

## 時空の歪みを探る時計



東京大学大学院工学系研究科教授 香取 秀俊

東京大学の香取でございます。最近、理化学研究所にも籍を置くようになりまして、こちらでも研究を始めています。

今日は、「時空の歪みを探る時計」というタイトルでお話しします。私たちの研究のセンスも山崎先生のお話と同じで、耳を澄ませて原子の時計の刻む音を聴いています。それによって、どんな世界が実現できるかお話ししていきたいと思います。

これから時計のお話をいたしますが、まず、どうやって時間を認識するかということから入っていこうと思います。われわれが時間を認識するには、最初に何らかの周期現象を見出します(図1)。たとえば振り子が何回振れたので、何時間たったと時間を認識しようというわけです。こういう周期現象の最たるものは地球の自転で、その日の朝から、翌朝が来るまでが1日だと考えました。前世紀になると、原子の振動を使った原子時計が発

明されました。セシウム原子時計では、原子が放出するマイクロ波の電磁波が9,192,631,770回振動すると1秒たつとわれわれは約束します。こんな話をこれからしていきます。

繰り返しの回数は、整数で $n$ 回と数えます。そうすると、周期 $T$ の振子が $n$ 回振れたら $t=n \times T$ の時間が経ったことになります。周期 $T$ の逆数のことを振動数 $\nu$ ( $=1/T$ )と呼びますが、振動数 $\nu$ を使うと、 $n/\nu$ が時間の経過です。よく時計が狂うと言いますが、振り子の周期が $\Delta T$ だけ狂うと、時間の経過は $n$ 回振動を数えて、 $\Delta t=n \times \Delta T$ だけずれることになります。これから、われわれは時間の相対的な精度というのを話題にしますが、これは、 $\Delta t$ を $t$ で割ったもの( $\Delta t/t$ )です。

たとえばこの腕時計は、1カ月で10秒遅れるとしましょう。そうすると、1カ月分の10秒、が時計の性能です。この相対精度 $\Delta t/t$ を計算してみると、 $4 \times 10^{-6}$ になります。周

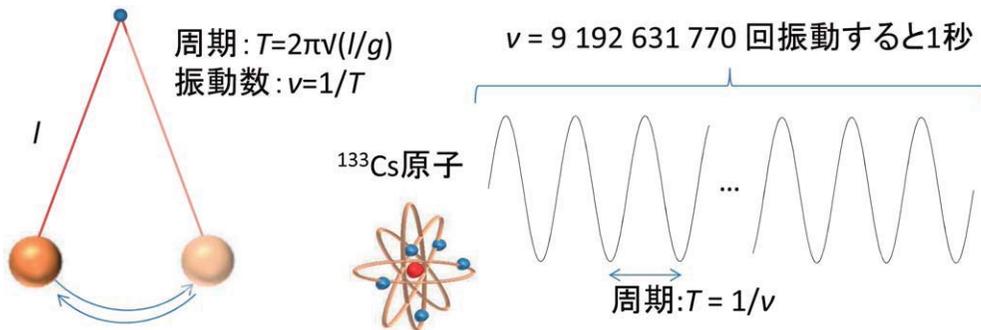


図1: 周期的な振動現象を使って時間を測る

# 1秒の定義の変遷

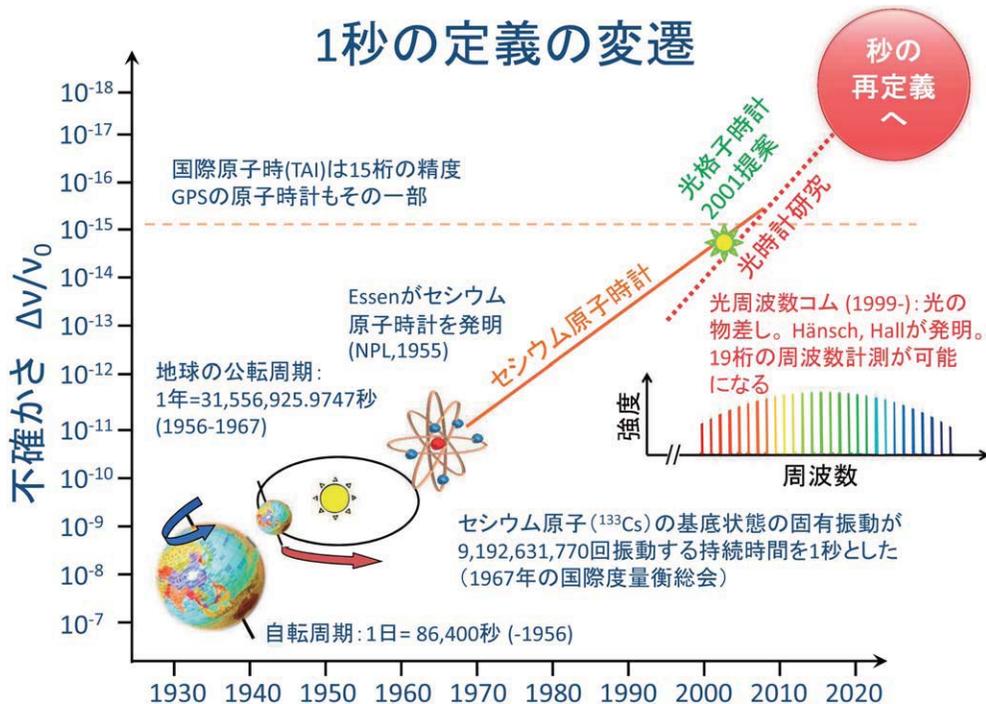


図2 : 1秒の定義の変遷

期  $T$  で表す代わりに周波数  $\nu$  という数字を使うと、周波数揺らぎ  $\Delta\nu$  を周波数  $\nu$  で割った  $\Delta\nu/\nu$  で時計の相対精度を表すことができます。

これからのお話では、時計の精度を周波数の精度、 $\Delta\nu/\nu$  を使って議論していきます。 $\Delta\nu/\nu$  が  $10^{-18}$ 、これをわれわれは18桁の時計と言いますが、これがターゲットです。18桁の時計、 $\Delta t/t=10^{-18}$ 、をもう少しわかりやすい言葉にすると、300億年たっても1秒しか狂わない時計と言ってもいいです。先ほど山崎先生のお話で、ビッグバン以来宇宙の年齢は137億年だと言われましたが、ビッグバンから現在まで1秒も狂わないような時計がわれわれの目指すところです。

10のマイナス何乗と書いてありますが、早速いまお話した相対精度が登場します(図2)。古来より人類は太陽を見て時間を認識していました。1秒の定義もまさにそれに基づいて行われ、1956年までは地球が自転する

周期から1秒を決めていました。地球の公転周期を使うと、時間の季節変動が1年で平均されるからより正確であろうと、新たな定義が変わって、1967年まで続きました。このあたりまでが、天文学者が時間を決めていた時代です。

1955年に、イギリスのエッセンが原子時計を發明します。その後、エッセンが發明した原子時計のほうが地球の公転から決める1秒よりも精度がよくなってしまったので、新しい定義を定めましようとなったのが1967年です。このとき、1秒が原子時計で定義されるようになりました。以来、セシウム原子時計の精度はどんどん向上し、いまでは  $1 \times 10^{-15}$ 、つまり15桁の精度で時間が全世界で共有されており、それを国際原子時といいます。カーナビでお世話になるGPSの中に搭載されている原子時計もその一部です。

1960年になると、レーザーが發明されました。今使っているレーザーポインターがまさ

にそれです。レーザーは光の発振器です。レーザーの発明以来、光の発振器を使った時計をつくりましょうという機運が高まってきて、前世紀の終わりには光周波数コムという画期的な発明がなされました。これを発明したヘンシュ先生とジョン・ホール先生がノーベル賞をもらったのが、2005年のことです。たとえばマイクロ波の電波だと、周波数カウンターという装置があって、波の周波数をエレクトロニクスの装置で読み出すことができます。しかし、光の周波数ではそうはいきませんでした。光周波数コムを使うと、光の周波数をエレクトロニクスの装置で直読することができます。光の周波数計測が実現しました。この結果、光の周波数を使った時計を作ろうとする研究が、一気に加速したのがこの10年ほどです。

これからお話しするのは、われわれが2001年に提案した、光格子時計という新しい原子時計です。この時計を使うと、どんな新しい世界が見えてくるかをお話したいと思います。光格子時計を含む、光を使った原子時計の研究は、ここ10年ぐらい非常に盛んになって、その精度がどんどん向上しています。やがては18桁の精度の原子時計ができるだろうと考えられています。こうなると、現在の1秒の定義の実現精度をはるかに上回ってしまうので、かつて天文観測からセシウム原子時計に新しい秒の定義が移されたように、現在のセシウム原子時計から光を使った新しい時計へ秒の定義が改訂されるでしょう。

それはおそらく10年以内に起こるだろうと予想されています（図2）。

これからお話しする原子時計の研究はなぜ面白いのでしょうか。原子時計の精度はあらゆる物理計測の中で桁違いの精度を誇ることを自慢にしています。たとえば先ほど山崎先生が、水素原子の分光は14桁という非常にいい精度でできていると話されましたが、14桁が意味するところは、現在の1秒の定義は15桁までしか実現されていないので、15桁を超えるような計測は原理的に不可能ということで

す。そういう意味で、原子時計はあらゆる物理計測の中で桁外れな精度を実現していないと困ることになります。

原子時計を研究することは原子の分光の技術のベンチマークテスト的な意味合いがあります。たとえば新しいパソコンを買ってくると、その中に搭載されたCPUがどんなにパフォーマンスがいいか、いろいろなプログラムを走らせてこのパソコンはここがいい、あそこがいいと言うわけです。分光手法の性能評価のベンチマークテストが原子時計性能を競うことです。

これからお話ししますが、原子時計は量子力学のルールだけに従って設計して運用できるので、アイデア勝負であるというところが面白いです。いくら高級な測定器を買っても、原子時計がよくなるわけではなく、うまいアイデアを盛り込むことが大事です。こういういい精度を実現して、山崎先生もおっしゃったような自然の囁きを聴きたいと思っています。極限的な精度で、物理の根幹に挑むというのは、物理学者の勝手な興味であろうと思われるかもしれませんが、時計は工学的に非常に重要です。これからお話ししますが、GPSを使ったカーナビ、いまの電波時計、高速ネットワーク技術の根底にあるのが原子時計の技術です。いまのセシウム原子時計でもみんな十分満足なのに、何でそんなにいい時計が必要なのかという質問をよく受けますが、新しい工学ニーズをこれから発見していくことが大事であろうと思っています。たとえばエッセンが50年前に原子時計を発明したときに、将来GPSを使ったカーナビに応用しようなんて思いもしなかったでしょう。いい技術があると、必ずそれに対するアプリケーションが生まれてきます。われわれの時計も、これからどんなアプリケーションが見つかるか、ワクワクしているところです。

身近な原子時計の応用であるカーナビを説明しましょう（図3）。カーナビの根底にあるのは、1905年にアインシュタインが発表した光速不変の原理です。これによれば、距

# GPSカーナビの仕組み

- アインシュタインの光速不変の原理(1905) : 距離=(光速) $\times$ (時間)
- 光速は定義値 : 299792458 m / s (~30万km/s)
- 車の時空間( $x, y, z, t$ )を知るには4台のGPS衛星(位置は既知)との距離を観測すればいい。未知数4つに方程式4つ

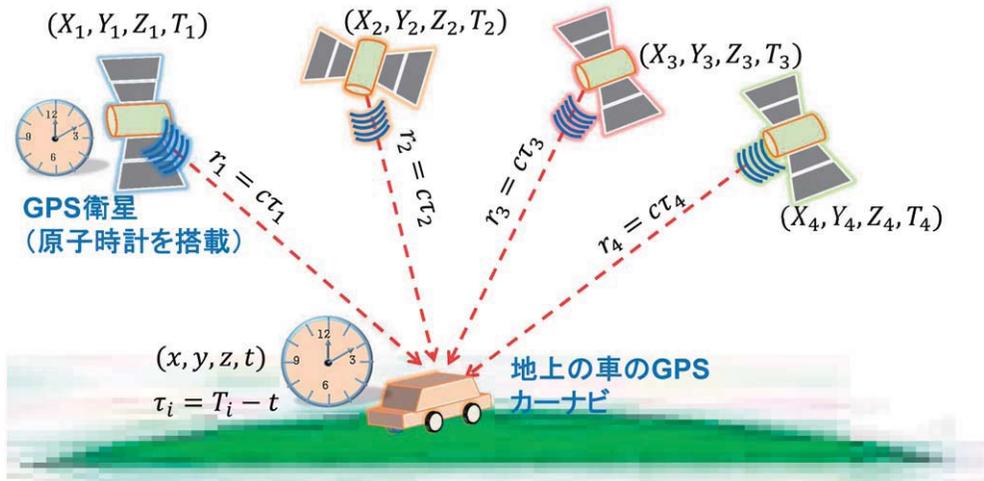


図3 : GPSカーナビの仕組み

距離は光速 $\times$ 光が伝わる時間で測定できます。光速は約30万km/秒という定義値になりました。GPS衛星には原子時計が載っていて、カーナビにもやや性能は悪い時計が載っています。両方の時計を比べてみると、GPSの衛星から来た電波が車に到達するまでの時間がわかります。1個の衛星の距離がわかってもあまり嬉しくありません。われわれは車の位置 $x$ 、 $y$ 、 $z$ と車の時間 $t$ という4つの情報を知りたい。4つの情報を知りたければ、4つの衛星を持ってくればいい。GPS衛星の場所と時間は全部把握されています。4台のGPS衛星からの信号を同時に捕捉して、それらとの距離に関して方程式が4つ立てば、4つの未知数( $x, y, z, t$ )がわかる。こんなことをやってカーナビでは車の位置情報を得ています。

こういう正確な時間がどういう重要性を持っているのでしょうか。たとえば時計のない時代は、太陽ぐらいしか時間を示すものがありません。そうしたら、太陽が南天した午の時

間に会いましょうと約束するわけです。実際、日本の明治以前は不定時法といって、日の出から日の入りまでを6等分して時間を決めていたゆったりとした時代でした。しかし、ヨーロッパの社会は時の掌握にもっとシビアでした。ナイルの氾濫、あるいは日食を予言すると、王様の権威は非常に高まるわけです。だから、時を司る天文学者は王様の側近で、重要なポストを与えられていました。

ヨーロッパでは古くから時計を戦略的な物資だと思っていて、時計の技術が一番進んだのは大航海時代です。航海の安全のためにいい時計が必要であるということで、イギリス議会は懸賞金をかけて時計を開発させ、ハリソンのクロノメーターという当時ずば抜けていい時計が出来ました。こうした時計で安全な航海ができたことが、大英帝国隆盛の源です。先ほどお話した原子時計の時代になると、原子時計を搭載したGPSを使ってカーナビができて、われわれは車の運転が非常に楽

になりました。しかしこれはGPSの想定外の応用にすぎません。そもそもGPSはアメリカの国防総省がつくった軍事衛星で、大韓航空機撃墜事件を機に民間に開放されたという経緯を持つものです。

これからお話しする光格子時計が普通に使われるようになると、いろいろ不思議なことが見えてきます。たとえば壇上でちょっと高いところにいる私の時計は、皆さんよりもちょっと進んでいるというのが見えるような時計です。

先ほどもお話ししましたが、科学の研究では定義の精度でしか周波数測定の結果を文献値にできません。いまだと15桁を超える精度で時間とか周波数を計測しても、それを論文に表現するための時間の物差しがない状況です。そういう情報共有のために時間の定義は非常に重要です。この点、フランス人は先見の明がありました。フランス革命でメートル法ができて以来、われわれが使うSI単位系（国際単位系）という科学の言葉は、フラン

ス語で語られています。例えば、SIって System International というフランス語の頭文字から来ています。日本人はこれまで時間をシビアに考えてきませんでした。欧米では時間を制することが国家戦略の中核を担っていると言っても過言ではないくらい、非常に熱心に時間を研究しています。

これからは、原子時計をつくるというお話をします。まずは、原子時計の仕掛けをお話ししてから、時間を測ることは時間のかかる作業であるという何だか不思議な話をします。これを考えていくと、たどり着けない時間があるということがわかってもらえると思います。光格子時計は、従来たどり着けないと思っていた時間を見ようとする新しい時計です。現在、光格子時計は世界各国で開発されて、秒の再定義へ向けた大きなアピールをしようとしているところです。最後に、そういう時計をつなげて何がわかるか、たとえば時空間の歪みが見えるという話をします。

まずは、「量子の世界へ」ということで、

## 量子の世界へ：光と原子、波動性・粒子性、原子時計

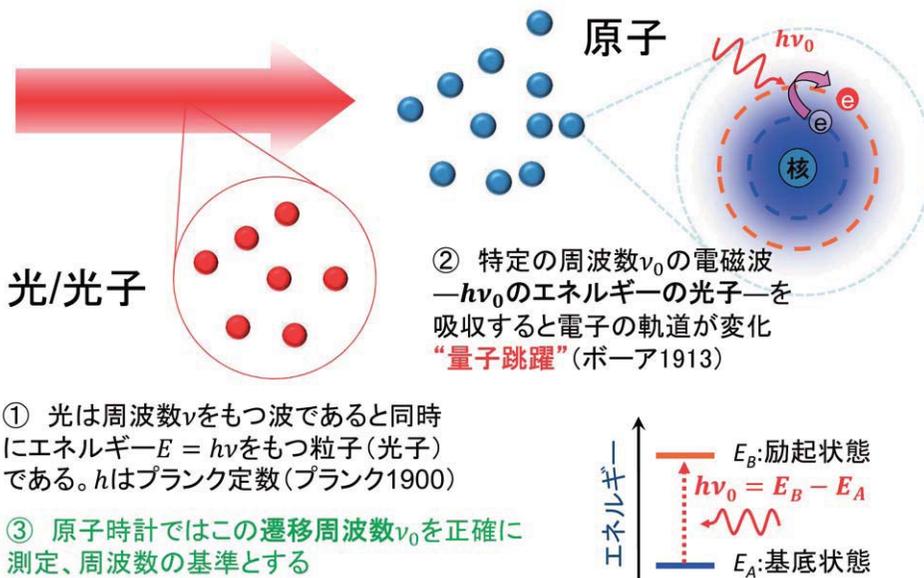


図4：量子の世界へ

これから必要な言葉を整理します(図4)。光と原子、あるいは光の波動性と粒子性を巧みに操って原子時計をつくるという話です。光は、周波数 $\nu$ を持つ波であると同時に、よく見てみると、光子という粒々からできていて、光子はプランク定数 $h \times$ 周波数 $\nu$ というエネルギーを持っています。この $h$ は、1900年にプランクが発見したプランク定数です。

一方、原子は、皆さん、粒々だと思っていることでしょうか。原子の中を覗いてみると、核の周りを電子が回っている構造をしています。原子に光が当たるとどうなるのでしょうか。原子に共鳴光が当たると、内側の軌道を回っていた電子が外側の軌道を回るようになります。こういうのを量子跳躍と呼んでいます。このような原子のモデルを考えたのがボーアで、1913年のことです。

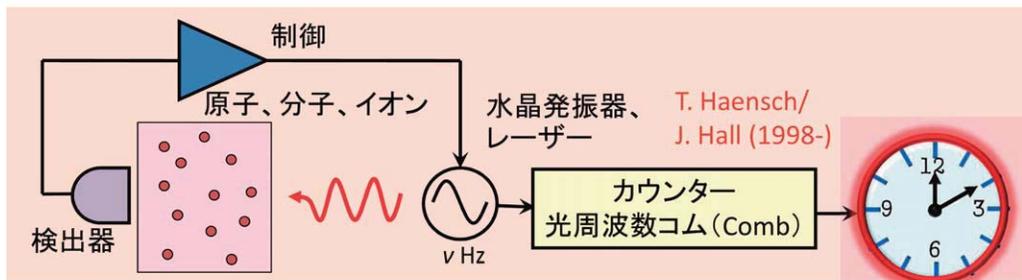
原子時計では、電子が軌道を変えるような遷移周波数、 $\nu_0$ を正確に測定して、これを基準に時計の刻みをつくります。時計の構成は(図5)のようになっています。たとえばこの腕時計には、水晶発振器と、その振動を約

3万2,000回数えたら1秒進めるというカウンターが入っています。この発振器とカウンターが時計の構成要素です。最初にお見せしたスライドで「いい時計をつくることはいい発振器をつくることである」と言いましたが、発振器の周波数の精度 $\Delta\nu/\nu$ が時計の精度 $\Delta t/t$ を握っているわけです。水晶発振器だと、水晶固有の振動を使っています。だけど、こういうマクロな物質の固有振動を正確に制御することは非常に難しいので、原子のようなマイクロな発振器を使いましょうというのが原子時計のアイデアです。

みんなで共有できるような普遍的な1秒をつくるためにはどうすればいいか。多くの物理学者は物理定数は定数だという信念を持っています。物理定数だけで一意的に値が決まる原子の振動を読み出して、マクロな発振器にそっくりコピーして、その振動を数えれば原子の振動に基づく普遍的な時が刻めるでしょう(図5)。

たとえば水晶発振器、あるいはこのレーザーポインターのようなレーザーなど、マクロ

## 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: 基礎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? →原子の振動に耳を澄まそう

図5 : 原子時計の構成

な発振器を原子に当てて、ちょうど原子がその周波数を吸収するように発振器を周波数制御することで原子の振動を正確にコピーします。こうした研究で、われわれが最後に一番興味を持っているのは、物理定数は定数だと信じているけれども、この信念は本当かという質問を自らに投げかけたいと思っているわけです。これがまさに原子の振動に耳を澄ませようということです。

いい原子時計をつくるにはどうしたらいいのでしょうか（図6）。原子の振り子の相対的な周波数ゆらぎ  $\Delta\nu/\nu$  が指標でした。これもちょうど山崎先生がおっしゃっていましたが、ミリヘルツぐらいの精度（ $\Delta\nu$ ）で周波数（ $\nu$ ）を測ることができます。分母に来る周波数が高いほうが、この比の値を小さくできるでしょう。これまでは、マイクロ波

（ $\nu \approx 10$  GHz）を使ったセシウム原子時計が使われてきましたが、これはレーダーなど当時はマイクロ波技術が発達していたという、1950年代というセシウム原子時計の発明当時の時代背景を考えると順当なところでした。しかし、いまやわれわれはレーザーを使いこなせるようになりました。レーザーの周波数、たとえば  $10^{15}$  ヘルツぐらいを使った時計をつくると、この比（ $\Delta\nu/\nu$ ）を一気に4桁とか5桁向上することができるでしょう。これが光時計による性能向上の戦略です。

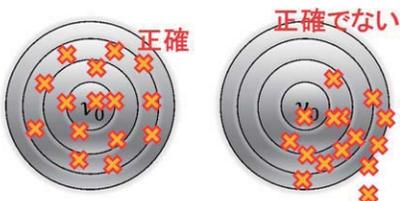
時計の性能を言うときに、正確さと安定度という二つの指標があります（図6）。原子時計は原子の遷移周波数を基準にすると言いましたが、固有の遷移周波数からのずれが少ないほど正確な時計と言われます。ずれを少なくするために、ずれる要因をゼロにする環

## いい原子時計を作る戦略

**原子の振り子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  $\nu_0$  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？
- 量子雑音が制限

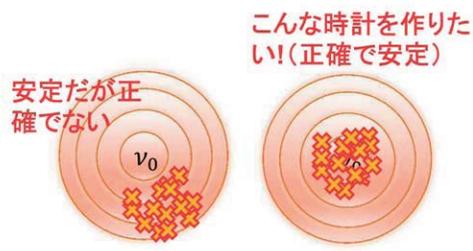


図6：正確さと安定度

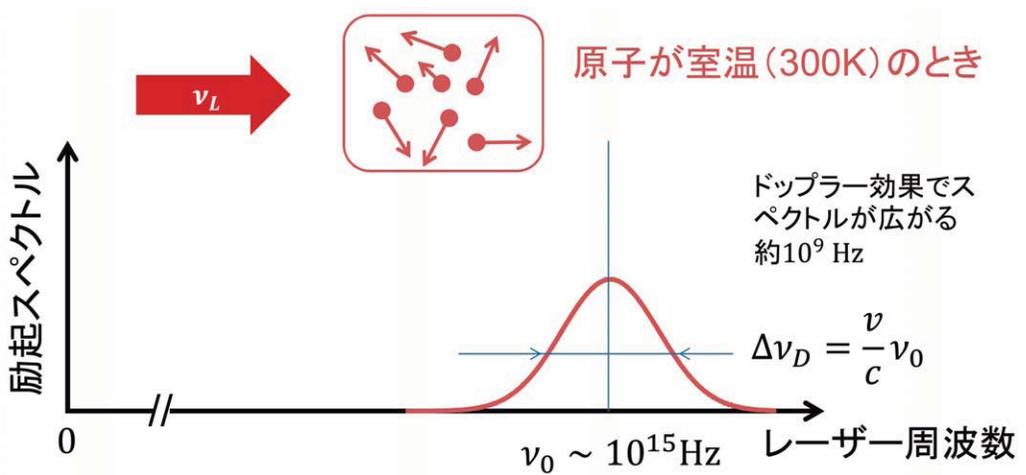


図7：室温原子のドップラーシフト

境を整備するのが原子時計をつくる仕事でした。われわれが測りたいのは、原子の遷移周波数 $\nu_0$ です。それを狙ってレーザーの周波数を制御します。ちょうど均等にばらけて、その重心が $\nu_0$ だったら、それは正確な時計ということです。しかし、原子に電場とか磁場が加わって、原子の周波数がずれているときには、センターからちょっとずれたところにレーザーの周波数が制御されてしまいます。そういうのは正確でない時計と言います。

一方、安定度は、どれだけ早く中心の $\nu_0$ を狙えるかというものです。これには、これからお話する量子雑音の影響してきます。たとえば測定値が早く収束したけれど、それがセンターからずれるのは、安定だけれども正確ではない時計と言います。センターを早く狙える時計が作りたい時計です。

原子の遷移周波数 $\nu_0$ をいかに正確に測るかが原子時計の勝負です。たとえばこの空間にある空気の酸素、窒素分子は音速、300メートル毎秒くらいの速さで飛び交っています。そんな速さで原子が動いていたとしましょう。そこにレーザー光を当てると、原子が見るレーザー光の周波数は、自分が300メートル毎秒であちこちに走っているのだから、その分だけドップラー効果によってレーザー光の周波数

を高く見たり、あるいは、遠ざかる場合には低く見たりします。これが、原子の運動によるドップラー効果でスペクトルが広がるという現象です。室温の原子だと、遷移周波数 $10^{15}$ ヘルツに対して、だいたいこれが $10^9$ ヘルツぐらいに膨らんでいます(図7)。原子時計をつくるときに、まずドップラー効果が邪魔になります。

このためには、原子を冷たくすればいい。これからレーザー冷却というお話をしますが、原子を $10^{-5}$ ケルビン程度の、絶対零度に非常に近いところまで冷やしてやると、原子の運動の速さも遅くなって、ドップラー効果が小さくなります。そうすると、スペクトルが鋭くなって、例えば、スペクトルの幅が $10^5$ ヘルツぐらいになります。まだまだ広いので、さらに減らすには、原子を小さな箱の中に閉じ込めてやります(図8)。この箱の大きさを観測に使う光の波長よりも十分小さくすると、原子は光の位相変化を見ることができなくなってしまいます。この結果、ドップラー効果が原理的に発生しなくなり、鋭いスペクトルが取れるようになります。

最後に残るスペクトルの幅は、相互作用時間を $t_{int}$ として $\Delta\nu \times t_{int} \approx 1$ で決まる幅 $\Delta\nu$ です。この不確定性の関係はフーリエ変換の関係そ

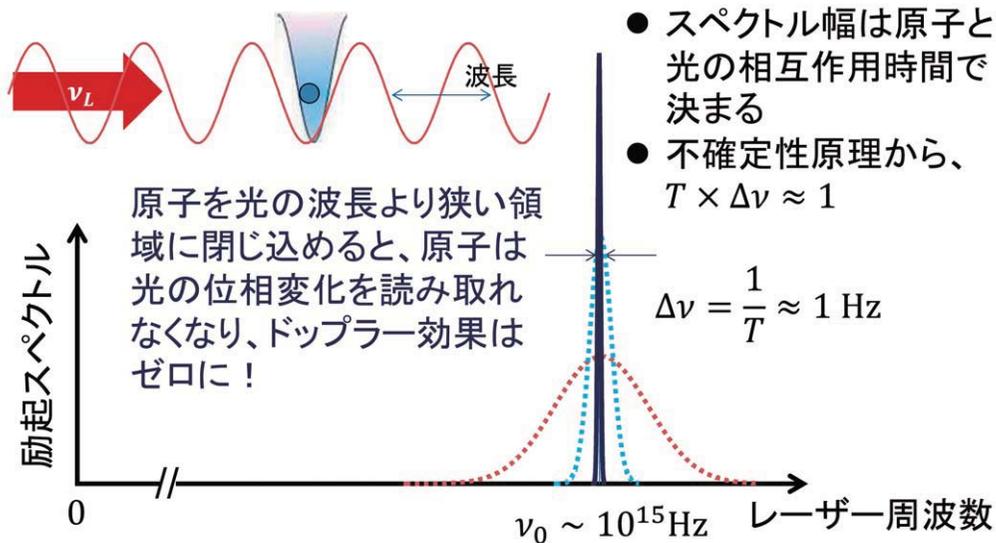


図8：原子を閉じ込めて、ドップラーシフトを排除する

のもです。たとえば、相互作用時間1秒、つまり1秒間原子を閉じ込めてそのスペクトルを観察すれば、このスペクトル幅はその逆数の1ヘルツになります。こういう測定を実現するのが、われわれが時計の開発をする大前提です。

まさにこんなことを考えたのが、デーメルトさんで1980年頃です(図9)。1950年頃にポールさんがイオントラップという装置を発明しました。ポールさんのイオントラップなので、ポルトラップと呼ばれます。ポルトラップでは四重極の電場でイオンを閉じ込め、その位置ではちょうど電場が0になるという、非常に巧みなトラップです。原子やイオンの遷移周波数を変化させる電場とか磁場を排除するのが原子時計の設計の基本でしたから、ポルトラップは原子時計をつくるのもってこのトラップです。デーメルトさんは、ポルトラップに閉じ込めた単一のイオンを使うといい時計ができると提案し、単一イオンの観測の手法を確立しました。1989年には、このトラップの発明者であるポールさんや、これを時計にしようと言ったデーメルトさんにノーベル賞が与えられました。こ

んなところからも、これが次世代原子時計の決定版だとこの分野の人はみんな考えるようになりました。(＊2012年のノーベル賞はデーメルトさんの単一イオン時計の提案を実現した、ワインランド博士が受賞しました)

これから、デーメルトさんの単一イオン時計ではどこが不満かを説明するのに、原子の振り子の周波数はどこまで正確に読めるか、この起源である、量子のコイン投げという話をしていきます。

このスライドはやや複雑で恐縮ですが、原子の中で電子が基底状態のときのエネルギーが $E_A$ で、それが励起されたときのエネルギーが $E_B$ です(図10)。このエネルギー差 $E_B - E_A$ 、あるいは、これをプランク定数 $h$ で割った遷移周波数 $\nu_0 = (E_B - E_A) / h$ は、原子と光の相互作用時間の逆数( $\Delta\nu = 1/t_{int}$ )の精度で決定できると先ほど言いました。

それでは、実際のところその測定はどうすればいいでしょう。レーザーを照射したとき、原子をB状態に励起する確率で周波数が測れるでしょう。原子をB状態に励起する確率を最大にするようなレーザーの周波数を使うと、レーザーの周波数が高くなったり低くなっ

# 単一イオンを電場のゼロ点に閉じ込める ポールトラップ

- 1950年代W. Paulが考案
- 1980年代H. DehmeltはPaul trap中の単一イオンを使う原子時計を提案。単一イオンの観測実験を実証。
- 1989年、Paul、Dehmelt、(Ramsey)にノーベル物理学賞
- 次世代原子時計の決定版に思われた。

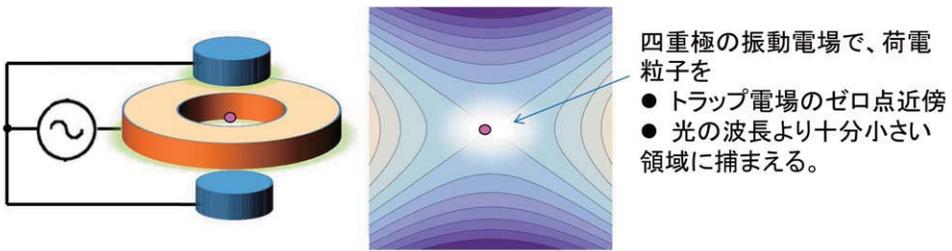
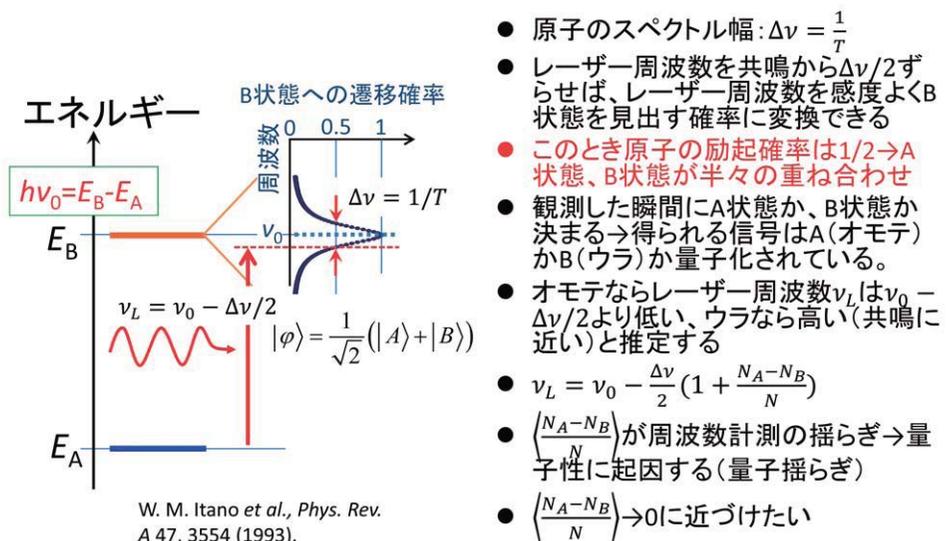


図9：ポールトラップと単一イオン光時計

## レーザー光で原子の周波数を読み出す —量子揺らぎとの戦い—



- 原子のスペクトル幅:  $\Delta\nu = \frac{1}{T}$
- レーザー周波数を共鳴から $\Delta\nu/2$ ずらせば、レーザー周波数を感度よくB状態を見出す確率に変換できる
- このとき原子の励起確率は $1/2 \rightarrow$  A状態、B状態が半々の重ね合わせ
- 観測した瞬間にA状態か、B状態が決まる $\rightarrow$ 得られる信号はA(オモテ)かB(ウラ)が量子化されている。
- オモテならレーザー周波数 $\nu_L$ は $\nu_0 - \Delta\nu/2$ より低い、ウラなら高い(共鳴に近い)と推定する
- $\nu_L = \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2} \left(1 + \frac{N_A - N_B}{N}\right)$
- $\left\langle \frac{N_A - N_B}{N} \right\rangle$ が周波数計測の揺らぎ $\rightarrow$ 量子性に起因する(量子揺らぎ)
- $\left\langle \frac{N_A - N_B}{N} \right\rangle \rightarrow 0$ に近づけたい

図10：遷移周波数測定と量子ノイズの起源

り変動しても、励起確率は減少するだけで、レーザー周波数の変動の方向を言い当てることはできません。ちょうどこの原子の励起確率が半分になるスロープにレーザー光の周波数を合わせると、レーザー光の周波数が高くなったら励起が増え、低くなったら励起が減るということで、レーザー光の周波数を感度よく読み取ることができます。

ここで、量子力学の問題が見えてきます。この周波数 ( $\nu_L = \nu_0 - \Delta\nu/2$ ) 近傍にレーザー周波数を合わせて、原子の励起を見ればいいのですが、このとき原子の励起確率は、ちょうど半分です。そうすると、原子は、A状態とB状態の半々の重ね合わせになっています。われわれが測定できるのは、どちらの状態にいるかということだけです。測定すると、その瞬間にA状態かB状態かという二つの状態に測定結果が射影されてしまいます。そうす

ると、コイン投げをした時と一緒に、表、つまりA状態だったらここよりはレーザーの周波数が低かった、あるいは裏、B状態だったらレーザーの周波数がちょっと高かったと推定するほかありません。そこから、レーザーの周波数は  $\nu_L = \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2} (1 + \frac{N_A - N_B}{N})$  と読めるでしょう。表と裏なので、ちょうど0.5という数字が欲しくても、それを出すことはできません。裏、表、裏、表とずっとつながっていくのが0.5という状態です。これが量子ゆらぎの起源です。表の確率をちょうど0.5に近づけるためには、たくさん試行を繰り返さなくてはなりません。

コイン投げの統計を考えてみましょう (図11)。1秒間光を当てて、A状態とB状態の半々の重ね合わせをつかって測定したら、表が出たとしましょう。確率が2分の1だから、

## コイン投げの統計

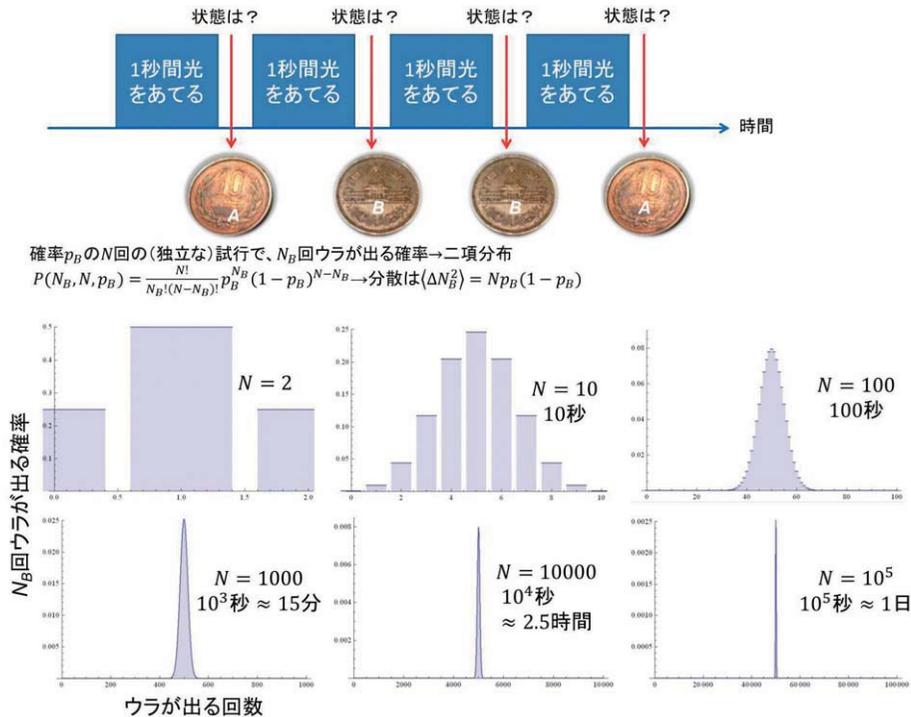


図11：コイン投げの統計

次をやったら今度は裏かもしれない。また次をやったら今度はまた裏だった。またやったら表だったという測定を繰り返すわけです。これを表現するのは二項分布と言われる分布ですが、1回コインを投げたときには、裏表が半々の確率で出て、2回やれば1回裏、1回表というのが出やすくなり、何回も試行を重ね、10回繰り返すとだんだんセンターが見えてきます。だけど、先ほど言ったように、1回の操作に1秒かかっているのです、これで10秒かかります。どんどん試行を繰り返し、1万回繰り返すと2時間半、さらに $10^6$ 回繰り返していると1日たってしまう。こんなことをやっていくと、中心値を確定するのはなかなか時間がかかる作業とわかるでしょう。先ほどの単一イオンを使った時計だと、10日かけると100万回の試行ができて、相互作用時間で決まる1ヘルツのスペクトル幅を1ミリヘルツまで読むことができます。これが時計の時間計測には時間がかかる理由です。これを漫画的に表しますと、こんな具合で

す。時間をかけて何回も試行を繰り返して統計を取れば、高い精度で中心の周波数を読むようになります。相対的不確かさ $\Delta v/v_0$ の分子にある相互作用時間で決まる幅、 $\Delta v=1/T$ は $n$ 回試行すると、 $\Delta v/\sqrt{n}$ となって、より精度よく中心周波数を見ることが出来ます。これからお話する光格子時計は、ここに着目します。たとえば単一イオン時計で100万回繰り返して中心周波数を読み出す代わりに、一度に100万個の原子を集めて測定すれば、時間の計測を100万倍速くできるでしょう。

見えなかった時間領域に光をあてるというのが、われわれのやりたいことです(図12)。単一イオン時計で原子の遷移周波数をより精度よく観測するためには、たくさんの試行を繰り返さなければいけません。この試行回数によって、どこまで精度よく時間が読めるかが決まってきます。最初にお話したように、われわれは国際原子時の15桁の時間精度を共有できているという状況にいますが、

## 見えなかった時間領域に光をあてる！

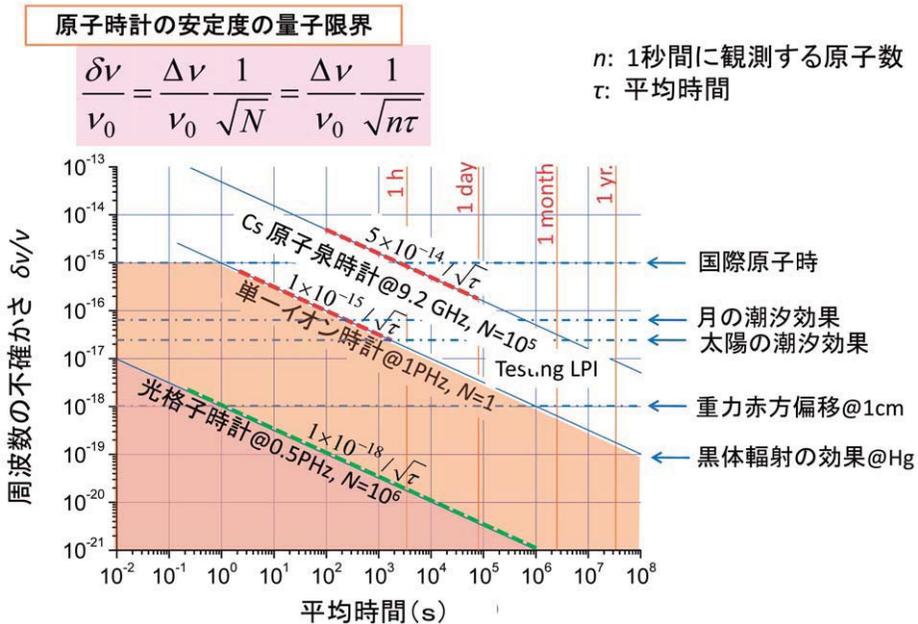


図12: 辿り着けなかった時間領域に分け入る

いまの秒の定義を与えているセシウム原子時計を使うと、この国際原子時の15桁の精度に達するまでにだいたい3時間ぐらいかかります。

ある研究所ではいい性能のセシウム原子時計をつくっていて、それによると16桁ぐらいまでは時間が読めると言われています。だけど、その先は技術的なノイズに阻まれています。もし $1/\sqrt{\tau}$ で安定度が改善し続けると仮定すると、300年計測を続けて待つと18桁の時間が読めるようになるはずですが、300年間というのは一人の人間では絶対観測できない時間なので、人間にはどう頑張っても辿り着くことのできない時間の領域があるように思われます。しかし、マイクロ波を使ったセシウム原子時計の代わりに光の時計を使うと、 $\Delta v/v_0$ の分母が一気に5桁高くなるので、ずっと精度のよい測定ができます。先ほどコイン投げの例をお示しした単一イオン時計なら、約10日ずっと観測を続けると、 $10^{-18}$ の時間が読めるようになります。従来は想像さえしなかった、新しい時間精度の窓が広がりました。

しかし、10日で18桁に到達できるようになったとはいえ、積算している間に平均して埋もれてしまう現象はたくさんあります。たとえば月とか太陽の潮汐効果で、地上の時間の進みは一日のうちにも $10^{-17}$ くらい早くなったり遅くなったりしています。だけど、10日も平均を取ると何も見えなくなるでしょう。こういう平均化で埋もれてしまうような時間を見るには、さらに安定度のいい時計が必要で、それを目指すのがこれからお話する光格子時計です。これは、100万個の原子を一度に観測することによって、単一イオン時計から3桁の安定度の向上を遂げようとしています。上手くいけば、1秒間計測するだけで18桁の時間が見えるでしょう。

この光格子時計をつくるには、時計設計の新しい発想が必要でした。先ほどお話ししたように、単一のイオン時計は非常に理想的な時計で、まさに時計をつくる時の設計指針

が凝縮されたような時計だったわけです。しかし、これだと量子力学が予言する安定度の限界が見えてしまいました。発想の転換をして、電場や磁場を除去するのではなく積極的に加えてやって、時計にいい環境をつくりだそうという企みをしたのが光格子時計です。光格子時計では、卵パックにたくさんの原子を1個ずつ詰め込むようにして、100万個の原子を捕まえるような容器をつくろうと考えました。この中で原子の運動を精密に制御し、さらに、この容器が原子の遷移周波数を変えないように、卵パックを巧みに設計しようというわけです。こんなことを考えながら、10年前に光格子時計を提案しました。

先ほども言いましたが(図6)従来、原子時計をつくるためには、原子に余計な電場や磁場を加えないことが大原則でした。このため、光格子時計を提案した10年前は、強い電場をかけて原子を捕まえて正確な時計がつけられると思った人はいませんでした。「これは原子時計の歴史への挑戦である」と大きなことを言って講演した昔が懐かしいです。しかし、10年たって、この手法は常識になってしまいました。卵パックに入った卵みたいに原子を捕まえるという光格子の話をこれからします。

その前に、まずレーザー光を使って原子を冷却する方法です(図13)。原子は質量×速度という運動量を持っています。それにレーザー光を当てますが、レーザーの光子もプランク定数÷波長という運動量を持っています。そうすると、原子が光子を1個吸うと光子の運動量だけ原子の運動量が小さくなります。特に、原子の共鳴周波数よりもちょっと周波数を低くしたレーザー光を原子の前後から当てると、原子はドップラー効果によって向かってくるレーザー光の周波数を高く感じて、より光子を吸いやすくなります。そうすると、原子は向かってくる方向の光の運動量を吸って、その光を温まった光子として外に捨てていく。そんなことをして、原子は運動エネルギーをどんどん失っていきます。そうすると、

# レーザー光による原子の運動操作

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997 Nobel Prize)

## 1)レーザー冷却:

原子の運動量を光子の運動量で制御する

→ 絶対温度0.000001Kかもっと低温まで原子を冷却

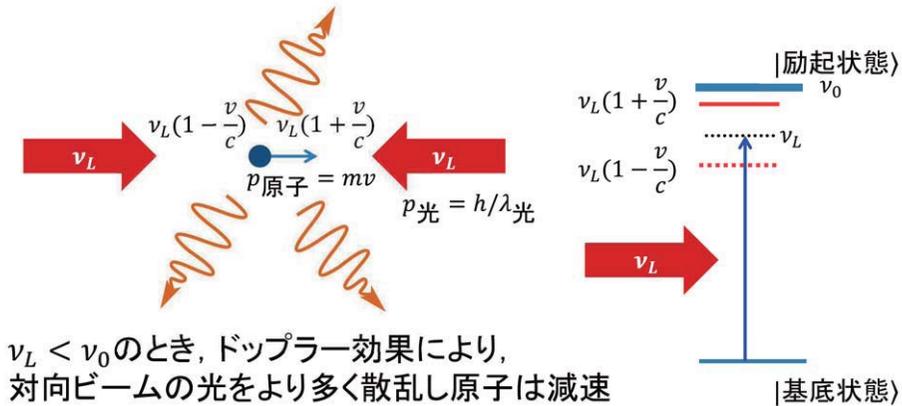


図13：レーザーを使って原子を冷やす

1 マイクロケルビンくらいの絶対零度に非常に近いところまで原子を冷却することができます。

こうして冷やした原子を、つぎは光双極子力トラップをつくって捕まえます (図14)。原子は中心に核があって、その周りを電子が回っているという構造をしています。原子に電場を加えると、電子と核の重心がちょっとずれる、つまり、原子が分極して双極子ができます。双極子は分極率×電場で定義されるものです。この双極子がさらに電場と相互作用すると、エネルギーシフトが起こります。これを光シフトと呼びます。光シフトはマイナス符号の分極率×電場の2乗で、この電場の振幅の2乗というのは光の強度に比例します。そうすると、光の強度に比例するようなエネルギーシフトが起こるわけです。このレーザーポインターもそうですが、レーザー光は中心部分が一番強くなっています。このためレーザービームの中心の光が強いところで

原子のポテンシャルエネルギーが最小になり、原子が捕まります。これを光トラップと言います。

一方、光をミラーで反射させてやると、光の定在波ができます (図14)。定在波では、腹の位置で電場の振幅が一番強いので、原子は腹の位置に吸い込まれて捕まえられます。腹の位置にトラップされた原子が等間隔に格子状に並ぶので、光格子と呼ばれます。こうして光で原子を捕まえると問題もあります。空間的に変化する電場によって、空間的に原子のエネルギーを変化させて原子をトラップすることができますが、それによって原子はエネルギーが変わってしまっています。原子のエネルギーが変わってしまうことは、時計をつくるうえでは一番嫌なことでした。

このエネルギーシフトを何とかしないと時計にはなりません (図15)。われわれは、分極率がレーザー光の周波数に依存することに着目しました。エネルギーが変わってしまっ

## 2) 光双極子トラップ:

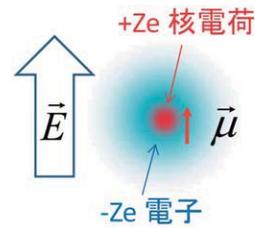
電場を加えると原子は分極する

— 双極子:  $\mu = \alpha(\omega)E(\omega)$

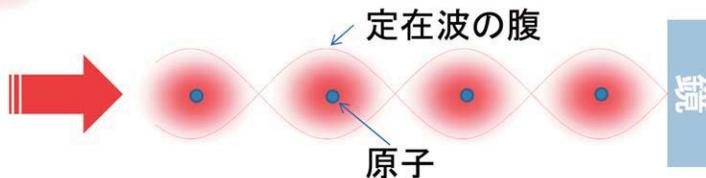
— 双極子と電場が相互作用

→ 光シフト (光周波数に依存):

$$U = -\mu \cdot E = -\frac{1}{2} \alpha(\omega) E^2(\omega) \propto -\alpha I$$



$\alpha$  はレーザー周波数  $\omega$  に依存する。 $\omega < \omega_0$  なら  $\alpha > 0$  となり、原子は光が強いところへ



光の定在波中では、極低温原子は光強度が最大の腹に捕獲される: 原子が光の格子で並ぶ → 「光格子」

図14: レーザーを使って原子を捕まえる

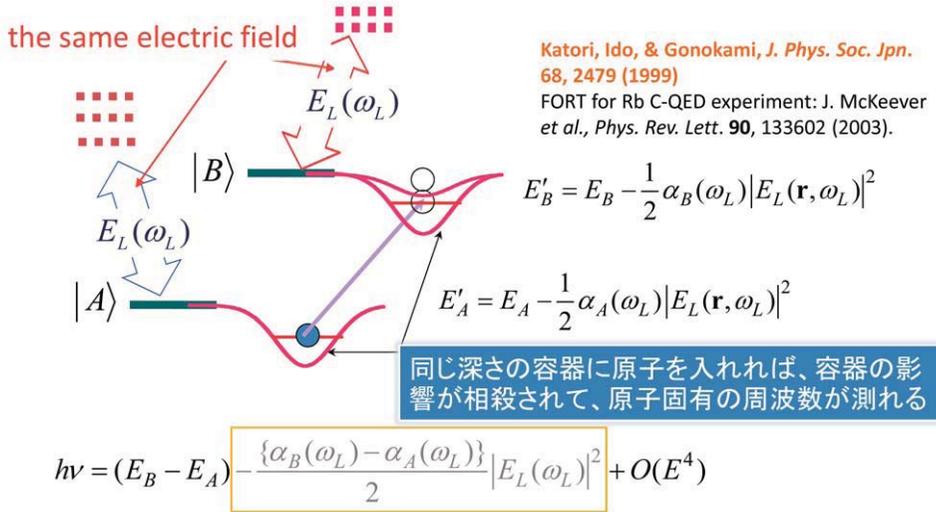
た原子に対して遷移周波数の測定をすると、欲しくない余計な項が付くけれども、もしレーザー光の周波数をうまくチューニングしてやって、励起状態の分極率と基底状態の分極率を等しくすることができれば、言い換えれば、同じ形の容器を上の状態と下の状態で行うことができれば、余計な項がキャンセルアウトしてなくなってしまいます。そうすると、光で原子をトラップしても、原子の固有のエネルギー差が読めるわけです。これが光格子時計のトリックです。実際にこんなことができるかというのが、ちょうど10年ぐらい前にやっていたことです。レーザーの周波数をチューニングしていくと、基底状態と励起状態でエネルギーシフトがちょうど同じになるような周波数があるはずだと、計算するとわかりました (図16)。

このような周波数に合わせたレーザー光で

格子をつくって、そこで原子を分光してやれば、正確な時計がつけられるだろうというわけです (図16)。この周波数をマジック周波数と名前を付けて論文を書いたら、レフェリーにそんなのはマジックでも何でも無い、マジックと呼ぶべきもっと高尚なものがたくさんあると突き返され、スペシフィック周波数、特定の周波数と言い換えてやっと受理されました。しかし、当時のレフェリーの苦言はどこへ行ったやら、いまやマジック・フリクンシー (周波数) という言葉で呼ばれるようになりました。マジック・フリクンシーを使って光格子をつくってやると、光格子の影響がすっかり消えて、非常に高精度な原子時計をつくることができます。

われわれが初めて実験に成功したのが2005年のことです。そのとき、この時計は18桁の時間計測ができると朝日新聞の記者に言った

# 光双極子トラップで加わる光シフトを取り除く



Katori, Ido, & Gonokami, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68**, 2479 (1999)  
 FORT for Rb C-QED experiment: J. McKeever et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 133602 (2003).

図15：光トラップで原子に加わるエネルギーシフトを取り除く

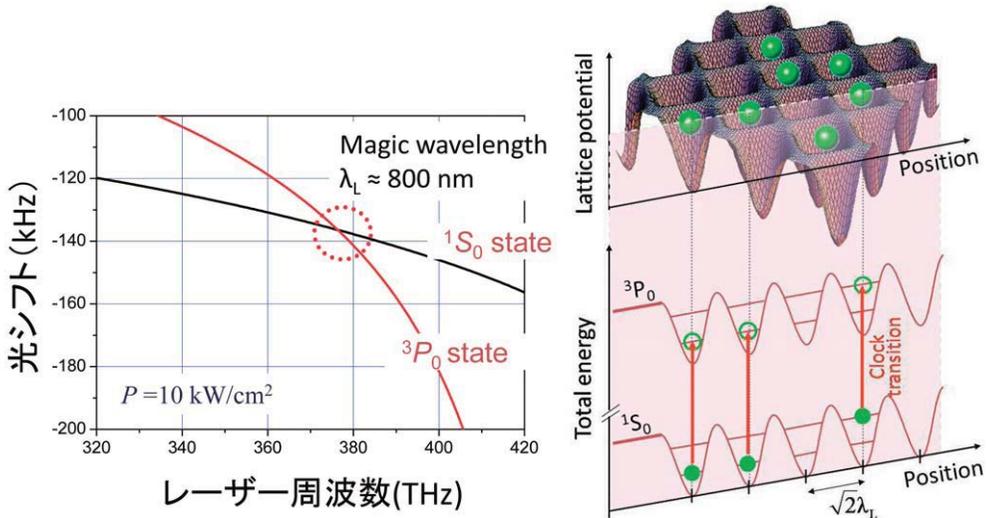


図16：原子のエネルギーシフトはトラップに使うレーザー周波数に依存する（左図）。魔法周波数で光格子を作れば、時計遷移を観測するとき、原子のエネルギーシフトが相殺してなくなる（右図）。

ら、137億年前の宇宙誕生から誤差0.4秒という几帳面な新聞の見出しを付けてくれました。18桁というのはざっくりしたもので、0.4秒という数字に特に意味はないのですが、こんな実験を世界中みんながやるようになって、秒の再定義への気運がだんだん高まりつつあ

るのが現状です。2006年にわれわれのグループ、フランスのグループ、アメリカのグループの三つのグループで周波数の測定をしたときには、14桁で周波数が合い、将来の秒の再定義の有力候補である秒の二次表現に採択されました。それ以来、いまや世界で20ぐら

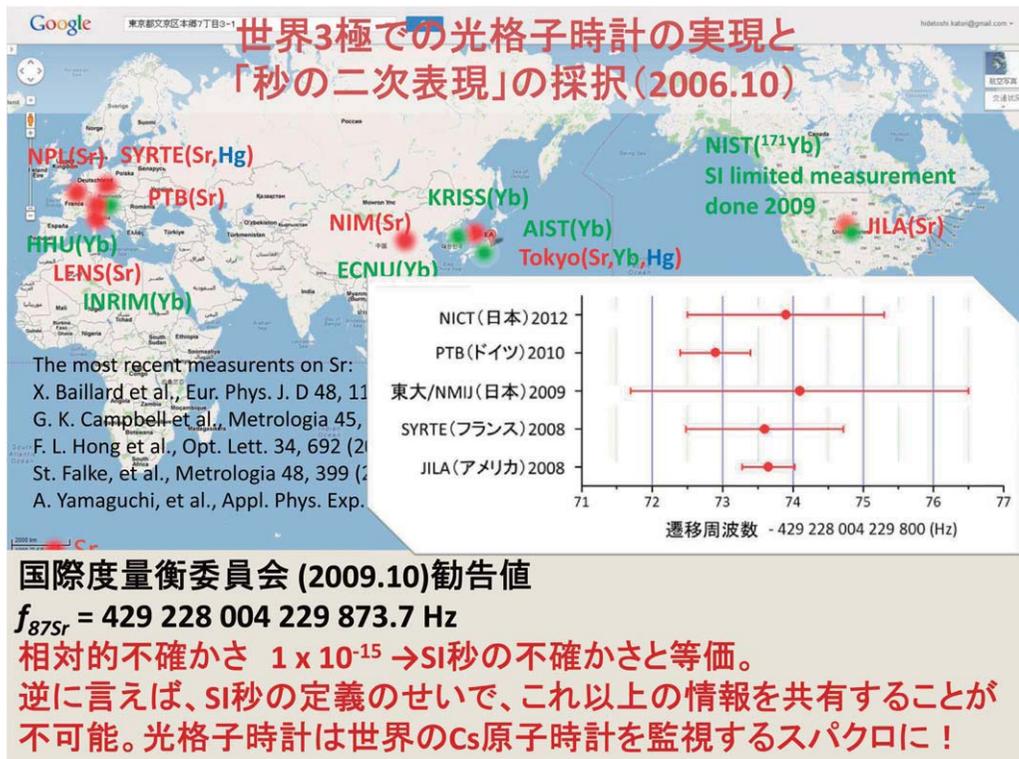


図17：世界での光格子時計の実現

のグループが光格子時計の研究をするようになってきました (図17)。

2009年になるとますます光格子時計の周波数計測の精度が上がり、いまや光格子時計の周波数は15桁の精度で測定されるようになりました。この相対的な不確かさが、なぜ $10^{-15}$ かということ、これがSI秒、いまの秒の定義の不確かさだからです。SI秒の定義のせいでこれ以上の情報が共有できないのがいまの状況です。最近では、世界4カ国、5グループがストロンチウムで光格子時計を実現し、周波数を計測しています (図17)。現在の秒の定義の実現精度よりも光格子時計が実現できる周波数精度のほうが良くなったので、おもしろい現象が起きてきました。これらの測定では、測定対象の光格子時計ではなくて、各国で使われるセシウム原子時計の精度がデータのふらつきを決めています。この意味では、光格子時計は世界のセシウム原子時計を監視

するスーパークロックと言ってもいいような状況になっています。これは、明らかにいまの秒の定義は不都合であるということをアピールしているわけです。

光格子時計はこんな仕掛けでつくっていません。われわれはストロンチウムという原子を使っています。フレック状のストロンチウム片をオープンで熱して、原子ビームに出します。対向する方向からレーザー光を当てて、レーザー光の運動量で原子をどんどん減速していくと、走行距離20センチぐらいで原子がほぼ静止します。今度は6方向からレーザー光を当ててやって、3次元的に原子の運動エネルギーを取り去ります。原子の温度がたとえば1マイクロケルビンぐらいの極低温になったら、先ほどお見せした光の格子の中に原子を1個ずつ詰めていきます。この原子の遷移周波数をレーザーを当てて観測し、先ほどの量子のコイン投げを始めます。

われわれの実験装置は山崎先生の装置に比べるとずっと小さくて、1メートル、1.5メートルぐらいの定盤がわれわれの全世界です。この中でレーザー光を当てて、ここに真空槽があって、その中に先ほどイラストでお見せしたような光格子を作ります。だんだんズームアップして行って、真空槽のウインドーから原子を観測します。そのズームアップがこれですが、30ミリのウインドーから真空槽の中を見えています。青白く光っているのが、レーザー冷却されているストロンチウム原子です。光を当ててレーザー冷却して光格子の中に入れ、暗くした一瞬に分光し、それを何回も繰り返していくことによって、より正確な周波数を求めます。

横軸が平均時間で、何回も実験を繰り返すと、周波数の不確かさが $1/\sqrt{\text{平均時間}}$ で小さくなっていきます。われわれが2011年に発表したデータですと、1,000秒観測すると $10^{-17}$

の周波数比較ができるようになっていきます(図18)。現時点では、おそらくこれは光の原子時計で多数の原子を使って高速に光を読み取る世界記録になっているデータです。

だんだん空間の歪みを見る時計の話に近づいてきます(図19)。重力が強いと時間がゆっくり進むというアインシュタインの一般相対論の予言を聞かれたことがあると思います。50年ぐらい前にこれを最初に検証したハーバードタワー実験というのがありました。そのときは、20メートルの建物を使って、その上と下で原子のスペクトルを観測したら、15桁目で周波数がずれているのが見えました。単一イオンを使った時計は伝統的な方法だと先ほど紹介しましたが、単一イオンの時計をつくっているグループが2010年に同じようなデモンストレーションをしています。彼らは、地上で30センチ時計の高さを変えました。そうすると、 $3 \times 10^{-17}$ の時間の進み方の違いを見る

## 2台の光格子時計( $^{87}\text{Sr}$ - $^{88}\text{Sr}$ )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—

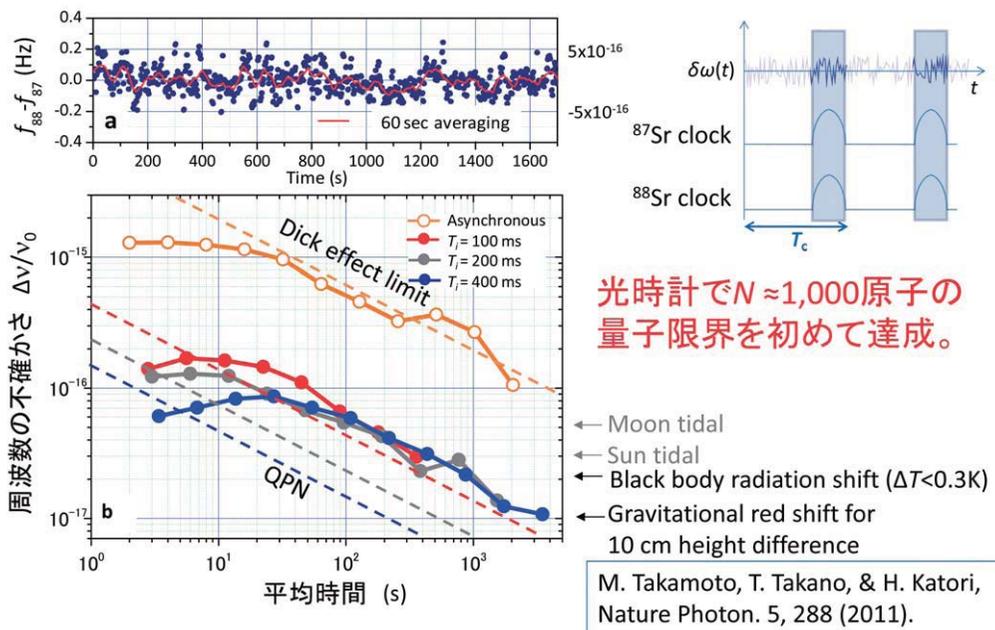


図18：2台の光格子時計の比較

ことができました。

だけど、何せ彼らは単一のイオンをずっと眺めていて、単一のコイン投げをずっと繰り返しているのだから、これを見るのに1日かかります。先ほどの光格子時計の実験だと(図18)、原子を1,000個使っているのではるかに速く測定ができて、 $1 \times 10^{-17}$ に達するのにわずか30分の積算時間しかかかりません。たったこれだけの時間で高度差10センチに相当する時空の歪みが見えるようになってきたわけです。われわれはいまこの実験を追究しているところで、あと数年後には数十秒の積算時間で18桁の時間が見えるようにしたい。そうすると、1センチ時計の高さを変えただけで、ほぼ実時間で、重力による時間の進みの変化がわかる時計が出来ます。これまで重力シフトは相対論の検証の見地から実験がなされてきましたが、もはや検証ではなくて新しいセンシングのツールになりつつあります。従来の状況と大きく違うのは、まさにパーソナルスケールで相対論的な歪んだ時空間が見えて

くることです(図19)。

こんな高精度な時計をつなげてどんな新しい物理が見えるでしょう。重力ポテンシャルの違いで高度差が調べられますし、自然の囁きを聴くという意味では、原子時計が決める時間が本当に普遍なのか、もっと言えば、物理定数は本当に定数なのか、あるいは物理定数と重力が結合したりはしていないのかといった問題を調べることができます。われわれは、ストロンチウムを使った時計や水銀を使った時計など、異なる原子種の時計の比較でこういう問題を議論していきたいと考えています。

こういう高精度な時計が出てくると、まずはその時計をつなぐのに、どうやって時間の信号を配信するかという問題が出てきます。従来、通信衛星を介してある研究所と研究所の間で時間の比較をしてきました。だけど、衛星による時間の伝送の安定度はあまりよくありません。15桁の精度で時間を伝送するのにさえ丸々1日かかってしまうので、先ほど

## 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  $2 \times 10^{-15}$  を検証
- 単一イオン時計(2010年):  $\Delta h = 30\text{cm}$  で  $3 \times 10^{-17}$  を検証(1日積算)
- 光格子時計(2011年):  $1 \times 10^{-17}$  (30分積算)  $\rightarrow \Delta h = 10\text{cm}$  が見える
- 201x年:  $1 \times 10^{-18}$  (数10秒積算) の時計で  $\Delta h = 1\text{cm}$  を見たい  
 $\rightarrow$  時間の相対論的効果をセンシングのツールへ!

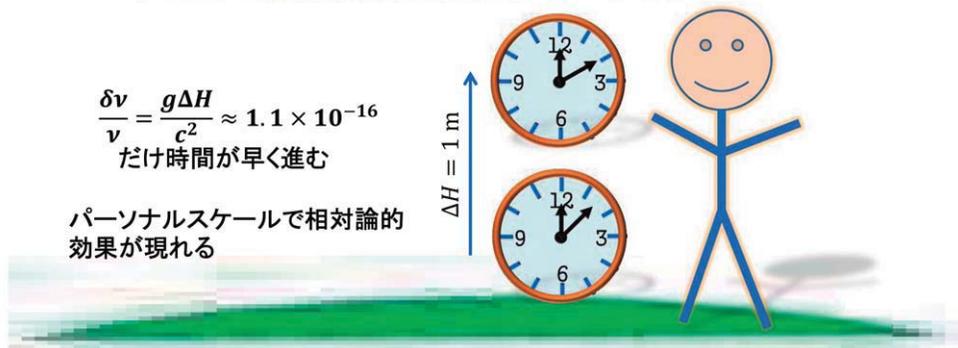


図19: 時計の重力シフト

のような17桁の精度を30分で見ると光格子時計の安定度を生かし切れません。最近、光ファイバーを使って安定度よく時計をつなぐという試みが世界各国でなされています。その最たるものは、ドイツのミュンヘンとブラウンシュバイク、約900キロをつなぐ周波数伝送のためのファイバリンク整備です。やがては、ヨーロッパ圏全域でこのような高精度時間伝送網が構築されるでしょう。

日本では実際に光格子時計をつなぐ実験が行われました(図20)。東大に光格子時計があり、日本の秒の管理をしている小金井の情報通信研究機構(NICT)でも光格子時計をつくっています。われわれ東大の光格子時計とNICTにある光格子時計を光ファイバーで直接つないで、周波数の比較をしました。同じ時計を使って周波数比較をしているので、二つの周波数差を観測してやると、ビートの周波数は0になるはずだと思われるかもしれませんが、0ではなく、約2.6ヘルツずれて

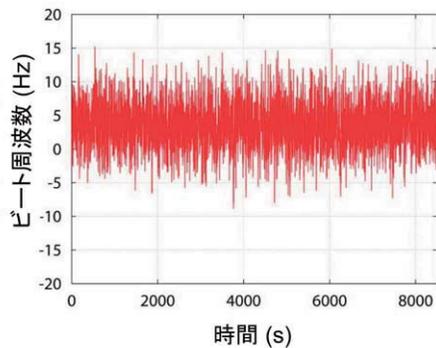
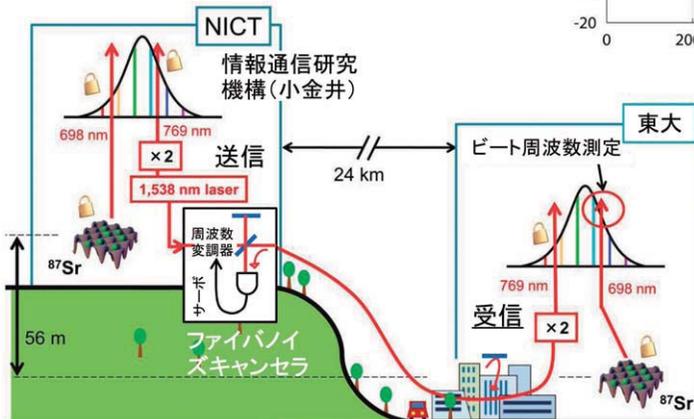
います。この2.6ヘルツのずれはどこから来るかということ、NICTは武蔵野台地にあって、東大に対して50メートルぐらい標高が高いので、彼らの時計のほうが早く進んでしまっているわけです。重力が弱くてNICTの時間が早く進んでいる、あるいは強い重力のせいで東大の時間が遅く進んでいるのが、ほとんど実時間で周波数差として読むことができるようになっています。

東大、つくばの産総研、小金井のNICTには光格子時計があり、いま理研でも光格子時計をつくっています。われわれは理研の光格子時計と東大の光格子時計の二つを非常にいい精度で比較しようと企んでいます。そうすると、重力を使って測地学ができるでしょう(図21)。ジオイド面というのは重力の等ポテンシャル面のことです。先ほどの時計の比較でみたように、重力ポテンシャルの違いを補正しないと時計の比較ができません。等重力ポテンシャル面は、日本だと東京湾の平均

## 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).

図20：東大と情報通信研究機構(NICT)の光格子時計のファイバリンク実験

海水面で定義しています。そこにある時計を0として、標高がたとえば1メートル高くなったら $1 \times 10^{-16}$ だけ時間が早く進むという補正をして、時間の比較をします。大昔 $1 \times 10^{-16}$ なんていう時間は読むことができなかったので、東京湾の海水面が干潮、満潮で1日に1メートルぐらい上下していても、そんなのは構いなしだったわけです。なので、平均海水面という発想が出たのだと思います。

ところが、いまや30分計測して10cmの高度差が見えるようになると、ジオイド面を平均海水面で定義していいのだろうかという疑問もわいてきます。ジオイドの高さは、 $5 \times 10^{-17}$ くらいの精度が出ていると言われていますが、これよりも精度のいい時計が作られると、時計の比較のほうが、ジオイド高の精度を上回るようになります。あるいは、世界規模でもっと大きな時計のネットワークをつくってやると、地球は太陽とか月の潮汐効

果で、ぐにやぐにヤゴム毬のように変形しているので、地球のジオイド面は柔らかすぎて長距離の時計の比較はできないだろうという時代にもなってくるでしょう。そうすると、ジオイド高のセンサー、あるいは地面の下でどんな現象が起きているか、地殻の変動のプロブが、将来の時計の新たな役割になるでしょう。本郷、和光の重力ポテンシャル差を1センチの精度で常時モニターできるような時計をまずはつくってみたい。そうすると、東京の地下でどんな地殻の変動が起きているか、リアルタイムで見ることができるかもしれない。

一方、物理定数は定数なのか、あるいは重力とどんな関係なのかを調べる実験もされています(図22)。たとえばストロンチウムの周波数を測るということは、1秒の定義であるセシウム原子時計との周波数比を測ることにほかなりません。この比を1年を通して、



## 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水面で定義

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

- 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
- 時計の比較はジオイド高の測定と等価
- 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...

図21: 光格子時計のネットワークと相対論的測地学

New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using  $^{87}\text{Sr}$  Optical Lattice Clocks

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

S. Blatt,<sup>1</sup> A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen,<sup>2</sup> T. Zelevinsky,<sup>3</sup> M. M. Boyd, and J. YeAl+/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？

<sup>1</sup>JILA, National Institute of Standards and Technology and University of Colorado,  
Boulder, Colorado, USA 80508-9044, 4  
<sup>2</sup>Y. Baudard, M. Fouché, B. Le Targat, A. Brusch, and P. Lemonde  
<sup>3</sup>Physique des Atomes, Université de Bourgogne, UMR 5026 CNRS, Dijon, France, F-21078, Dijon, France

M. Takamoto, F.-L. Hong,<sup>3</sup> 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,

$$f_{\text{Sr}} = F[\alpha(U/c^2)],$$

$$f_{\text{Cs}} = G[\alpha(U/c^2)]$$

$$f_{\text{Sr}}/f_{\text{Cs}} = H[\alpha(\delta U_{\text{sun}}/c^2)]?$$

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。

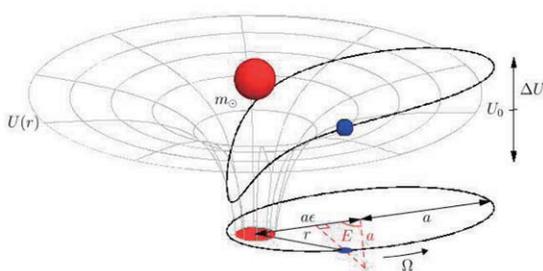


図22：地球の上でSr光格子時計とCs原子時計を比較する

あるいは数年にわたって比較しているわけですが。もしも物理定数が定数であれば、この周波数比は定数であるはずですが、もしも物理定数が時間変化していると、この周波数比も変動することになります。あるいは、われわれは宇宙船地球号に乗っていて、太陽の周りの楕円の公転軌道を動いているので、1年のうちに、太陽の重力ポテンシャルが強いとき、弱いときを経験しています。もしも物理定数が太陽の重力ポテンシャルと結合しているのであれば、1年周期で、周波数比が変動しているのが見えるかもしれない。まさに自然の囁きを聴こうとしています。いまのところ、まだ時計の精度はそれを見るには至っていません。

これは最後のスライドですが、正確すぎて正確でなくなる新しい時間の概念を提示していきたいと思っています。われわれは、日常生活のスケールでは、まだニュートンの絶対空間とか絶対時間の感覚で時空間をとらえて

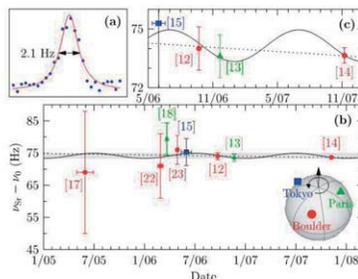


FIG. 1 (color online). (a) Spectrum of the  $^{87}\text{Sr } 1S_0-3P_0$  clock transition with quality factor  $2 \times 10^{14}$ . (b) Measurements of the clock transition from JILA (circle), SYRTE (triangle), and U. Tokyo (square) over the last 3 years. Frequency data are shown relative to  $\nu_0 = 429\,228\,004\,229\,800$  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.

います。でも、アインシュタインの相対論的な時空間をパーソナルスケールで認識させてくれるような時計ができると、われわれの世界観は大きく変わるでしょう。そういう時計の比較をすることで、原子が不変な時を刻んでいるのかということもわかるようになります。まずは18桁の精度を持つ光格子時計を完成させて、相対論的な時空間が、パーソナルスケールに介入するような未来社会の新たな時間インフラの予測をしてみたいと思っています。1931年、ダリがアインシュタインの相対論にインスパイアされて「記憶の固執」という有名な絵を描きました。彼は、アインシュタインの相対論を聞いただけでこういう空間が描けたわけですが、われわれはまさにいま光格子時計で実際に時空間が曲がっているのを認識しつつあります。こういう世界観を今後ぜひお見せしたいと思っています。ご清聴ありがとうございました。