

# 光格子時計の現状と展開


①時間は科学技術の要、②秒の再定義、  
好機到来、③光格子時計の展開、④海  
外動向、⑤測地、超精密科学への展開

## 香取 秀俊

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻

理化学研究所 香取量子計測研究室

ERATO 創造時空間プロジェクト 科学技術振興機構

- 
- ①原子の遷移周波数を（量子限界で）正確に測定（**原子発振器を作るのがハイライト**）
  - ②振動回数を数え、時間を知る（原子時計）

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{10 \text{ s}}{1 \text{ yr.}} = \frac{10 \text{ s}}{60 \times 60 \times 24 \times 365 \text{ s}} \approx 3 \times 10^{-7}$$


（いい腕時計）

$$\frac{\Delta t}{t} \left( = \frac{\Delta \nu}{\nu_0} \right) \approx \frac{1 \text{ s}}{3000 \text{ 万年}} \approx 1 \times 10^{-15}$$

（セシウム時計による国際原子時）

$$\frac{\Delta t}{t} \left( = \frac{\Delta \nu}{\nu_0} \right) \approx \frac{1 \text{ s}}{2 \times 138 \text{ 億年}} \approx 1 \times 10^{-18}$$

（光格子時計を含む、光時計）

- 
- **周波数を測る→比を測ること：**  
 $(\nu_X/\nu_{Cs}) \times 9,192,631,770 \text{ Hz}$ .
  - セシウム原子時計の精度の範囲なら**国際単位系(SI)の秒 (s, Hz)** が便利
  - **いくつかの光時計精度は $10^{-18}$ の不確かさへ**

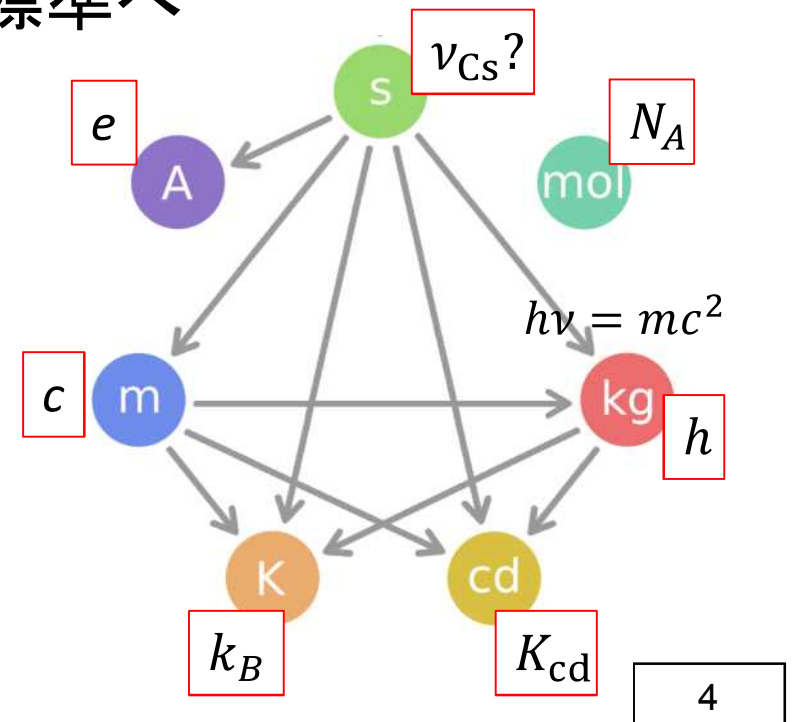
N. Huntemann, et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 063001(2016).  
T. L. Nicholson, et al. Nat Commun **6**, 6896 (2015).  
I. Ushijima, et al., Nature Photon. **9**, 185 (2015).  
C. W. Chou, et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 070802 (2010).

- **周波数比,  $\nu_a/\nu_b$ , はSI秒の精度に依存することなく物理量を表現できる**
- **SI秒の精度を超える計測の有効利用、物理定数の安定性、量子高度差計への応用…**

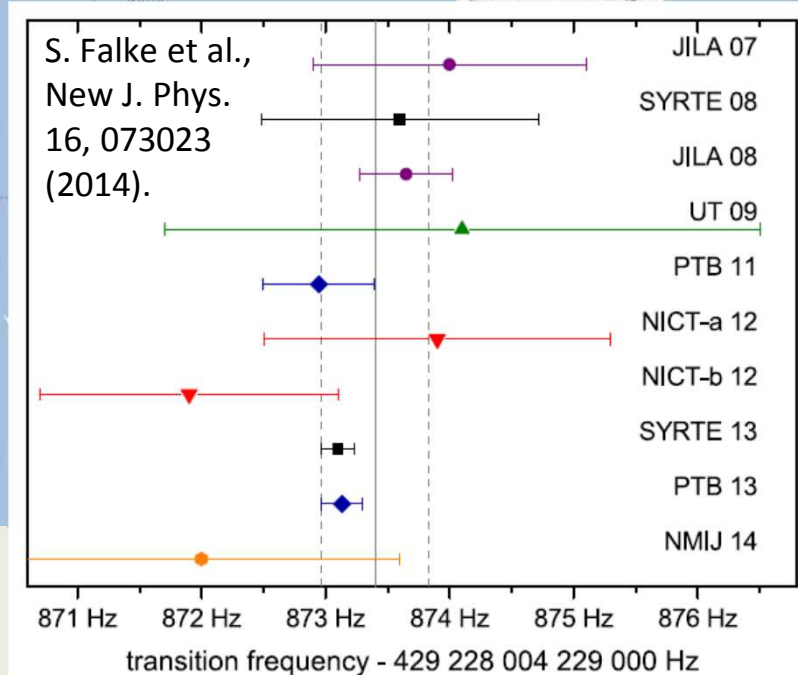
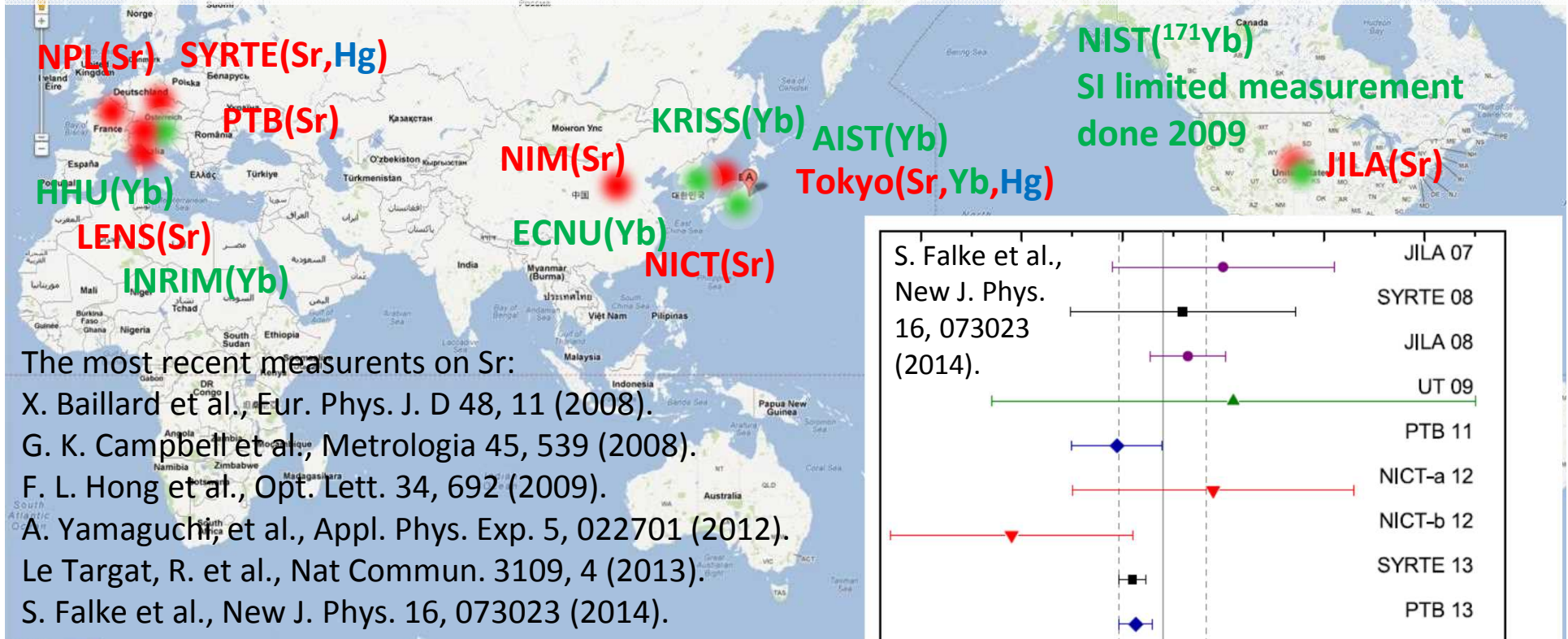
# 国際単位系の秒 (SI秒) は科学技術の要

- GNSS (Global Navigation Satellite System)による時刻同期、位置決定は現代社会の基幹技術
- Cs原子時計は、人類が科学知を共有するためのリファレンス:  $(\nu_X/\nu_{Cs}) \times 9,192,631,770 \text{ Hz}$
- SI秒を頂点とする、新しいSIの定義 (2018年、国際度量衡総会)、人工物の廃止、量子標準へ

- Cs原子によるSI秒は破綻の危機 (記述できない物理量が出現)
- 10年程度でSI秒の再定義



# 光格子時計は原子時計の新たな潮流となった 全世界20以上のグループで開発が進む



## 国際度量衡委員会 (2015.10) 勧告値

$$f_{87\text{Sr}} = 429\,228\,004\,229\,873.2 \text{ Hz}$$

相対的不確かさ  $5 \times 10^{-16}$  → 「SI単位系の1秒」の不確かさと等価。

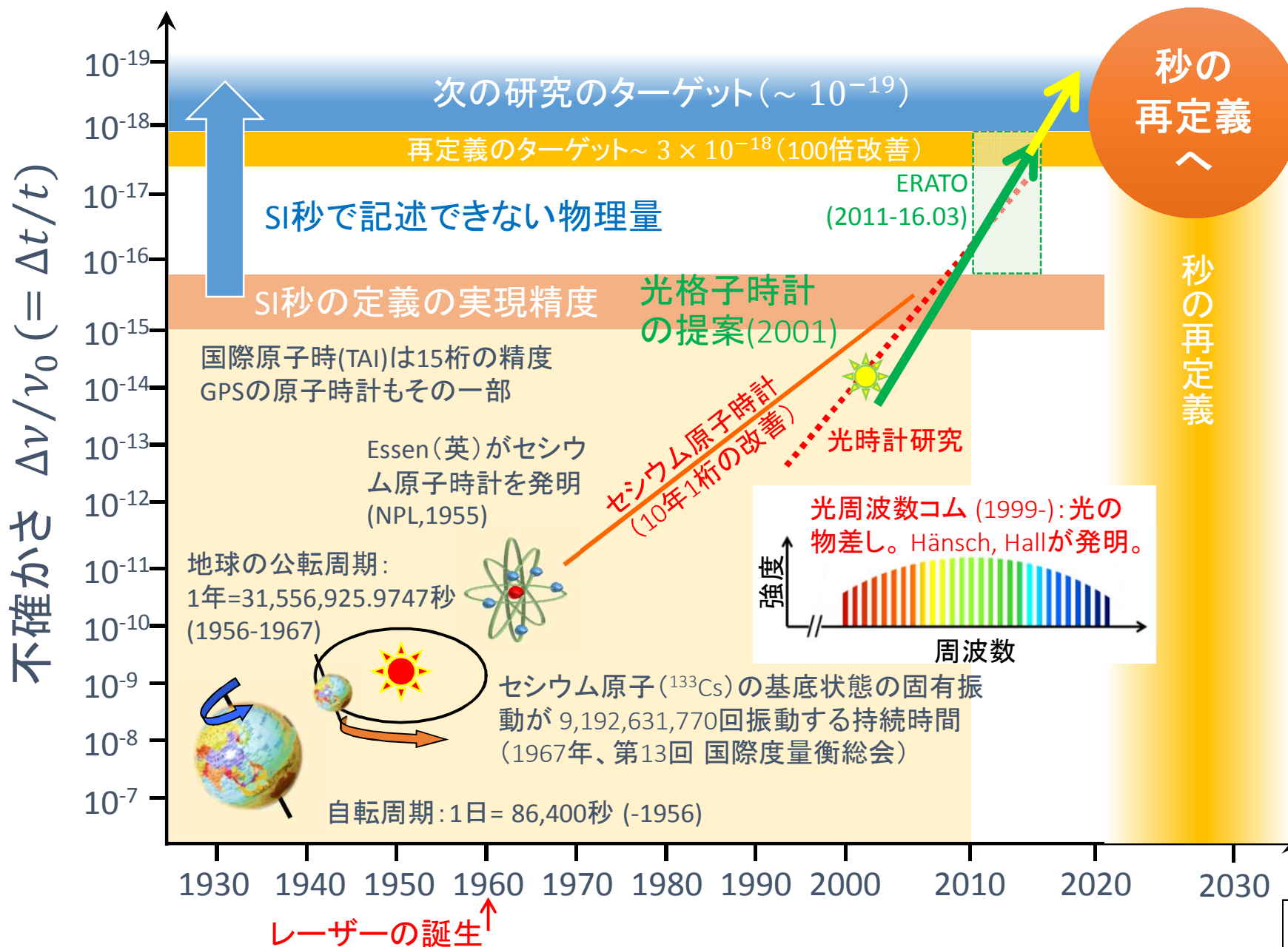
逆に言えば、SI秒の定義のせいで、これ以上の情報を共有することが不可能。光格子時計は世界のCs原子時計を監視するスパクロに！

ものさしの精度比べ：  
今迄完璧なものさしと考えていたCsものさしは、(スパクロ)光格子時計に測られる対象になった



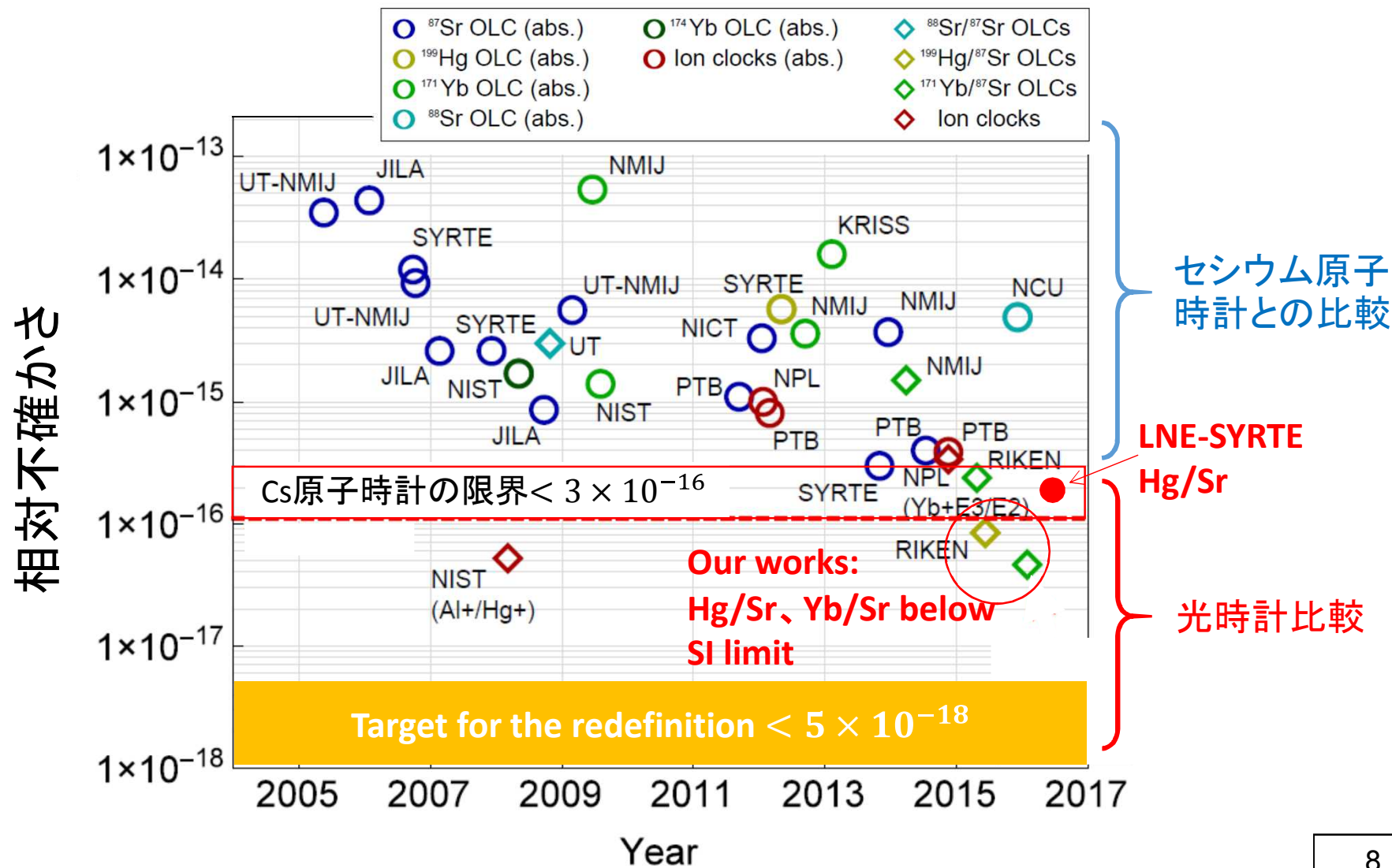
- 従来のSI秒に縛られずに「新しい時間をつくる」ことができる
- 光時計の周波数比の測定が、精度評価の唯一の客観的な指標
- 欧米主導のゲームのルールを変えた、大学でCs時計無しに研究が進む

# 秒の再定義の議論に王手をかける



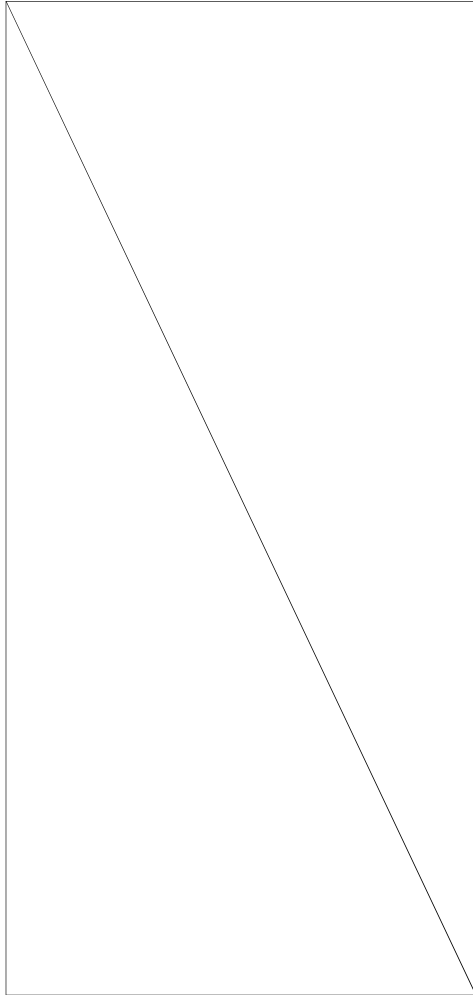
# 世界の周波数比測定の世界、ターゲット

SIの精度を凌駕し、かつ、答えを検証可能な、周波数比 $\nu_a/\nu_b$ 計測が本当の勝負。  
物理量へのアクセス、物理定数の恒常性。UT/RIKENは世界をリード。





# 秒の再定義、Riehle案(2016.04)



- ① (独立の)3台の光時計が、セシウム原子時計を2桁上回る不確かさを実現。ほぼ完了
- ② 3つの測定(可搬時計、周波数リンク、周波数比等)で、 $\Delta\nu/\nu < 5 \times 10^{-18}$ の一致を検証。
- ③ (SI秒との連続性)3つの測定で、①を満たす時計を、セシウム原子時計( $\Delta\nu/\nu < 3 \times 10^{-16}$ )の限界で測定。ほぼ完了
- ④ 光時計が、TAI(国際原子時)に定期的に貢献
- ⑤ 5つの光時計の比が、2回以上測定され、 $\Delta\nu/\nu < 5 \times 10^{-18}$ で一致。

# 2001年のFreq. Stand. Metrology シンポジウムでの提案スライド

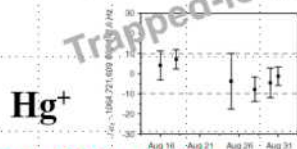
28 MAY 2001

Transitions

Th. Udem, S. A. Diddams, K. R. Vogel, C. W. Oates, E. A. Curtis, W. D. Lee,  
W. M. Itano, R. E. Drullinger, J. C. Bergquist, and L. Hollberg

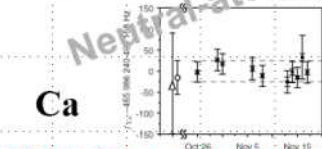
Time and Frequency Division, National Institute of Standards and Technology, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305  
(Received 4 January 2001)

原子時計半世紀の歴史を背負った2つの流派(イオン・中性原子)があった



Hg<sup>+</sup>

Lamb-Dicke regime  
 $n = 1$  quantum projection noise



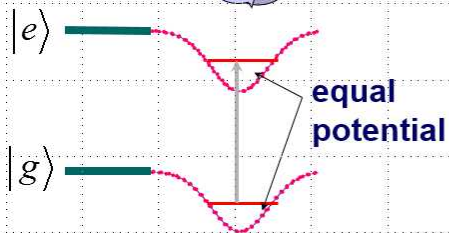
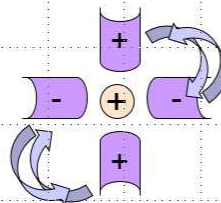
Ca

Wave-front curvature (Doppler)  
Collision shift ...

$N$  quantum absorbers in the Lamb-Dicke regime  
Optical Lattice Clock

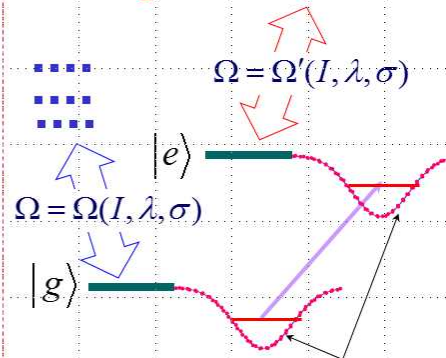
## “Ion-trap” like confinement for neutral atoms

Charged particle  
--- Coulomb interaction  
RF quadrupole trap



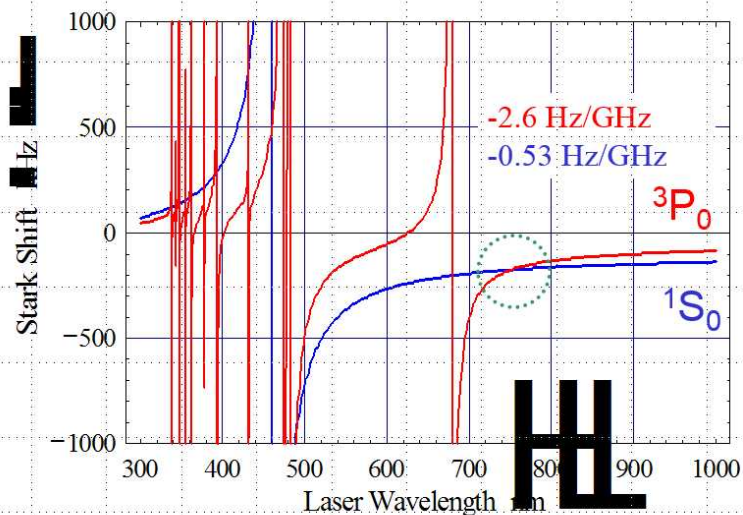
Neutral atoms  
--- Dipole interaction  
Dipole force trap (optical trap)

$$U(r) = \frac{1}{2} \alpha |E(r)|^2$$

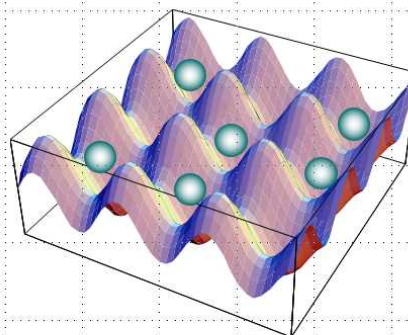


Adjustment required!

## Light Shift cancellation in $1S_0$ - $3P_0$ transition



## Measuring clock transition in 3D Optical Lattices



- Long interaction time
  - Lamb-Dicke regime
    - Doppler & Recoil-free
  - $N$  atoms:  $S/N \propto \sqrt{N}$
  - No collision shifts
- 
- Magic point?
    - Light-shift cancellation
  - Uncertainties?

# 7年に一度の原子時計の会議 ボストン、後の光時計のプレーヤーが一同に揃った 光格子時計のデビューは幸運に恵まれた



Ramsey?

Wineland

Katori?

Clarion

Hall (2005N)

Gill (秒の再定義  
の牽引役)

この会議でQLS  
を提案(2012N)

Udem

Blatt

Proceedings of the **6<sup>th</sup>** Symposium  
on **Frequency Standards and Metrology**



editor  
**Patrick Gill**

秒の再定義の牽引役の一人  
時代は、この頃、光時計に大きく  
舵を切った

**SPECTROSCOPY OF STRONTIUM ATOMS IN THE  
LAMB-DICKE CONFINEMENT**

HIDETOSHI KATORI

*Cooperative Excitation Project, ERATO, JST  
KSP D-842, 3-2-1 Sakado Takatsu-ku, Kawasaki, 213-0012, Japan*  
and

*Engineering Research Institute, The University of Tokyo  
Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan  
E-mail: katori@amo.t.u-tokyo.ac.jp*

Applying a light-shift cancellation technique, spectroscopy on the  $^1S_0 - ^3P_1$  transition of  $^{88}\text{Sr}$  atoms is demonstrated in a one-dimensional optical lattice. Photons elastically scattered by atoms confined in the Lamb-Dicke regime provide a narrow Doppler-free spectrum of  $\sim 20$  kHz. To further reduce potential uncertainties originating from collisional frequency shifts as well as tensor light shifts, we propose to employ the  $^1S_0(F=9/2) - ^3P_0(F=9/2)$  transition of the  $^{87}\text{Sr}$  isotope confined in a three-dimensional optical lattice. We anticipate these optical lattice spectroscopy, evading the first order Doppler shift, may offer an alternative approach for precision spectroscopy in neutral atomic ensembles.

**1 Introduction**

Alkaline earth species have long been considered as a prime candidate for optical clocks in neutral atoms because of their reasonably narrow lines found in the intercombination transitions<sup>1</sup>. Recent dramatic advance in laser cooling techniques for alkaline earth atoms, allowing to cool the atoms down to the photon recoil temperature<sup>2,3,4,5</sup> or even below<sup>6</sup>, decreased their temperatures by more than 4 orders of magnitude. These ultracold atoms, requiring much less power for Ramsey excitation, may offer a variety of possibilities for ultra precise laser spectroscopy on extremely narrow transitions.

Compared to the existing single-ion-based optical clocks<sup>7</sup>, the outstanding advantage of using neutral atoms as quantum absorbers lies in the far better signal to noise ratio, which is proportional to the square root of the number of observed atoms. However, when pursuing the higher quality factor of  $\sim 10^{15}$  for the clock transition with an extended observation time, the atomic motion causes a major obstacle. Consider, for example, the fountain experiments with a flight time of 1 second: Even 100 nK cold strontium atoms<sup>8</sup> demonstrated in Fig. 1(a) expand to several mm in diameter, with an upward or downward velocity of 5 m/s due to gravity. These rather large spatial spread as well as velocity gain of atom clouds pose severe demands for the probing laser

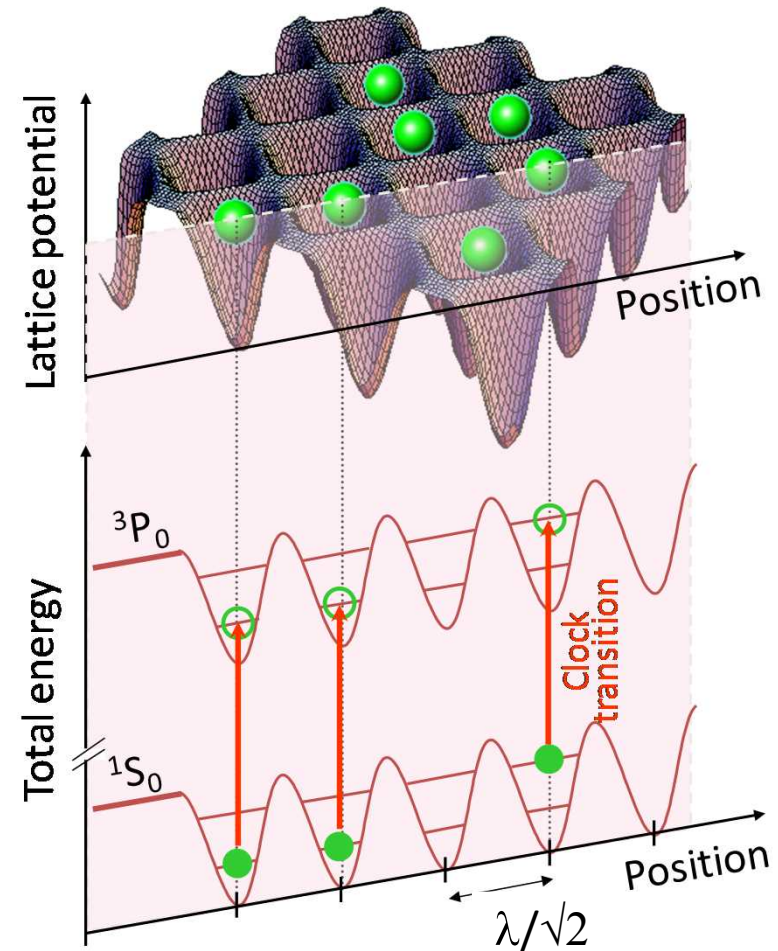
プロシーディングスが論文の役割  
を担っていた最後の時代

# 光格子時計：摂動のエンジニアリング

- 50年来の摂動除去の原則
  - 単一イオン時計の量子力学的限界に到達(時間がかかる)
- 原子を100万個捕まえる容器をデザインする
  - “光格子時計”の概念の提案: 魔法波長のレーザー光で原子をトラップすると、原子には容器の摂動が見えない  
(Katori 2001・FMS)

$$h\nu = h\nu_0 - \frac{1}{2}\Delta\alpha(\omega)|E|^2 + O(E^4)$$

$$\Delta\alpha(\omega_m) = 0, \omega_m: \text{魔法周波数}$$



強い電磁場で原子を捕まえても、正確な時計が作れるのか？  
半世紀の原子時計の歴史への挑戦(2001年)！

平成14年度 若手研究(A・B) 研究計画調書(新規)						※機関番号	12601
注1 別途平成14年度若手研究(A・B) 研究計画調書作成・記入要領(紫色)を参照してください。						※整理番号	
若手研究		A・B					
審査希望部門	部	分科	細目		部・分科・細目番号	系	
	理学	物理学	物理学一般		325	人・物 化・生	
研究代表者	氏名	かとり ひでとし 香取 秀俊		年齢 (H14.4.1現在)	37歳 S. 39年9月生まれ		
	所属研究機関・ 部局・職	東京大学・工学部附属総合 試験所・助教		学位	工学博士	現在の専門	量子エレクトロ ニクス
研究課題	光格子を用いる超高精度ストロンチウム原子光周波数標準の研究						

光格子時計の提案  
元年(2001.10)の若  
手A、応募書類

平成15年度科学研究費補助金実績報告書(研究実績報告書) **光格子時計の実験元年(2003)の報告書**

定度向上を狙う。この提案の鍵を握る「光シフト相殺手法」の検証ため、ストロンチウム原子のフェルミ同位体  $^{87}\text{Sr}$  の  $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$  禁制遷移(遷移周波数 698nm、線幅 1mHz)を用いた理論計算を行ない、1秒で  $10^{-18}$  の安定度・確度を達成可能なことを、明らかにした。

「光格子時計」の実証のため、レーザー冷却を施した  $^{87}\text{Sr}$  を1次元光格子に捕獲し、時計遷移励起光に対してラム・ディッケ束縛条件を満たした上で、これに対する分光実験を行った。この結果、光格子レーザー波長を 813.5nm とすることで光シフトの相殺が可能となることを示し、このとき励起レーザー線幅で制限される(ドップラーフリーな)500Hzの時計遷移の観測に成功した。

魔法波長の実証、時計  
遷移( $430 \times 10^{12}\text{Hz}$ )  
の500 Hz線幅での分光

H. Katori, et al., Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap, Phys. Rev. Lett. **91**, 173005 (2003).

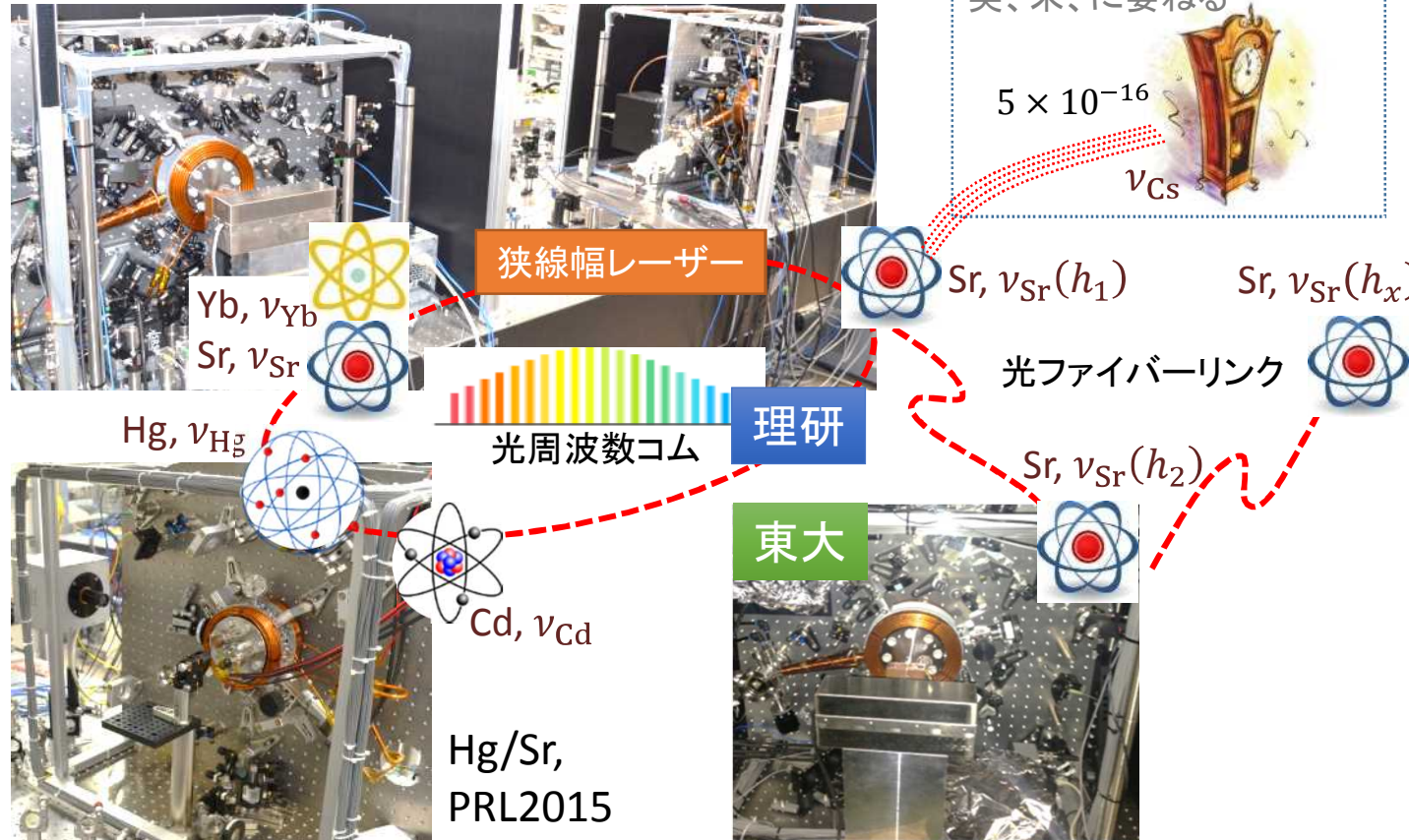
M. Takamoto and H. Katori, Spectroscopy of the  $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$  clock transition of  $^{87}\text{Sr}$  in an optical lattice, Phys. Rev. Lett. **91**, 223001 (2003).

アイディア実証は大学の真骨頂だが、これ以降は、激しい国際競争へ  
国家の威信をかけた欧米の主要標準研を相手に、大学だけで戦うのは難しくなっていく。

# 世界最強の光格子時計群の構築 (ERATO・2010-16)

—世界を圧倒的にリードするには18桁の周波数計測が不可欠—

低温光格子時計の実現  
(nat. photon. 2015, 2016)



現行のセシウム原子によるSI秒とのリンク、仏、独、英、米、に委ねる

光格子時計の周波数リンク: 産総研(つくば)、情報通信研究機構(小金井)、NTT物性基礎研(厚木)...

相対論的測地の議論: 国土地理院、東大地震研

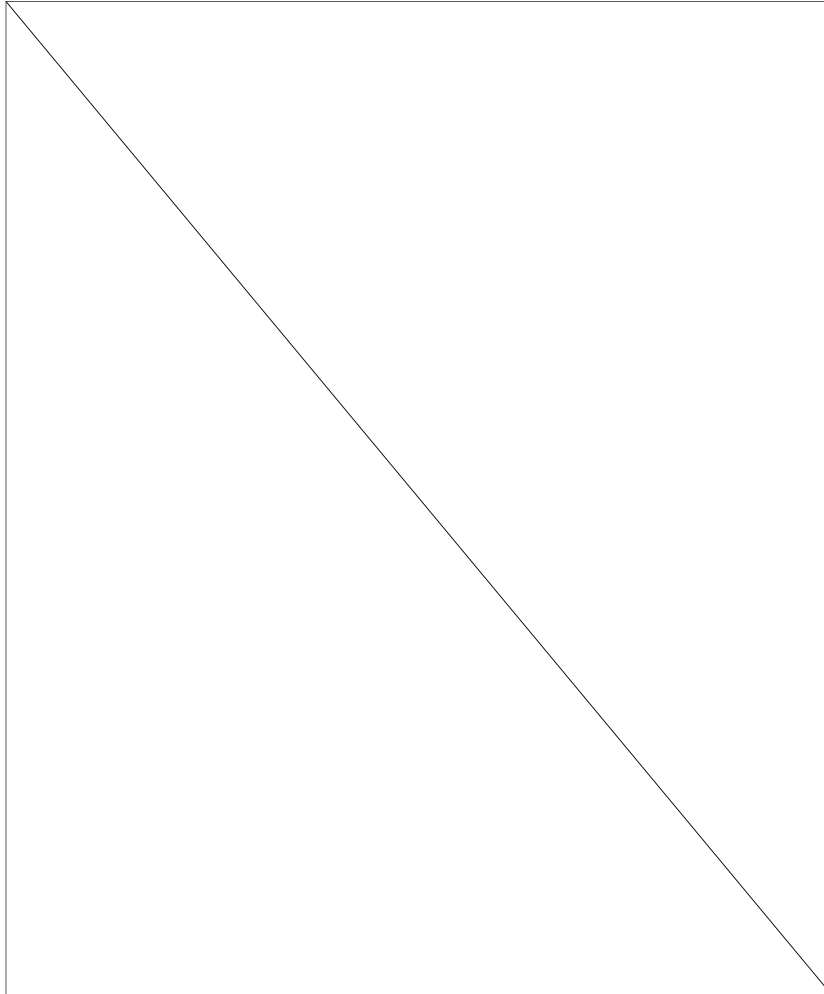
物理応用: 異種光格子時計の構築、光周波数コムによる比較、物理定数の恒常性の探索

測地応用: 光ファイバーによる遠隔周波数リンク・伝送技術の中核、相対論的測地、光格子時計の新概念の検討

# 遠隔時計比較

- 異なる機関間での時計の比較はSI秒の再定義に重要なステップ
- 18桁の比較では、むしろ重力ポテンシャル差を測っている！ → 相対論的測地
- 測地応用のためには、短時間で計測できることが大事 → 安定度のいい光格子時計の出番
- 恐らく、我々のリンクが世界最高安定度、精度の遠隔リンク(重力ポテンシャル計)
- **ファイバーリンク網の整備ではヨーロッパが突出、全ユーロ標準研ネットワークの構築、光時計の衛星比較のキャンペーンを実施**





**全ヨーロッパでのファイバーリンク網の構築**  
**SYRTE-PTBで光格子時計の比較が実現（1500 km）、NPL、INPIMまで延伸。**

## 光時計を衛星経由で繋ぐ、測定のキャンペーン



**EUROPEAN METROLOGY RESEARCH PROGRAMME  
(EMRP, 2009-) / EUROPEAN ASSOCIATION OF  
NATIONAL METROLOGY INSTITUTES (EURAMET)、地  
続きの欧州には時間共有の文化**

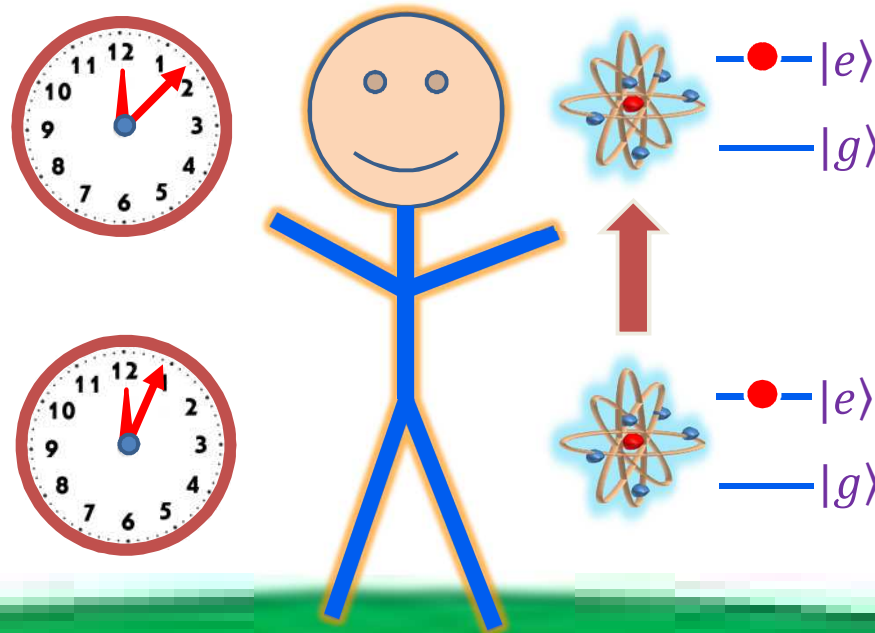
# 時計は(量子)重力ポテンシャル計になる

アインシュタインの相対性理論: 上方の時計は速く進む

- ハーバードタワー実験(1960): 高低差  $\Delta H = 22.6 \text{ m}$  で  $2 \times 10^{-15}$  変化
- 東大-理研リンクをテストベッド、相対論的測地の確立、応用の探索
- 光格子時計リンクで約15 mの高低差を数cmの精度で観測

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{g\Delta H}{c^2} \approx 1.1 \times 10^{-18}/\text{cm}$$

時間が速く進む  
パーソナルスケールで  
相対論的時間が見える



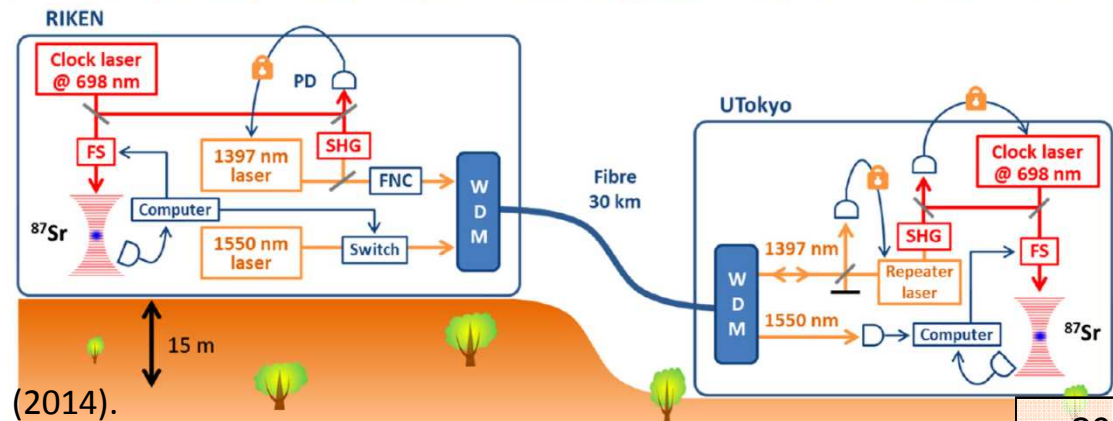
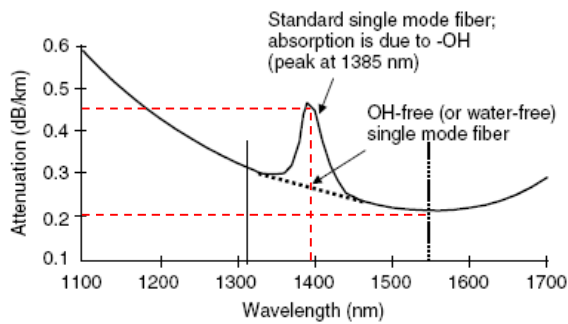
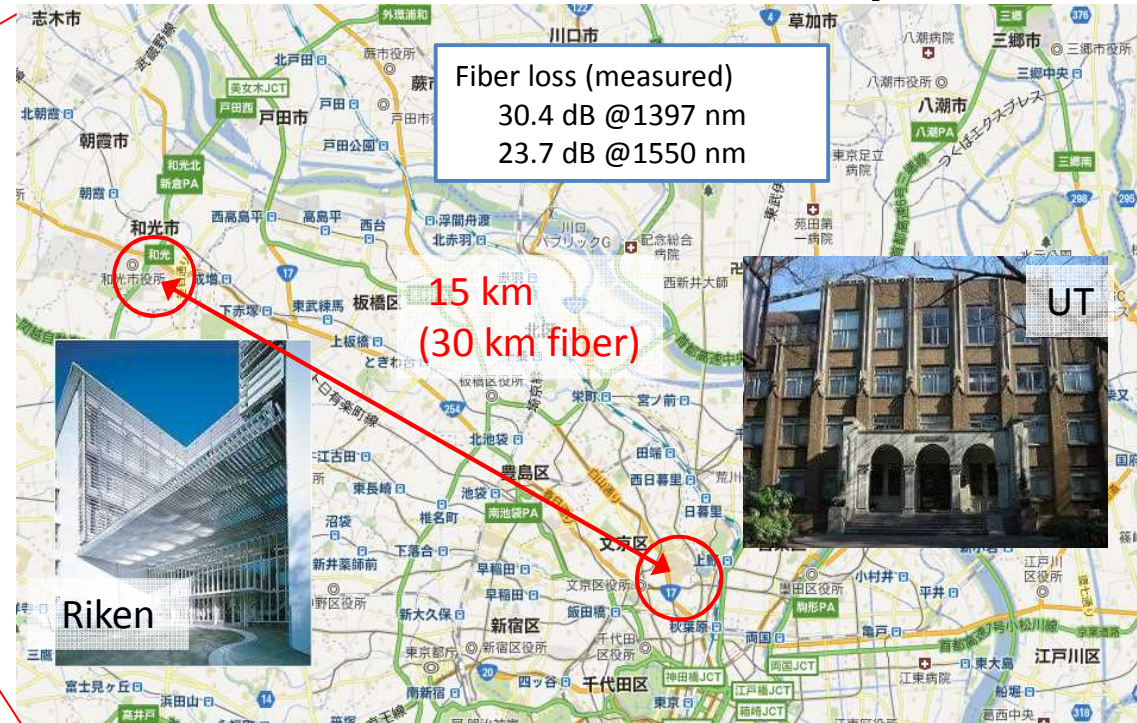
重力ポテンシャルエネルギーを獲得:  
 $(M + \frac{h\nu_0}{c^2})g\Delta H$ 、この分、放出光子のエネルギーが高い

励起光子のエネルギー分だけ重くなる:  
 $M + h\nu_0/c^2$

# Connecting Sr clocks at UT and Riken using 30-km-long fiber link @1.4 $\mu\text{m}$

Transfer  $698 \times 2 = 1396 \text{ nm}$  laser through telecom fiber

- **No frequency combs** necessary; Clock comparison is not limited by comb stability
- Long distance link would be possible by employing OH-free fiber

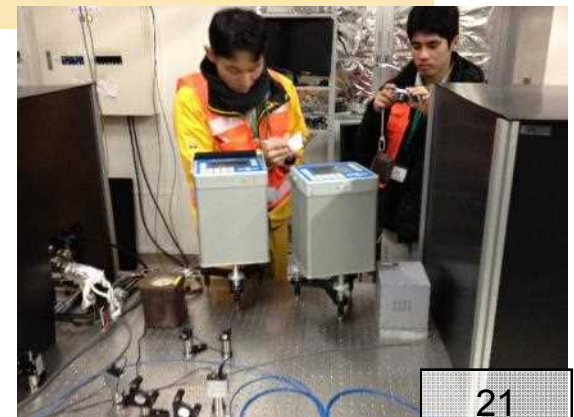
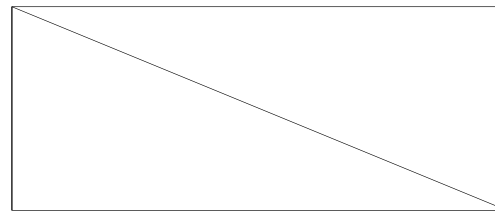
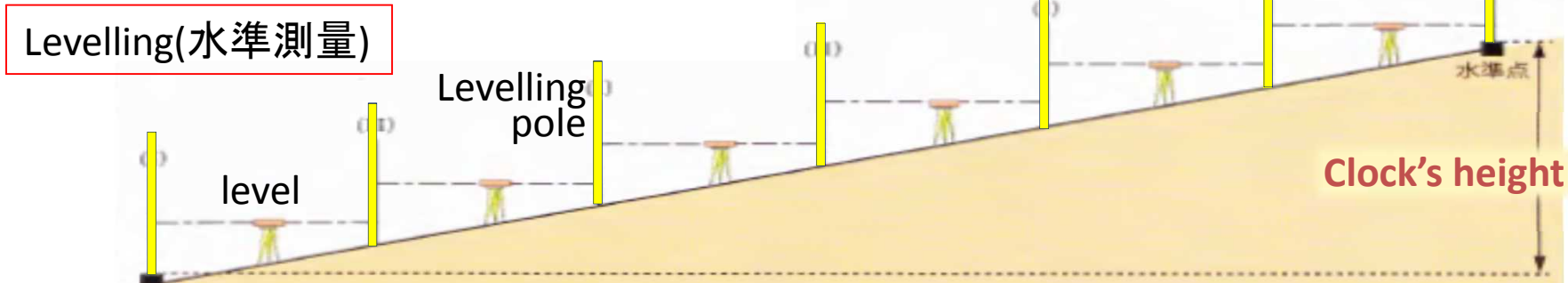


Akatsuka, T. et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53, 032801 (2014).

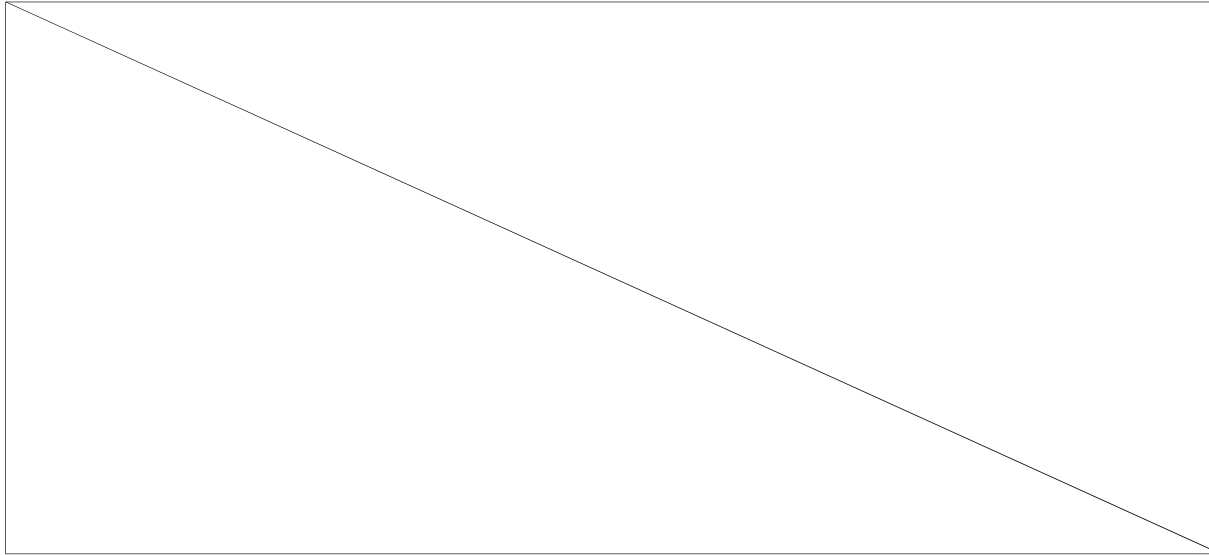
P. A. Williams, W. C. Swann, and N. R. Newbury, J. Opt. Soc. Am. B 25, 1284 (2008).

# 水準測量とアインシュタインの相対論の対決

## 国土地理院と光格子時計、どちらが標高差を上手く測れるか？

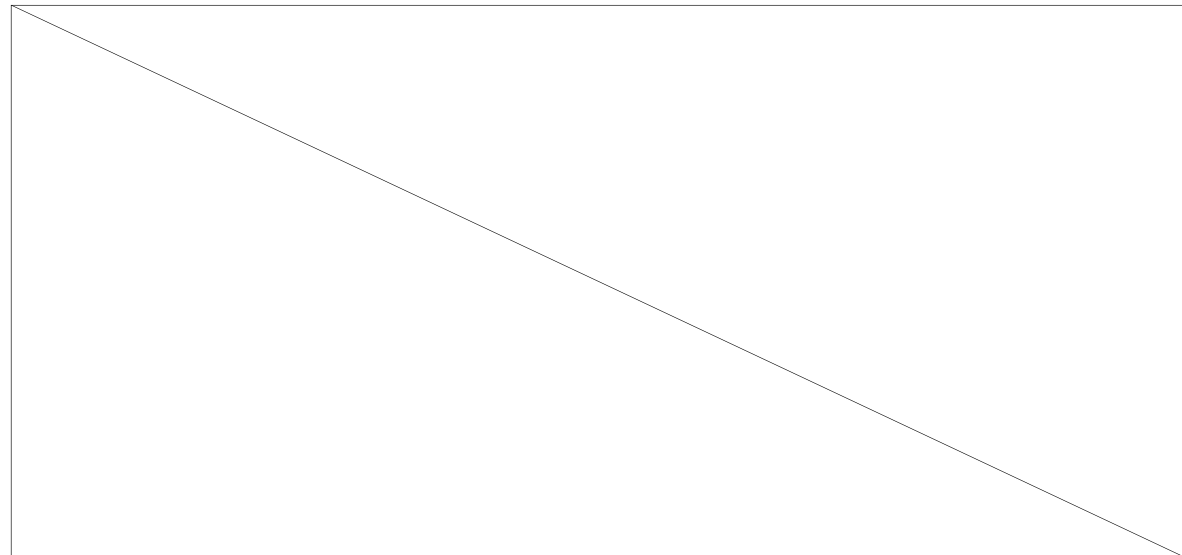
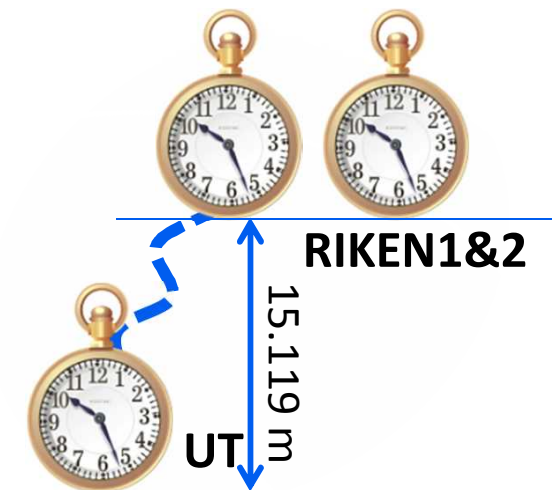


未発表データのため、画像を表示していません。

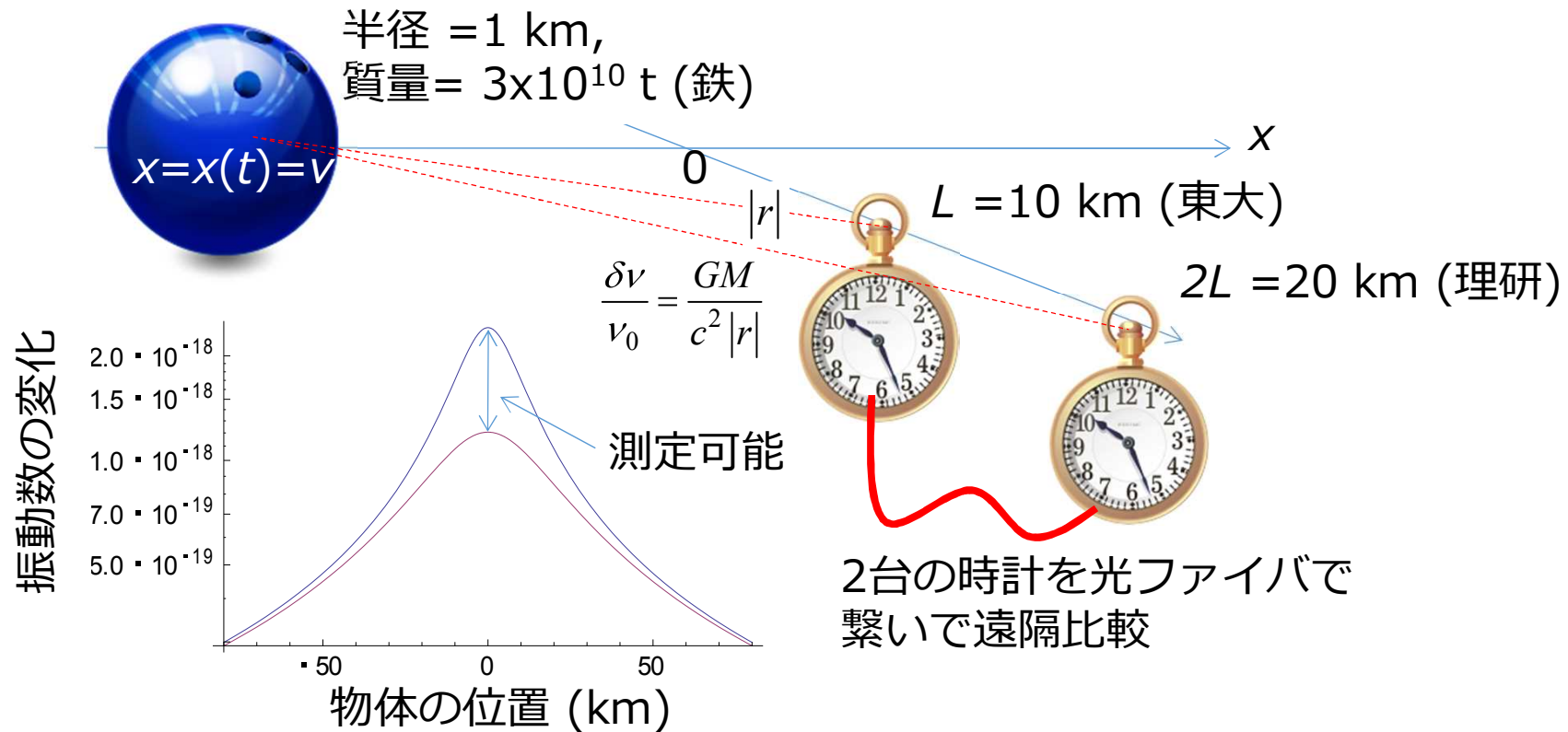


- 数cmの不確かさで、相対論的な重力シフトから、高低差を決定。
- 将来的には、mmの不確かさで、リアルタイムに高低差を決定可能。
- 水準点の置き換え、ダイナミック応答の量子水準点の形成。

### 3日間連続比較 (RIKEN1,2 & UT)



# 時計は新しいセンサー：重い質量が動くと…



- ❑ 従来技術では18桁精度の測定は途方もない時間のかかることだった (Cs原子時計なら出来たとしても300年、単一イオン時計でも半月)
- ❑ 光格子時計なら2時間、将来的には数分で可能
- ❑ マグマだまりの形成、津波の到来、重い物体の質量の分布の変化が見える
- ❑ レーダーではない。時空間のゆがみを見ている

# Time for detection

Rana Adhikari, Paul Hamilton and Holger Müller

## Hunting for topological dark matter with atomic clocks

Nature Physics

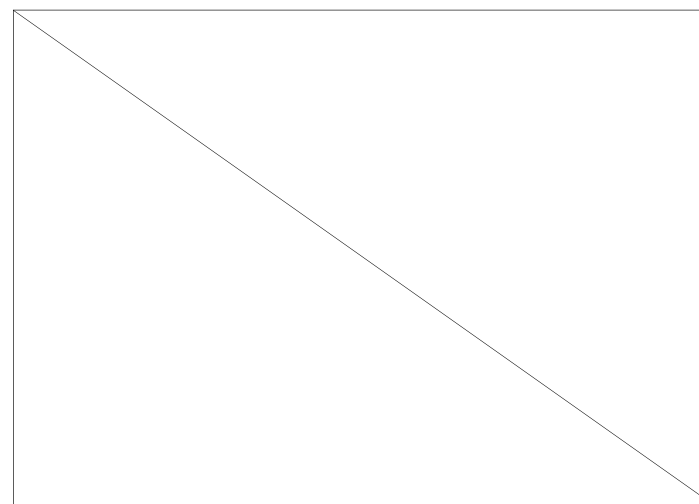
A. Derevianko<sup>1\*</sup> and M. Pospelov<sup>2,3</sup>

PUBLISHED ONLINE: 17 NOVEMBER 2014

1. 物理定数の長期的変化
  - クウェーサーの原子スペクトル(50-100億年前の光)と現在の原子スペクトル
  - 異種原子時計の周波数比(例えば、Al<sup>+</sup>/Hg<sup>+</sup>、Hg/Sr)
2. 物理定数の瞬間的变化
  - ダークマターのドメインウォールが地球を横切るとGPS原子時計の同期が崩れる？
  - 宇宙の質量の1/4を占めるダークマター、その相互作用は未知
  - 標準モデルでは説明できないのでどんな仮説もあり

原子時計は一番精密な測定ツールなので、見るとすれば原子時計

- 原子のスペクトルを頼りに、手探りで原子モデルを作って、量子力学の体系を築いた19～20世紀初頭の分光学と酷似
- ドイツの鉄鋼業の要請→黒体輻射の研究→プランクの光量子の発見
- 原子時計はNew Physicsの幕開けの最もエキサイティングな時代の主役

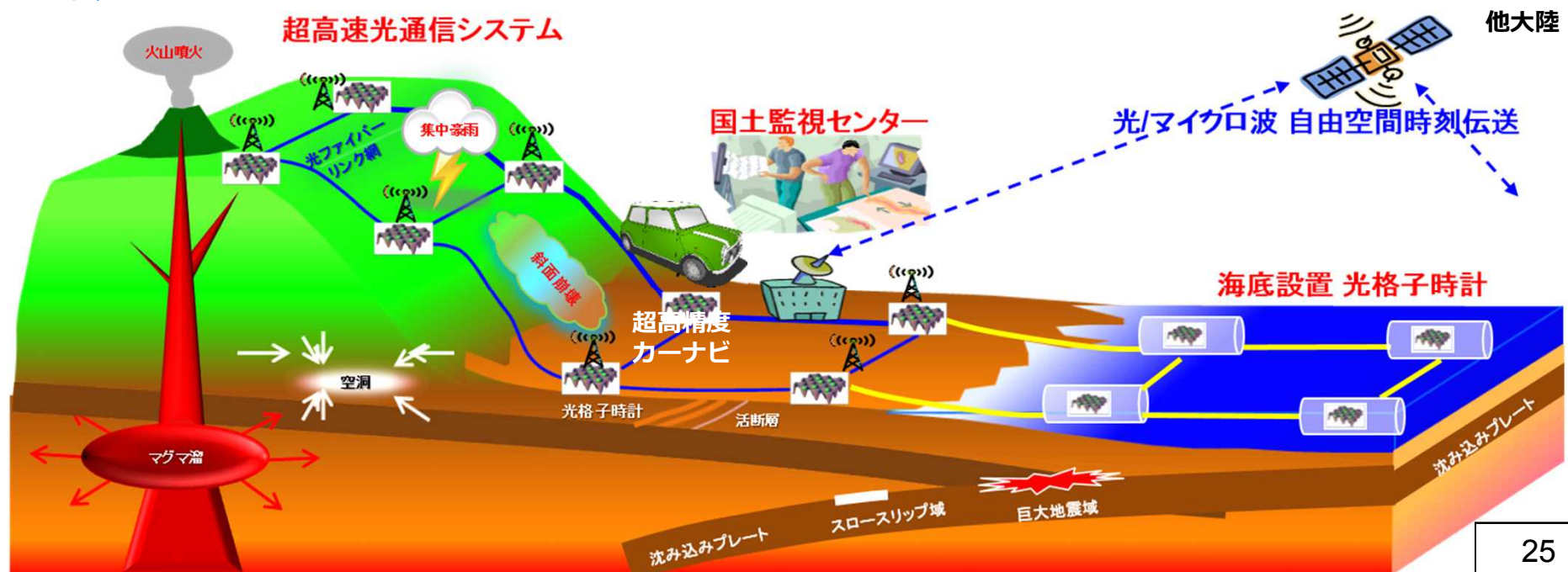




# Internet of Things(IoT)→Internet of Clocks(IoC) へ

本邦独自の高度・時空間インフラの整備

- 時空間情報は、GPSを運用する米国にもっぱら依存、超小型原子時計開発も、DARPA（アメリカ国防高等研究計画局）の巨大投資が独占的に推進
- 欧州では、ESAを中核とするSOC（Space Optical Clocks）プログラムが、最先端レーザーベンチャーと、光格子時計研究のレーザー需要を仲介し、ベンチャーの成長を促す。
- しかし、（軍事・防衛・宇宙のコンテクストによらずとも、）高度な時空間インフラは、未来社会の安全・安心インフラの要：高齢化社会の車の自動運転・位置情報の高度掌握、日本の国土（環境，海洋，気象，地質）の監視・探査、など
- 次世代時間インフラ整備、新しい市場とニーズの開拓、研究力強化への還流の手法？



# 光格子時計で期待される成果

## ① 秒の再定義への国際貢献

- 光格子時計の基礎物理解明のリーダーシップ
- 秒の再定義の想定 ( $3 \times 10^{-18}$ ) の1桁先の精度を本邦で率先して実現
- 異種原子の周波数比  $R = \nu_a/\nu_b$  の高精度決定

## ② 超精密計測による基礎物理の展開

- 周波数比  $R$  は時間的、空間的に不変か？ 物理定数の恒常性、ローレンツ不変性、局所位置不変性の検証
- 標準モデルを超える物理探索

## ③ 次世代原子時計の工学応用の探索

- 相対論的測地、高低差  $\sim$  mm を実時間で読む
- 超高精度原子時計のアプリケーションの開拓

## ④ 10-20年後の超精密科学・技術の礎を本邦主導で構築

- かつて時間研究は欧米の掌の上にあった。大航海時代を支えたハリソンのクロノメータ、Cs原子時計、GPS...
- 光格子時計は欧米主導の時計研究のゲームのルールを変えた