

理研シンポジウム「宇宙線の発見から100年、X線天体の発見から50年」
理化学研究所(和光)大河内ホール、2012年11月27日(火)

光格子時計で見る パーソナル・スケールの相対論

理化学研究所 量子計測研究室

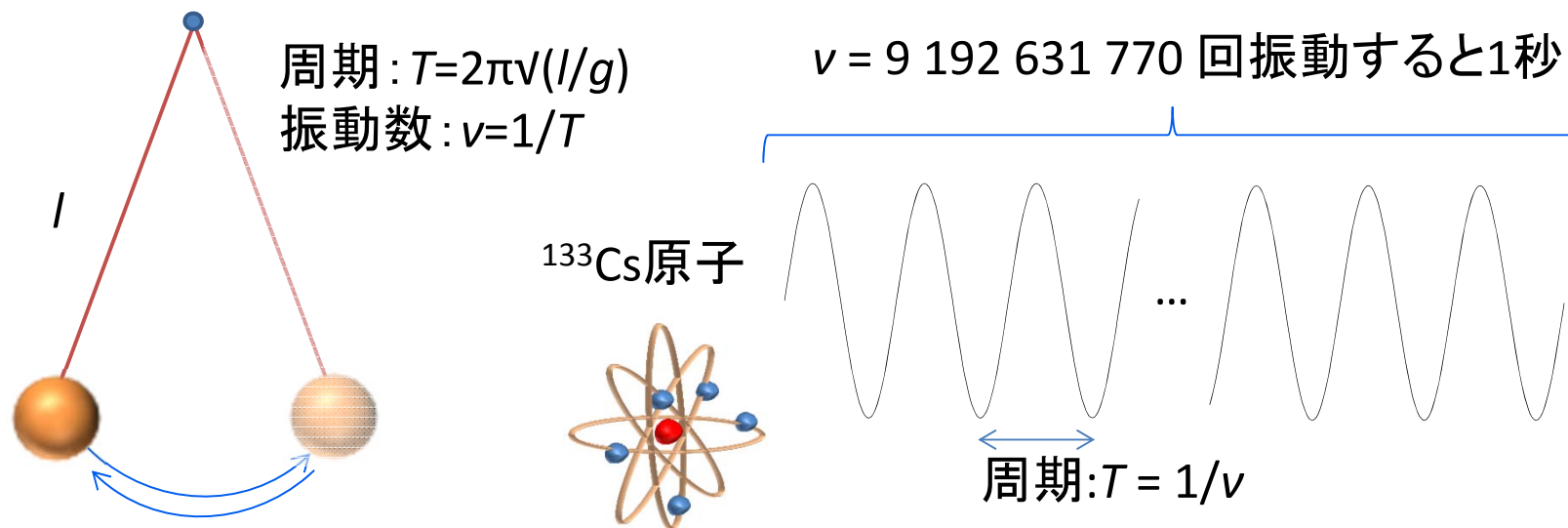
東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻

ERATO 創造時空間プロジェクト 科学技術振興機構

香取秀俊

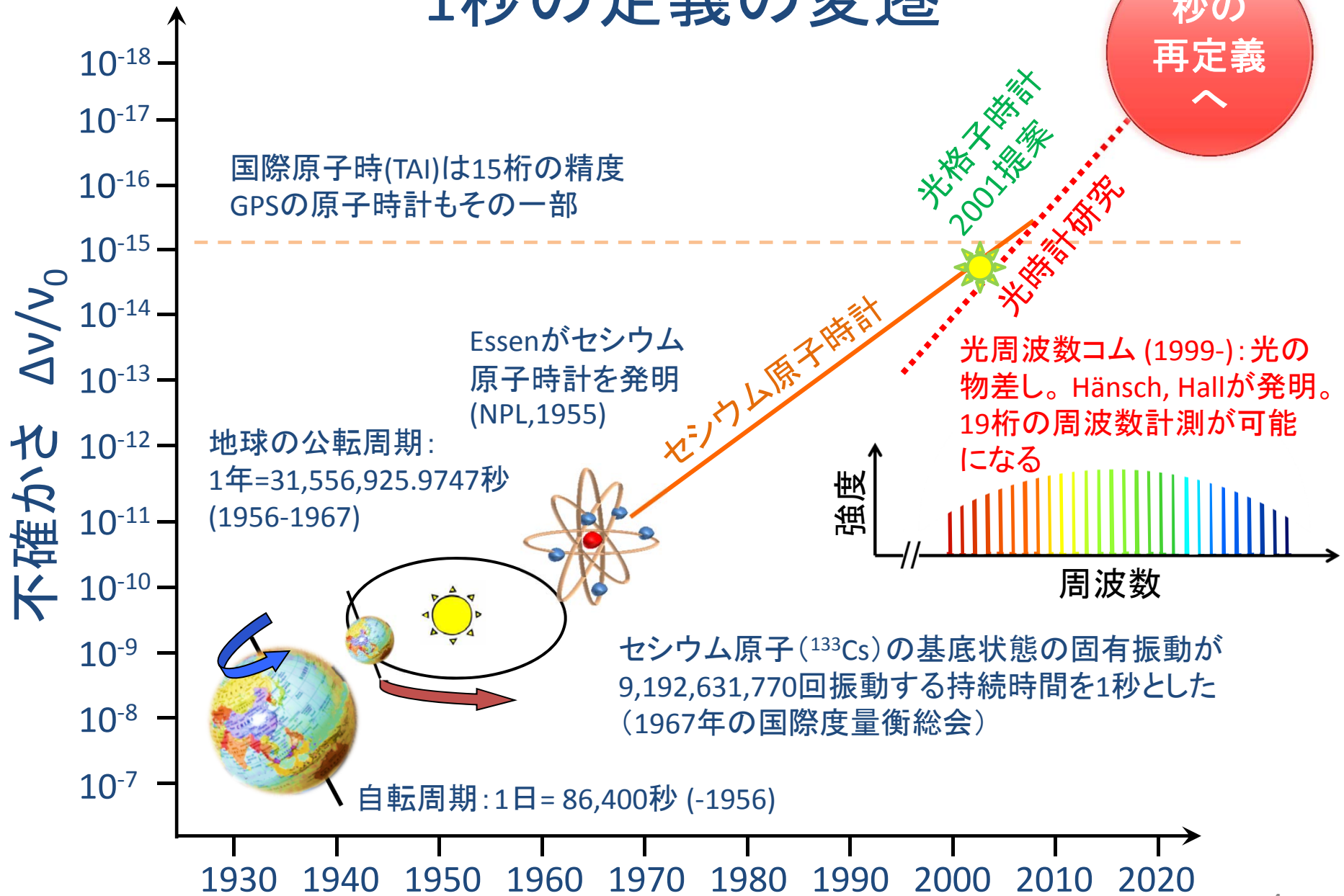
- 相対論の舞台は宇宙スケールの物理だった
- 高性能な時計を作ると、パーソナルスケールで相対論的効果が見える
- 相対論はエンジニアリングの対象に
- 宇宙空間に持っていくにはまだ手間がかかり過ぎるので地上実験

どうやって時間を認識する？



- 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
- $\delta\nu/\nu = \delta t/t = 10^{-18}$ なら、 $\delta t/t = 1$ 秒/300億年、つまり300億年(宇宙の年齢137億年)で1秒の誤差の時計作りを目指そう!

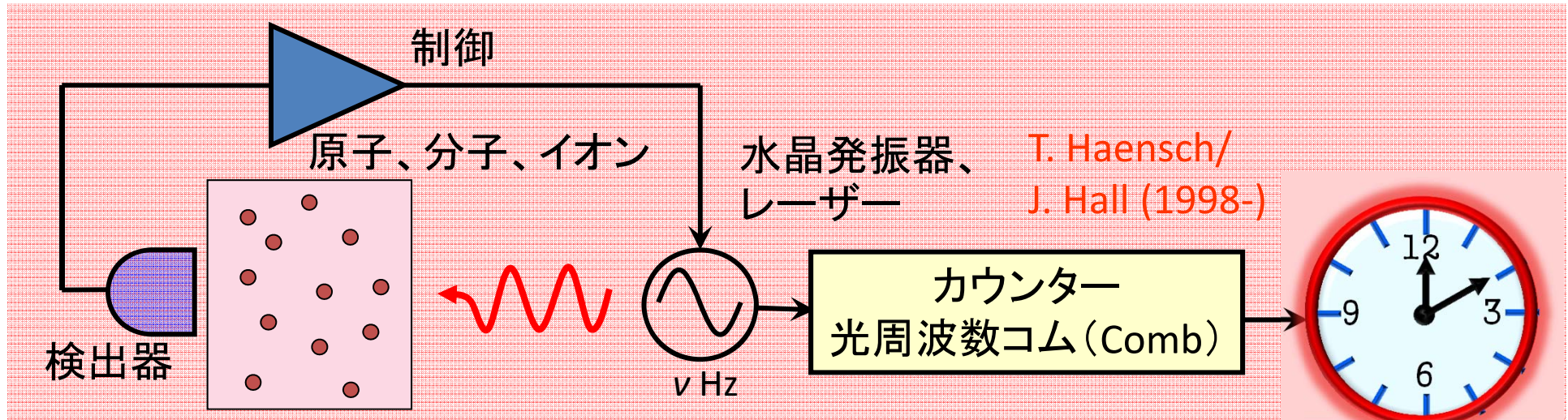
1秒の定義の変遷



原子時計研究はなぜ面白い？

- 原子時計の精度
 - あらゆる物理計測の中で桁違いの高精度を誇る
 - 精密計測・原子分光技術の**ベンチマークテスト**
 - スーパーカー、スパコン、スパークライダー、...、**スパクロ**...
- **量子のルール**だけで性能を競う(測定器の雑音を混入させない工夫)
- 極限的な精度で**物理の根幹**に迫る
- 工学的にもきっと役立つ
 - 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

時計 = 発振器 ($\nu=1/T$) + カウンター



- 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: 物理定数は定数と信じれば...
- 「量子の振動子」=「原子」の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？

いい原子時計を作る戦略

原子の振りの相対的な周波数揺らぎ $\delta\nu/\nu_0$ が指標

→ 測定の不確かさ $\delta\nu \approx 10^{-3}-10^{-5}$ Hzが同程度なら、周波数 ν_0 が高いほど有利。光原子時計 ($\nu_0 \approx 10^{15}$ Hz) はマイクロ波のCs時計 ($\nu_0 \approx 10^{10}$ Hz)より圧倒的に有利

正確さ (Accuracy)

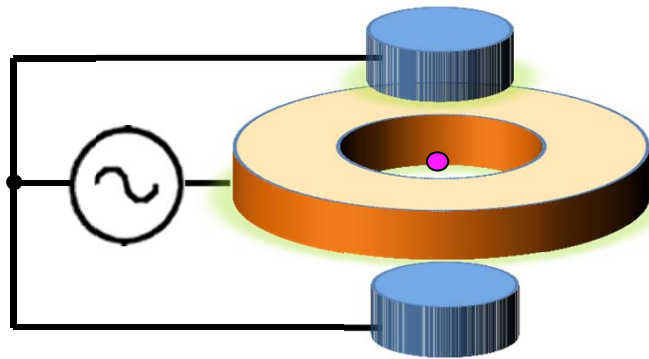
- 原子固有の遷移周波数からのずれの小ささ(ドップラー効果、電磁場の影響をなくす...)
- 原子時計の設計 = 電磁場がゼロの環境整備

安定度 (Stability)

- どれだけ早く、中心値を狙えるか？
- 量子雑音が分光分解能 $\delta\nu = \frac{1/T}{\sqrt{N}}$ を制限 (N : のべ観測原子数)
- 原子時計の安定度: $\frac{\delta\nu}{\nu_0} \approx \frac{1/T}{\nu_0\sqrt{N}}$
 - 測定原子数 N の平方根でしか向上しない
 - 長時間の測定が必要

単一イオンを電場のポールト

- 1950年代W. ポールが考案
- 1980年代H. デーメルを使う原子時計を提案
- 1989年、ポール、デー物理学賞
- 次世代原子時計の決



The Nobel Prize in Physics 1989

"for the invention of the separated

"for the development of the ion trap technique"



The Nobel Prize in Physics 2012
Serge Haroche, David J. Wineland

The Nobel Prize in Physics 2012

Serge Haroche

David J. Wineland



Photo: © CNRS
Photothèque/Christophe
Lebedinsky

Serge Haroche

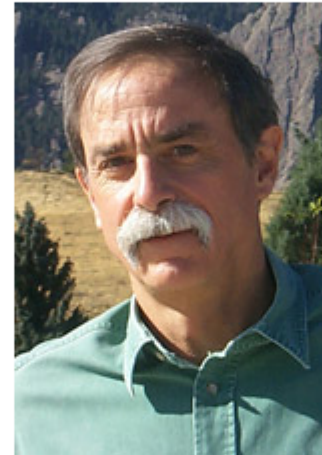


Photo: © NIST

David J. Wineland

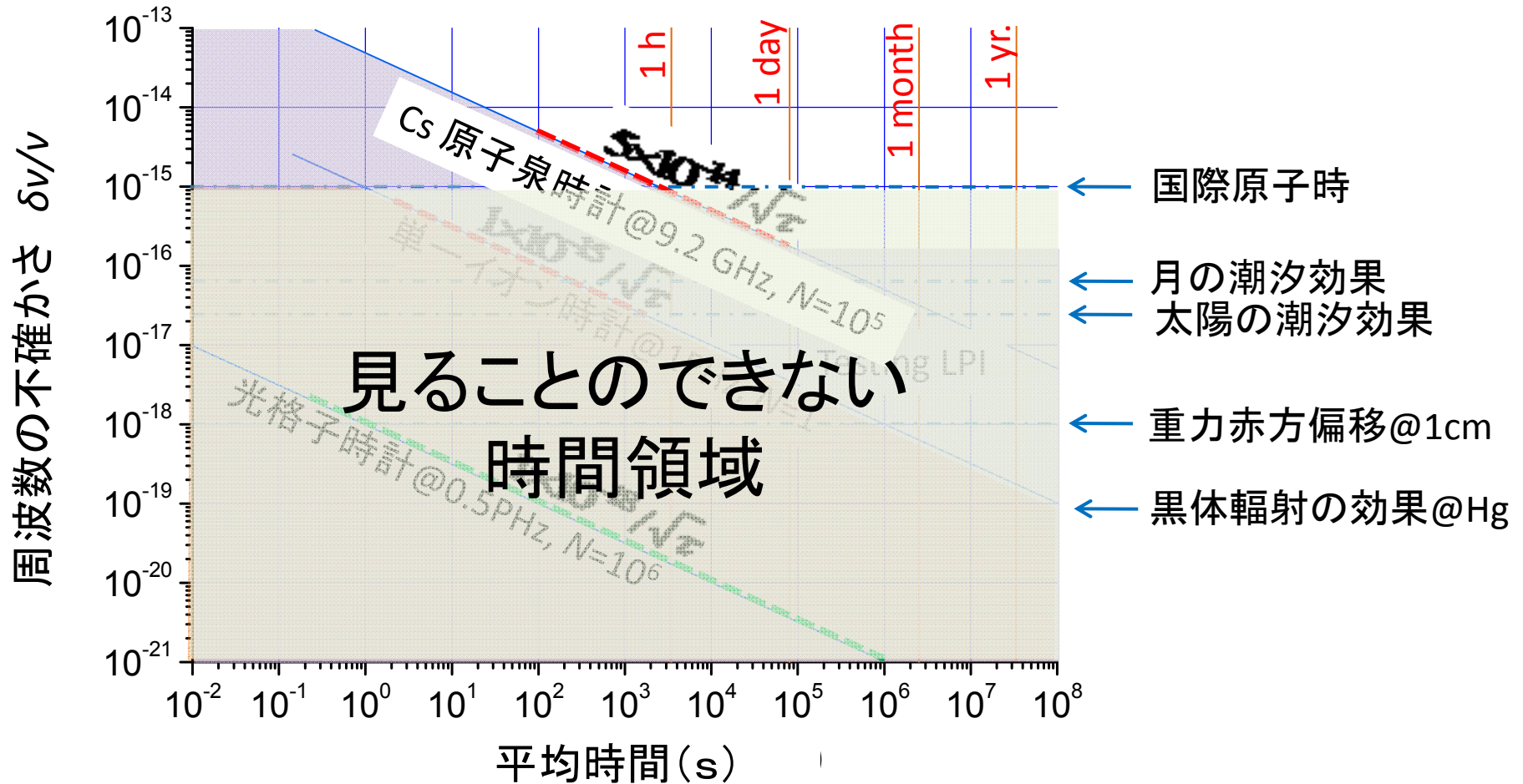
The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland "for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

見えなかった時間領域に光をあてる！

原子時計の安定度の量子限界

$$\frac{\delta\nu}{\nu_0} = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{n\tau}}$$

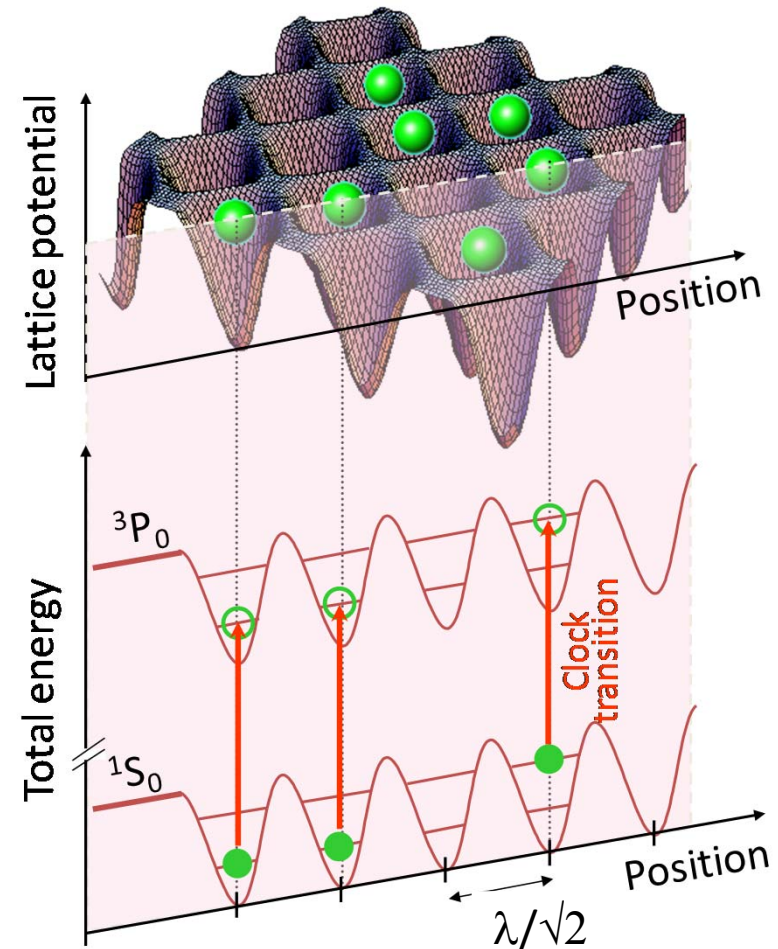
n : 1秒間に観測する原子数
 τ : 平均時間



発想の転換：摂動のエンジニアリング

- 伝統的な摂動除去の原則
 - 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作ろう！
 - 個々の原子運動の精密制御
 - 容器が原子の振子の振動を変えないように
 - “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)



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！

(1次元)光格子時計の実現(2005) LETTERS

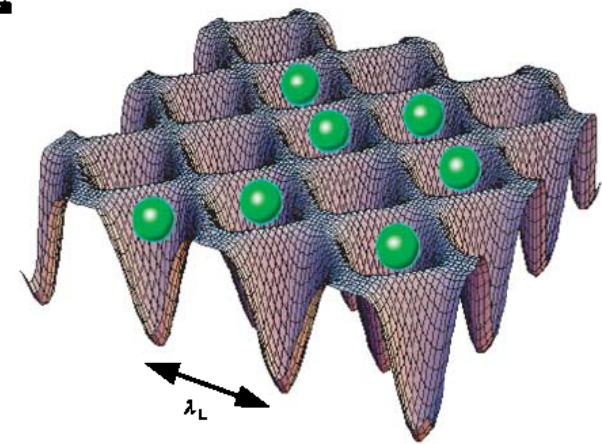
An optical lattice clock

Masao Takamoto¹, Feng-Lei Hong³, Ryoichi Higashi¹ & Hidetoshi Katori^{1,2}

nd frequency is a prerequisite also for technologies that networks and navigation with the SI second is currently of Cs atoms with a fractional the optical frequency comb erent link between optical have attracted increasing ks with superior precision. racold neutral atoms in free mance that is approaching Here we report a different an optical lattice serve as ce clock^{9,10} demonstrates a 'ower than that observed for stability is better than that frequency for the Sr lattice is determined by an optical econd.

can confine atoms in a submicrometre region, and its periodicity allows the production of billions of micro-traps in a volume of 1 mm³. 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^{16,17}. The transition frequency ν



servation of a narrow atomic cy ν_0 that is insensitive to ossible degree. An indicator stability, which is minimized $Q = \nu_0/\Delta\nu$ transition. The an deviation¹²

$$\sqrt{N\tau} \quad (1)$$

(2005年5月19日, 朝日新聞・朝刊)

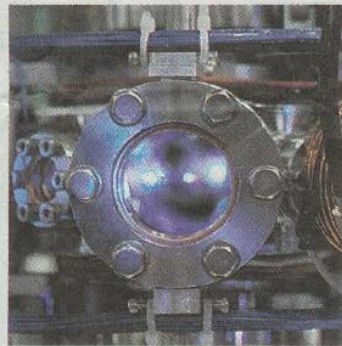
超高精度の時計 基礎実験に成功

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

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

東大の香取秀俊・助教は、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分の1程度の精度だが、香取助教は「より安定したレーザーを使えば、理論通りの精度が達成できる」と話す。



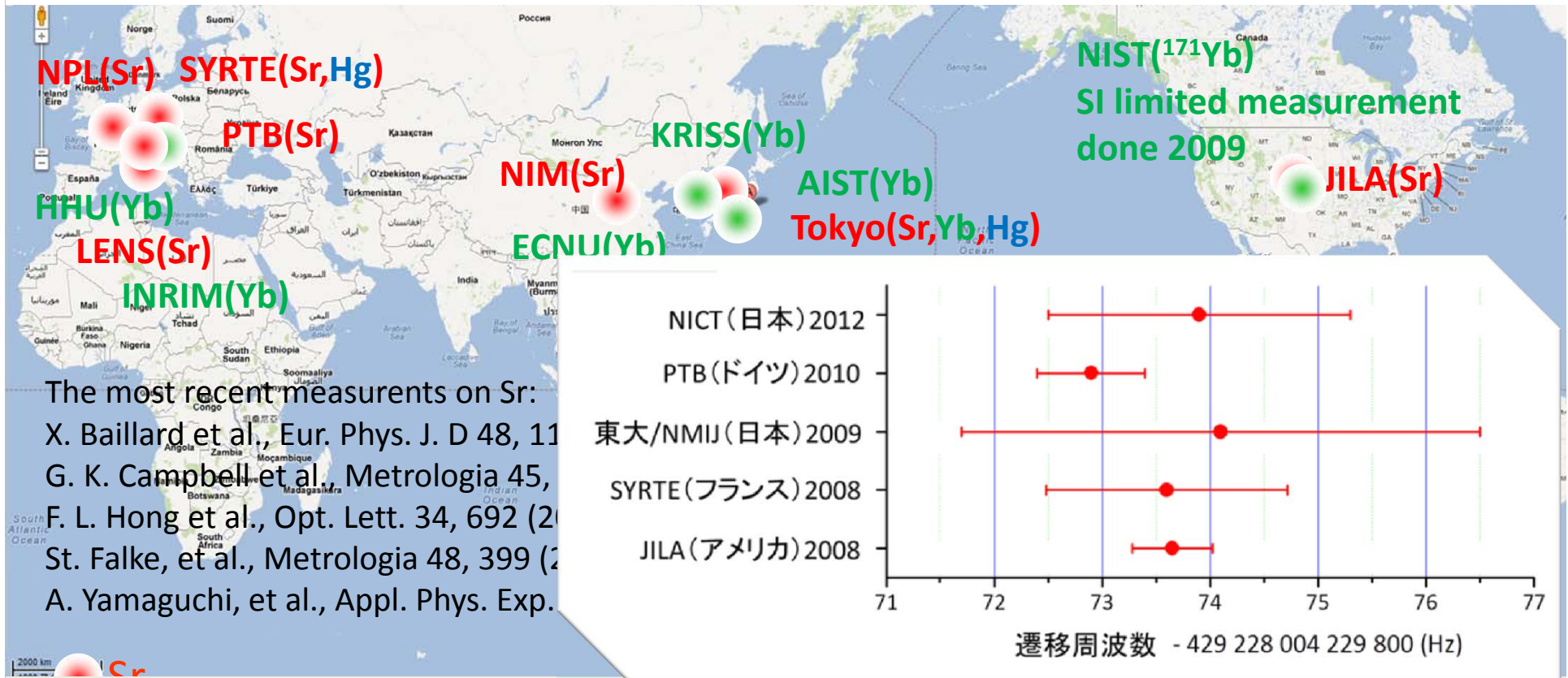
中央の小さな青い点が、極低温のストロンチウム原子を利用した光格子時計の心臓部=17日、東大工学部で

原子時計の精度を一気に千倍も引き上げる(ことが)できる「光格子時計」の基礎実験に東大と産業技術総合研究所・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。

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。これに光を当て、原子が吸収する光の振動数を数えて時計として使えることを確かめた。試作したのは現在最高精度の原子時計の10分の1程度の精度だが、香取助教は「より安定したレーザーを使えば、理論通りの精度が達成できる」と話す。

これほど精度が高いと「運動する時計は時間の進み方が変わる」というアインシュタインの相対性理論の効果も検出可能。「光時計を持つて歩けば、止まっている時計との比較で遅れがわかるはず」と香取助教。

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)

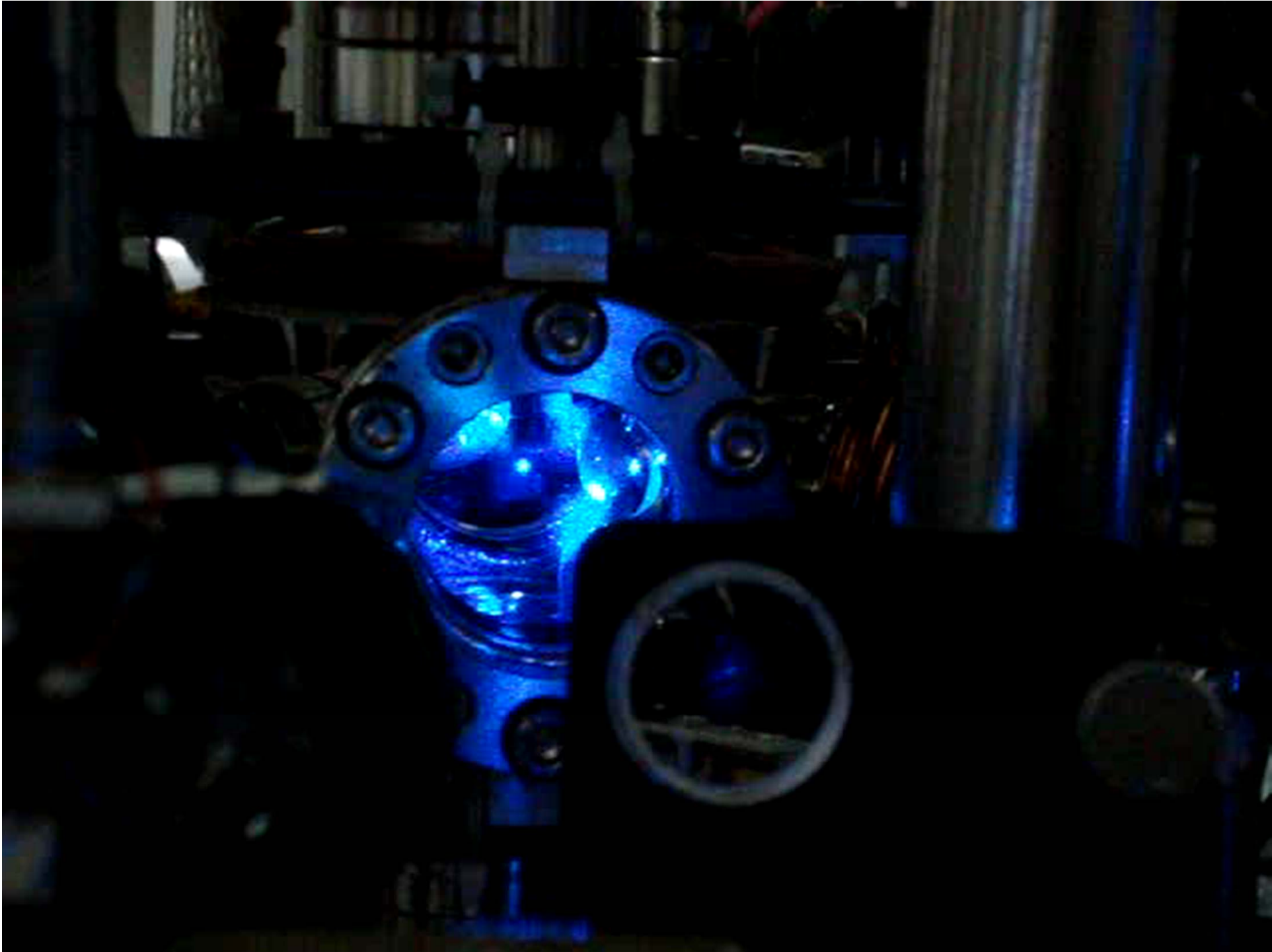


国際度量衡委員会 (2012.10)勧告値

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

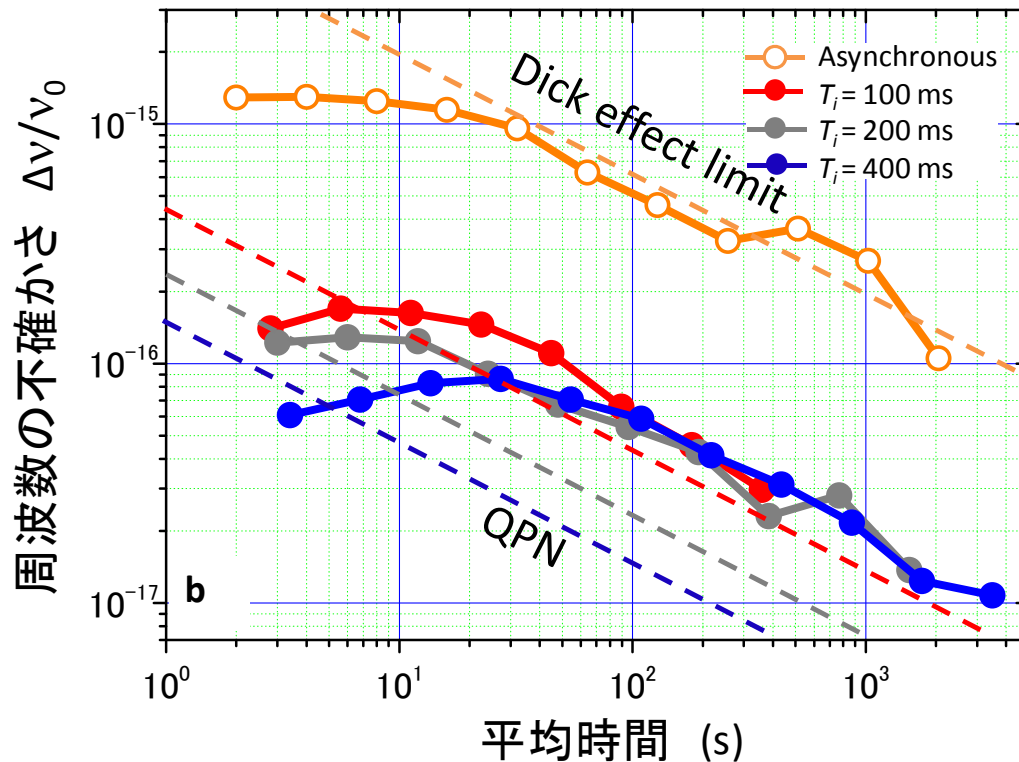
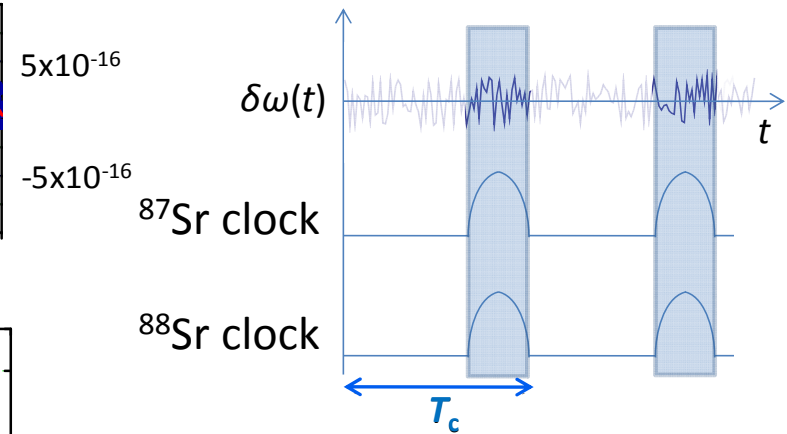
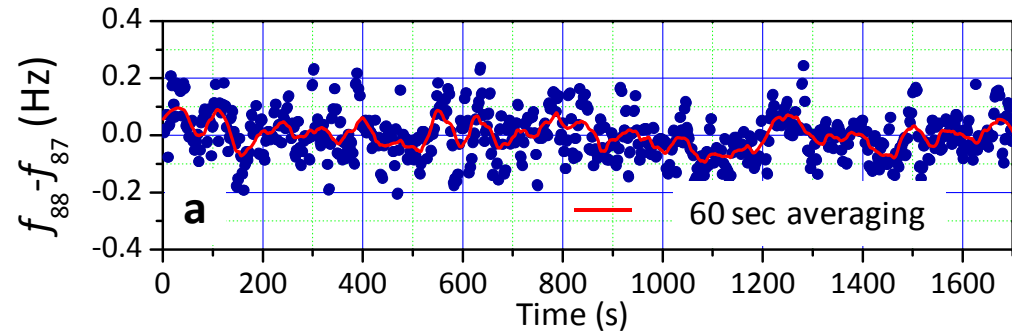
相対的不確かさ 1×10^{-15} → SI秒の不確かさと等価。

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！



2台の光格子時計 (^{87}Sr - ^{88}Sr) の同期比較

—光格子時計は光格子時計でないと評価できない—



光時計で $N \approx 1,000$ 原子の量子限界を初めて達成。

- ← 月や太陽の潮汐効果
- ← 0.3Kの黒体輻射シフト
- ← 10 cm の高度差の重力シフト

M. Takamoto, T. Takano, & H. Katori, Nature Photon. 5, 288 (2011).

重力が強いと時間はゆっくり進む

アインシュタインの一般性相対論の予言

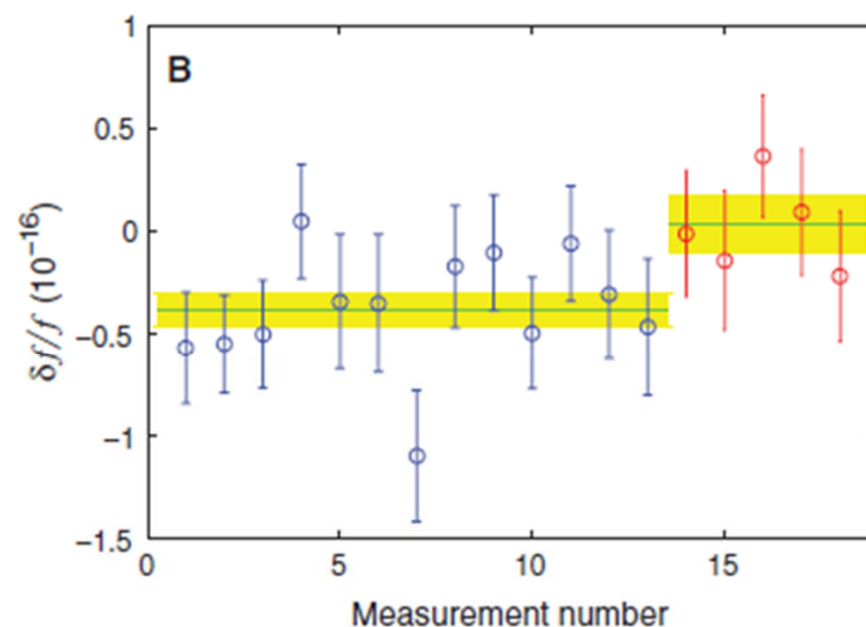
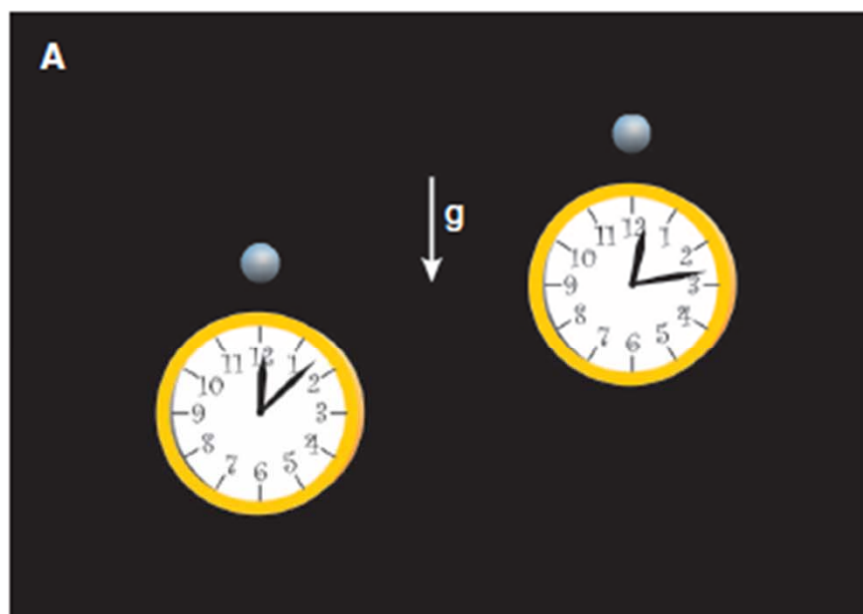
- ハーバードタワー実験(1960年): $\Delta h=22.6\text{m}$ で 2×10^{-15} を検証
- **単一イオン時計(2010年): $\Delta h=30\text{cm}$ で 3×10^{-17} を検証(1日積算)**

1630

24 SEPTEMBER 2010 VOL 329 SCIENCE

Optical Clocks and Relativity

C. W. Chou,* D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland



時計をつなぐと新しい物理が見えてくる

- ジオイドの探索
- 原子の時間は普遍なのか？
物理定数の恒常性？

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

物理定数と重力の結合？

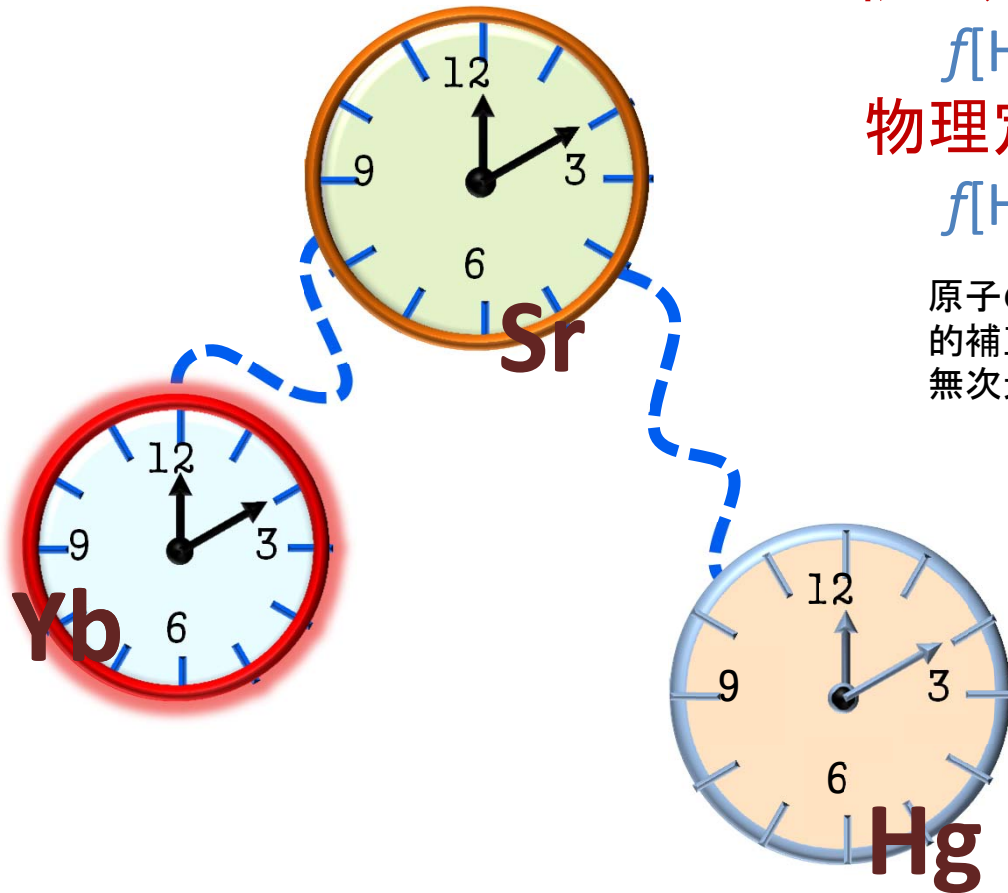
$$f[\text{Hg}(\alpha(U_g))]/f[\text{Sr}(\alpha(U_g))]$$

原子の中における電子の軌道エネルギーの相対論的補正に現れる。電磁相互作用の結合定数を表す無次元の定数。

電磁相互作用の強さ

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137.036}$$

光速(相対論的定数)
プランク定数
(量子論的定数)



New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using ⁸⁷Sr Optical Lattice Clocks

$$\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar c$$

S. Blatt,* A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen,† T. Zelevinsky,‡ M. M. Boyd, and J. Ye

$$\text{Al}^+/\text{Hg}^+ : \dot{\alpha} / \alpha < (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17} / \text{yr.}$$

物理定数は経時変化しているのか?
物理定数は重力と結合しているのか?

JILA, National Institute of Standards and Technology and University of Colorado,
Department of Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado, 80599-0440, U.S.A.
X. Baillard, M. Fouché,§ B. Le Targat, A. Brusch,|| and P. Lemonde
SYRTE, Observatoire de Paris, Avenue de l'Observatoire 75014, Paris, France

M. Takamoto, F.-L. Hong,¶ and H. Katori

Department of Applied Physics, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku,

V. V. Flambaum

School of Physics, The University of New South Wales, Sydney, New South Wales 2052,

$$\begin{aligned} f_{\text{Sr}} &= F[\alpha], \\ f_{\text{Cs}} &= G[\alpha], \\ f_{\text{Sr}}/f_{\text{Cs}} &= H[\alpha] \end{aligned} \quad]? \quad]?$$

地球の楕円・公転軌道を、太陽重力ポテンシャルの変調器として用い、Sr光格子時計/Cs時計(TAI)の周波数比を3年間測定しLPIを検証。不確かさの範囲では、結合はない。

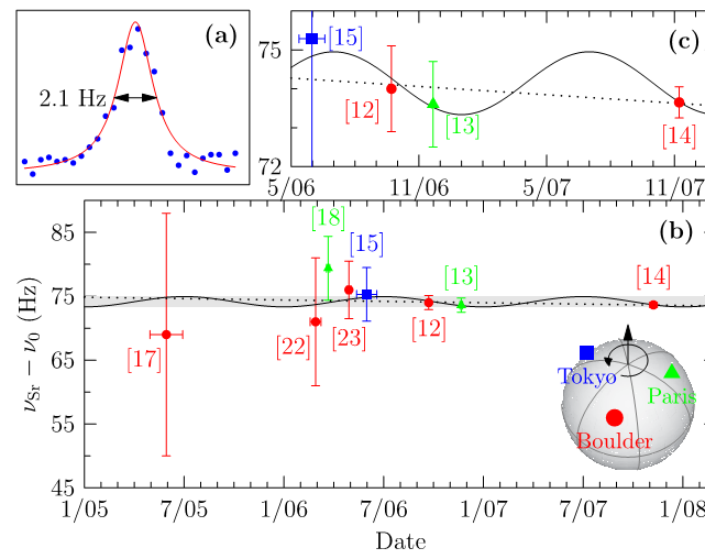
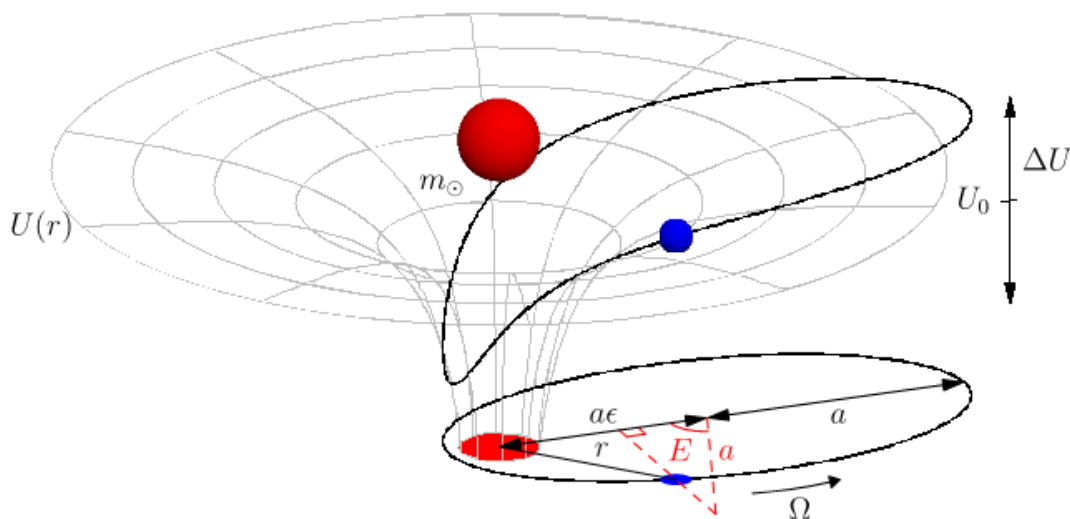
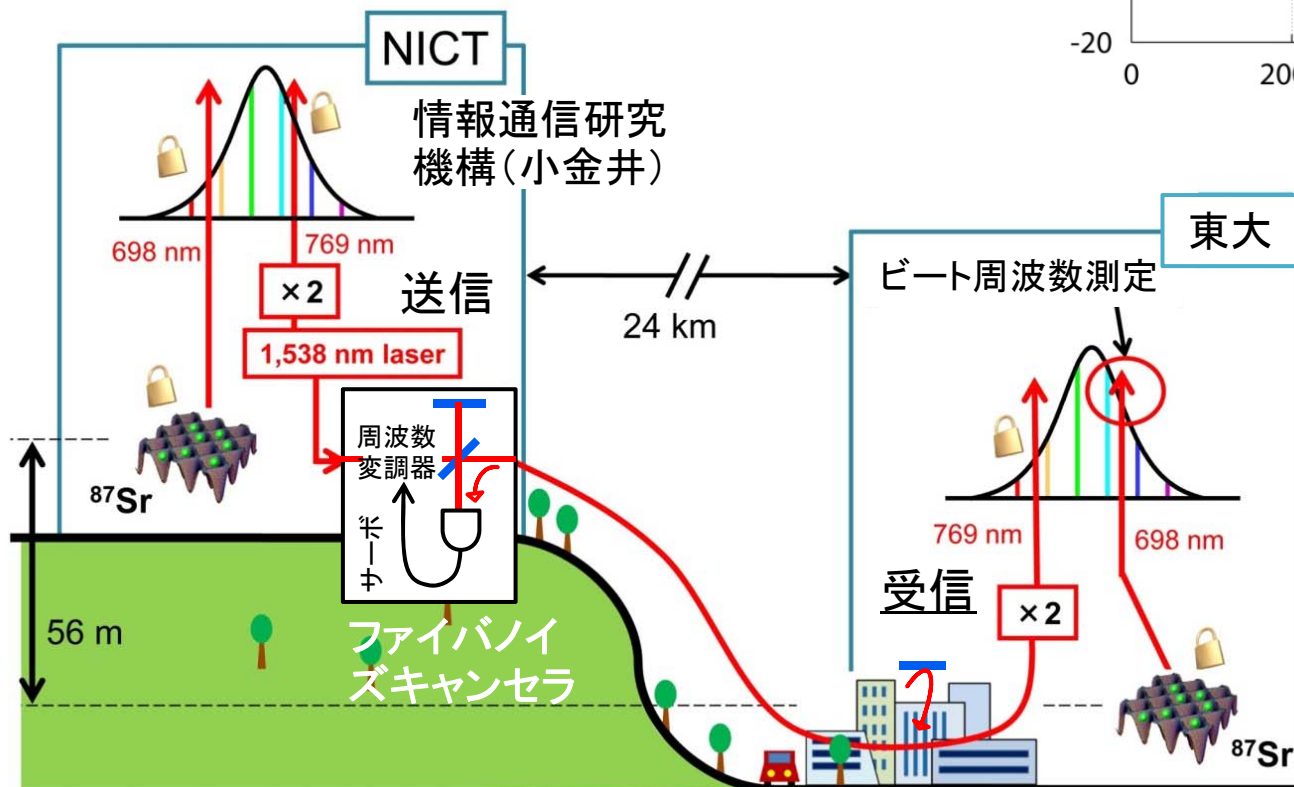
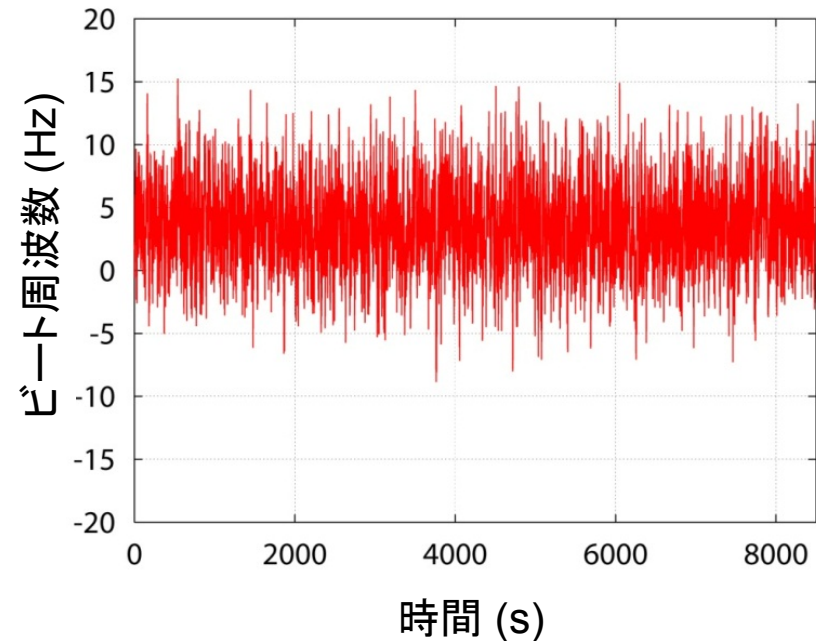


FIG. 1 (color online). (a) Spectrum of the ⁸⁷Sr ¹S₀-³P₀ clock transition with quality factor 2 × 10¹⁴. (b) Measurements of the clock transition from JILA (circle), SYRTE (triangle), and U. Tokyo (square) over the last 3 years. Frequency data are shown relative to ν₀ = 429 228 004 229 800 Hz. Weighted linear (dotted line) and sinusoidal (solid line) fits determine a yearly drift rate and an amplitude of annual variation. (c) Zoom into the four most recent measurements, showing agreement within 1.7 Hz and determining both drift and annual variation.

遠隔地間の時計比較

- 重力シフト (2.6Hz) の実時間測定
 - SI秒を介さない2機関の光格子時計の直接比較
- $$\frac{\nu_{\text{NICT}} - \nu_{\text{UT}}}{\nu_0} = 0.9(7.3) \times 10^{-16}$$



Yamaguchi, A., Fujieda, M., Kumagai, M., Hachisu, H., Nagano, S., Li, Y., Ido, T., Takano, T., Takamoto, M., & Katori, H., Appl. Phys. Exp. 4, 082203 (2011).

東京圏で光格子時計のネットワークを作る



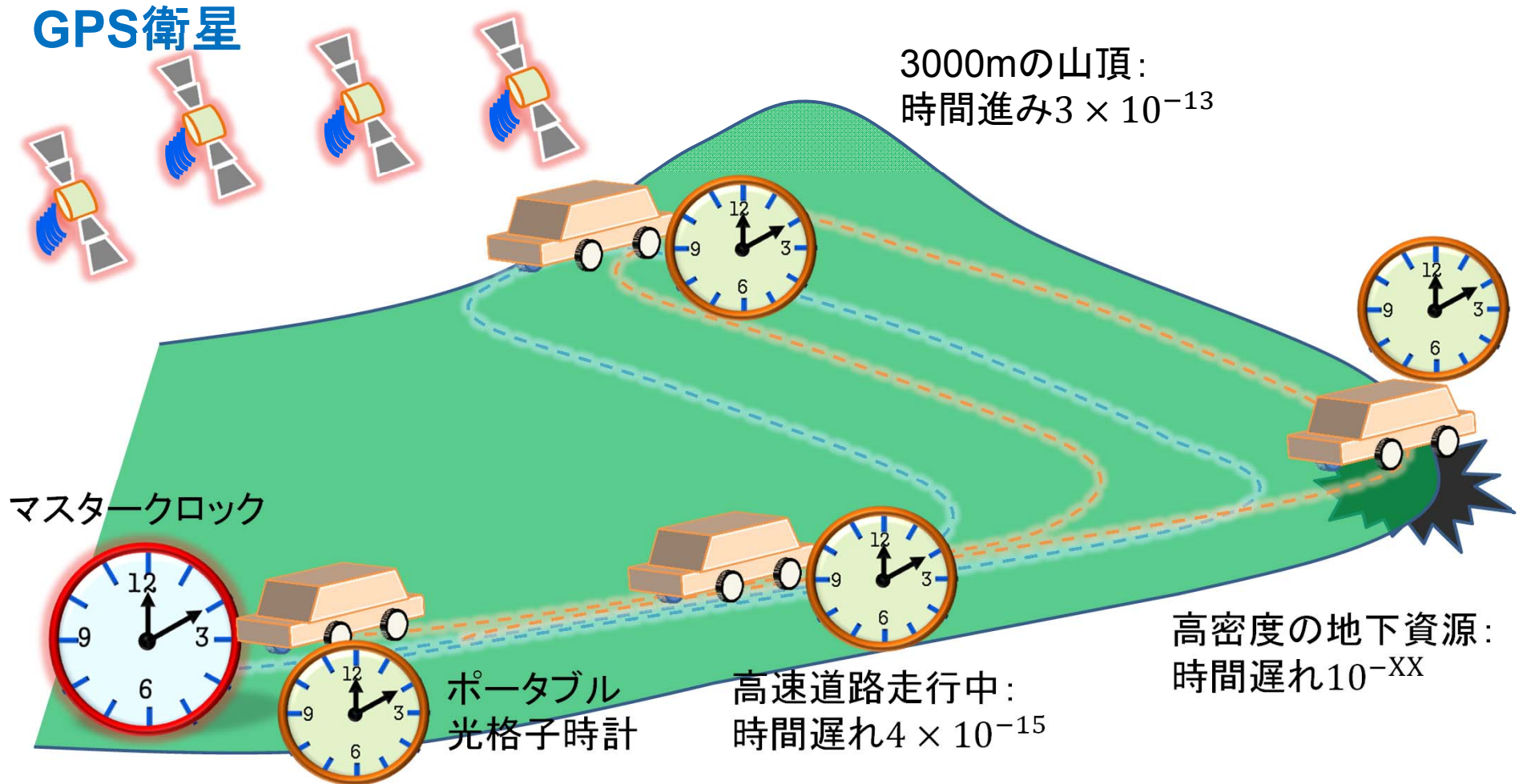
重力シフトを使って測地学

ジオイド: 重力の等ポテンシャル面、日本では東京湾の平均海面で定義

$$\Delta f/f = g\Delta H/c^2$$

- ジオイド高は30-50 cm, or $3-5 \times 10^{-17}$ の不確かさでマッピングされている
- 時計の高精度比較はジオイド高の測定に他ならない
- 地球は柔らかすぎて、長距離にわたっての正確な時間の共有は難しい
- 時計は、ジオイド高のセンサーになる: 資源探索、地殻の変動...

ポータブルクロック: 相対論的カーナビによる重力ポテンシャルマッピング・資源探索へ



- 経路を一周して帰還した時計とマスタークロックの時刻比較→経路に応じた時間遅れ
- グーグルカーのように地域の巡回を繰り返せば、重力ポテンシャルマッピングが可能
- マスタークロックとの位相差(時間差)から、空間的な重力分布の情報を引き出す

正確過ぎて正確でなくなる新しい時間の概念を探したい

Yb

光格子時計は「魔法波長」の導入して、
多数原子の同時観測で高速な時間計測を実現
— 相対論的時空間がパーソナルスケールに
— 物理定数は定数なのか？

Sr

「記憶の固執」に登場する「やわらかい時計」の工学的応用

Hg

科学・技術の新しいプローブで自然の声を聴く
望遠鏡、顕微鏡、加速器、...、原子時計
今まで見えなかった時間の隙間に何があるか？