



神戸大CPSセミナー  
令和4年3月1日(火)  
Zoom online

# 光格子時計の小型化と 相対論的測地技術応用

理化学研究所  
開拓研究本部 香取量子計測研究室  
光量子工学研究センター 時空間エンジニアリング研究チーム

高本 将男、牛島 一郎、香取 秀俊

# 目次

1. 光格子時計の紹介
2. 光格子時計の実証実験
3. 光ファイバリンクを用いた時計の遠隔比較
4. 光格子時計の可搬化
5. 東京スカイツリーでの一般相対性理論検証実験
6. 相対論的測地技術応用に向けて

# 1. 光格子時計の紹介

光格子時計の原理と魔法波長

# 時計の高精度化の意義

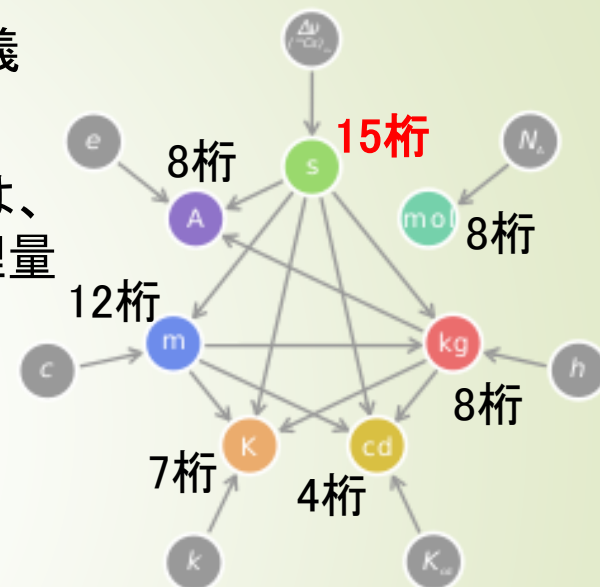
## ● 国際単位系 (SI)

- kg原器を廃止して全ての物理量が量子標準で定義  
(2019年改訂@国際度量衡委員会)
- 「秒」は1967年から量子標準が採用され、現在では、SI単位系の中でも突出した15桁の精度を誇る物理量
- 「秒」は他の基本単位を支える要
- 精密計測・科学を支える基幹技術

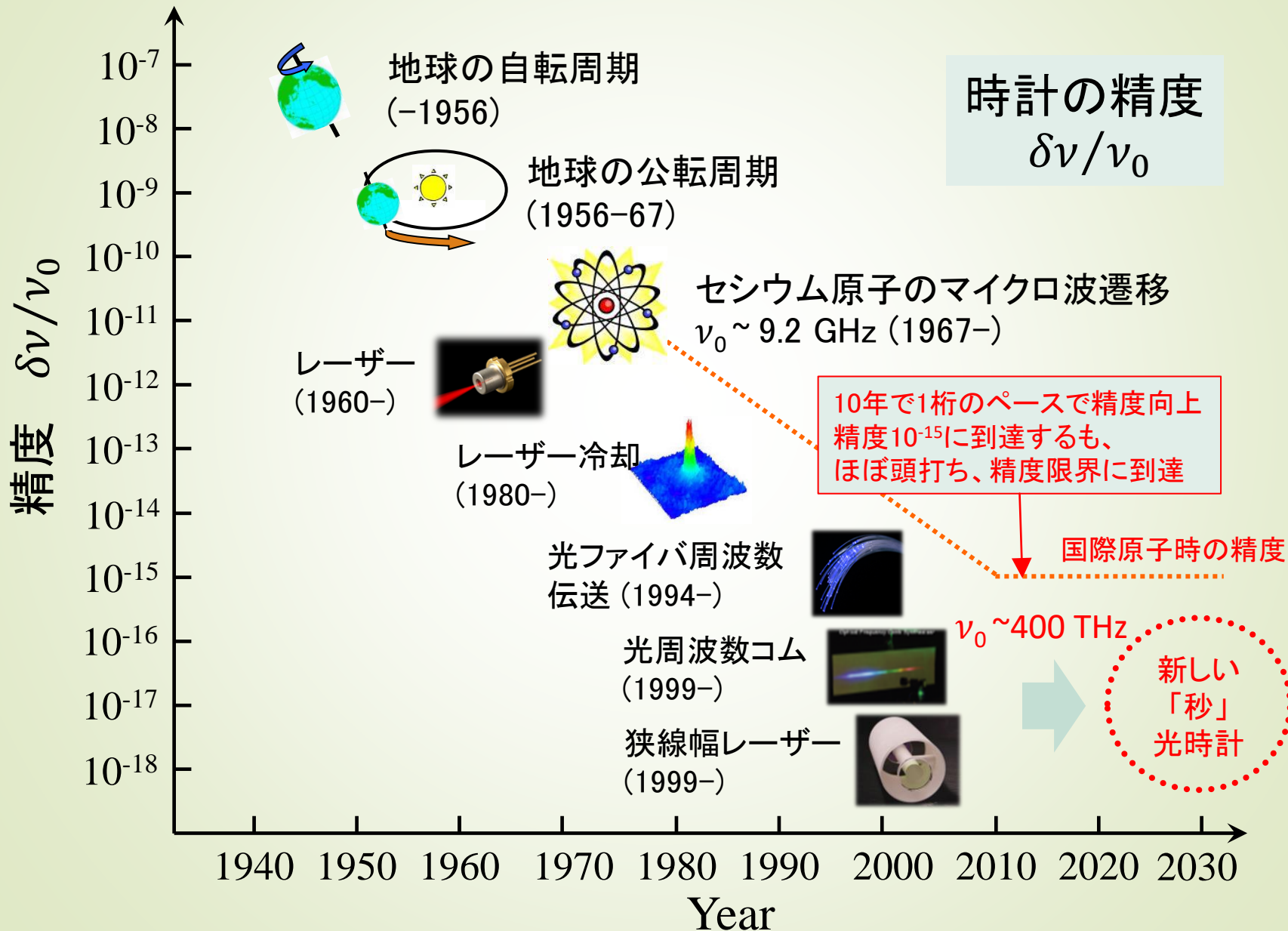
## ● 高精度な時計の社会貢献

- 人工衛星搭載の原子時計によるGNSS(地球規模のナビゲーションシステム)の実現
- 超高速大容量通信ネットワークのタイミング同期
- 重要な社会インフラとして機能

高精度な時計は、標準としての枠を超えて、科学技術、社会インフラの両面において重要な基盤技術

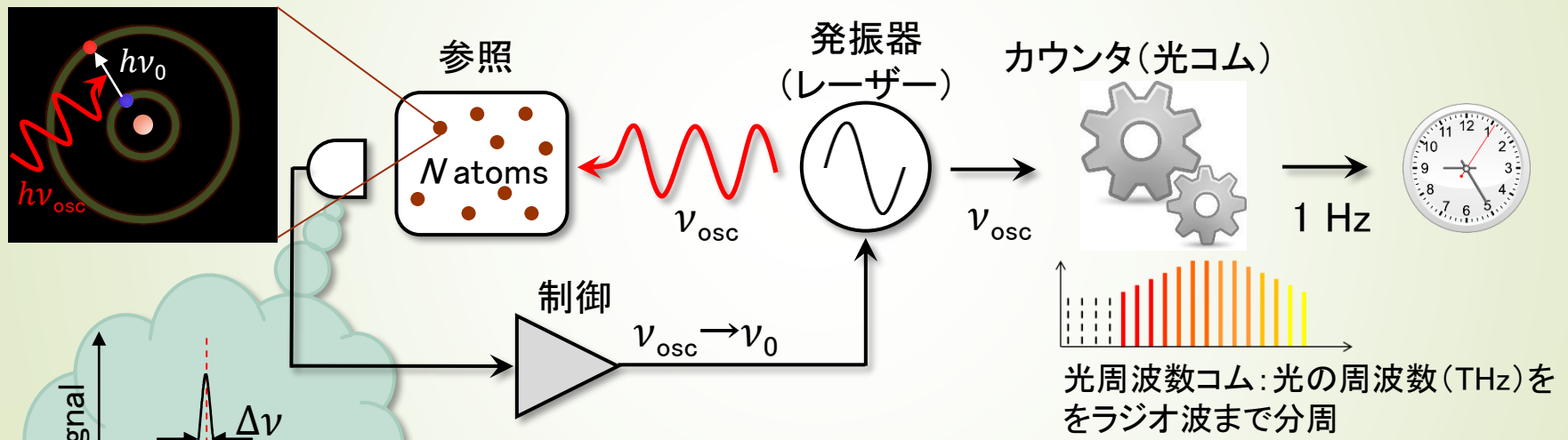


# 「秒」の定義の変遷



# 原子時計の原理

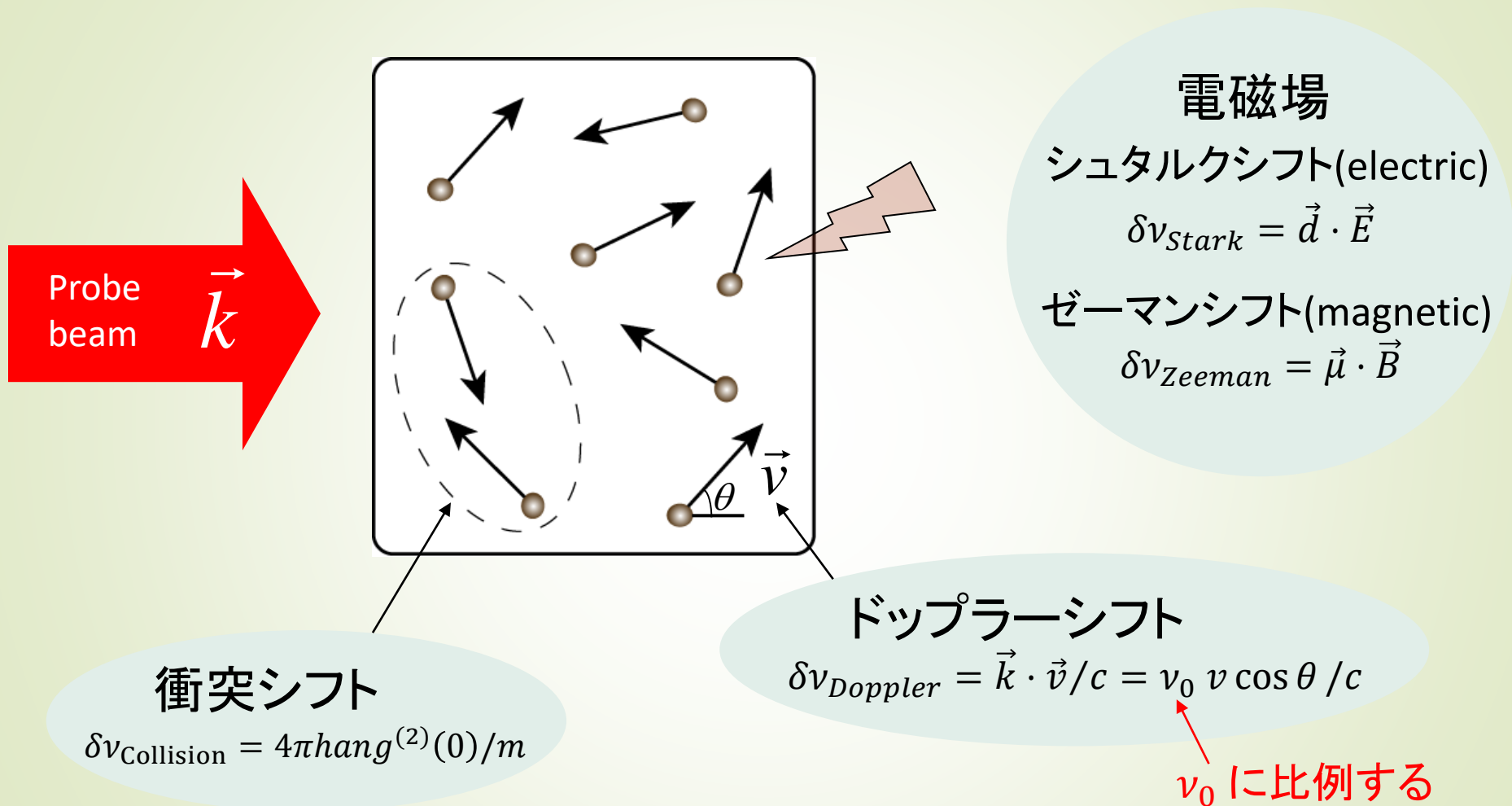
- 原子の遷移周波数  $\nu_0$  は不変である
- 発振器の周波数  $\nu_{osc}$  が原子の周波数  $\nu_0$  に常に共鳴するように制御
- $\nu_{osc}$  を  $\nu_0$  で分周して1 Hz を生成 (周波数カウンタ、光周波数コム)
- 1秒おきに針を進める



高性能な時計を作るためには、

- 原子の遷移周波数  $\nu_0$  に対する外乱  $\delta\nu$  をいかに抑えるか? (精度)  
⇒ 原子の熱運動 (ドップラーシフト)、電磁場、原子間衝突など
- 原子の量子状態をいかに高い S/N で読み出すか? (安定度)  
⇒ できるだけ多くの原子を観測 (量子ノイズの影響  $\propto 1/\sqrt{N}$ )

# 様々な外乱による原子の共鳴周波数のシフト



$\nu_0$ を高くしても不確かさ $\delta\nu/\nu_0$ が小さくならない  
⇒原子の運動を抑える強い束縛(トラップ)が必要

# 光時計の有力候補

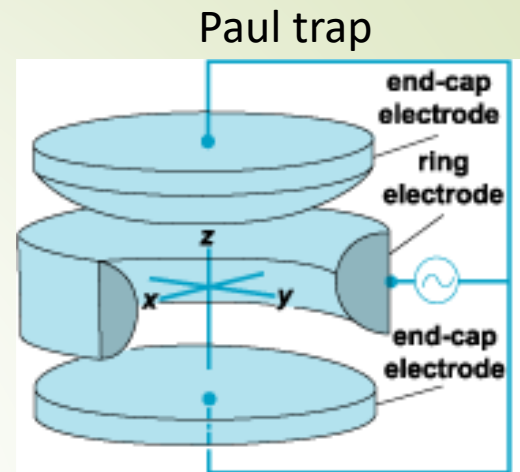
## 単一イオン時計 (H. Dehmelt, 1973-)

- Al<sup>+</sup>, Hg<sup>+</sup>(NIST), Yb<sup>+</sup>(NPL,PTB), Sr<sup>+</sup>(NPL,NRC), In<sup>+</sup>(MPQ)...

荷電粒子を四重極電場のゼロ点にトラップ

イオントラップの強い閉じ込めによって、完全にドップラーシフトを除去できる (ラム・ディッケ束縛)

単一イオンにより衝突シフトがない



正確さ  $\delta f/f_0 \sim 10^{-18}$  実現可能

(NIST) S. M. Brewer *et al.*, “<sup>27</sup>Al<sup>+</sup> Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10<sup>-18</sup>,” *Phys. Rev. Lett.* 123, 033201 (2019)

## <sup>27</sup>Al<sup>+</sup> Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10<sup>-18</sup>

S. M. Brewer,<sup>1,2,\*</sup> J.-S. Chen,<sup>1,2,†</sup> A. M. Hankin,<sup>1,2,‡</sup> E. R. Clements,<sup>1,2</sup> C. W. Chou,<sup>1</sup> D. J. Wineland,<sup>1,2,3</sup> D. B. Hume,<sup>1</sup> and D. R. Leibrandt<sup>1,2,§</sup>

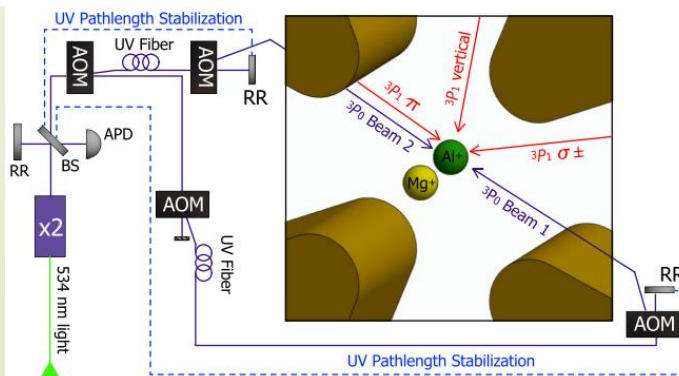


TABLE I. Fractional frequency shifts ( $\Delta\nu/\nu$ ) and associated systematic uncertainties for the <sup>27</sup>Al<sup>+</sup> quantum-logic clock.

Effect	Shift (10 <sup>-19</sup> )	Uncertainty (10 <sup>-19</sup> )
Excess micromotion	-45.8	5.9
Blackbody radiation	-30.5	4.2
Quadratic Zeeman	-9241.8	3.7
Secular motion	-17.3	2.9
Background gas collisions	-0.6	2.4
First-order Doppler	0	2.2
Clock laser Stark	0	2.0
AOM phase chirp	0	<1
Electric quadrupole	0	<1
Total	-9336.0	9.4



# 光時計の有力候補

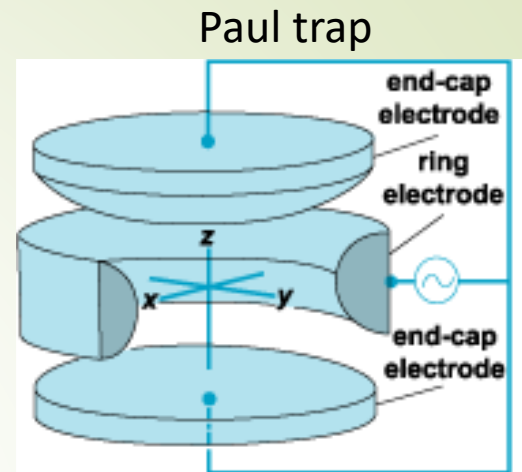
## 単一イオン時計 (H. Dehmelt, 1973-)

-  $\text{Al}^+$ ,  $\text{Hg}^+$ (NIST),  $\text{Yb}^+$ (NPL,PTB),  $\text{Sr}^+$ (NPL,NRC),  $\text{In}^+$ (MPQ)...

荷電粒子を四重極電場のゼロ点にトラップ

イオントラップの強い閉じ込めによって、完全にドップラーシフトを除去できる (ラム・ディッケ束縛)

単一イオンにより衝突シフトがない



**正確さ**  $\delta f/f_0 \sim 10^{-18}$  実現可能

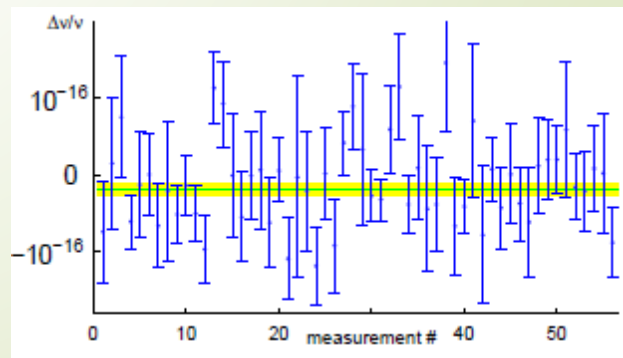
(NIST) S. M. Brewer *et al.*, “ $^{27}\text{Al}^+$  Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below  $10^{-18}$ ,” *Phys. Rev. Lett.* 123, 033201 (2019)

**安定度**

単一イオンの量子ノイズ ( $N=1$ ) が安定度を制限 (S/Nが悪い)

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{1\text{Hz}}{10^{15}\text{Hz}} \frac{1}{\sqrt{1/\text{s} \times \tau \text{s}}} = 1 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau}$$

$1 \times 10^{-18}$  の最終精度に到達するためには、  
 $\tau = 10^6 \text{ s}$  (10日) もの長い積算時間が必要



# 光時計の有力候補

## 光格子時計 (H. Katori, 2001-)

- Sr (RIKEN/Tokyo, JILA, SYRTE, PTB, LENS, NICT, NMIJ, NPL, NIM),  
 Yb (NIST, NMIJ, INRIM, KRIS), Hg (Tokyo, SYRTE), Cd (RIKEN)

数百万個の原子を光格子ポテンシャルでトラップ  
 原子を光格子の腹(電場強度が強い所)にラム・ディッケ  
 束縛→ドップラーシフトの除去  
 各格子点に原子を1個ずつトラップすれば衝突シフトなし

**正確さ**  $\delta f/f_0 \sim 10^{-18}$  到達可能

**安定度**  $N \sim 10^6$  個の多数の原子を同時観測  
 100万台のイオン時計の同時並列運転

$10^{-18}$  の最終精度に到達するために、

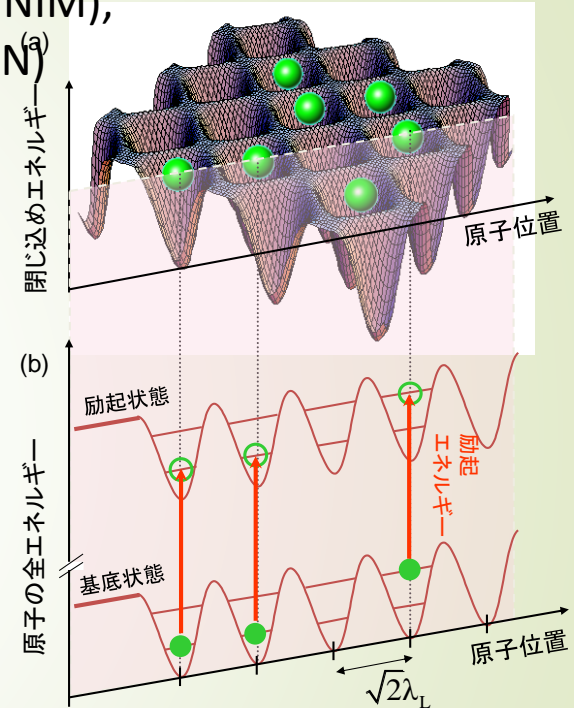
$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx \frac{\delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N}}$$

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

10 days averaging of  $N=1$  ion

1s averaging of  $N=10^6$  atoms

短時間で高い精度を実現できる原子時計

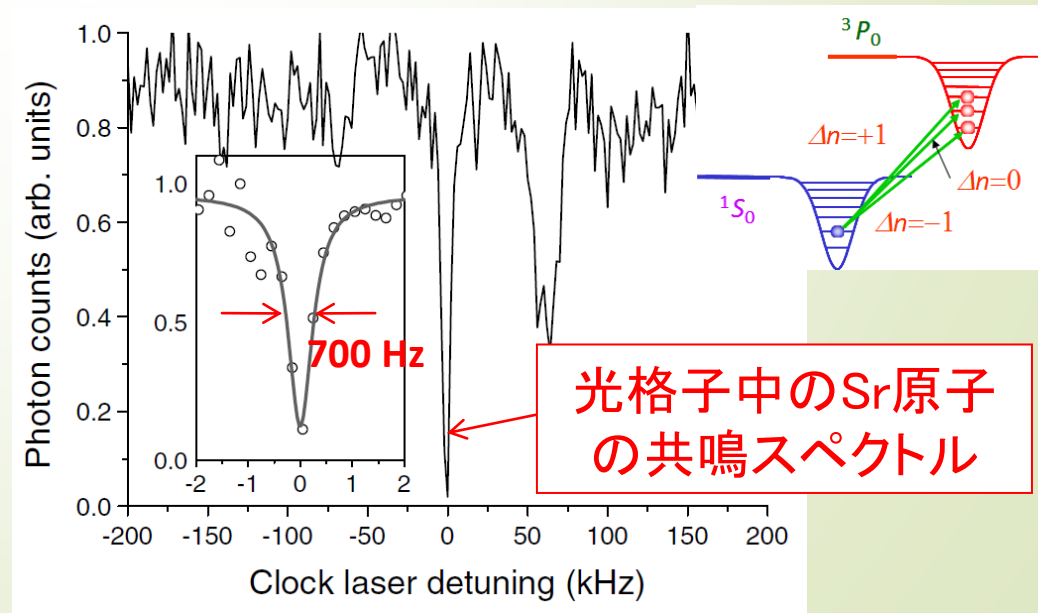
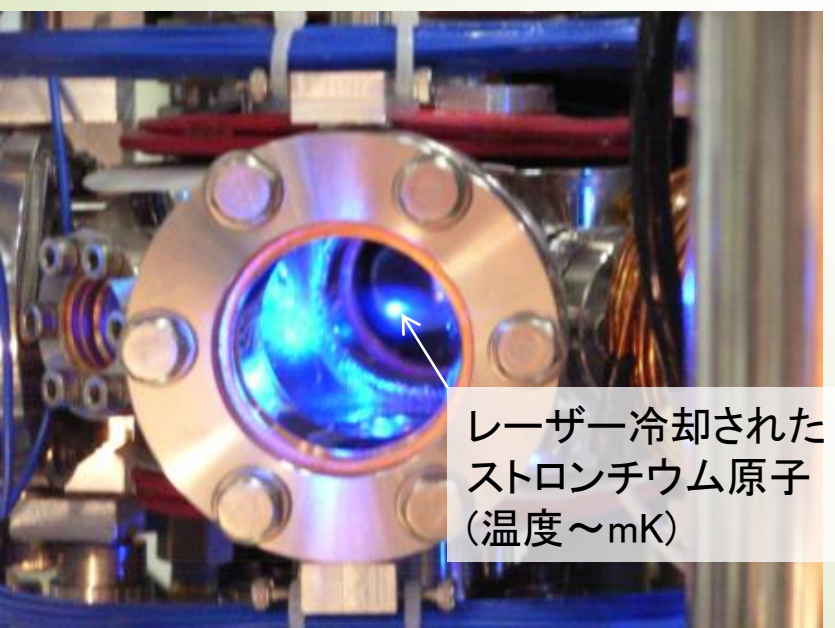
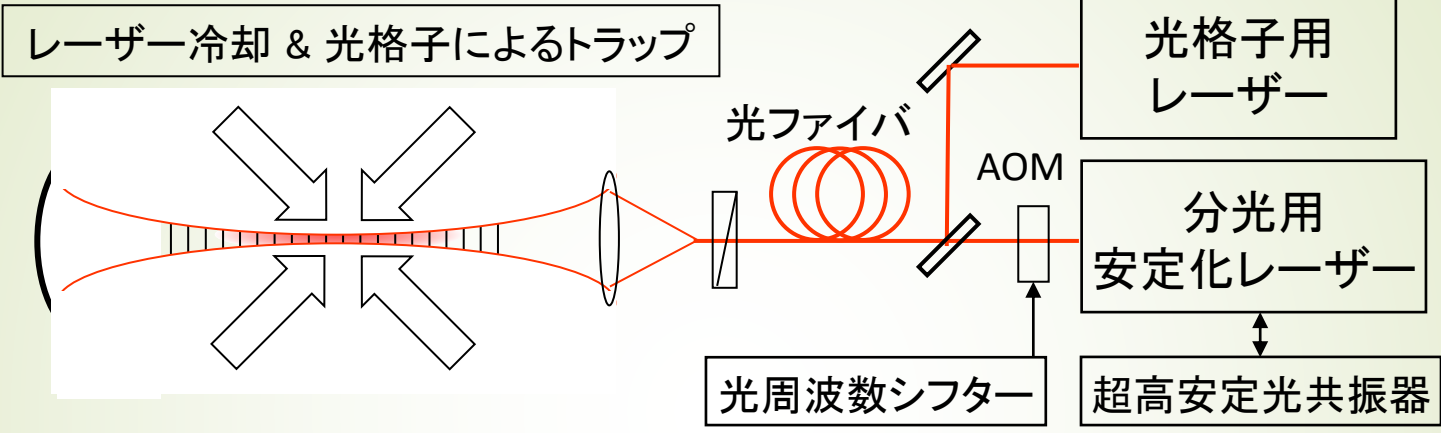


Katori, FMS (2001)  
 Katori, Takamoto, Pal'chikov  
 & Ovisannikov, PRL **91**, 173005 (2003)  
 Takamoto et al., Nature (2005)

## 2. 光格子時計の実証実験

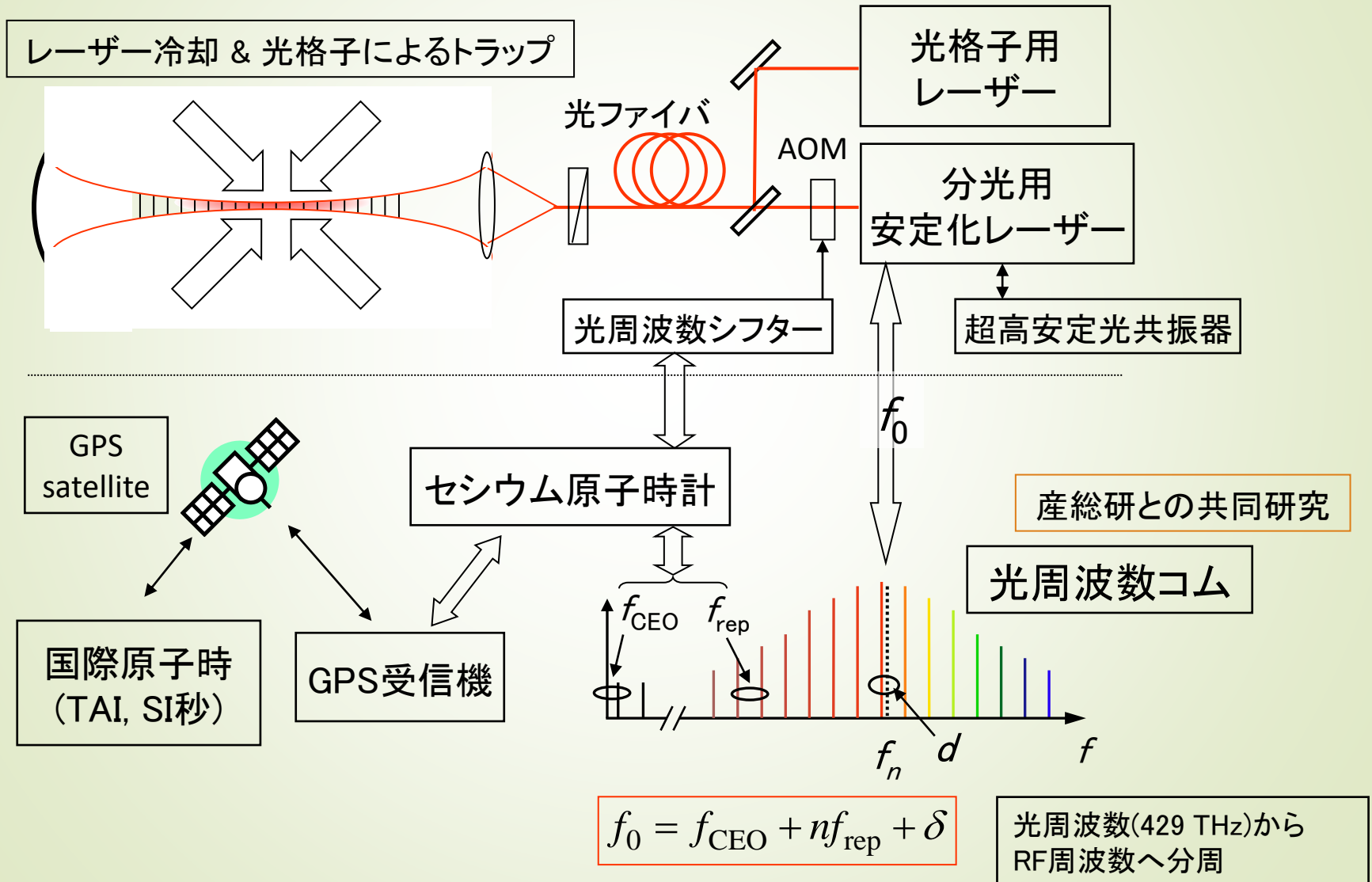
時計動作の実現と「秒」の二次表現に採択

# 光格子時計の実証実験 — 光格子中のSr原子の精密分光(2003) —



# 光格子時計の実証実験

## —Sr原子光格子時計の周波数計測(2005)—



# 光格子時計の周波数計測の実現(2005) (時計としての動作の初の実証)

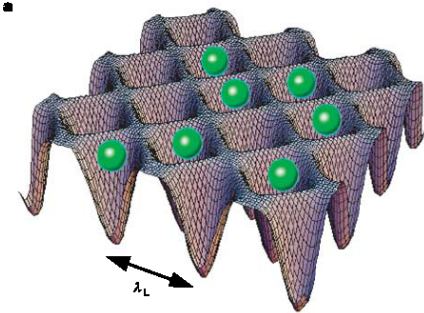
## An optical lattice clock

Masao Takamoto<sup>1</sup>, Feng-Lei Hong<sup>3</sup>, Ryoichi Higashi<sup>1</sup> & Hidetoshi Katori<sup>1,2</sup>

The precision measurement of time and frequency is a prerequisite not only for fundamental science but also for technologies that support broadband communication networks and navigation with global positioning systems (GPS). The SI second is currently realized by the microwave transition of Cs atoms with a fractional uncertainty of  $10^{-15}$  (ref. 1). Thanks to the optical frequency comb technique<sup>2,3</sup>, which established a coherent link between optical and radio frequencies, optical clocks<sup>4</sup> have attracted increasing interest as regards future atomic clocks with superior precision. To date, single trapped ions<sup>4-6</sup> and ultracold neutral atoms in free fall<sup>7,8</sup> have shown record high performance that is approaching that of the best Cs fountain clocks<sup>1</sup>. Here we report a different approach, in which atoms trapped in an optical lattice serve as quantum references. The 'optical lattice clock'<sup>9,10</sup> demonstrates a linewidth one order of magnitude narrower than that observed for neutral-atom optical clocks<sup>7,8,11</sup>, and its stability is better than that of single-ion clocks<sup>4,5</sup>. The transition frequency for the Sr lattice clock is  $429,228,004,229,952(15)$  Hz, as determined by an optical frequency comb referenced to the SI second.

can confine atoms in a submicrometre region, and its periodicity allows the production of billions of micro-traps in a volume of  $1 \text{ mm}^3$ . These features are indeed attractive for fine spectroscopy with enhanced stability.

In general, such a lattice-trapping field significantly modifies the internal states of atoms by so-called light shifts, and so the system was not seriously considered for atomic clocks until the demonstration of the light shift cancellation technique<sup>16,17</sup>. The transition frequency  $\nu$



Accurate atomic clocks rely on the observation of a narrow atomic resonance  $\Delta\nu$  at a transition frequency  $\nu_0$  that is insensitive to external perturbations to the highest possible degree. An indicator of clock performance is the fractional instability, which is minimized by repeatedly measuring the high-Q ( $Q = \nu_0/\Delta\nu$ ) transition. The fractional instability is given by the Allan deviation<sup>12</sup>

$$\sigma_y(\tau) \approx \Delta\nu / (\nu_0 \sqrt{N\tau}) \quad (1)$$

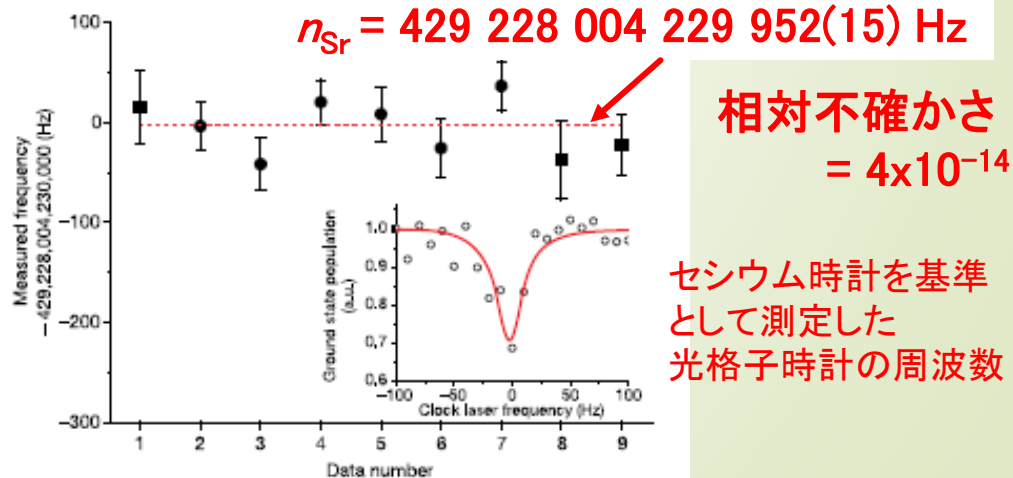


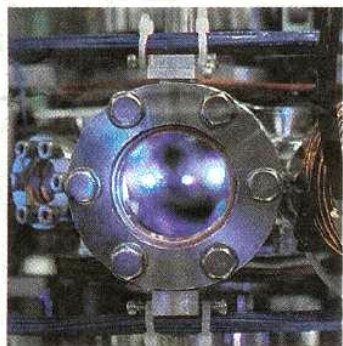
Figure 4 | Absolute frequency measurement of the  $^1S_0 - ^3P_0$  transition of Sr atoms in an optical lattice. The inset shows the typical clock transition

### 超高精度の時計 基礎実験に成功

東大・産総研グループ

137億年前の宇宙誕生から誤差0.4秒

原子時計の精度を一気に千倍も引き上げる(1)ができる「光格子時計」の基礎実験に東大と産総研技術総合研究所・計測標準研究部門(茨城県つくば市)のグループが成功し、19日発行の英科学誌「ネイチャー」に発表する。



中央の小さな青い点が、極低温のストロンチウム原子を利用した光格子時計の心臓部=17日、東大工学部で

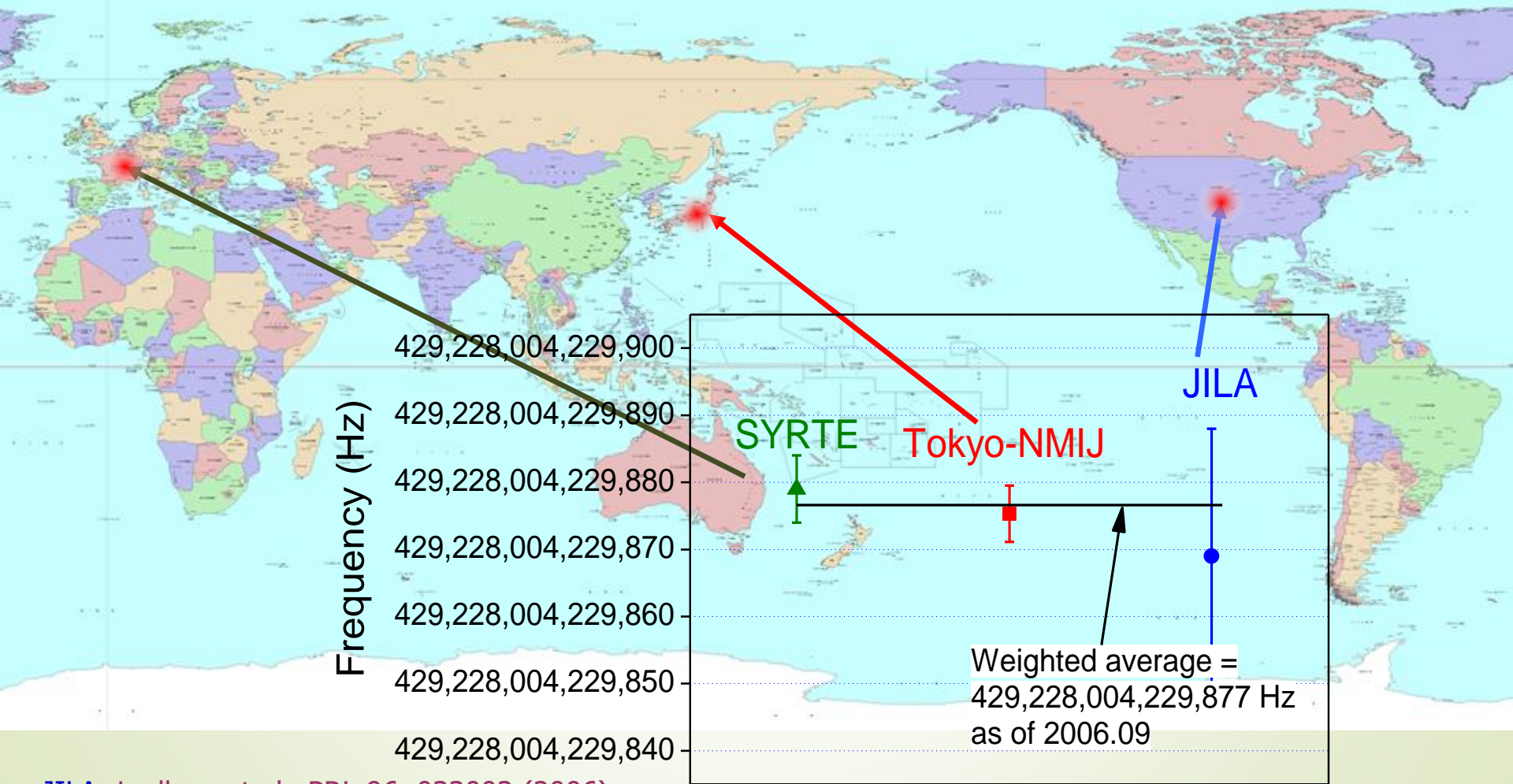
実現すれば、理論上、宇宙が誕生した137億年前から現在まで動き続けたとしても0.4秒も狂わない正確さになる。現在の1秒は、セシウム原子が吸収・放出する電磁波(マイクロ波)の振動数で定義されており、世界最高精度の原子

時計は3千万年に1秒しか狂わない。しかし、同じ電磁波だが振動数が千倍ほど高い光なら、精度を千倍程度高めることができるため「光時計」の開発競争が続いてきた。東大の香取秀俊・助教授らは、絶対零度近くまで冷やしたストロンチウ

ム原子をレーザーで10万分の2程度の空間に閉じ込めた「光格子」と呼ばれる原子配列を作製し、これに光を当て、原子が吸収する光の振動数を測って時計として使えることを確かめた。試作は現在最高精度の時計の10分の1程度の精度だが、香取助教授によれば、理論通りの精度が達成できる」と時計が「これほど精度が高い運動する時計は時計の進み方が変わる」というアイディアの対照性理論の効果も検証可能。「光時計を持つべきは、止まっていない時計との比較で遅れがなくなるはず」と香取助教授

(2005年5月19日 朝日新聞・朝刊)

# Sr光格子時計の周波数計測 (2006)と 日・米・仏の3グループの周波数値の一致



JILA: Ludlow, et al., PRL 96, 033003 (2006)

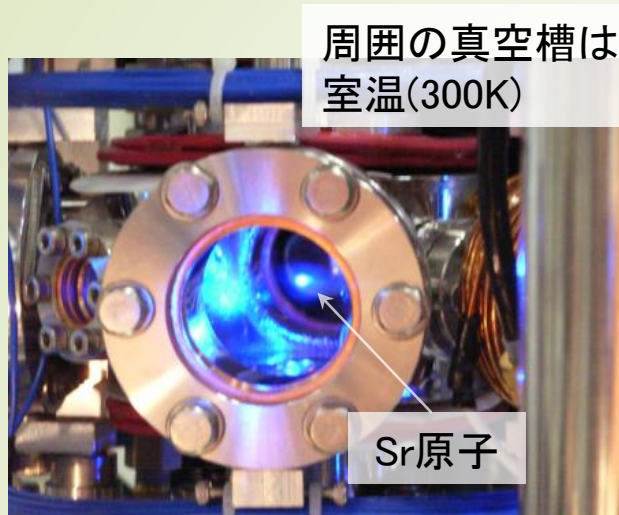
Tokyo-NMIJ: Takamoto, et al., JPSJ 75, 104302 (2006)

SYRTE: Targat, et al., PRL 97, 130801 (2006)

Measurement

2006年 国際度量衡委員会によりSr原子を用いた光格子時計が「秒の二次表現」に採択

# 18桁精度実現に向けた最大の課題：黒体輻射シフト



## ■ 黒体輻射シフト

- 温度  $T$  で熱平衡にある電磁輻射
- 室温 ( $T=300$  K) では、
  - スペクトルのピーク:  $17 \mu\text{m}$
  - $E(\text{rms}) = 8.319$  V/cm
- 黒体輻射によって生じる光シフト

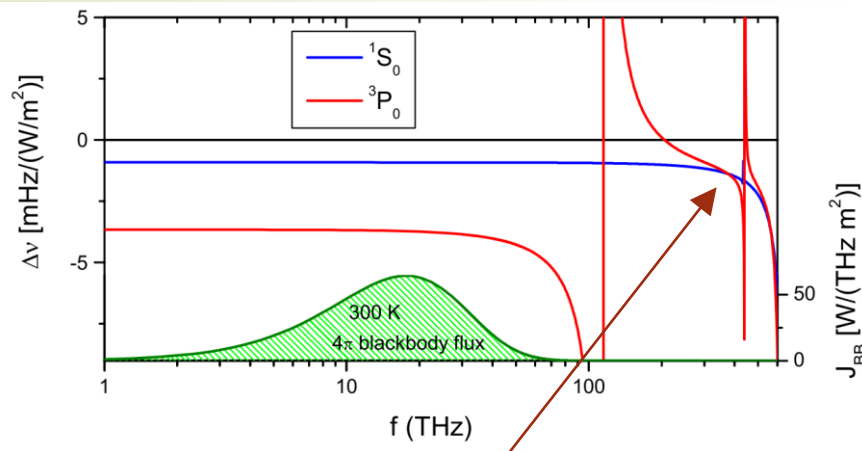
## ■ Sr原子の黒体輻射による周波数シフト

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

室温(300 K)で温度の不確かさ 0.1 K

$$\Rightarrow \Delta \nu_{\text{BBR}} / \nu_{\text{Sr}} = 1 \times 10^{-17}$$

これまでのSr光格子時計比較を制限



光格子レーザーによる光シフト  
は魔法波長で相殺

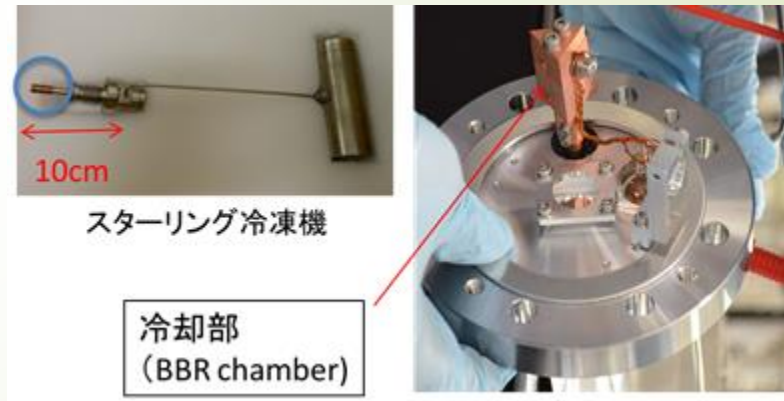
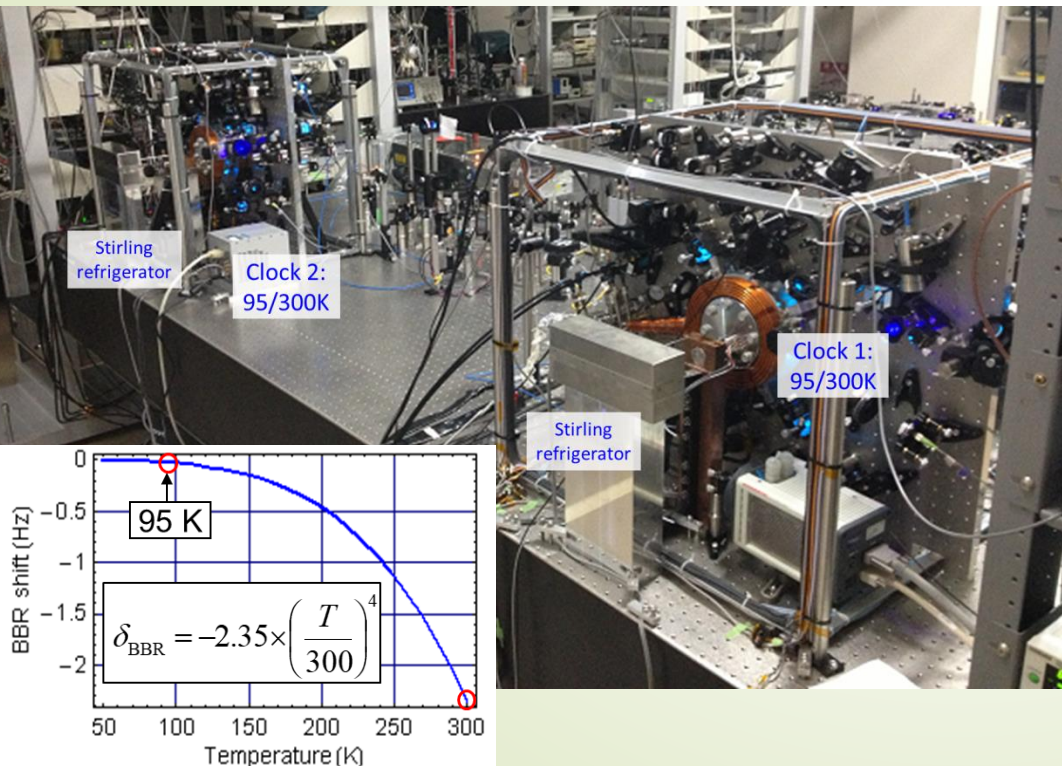
Atom	$\delta\nu_{\text{BBR}}$ (Hz)	$\nu_0$ (Hz)	$\delta\nu_{\text{BBR}}/\nu_0$	Uncertainty
Mg	-0.258(7)	$6.55 \times 10^{14}$	$-3.9 \times 10^{-16}$	$1 \times 10^{-17}$
Ca	-1.171(17)	$4.54 \times 10^{14}$	$-2.6 \times 10^{-15}$	$4 \times 10^{-17}$
Sr	-2.354(32)	$4.29 \times 10^{14}$	$-5.5 \times 10^{-15}$	$7 \times 10^{-17}$
Yb	-1.34(13)	$5.18 \times 10^{14}$	$-2.6 \times 10^{-15}$	$3 \times 10^{-16}$

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



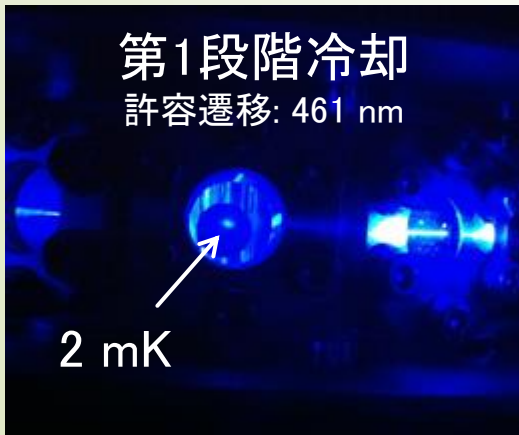
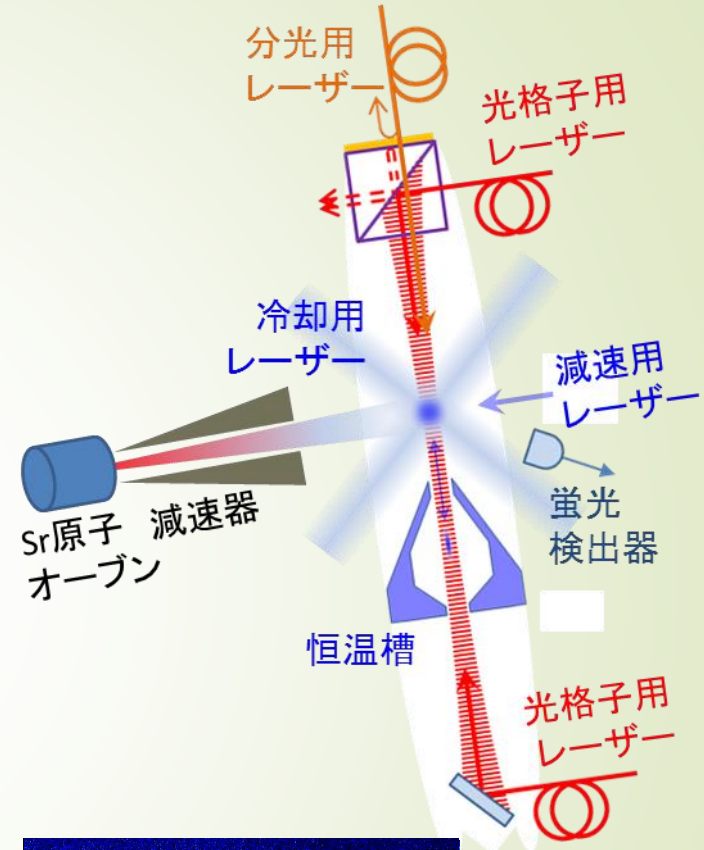
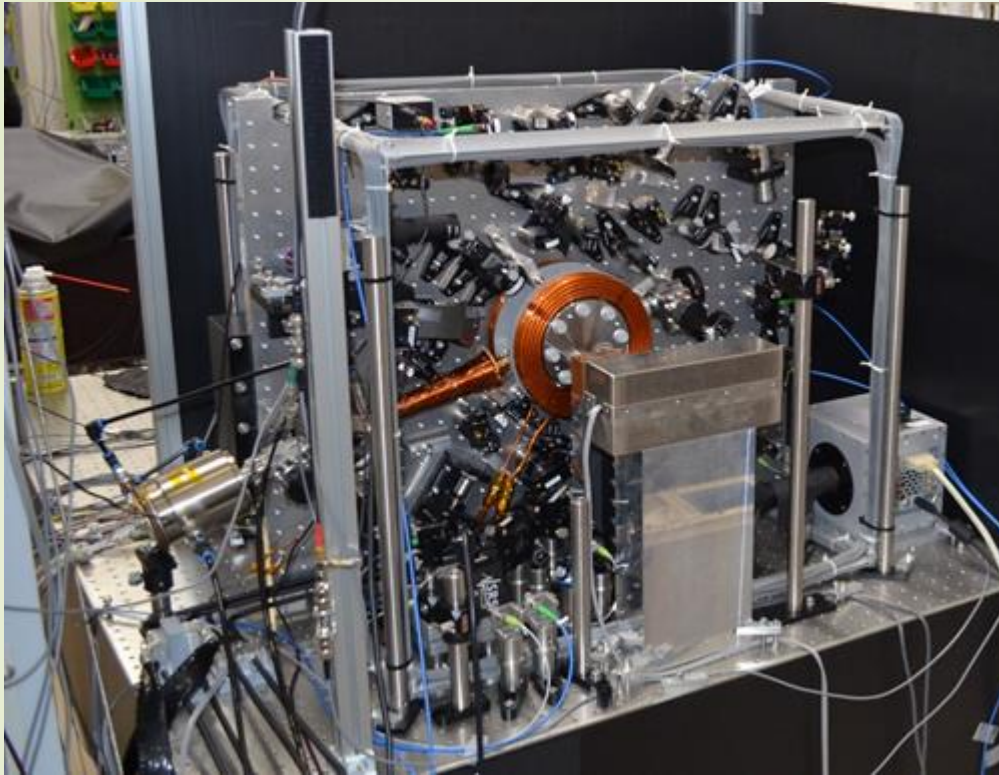
# 低温型Sr原子光格子時計の開発('13-15)

- 冷却した低温恒温槽内で時計分光する低温型Sr光格子時計の開発
  - 黒体放射のエネルギー密度  $\propto T^4$  (ステファン・ボルツマン則)
  - 温度 $T$ を下げることで比較的容易にBBRシフトを低減できる
  - $T = 95 \text{ K}$ まで冷却すれば、黒体放射シフトは $0.01 \text{ Hz}$ 
    - 温度の不確かさ  $\Delta T = 1 \text{ K} \Leftrightarrow \Delta\nu/\nu_0 = 1 \times 10^{-18}$ の時計精度
  - 低温型時計を2台開発して、2台の時計を高精度に周波数比較することによって、18桁時計精度を実証



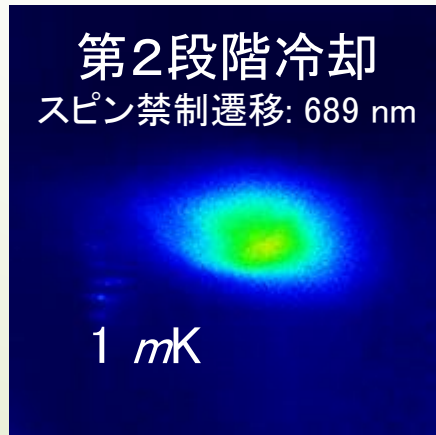
Temperature (K)	BBR shift (uncertainty) $\Delta\nu/\nu_0$
300 ( $\Delta T = \pm 0.1$ )	2.28 Hz ( $\pm 3 \text{ mHz}$ ) $\sim 1 \times 10^{-17}$
95 ( $\Delta T = \pm 1$ )	0.01 Hz ( $\pm 0.5 \text{ mHz}$ ) $\sim 1 \times 10^{-18}$

# 低温型光格子時計システム



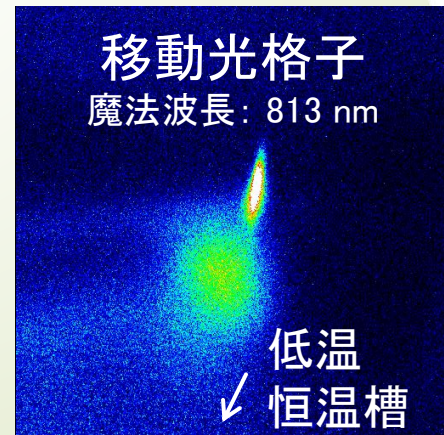
第1段階冷却  
許容遷移: 461 nm

2 mK



第2段階冷却  
スピン禁制遷移: 689 nm

1 mK

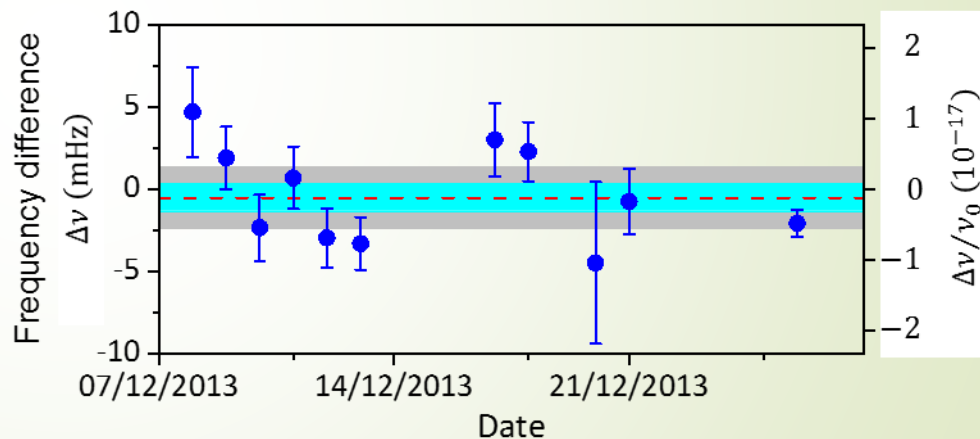
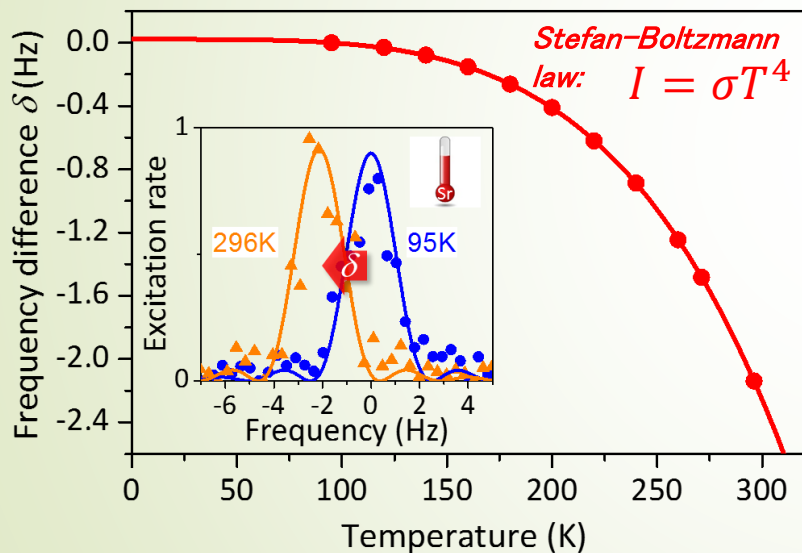
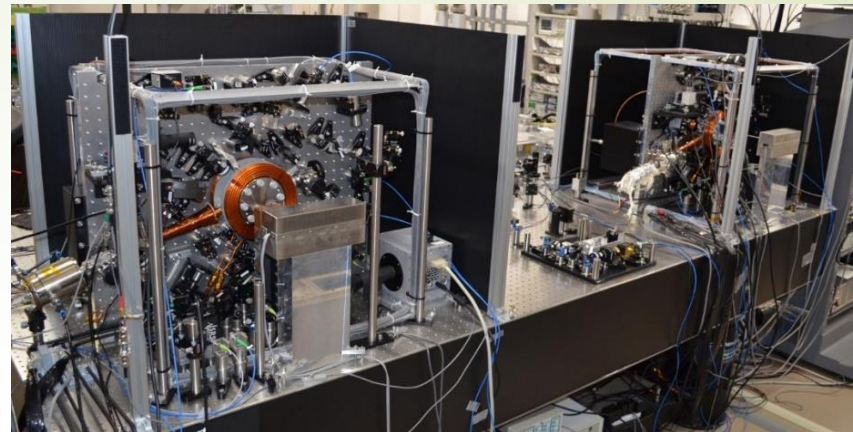


移動光格子  
魔法波長: 813 nm

低温  
恒温槽

# 18桁精度の光格子時計の実現 ('15)

- 低温での環境温度の制御により、黒体放射に起因する不確かさを大幅に低減
- 2台の光格子時計が18桁の不確かさで一致



2台の光格子時計  
の周波数差

$$\frac{\nu_{\text{Sr2}} - \nu_{\text{Sr1}}}{\nu_0} = (-1.1 \pm 2.0(\text{stat.}) \pm 4.4(\text{sys.})) \times 10^{-18}$$

*I. Ushijima et al., "Cryogenic optical lattice clocks,"  
Nature Photon. 9, 185-189 (2015)*

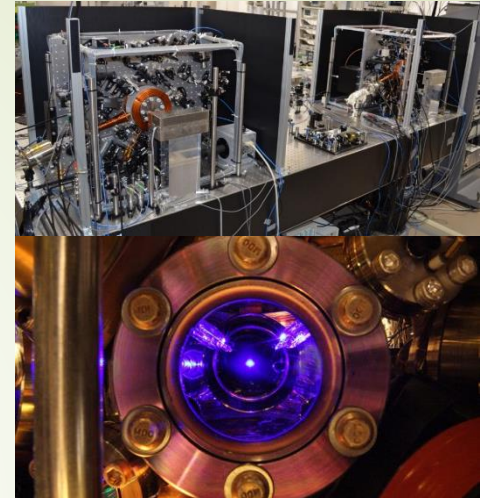
# Laboratory-based optical clocks with 18-digit accuracy

## Optical lattice clocks

**Sr (RIKEN)** I. Ushijima *et al.*, “Cryogenic optical lattice clocks,” *Nat. Photon.* 9, 185 (2015)

**Sr (JILA, USA)** T. Nicholson *et al.*, “Systematic evaluation of an atomic clock at  $2 \times 10^{-18}$  total uncertainty,” *Nat. Commun.* 6, 6896 (2015)

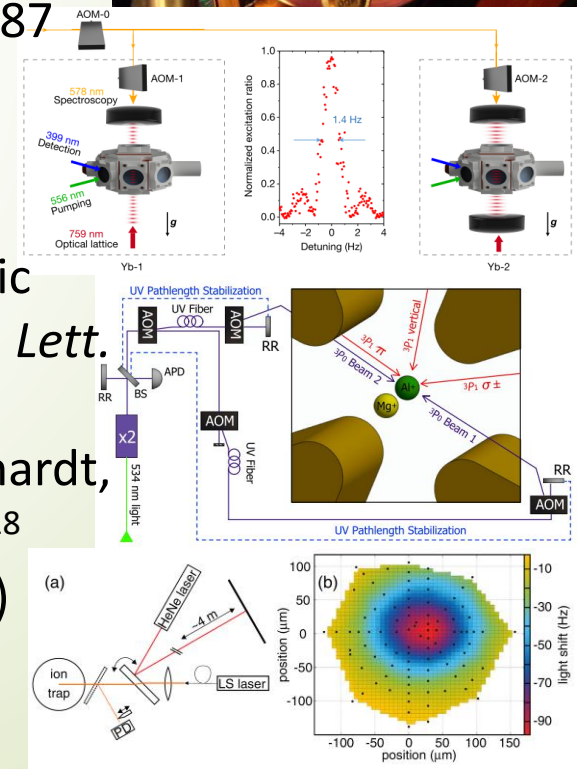
**Yb (NIST, USA)** W. F. McGrew *et al.*, “Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level,” *Nature* 564, 87 (2018)



## Single ion clocks

**Al<sup>+</sup> ion (NIST, USA)** S. M. Brewer *et al.*, “<sup>27</sup>Al<sup>+</sup> Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below  $10^{-18}$ ,” *Phys. Rev. Lett.* 123, 033201 (2019)

**Yb<sup>+</sup> ion (PTB, Germany)** N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, C. Tamm, and E. Peik, “Single-Ion Atomic Clock with  $3 \times 10^{-18}$  Systematic Uncertainty,” *Phys. Rev. Lett.* 116, 063001 (2016)



# 3. 時計の遠隔比較

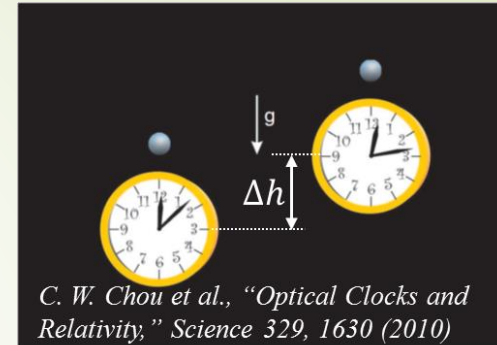
光ファイバを用いた遠隔光格子時計周波数比較

# 18桁精度の時計で実現する相対論的測地技術

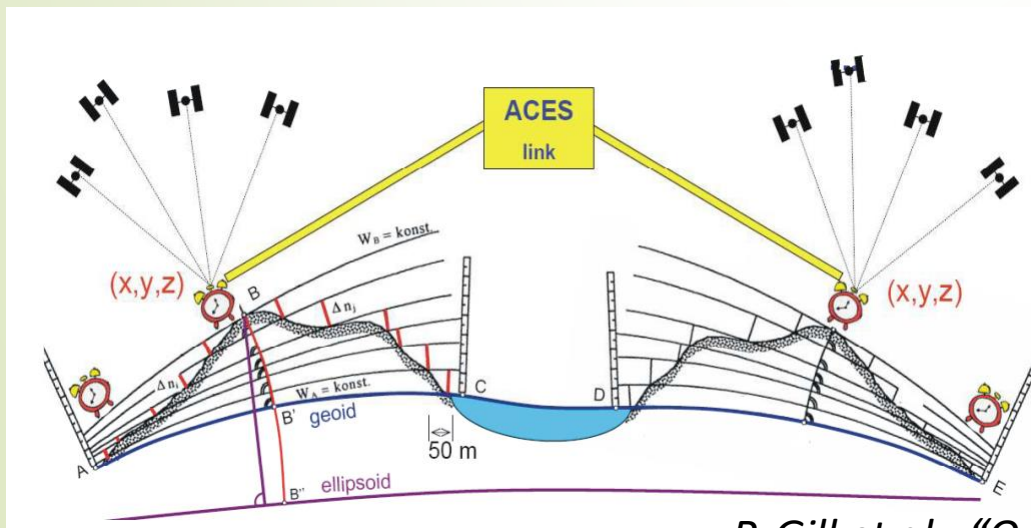
アインシュタインの一般相対性理論:

「地上では、重力の影響によって、低い場所では高い場所よりも時間がゆっくり進む」

- 高低差  $\Delta h = 1 \text{ cm}$  で時間の進み方が  $\delta\nu/\nu \approx 10^{-18}$  変わる (このわずかな変化が時計で検出できる)
- もはや地上で18桁の時計精度を共有するのは不可能? (標高がそもそも1 cmの精度で決められていない)
- 時計が重力ポテンシャル ( $\phi = g\Delta h$ ) を計測できる「重力ポテンシャル計 (標高計)」となる (等ポテンシャル面を定義する標高のリファレンスとなる)  
⇒相対論的測地 “Chronometric levelling”



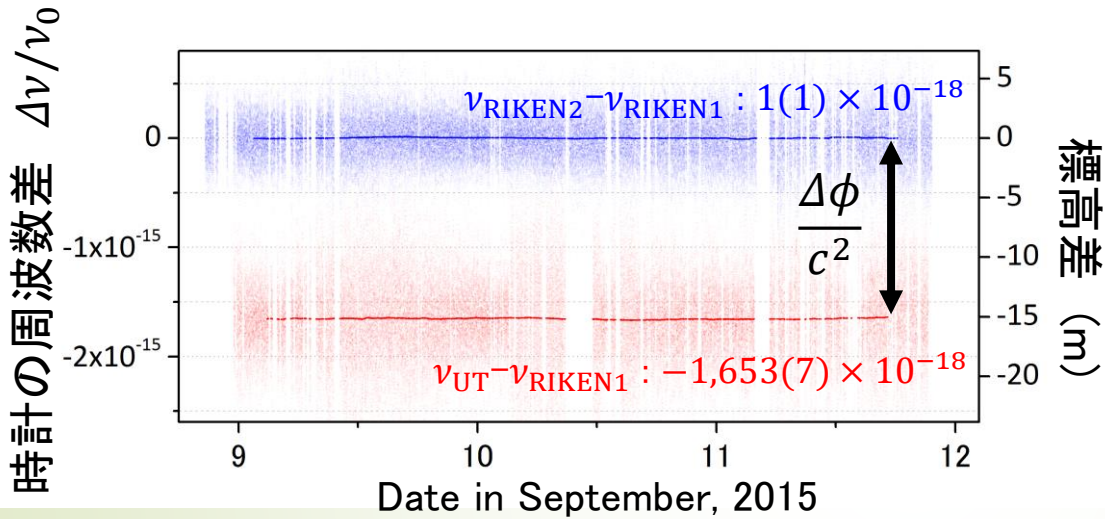
$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{g\Delta h}{c^2} \approx 1 \times 10^{-18} \text{ for } \Delta h = 1 \text{ cm}$$



「時間の進み方が同じ」＝「同じ標高」  
時計が水準点 (ベンチマーク) の役割  
国境、大陸を超えて統一した  
標高体系が構築できる

P. Gill et al., “Optical Atomic Clocks for Space”

# 理研一東大間の光格子時計の遠隔周波数比較('16)

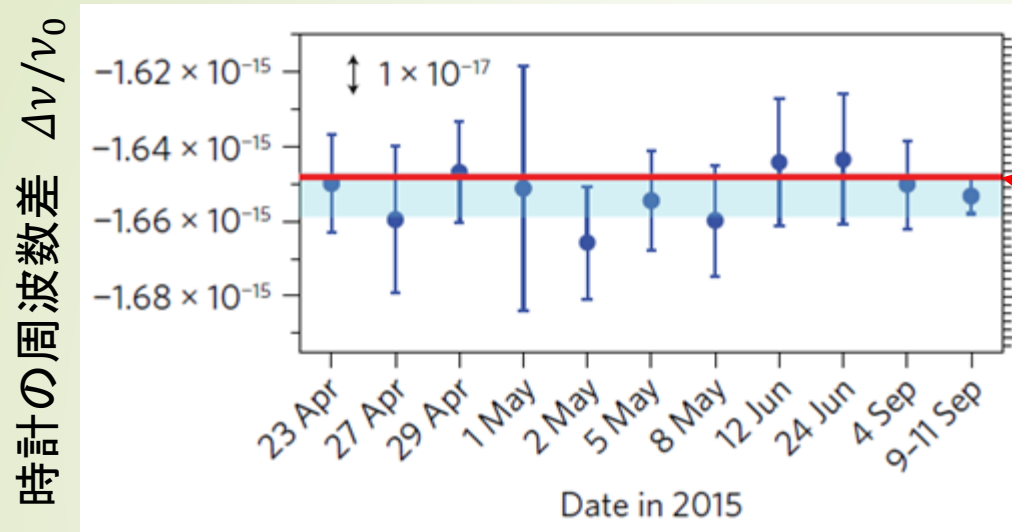


T. Takano et al., Nat. Photon. 10, 1038 (2016)



- 理研(和光市)一東大(文京区本郷)間の標高差(重力ポテンシャル差)を時計比較によりリアルタイムに観測

# 理研一東大間の光格子時計の遠隔周波数比較('16)



水準測量で得られた標高差から求めた重力赤方偏移 (国土地理院)

T. Takano et al., Nat. Photon. 10, 1038 (2016)

- 理研(和光市)一東大(文京区本郷)間の標高差(重力ポテンシャル差)を時計比較によりリアルタイムに観測
- 国土地理院による水準測量とも良い整合が得られた
- 実験室ベースでの時計を用いた測地応用の有用性は実証
- さらに計測ツールとしての応用を広げるためには時計システムの可搬化が必要



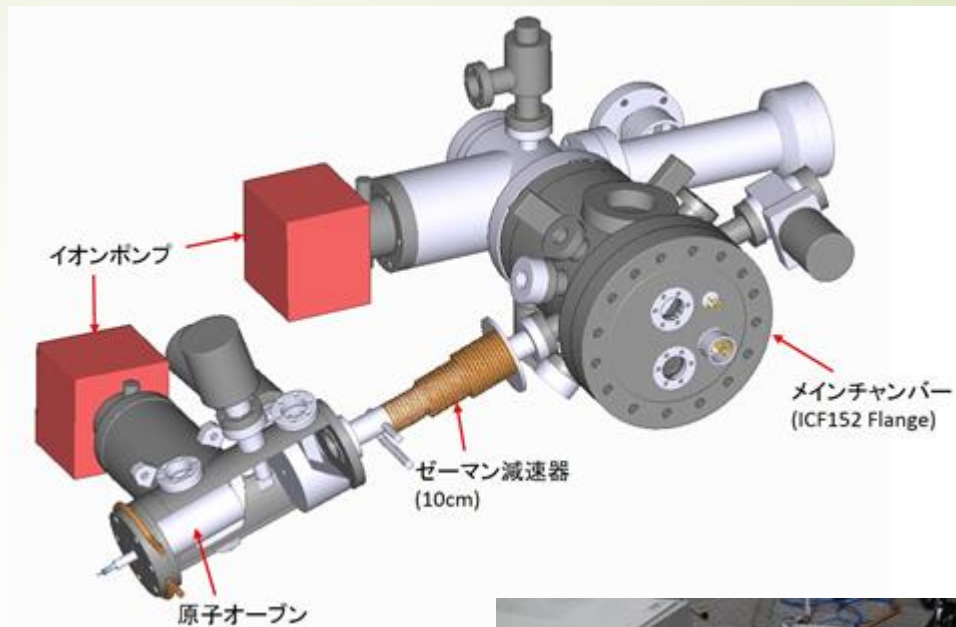
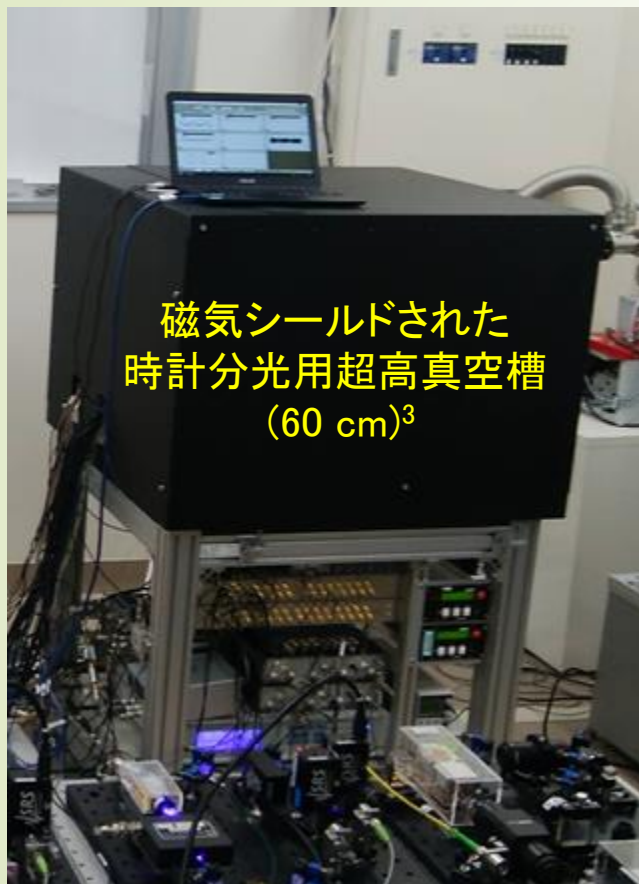
## 4. 光格子時計の可搬化

フィールド応用に向けて

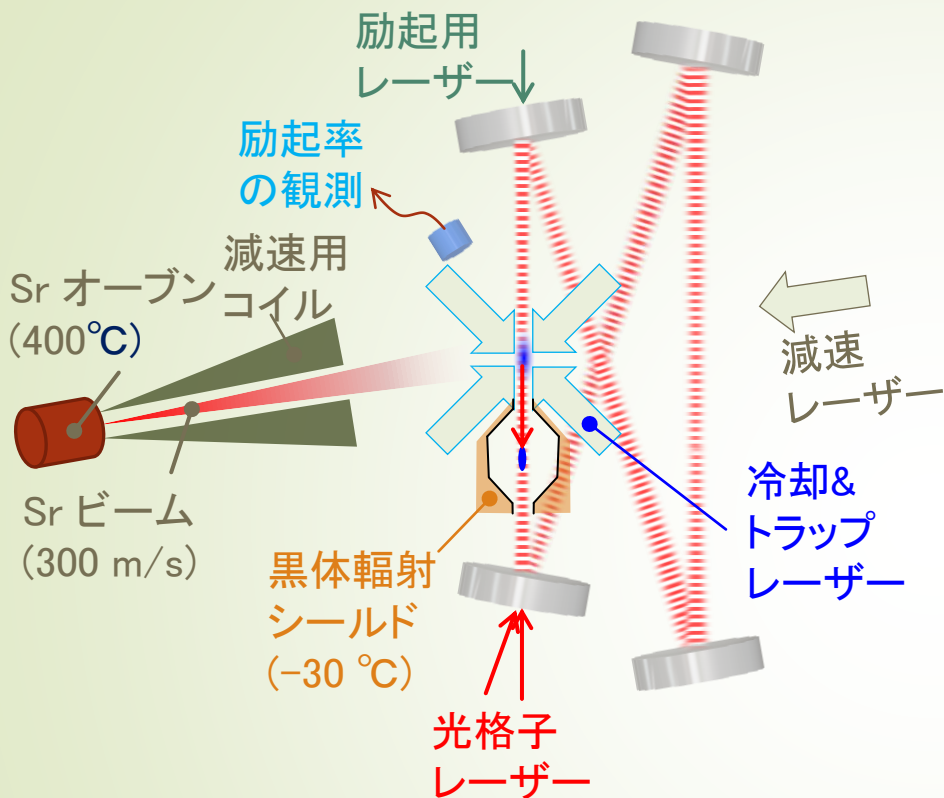


- 2台の時計を運転するのに18台の周波数安定化レーザーが必要
- 実験室1, 2部屋分の装置でようやく時計が動作
- 定盤上に固定、実験室内限定の実験
- 実験室外でも動作可能な計測ツールとしての利用するためには、より小型で可搬性の高い光格子時計の開発が必須

# 可搬型光格子時計システムの開発



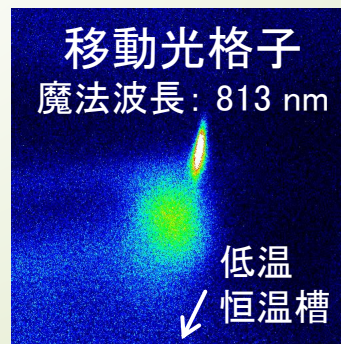
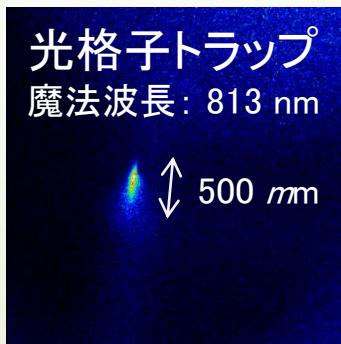
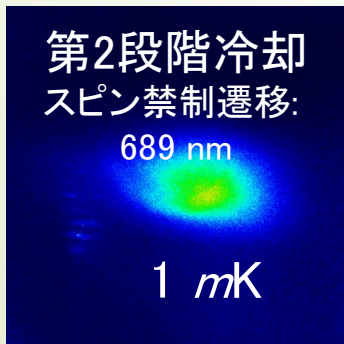
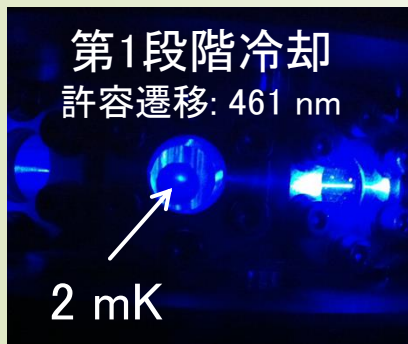
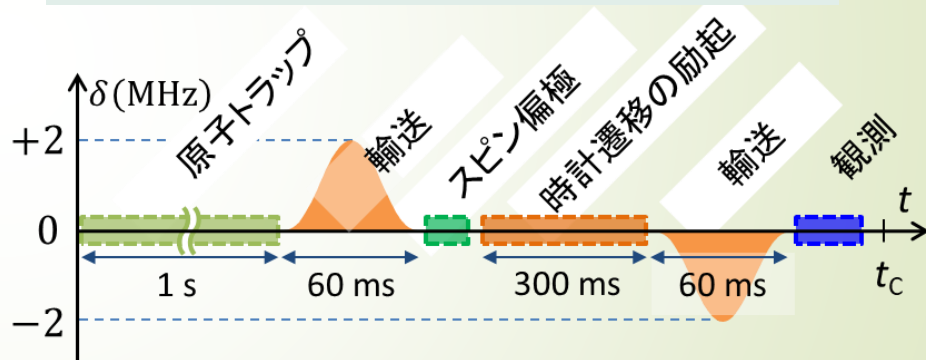
# 1次元光格子時計の動作



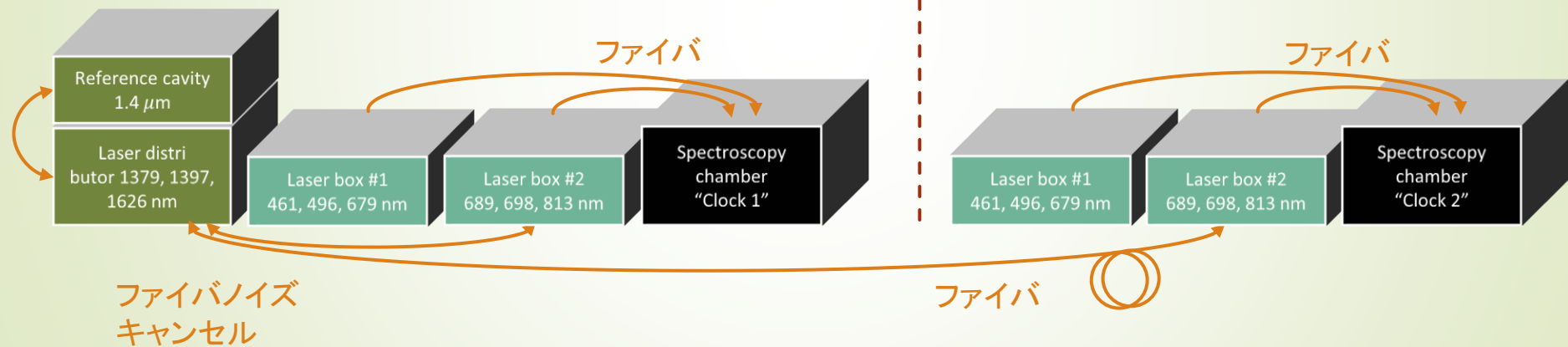
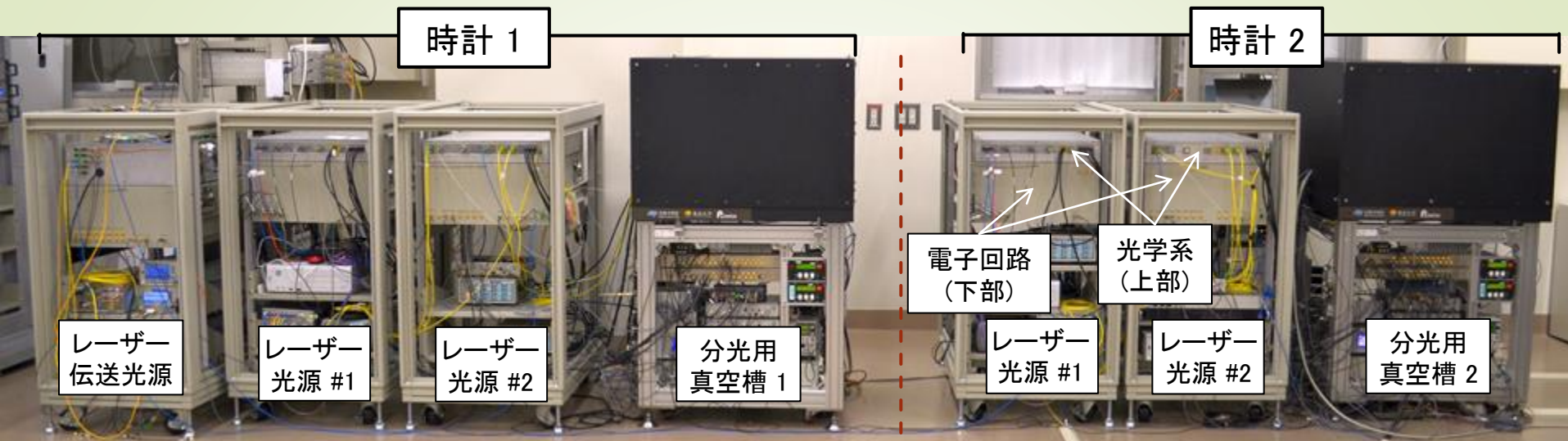
## 時計の動作

1. 光格子に原子を充填
2. 黒体放射シールドに原子輸送
3. 時計遷移を励起
4. 原子をシールド外に輸送
5. 励起率を測定
6. 常に励起するように励起レーザーの周波数を制御

繰り返し  
 $t_c = 1.6$  s



# 2台の可搬型光格子時計

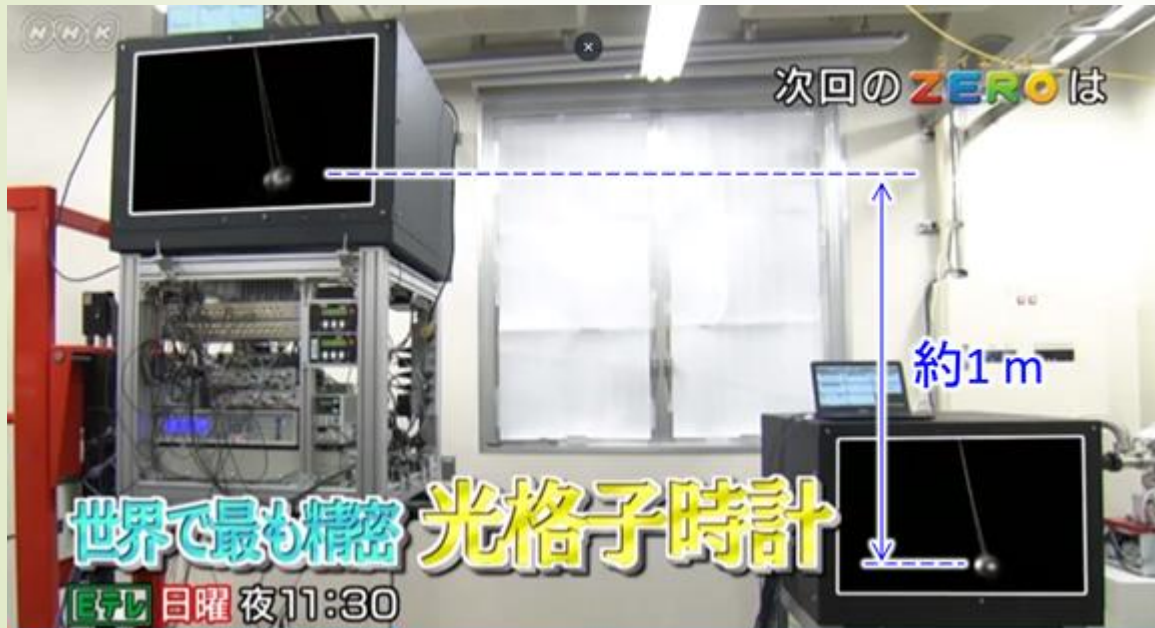


- レーザー光源と制御用電子回路を19インチラックに搭載
- レーザー光源 #1: 第一段階冷却用レーザー (461, 496, 679 nm)
- レーザー光源 #2: 第二段階冷却 (689 nm), 光格子 (813 nm), 時計分光 (698 nm)
- 2台の時計をノイズキャンセルされた光ファイバでつなげ、周波数比較を行う

# 実験室環境での予備実験:

高さが1 m違う2台の時計の進み方の違いの検出

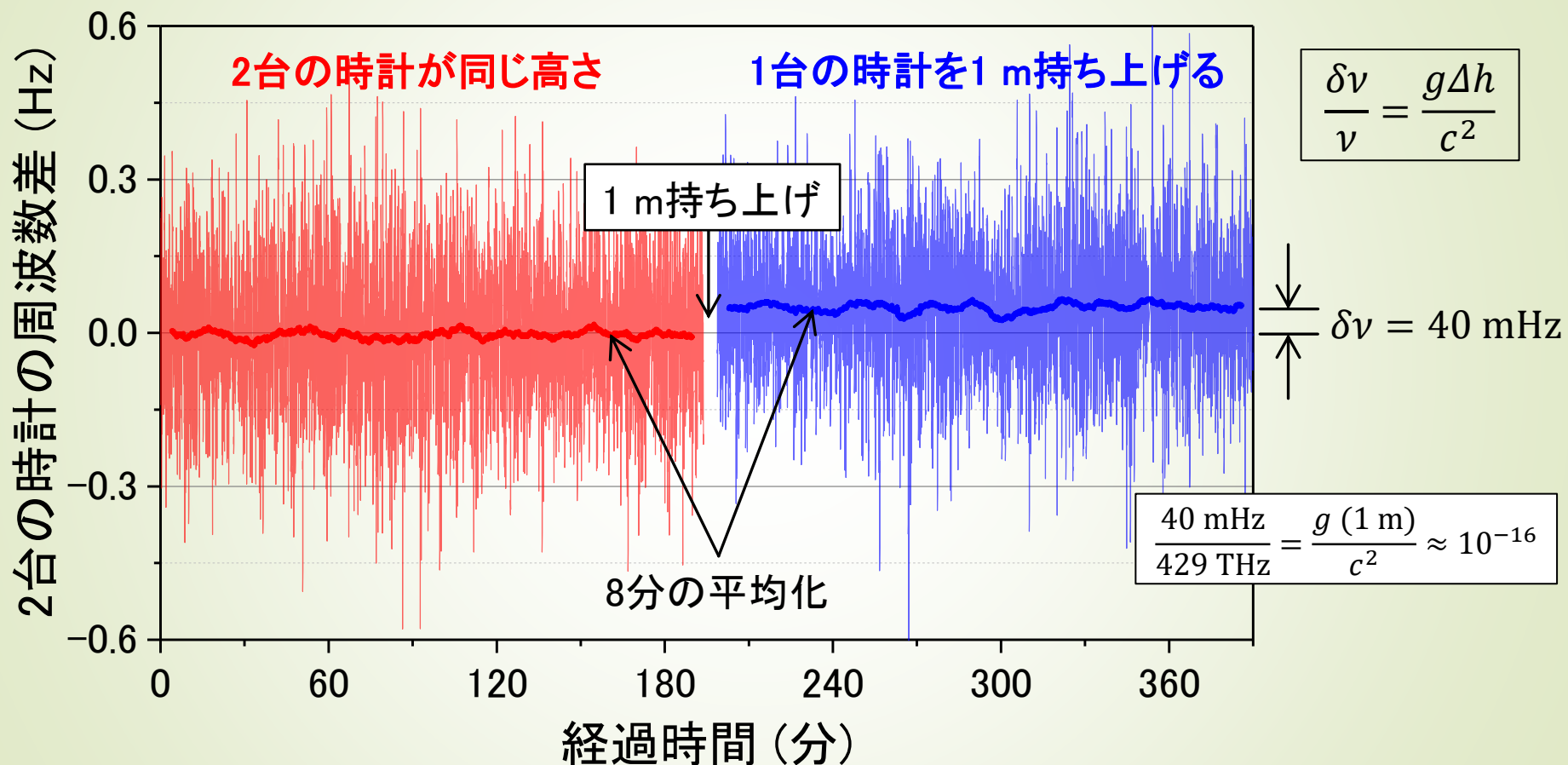
- 片方の時計を1 m持ち上げて、時計周波数を比較
- 2台の時計の進み方の違い(周波数差)から、1mの高低差による一般相対論的な時間の遅れ(重力赤方偏移)を検出



NHKサイエンスゼロ(2018/10/21,27)

# 実験室環境での予備実験:

高さが1 m違う2台の時計の進み方の違いの検出



1 mの高低差に対する、一般相対性理論による時間の流れる早さの違いが、光格子時計によって数分の平均化で重力赤方偏移として観測された

# 5. 一般相対性理論検証実験

東京スカイツリーでのフィールド実験



# 一般相対性理論の検証実験

- ▶ 東京スカイツリーの地上階、天望回廊にそれぞれ光格子時計を設置
- ▶ 2台の時計を光ファイバーでつなぎ、高低差 $\Delta h \sim 450$  mによる時間の進み方の違い $\delta\nu_{\text{redshift}}$ を測定
  - ▶ 高低差:  $\Delta h \sim 450$  m  $\Rightarrow \delta\nu_{\text{redshift}} \sim 21$  Hz ( $\delta\nu/\nu_0 \sim 5 \times 10^{-14}$ )
  - ▶ 検証精度:  $10^{-18} / (5 \times 10^{-14}) \sim 10^{-5}$
- ▶ 高低差 $\Delta h$ をレーザー測距およびGNSSで高精度に測定
  - ▶  $\delta\nu_{\text{redshift}}/\nu_0 = (1 + \alpha) g\Delta h/c^2$ において、 $\alpha$ の0からのずれを評価
- ▶ 一般相対論の検証実験
  - ▶ Pound-Rebka experiment (Harvard tower:  $\Delta h = 23$  m)  
 $|\alpha| < 0(10^{-2})$  (PRL 4, 337 (1960))
  - ▶ Gravity Probe A mission, NASA (Launched H-maser:  $\Delta h = 10,000$  km)  
 $|\alpha| \sim 1.4 \times 10^{-4}$  (PRL 45, 2081 (1980))
  - ▶ Galileo satellites, ESA (Atomic clocks on elliptic orbits:  $\Delta h \approx 8,500$  km)  
 $\alpha = (0.19 \pm 2.48) \times 10^{-5}$  (PRL 121, 231101 (2018))  
 $\alpha = (-0.9 \pm 1.4) \times 10^{-5}$  (PRL 121, 231102 (2018))
- ▶ 光格子時計の精密計測ツールとしての実証実験

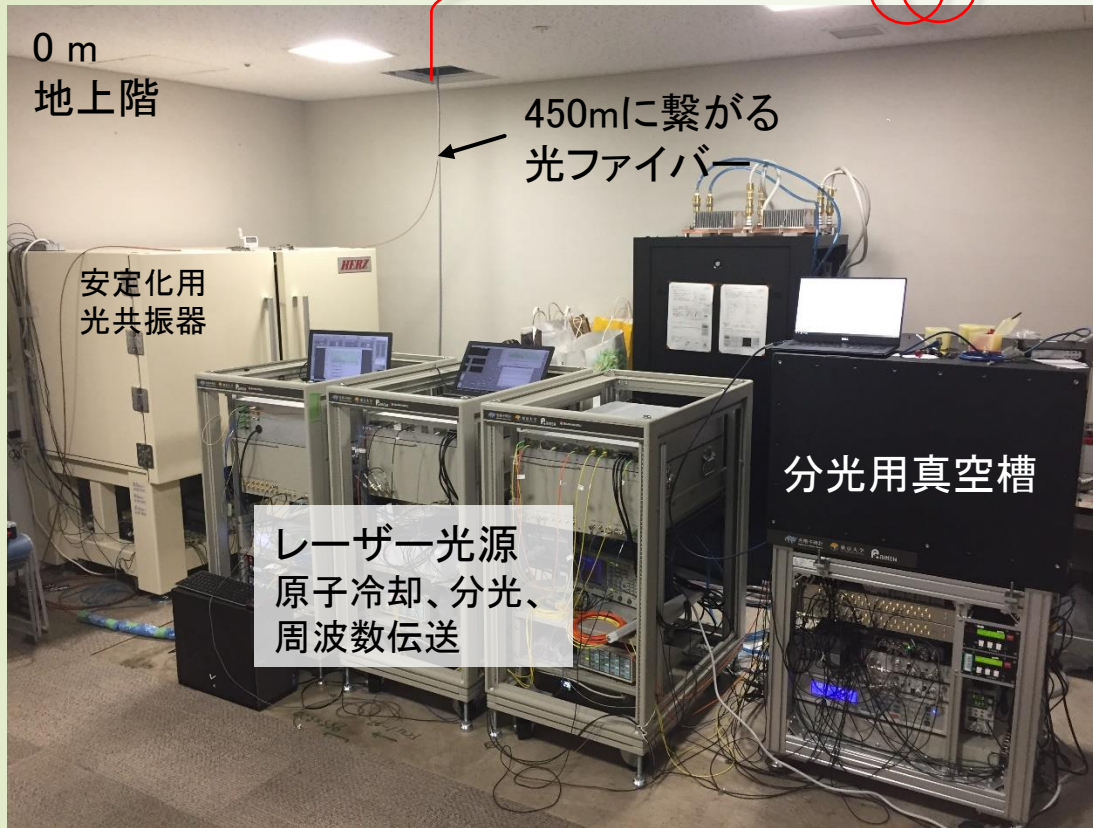


# 東京スカイツリーに装置搬入



設置期間：2018/10/3 - 2019/4/9

# 光格子時計 @ 0 m, 450 m

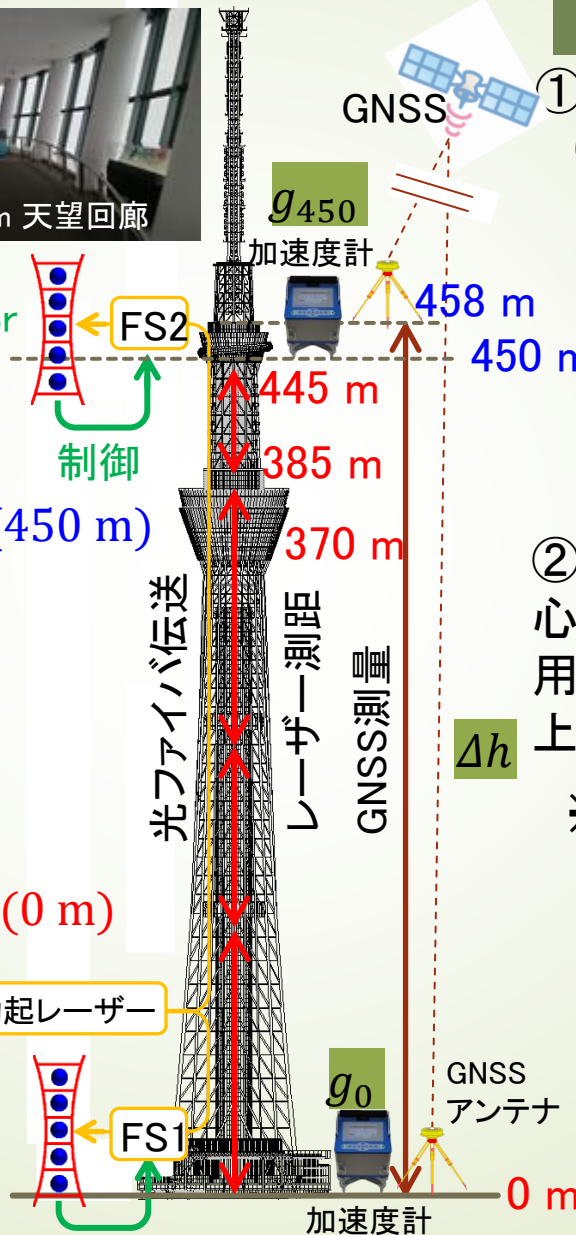
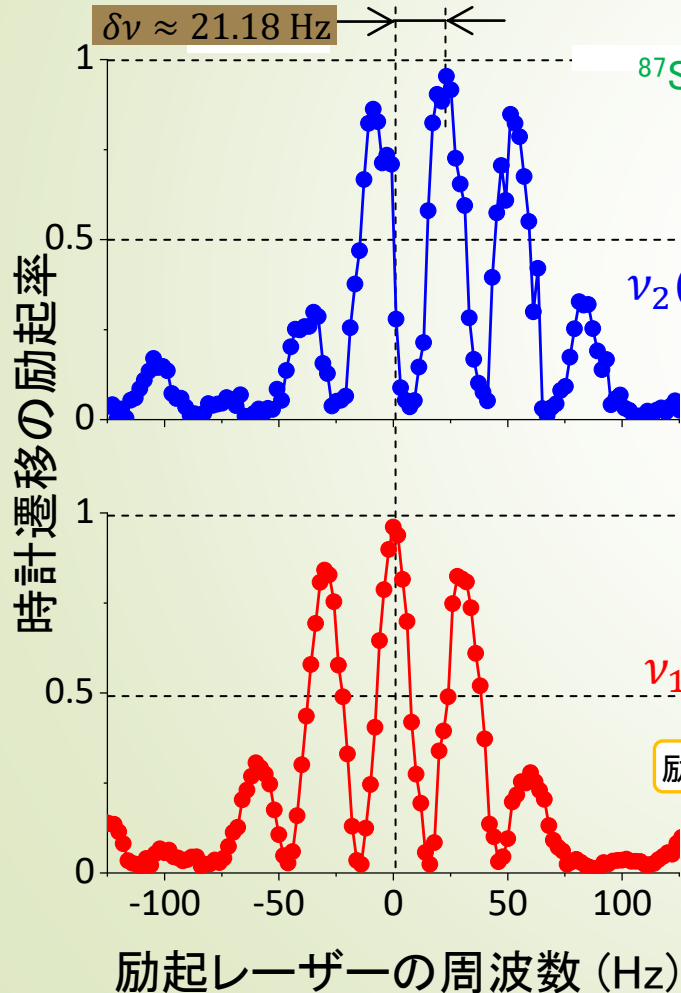


- 位相ノイズキャンセル用の制御機構を導入した光ファイバーリンク(全長700 m)を介して0 m - 450 m間の遠隔高精度時計比較
- リモートアクセスで無人運転可能
- 東京スカイツリーでの環境温度変化最大10 °C(昼夜)にも耐える連続安定稼働

# 一般相対性理論検証実験：時計比較と標高差測定

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{\bar{g}\Delta h}{c^2}$$

## 時計比較



## 測量法 (2通り)

① GNSS測量 (衛星測位)  
(国土地理院実施)

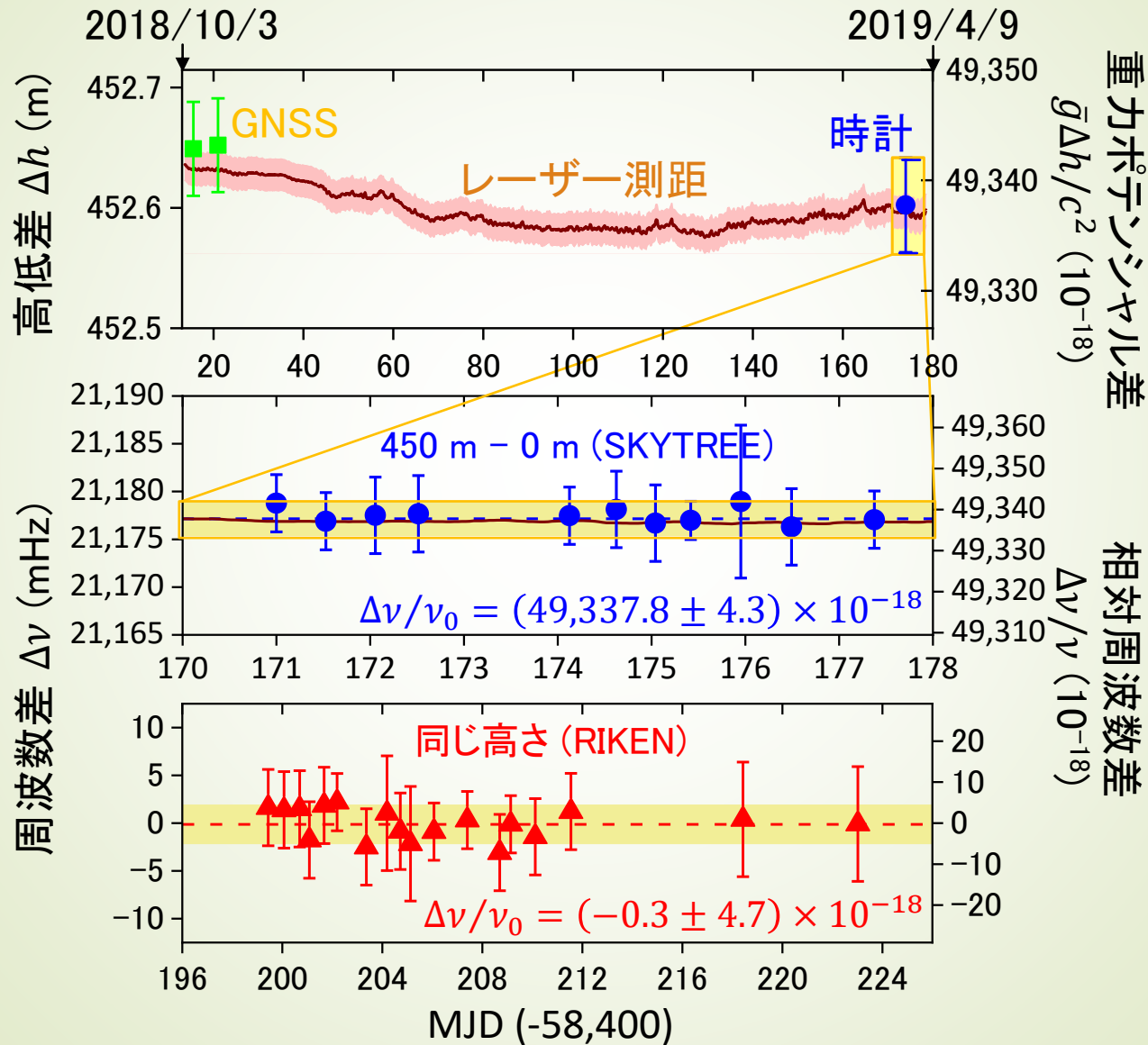


② レーザー測距  
心柱内の非常階段の隙間を利用してレーザーを打ち上げ  
上方壁面の反射を検出

※ 短距離：水準測量  
(国土地理院実施)



# 一般相対性理論検証実験：時計比較と標高差測定



# 6. 相対論的測地技術応用に向けて

可搬型光格子時計とその応用

# 18桁精度の可搬型光格子時計の開発

## ■ 時間・周波数標準: 「秒」の再定義

- 全世界での時計の再現性、整合性の確認@ $10^{-18}$ 
  - 衛星MWリンク: 長距離、大気擾乱 (安定度  $10^{-15} \sim 10^{-16}$ @1 day)
  - 光ファイバ: 高精度・高安定( $10^{-17}$ @1 s)、短距離(~1000 km)
- 可搬型時計によるローカルな直接時計比較

## ■ 相対論的測地応用

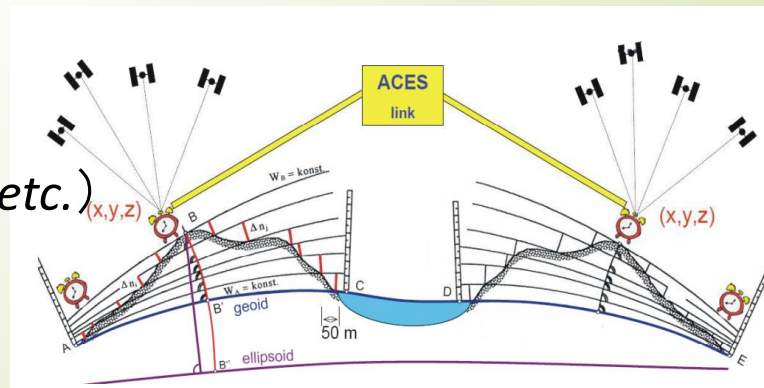
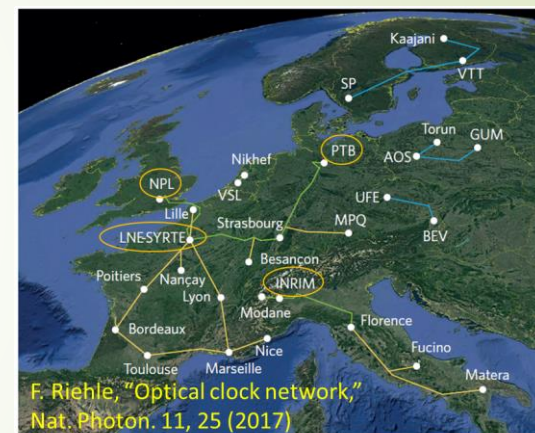
- 相対論的效果を利用した測地
  - 精度 $\delta\nu/\nu \approx 10^{-18}$ の時計で標高差  $\Delta h = 1$  cm が検出可能
- 重力ポテンシャル計としての応用
  - 各国の標高基準系の統一、ジオイドマッピング
  - 動的変化から地殻変動等の検出

## ■ 宇宙用光時計

- 地上の時計の高精度同期
- 基礎物理応用 (EEP検証、DM探索、GW検出 *etc.*)

A. Derevianko *et al.*, "Fundamental Physics with a State-of-the-Art Optical Clock in Space," arXiv 2112.10817 (2021)

S. Kolkowitz *et al.*, "Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks," PRD 94, 124043 (2016)



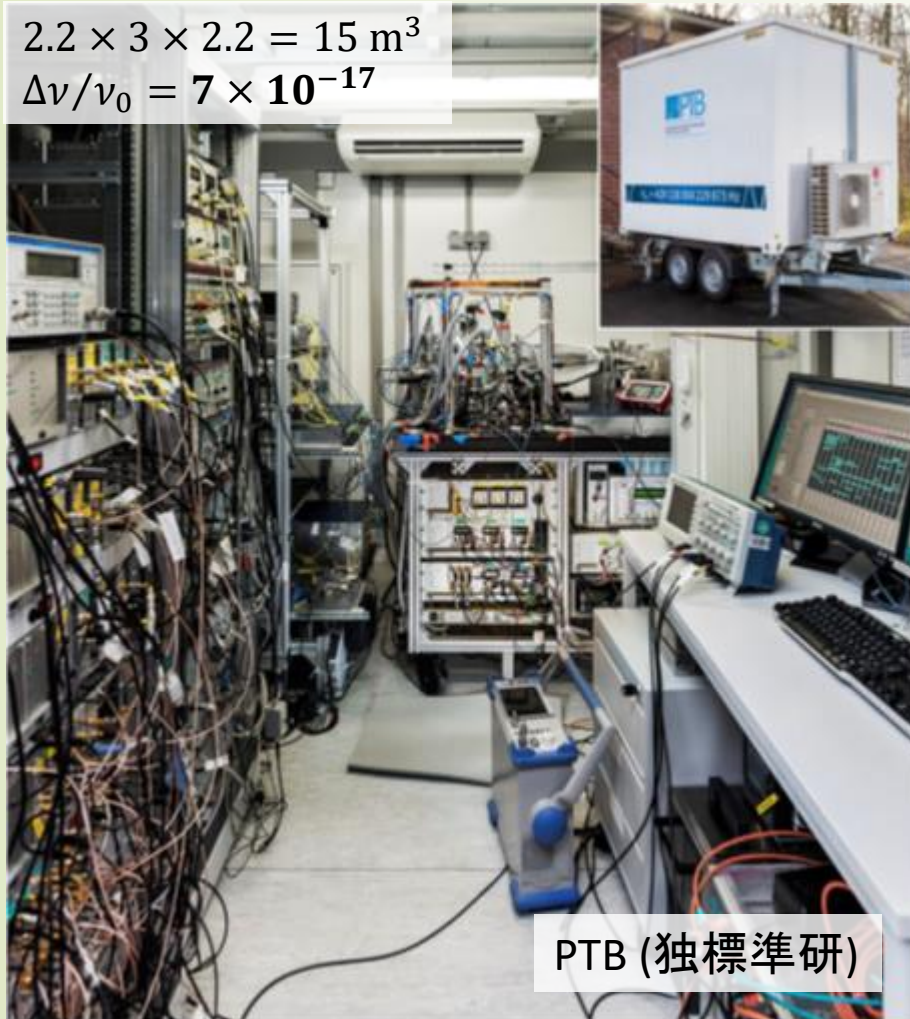
P. Gill *et al.*, "Optical Atomic Clocks for Space"

# 欧州での可搬型光格子時計の開発と応用

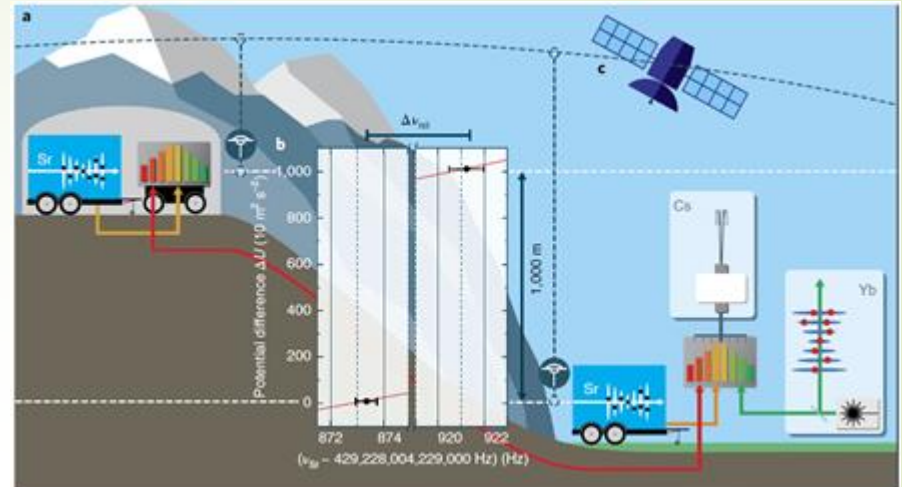
*S. B. Koller et al., PRL 118, 073601 (2017) "Optical lattice clock on car trailer"*

$$2.2 \times 3 \times 2.2 = 15 \text{ m}^3$$

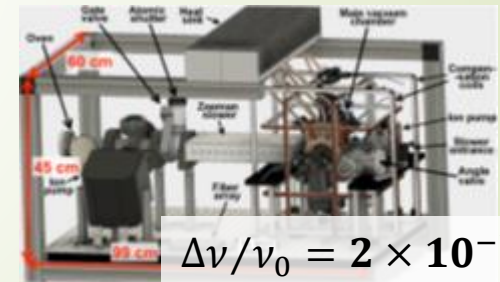
$$\Delta\nu/\nu_0 = 7 \times 10^{-17}$$



PTB (独標準研)



*J. Grotti et al., Nat. Photon. 14, 437 (2018)*  
16桁精度で可搬時計を遠隔時計比較



$$\Delta\nu/\nu_0 = 2 \times 10^{-17}$$

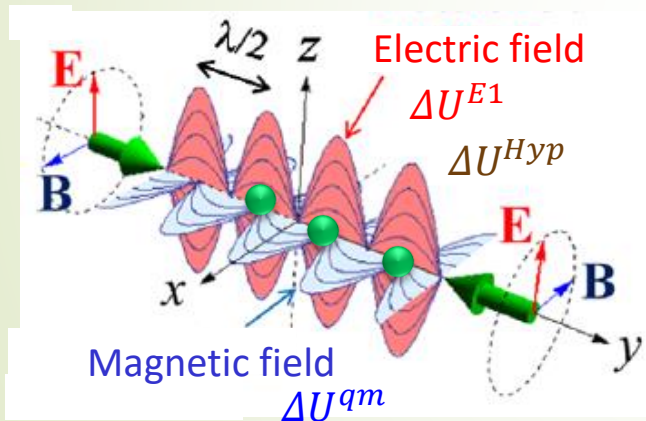
*S. Origlia et al., PRA 98, 053443 (2018)*

宇宙用光格子時計開発  
(欧州宇宙機関(ESA)のプロジェクト)



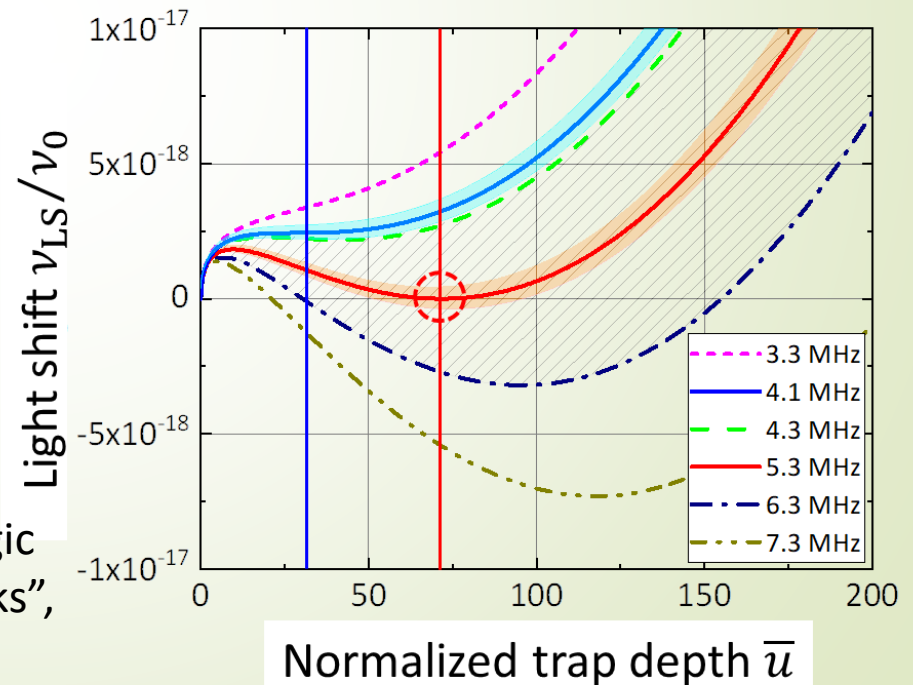
# mmレベルの測地精度の実現に向けて

- 19桁精度で動作する光格子の条件の探索: 高次の光シフトの不確かさを  $10^{-19} = 1 \text{ mm}$  レベルに低減する条件の決定(2018)
- 1 mm の高さ計測は、GNSSなどの既存技術の精度では到達できない計測精度⇒次世代測地技術



H. Katori *et al.*, PRL 103, 153004 (2009)

I. Ushijima *et al.*, "Operational Magic Intensity for Sr Optical Lattice Clocks", PRL 121, 263202 (2018)



# まとめ

## 光格子時計の高精度化

- 光格子時計の精密分光と時計動作の実現(2003-2005)
- 「秒の二次表現」に採択、次世代の「秒」の再定義の有力候補(2006)
- 18桁の時計精度の実現(2015)

## 光格子時計の相対論的測地技術への応用

- 理研一東大間での遠隔光格子時計比較による相対論的測地の実証実験(2016)
- 重力ポテンシャル計としての応用に向けて可搬型光格子時計の開発(2018)
- 実験室において1 mの高低差での時間の遅れを検出

## スカイツリーでの相対論検証実験

- 実験室外の環境下での時計の安定稼働を実現
- 5桁精度の相対論検証実験の実現、地上実験では最高精度(2020)

## 光格子時計の実用化に向けて

- 更なる小型化・可搬化と高精度化(19桁)の追求