

第16回 日立財団科学技術セミナー
2020年10月31日、13:30-15:00、ZOOM

光格子時計 ～時空のゆがみを見る時計～

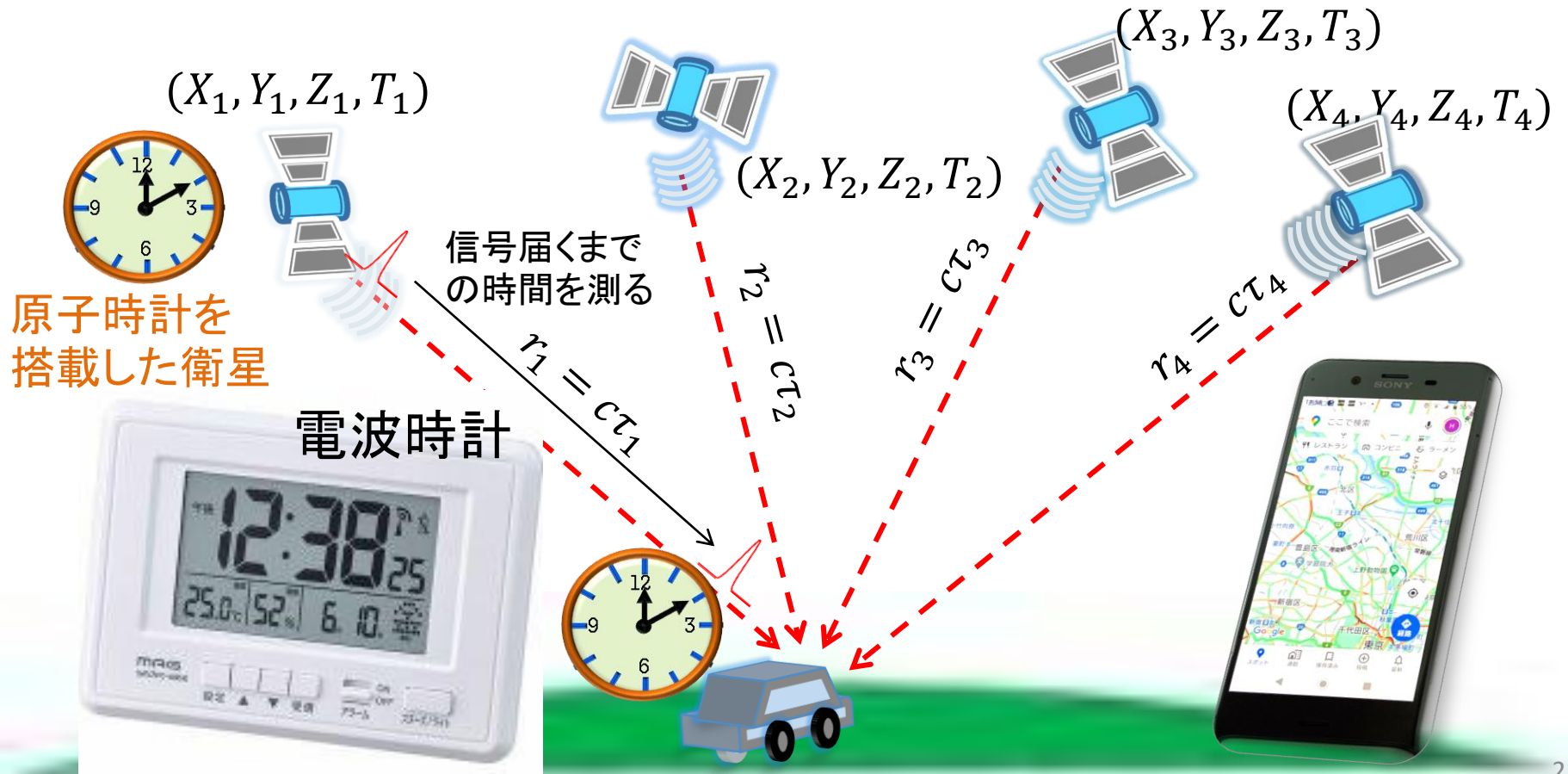
香取 秀俊

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

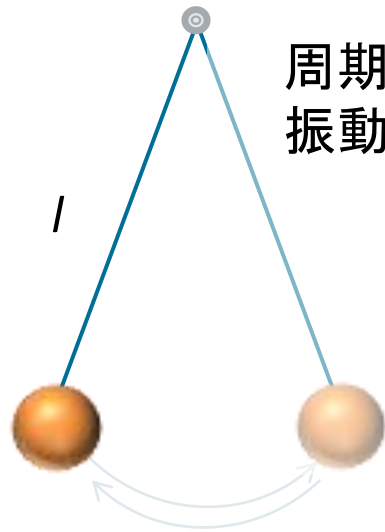
JST未来社会創造事業

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年)
- 光速 $c = 299792458 \text{ m/s}$ を定義(1983年): 時間 t は長さ $l = ct$ を測る物差し
- 4台以上の測位衛星GNSS (Global Navigation Satellite System)との時間差から距離を割り出して、自分の位置と時刻(x, y, z, t)を知る⇒未知数が4、方程式も4

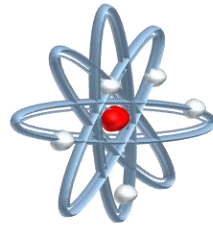


どうやって時間を認識する？

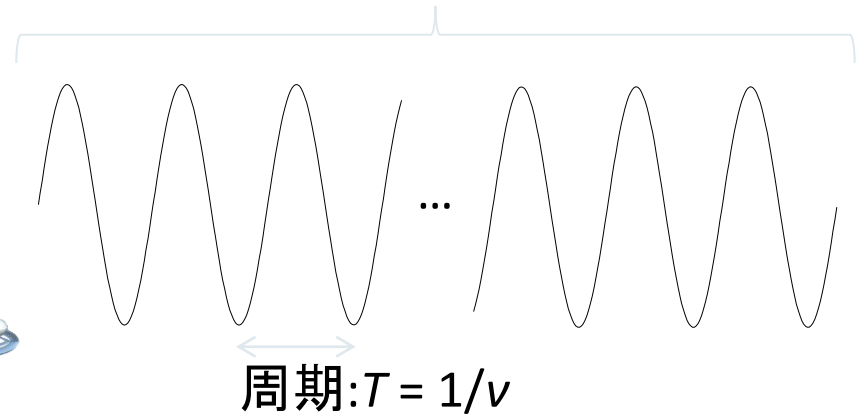


周期: $T=2\pi\sqrt{l/g}$
振動数: $\nu=1/T$

^{133}Cs 原子



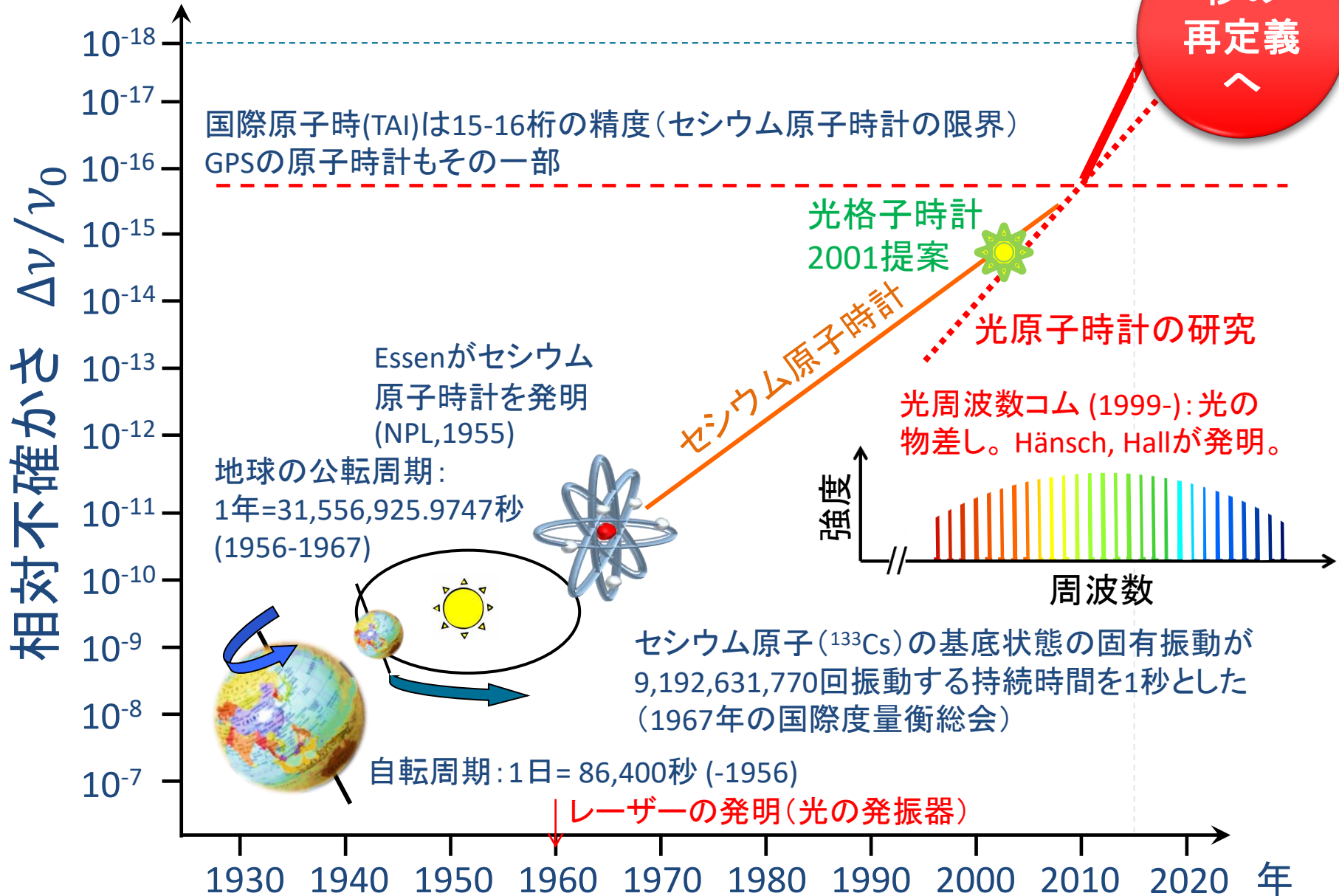
$\nu = 9\,192\,631\,770$ 回振動すると1秒



- 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
→ 時計の(相対)精度: $\delta t/t = \delta T/T = \delta\nu/\nu$ (振り子の精度)
- 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
- 物理定数は不変と思うと、原子の振り子の振動数は不変なはず

我々は歴史的な「原子時計の精度革命」に立ち会っている！

秒の再定義
^



- GPS/GNSS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

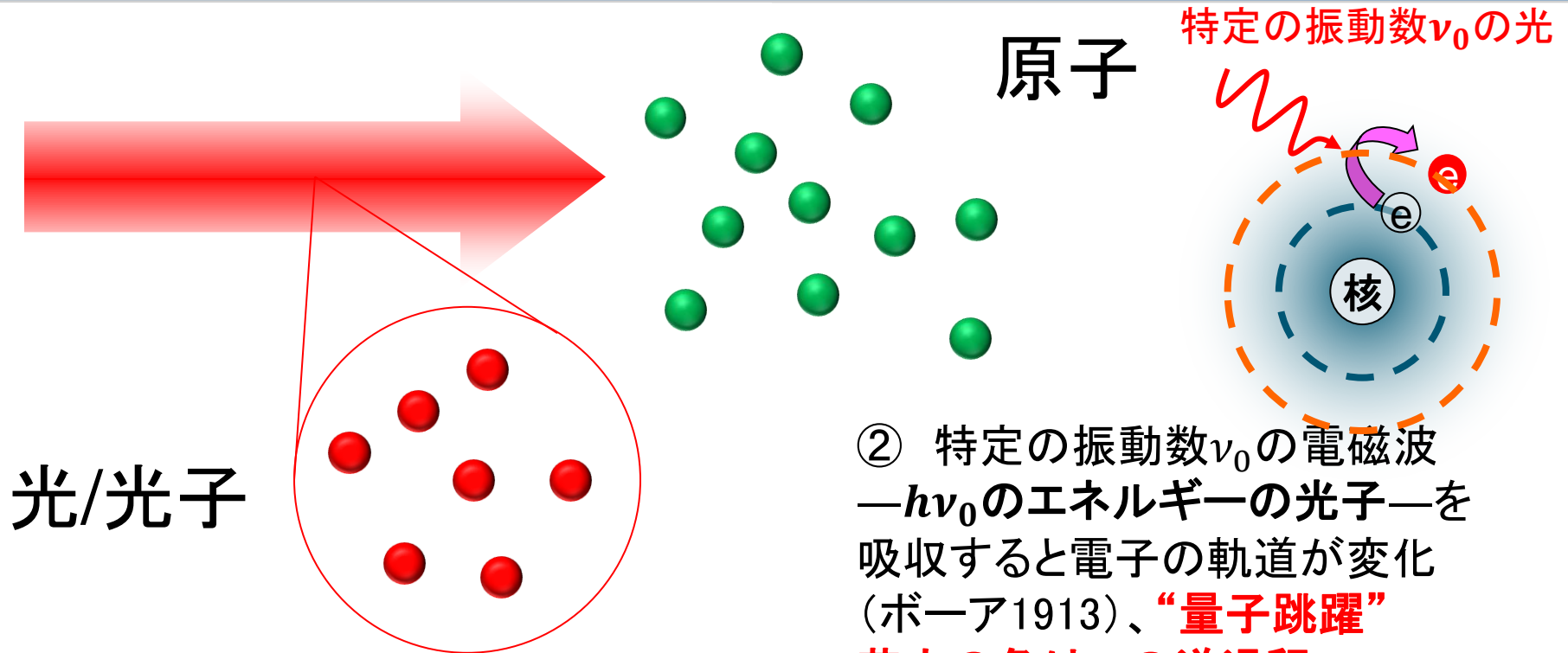
赤い光：1秒間に450,000,000,000,000 (4百兆) 回光の波が振動する

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

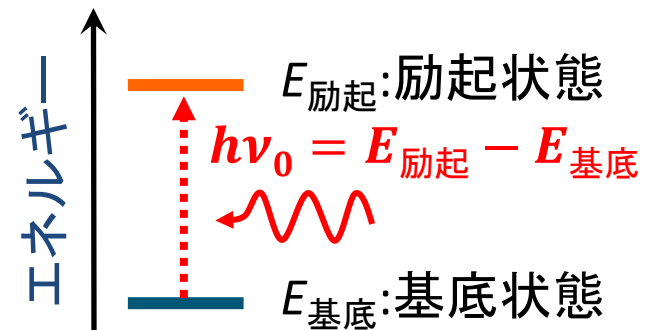


光/光子

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)

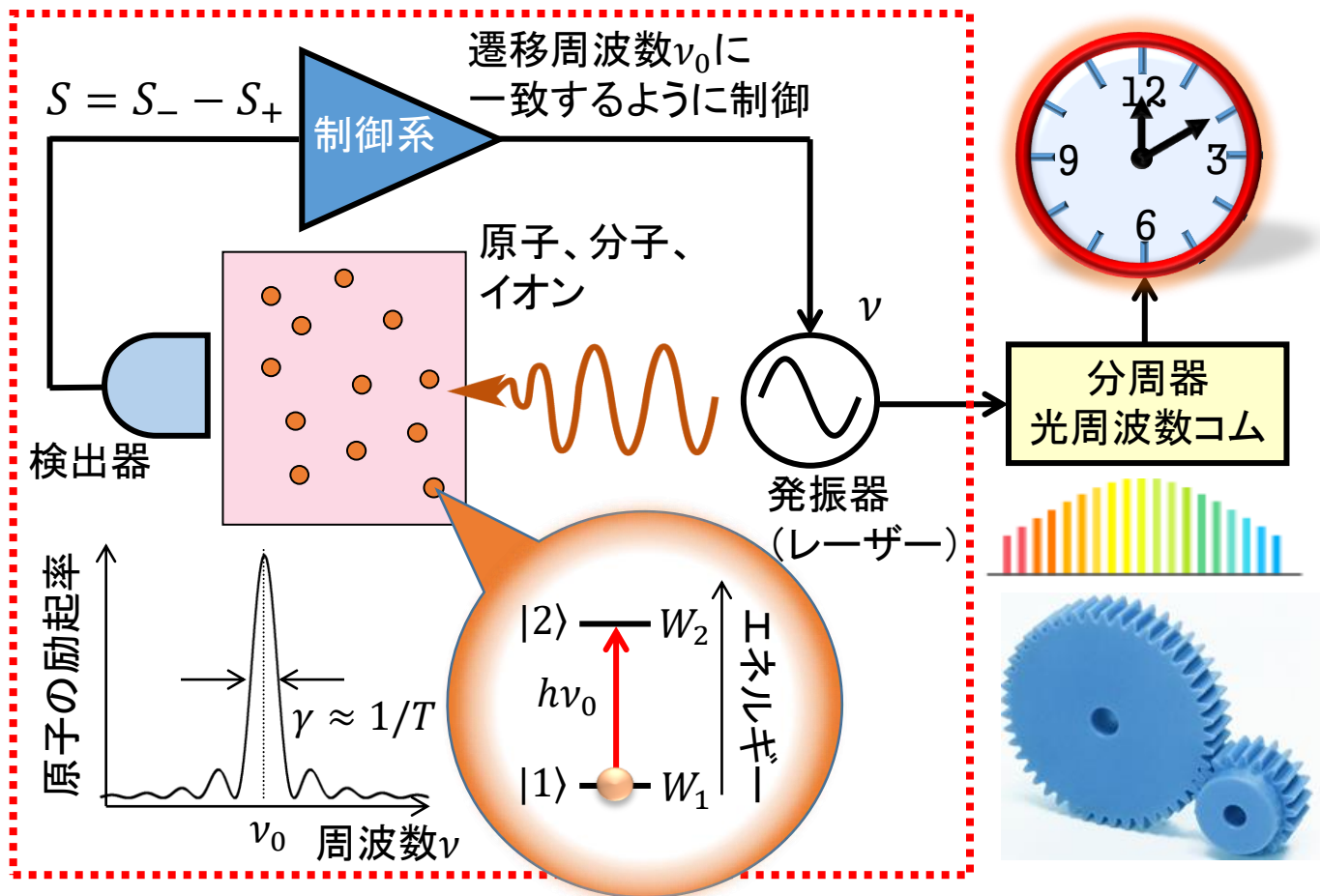
③ 原子時計ではこの原子の「振り子の振動数」 ν_0 を正確に測定、振動数の基準とする

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



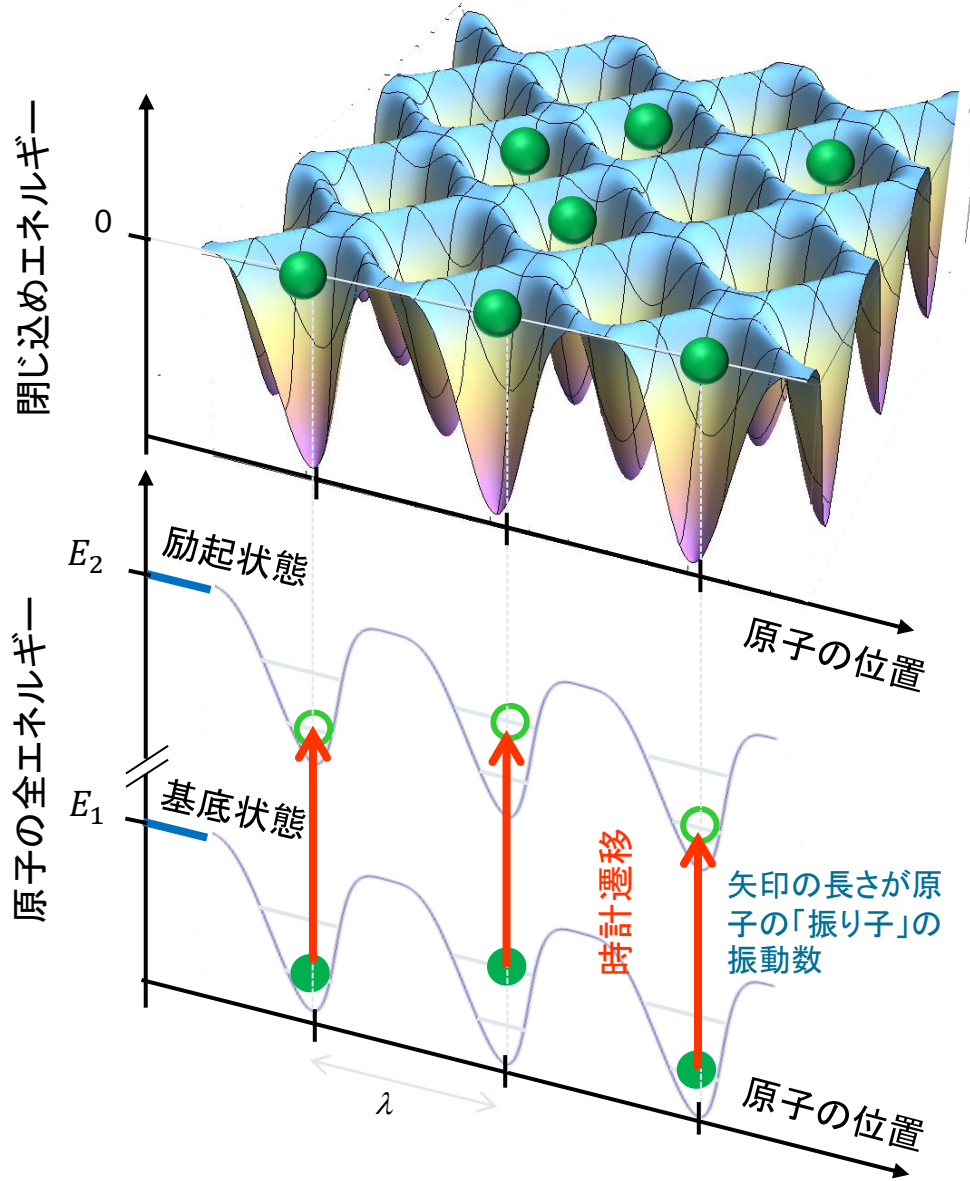
マクロな発振器を原子のミクロな振動にチューニング

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？

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

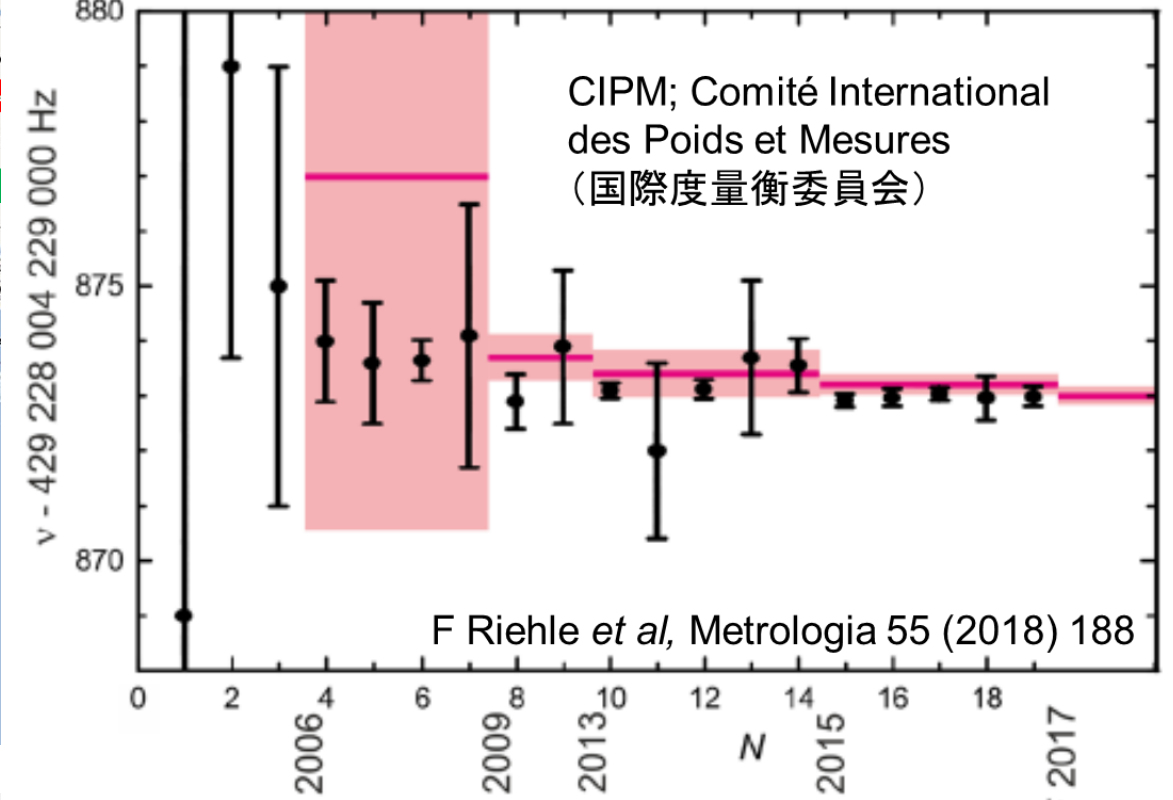
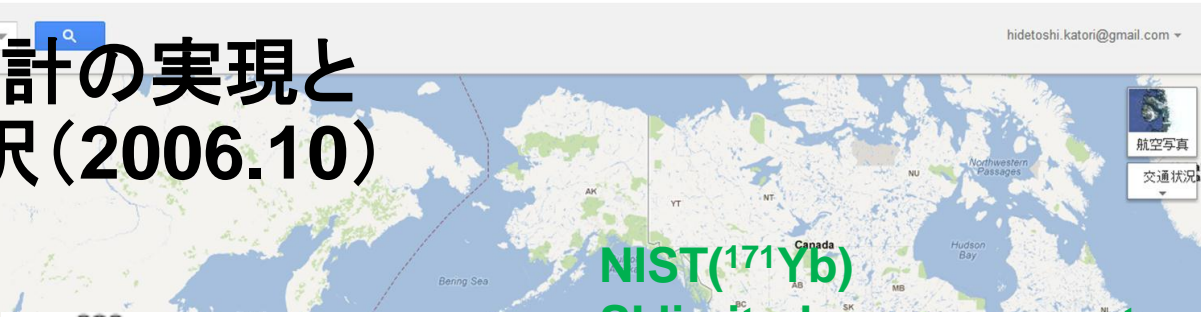
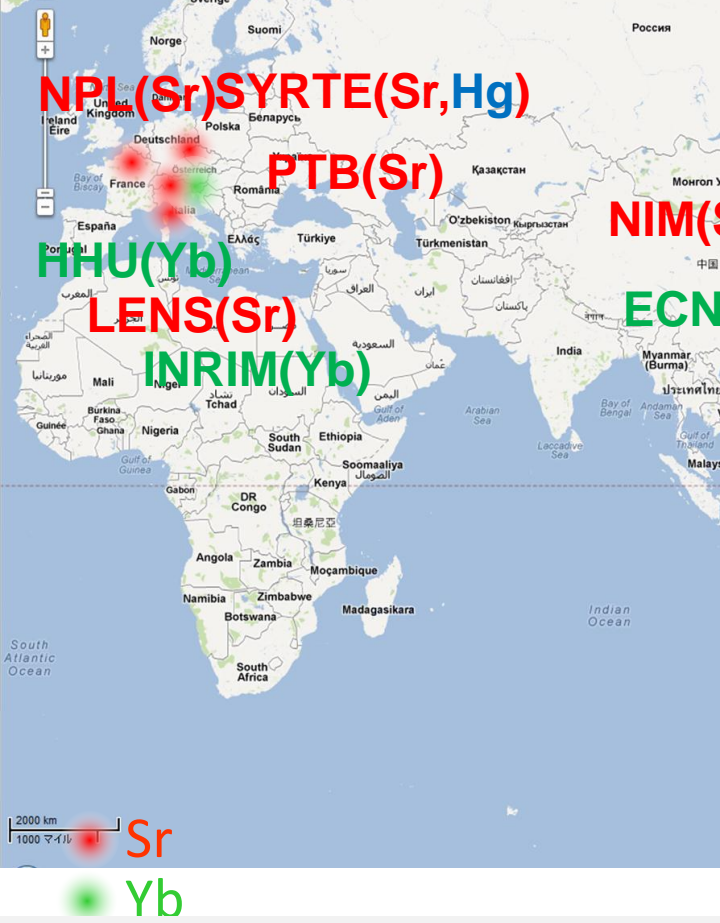
2001年、香取、Frequency Standards and Metrology Symposium (原子時計の国際会議)

- 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

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)

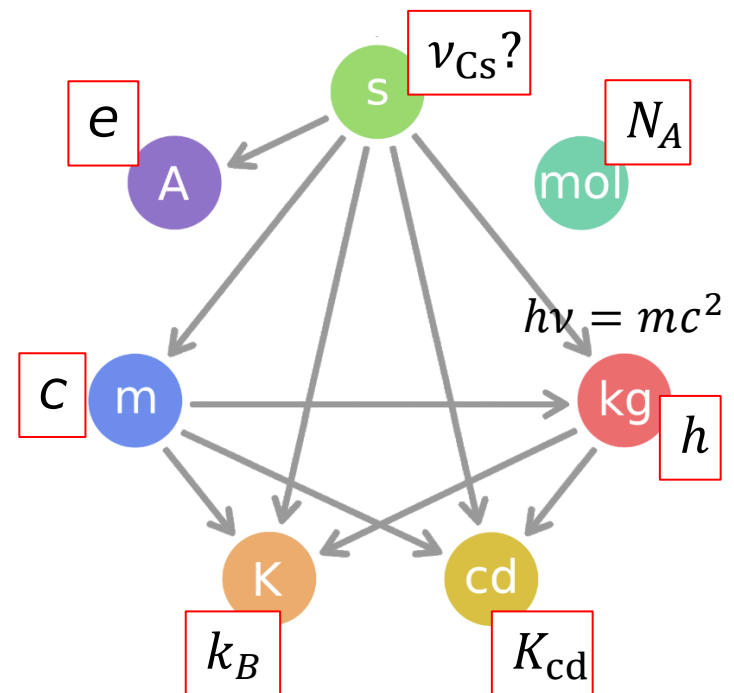


国際度量衡委員会 (2017.10) 勧告値: $f_{87\text{Sr}} = 429\,228\,004\,229\,873.0\text{ Hz}$

- 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
- 測った数値を伝える言葉がないのは不便、秒の再定義へ

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)、質量原器の廃止、プランク定数を定義、**2019年5月20日発効**
- 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...**



トピックス

光格子時計の小型・可搬化と高精度化をどこまで進められるか？

- 可搬光格子時計の青写真を作る、ラボ外運転
- スカイツリーの高さを利用した重力赤方偏移の検証
- 時計のネットワークを作る、見えること
- まとめ

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、誰も知らない手法へのワクワク感 (Curiosityが原動力)
- 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



光格子時計2

レーザーなどの光学系

制御装置

光格子時計1

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

実験室のエレクトロニクスと光学系を19^{インチ}ラックに搭載可能な2箱にまとめる島津製作所との共同開発を2017.04に開始

(=位置エネルギー)

時計は重力ポテンシャル計になる

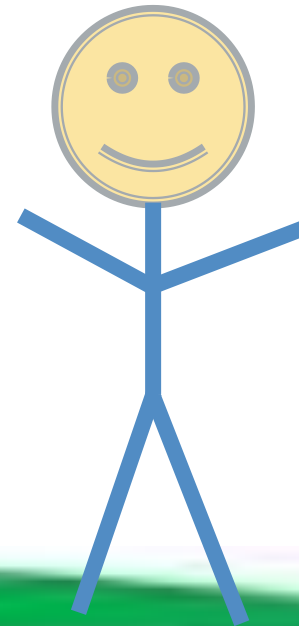
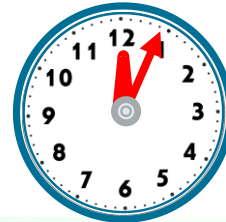
アインシュタインの相対性理論: 上方の時計は速く進む

- 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 → 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
→ 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

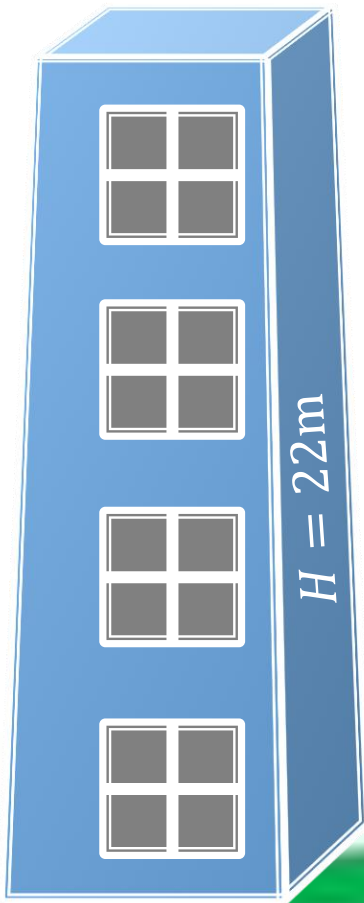


(=位置エネルギー)

時計は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

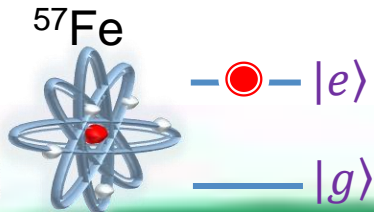


原子は余分な重力ポテンシャルエネルギーを獲得: $(M + \frac{h\nu_0}{c^2})gH$

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

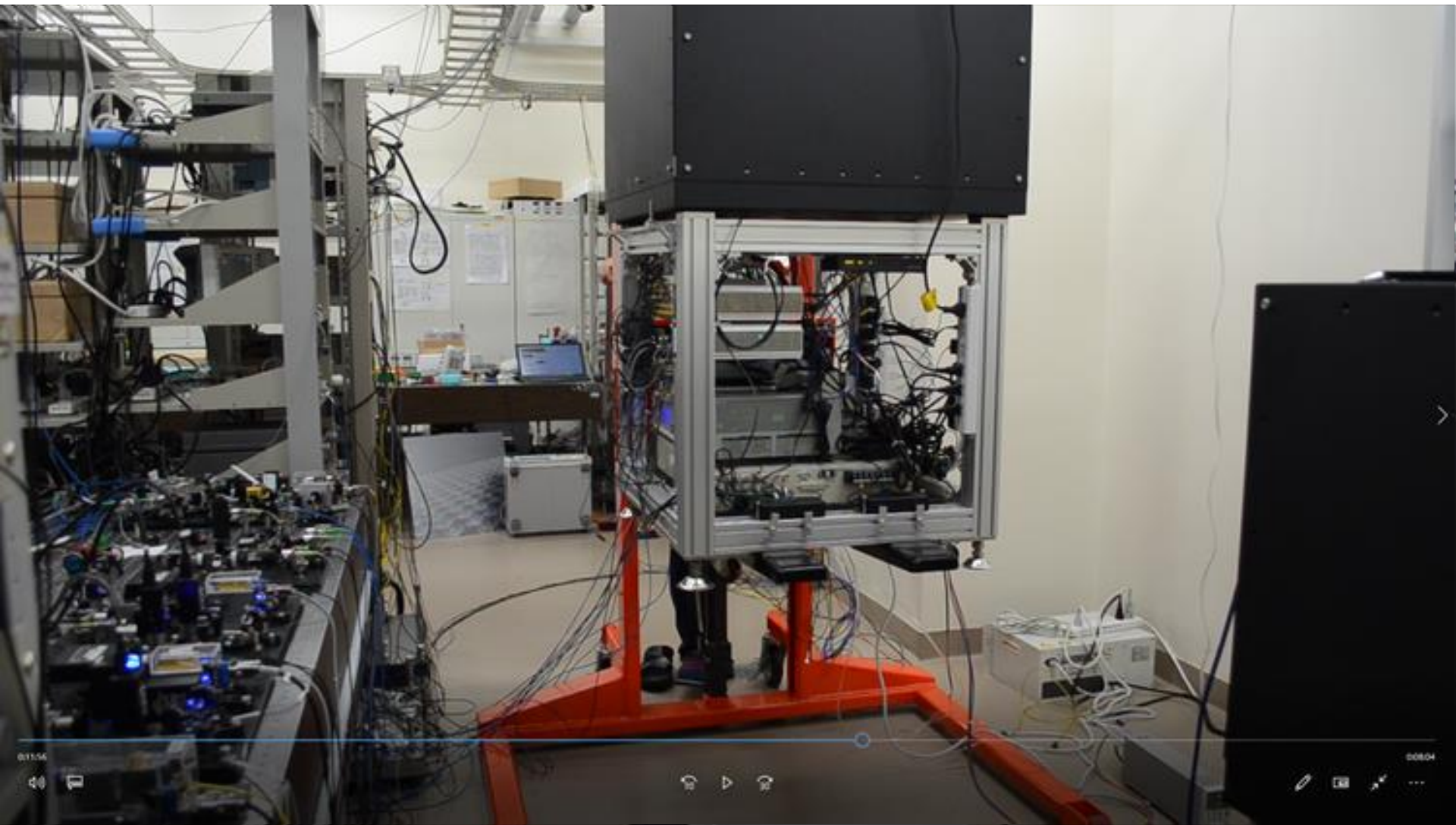
→ 上方の原子時計は $\frac{gH}{c^2}$ 振り子が速く振動

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



励起原子 $|e\rangle$ は、光子のエネルギー分質量が増加: $M + \frac{h\nu_0}{c^2}$

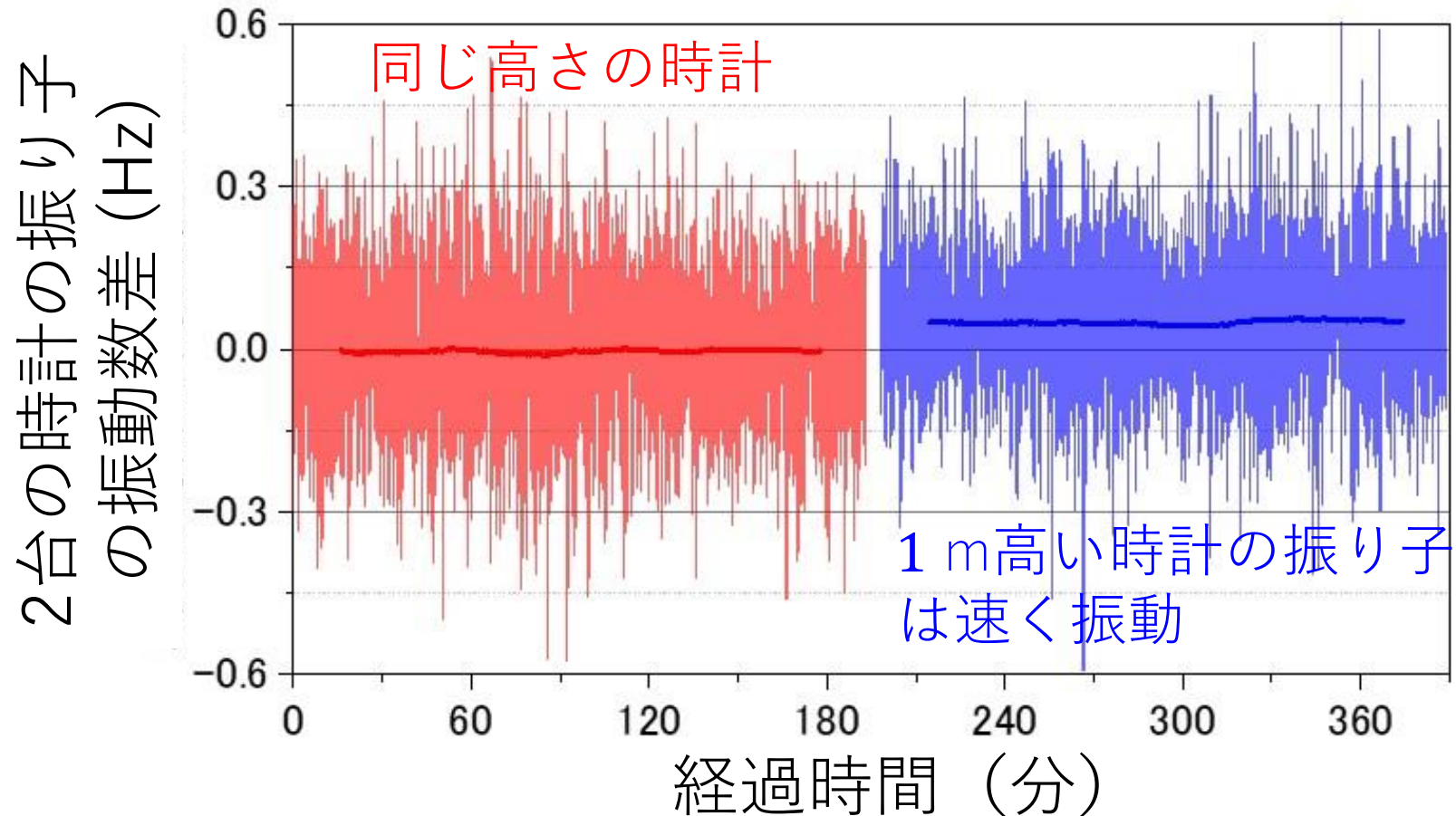
静止した光子の質量
($h\nu_0 = mc^2$) 25



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



スカイツリー実験、相対論の検証、成功と失敗 —失敗は最高の教師である—

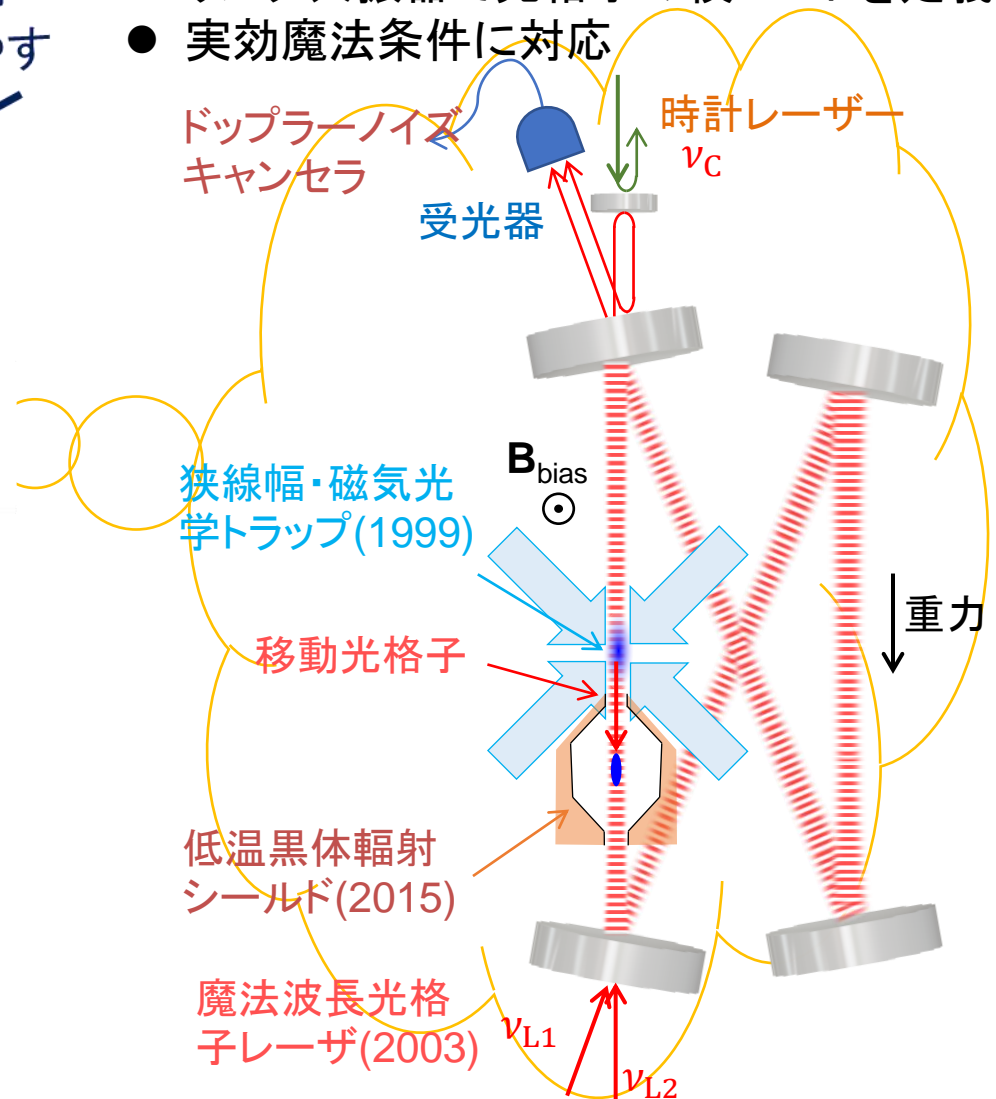
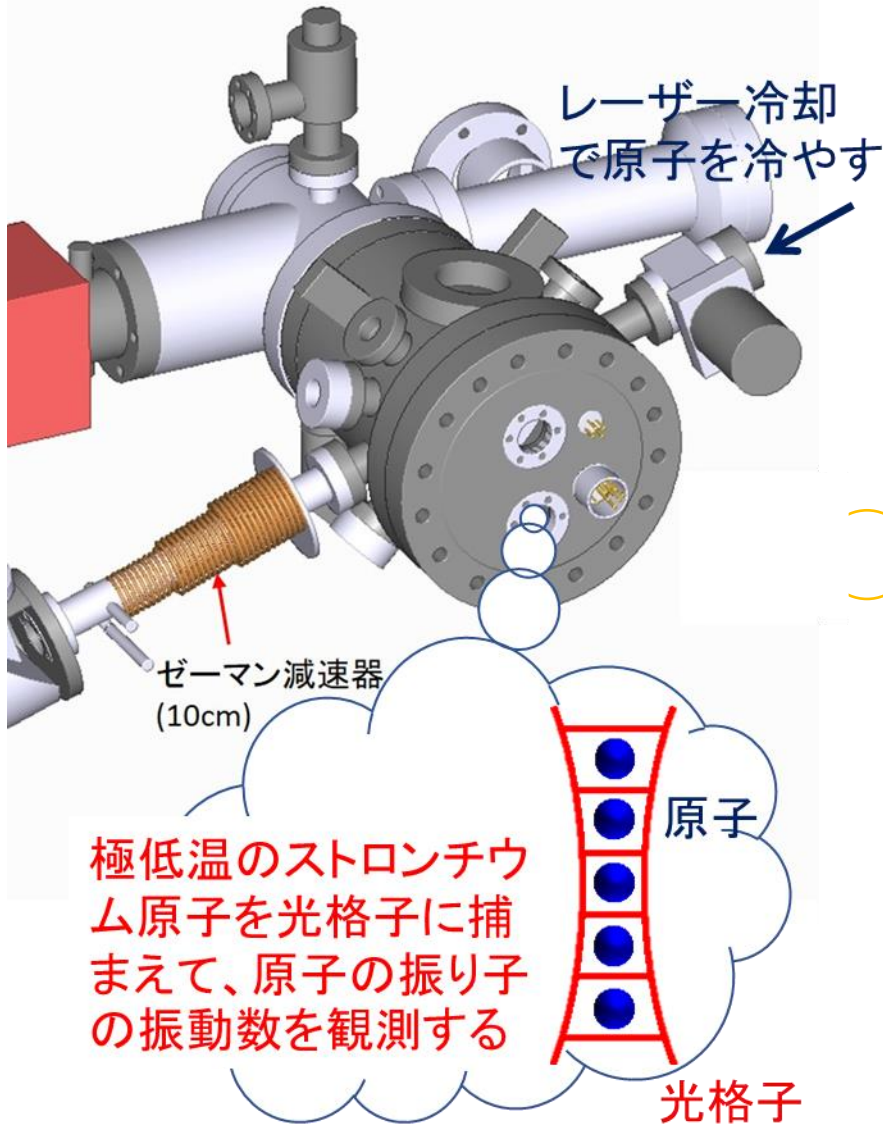
- 光格子時計小型化の青写真が完成
- スカイツリーで（ラボ外で）動作
- リモートメンテナンス、運用
- cmレベルの相対論的測位
- 実用化技術の指針の発見

- 電車の振動ノイズ
- 耐環境性能（振動、温度）
- 半年間の部品耐久テスト、機械部品 10^7 回駆動は酷
- 予想外のトラブル発生に備える
- 半導体レーザーの寿命はこれから

18桁精度の可搬型・光格子時計

20年分のノウハウ蓄積を導入

- 移動光格子で黒体輻射シールドに輸送
- リング共振器で光格子の横モードを定義
- 実効魔法条件に対応



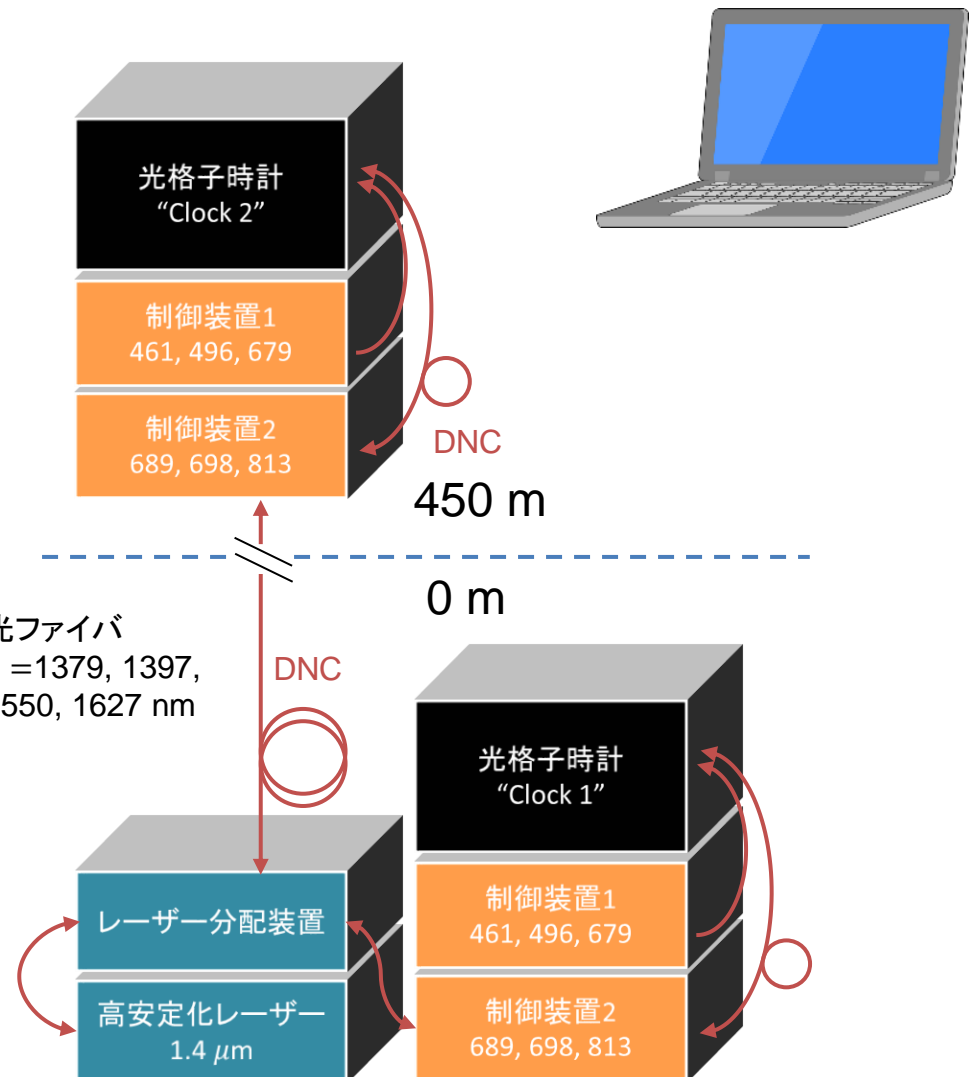


実験の様子:レーザーを照射して、
ストロンチウム原子を0.000001ケルビンまで冷却
冷却(0.5秒)、光格子に捕獲・原子の振りの観測(0.5秒)を繰り返す

スカイツリーの実験装置

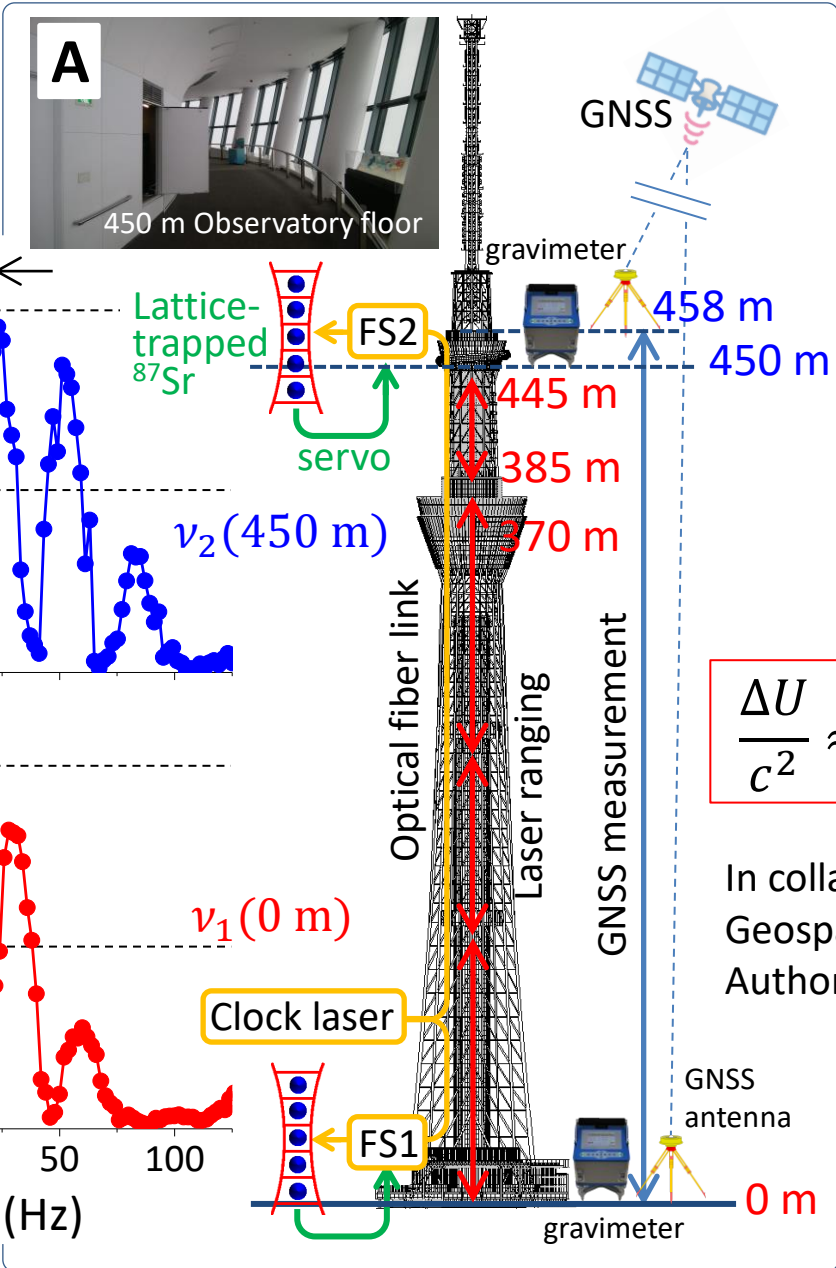
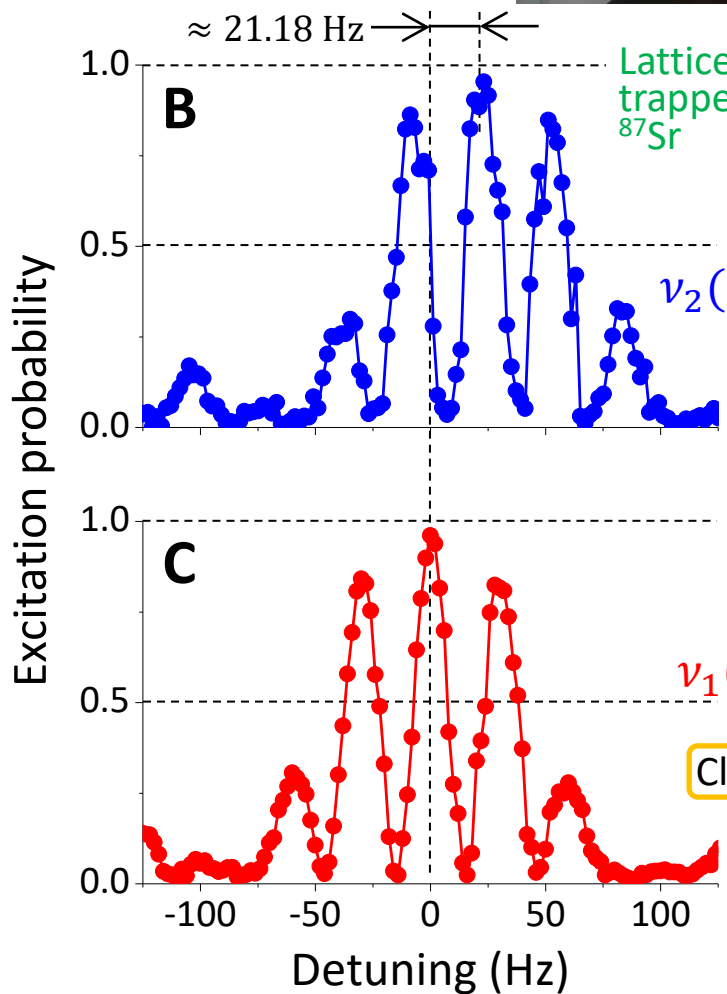
450 mの展望回廊の小部屋

インターネット経由の
ノートパソコンで遠隔操作



スカイツリーでの比較実験

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx \frac{21.18 \text{ Hz}}{429.228 \times 10^{12} \text{ Hz}}$$



$$\frac{\Delta U}{c^2} \approx \frac{g \times 452.6 \text{ m}}{c^2}$$

In collaboration with
 Geospatial Information
 Authority of Japan

相対論の予言する重力赤方偏移はどこまで正しい？

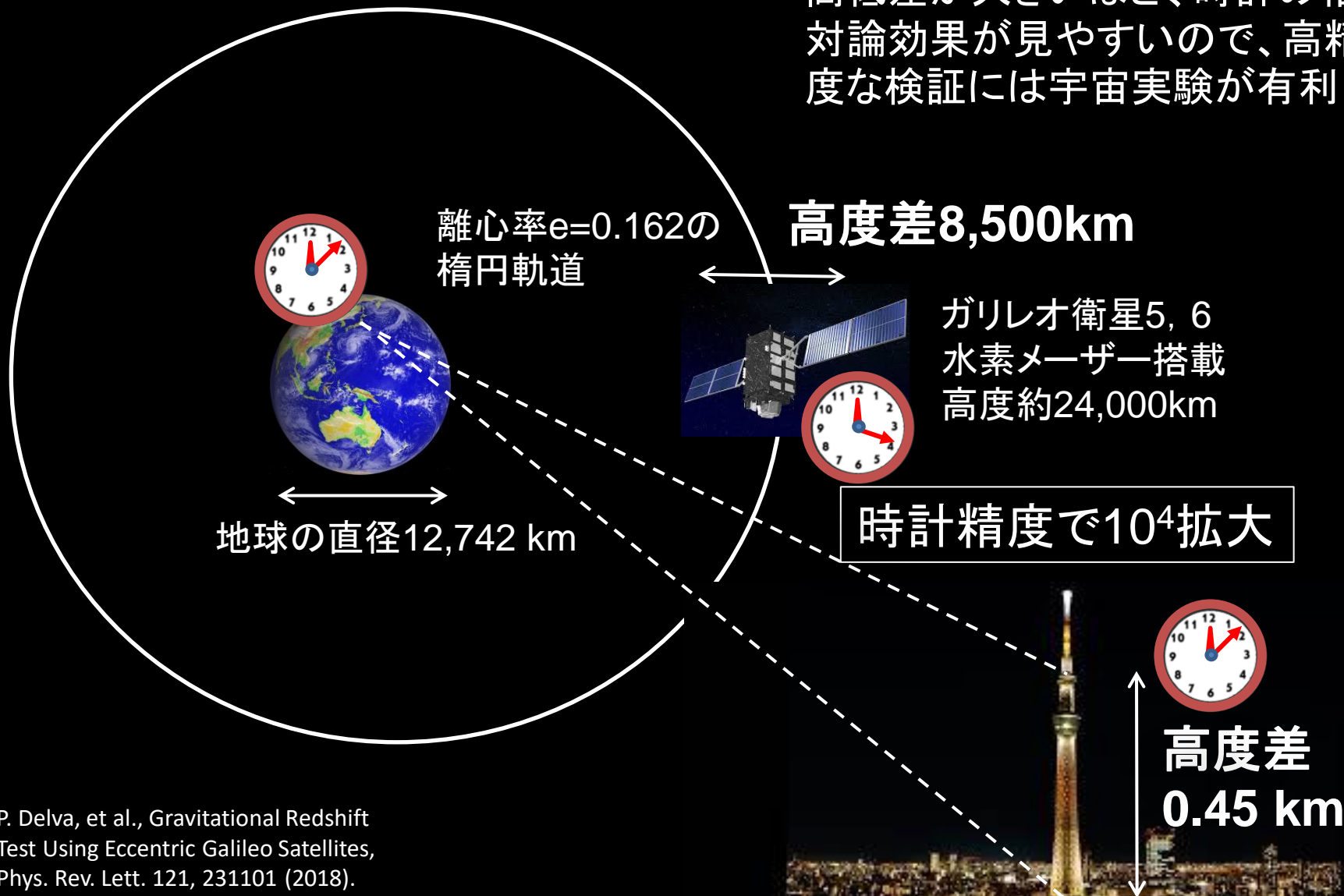
時計の変化 $\rightarrow \frac{\Delta\nu}{\nu} = (1 + \alpha) \frac{g\Delta h}{c^2}$ ←相対論の予言

($\alpha = 0$ なら、相対論の予言通り)

- α の不確かさ、 $\delta\alpha = \frac{\delta\nu}{\nu} \frac{c^2}{g\Delta h}$: 時計の精度 $\frac{\delta\nu}{\nu}$ が同じなら、高低差 Δh が大きいほど小さくなる。
- ロケット実験は $\Delta h \sim 10^4$ km
- 時計精度を4桁上げれば、kmの高低差で、ロケット実験の精度に迫る
- $\Delta h \sim 10^4$ kmと数100mのスケールで、物理法則(重力赤方偏移)は同様に成り立つか？

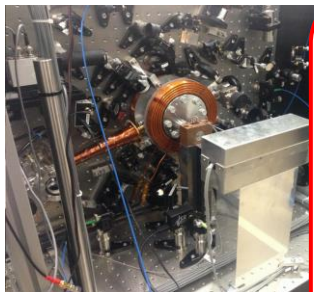
宇宙実験が地上実験になった

高低差が大きいほど、時計の相対論効果が見やすいので、高精度な検証には宇宙実験が有利



理研-東大で時計の進み方の違いを調べる

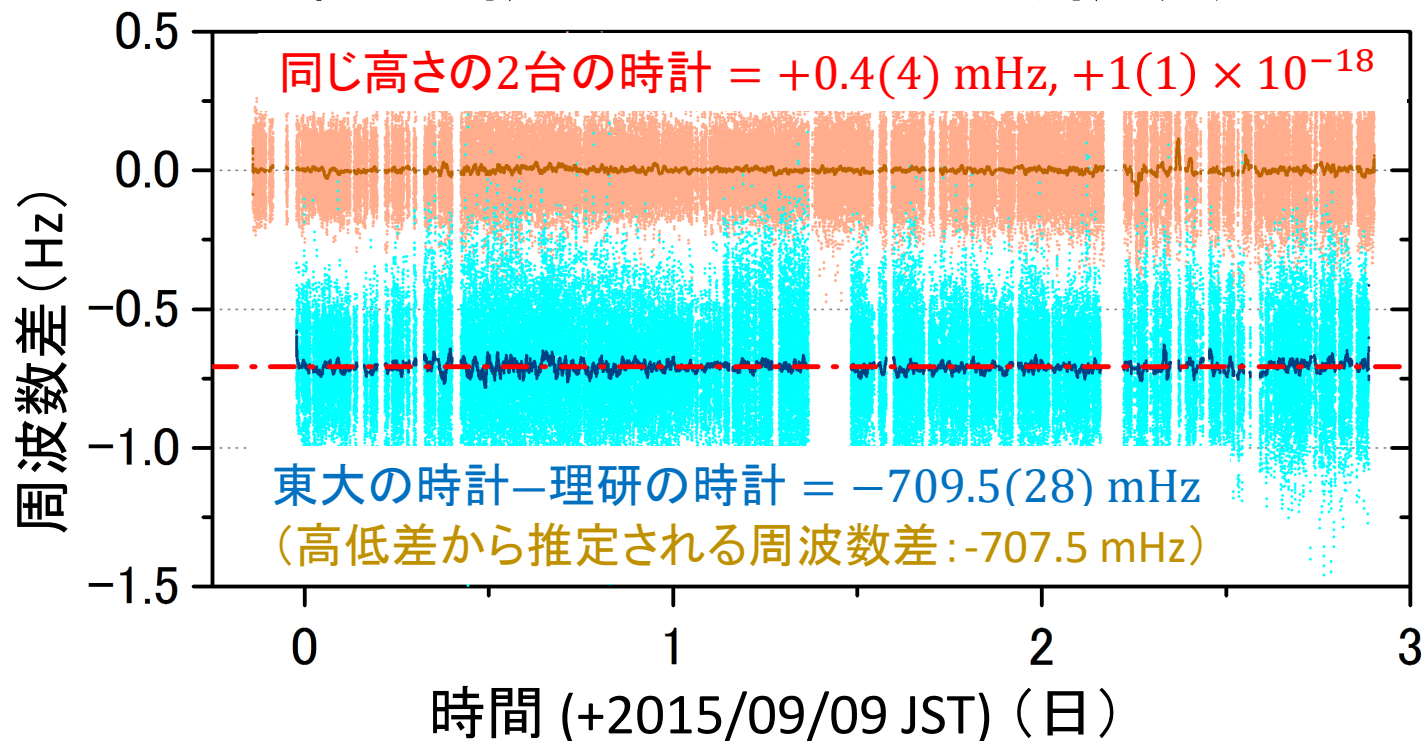
理研の光格子時計



東大の光格子時計



東大の振り子は0.7Hzゆっくり振動する



理研



V_{RIKEN}

V_{UT}

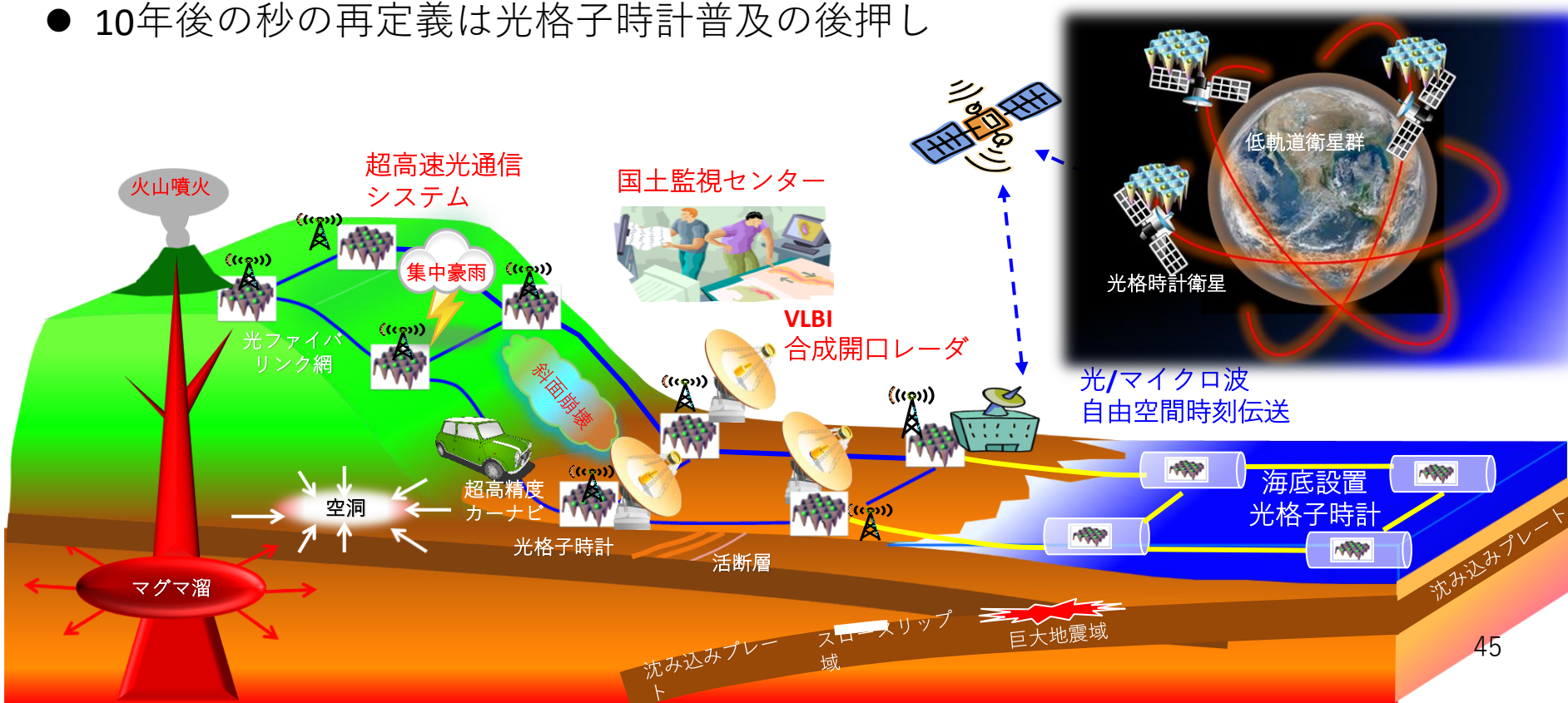


光格子時計ネットワーク:

相対論で国土を監視する未来社会インフラ、GNSSの補完・代替

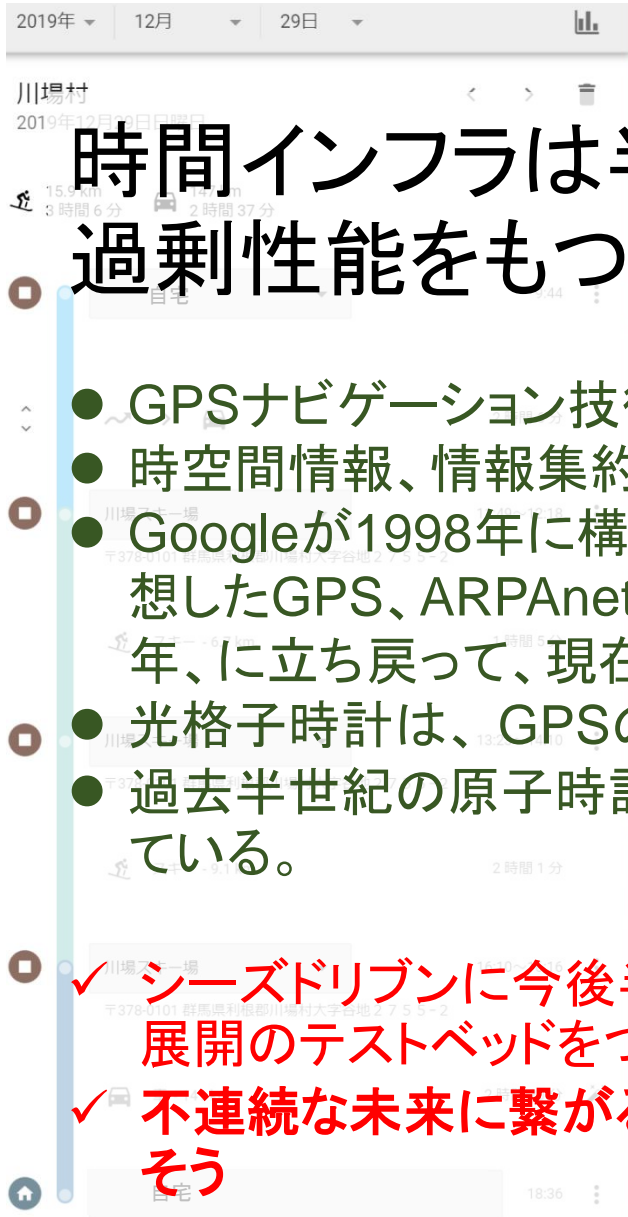
光格子時計が提供する堅牢な時間の応用

- ネットワーク化、通信ネットワーク応用（5G、...#G通信規格のベース、時間精度の要求は厳しくなる一方）
- GNSSのジャミング、スプーフィング対策にはstandaloneの時計が必要
- 相対論的測地、水準体系の統一、**cm/数時間の高さ変動**の実時間計測：火山学・地震学への貢献（**地球の柔らかさを見る時計**）、新たな物理学発見のツール
- 10年後の秒の再定義は光格子時計普及の後押し



やっぱり言われること

そんなオーバースペックな原子時計でビジネスになるの？



シュプールの記録

時間インフラは半世紀の応用を視野に入れる 過剰性能をもつべき

- GPSナビゲーション技術の民生転換、自動運転へ
- 時空間情報、情報集約は、情報サービス産業の最上位の、コア技術
- Googleが1998年に構想したこと、DARPAが1970年代米ソ冷戦下で構想したGPS、ARPAnetができた1969年、セシウム原子時計発明の1955年、に立ち戻って、現在をフォーキャストする能力が問われている
- 光格子時計は、GPSの時計精度を1万倍改善する、新たな社会インフラ。
- 過去半世紀の原子時計の展開に匹敵する想像力と構想力が求められている。

- ✓ シーズドリブンを今後半世紀のアプリケーションを発掘、サービス、産業展開のテストベッドをつくる
- ✓ 不連続な未来に繋がる技術で、時間ビジネスのゲームチェンジを目指そう



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、可搬化
- 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が実用化する未来社会を考える

例3

げることにより、重力の理論のより精密な検証が期待できる。

- 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。