

理事長定例記者説明会

4月23日(木)11時～12時 東京本部別館

新しい時間をつくる



ERATO

さかひ
PRESTO

CREST

ERATO

1997-----2002----2005-----2010-----2016

香取 秀俊

ERATO 創造時空間プロジェクト 科学技術振興機構

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 量子計測研究室

Accurate clocks would see the curved space-time like the picture of “The Persistence of Memory, 1931 : Salvador Dalí”.

アインシュタインの相対論にインスパイアされたとされるダリのやわらかい時計。パーソナルスケールで実現されつつある。10－20年後、時計の役割はどのようなだろう？

GPS原子時計の相対論的補正

円軌道速度・約4 km/s

特殊相対論効果で時間の進み
方が遅れる: -8.4×10^{-11}



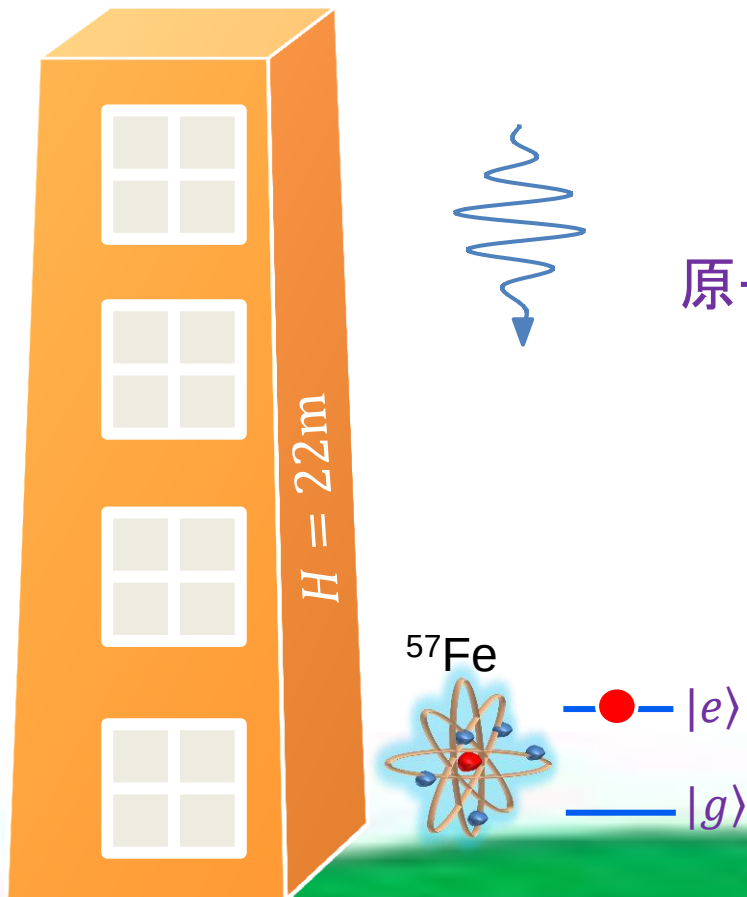
高度・約2万 km、地球の重力場の影響が小さい。一般相対論的効果で、地上よりも時間の進み方が速くなる: $+5.27 \times 10^{-10}$

特殊相対論と一般相対論で逆の寄与。
合計で $+4.43 \times 10^{-10}$ の相対論的補正

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 2×10^{-15} 変化



原子は余分な重力ポテンシャルエネルギーを獲得: $(M + \frac{h\nu_0}{c^2})gH$

原子は振動数 $\nu = (1 + \frac{gH}{c^2})\nu_0$ の光子を放出

→ 上方の原子時計は $\frac{gH}{c^2}$ だけ速く進む

$E_0 = h\nu_0$: 励起エネルギー
原子時計は ν_0 を振りににする

励起された原子 $|e\rangle$ は、エネルギーと質量の等価性から重くなる: $M + h\nu_0/c^2$

時計は(量子)重力ポテンシャル計になる

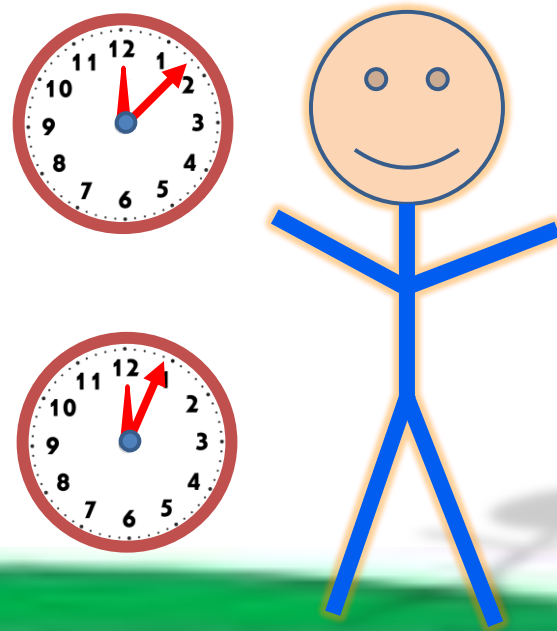
アインシュタインの相対性理論: 上方の時計は速く進む

- ハーバードタワー実験(1960): 高低差 $\Delta H = 22.6 \text{ m}$ で 2×10^{-15} 変化
- 単一イオン時計 (2010): 一日平均して $\Delta H = 30 \text{ cm}$ を検出
- 光格子時計 2×10^{-18} を2時間で達成 $\rightarrow$ 高低差 $\Delta H = 2 \text{ cm}$ が見える
- 数年後には、100秒平均で 1×10^{-18} を見たい
 $\rightarrow$ 相対論的な重力の効果がセンシングのツールになる

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

時間が速く進む

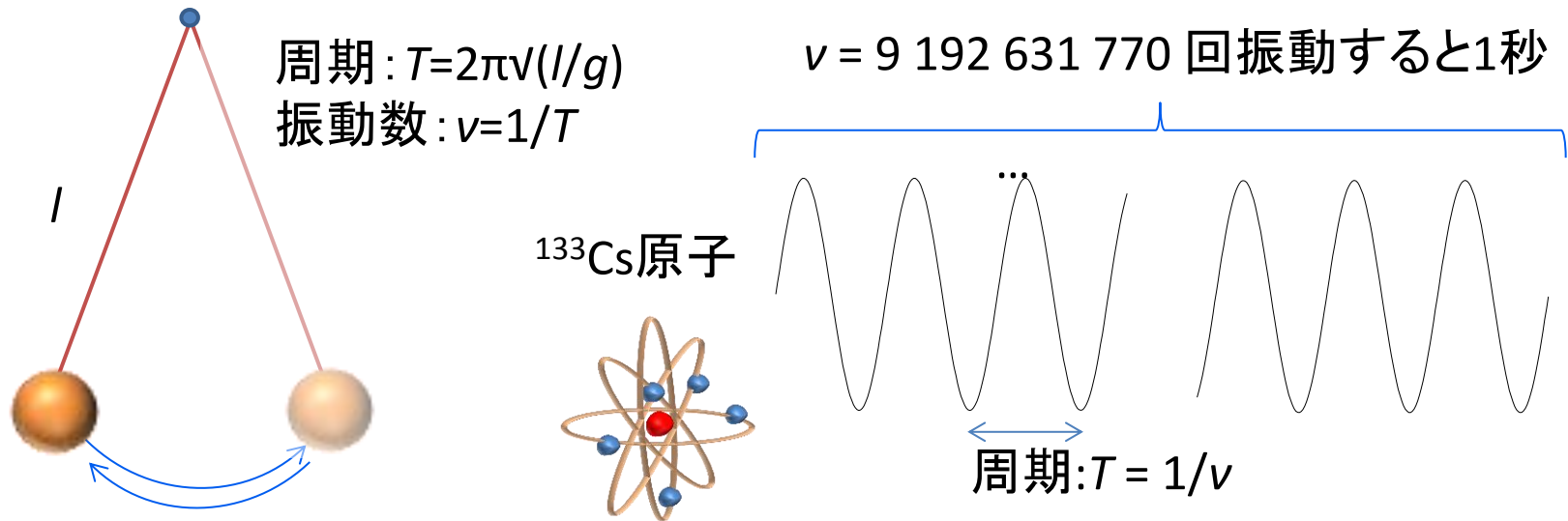
パーソナルスケールで相対論的
時間が見える



原子時計研究はなぜ面白い？

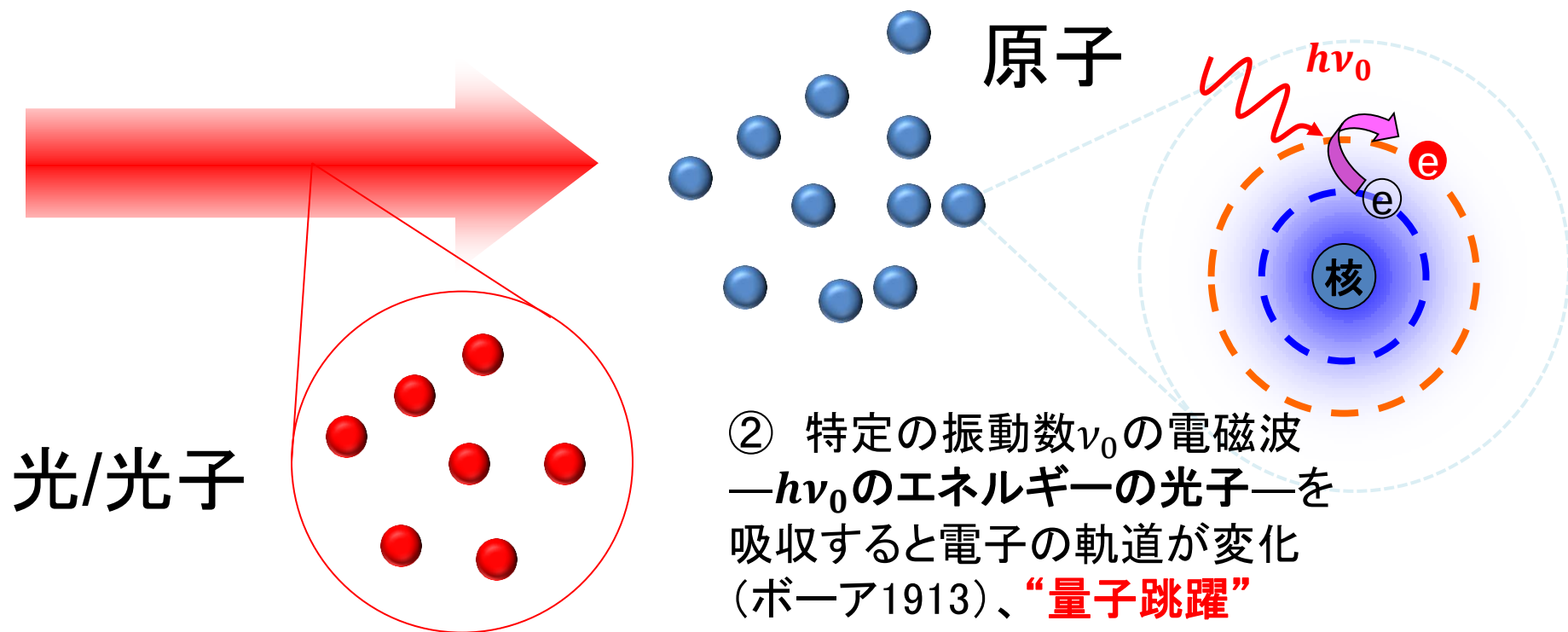
- 原子時計の精度
 - あらゆる科学計測の中で桁違いの高精度を誇る
 - 精密計測の**ベンチマークテスト**
 - スーパーカー、スパコン、スパーコライダー、...、**スパクロ**...
- **量子のルール**だけで性能を競うアイディア勝負（測定器の雑音を混入させない工夫）
- スモール・サイエンス、しかし、極限的な精度で**物理の根幹**に迫る（←加速器のビッグ・サイエンス）
- 工学的にはきっと役立つ
 - GPS、電波時計、高速ネットワーク同期...
 - 新しい工学ニーズの発掘：50年前に**GPSのカーナビ**応用を考えるような斬新な発想が必要

時間の測りかた・精度の表現



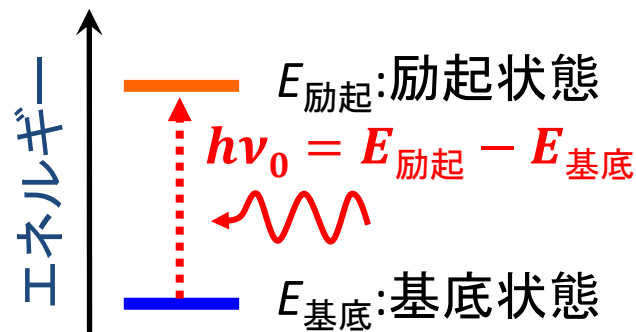
- 周期 T の現象を見出す：地球の自転、振り子、原子の振動...
- 繰り返しの回数 n を数える：経過時間 $t = n \cdot T = n/\nu$
- 周期が δT 狂うと、時間も $\delta t = n \cdot \delta T$ だけ狂う
→ 時間の(相対)精度： $\delta t/t = \delta T/T = \delta \nu/\nu$
- これから時計精度 $\delta t/t$ を振り子の**周波数精度 $\delta \nu/\nu$** で読み替える
- $\delta \nu/\nu = \delta t/t = 10^{-18}$ (18桁の精度)なら、 $\delta t/t = 1$ 秒/300億年、つまり300億年 (宇宙の年齢138億年) で1秒の誤差の時計作りを目指そう！

量子の世界：光と原子、波動性・粒子性、原子時計

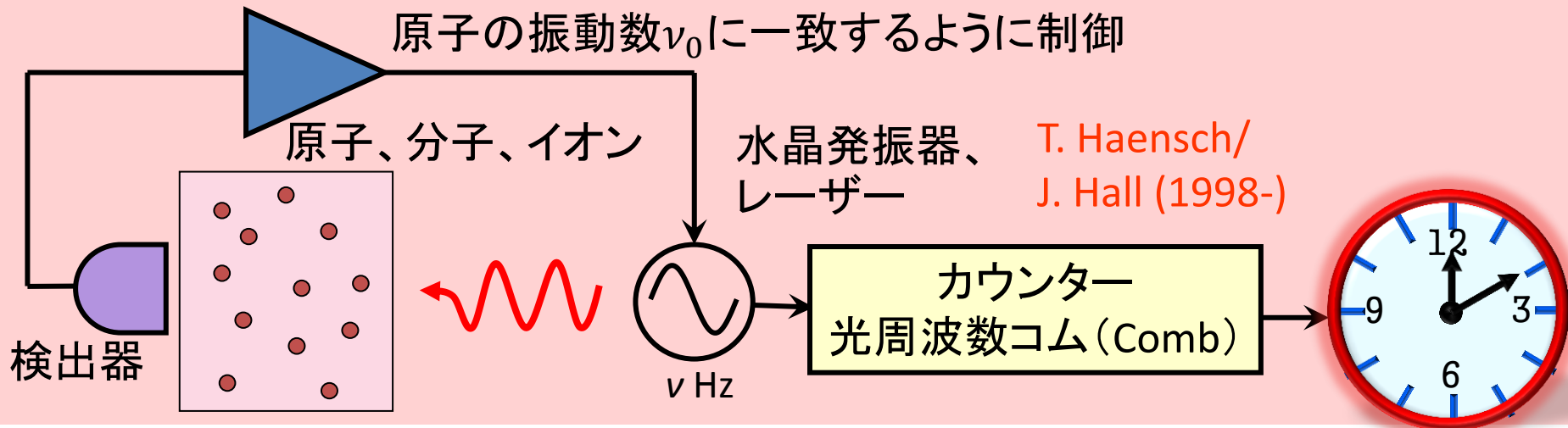


① 光は振動数 ν の波であると同時にエネルギー $E = h\nu$ (と運動量 $p = h/\lambda$)をもつ粒子(光子)である。 h はプランク定数(プランク1900年)

③ 原子時計ではこの振動数 ν_0 を正確に測定、振動数の基準とする

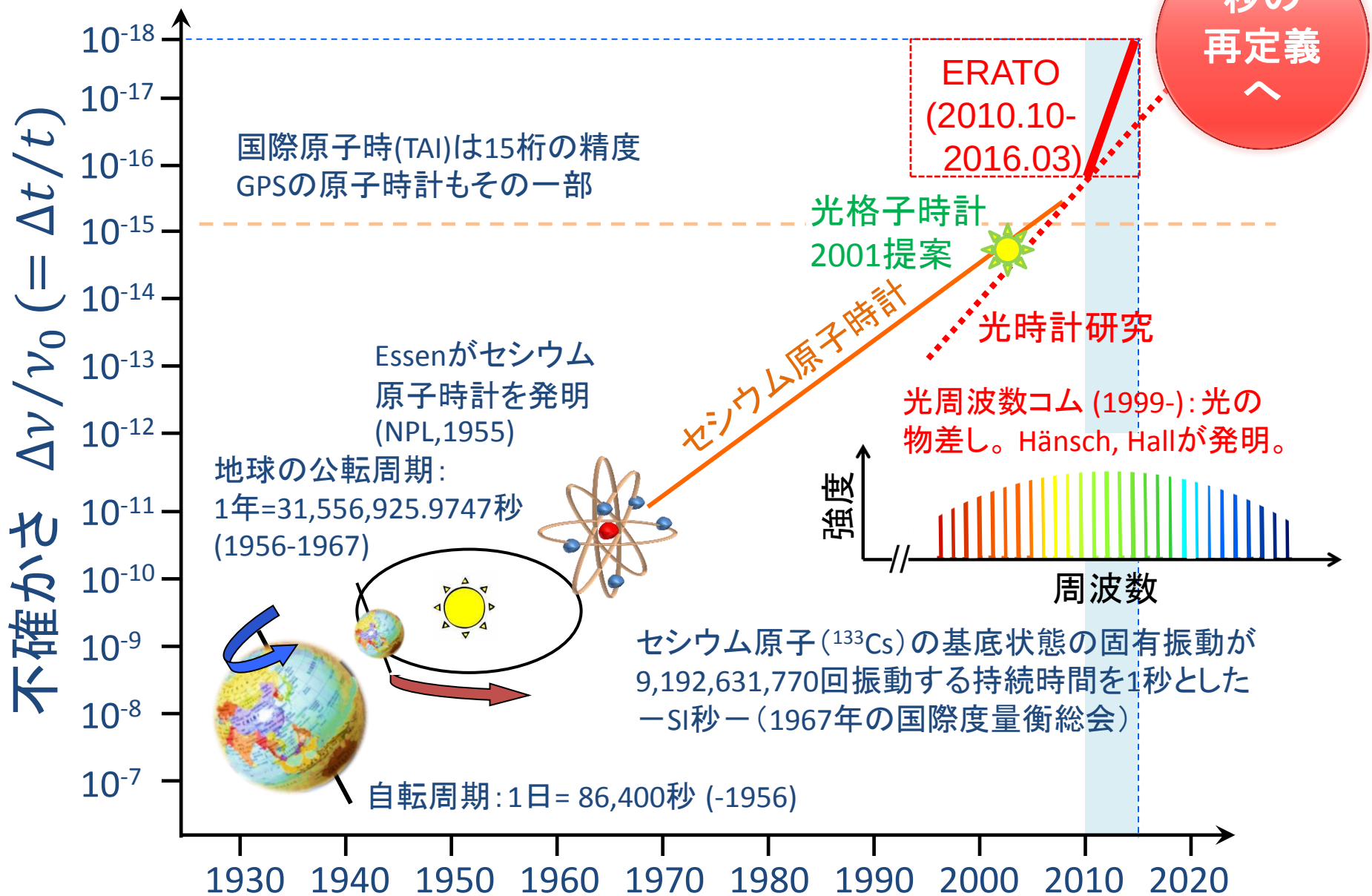


原子発振器：原子の振動をレーザーにコピー



- いい時計を作ることは、いい発振器を作ることと等価
- (物質の固有振動を使う) マクロな発振器は周波数が揺らぐ
- 普遍的な1秒を作りたい: 基礎物理定数は定数と信じれば...
- 「原子の固有振動」を読み出してマクロな発振器にコピーする
→ **原子時計**
- 研究の大前提は本当か？を検証したい

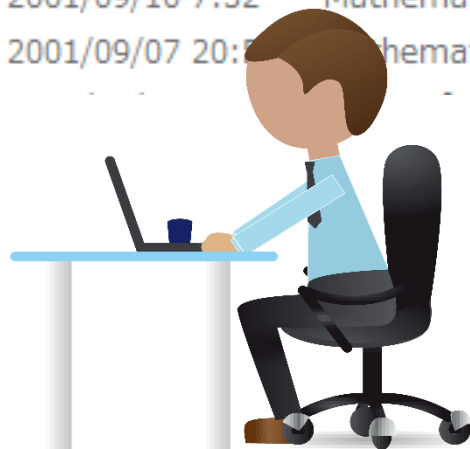
1秒の定義の変遷: 精度の追求の歴史



↑
レーザーの誕生

StAndrews2001.9.ppt
dipolemoment.nb
dipolemoment0.nb
alpha_990216graph87SR.nb

2001/09/14 7:01 Microsoft Power
2001/09/11 4:42 Mathematica
2001/09/10 7:32 Mathematica
2001/09/07 20: Mathematica



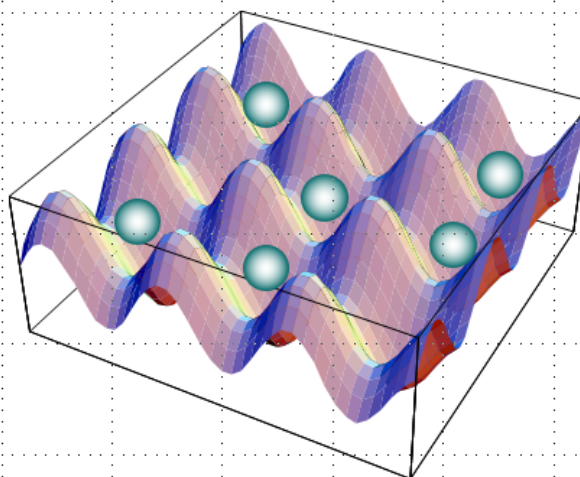
原子時計はノーベル賞の系譜、既定路線で研究しても意味がない
発表が一日延期。BBCの非日常の映像を尻目に、部屋にこもって計算、
プレゼンを練った。若者は突飛なアイディアを出すべきと思った。

光格子時計の提案は2001・9・12 ST. ANDREWSの会議

Light Shift cancellation in 1S-3D transition

Measuring clock transition in 3D Optical Lattices

Stark Shift [Hz]



- 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、ボスがみんないた



Wineland

この会議で
QLSを提案
(2012N)

Katori?

Clarion

Hall (2005N)

Gill (秒の再定義
の牽引役)

Udem

Blatt

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

Proceedings of the **6th** Symposium
on **Frequency Standards
and Metrology**



editor
Patrick Gill

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}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 ~ 20 kHz. To further reduce potential uncertainties originating from collisional frequency shifts as well as tensor light shifts, we propose to employ the $^1S_0(F=9/2) - ^3F_0(F=9/2)$ transition of the ^{87}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 transitions¹. Recent dramatic advance in laser cooling techniques for alkaline earth atoms, allowing to cool the atoms down to the photon recoil temperature^{2,3,4,5} or even below⁶, 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 clocks⁷, 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 atoms⁸ 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

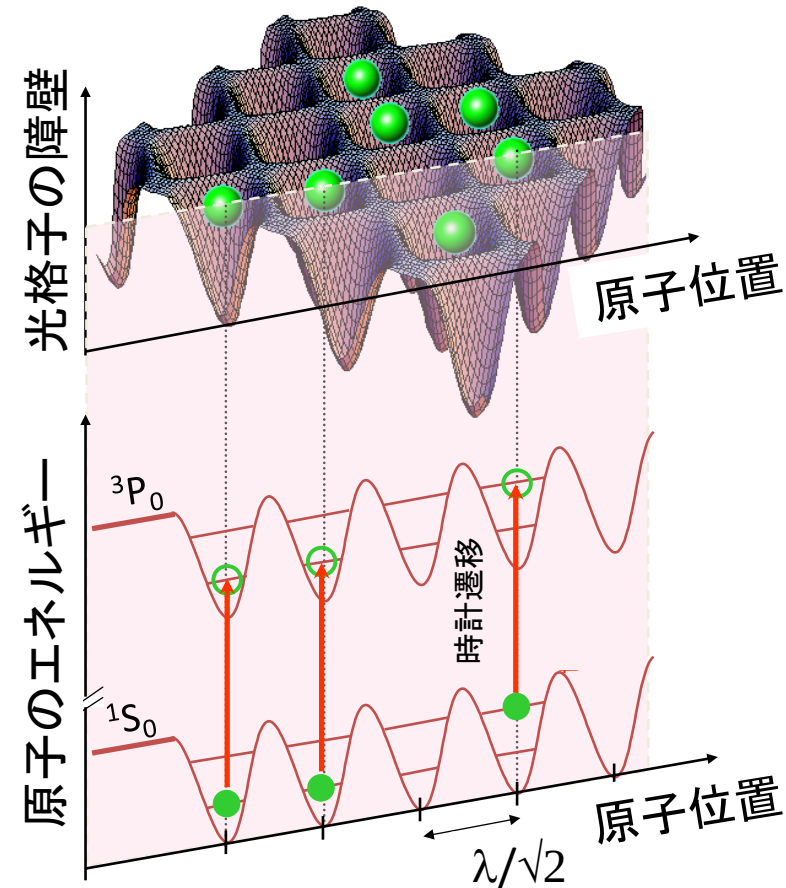
光格子時計：「原子の振り子」に気付かれ ないように原子をつかんで運動を凍結

❖ 次世代原子時計の有力候補はポールトラップ中の単一イオンと考えられてきた

- ポール、デーメルト(1989)、ワインランド(2012)ノーベル賞
- 量子力学的限界に到達、できたとしても 1×10^{-18} の評価に10日(約100万秒)平均時間がかかる)

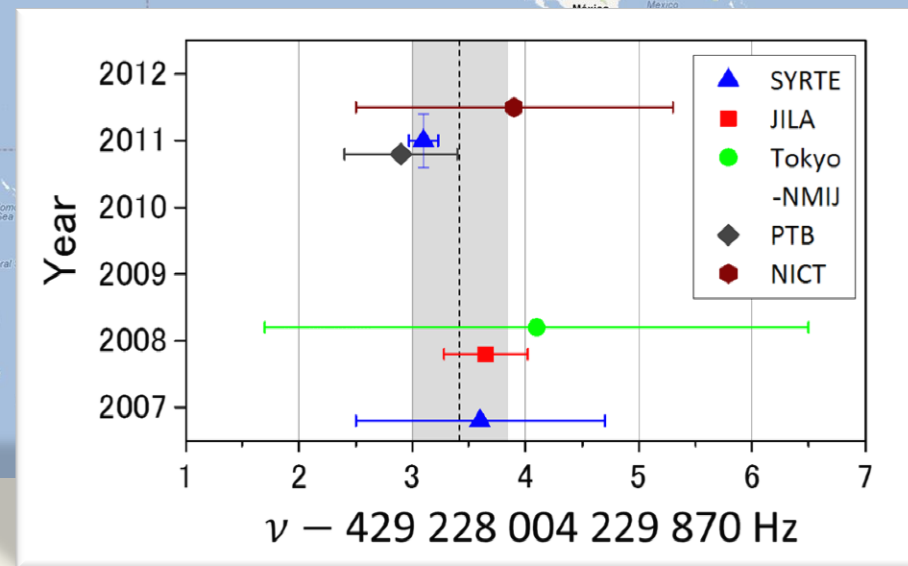
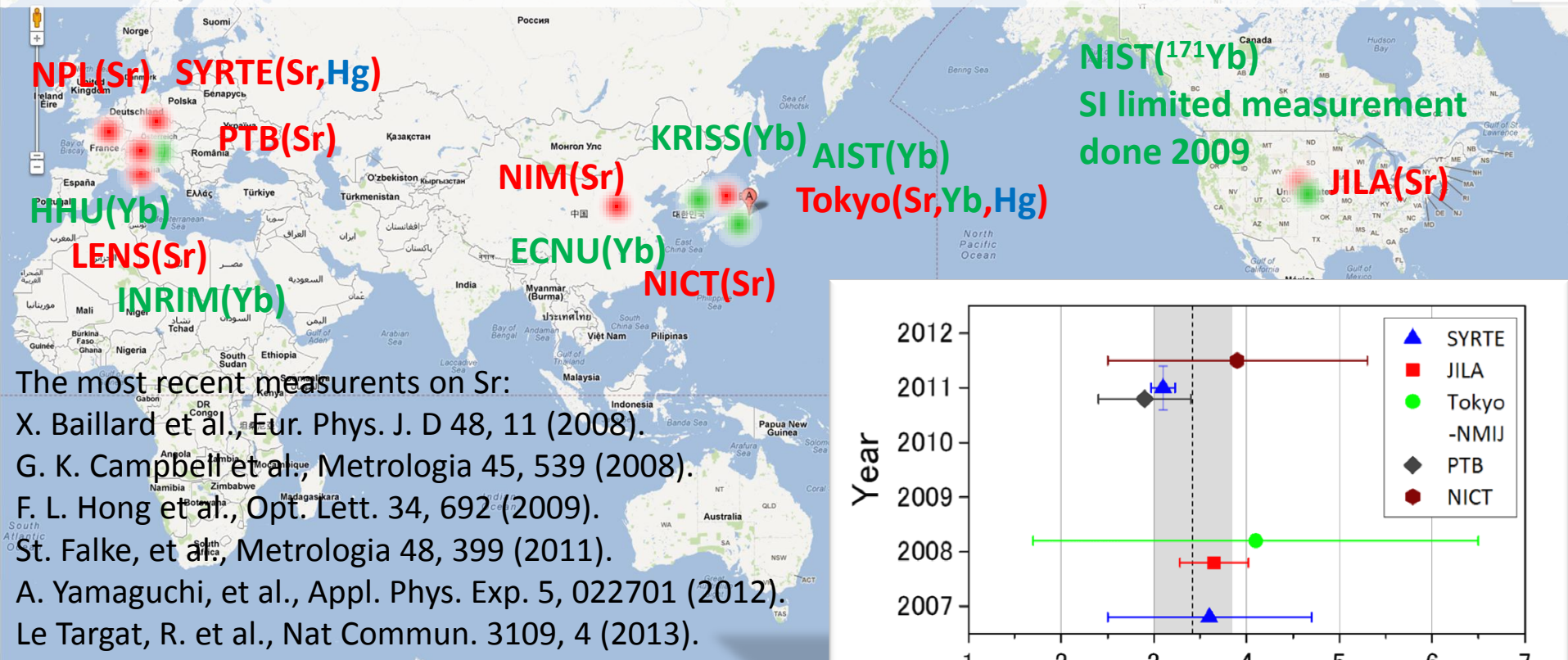
❖ ポールトラップに代わる、新型トラップの探索

- 原子を100万個捕まえる容器を作れば、100万分の1の時間で測定できる
- “**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捕まえると、原子の振り子の振動数は変化しない(Katori 2001・Frequency Metrology Symposium)



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！

世界3極での光格子時計の実現と 「秒の二次表現」の採択(2006.10)

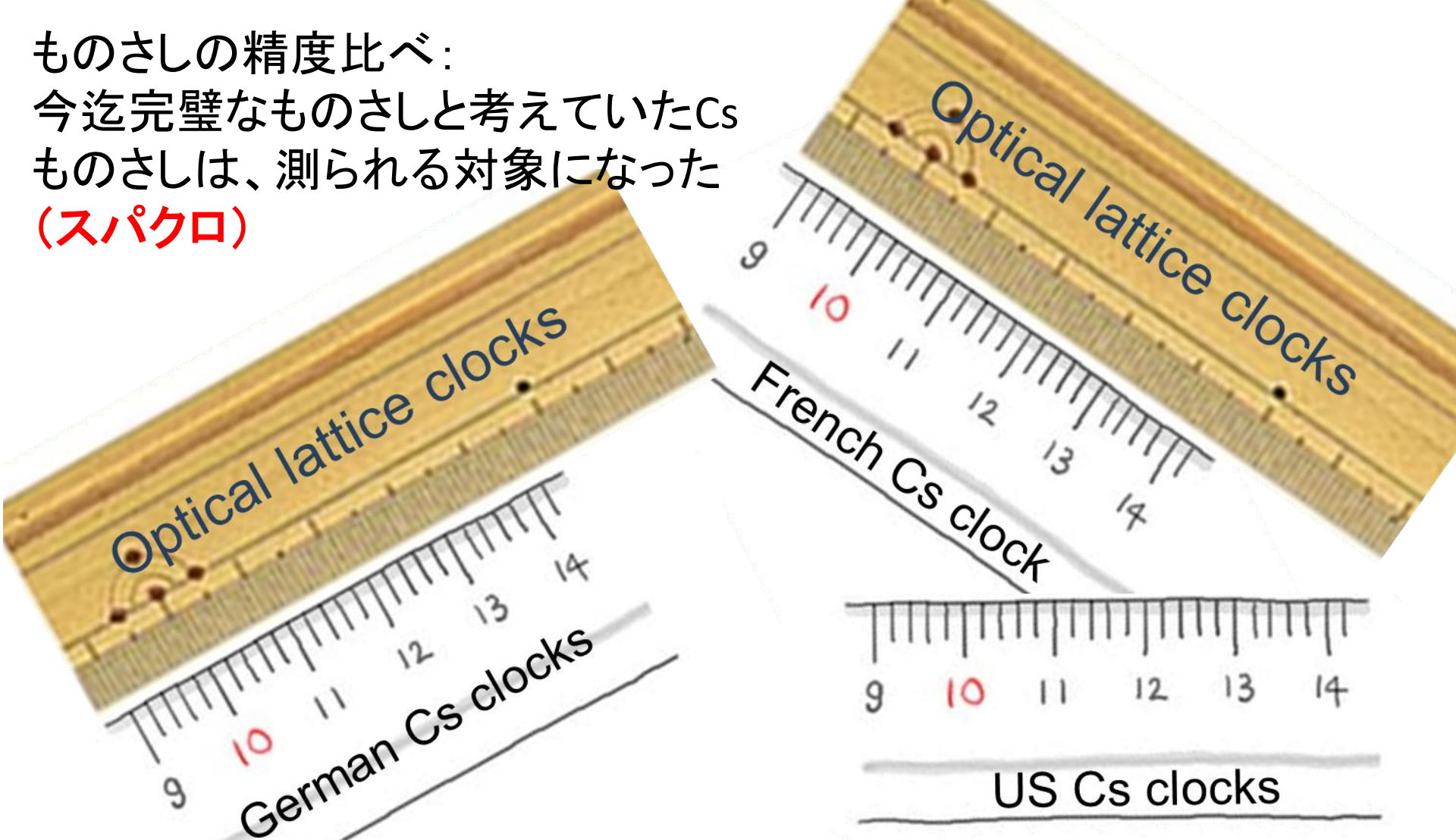


国際度量衡委員会 (2012.10) 勧告値

$$f_{87\text{Sr}} = 429\,228\,004\,229\,873.4 \text{ Hz}$$

相対的不確かさ 1×10^{-15} → 「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、測られる対象になった
(スパクロ)

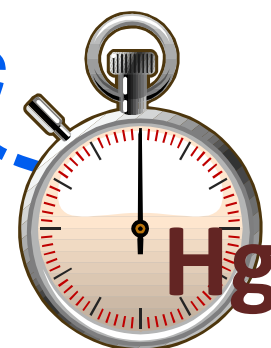


- ❑ 従来のSI秒に縛られずに「新しい時間をつくる」ことができる
- ❑ サイエンスとして楽しいし、エンジニアリングとしても重要
- ❑ 今まで見えない時間の隙間に、新しいサイエンスとエンジニアリングを見つけた

Cs clocks: No longer a reference for us



$$\frac{f[\text{Hg}(Z_{\text{Hg}}^2 \alpha(t)^2)]}{f[\text{Sr}(Z_{\text{Sr}}^2 \alpha(t)^2)]}$$



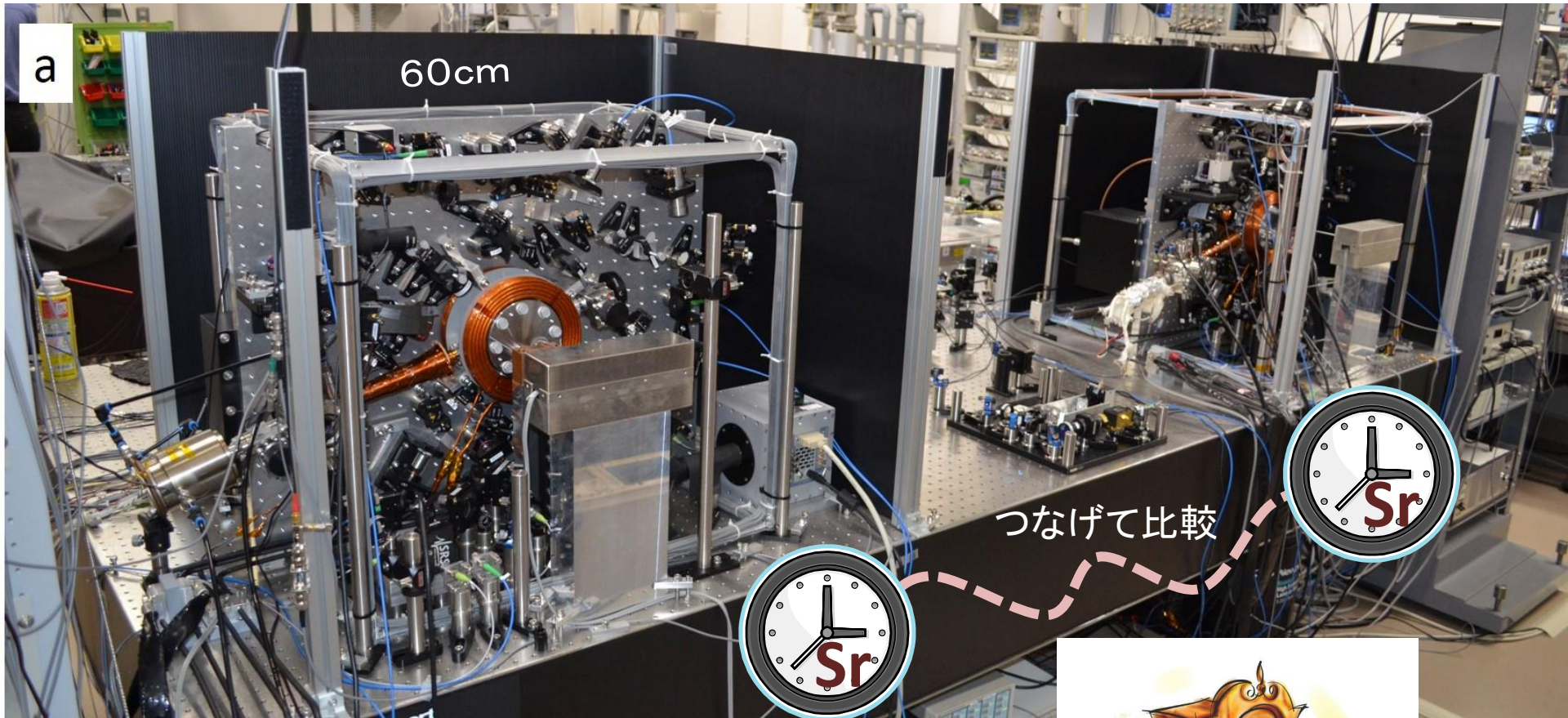
18桁の時計を2台作る、低温光格子時計

物理定数は定数か？ Hg/Yb/Sr時計比較

原子時計は高度差計に！相対論的カーナビ、社会インフラへ

時計を繋いで新しい物理と応用を 探す

2台の低温動作・光格子時計を比較する



現在の1秒を定義するセシウム原子時計では、精度が1000倍向上した光格子時計を評価できない



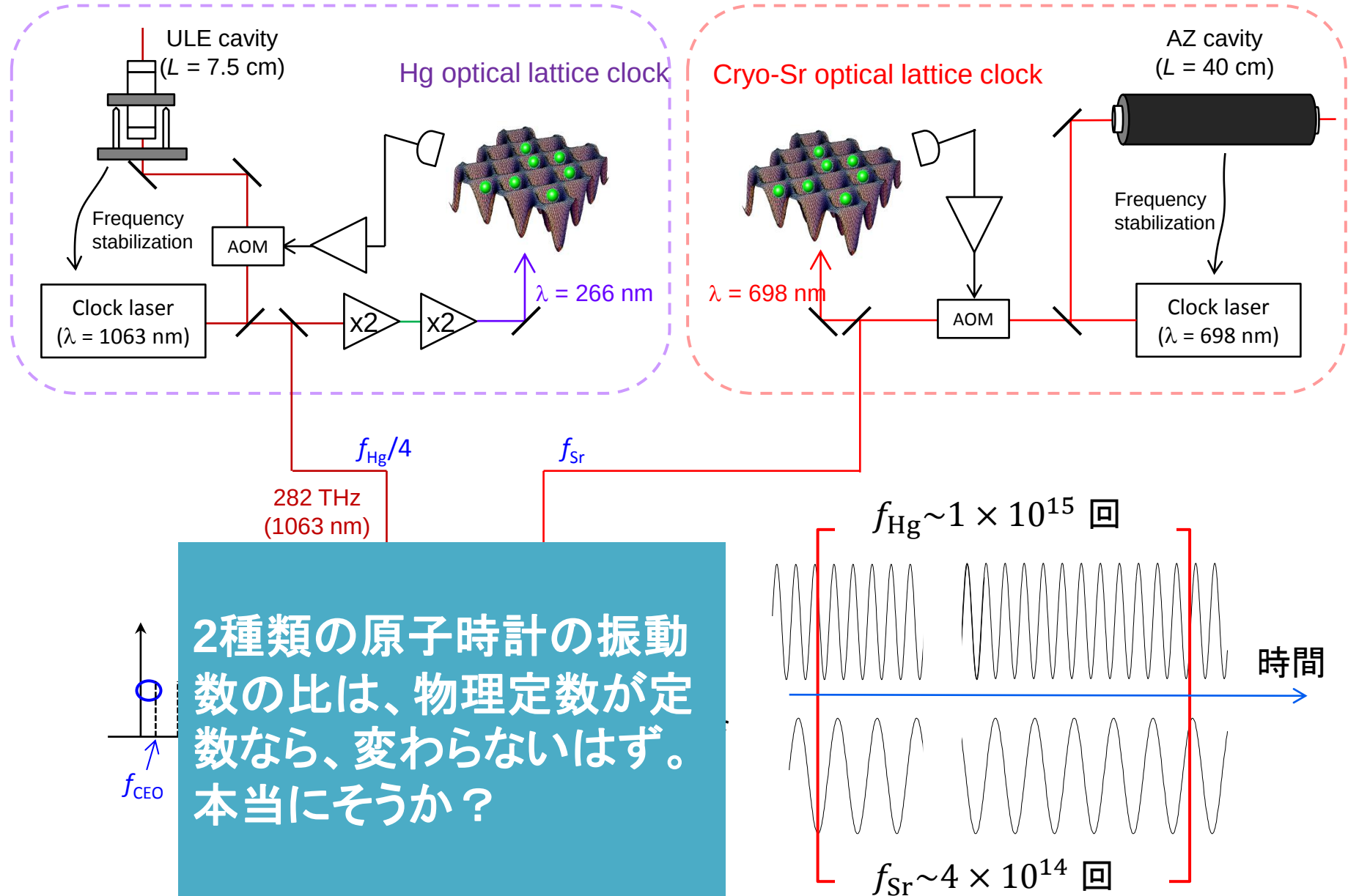
水銀原子・光格子時計

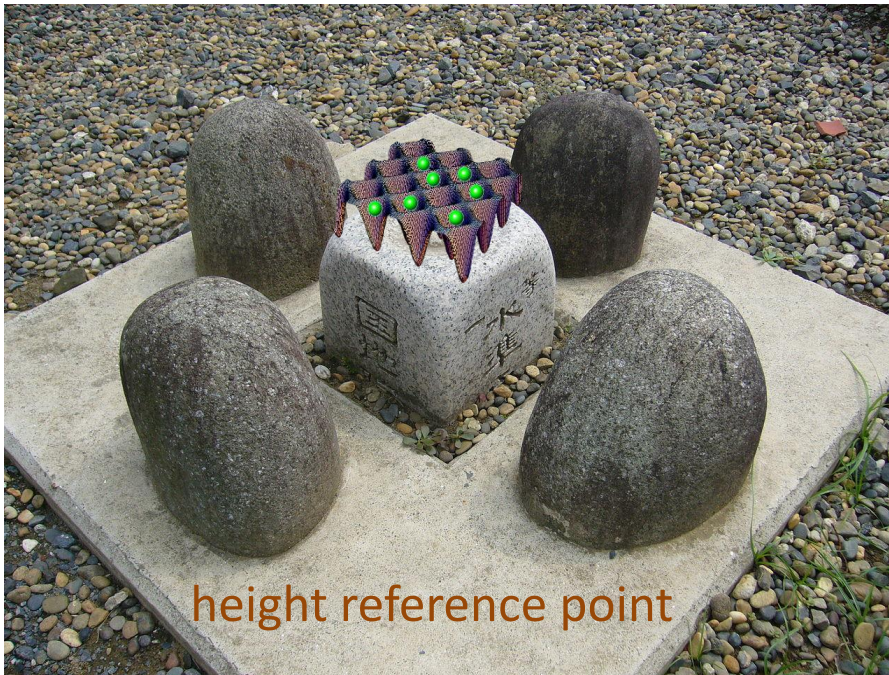


ゼロ測定じゃない役立つ物理量を測る

- 黒体輻射シフトが小さい
→ 室温動作で 1×10^{-18} の精度が達成できる(冷凍機が不要)
- 核電荷 Z 大 $\rightarrow$ 微細構造定数 ($\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$) の変動の検出感度 ($\propto \alpha^2 Z^2$) が高い
→ Hg/Sr の時計の比較で $\Delta\alpha/\alpha \approx 1.3 \Delta\nu/\nu_0$ を検証
- 紫外光源が必要、準備が大変

Hg/Sr光格子時計の周波数比を測る





Frequency link of clocks: Riken and UT

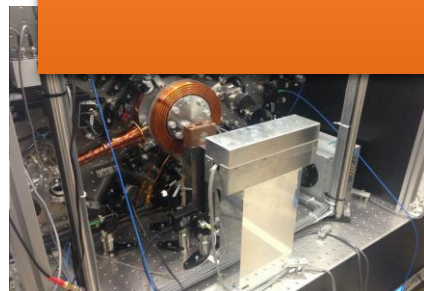
QUANTUM BENCHMARK(量子水準点): CLOCK APPLICATIONS IN THE FUTURE

遠隔時計比較

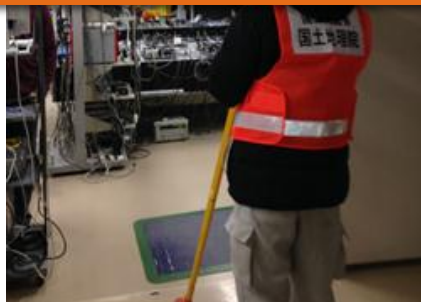
- 異なる機関間での時計の比較はSI秒の再定義に必要なステップ
- 18桁の比較では、むしろ重力ポテンシャル差を測っている！→測地応用へ
- 測地応用のためには、短時間で計測できることが大事→光格子時計の出番
- 原子の測定の量子ノイズを $1/N$ に低減したら、原子遷移をプローブするレーザーノイズがネックに
- レーザーノイズを遠隔地で同相除去→恐らく、我々のリンクが最高安定度、遠隔リンク(未発表)

理研—東大の光格子時計の遠隔周波数比較

性能のいい時計は実時間・重力ポテンシャル計・高度差計として機能する



時計の標高を測定



時計の標高を測定

理研



V_{RIKEN}

国土地理院に2台の時計の標高差を測定してもらった。(不確かさ~1 mm)
これを参照値として, 時計周波数比較の結果を検証する。

$$\Delta V = V_{\text{RIKEN}} - V_{\text{UT}}$$

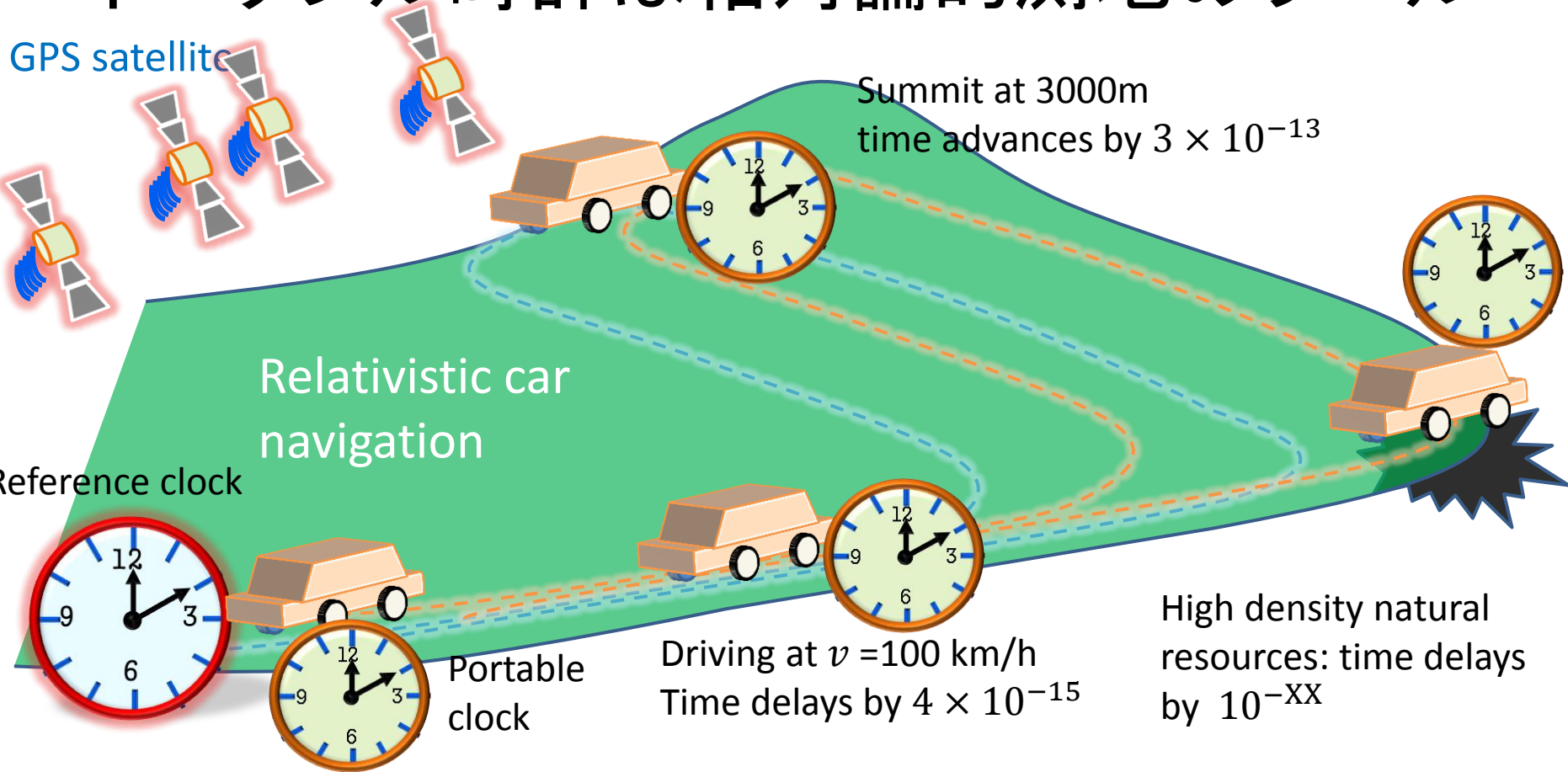
~15 m 東大



V_{UT}



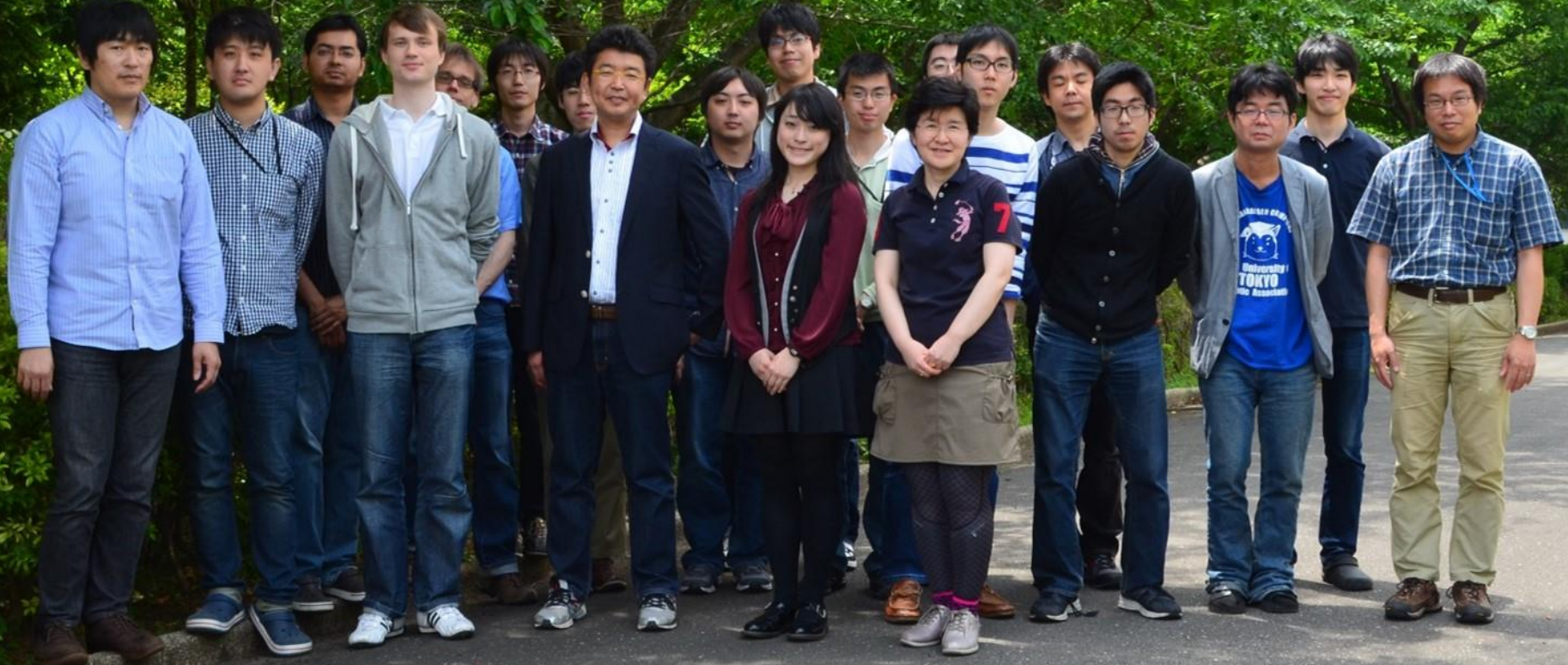
ポータブル時計は相対論的測地のツール



- A portable clock on a car (固有時) $d\tau \approx (1 + \Phi/c^2 - v^2/2c^2)dt$, Φ : gravitational potential, v : velocity, t : 座標時 (measured by the reference clock)
- $\Delta T = \tau - t$ compared at the base station depends on the driving route
 $\tau = \int (1 + \Phi/c^2 - v^2/2c^2)dt$.
- Slightly different driving route C_i gives different $\Delta T(C_i) = \tau(C_i) - t$.
- Differential time difference of $\Delta T(C_i)$ will map out spatial gravitational potential.

The Group: University of Tokyo/ERATO/RIKEN

/UT: T. Takano, N. Ohmae, I. Ushijima, K. Yamanaka, S. Okaba, T. Ohkubo, H. Ono, T. Osanai, K. Hayashida, T. Oita, K. Araki, M. Tanaka /Si-cavity: Y. Aso, N. Ohmae, A. Shoda, T. Ushiba, /RIKEN: M. Takamoto, A. Yamaguchi, N. Nemitz, M. Das, T. Akatsuka, M. Kobayashi, H. K.



光格子時計はダリ※のゆがんだ時計を可視化する

今後20-50年後の時計の新たな役割を考えるべきときに来ている
10年程度のうちに「秒の再定義」の可能性→基礎科学、国際社会への貢献
社会実装の検討：光格子時計ネットワーク
物理学の新たな展開へ（高エネルギー物理→超精密計測へ）

※ The Persistence of Memory(記憶の固執), 1931 : Salvador Dalí