

日本学術会議公開シンポジウム

「新しい国際単位系(SI)重さ、電気、温度、そして時間の計測と私たちの暮らし」

日本学術会議講堂、平成30年12月2日(日)

新しい時間をつくる、使う —光格子時計—

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

現代人は原子時計のヘビーユーザー

- アインシュタインの相対論、光速は一定(1905)
- 光速 $c = 299792458 \text{ m/s}$ を定義にしたら、長さ計測 $l = ct$ は、時間計測に置き換わった
- 4台以上の測位衛星GNSS (Global Navigation Satellite System)との時間差が分かれば、位置と時刻(x, y, z, t)が分かる

(X_1, Y_1, Z_1, T_1)

(X_3, Y_3, Z_3, T_3)

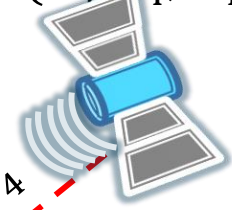
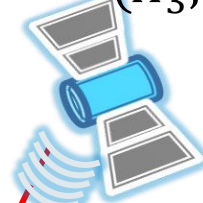
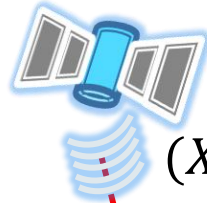
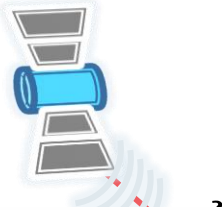
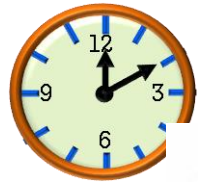
(X_4, Y_4, Z_4, T_4)

(X_2, Y_2, Z_2, T_2)

$r_2 = ct_2$

$r_3 = ct_3$

$r_4 = ct_4$



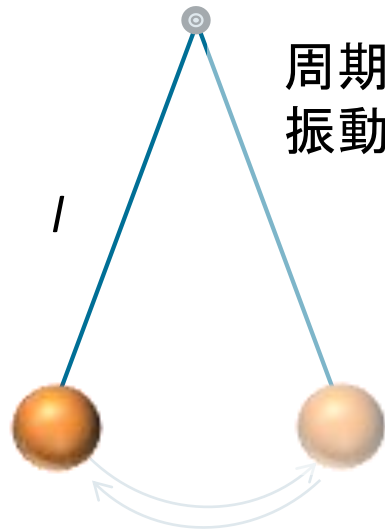
Satellite
with atom
clocks



電波時計

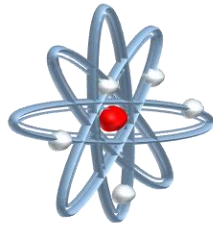


どうやって時間を認識する？

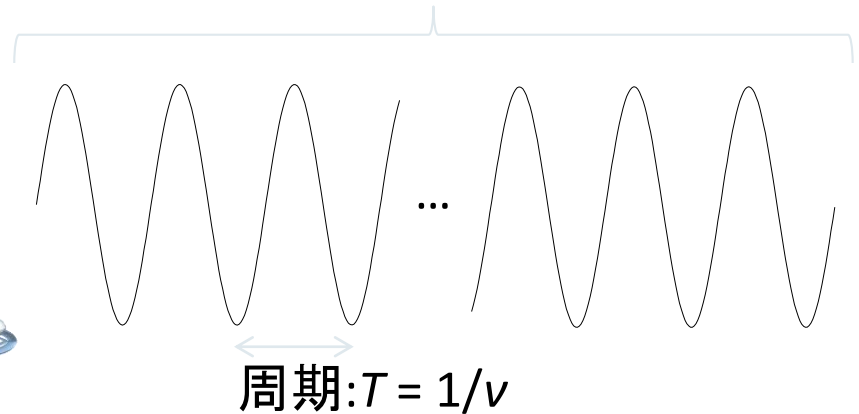


周期: $T=2\pi\sqrt{l/g}$
振動数: $\nu=1/T$

^{133}Cs 原子



$\nu = 9\,192\,631\,770$ 回振動すると1秒



- 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: $\delta t/t = \delta T/T = \delta\nu/\nu$
- 精度の高い時計を作るには、いい時計の振り子を見つけて、正確に測るのが大事

時計の精度の表現

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

(高精度なクォーツ腕時計)

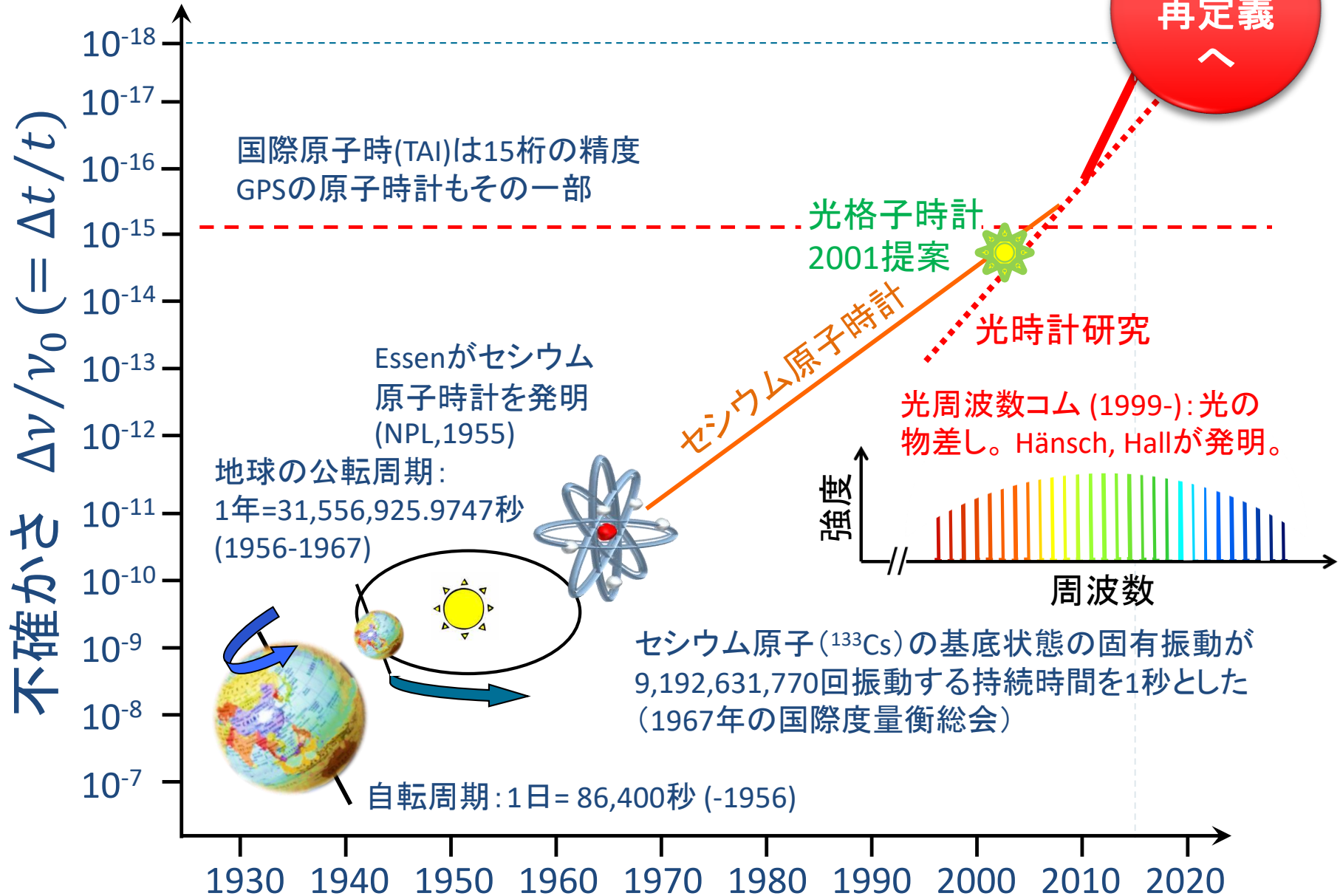
$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{1 \text{ s}}{6000 \text{ 万年}} \approx 5 \times 10^{-16}$$

(国際原子時、セシウム原子時計)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{1 \text{ s}}{2 \times 138 \text{ 億年}} \approx 1 \times 10^{-18}$$

(光格子時計)

我々は歴史的な「原子時計の精度革命」に立ち会っている！



- 測位衛星の利用で、原子時計は日常で不可欠な道具になった
- さらに、3桁精度が向上すると何ができるだろうか？
- 不連続な精度向上がもたらす、不連続な未来を考えよう

ナトリウム？

ストロンチウム？

バリウム・銅？

???

炎色反応・原子のスペクトル

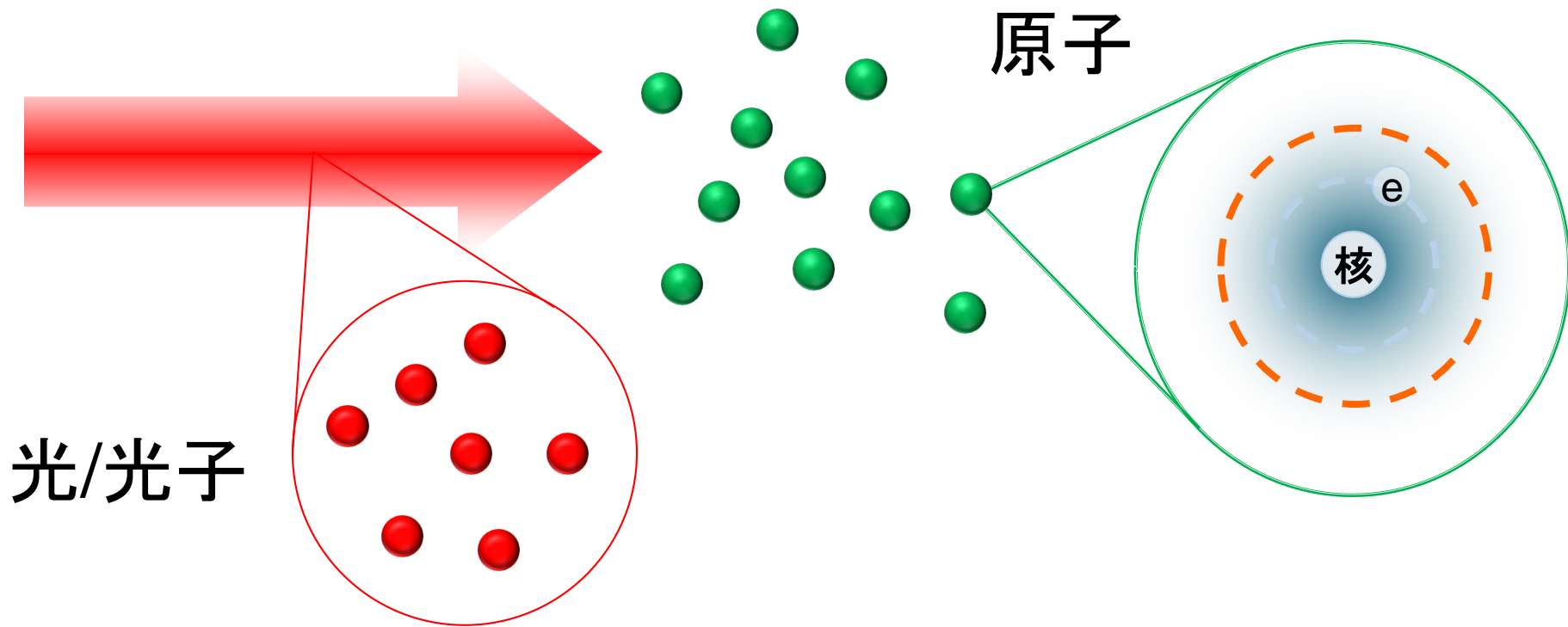
赤い光：1秒間に450,000,000,000,000 (4百兆) 回光の波が振動する

光原子時計を作る

花火の色は原子の色 (= 光波の振動数)

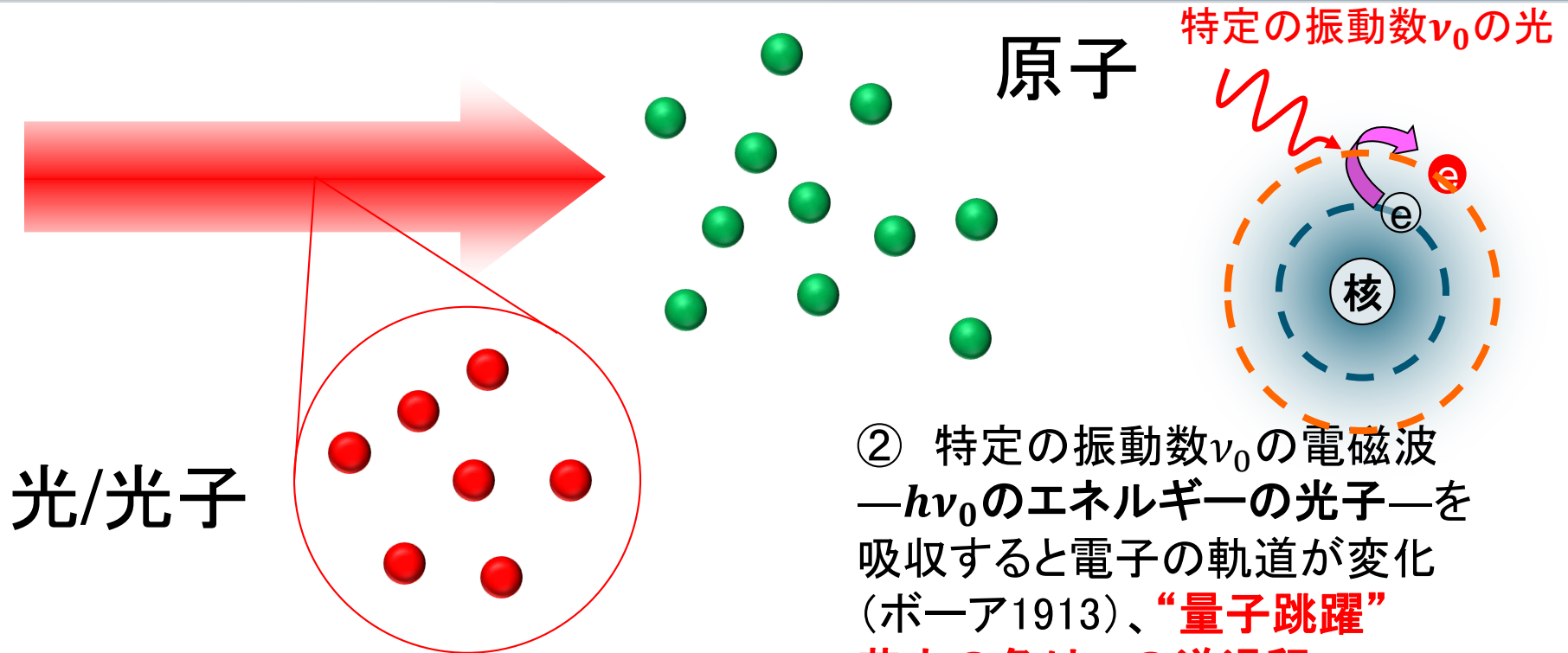
原子の振り子を正確に数えて時間を測る

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)

量子の世界：光と原子、波動性・粒子性、原子時計



光/光子

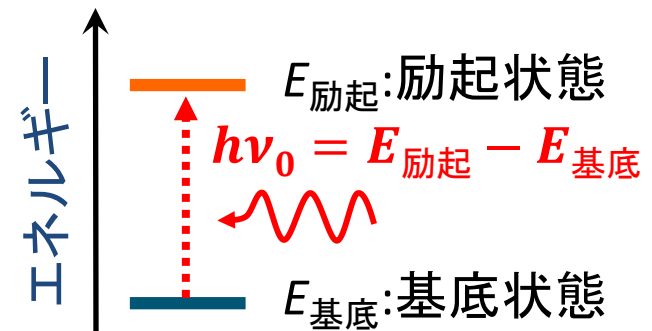
原子

特定の振動数 ν_0 の光

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)

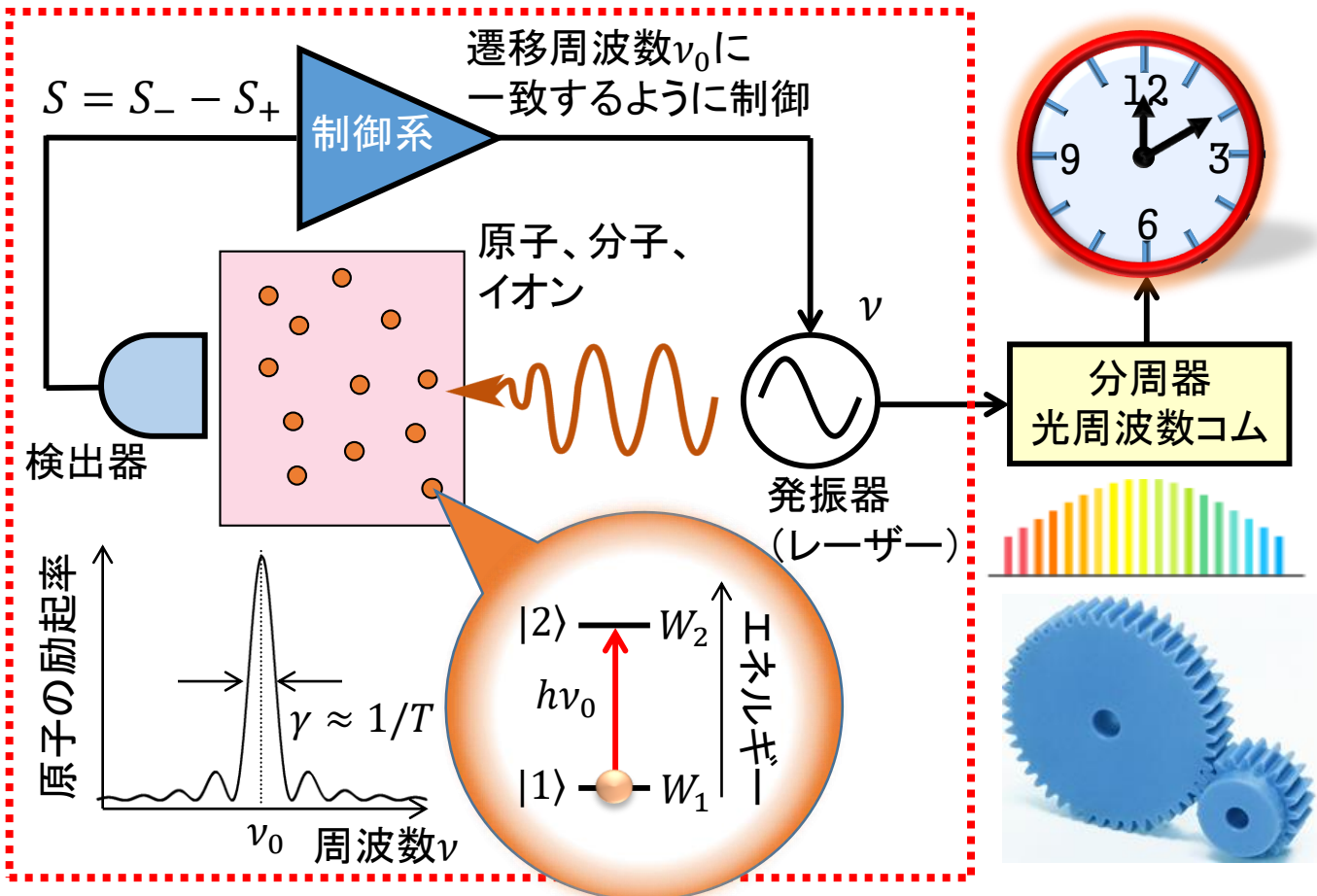
③ 原子時計ではこの原子の「振り子の振動数」 ν_0 を正確に測定、振動数の基準とする

② 特定の振動数 ν_0 の電磁波— $h\nu_0$ のエネルギーの光子—を吸収すると電子の軌道が変化(ボーア1913)、“量子跳躍”
花火の色はこの逆過程



原子のミクロな振動をマクロな発振器にコピーする

物理定数が定数
と信じれば、
原子時計は普遍
な1秒を刻むはず



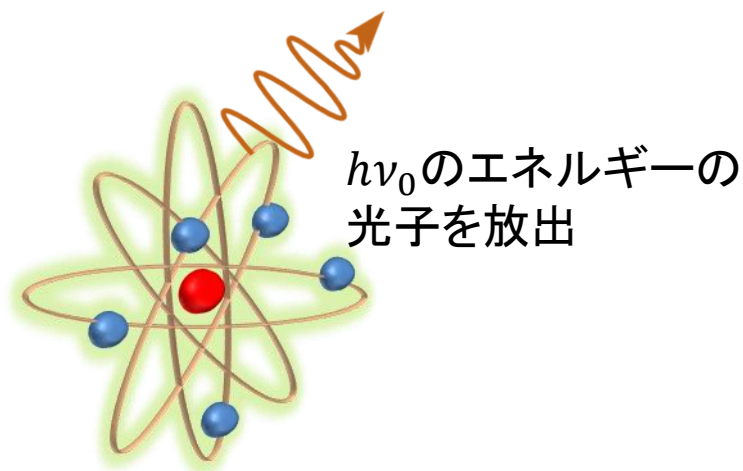
- いい時計を作ることは、いい発振器を作ること
- 「原子の固有振動」を読み出してマクロな発振器にコピーする→原子時計
- たくさんの原子を、原子の振り子の振動数を変えないように掴む。
- 研究の大前提(物理定数は普遍)は本当か？

時計はマクロとミクロの世界が出会うところ

マクロな水晶振動子の振動

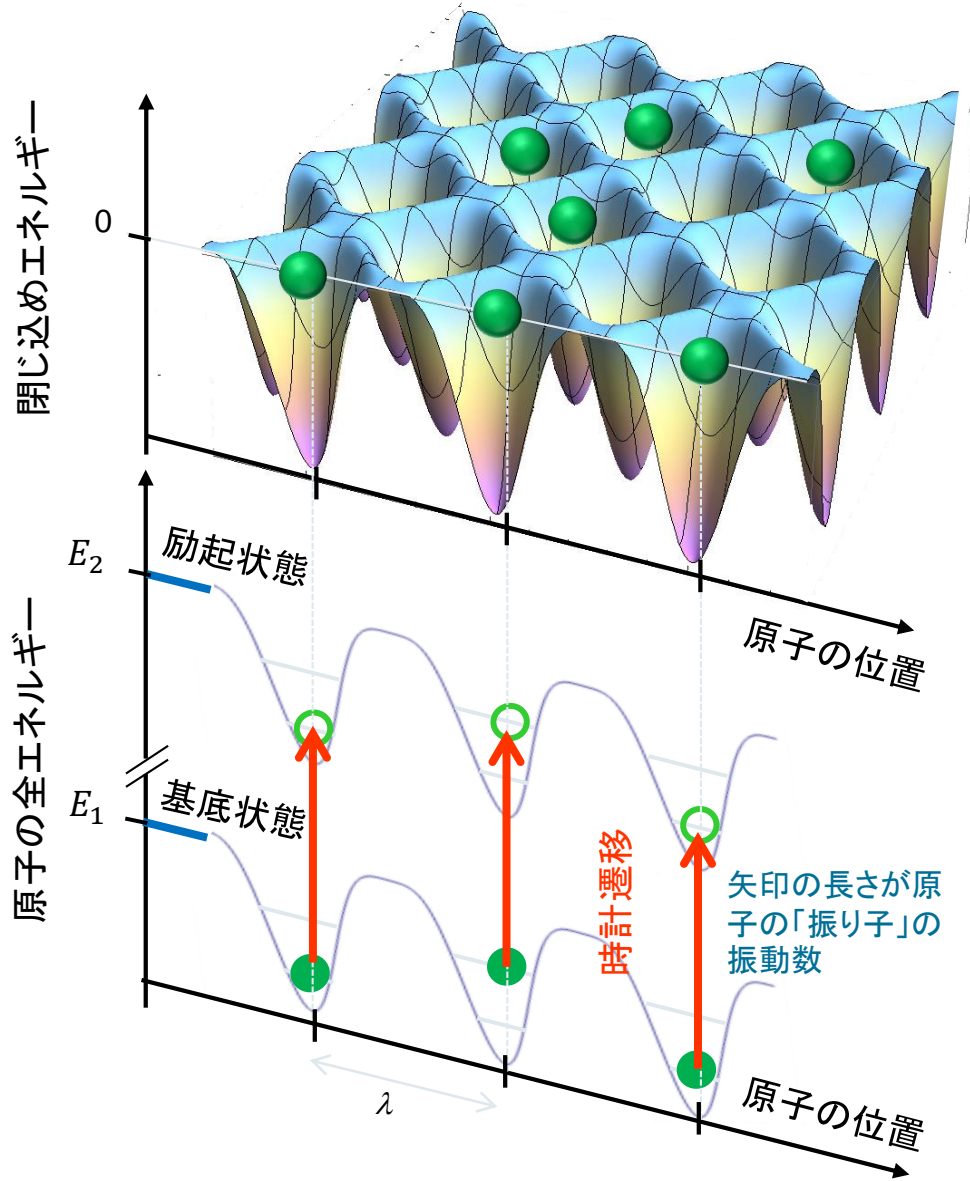


ミクロな量子(原子)の振動



- ミクロでも、マクロでも、振動は同じ
- ミクロな振動をそっくりマクロな振動にコピーするのが原子時計
- 時計の研究では、ミクロな「量子の世界」をマクロな世界に直接つなげて、ミクロな世界を調べられる

光格子時計：奇想天外な企て



- 光で「原子の魔法の箱」を作って、「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
- ドップラー効果をゼロに
 - 多数個の原子を同時に観測
 - 高精度原子時計実現の突破口

2001年、香取、Frequency Standards and Metrology Symposium (原子時計の国際会議)

- 原子に余計なエネルギー変化を与えないように原子をつかむ：

$$h\nu = h\nu_0 - \frac{\alpha_e(\omega_m) - \alpha_g(\omega_m)}{2} E^2 + \text{高次項}$$
- 魔法周波数、magic frequency

$$\Delta\alpha(\omega_m) = \alpha_e(\omega_m) - \alpha_g(\omega_m) = 0$$
 高次項の影響：18桁目でしか現れない

(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}

超高精度の時計 基礎実験に成功

東大・産総研グループ

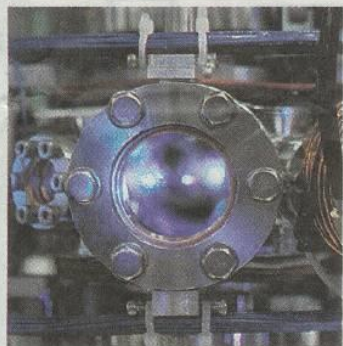
137億年前の宇宙誕生から誤差0.4秒

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

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

は「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」と香取助教は話す。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」と香取助教は話す。

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。



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

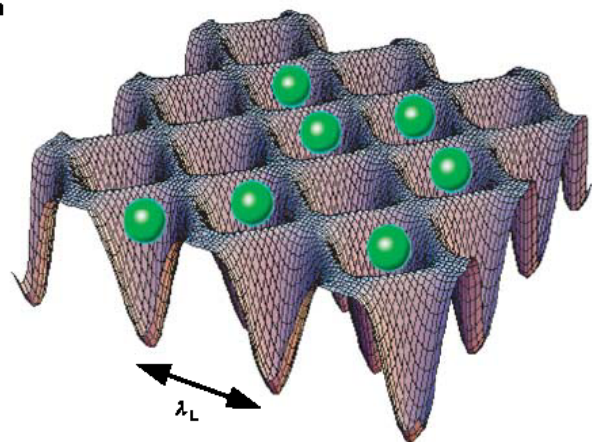
nd frequency is a prerequisite also for technologies that networks and navigation with the SI second is currently of Cs atoms with a fractional the optical frequency comb erent link between optical 4 have attracted increasing ks with superior precision. racold neutral atoms in free mance that is approaching Here we report a different n an optical lattice serve as ce clock^{9,10} demonstrates a r lower than that observed for s stability is better than that frequency for the Sr lattice is determined by an optical econd.

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

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

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



(2005年5月19日, 朝日新聞・朝刊)

100億年動かしても、生じる誤差はわずか1秒

セシウム原子時計より1000倍正確に時をさざむ究極の時計が開発中だ。この精度なら、一般相対論が予言するほんのわずかな「時間の進み方の差」まで検出することができる。将来、1秒の基準を決める時計になると期待されている。

時計の基本的なしくみは、「振り子」と「歯車」である。1秒間に決まった数だけゆれる振り子と、それをカウントする歯車があれば、時計は正確に1秒をさざむつづける。

現在、1秒の基準をつくりだしているのは「セシウム原子時計」だ。セシウム原子時計の「振り子」は、セシウム原子の状態を変化させること（励起）ができるマイクロ波である。このマイクロ波が91億9263万1770回振動する時間を1秒と定めている。しかし、セシウム原子時計には問題点がある。セシウム原子どうしが衝突することがあり、このとき原子の状態がかわってしまうため、励起に必要なマイクロ波の振動数（1秒あたりの振動回数）が、わずかがずれてしまうのだ。

東京大学大学院工学系研究科の香坂芳俊教授は、セシウム原子時計よりも正確な原子時計「光格子時計」の研究を進めている。光格子時計で使われるのはストロンチウム原子であり、マイクロ波より高い振動数をもつ可視光レーザーで励起される特徴をもつ。可視光の振動数は非常に高く、従来は計測できなかったが、2000年ごろに画期的な手法（光コム）が開発され、計測できるようになった。

光格子時計では、ストロンチウム原子を励起する可視光レーザーが429兆2280億422万9877回振動した時間を1秒とする。また、光でできた「那バック」（光格子、右上に図）にストロンチウム原子を1個ずつ入れてレーザーを当てるため、原子どうしは衝突しない。

光格子時計はセシウム原子時計より1000倍精度が高く、100億年に1秒しかずれない。この精度では、地上で時計を設置する高さが1センチちがうだけで、一般相対性理論の効果による時間の進み方の差が検出できる。

ニュートンから
転載

光共振器

半導体レーザーから送られてきたレーザーのゆらぎを取り除き、安定させる。ストロンチウム原子を励起するための時計レーザーとして使う。

半導体レーザー

電流を送ってレーザーをつくりだし、光共振器へ送る。

5. 時計レーザー

ストロンチウム原子を励起するためのレーザー。時計の振り子の役割。ほんの少しでも振動数がずれていたら励起できない。

4. 光格子

複数のレーザーを交差させると、エネルギーの高いところと低いところが格子状にできる。これを「光格子」という（右上にイラスト）。1マイクロKまで冷却されたストロンチウム原子は、光格子に捕獲される。

第1段階の冷却レーザー

光格子時計のしくみ(1~7)

右下にみえるオープンで固体のストロンチウムを加熱して気体にする(1)。気体のストロンチウム原子は「レーザー冷却」という特殊な方法で2段階で冷却され(2、3)、原子はほぼ静止する。冷却されたストロンチウム原子は、メインチャンバーの中で光格子に1個ずつ閉じこめられる(4)。そこへ、振り子の役割をする時計レーザーを当て(5)。その振動数が原子を励起する振動数になっているかを光検出器で観測する。わずかにずれていれば、時計レーザーの振動数をコンピューターで調整する(6)。ストロンチウム原子が励起されたときは、この時計レーザーの振動の回数を、光コムとよばれるカウンターで数える(7)。この時計レーザーが429兆2280億422万9877回振動する時間が1秒である。



7. 光コム (光振動数カウンター)

ストロンチウム原子を励起させることができたときの時計レーザーの振動数を正確に計測する。時計の歯車の役割。

6. 制御コンピューター

検出器からの情報を処理し、ストロンチウム原子を励起できるように、光共振器に時計レーザーを調整させる。励起できたら、そのときの時計レーザーを光コムに送る。

磁場の崩壊を行うためのコイル。光格子中のストロンチウム原子が地磁気などの影響を受けないようにする。

メインチャンバー

内部に設置されているミラーでレーザーを反射させ、立体的な光格子をつくる。円柱の直径は約20センチメートル。内部は超高真空に保っている。

真空ポンプ

1. オープン

内部は約500度Cに加熱され、固体のストロンチウムが気体になる。

ニクロム線

2. 第1段階の冷却レーザー (青)

気体のストロンチウム原子を冷却するレーザー（青色）。この段階で1ミリK（絶対温度0Kはマイナス273.15度C）まで冷却する。冷却されたストロンチウム原子は減速しながらメインチャンバーへ移動する。

3. 第2段階の冷却レーザー (赤)

第1段階で1ミリKまで冷却されたストロンチウム原子に、上下、左右、前後からレーザーを当てて、さらに1マイクロK（マイクロは100万分の1）まで冷却する。

光検出器

ストロンチウム原子が励起されたかどうかを観測する装置。

光格子
那バックのような形をしている。実際にこのような形が見えるのではなく、格子状なのでここでは、エネルギーの高低をあらわしている。数万個のストロンチウム原子が、エネルギーの低い、へこんだ部分に捕獲される。

ストロンチウム原子

励起された原子
適切な振動数の時計レーザーが高当たると、ストロンチウム原子は励起する。ここでは励起した原子を、色をかえて表現している。

時計レーザー

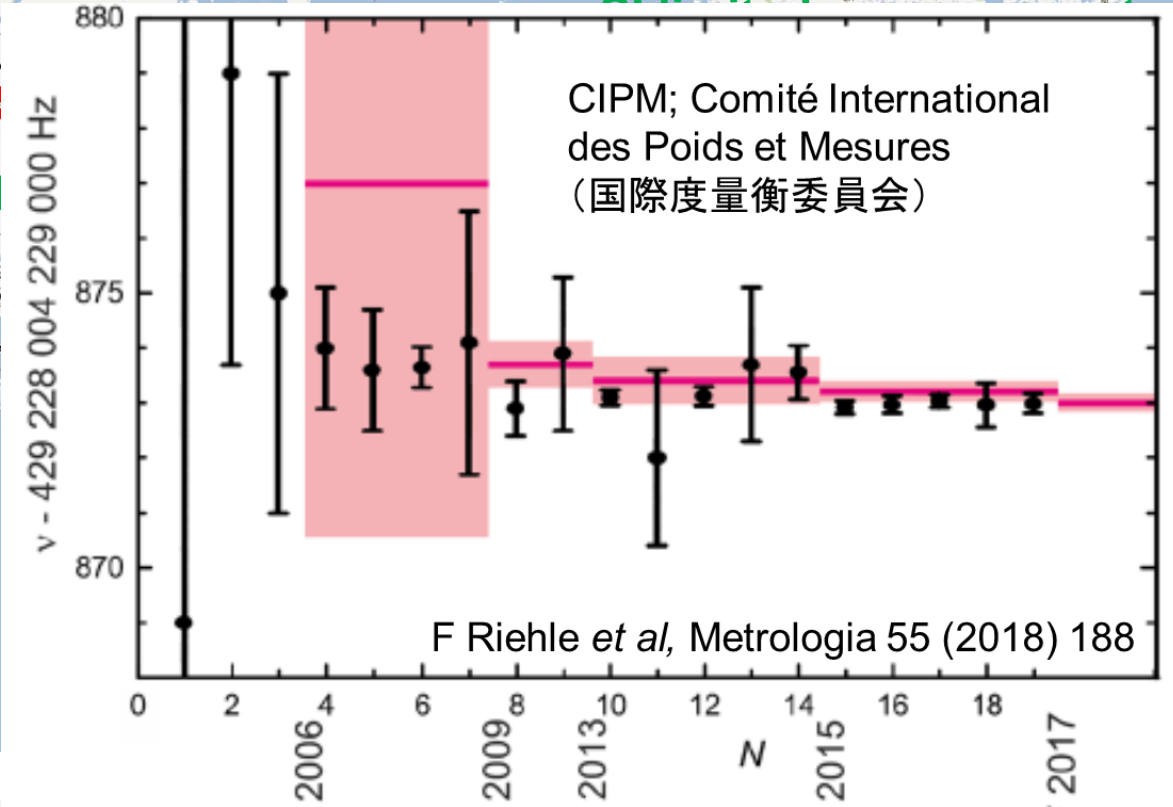
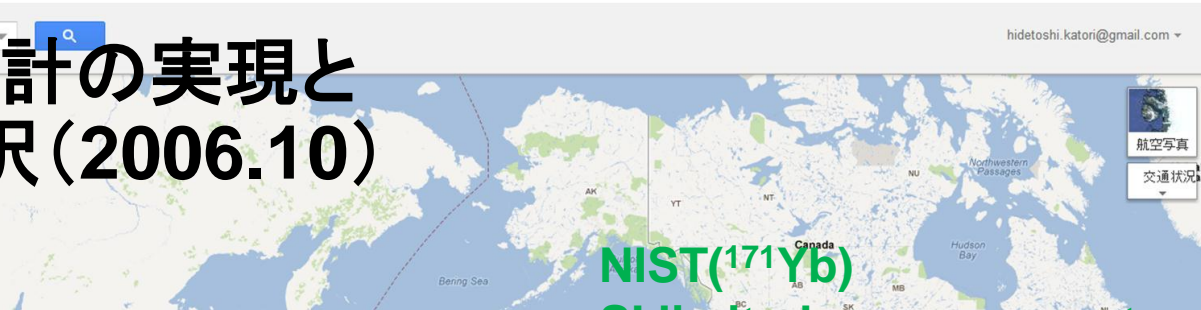
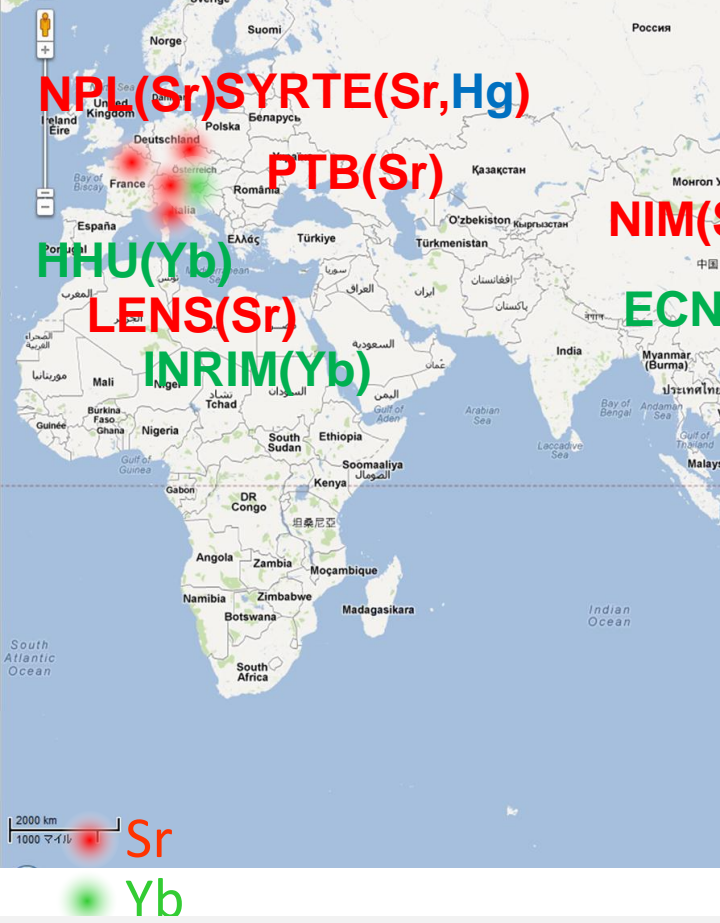
ストロンチウム原子が動く方向

時計レーザー



世界中での光時計の実現
秒の再定義の機運

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)

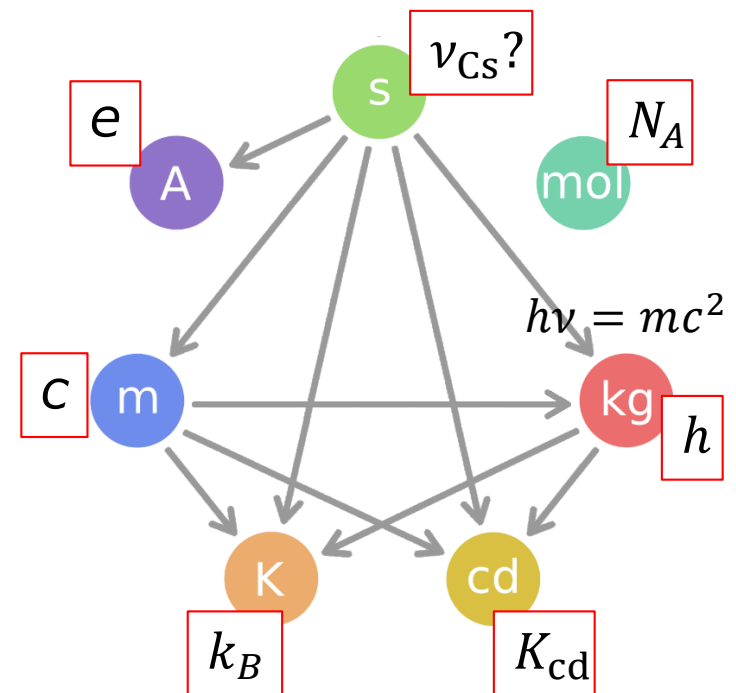


国際度量衡委員会 (2017.10) 勧告値: $f_{87\text{Sr}} = 429\,228\,004\,229\,873.0\text{ Hz}$

- 相対的不確かさ 4×10^{-16} → 「SI単位系の1秒」の不確かさと等価
- 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
- 従来のSI秒に縛られずに「新しい時間をつくる」

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、測位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： $(\nu_X/\nu_{Cs}) \times 9,192,631,770$ 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
- SI秒の精度を超える計測の有効利用、物理定数の安定性、量子標高差計への応用…



度量衡は重要な社会基盤

「ソーシャルキャピタル」が及ぼすグローバル化へのインパクト

交易が加速度的に進むためのポイントは、社会基盤である。

たしかに、始皇帝がつくった秦(BC778-BC206年)という国家があったように、中国には大きな帝国が昔からあった。しかし、実質的に始皇帝はほとんど統治をしていなかった。にもかかわらず始皇帝の業績が素晴らしいのは、交易を促進する仕組みづくりを工夫したことだ。**度量衡の尺度を統一したこと**、通貨を統一したこと、文字を統一したこと。見ず知らずの人と交易できる仕組みをつくることが重要で、国家がそれを助長してきたことは紛れもない事実である。(新しいグローバルビジネスの教科書、山田英二)

時計のグローバルスタンダード:

- ① 英国議会、ハリソンのクロノメーター、大英帝国、グリニッジ標準時へ
- ② 近代度量衡、フランス革命、メートル法、Système international d'unités (SI)
- ③ カーナビ、測位、時刻同期のデファクトスタンダード、GPS(米国、DARPA = Defense Advanced Research Projects Agency、国防総省の機関)

2台の光格子時計を運転するのに18台の周波数安定化半導体レーザーを使う
こんな複雑なシステムは実用化できないと思われていた常識を変える



光格子時計の大きさは？

- 1997年に始めた基礎研究
- 20年を経て、将来の量子技術の実用化を見据えたい
- まず光格子時計の全体像を示して、今後の小型化の指針を作ろう

インターネット経由でリモートメンテナンス可能なコントローラ2台で時計1台を運用

光格子時計1

光格子時計2

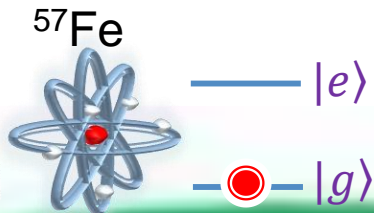
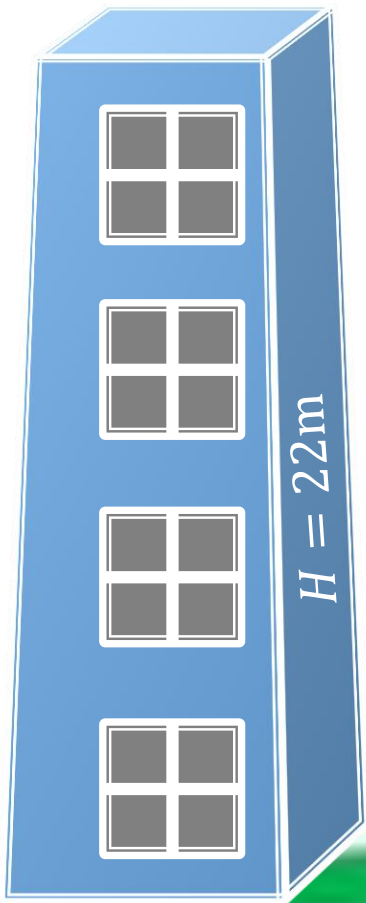
実験室のエレクトロニクスと光学系を
2箱にまとめる

(=位置エネルギー)

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



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

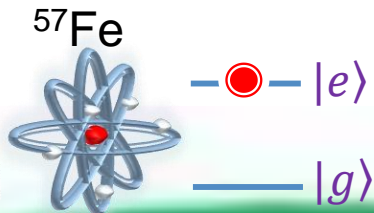
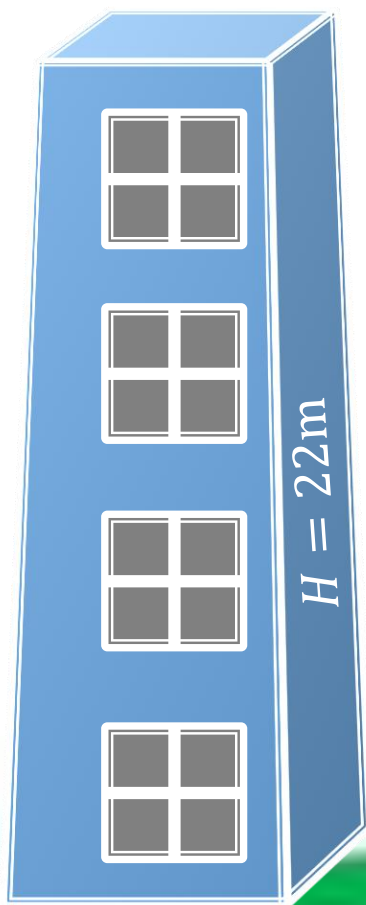
励起された原子 $|e\rangle$ は、励起光子のエネルギー分だけ重くなる: $M + \boxed{h\nu_0/c^2}$

静止した光子の質量
($E = mc^2$) 21

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: $(M + \frac{h\nu_0}{c^2})gH$

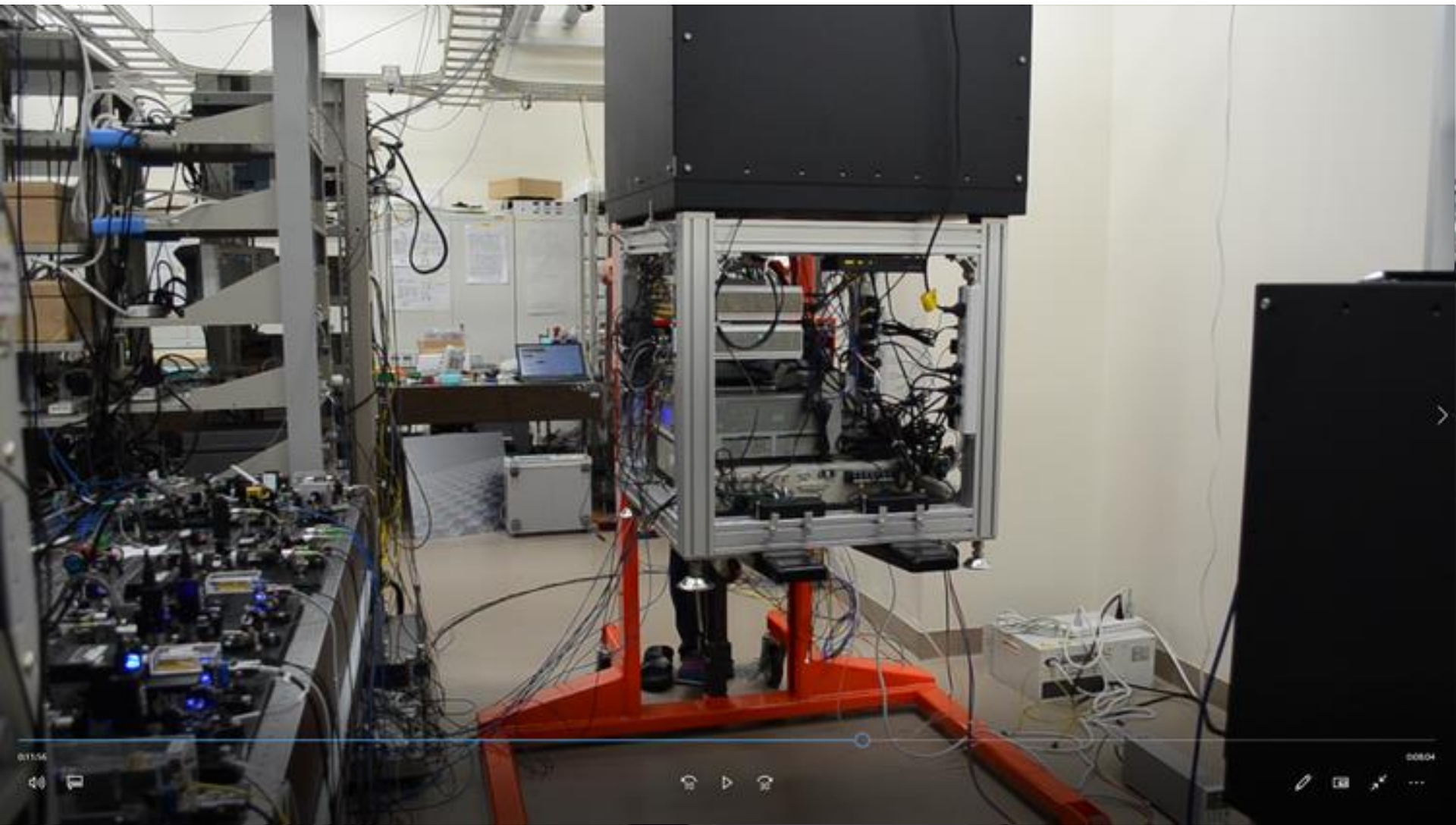
原子は振動数 $\nu = (1 + \frac{gH}{c^2})\nu_0$ の光子を放出

→ 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 を振り子にする

励起された原子 $|e\rangle$ は、励起光子のエネルギー分だけ重くなる: $M + \frac{h\nu_0}{c^2}$

静止した光子の質量



01:56



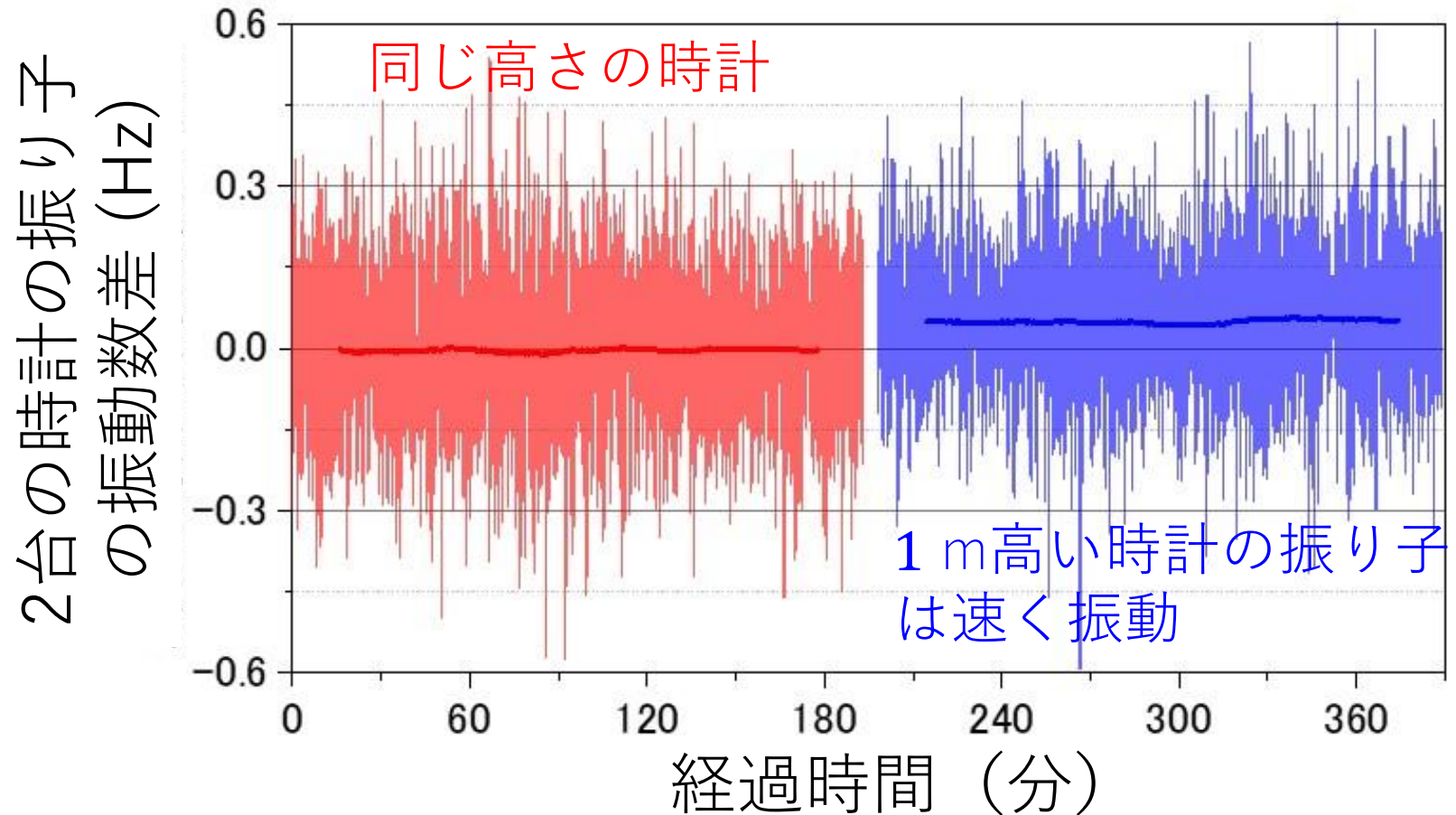
00:04



時計は高さを測る道具になる (相対論な時空を見る時計)

$\Delta\nu/\nu_0 \approx g\Delta h/c^2 \approx 1.1 \times 10^{-18} \Delta h/\text{cm}$
(18桁の時計なら1cmが読める)

平均時間
1, 2, 4, 8, 16, 32 分



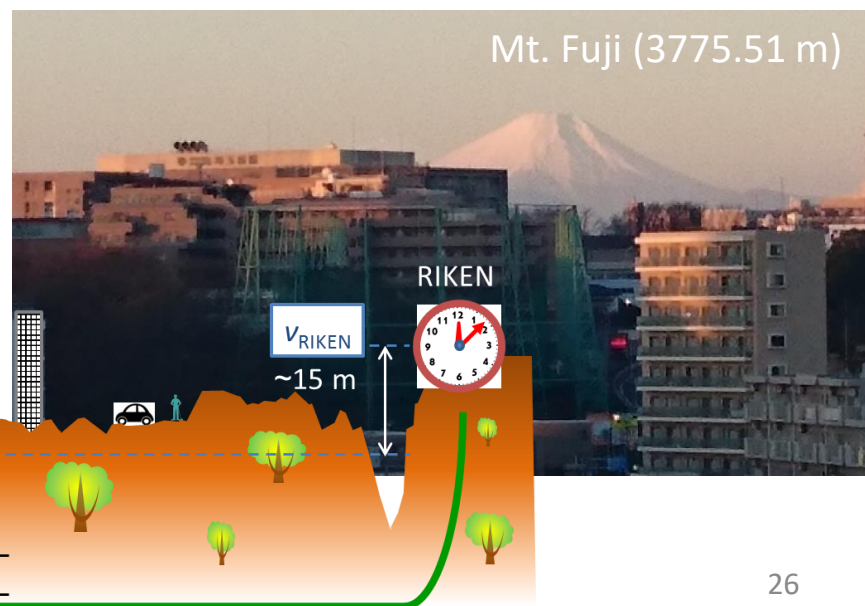
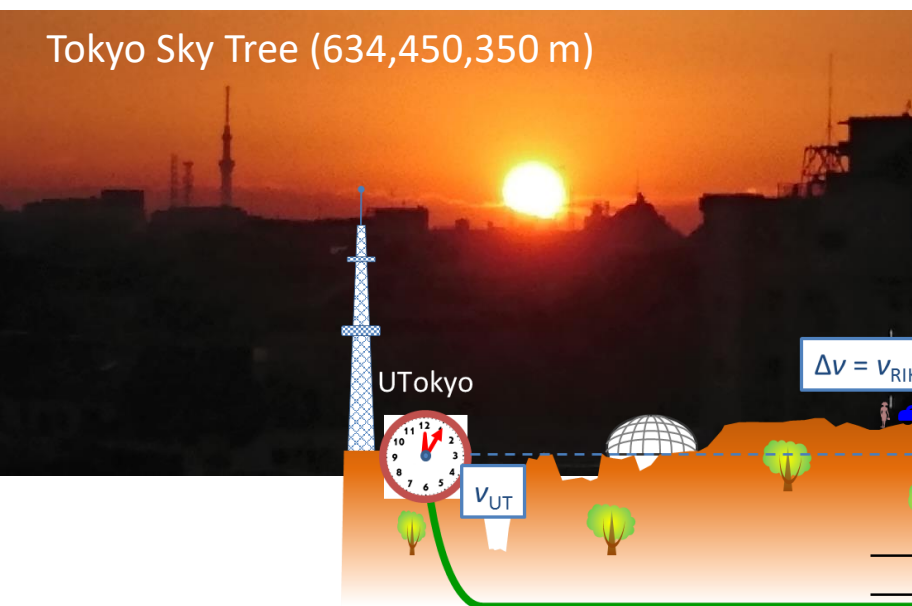


アインシュタインの相対論にインスパイアされたとされるダリのやわらかい時計をパーソナルスケールで実現。10-20年後、時計の役割はどうなるだろう？

アインシュタインの相対論は大丈夫？

一般相対論の検証：(時計精度がいいと)ロケットの大実験が地上実験になる

- ① GPA (1976): 水素メーザー (@10,000km)、 $\frac{\Delta v/v \text{ (時計による測定精度)}}{\Delta\phi/c^2 \text{ (重力赤方偏移の予想値)}} = 1.4 \times 10^{-4}$
- ② 東大一理研: 光格子時計 (@15.16m)、 $\frac{\Delta v/v}{\Delta\phi/c^2} = \frac{5 \text{ cm}}{1,516 \text{ cm}} = 3 \times 10^{-3}$
- ③ 東京スカイツリー、 $\frac{\Delta v/v}{\Delta\phi/c^2} = \frac{1 \text{ cm}}{45,000 \text{ cm}} = 2 \times 10^{-5}$
- ④ 富士山、 $\frac{\Delta v/v}{\Delta\phi/c^2} = \frac{1 \text{ cm}}{377,551 \text{ cm}} = 2.6 \times 10^{-6}$



スカイツリーの上と下 時の流れ違う？

日本で開発の高精度時計で計測

標高の高いところでは、地表と時間の流れが異なる。アインシュタインの一般相対性理論で予測される、そんな不思議な現象をとらえる実験を、東京大学などの研究グループが東京スカイツリーの展望台で始めた。標高の違いによるわずかな重力の差がもたらす時間差を日本発の超高精度の時計でとらえる試みだ。

3日未明、東京都墨田区にあるスカイツリーの天望回廊で、作業員が冷蔵庫くらいの大きさの装置を慎重に運んでいた。ここは地上約450m。フロアの1室に運び込まれ、梱包が解かれた。同じものは1階の会議室にも置いてある。

香取秀俊教授(54)が20



東京スカイツリーの展望台に設置される光格子時計(中央) 11月3日午前2時10分、東京都墨田区、池田良撮影

アインシュタイン理論 検証へ

05年に開発した「光格子時計」と呼ばれる世界最高レベルの精度を持つ時計だ。今回初めて研究施設の外で実験に挑む。

光格子時計は理論上、宇宙の誕生から現在までの時間よりもまだ長い、約1.60億年動かしても1秒も狂わず、10のマイナス18乗の精度を持つとされる。その精度は最新のレーザー技術などに支えられており、将来のノーベル物理学賞候補と期待する声もある。

時計の振り子に当たるのは、装置に組み込まれたストロンチウム原子が出した吸収したりする電磁波の周波数だ。置き時計の秒針

光格子時計を使って時間のズレを検出するイメージ

天望回廊(地上450m)



・重力が弱い
・時間の流れが少しだけ速い

○時×分△秒123……9

東京スカイツリーの2カ所に光格子時計を設置

↓
わずかな時間のズレを検出

地表



・重力が強い
・時間の流れが少しだけ遅い

○時×分△秒123……8



子は20Hz早く振動

は1日で4ナノ秒早く進む

■ スカイツリーの450m展望台の時間は1年で1.5マイクロ秒早く進む

時計は量子・高度差計

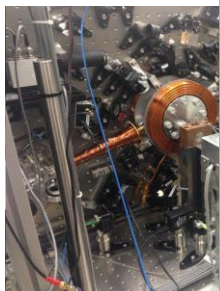


東大と理研の時間を比べてみよう

- 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

理研-東大で時計の進み方の違いを調べる

理研の光

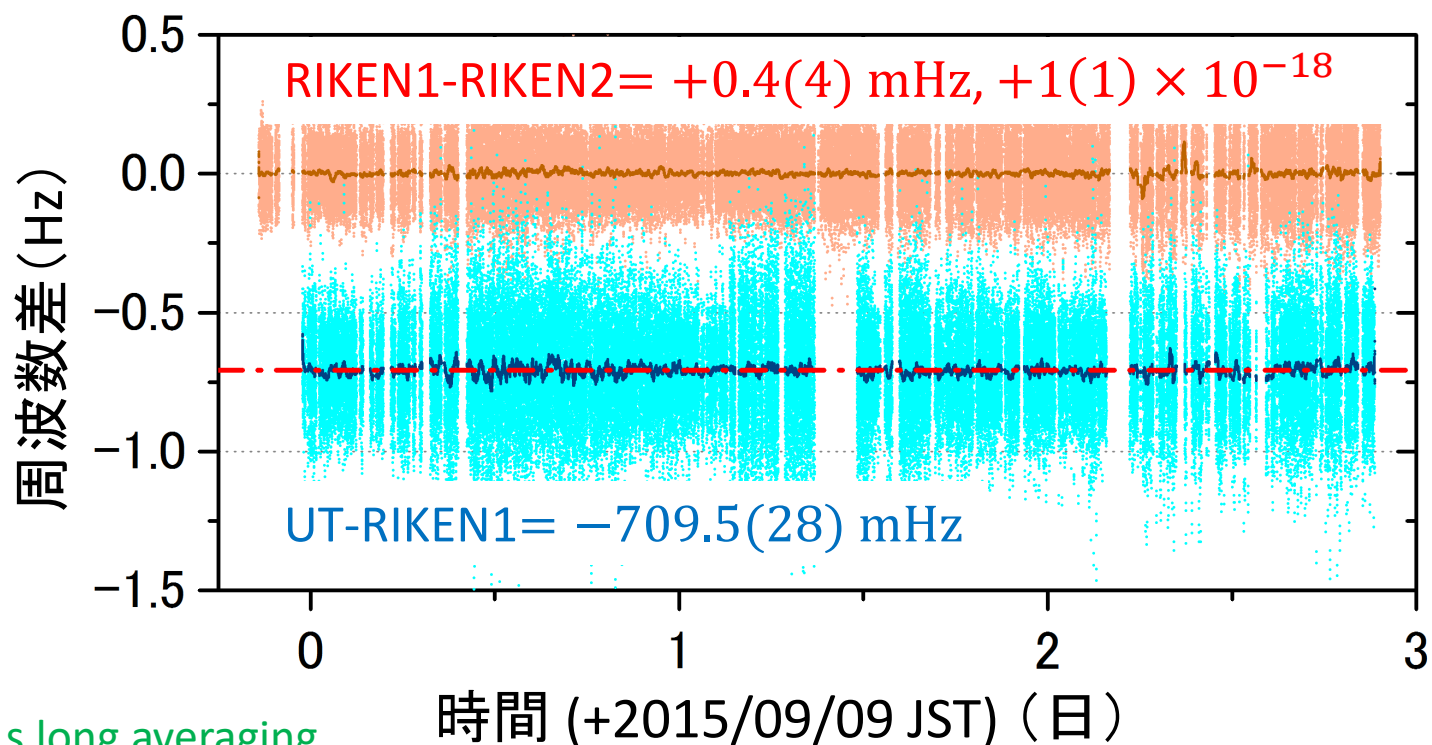


理研



VRIKEN

東大の振り子は0.7Hzゆっくり振動する



1.5 s long averaging

600 s long averaging

高低差から推定される周波数差: -707.5 mHz

いい時計は量子・高度差計になる

Time for detection

Rana Adhikari, Paul Hamilton and Holger Müller

Hunting for topological dark matter with atomic clocks

Nature Physics

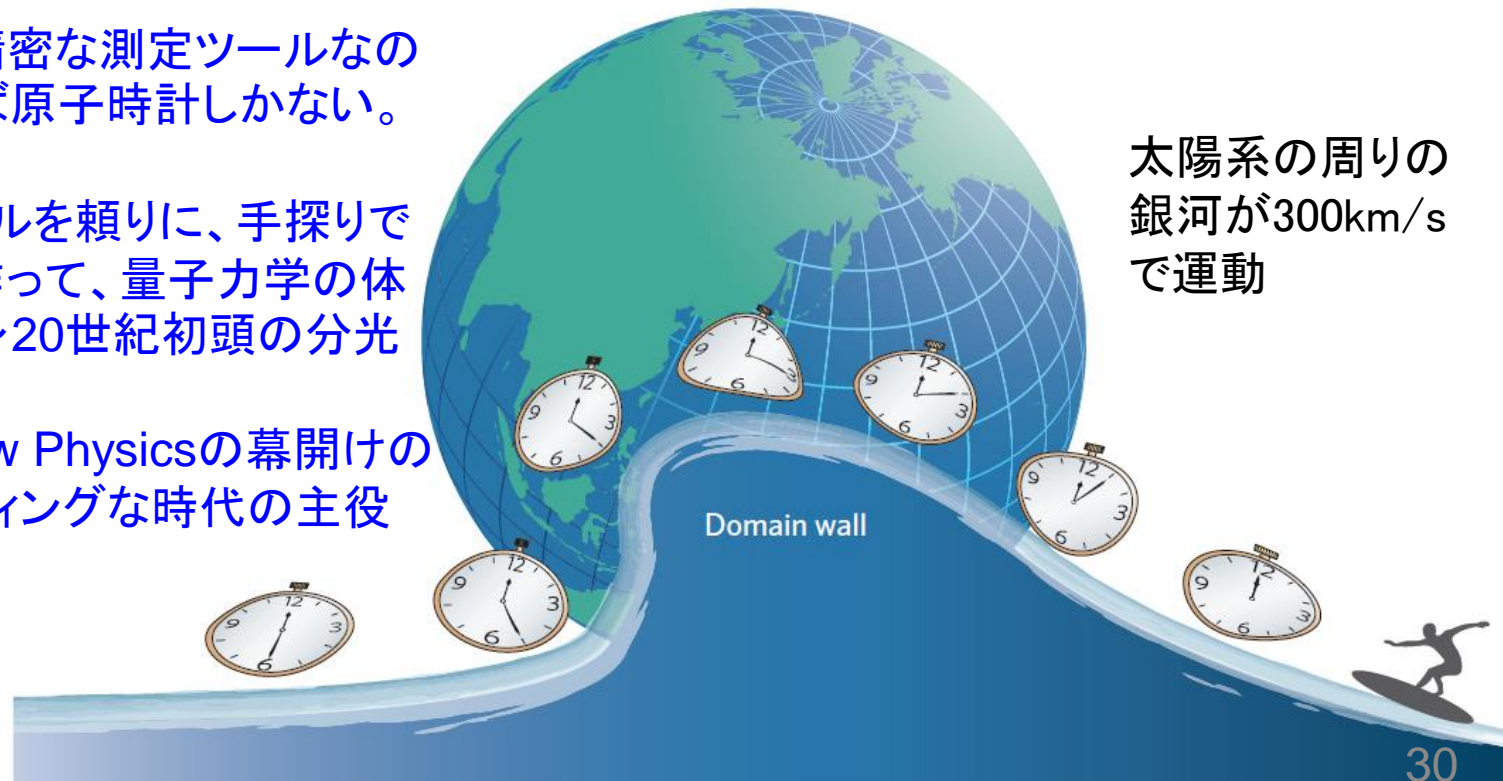
A. Derevianko^{1*} and M. Pospelov^{2,3}

PUBLISHED ONLINE: 17 NOVEMBER 2014

原子時計でダークマターが見えるかもしれない。
まだ物理学にも分からないことが、山ほどある。

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しかない。

- 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世紀初頭の分光學と酷似
- 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



教科書も変わる

啓林館:平成30年度以降用高校理科教科書
「物理改訂版」「総合物理(仮称)」

原
定の

例1

いまよりさらに時間の精度を向上させることにどのような意味があるのか、 10^{-18} という究極の精度とはいったいどんなものか考えてみよう。

まとめ

- 18桁精度の光格子時計の実現
- 時計は、ミクロとマクロのインターフェース
- どこでも、いつでも、アクセスできる超高精度な時計を作る
- 精度向上で、今までの物理を疑い、新しい物理を探す
- 相対論を使う、新たなセンシング技術の開拓

候補

私

代文

て高

それ

⑧ 私たちは、電気素量、光速、プランク定数などの物理量が、不変の「定数」であるとして学習してきた。光時計で測定している原子のエネルギーはこれらの定数の組み合わせで決められているため、時間の測定精度を上げることにより、これらの物理定数は本当に「定数」といってよいのか、というきわめて基本的な問題に対しても、光時計の研究の応用が期待されている。