

201702-04原子時計

一般相対論測地

「東大は理研より15メートル低い」

2017年8月ごろ、「最先端の原子時計の技術で東大（本郷）は理研（和光）よりも約15メートル低い位置にあることを一般相対論的な時間の遅れから測定した」というJST・東大・理研の香取チームの発表があった。「中学生の夏休み宿題じゃあるまいし、そんなことは地図の見方を覚えればすぐ分かることじゃない！！」「Stap細胞でミソつけた上にまだこんな無駄遣いをやっているのか！！」現代の「ネット炎上社会」では誤解がチェックなく広がりかねない。

この素晴らしい「成果」は非常に重要な意義を将来の科学に持っているものだが、成果としては日本では珍しいパターンなので、科学愛好家には真価が伝わり難いと思う。「15メートル」がポイントでないと分かる科学通の人でも「重力の高低差による一般相対論的な時間の遅れは1960年にすでに実験で発見されている、半世紀も遅れて単に再確認しただけでは・・・」と反応するかも知れない。

光ファイバー網と一般相対論を使う技術

確かにこの「科学＝発見」、すなわち「発見で目的達成＝終わり」という見方が日本では優勢で、「発見→技術→発見・・・」という長期的な見方が弱い。ファラデーの電磁誘導発見が発電機やモーターの技術を生み出し、その電磁気技術が原子や素粒子の発見を導き、それを元に真空管やトランジスターや計算機ができて情報通信と高度医療の「ハイテク社会」と「素粒子標準理論」や「ビッグバン」の発見も導き、さらに量子力学を使った通信法も目指されている、……。電磁気学や量子力学を使いこなす技術はいまや世の中に氾濫している。

こういう見方で言えば、一般相対論的な効果を使いこなす技術はあまりない。理由は測定器の精度が悪くて一般相対論的な効果が検出不可能だったからである。「重力の15メートル差を一般相対論効果で測れる技術を達成した」というのがこのニュースである。この話題は原子時計の技術を向上させて、一般相対論効果での測地やSI(国際単位系)で注目されていることなのだ。

天文時間からマイクロ波原子時計へ

技術は原子時計の精度の向上と効率化である。時間といえば天文現象が昔は基準であったが、その不正確さが分かるほどに原子時計の精度が高まり、1967年に世界標準時間の基準は原子が発するマイクロ波に置き換えられた。セシウム ^{133}Cs 原子の基底状態の超微細準位での振動現象が天体現象に入れ替わったのである。9,192,631,770回の振動を数える時間の長さを1秒と定義された。何かを測るためにはモノサシが変動しては困る。原子時計で地球自転を測るとフラついている様子が分かっている。

地球自転を天文時間として基準にしたのでは、過去45年では、平均して5年に一秒もの誤差が生ずる。Cs時計では数十万年に一秒の誤差と推定されている。原子時計とは安定した「振り子」にあたる振動現象を「計数」することである。ここで振動数が大きくなると「計数」が難しくなるので当初はマイクロ波の振動数から始まった。しかし振動周期で測定の分解能が決まるから、振動数の高い光を使った方が良いから、1980年代から光子原子時計の開発がはじまっている。

マイクロ波原子時計から光原子時計へ

光振動を「振り子」に使うのに立ちはだかっていたのは「計数」技術であったが、これを解決したのが光周波数コム（櫛）の発明である。2005年アインシュタイン世界物理年のノーベル賞はこの発明者のハッセンとホールに与えられた。パルス状に何回も発したレーザーの周波数分解を使う手法である。

光時計で精度を上げるためのもう一つの課題は原子の運動を止めることだった。動いているとドップラー効果で周波数が変わるからである。レーザーを当てて原子を止めるレーザー冷却の技術についてもノーベル賞が与えられている。これで精度が数千倍あがったが、限界の精度を実現するには多数回の測定が必要で、長い時間がかかるのが欠点だった。

光原子時計から光格子時計へ

2001年に香取秀俊が考案した光格子時計は千個の原子を一度に観測して、短時間により良い精度をだすことを可能にした。Sr87の429228004229873.2Hzの光を使う。レーザーで作った定在波の電場ポテンシャルの窪みに一つずつSr原

子をならべて一緒に測定するのである。従来は10日かかったのが二時間で済む効率化が進んだ。将来は百万個まで増やせるという。

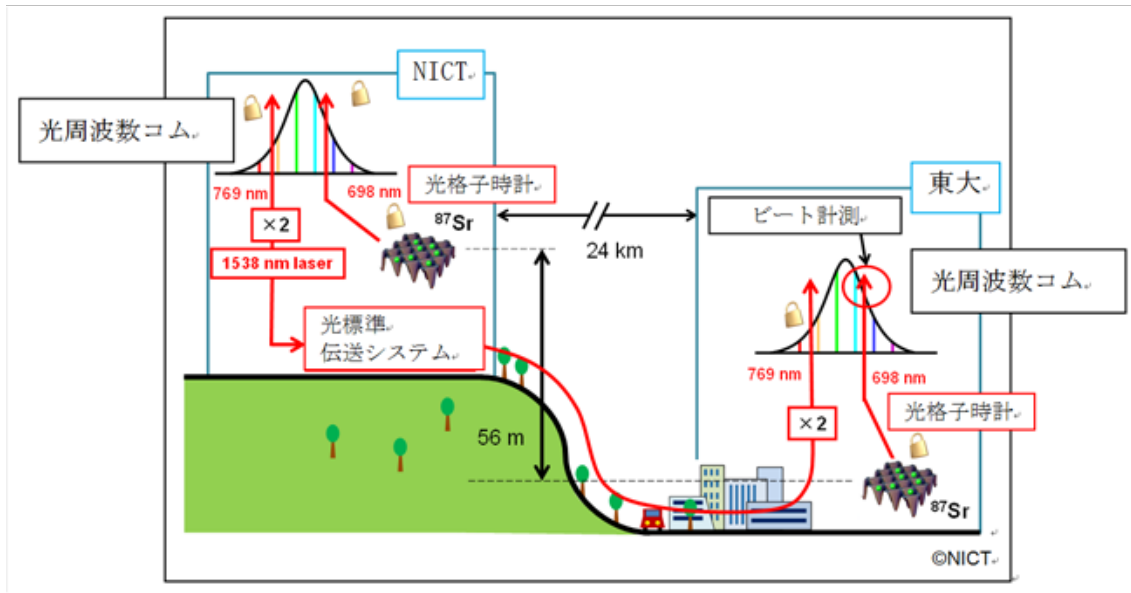
図1：理研-東大の香取研究室のストロンチウム光格子原子時計。原子時計の精度はセシウム原子時計の初期の精度 10^{-11} が精度 10^{-15} に進歩したが、香取の原子時計は精度が 10^{-18} の携帯可能な原子時計である。理研HP



2011年に初実験

世界一の精度をもつ原子時計を開発して、一般相対論の効果を使って、遠隔地の重力の差を測った実験は、すでに2011年に、東京大学と東京都小金井市の情報通信研究機構（NICT）の間で行っていた。図2はこの実験の構図を描いたものである。この図で、東大とNICTの地点に「 ^{87}Sr 」という文字のそばに卵ケースのような絵が描かれているが、これは「光格子原子時計」の概念図である。卵に当たる場所にストロンチウム原子 ^{87}Sr が収まっている。ケースは電磁場の配置で作られる。

図2 2011年と東大とNICTで時間の進み方の差から、重力のさを使って、高低差を測定した。これは香取が開発したストロンチウム光格子原子時計を用いて可能になったものである。図はNICTのHPより。



NICT 情報通信研究機構

「東大」香取グループは同じだが、この時の相手はNICTという研究所である。総務省の研究所で、この実験は電磁波計測研究所の時空標準研究室が行なった。昔の郵政省の電波研究所であり、電波天文学や宇宙開発などの日本での揺籃期には天文学との関係が深かった。いまも太陽活動の「宇宙天気予報」とサービスをしている。宇宙空間からのリモートセンシングも主な仕事だ。

また現在広く普及した電波時計サービスを行っており、さらに、「うるう秒」を挿入したりして日本の標準時の管理も行っている。ネット通信では同期した時計がどこでも使えることが不可欠になっている。だから、より精度のいい原子時計を長期的に安定に管理する責任がこの研究所にある。

特殊相対論の時間の伸び

話を元に戻して、一般相対論と時間の関係から見ていく。まず特殊相対論では「双子のパラドックス」が知られている。双子の一人が高速の宇宙旅行をして帰ってくると、止まっていた双子の方は老けているのに、旅行から帰ってきた方は若い、双子でも年が違ってくるというパラドックスである。「浦島太郎効果」などとも呼ばれる。

この効果は、人間では実験出来てないが、素粒子の走行では確認されている。例えば、大気中の宇宙線で発生する大量のミューオンの寿命が光速に近い

速度で走行するので、このために崩壊しないで長い距離走行する。こうした大気中のミューオンはメルトダウンした福島原発の炉内やエジプトのピラミットの透視に利用され話題になっている。このミューオンの崩壊で発生する待機ニュートリノは梶田ノーベル賞のテーマであった。

一般相対論の時間の伸び

アインシュタインは、「落下するエレベータ」では無重力になるように、重力と加速度運動で働く慣性力は同じものであるという等価原理を仮定して一般相対論を完成させた。それによると、無重力下での原子時計の固有时间の流れを重力下で測定すると、運動速度による「浦島太郎効果」のように、時間の流れが違ってくるのである。

時間の遅れを決める特殊相対論の速度 v と重力の関係は次のようになる。すなわち、質量 M の中心から r の位置の重力ポテンシャル GM/r と $v^2=2GM/r$ と関係している。地表での標高とは地球の中心からの半径 r の差のことであるから、対応する速度も違う。標高が低い重力の強いところほど、時間がゆっくり進む。(GM/rで表されるのは r が固体地球の表面よりも外側の場合のみ正しい)。

重力による時間のずれ

一般相対論提唱後すぐに、重力による時間のずれを、太陽からのスペクトル線の変移で試みられたが、成功しなかった。最初に成功した実験は、1960年にMITの建物の最上階と地下室の差を使って、 γ 線の振動数のズレを使ったものであった。ノーベル賞も受賞したメスバウアー効果を用いて、ガンマ線のエネルギーを精度良く測定する技術を使ったものであった。

その頃は高価な測定装置だったが、その後の半導体技術の進歩で、いまでは一般に販売されている。福島原発事故後の汚染の測定などに大活躍している。

X線天文学

最近のX線天文観測はブラックホール周りの降着円盤の内側の方からの放射の赤方変移が観測されており、これが一般相対論の効果であることが知られている。1984年に日本の「てんま」衛星の測定が最初だとされている。

これと「東大-NICT」実験にたとえていうと、ブラックホール近傍の原子（東大の原子時計）とX線を観測した人工衛星の原子（NICTの原子時計）の進み方を比較しているのである。

X線天文での測定の精度（エネルギー＝振動数の測定）は 10^{-2} とか 10^{-3} の精度があれば十分だが、「東大-NICT」実験では 10^{-18} という超絶技法が必要なのである。

重力の水準測定

香取グループの高精度の安定した原子時計を開発したことで、それを遠隔地に設置して、重力の水準測量が可能になるかもしれない。さらに、測定に要する時間が短くなれば、重力差の時間変動も測定できることになる。これは地殻変動などの新しい測定法になる。また重力差が異常なホットスポットが見つければ、それは地下構造が異常である兆候で、鉱脈の探索にも使えるだろう。光ファイバーで繋がっておれば、遠隔地でもこういう探索が可能であろう。本郷（東大）-小金井(NICT)、本郷-和光（理研）間の実験のニュースはこういう応用が可能であることを実証したのだ。

「水準を計る」と聞くと「海拔何メートル」といった高さのことだが、「海拔」の意味自体が曖昧である。潮汐があるから場所と時間を決めて定義すると、遠隔地の水準は陸上の実測をつないで決めることになり、大きな誤差が生ずる。東京湾の海面からみた鹿児島桜島の高さを測ることになるからだ。従来と違う測定法が加われば地球構造のより詳細がわかってくるかもしれない。

高さ測定の精度

それにしても一般相対論の効果を使った測定法が土木や運輸の現場に将来登場するかも知れないという話には、アインシュタインも目をまるくして驚くだろう。従来は測定できなかった僅かな効果を測定できる様になったのは原子時計の精度向上であり、将来、測定機器として販売されるかもしれない。

「時計の精度」とは例えば「1年間でのくるいは10秒以下」といったことだ。これだと精度は $10\text{秒}/1\text{年}=3\times 10^{-7}$ という言い方になる。いい腕時計の精度はこの程度だという。またGPSなどのテクノインフラを支えている原子時計の精度は 10^{-15} だという。香取グループはこれを 10^{-18} に上げたというのだ。

この 10^{-18} はちょうど高さが1センチメートルの地上重力の差による一般相対論効果で生ずる時間差に相当する。高校でも習う地上での重力加速度 g の 980cm/s^2 から次の様に計算される。 $gx1\text{cm}/c^2=10^{-18}$,ここで c は光速である。このことは、遠隔地でも高さ差の測定を1cmの精度で行うことができるということを意味する。

天文時間から原子時間へ

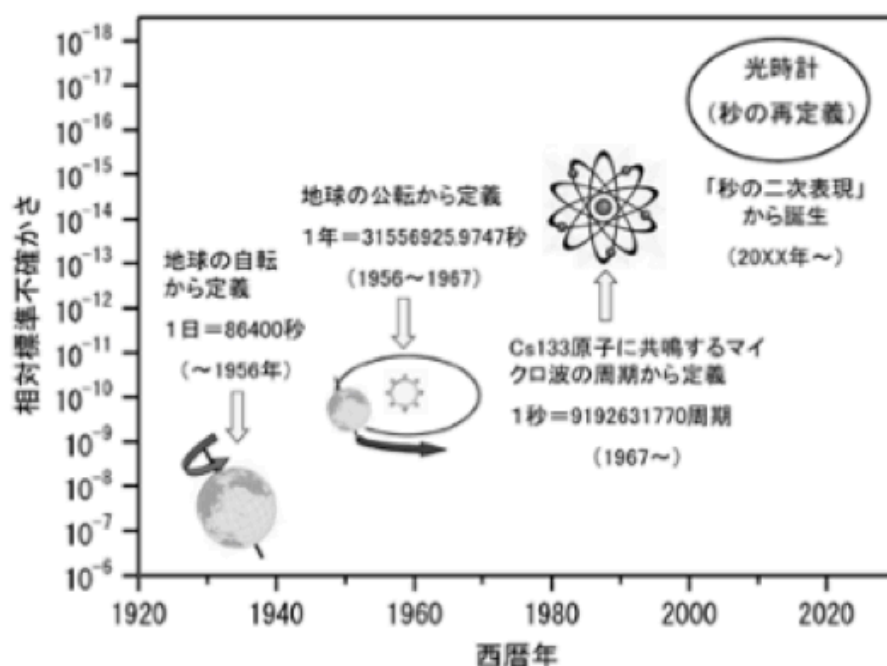


図3 時間の基準の変遷

昔しは時間の管理者は天文学だった。グリニッチ天文台を基準にした各国の天文台が星空を見て、その国の時間が狂わない様に管理していたのである。だから、天文台は大事な国の部署だったのである。

時間を管理するとは、きちんと周期的に繰り返す自然現象を見つめていて、人工的な時計のきざみの狂いを絶えずチェックする仕事である。そして長い間、この「自然現象」が地球の自転であり、地球の公転であったので、天文学がその主役であったのである。

ところが計時の技術が進歩すると天文現象の周期性は厳密に一定でないことがわかったので、基準としては不適格となり、1967年以後は、世界時などの時間管理は原子時計を基準にする国際協定に変わったのである。図3に示したよ

うに、時間基準の「自然現象」が地球自転から原子振動の変わったのだ。地球一回転を24時間の定義から、Cs原子超微細準位の遷移に対応する電波が9,192,631,770回振動する時間を一秒と定義したのである。

標準時システムへの日本の進出

日本で開発された香取のストロンチウム (Sr) を用いた光格子時計は、すでに日米仏独の4か国で安定して動いている。この現在のCs原子時計より千倍精度が良い原子時計が存在する。しかし、これが国際標準時の元になるには、離れた場所にある時計の比較もその精度で出来ることが必要だ。単体の精度だけでなく、世界のあちこちにある光格子原子時計の相互チェックの技術がなければ世界標準にはなれない。

日本とヨーロッパとかの時計を比較するには人工衛星で結ぶことが必要である。長くなると光ファイバーは適さない。現在もCs原子時計の 10^{-15} の精度で、通信衛星を用いた位相双方向比較の技術で達成されている。そして現在は海外のSr光格子時計との比較が実験されており、Cs原子時計のそれを越えたと最近発表されている。

このことは近い将来、日本で開発された技術が世界の標準時を刻むことになるかもしれないということである。これは、ちょうど周期表に日本初のニホニウムのように、度量衡の世界の標準を初めて手にすることになるのである。日本の科学技術の底力を示すことになるかと期待されているのだ。