生する → BBRシフト

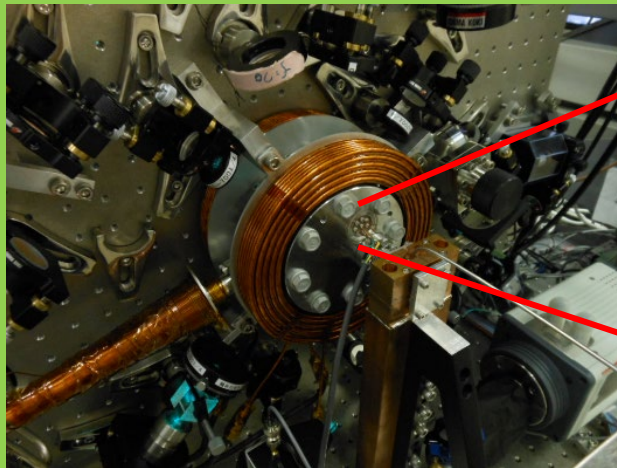
7. 精度

ストロンチウム光格子時計の場合、室温(300 K)で温度が0.1 Kゆらぐと、時計の周波数は 1×10^{-17} ゆらいでしまう

$$\nu_{\text{BBR}}(\text{Sr}) = -2.4 \text{ Hz} \times (T/300 \text{ K})^4$$

T の4乗に比例するので、温度を下げることで大きく抑制できる

光格子時計真空チャンバーを外から見た写真



(写真：理化学研究所 香取量子計測研究室)

ミニ極低温チャンバー(77 K)



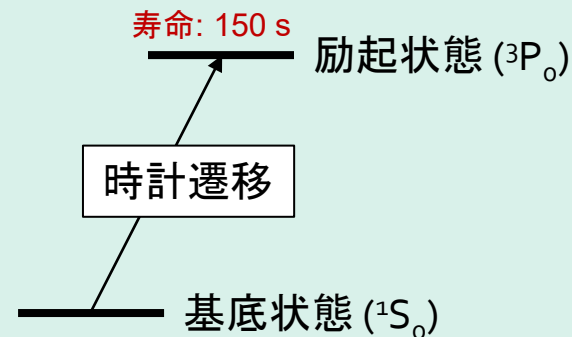
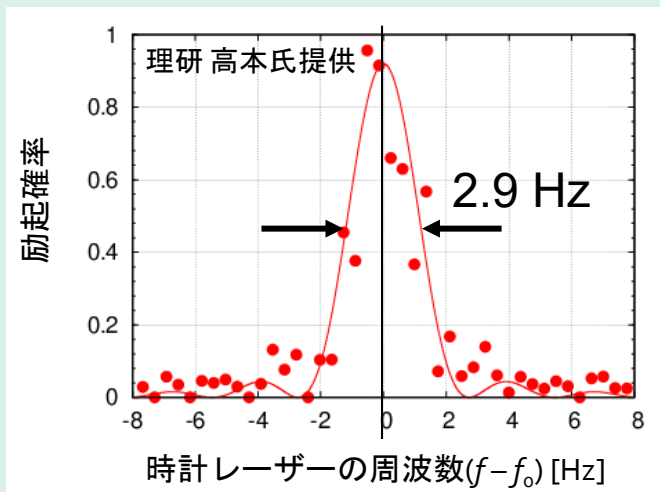
冷凍機につながっている

黒体放射が抑制された、ミニ極低温チャンバーの中で時計遷移を分光する

77 Kだと、温度が1 Kゆらいだとしても周波数の $\Delta\nu/\nu = 1.3 \times 10^{-18}$ しかゆらがない。

7. 精度 (制御時間)

ストロンチウム光格子時計の時計遷移スペクトル



中心は時計遷移の共鳴周波数 $f_0 = 4.3 \times 10^{14}$ Hz

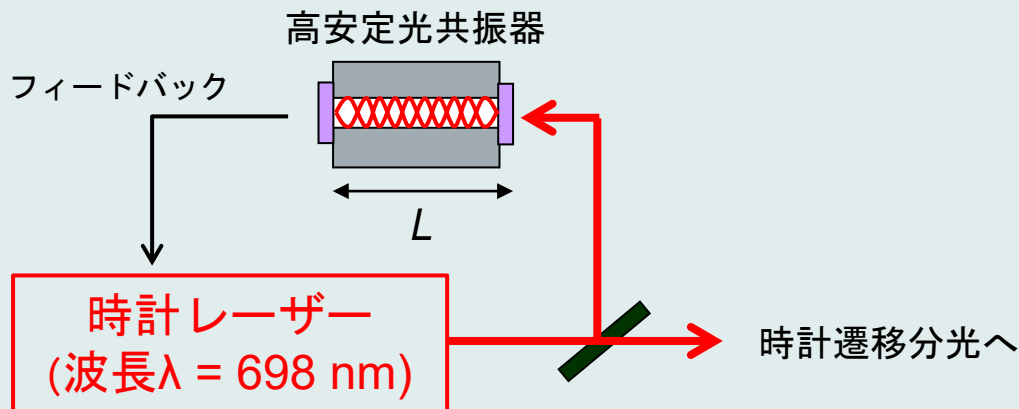
このスペクトル幅は、分光時間 0.3 sの逆数で決まっている(フーリエ限界)

励起状態($3P_0$)の寿命 150 sで決まるスペクトル幅(自然幅)は 1 mHz

さらに細いスペクトル幅を得られるか？

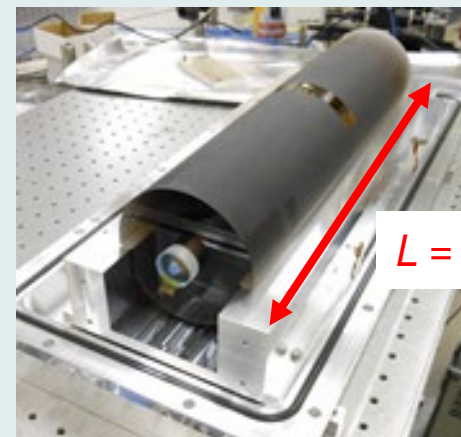
7. 精度 (制御時間)

時計遷移分光用レーザーの高安定光共振器への安定化



光共振器の共振条件 $L = n \left(\frac{\lambda}{2} \right)$ (n は自然数)

高安定光共振器



$L = 40 \text{ cm}$

(写真：理化学研究所 香取量子計測研究室)

元の(半導体)レーザーのスペクトル幅： $\sim 1 \text{ MHz}$ \rightarrow 共振器に安定化後： $\sim 1 \text{ Hz}$

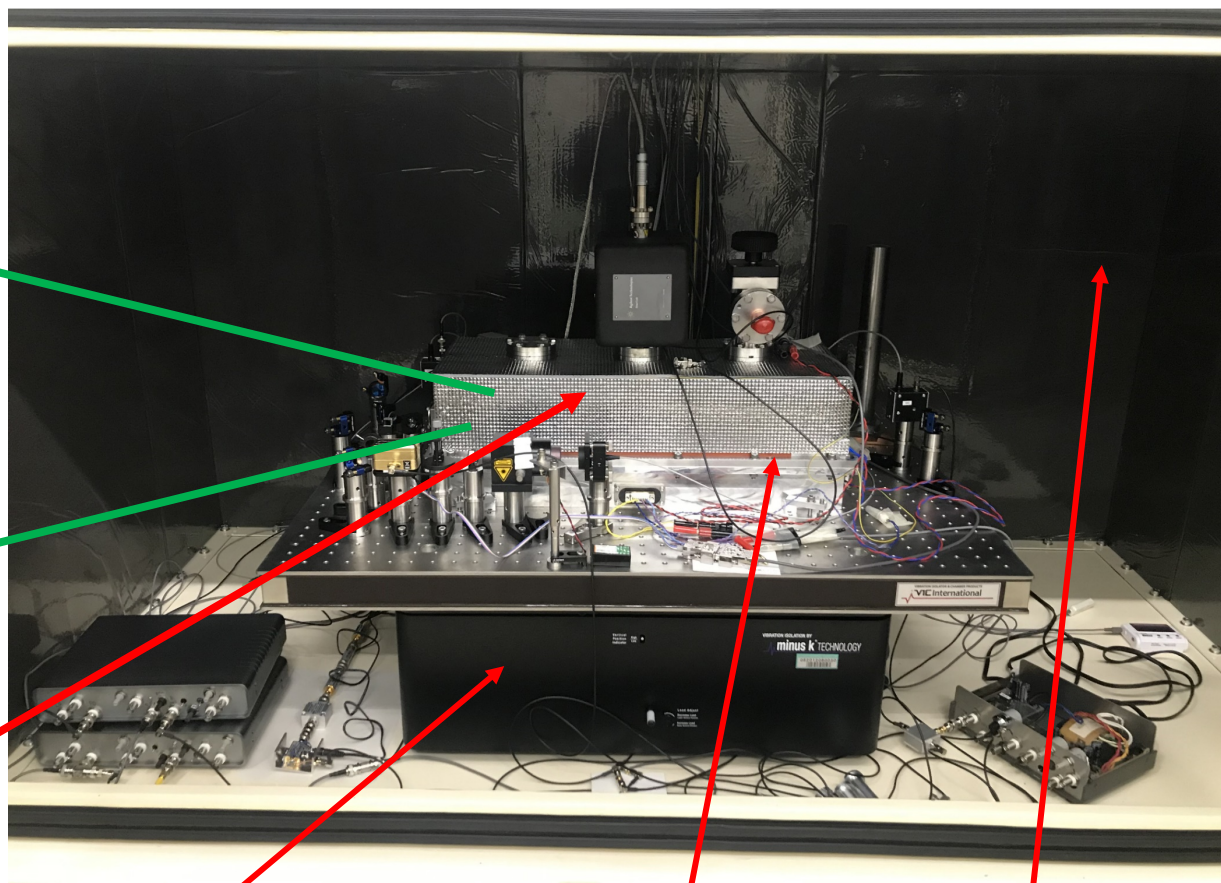
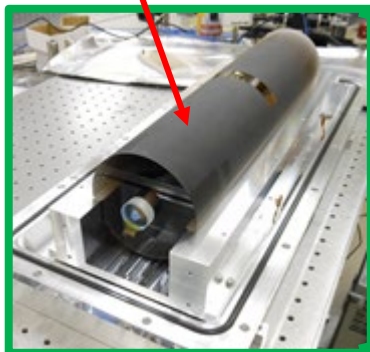
$$\left| \frac{\delta f}{f} \right| = \left| \frac{\delta L}{L} \right|$$

共振器に安定化されたレーザーの周波数ゆらぎ $\delta f/f$ を小さくするには $\delta L/L$ を小さくする。

7. 精度 (制御時間)

(写真：理化学研究所 香取量子計測研究室)

超低熱膨張ガラス



超高真空チャンバー

高性能除振台

定温真空槽

防音箱

7. 精度 (制御時間)

スペクトル幅をさらに狭くしようと思うと...

$|\delta f/f| = |\delta L/L|$ なので、 $\delta L/L$ を小さくする。そのためには、

① L を大きくする

すなわち、ミラー間隔を大きくする。

→ これ以上(今は40-50 cmが主流)長くすると、地面振動の影響を受けないように支持するのが難しい

② δL を小さくする

→ [現状のリミット] 共振器を構成している物質(主にミラーのコーティング)の熱運動(ブラウン運動)

→ 共振器全体を冷やしてブラウン運動を抑える

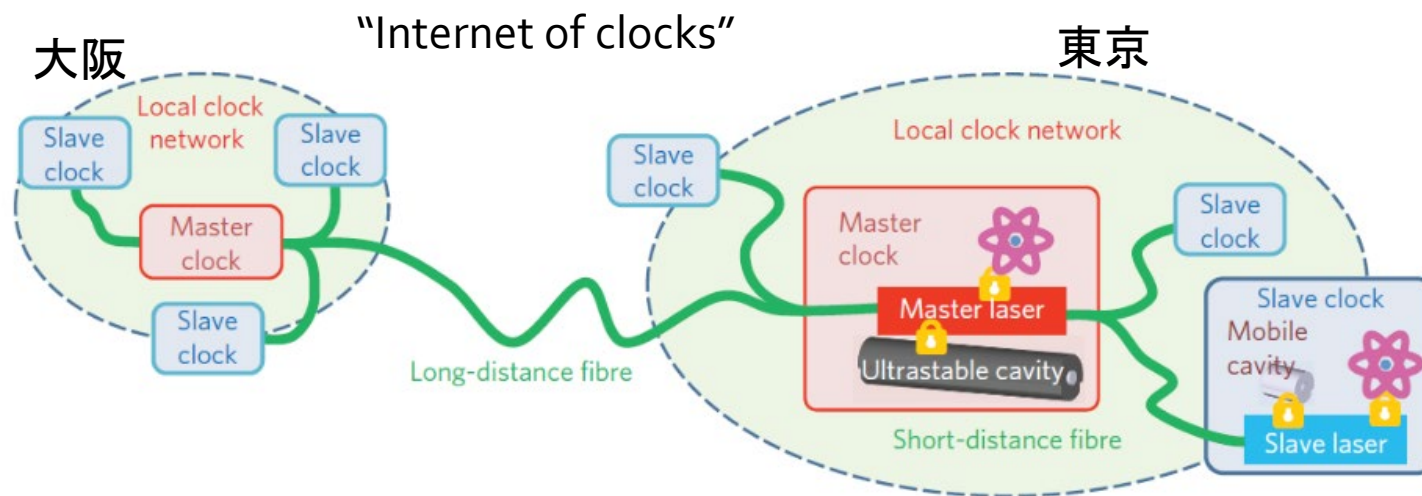
4 Kに冷却: W. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 243601 (2017).

→ ブラウン運動の影響の少ない特殊な物質でミラーコーティングを作る

"Crystalline coating": G. D. Cole *et al.*, Nat. Photon. **7**, 644 (2013).

8. 拡張性

光ファイバーリンク網を介して、遠隔地の光格子時計同士をつなぐ

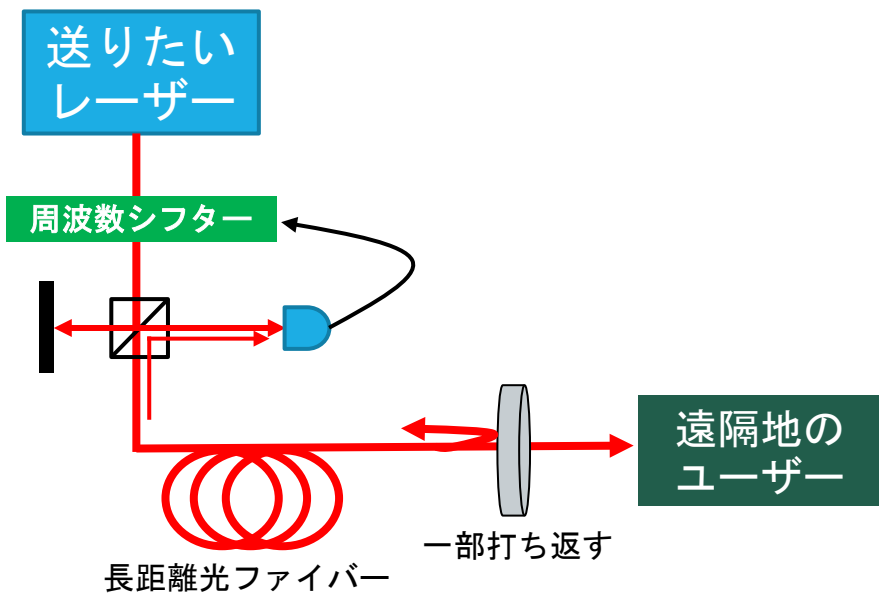


T. Takano *et al.*, Nature Photonics **10**, 662 (2016). Figure 1-a

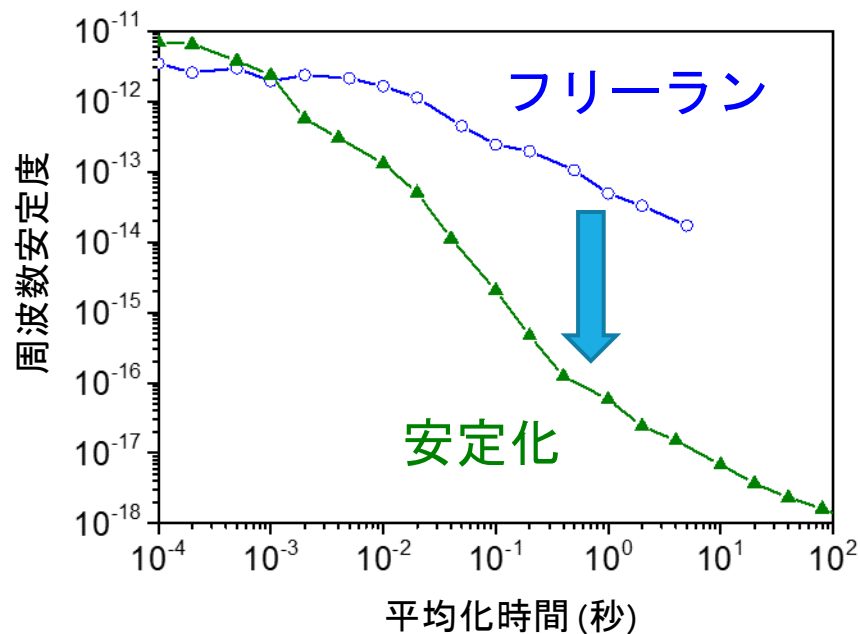
- 光格子時計の精密周波数を遠隔地へ配信
- 離れた光格子の周波数比較
→ 将来の秒の定義の改定、相対論測地学

8. 拡張性

光周波数の光ファイバー伝送



60 km光ファイバーでの光周波数伝送精度 (理研)



8. 拡張性

アメリカ

NIST – JILA : 32 km

NIST : 250 km

S. M. Foreman, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 153601 (2007).

N. R. Newbury, *et al.*, Opt. Lett. **32**, 3056 (2007).

ヨーロッパ

SYRTE-LPL: 172 km

PTB – IQ(LUH) : 73 km

PTB – MPQ : 920 km

150 km インターネット用光ファイバー利用

H. Jiang, *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B. **25**, 2029 (2008).

A. Pape, *et al.*, Opt. Express **18**, 21477 (2010).

K. Predehl *et al.*, Science 336, 441 (2012).

O. Lopez, *et al.*, Opt. Express **18**, 16849 (2010).

Japan

AIST – UTokyo : 120 km

NICT – UTokyo : 60 km

RIKEN – UTokyo : 30 km

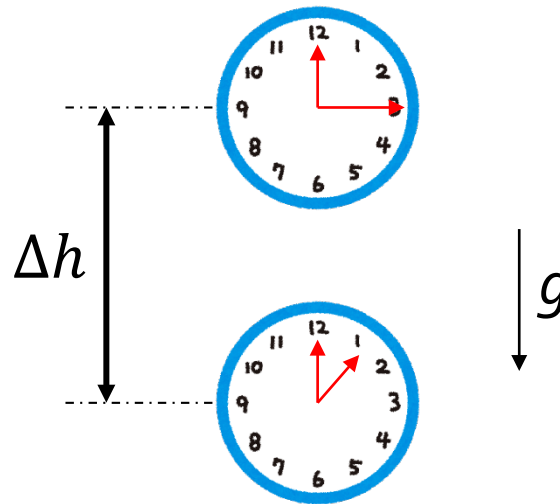
M. Musha, *et al.*, Opt. Express. **16**, 16459 (2008).

M. Fujieda, *et al.*, Opt. Express. **19**, 16498 (2011).

T. Akatsuka, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 032801 (2014).

9. 応用先、各応用への課題

相対論的測地学 (Relativistic Geodesy)



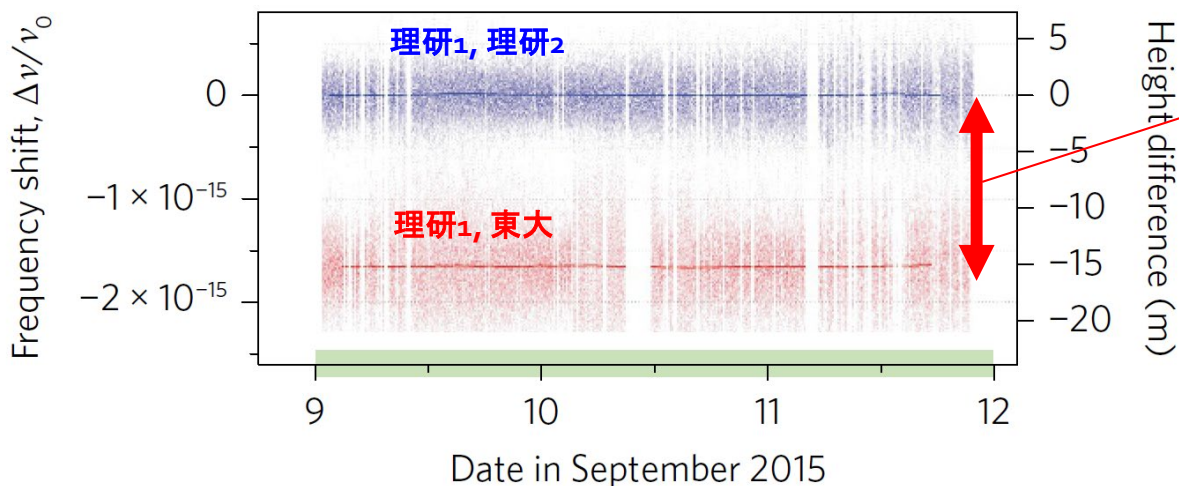
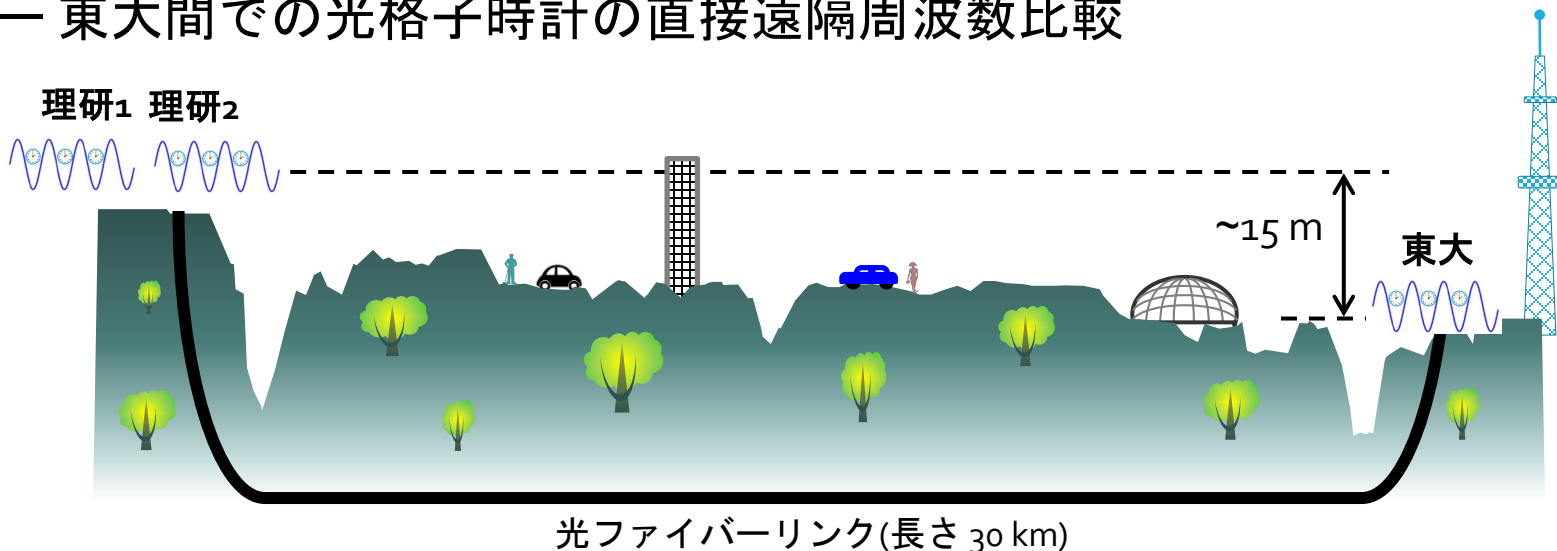
$$\frac{\delta f}{f} = \left(\frac{g}{c^2}\right) \Delta h = 1 \times 10^{-18} \quad \text{for} \quad \Delta h = 1 \text{ cm}$$

地球上では、標高が違くと時間の進み方が違う

- GPS (衛星高度約2万km) では、相対論効果の補正が必須
- 原子時計(同じ建物内) で、 $\Delta h = 33 \text{ cm}$ の重力シフトを検出
C. W. Chou, *et al.*, Science **329**, 1630 (2010).

10. 応用先、各応用への課題

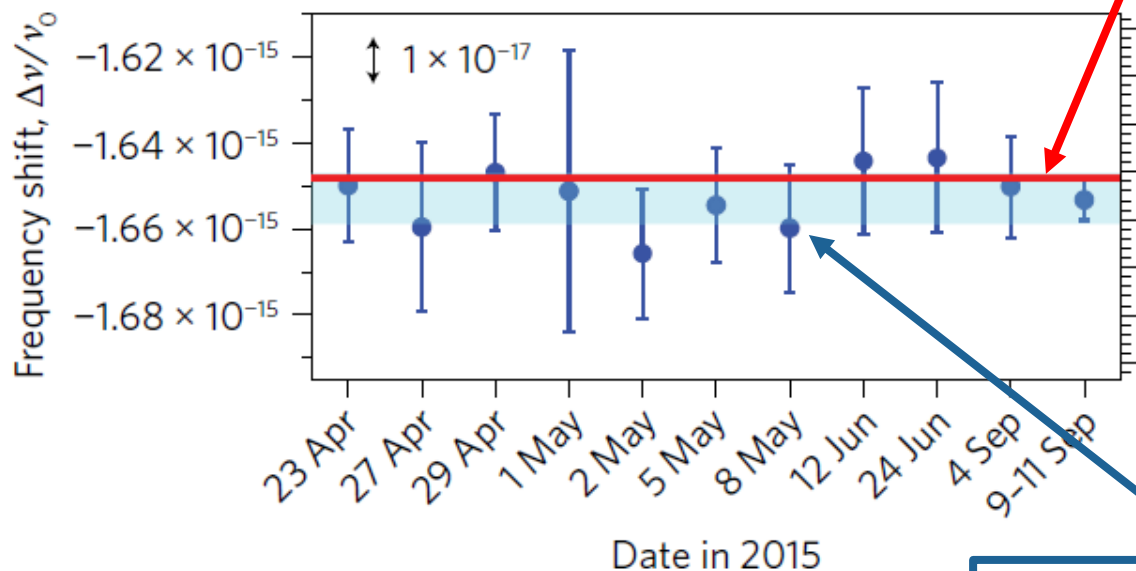
理研 — 東大間での光格子時計の直接遠隔周波数比較



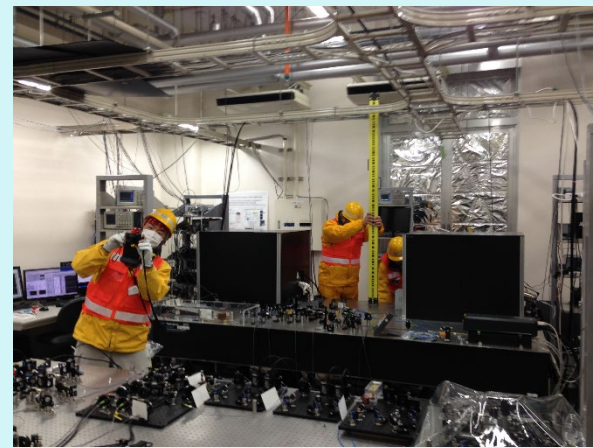
重力シフト

$$\Delta f/f = 1652.9 (5.9) \times 10^{-18}$$
$$\Delta h = 1516 (5) \text{ cm}$$

10. 応用先、各応用への課題



赤線：水準測量で出した標高差を重力シフト差に換算した値

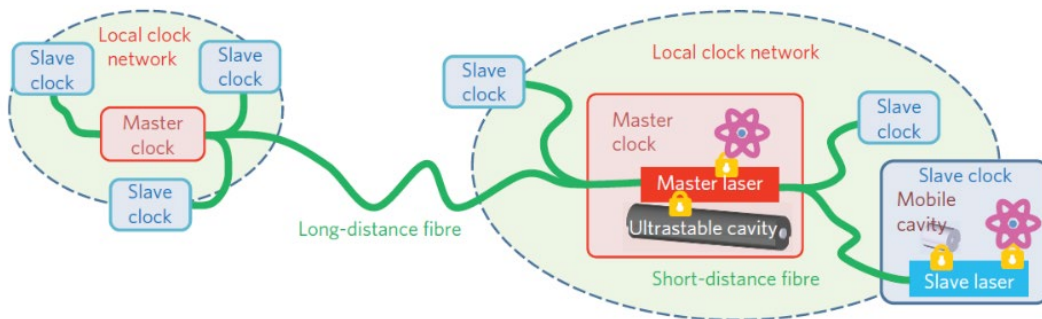


(写真：理化学研究所 香取量子計測研究室)

光格子時計で測定した重力シフト差

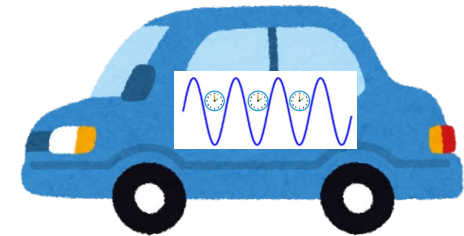
10. 応用先、各応用への課題

“Internet of clocks”



T. Takano *et al.*, Nature Photonics **10**, 662 (2016). Figure 1-a

任意の場所に持っていくには？



- 地殻変動モニター → 地震や火山の活動監視
- 大型電波望遠鏡やVLBIのアンテナ同期用

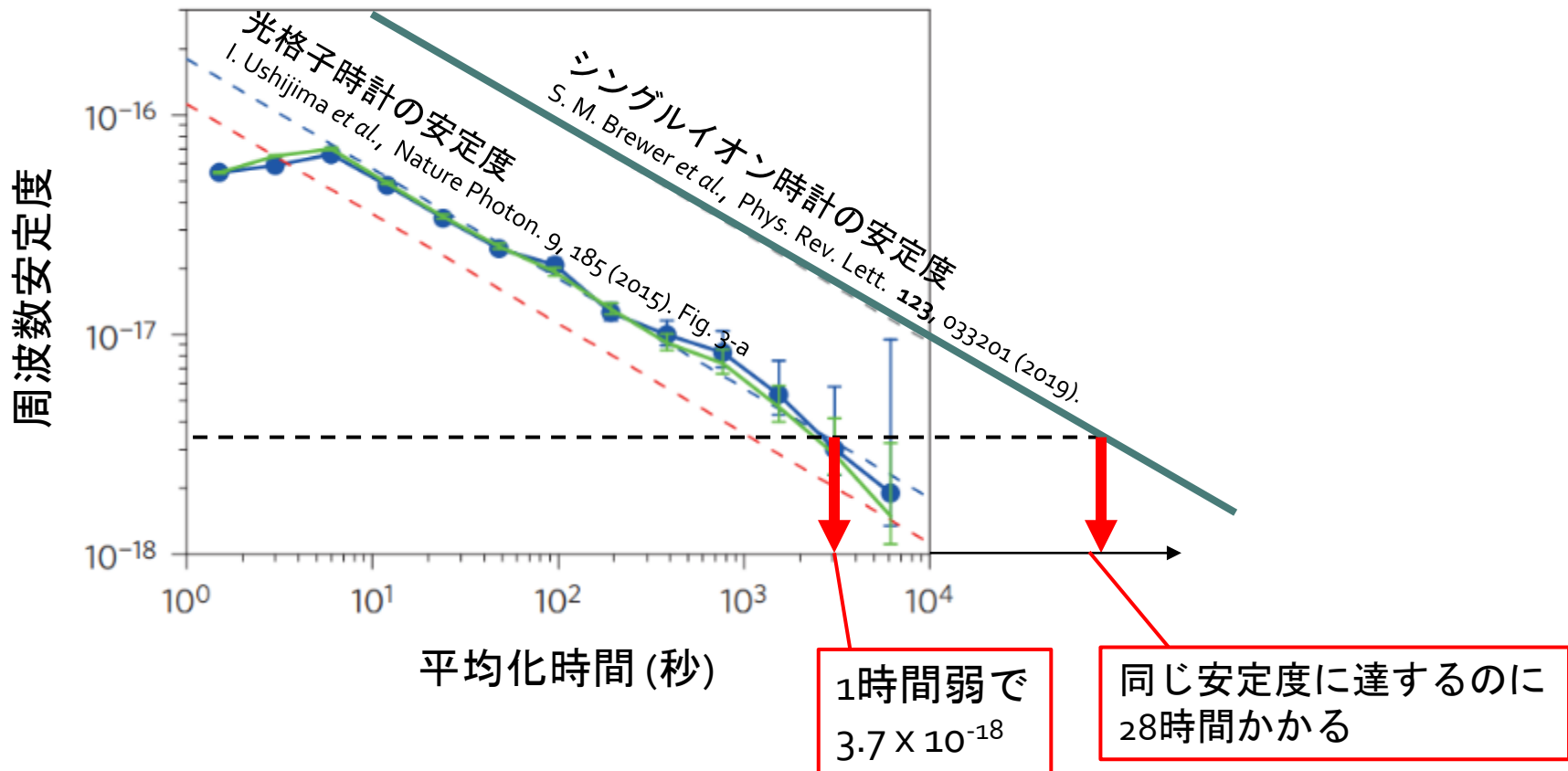
- 小型ポータブル化

11. 他の系との関係

イオン時計との比較

光格子時計は、周波数精度を出すスピードが速い！

光格子時計は、一気に多数個(下の例では 10^4 個程度)の原子を観測するので、イオン1個のイオン時計より信号のS/Nが格段に良い。



→ (応用例) 地殻変動の短い時間変動が見える

12. より深く勉強したい方向けの文献

“1秒って誰が決めるの?: 日時計から光格子時計まで” 安田 正美
(ちくまプリマー新書, 2014, ISBN-10 : 4480689184)

“Frequency Standards Basics and Applications” by Fritz Riehle
(Wiley-VCH社, 2005年, ISBN-10 : 3527402306)

“Optical atomic clocks”
A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik and P. O. Schmidt
Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015).