

時空のゆがみを見る時計：光格子時計

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授

香取 秀俊

これから、原子時計の話をしていきます。今までの時計は時間を共有するための道具でしたが、精度が上がると、相対論的な時空間のゆがみをはじめ、いろいろなことが見えてくるというお話をします。最後に、それが未来の社会にどう役立つかを考えたいと思います。



原子時計は物理の研究で使う特殊な装置と思われるかもしれませんが、現代人は原子時計のヘビーユーザーです。今日ここに来るとき、初めての場所なのでスマホを見ながらやって来ました。スマホのナビゲーションで使う GPS 衛星には高精度な原子時計が入っています。自分の位置を知りたいければ、自分の位置と原子時計の入っている GPS の衛星の位置の相対的な関係を、時間を使って知ります。自分の x 、 y 、 z の座標と、(スマホに入っている時計は大した精度はないので) 正確な時間 t も知る必要があります。これら 4 つの未知数を求めるには、4 つ方程式を解けばいい。

このために、頭上の 4 台以上の GPS の衛星を見て自分の位置を計算するのがスマホのナビゲーション機能です。グーグルマップのサービスが 10 年前に始まって、最近では皆さんスマホのナビを見ながら道を歩くようになりました。

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 $c = 299792458$ m/s を定義(1983年)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



もうひとつ、工学的にも大成功していると思うのが、電波時計です。電波時計は、スーパーに行くと 980 円で売っているのもので、いつの間にか家中に何台もあ

ります。複数時計を持つと、時間合わせが面倒くさいのですが、電波時計は勝手に原子時計に時間を合わせてくれます。電池さえあれば、調整不要で正確な時を刻みます。このように非常に正確な原子時計の時間が身の回りに溢れているのが現在の状況です。

どうやって時間を測るか。
一番簡単なものが振り子時計です。振り子の長さが分かれば、地上の重力加速度で周期が決まります。ある一定の周期現象を見出すのが、時計を作るための基本です。

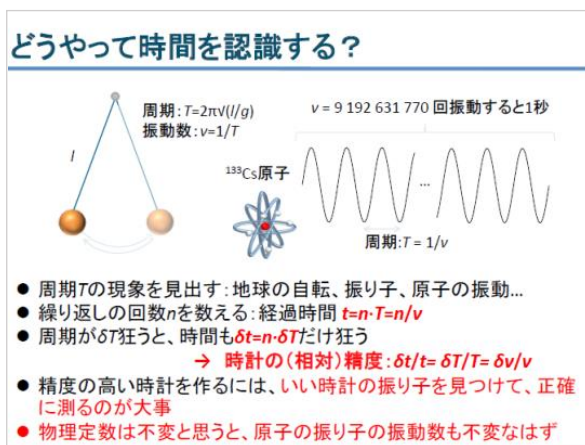
今、1秒を刻んでいるのは、セシウム原子の原子時計です。

セシウム原子の振り子が 92 億回振動したら 1 秒とするように時間を測ります。

このように T の周期現象を見出して、 n 回数えたら t が経過すると時間を測るので、時計で大事なものは、周期現象がどれだけ一定かです。周期がほんの少しだけ変わっても、 n 回数えると n 倍時間が変わってしまう。したがって正確な周期現象をいかに見出すかが大事になります。

時計の精度は何時間たって何秒狂うと表現します。時計の精度を決めているのは周期やその逆数の周波数です。これらが、どれだけ一定であるかが、時計の性能を表わす大事な指標です。

いい時計を作ることは、いい振り子を見つけて正確に測ることです。我々物理学者は、物理定数は不変だと信じているので、原子の振り子を数えれば不変な 1 秒を皆で共有できるはず。このための道具が原子時計です。でも、物理定数が不変と仮定しているだけで、検証されてはいません。いい時計を作ると、最終的にはこのような物理の重要なことが分かるかもしれないと思って研究しています。



時計の精度の表現

(いい時計を作ることはいい発振器を作ること)

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

(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)

先ほど時計精度の表し方の話をしました。例えば年差 10 秒の腕時計を買いに行きます。高性能のクォーツ時計だと 1 年で 10 秒しか狂いません。この分数で時計の性能を表します。3 × 10⁻⁷、マイナス 7 乗とは小数点以下に 0 が並び 7

つ目に数字、この場合は 3、が来るというものです。この指数部の数字を使って、7 桁の精度の時計という呼び方をします。今の 1 秒の元になっているセシウム原子時計は、新聞で紹介される時は 6000 万年たって 1 秒の精度と言われます。1 秒を 6000 万年で割ってみると、5 × 10⁻¹⁶、従って 15 桁か 16 桁ぐらいの精度です。

これから、光格子時計の話をします。ゼロが 18 個並ぶ、18 桁の精度の時計です。これを言い換えて、宇宙誕生から 138 億年、さらにその 2 倍たっても 1 秒も狂わない時計ですと言うと新聞記者さんには喜ばれます。とは言え、そんなに長生きする人はいないので、1 秒狂っても狂わなくても、その精度の恩恵にあずかる人はいないだろう、と考える人も多いだろうと思います。どうありがたいのか、どう世の中の見方が変わるかのお話をしていきます。

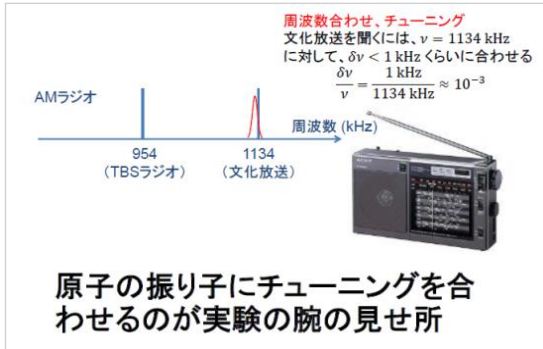
ちょっと脱線します。大きな数の呼び方は、何億円、何兆円、と聞きなれていますが、小さい呼び方はあまり聞きません。便利な時代で、ウィキペディアで小さな数の数え方を調べるとすぐに出てきます。分、厘、毛ぐらい迄は何となく知っています。

10⁻¹⁸、マイナス 18 乗はどう呼ぶか、格好いい名前がついていて、「刹那」というらしいです。ということで、光格子時計は「刹那」を測る時計です。

小さな数の数え方(分、厘、毛、糸、…)

分	ぶ	0.1(10 ⁻¹)
厘	りん	0.01(10 ⁻²)
毛	もう	0.001(10 ⁻³)
糸	し	0.0001(10 ⁻⁴)
忽	こつ	0.00001(10 ⁻⁵)
微	び	10 ⁻⁶
——中略——		
遼巡	しゅんじゅん	10 ⁻¹⁴
須臾	しゅゆ	10 ⁻¹⁵
瞬息	しゅんそく	10 ⁻¹⁶
彈指	だんし	10 ⁻¹⁷
刹那	せつな	10 ⁻¹⁸
六德	りつとく	10 ⁻¹⁹
虛空	きょくう	10 ⁻²⁰
清淨	せいじやう	10 ⁻²¹
		10 ⁻²²
		10 ⁻²³

光格子時計は「刹那」を測る時計



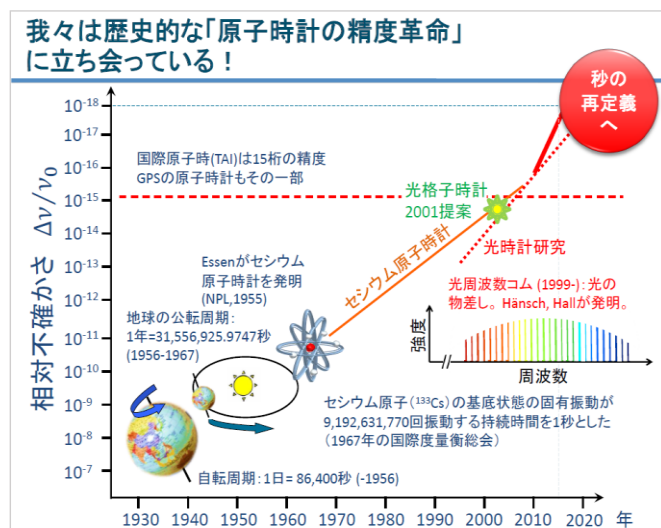
原子時計を作る時に我々がやることは、原子の振りにチューニングを合わせることです。チューニングと言っても、今の若い学生には全然通じません。恐らくこの会場にいる世代だと、チューニングは分かると思います。

昔の AM ラジオ、例えば文化放送が聞きたいと思ったら、1134 キロヘルツにチューニングのノブを回す。うまく回すと文化放送のラジオが聞こえる。この時どのぐらいの精度で、手でチューニングしているかというと、恐らく 1134 キロヘルツに対して、1 キロヘルツの精度まで手で合わせると、音が聞こえてくると思います。そうすると、このチューニングの精度は 10^{-3} です。我々の腕の見せ所は、原子の振動に合わせて 10^{-18} の精度でチューニングすることです。

今、原子時計の精度革命に立ち会っています。

昔、時計を作るのは天文学者の仕事でした。天体観測をして時間を刻む、そういう人は王の側近でした。実際、この天文学的な秒が、半世紀前までは現役でした。地球の公転周期で時間を刻み、時間の測定精度は 10 桁ぐらいでした。

1967 年に天体観測から、セシウムの量子の振動を使った原子時計に変わりました。今グーグルが量子超越を言っていますが、時計の量子超越はもう 50 年も前に起きていました。セシウム原子時計で、10 桁の精度で 1 秒の定義を引き継いで以来、その精度はどんどん向上して、今は 15 桁から 16 桁の精度でセシウム原子時計は刻んでいます。GPS のナビゲーションもこのような高精度な原子時計のたまものです。



セシウムの原子の振り子は、先に言ったように 1 秒間の 92 億回振動するマイクロ波の振動です。これに比べて 1 万倍以上も早く振動する、光の振動を使うと、時計の高性能化が期待できます。1960 年にレーザーが発明されると、光の発振器を使った原子時計を作ろうという流れができました。レーザー技術の成熟した 1980 年ぐらいから、光原子時計の研究が本格化しました。

今日お話しする光格子時計は、2001 年に提案した方法です。光格子時計ではセシウム原子時計の精度を 3 桁改善して、18 桁の精度で時間が読めるようになりました。セシウム原子時計よりも 1000 倍も精度よく 1 秒を定義できるので、10 年くらいのうちに、秒の新しい定義がなされるだろうと予想されています。

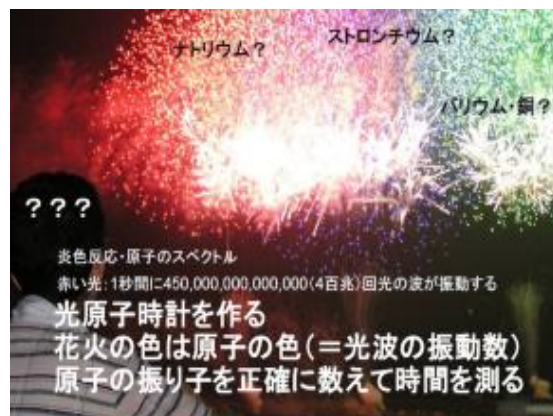
- GPS/GNSSの利用で、原子時計は日常で不可欠な道具になった
- さらに、3桁精度が向上すると何ができるだろう？
- 不連続な精度向上がもたらす、不連続な未来を考えよう

原子時計は日常に不可欠なツールです。今セシウム原子時計で十分用が足りているからいいとも思えますが、時計の精度が更に 3 桁上がるとどんなことが見えてくるのか。そんな未来を考えてみたいと思います。

原子時計が測っているのは花火の色です。花火を見ていると、どの原子が光っているのかを考えたくになります。だいたい色はナトリウムの原子が光っていて、青緑色はバリウムや銅が光っています。

これからお話しする光格子時計で使う原子はストロンチウムで、青と赤のスペクトルの炎色反応を示します。下の写真で、赤と青が混ざって紫色に見えている部分がありますが、これがストロンチウムの花火です。今回時計に使うのは赤色で、1 秒間に 400 兆回、光の波が振動します。光格子時計はこの 400 兆回の振動を正確に測って時計を作ります。

これからの話の前に、量子の世界の説明をする必要があります。今使っているレーザーポインタもそうですが、光は粒であり光子と呼ばれています。光子はエネルギー、プランク定数×振動数、を持つ粒子です。



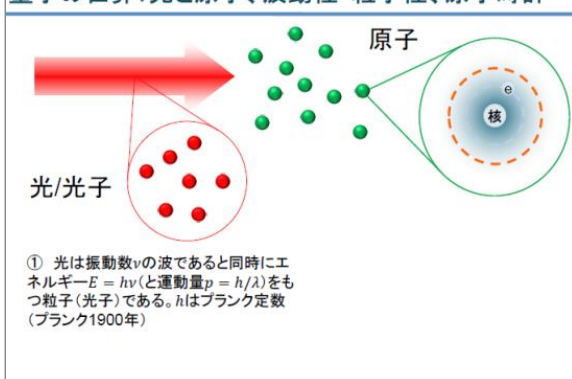
この光子が原子に当たります。原子の中身は、図のように核の周りを電子が回っています。ちょうど特定の振動数のエネルギーの光子が来ると、基底状態を回っている電子の軌道が励起状態になります。これを量子跳躍と呼びます。花火の場合、火薬を爆発させて基底状態の原子を励起状態に量子跳躍させます。励起状態の電子が基底状態に緩和するというプロセスで、光を出します。その光を見ているのが花火です。

花火で見た色の光の振動をきちんと数えるのが原子時計です。原子時計では原子の振りの振動数、つまり、花火の色を正確に数えて振動の基準にします。

それをどうやって時計にするか。原子（緑）に光（赤）を当てます。この時、原子の共鳴周波数に光の周波数が合うようにうまくチューニングする仕組みを作ります。そして原子の周波数を発振器にコピーすることができたら、歯車を使って分周します。そして何回数えたら1秒、とすれば時計になります。

今日お話しするのはこの部分で、レーザー光の周波数を、うまく原子の振りに

量子の世界：光と原子、波動性・粒子性、原子時計

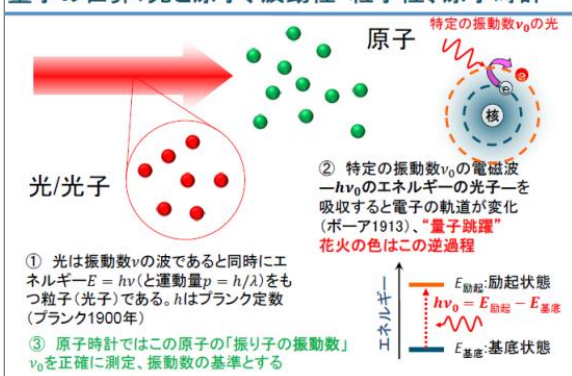


にチューニングを合わせて、原子の振りの周波数に合った、安定した発振器を作るという話です。

原子の周波数を高精度に読み取るためには、できるだけたくさん原子を集めて、強い信号を得ることが必要です。たくさんの原子を捕まえるために光格子を使います。難しい話は省略しますが、原子を掴むと、原子の振りの周波数が変わります。何とかうまく周波数を変えないように掴む方法はないかと考えたのが、光格子時計です。

時計の研究はなぜ面白いのか。時計は、原子のミクロな世界と

量子の世界：光と原子、波動性・粒子性、原子時計



マクロな世界が会うところで、振動はミクロもマクロも一緒です。研究者が顕微鏡を覗いて小さな世界を見るように、我々はミクロな振動をマクロな時計にコピーすることで、ミクロな振動を研究します。ミクロな世界で何が起きているかに興味があります。

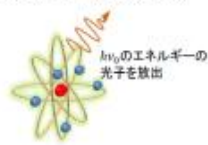
これは私のセイコーの時計です。
20 年ぐらい前、光格子時計の最初の研究を始めたころにある賞を頂いたときの副賞です。確かに狂わなくて、いい時計は素晴らしい。これは、時計の研究をなさいともらった副賞のような気がします。

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



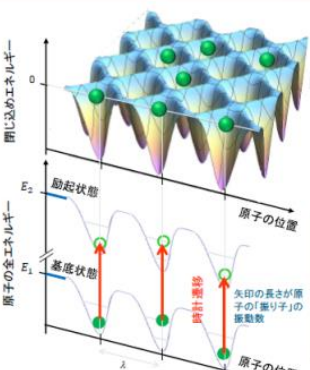
- ミクロでも、マクロでも、振動は同じ
- ミクロな振動をそっくりマクロな振動にコピーするのが原子時計
- 時計の研究では、ミクロな「量子の世界」をマクロな世界に直接つなげて、ミクロな世界を調べられる

そのころ光格子時計という方法を考えました。原子を捕まえるために、光の定在波で卵パックみたいな原子の容器をたくさん作ります。たくさんの容器を作れば、そこにたくさんの原子が捕まえられます。原子を捕まえるには、空間的に原子のエネルギーを変えればいい。エネルギーが一番小さくなる場所に、原子が捕まえられます。

しかし、原子時計で正確に測りたいのは原子の基底状態と励起状態のエネルギー差です。もし原子のエネルギーが空間的に変わると、時計の周波数が変わってしまうので、せっかくの原子時計が台無しです。

光格子時計で考えたことは、原子をつかむために基底状態のエネルギーを空間的に変えるとき、全く同じように励起状態のエネルギーも変えることができれば、

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：

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

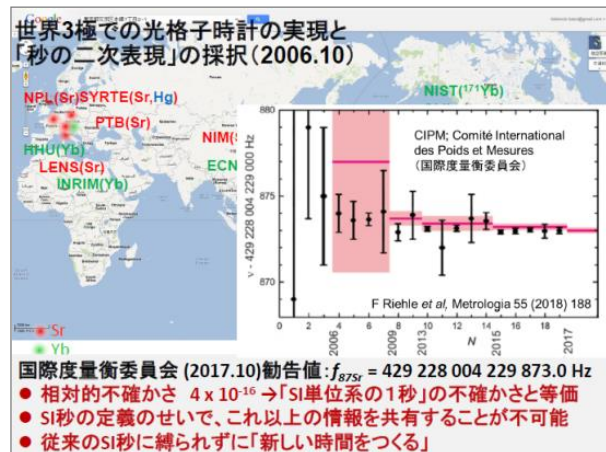
$$\Delta\alpha(\omega_m) = \alpha_g(\omega_m) - \alpha_g(\omega_m) = 0$$
- 高次項の影響：18桁目では見えない

14

このエネルギー変化が相殺して正確な時計が作れるだろうということです。そんな提案をしたのが、2001 年の会議でした。18 桁ぐらいまではこのエネルギー変化を正確に合わせられるだろうと計算し、18 桁の時計ができます、と発表しました。

この提案をした 2 年後の 2003 年に最初の実験が成功しました。その後、2005 年には光格子時計ができました。その翌年には、同じ手法をフランスやアメリカのグループが採用して、日本、フランス、アメリカで同じ時計ができ上がりました。

世界 3 極で実現できたので、この時計を、将来の秒の定義の候補にしようと議論されたのが 2006 年です。今では、世界で 30 ぐらいのグループが光格子時計の開発を進め、ストロンチウムを使った光格子時計では 16 桁の測定ができています。



2005 年に開発が始まったころは、おおきな不確かさがありました。しかし、それから 15 年経ち、世界中の測定が高精度になりました。

国際度量衡委員会という機関があり、世界中で得た周波数から勧告値を決めています。有効数字を見ると 16 桁です。これは、今 1 秒の定義の実現精度が 16 桁しかないので、それ以上の周波数を書きたくても、表現する手段がないためです。秒の定義の精度を超えて数値を共有することは不可能です。

研究者としては、こういう状況が面白い。従来の枠組みにとらわれずに自由に研究にして、新しい時間をつくることができます。科学者としては、いままで見ることができなかった時間の隙間にどんな新しい物理や応用があるのかを、探していきたいと思っています。

国際単位系の秒は科学技術の要です。最初にご紹介した GPS を使った時刻同期は、現代社会の基幹技術です。

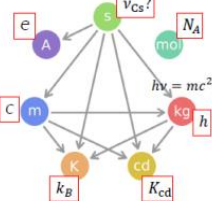
質量原器が廃止され、プランク定数で質量を定義するという定義の改変が今年の 5 月に行われ、大きなニュースになりました。新聞を読むのを楽しみにしていましたが、どの紙面にもプランク定数の説明はありませんでした。これは、すごく難しい話です。

なぜプランク定数を定義すれば質量になるか。光速は 1983 年に既に定義され

ています。一方、アインシュタインの質量とエネルギーの等価性から $E=Mc^2$ 、が成り立ちます。このエネルギーはプランク定数×周波数で測れるので、プランク定数を定義しておけば、質量を知りたいければ周波数を測ればいい、ということになります。難しいですが、次の世代の

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、量子標準差計への応用...



若者は、きっとこれを普通に理解するようになるのだらうと思います。

こうなると質量を測るのも時計の仕事です。将来、セイコーで質量を測れるという話にしてもいいだらうと思います。

先ほど度量衡という言葉が出てきました。度量衡の言葉は、秦の始皇帝が国家を築くときに度量衡を整備しました、と中学校や高校で習いますが、それ以降ほとんど使うことはありません。

度量衡、特に時間は、重要な社会基盤です。時計のグローバルスタンダードは何か。英国議会の決定でハリソンに精巧なクロノメーターを作らせました。そのおかげで航海の安全が保障され、世界の海を制覇して、大英帝国が誕生しました。そのころ時間を測る役割をしていたのは天文学者でした。グリニッジ天文台を時間の原点にする、グリニッジ標準時が設定されました。若い人は知らないかもし

れませんが、ここにいる世代の皆さんは記憶にあるのではと思います。そうして日本は9時間のオフセットを持つことになりました。

フランス革命以来の近代度量衡でメートル法ができました。先ほどから SI 単位ができてきます。英語ならインターナショナル・システムですが、

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)

メートル法以来、フランス人が守ってきた分野なので、フランス語、システム・インターナショナルなのです。

現在、時刻同期のデファクトスタンダードになっているのは GPS です。これは米ソ冷戦下、米国の国防総省が進めた大プロジェクトです。このように、国際戦略の要は時計であると思うと、時計開発は力を入れるべき研究課題です。

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
- 19桁の光格子時計もできそう。1mmが測れる
- まとめ

これからお話するトピックスです。光格子時計を作ったので、次は小型化、可搬化を考ます。

まず、小型化の青写真を作ります。今まで実験室で使っていれば満足で

したが、実験室から出してみよう。その一環でちょうど去年の今ごろ、光格子時計をスカイツリーに持って行きました。そしてスカイツリーの高さを利用して、相対論の検証をしました。

今は 19 桁の時計を作ろうとしています。そうすると、1 ミリの高さも時計で分かります。それが何に使えるか、考えていきましょう。

写真は我々の実験室です。光格子時計が入っている黒い箱は、1 辺 60 センチぐらいの立方体です。2 台の時計を作るのに 20 台の半導体レーザーがあり、その制御のために、多数のエレクトロニクスやオシロスコープがあります。

20 年近く前にこの研究を始めました。将来技術の大事な基礎研究であると言って研究費をもらっ



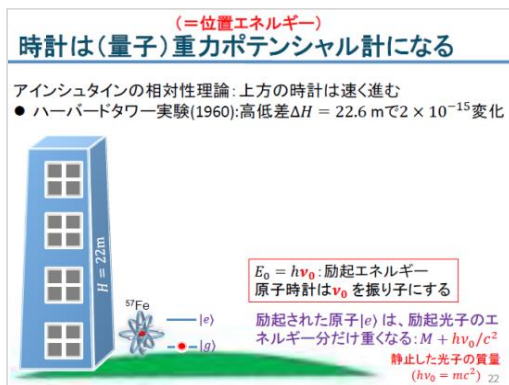
実験室のエレクトロニクスと光学系を19桁ラックに搭載可能な2箱にまとめる島津製作所との共同開発を2017.04に開始

たので、20 年たった今、これを技術として成熟した形にしたいと思っています。

こんな多くのレーザーを使った複雑な装置は実験室では使えても、実用にはならないと多くの研究者が思っていました。この常識を変えてみたいと思っています。

ちょうど 2 年前、島津製作所と、光格子時計を小型化する共同研究を始めました。島津製作所にエレクトロニクス部分を担当してもらいました。我々もレーザーを小さくまとめて、箱に入れました。実験室いっぱい広がっていた装置が、この 2 箱と光格子時計の本体だけに集約できました。時計は比べないと意味のある数字が測れないので、同じ性能の時計を 2 台作り、比較する実験を始めました。

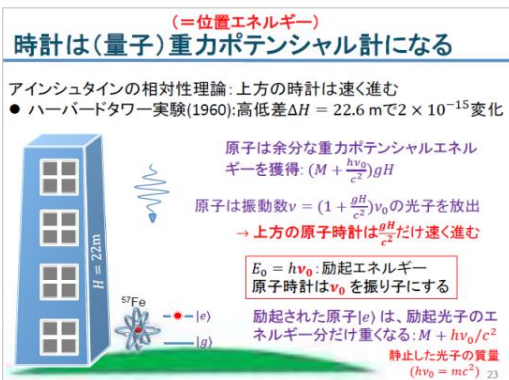
時計は高さのセンサーになるという話をします。これは相対論の話です。高いところの時計は早く進みます。この最初の実験が、60 年前のハーバードタワー実験です。そのときは、ハーバード大学の 20 メートルのビルの高低差で、わずかな違いが見えました。



基底状態と励起状態のエネルギー差を見るのが原子時計です。エネルギー差をプランク定数で割った、原子の振りの振動数が測定できます。

では、この振りの周波数、振動数が高さでどう変わるのか。共鳴するエネルギーの光を入れると、原子が励起状態になります。この時、原子の重さはどうなっていると思いますか。核分裂で質量欠損が起これとその分エネルギーに変わって原子力エネルギーになりますが、その逆のことが起こります。

励起された原子は、基底状態の原子に比べて励起エネルギーをもらっ



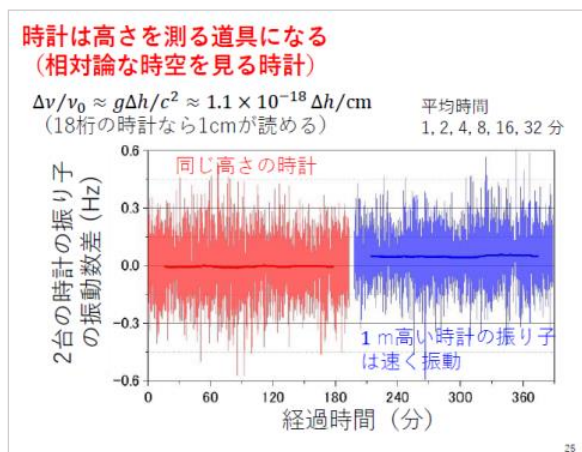
ています。そうすると、励起エネルギー分だけ重くなっています。先ほど、今年

の 5 月からプランク定数で質量を定義すると言いましたが、まさにその話です。光子のエネルギー分だけ重くなった原子をビルの上まで持ち上げていくと、原子は、重力加速度 g と高さの差 H を掛けた重力のエネルギーを受け取ります。

ビルの上の原子が光を出すときには、この重力のエネルギー分、原子は高い振動数の光を出します。つまり、上の原子の振りは早くなります。早くなった振りを見て時間を決めていたら、早く時間が進むことになります。

去年の 9 月に NHK が取材に来て、実験室の中で高さを変えてみてと言われて、時計を持ち上げる実験をしました。

2 台の原子時計を用意して、1 つはリフターで 1 メートル持ち上げ、両方の時計の振動数を比較したのが右の図です。横軸が経過時間で縦軸が 2 台の時計の振動数差です。赤色が 2 台を床に置いたとき、青色が片方を 1 メートル持ち上げたときです。最初は、



2 台の時計が同じ高さなので、原子時計の振りの振動数の差は 0 でした。太い線が 30 分間の隣接平均で、振動数の変化がよくわかります。1 メートル高い時計は早く振動し、このデータでは 47mHz 上の時計は早く振動しています。

刹那を見る光格子時計、18 桁目の時間が測れるという話をしましたが、1cm 時計の高さが変わると、18 桁目で時間の進み方が速くなります。従って、18 桁の精度の時計を使うと、1 センチメートルの高さの違いが分かります。

こうなると、時計は時間を共有するための道具というより、むしろ、時計を見比べることによって高さの違いを知る、相対論的な時空を測る道具です。ということで、今日の講演タイトルになるわけです。

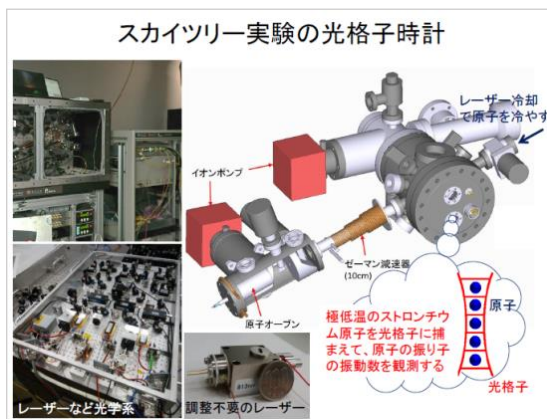
時計で、重力で曲がった時空間を映し出すことを、サルバドール・ダリは 80 年も前に想像していました。アインシュタインの相対論にインスパイアされて、サルバドール・ダリは、時空は地球の重力で曲がっているのを、「記憶の固執」と名付けられた絵の中で、曲がった時計で表現しました。天才画家はすごいと思

います。アインシュタインの理論を聞いてもなかなかこういう世界は想像できません。我々は、実験してみてようやく実感できました。

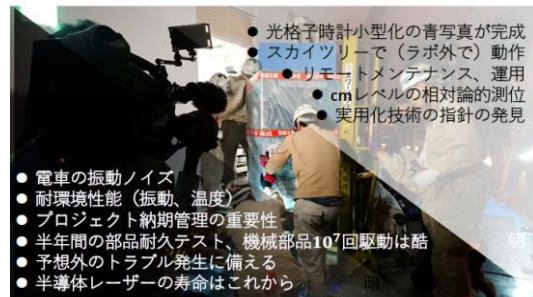
スカイツリーに小さくまとめた光格子時計を持って行きました。営業終了後、深夜の 2 時に 450 メートルの小さな部屋まで運んでもらいました。スカイツリーでの実験の為に、小型化の青写真を作ることができました。しかしかなり苦労もしました。スカイツリー

は電車が 3 本乗り入れているので、いつも振動があります。また、営業中はお客さんがいるので 20℃ですが、夜中になると夏は 30℃になり、冬は 10℃になります。実験室と違い過酷な環境で、高精度な時計を動かさなければいけません。なんとか時計を動かして、センチメートルレベルで、スカイツリーで高さが測れました。

スカイツリーで使った時計の本体はこんな形をしています。ずいぶんコンパクトになって、長さは約 40 センチぐらいです。この中は超高真真空になっていて、ストロンチウムの原子を捕まえます。これを運転するのに多くのレーザーが必要です。レーザー部分は横幅 40 センチ、長さ 60 センチ程度に小さくまとめました。レーザー調整はなかなか手間のかかるもので、溶接して固め可動部がないようにしました。この辺のプロセスは、今のクォーツの時計が実用化された時と通

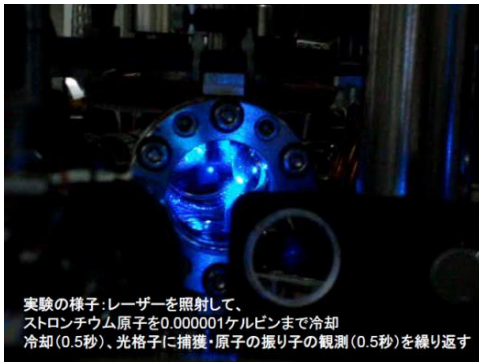


スカイツリー実験、相対論の検証、成功と失敗
—失敗は最高の教師である—



2018.10.03 2 am、スカイツリー450 m、天望回廊～2019.04.08まで実験

じるものがあります。昔の実験の教科書には、水晶の発振器は大事に扱いなさい、角を曲がる時は加速度を掛けないように曲がるようにと書いてありました。少し昔のレーザーはまさにそんなもので、レーザーは注意深く取り扱わないと思うように動きませんでした。



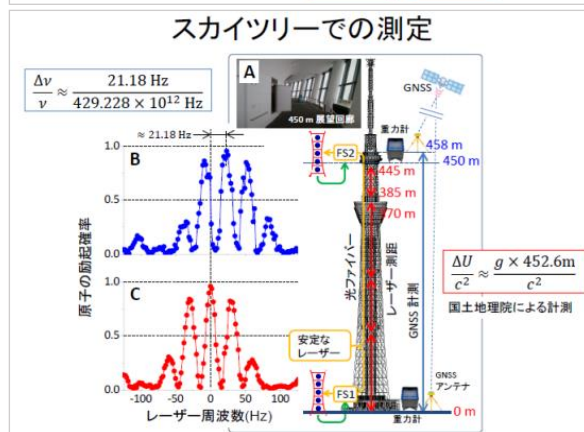
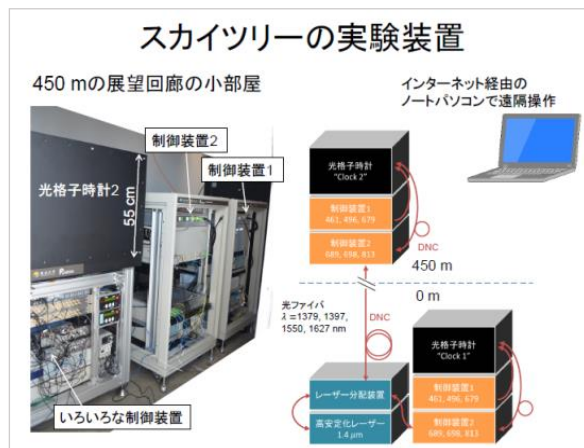
今回のように調整箇所をなくして安定したレーザーを作ると、今後はどんどん小型化する可能性があると思います。

この中で、原子をレーザー冷却するというプロセスがあります。ストロンチウムの原子にレーザー当たるだけで、 10^{-6} ケルビンという極低温まで冷えます。そ

の極低温の原子を、光格子に捕まえて実験を進めて行きます。スカイツリーの上の時計と下の時計を、光ファイバーでつなげておきます。先ほどお話ししたのと同じように、上の時計の振りの振動数、下の振りの振動数を比較します。スカイツリーには頻繁に行くのは大変なので、全てをインターネット経由でリモートコントロールできるようにしました。そうすると研究者は、自宅や実験室からパソコンを操作すれば、この時計が動くということになります。

右の図は、スカイツリーで使った実験装置とその結果です。地上 0メートルと、450メートルの展望回廊の小部屋に時計を置きました。二つの時計の振りの振動数を比較すると、上の時計は 21ヘルツ早く振動しました。

この結果が相対論と合っているかどうかを検証するために高低差を調べ、重力のポテンシャルを調べます。それを国土地理院にお願いして、やってもらいました。そうすると、時計の重力赤方偏移は重力のポテンシャル差から計算した値とぴったり合いました。



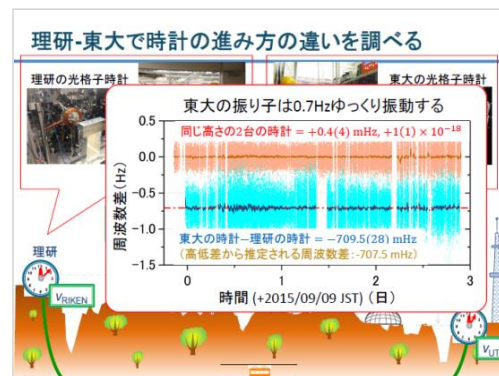


新聞が取材してくれるのはありがたいですが、どれだけ早く時間が進むのかという質問の説明が難しいです。上の方が 21 ヘルツ速く振動しています、と言われても実感は難しい。1 日で 4 ナノ秒速く進みます、というのもよく分からない。

では 1 年にしたらどうか。1.5 マイクロ秒、上にいると確実に速く進みます。これもまだわかりにくいようです。サイエンスとしては、この地上実験で相対論を 5 桁の精度で検証できたことが大きいです。時計は時間を共有するための道具から高さを測る道具、高度差計になる、と実感してもらえれば大成功です。光格子時計をこれからどんどん小さくして、道端にある水準点を光格子時計に置き換えるようになるのいいと思っています。そうすると、地面の高さが時間的にどう変化しているのかリアルタイムで読める世の中が来ます。

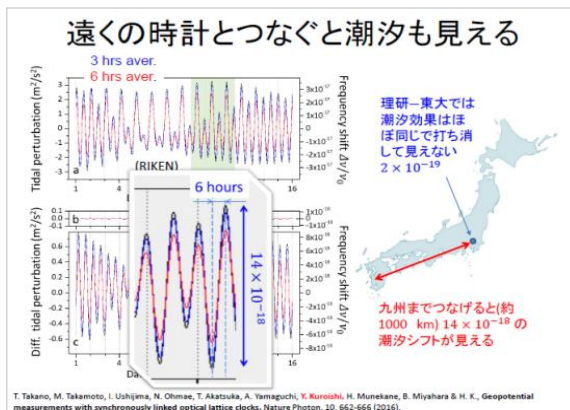
この手始めに、数年前、東大の時計と理研の時計を比べてみました。地形の断面を見ると、理研は東大に比べて標高が高いところにあります。国土地理院の方をお願いして、東大の時計と理研の時計の高さがどれだけ違うか、水準測量をしてもらったところ、標高差は 15m でした。

その間に、我々は時計の周波数の違いを測定しました。理研で同じ高さに置いた時計は、18 桁まで周波数は合っていました。しかし、東大に置いた時計を見ると、700 ミリヘルツ、ゆっくり振動していることが分かります。



これは国土地理院の方をお願いして測ってもらった 15 メートルの標高差とぴったりに一致しています。

相対論の検証という目的なので 2 つの方法で測りましたが、時計の周波数差だけを見ていれば、高低差がわかるので水準測量が不要になる、というのが次のステップです。



時計をつなぐと、潮汐効果も普通に見えるようになります。東大と理研は 15 キロメートルしか離れていないので、月や太陽による潮汐はほぼ同相で起こり、同じように上がったり、下がったりするので、その差分はわずかミリメートル程度です。

ところが、例えば東京と九州の時計を繋げると、潮汐を受ける位相が 1000 キロメートル分違い、東京から見ると九州の時計は 6 時間で 14 センチぐらい上下しているように見えるはず。そうすると、標高とは何かという話にもなってきます。非常に堅牢な時計、時間を持っていると地球の柔らかさが見えるようになります。

時計を使って高さを測ろうというのはもう現実の話です。ヨーロッパ、例えばドイツとフランスは国境を接していますが、ドイツとフランスの標高の基準は一緒ではありません。そうすると、ドイツからフランスの国境を渡るときに、標高がいきなり 10 センチずれるということが起こります。

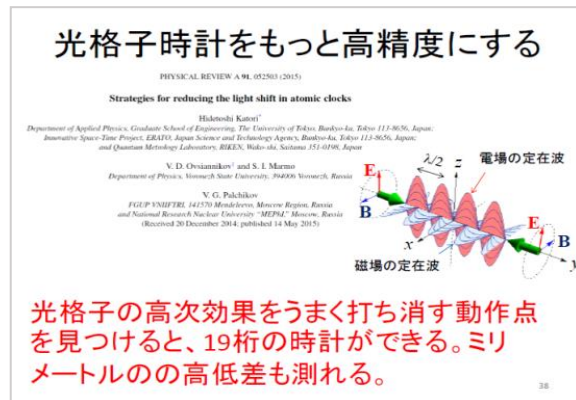
それでヨーロッパ圏で、標高の統一をしたいということになり、そのためにドイツ、フランス、イギリスで光格子時計を作って、光ファイバーで繋いで、欧州で標高の基準を作ることを始めています。



日本は、プレート境界に位置した特殊な環境にあるので、火山が噴火したり、地震がおきたりします。光格子時計でリアルタイムに標高差の変動が見えるようになると、予兆を捉えて減災するという応用もあると思います。

時計を使ってどんなことが見えるのか、いろいろな予想がされています。時計のネットワークを作って、そこにダークマターが来ると、時計のネットワークがずれてダークマターが見えるでしょう、とか理論家たちがいろいろ予想をしています。

正確な時計を比較することによって、今までの物理で見えなかった新しい物理が発見できたらいいです。応用も面白いのですが、新しい物理を探るプローブとして非常に興味があります。



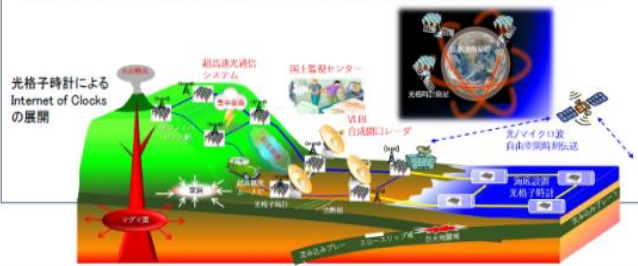
現在は 18 桁の時計で、高さの精度が 1 センチで測れます。もっといい光格子時計を作り 19 桁の精度を目指しています。恐らく 1〜2 年後には、ミリメートルの高低差が測れるようになると思います。

光格子時計を提案したころは、そんなアイデアは上手くいかないだろうと多くの人が言うので、Curiosity driven に研究を進めました。いまや、これが技術として成立したので、次はそれを使って新しい産業の創出を考えたいと思っています。まず実験室から出して、無人運転とリモートメンテナンスがスカイツリーの実験でできました。次は、時計のネットワークを作ると、地下でどんなことが起こっているのか、プレートがどう動いて地上が変動しているのか、あるいはマグマが上がってきて、山腹が上昇するのも見えるでしょう。山腹の上昇を捉えることができれば、噴火の予測ができるのではないかな。小さな時計を作り、それで時計のネットワークを作り、新

Curiosity drivenなサイエンスから産業創出へ

光格子時計技術の産業化と基礎研究へのフィードバック

- 光格子時計のラボ外・無人運転化、リモートメンテナンスの実証
- 小型乗用車に光格子時計を実装(2019)、全世界の標準研に正確な時間を運ぶ(秒の再定義の布石)。相対論的測地の地震学、火山学へ適用の調査
- 通信ネットワーク網への光格子時計の網羅的設置による高精度時間インフラ構築、GNSS非依存な高度非同期ネットワークの構築
- 相対論の時計ネットワークによる国土環境監視、減災利用、物理定数の恒常性、相対論の検証を通した標準理論を超える物理学の実験的解明、光格子時計による秒の再定義



しい現象を見ていきたいと思っています。

今日の初めのスライドでは、時計の精度を表すのに 1 秒ずれるのにどれだけかかるか、という話をしました。実際に、通信や、情報処理で時計を使った装置を設計している人には、むしろクロックがナノ秒ずれるのに

かかる時間の方が、もっとリアルな話だと思います。

例えばペンティアムの CPU のクロックは数ギガヘルツです。そうすると、1 クロックサイクルは1 ナノ秒です。最初に出したスライドを書き直してみます。水晶が入っているクォーツ時計だと、1 ナノ秒ずれるのに 3 ミリ秒しかかからない。そうしたら、PLL で常に同期していなくては使えないということになります。商用の原子時計は 3000 万円ぐらいしますが、それを使っても 1 ナノ秒ずれるのに 5 時間。日々時間合わせをしていたら使いにくい。

システムクロックが1ナノ秒ずれるのにかかる時間

通信や情報処理では、1秒のずれよりも、nsのタイミングジッターのほうが気になる

$$\frac{\Delta t}{t} \left(= \frac{\Delta v}{v_0} \right) \approx \frac{1 \text{ ns}}{3 \text{ ms}} \approx 3 \times 10^{-7}$$

(最高級のクォーツ腕時計)
msごとに時間合わせが必要

$$\frac{\Delta t}{t} \left(= \frac{\Delta v}{v_0} \right) \approx \frac{1 \text{ ns}}{5 \text{ hours}} \approx 5 \times 10^{-14}$$

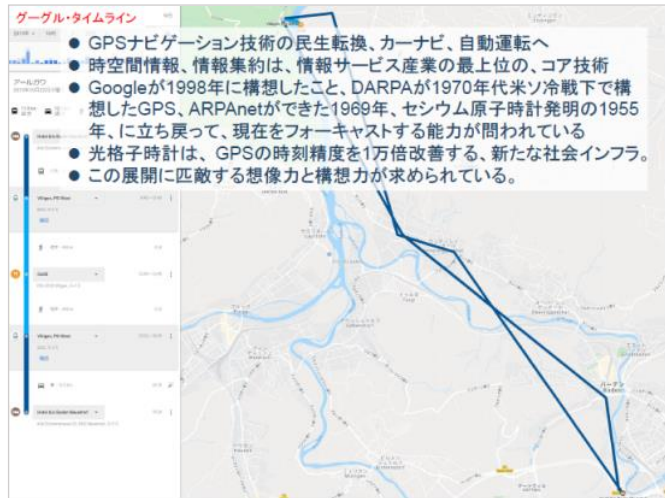
(商用の最高級原子時計、3000万円)
数時間ごとに時間合わせ

$$\frac{\Delta t}{t} \left(= \frac{\Delta v}{v_0} \right) \approx \frac{1 \text{ ns}}{32 \text{ yrs.}} \approx 1 \times 10^{-18}$$

(光格子時計)
30年以上時間合わせ不要、装置寿命より長い

光格子時計を小型化したらどうなるか。18 桁の精度だと、1 ナノ秒ずれるのに 30 年かかります。装置のシステム寿命より長いでしょうから、工場出荷時に 1 回時間を合わせたらそれで大丈夫です。2 つのペンティアムプロセッサが、光格子時計のクロックを持っていれば、クロックをつないで同期をすることなしに、30 年間もクロックサイクルがずれることなく同期動作するはずです。

グーグルタイムライン
を使われている方はいますか。グーグルマップの入ったスマホを持って歩くと、GPS で自分の場所のログが常に取りられています。これは、先月スイスに行った時に、ホテルと会議場の往復でつまらない 1 日でしたとい



う証拠です。GPS のナビゲーション技術は米ソ冷戦下に端を発し、それが民生転換されると、この技術はあっという間に、ユーザーを広げました。カーナビに使われ、次は自動運転の時代になりつつあります。

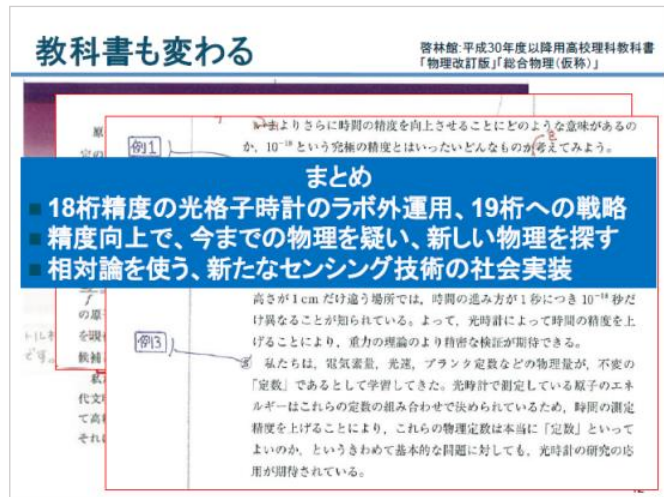
時空間情報や情報集約は、情報サービス産業の最高位に置かれています。前の講演の高橋先生のスライドにもグーグルの写真がたくさんありました。彼らは、戦略的にビジネスのコア戦略を練っていました。グーグルマップのサービスが始まったのは 2010 年で、我々はそれに依存した生活に慣れ切っています。それ以前の GPS が作られたころ、そして今のインターネットの前身 ARPANET が 1969 年。セシウム原子時計は 1950 年。こういう 60 年以上前の技術で、今の便利な世の中ができています。

光格子時計はセシウム原子時計の 1000 倍に精度を上げて、どんな使い道があるのか。今はそれを想像できる人がいません。しかし、歴史は繰り返します。これから半世紀後、どんなアプリケーションが待っているか。そこからバックキャストとして今何をするべきか。まさに想像力と構想力が問われているのだと思っています。

教科書も変わります。数年前、啓林館からホームページの写真を使わせてとの問い合わせが来ました。平成 30 年以降の物理の教科書に、光格子時計が登場するらしいです。そして、今日話したようなことを高校生が習うようです。時計の性能をどうやって評価するか、18 桁の精度ができる、そしてその時計でどんなアプリケーションがあるのか、ということが書いてあります。

相対論によると 1 センチで 18 桁目が変わるのを、高校生が習う。その高校生が大学生になったら、きっと光格子時計のいいアプリケーションを見つけてくれると期待しています。

この教科書の最後に、私たちは電気素量、光速、プランク定数等の物理量が定数だと教えてきましたが、実はそれが定数かどうか検証されていません、ということまで書いてあります。疑うことから学問が始まる、という意味で教訓的です。



最後にまとめです。光格子時計は実験室から離れて使えるようになりました。19 桁が見えるのももうすぐです。今までの物理を疑って新しい物理を探す。今まで想像しなかったような精度で今度は相対論を使った新しい先進的技術ができてくる。20 年、30 年、半世紀先を見据えて、社会実装することを考えていきたいと思っています。

ご清聴ありがとうございました。