

香取創造時空間プロジェクトの取り組み

1秒を「決める」 超精密時計の誕生

時間の基本単位“秒”を世界でも最も正確に刻む時計の開発が最終段階に入っている。極微の原子の世界に分け入り、その振動を高精度で読み取って、1秒を正確に「決める」超精密時計。それはいったいどんな時計なのか。そして、その精密さの先に見えてくるものは何か。

1秒は1秒であって“1秒でない!?”

光格子時計——このちょっと変わった名称の時計が、いま科学の世界で注目を集めている。「世界で最も正確に“秒”を決める時計」としての期待が高まっているのだ。

「正確な秒? 正確じゃない秒があるのか」と思う人も多いだろう。何事も時間に制約される現代である。その時間の基本である秒は、正確に決まった単位のはずである。

ところが、秒には不確かさがつきまとうている。人間が決めた単位でありながら、「1秒が1秒ではない」ということがあるのだ。

かつて、古代人は太陽の周期性(地球の自転)に気づいて“1日”をつくり、中世人は時間・分と細分化し、さらに「1日の長さの1/86400」を“1秒”と決めた。

ところが、20世紀になる頃には、地球の自転速度が少しずつ遅くなっていること、従って1日の長さが変わってきていることが分かった。そうなれば、1日の長さの1/86400である1秒の長さも変わる。「1秒が1秒ではないこと」になってしまう。時間は事象を測る基本的な物差しだから、これでは具合が悪い。

そこで注目されたのが、1950年前後から開発が進んだ「原子時計」だ。これは、固有の振動数の光や電波を吸収・放射するという原子の性質を利用した時計で、原子に光または電波を当て、その正確で安定した振動数を高い精度で読み取ることで、時間を決めるのである。これを踏まえて国際度量衡総会(度量衡の国際的統一を行う組織)は1967年、「セシウム原子時計」による1秒の定義を国際的な基本単位とすることを決定した。すなわち、1秒とは「セシウム原子が吸収・放射する電波が、9,192,634,770回振動する時間」としたのである。これが現在、世界で共有されている時間のもととなっている1秒だ。

しかし、そんなセシウム原子時計も絶対ではない。3000万年に1秒の誤差(不確かさ、狂い)が生じるのだ。この誤差は、私たちには何の影響もないが、しかし、科学、たとえば極微の世界を扱う量子力学や素粒子論などにとっては、そうではない。そこに「誤差があれ

ばなくしたい」と思うのが科学者というものだ。

こうして1980年代からは、さらに高精度の時計の研究が行われるようになった。その流れのなかから、「光格子時計」が登場した。21世紀になって早々のことである。

外様の研究者

「初めは、いずれ破綻するだろうといわれましたが、ようやく、方法論の違う研究者からも、精度を追求するなら光格子時計がいい、と認められるようになりました」

こう感慨深げに語るのは、「光格子時計」を考案した東京大学教授の香取秀俊さんである。

原子時計研究者らの参加する国際会議で、香取さんが光格子時計のアイデアを初めて発表したのは2001年。当時は「単一イオン時計」(後述)という、正確さの観点からは「これしか解がない」と世界の研究者の誰もが認める有力な手法があり、大家から新進までの研究者のほとんどが、これだけに注目していた時期だった。一方、香取さんは当時37歳。他の分野の研究を経て原子時計の研究に加わった、いわば外様の研究者だ。

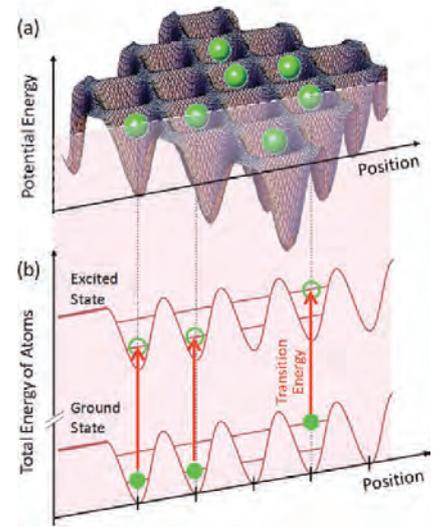
「単一イオンには新たに入り込む余地はないし、他の人と同じことをやるのもつまらない。それならいっそ、全然違う角度からアプローチしてみようと思ったのです」

こうして光格子時計の提案をしたわけだが、これは“常識破り”のものだけに、当初は受け入れる研究者も少なかった。

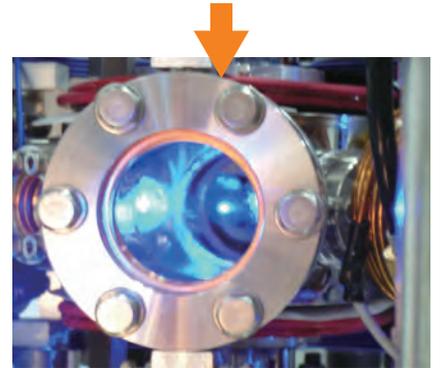
しかし発表から10年余りを過ぎ、事態は劇的に変化している。2003年、香取さんらの研究グループが基礎実験に成功してこの手法を実証すると、アメリカ・フランスの研究者がただちに反応して光格子時計の開発を始め、06年には日本側の計測とほとんど一致する結果を出した。

同じ06年、国際度量衡委員会は光格子時計を「秒の二次表現」の1つとして採択した。2020年頃に行われる見込みの「秒の再定義」で、セシウム原子時計の次の基本単位として選ばれる可能性が生まれたのだ。

●光格子時計の概念図……………



光格子模式図。レーザー光の干渉縞で作られた光格子とストロンチウム原子。(下)励起状態・基底状態のエネルギーが同方向にシフトするため、両者の差は一定で、原子はレーザー光の電磁場に囲まれていることに“気づかない”。



レーザーの照射口側から、光格子の入られたメーンチャンバー内部を見る。それぞれ孤立したストロンチウム原子が数千万集まり、全体で青白い雲をなしている。



1cmの違いが時計の進み方に出るのです。

研究総括

香取秀俊

かとり・ひでとし

1991年、東京大学大学院工学系研究科物理学専攻博士課程中途退学。博士(工学)。ドイツのマックス・プランク量子光学研究所客員研究員、東京大学工学部付属総合試験所助教授などを経て、2010年から東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻教授(現職)。11年から、理化学研究所「香取量子計測研究室」主任研究員を兼務。



回路図から量子コンピュータへ

香取さんは1964年、東京生まれ。理科が大好きな少年だった。小学生の頃夢中になったのは電気の工作で、とりわけ回路図がお気に入り。一日中、飽きずに見ていた。図のところどころに書き込まれた、○にエの印(つまり「江崎ダイオード」だ)に心ときめかせ、「物性(ブッセイ)」という言葉の響きにうっとりした。

もちろんコンピュータ少年でもあった。それが高じて中学生のとき、当時人気のマイコン「Apple II」の模造品を、回路図片手に組み立てたこともあるし、高校生のときには「将来はデバイスを作る仕事をしたい」と思っていた。

その延長で東京大学では物理工学を専攻、しかし物性ではなく原子分光の研究に取り組んだ。ファインマンの量子コンピュータの提案を目にしたのがきっかけだった。大学院を出た後、ドイツのマックス・プランク研究所に留学。ここではからずも、光格子時計の最初のアイデアを得ることになる。

そのころ、量子コンピュータに関する論文(シラク、ゾラー、1995)が一大センセーションとなっていた。そこにはトラップされたイオ

ンをキュービット(量子情報の最小単位)として使う、量子コンピュータの作り方が提案されていた。

「これを中性の原子でやれないだろうか、と思ったことが光格子時計のアイデアにつながりました」

同研究所では、得難い見聞もした。ほかでもない、隣室の研究者が「単一イオン光時計」の実験をやっていたのである。

これは、2対の電極に囲まれた真空中の空間に1個のイオンを閉じ込め、イオンの振動数を測る、「四重極型イオントラップ」を用いる方法だ。この方法では周囲に他の原子もなく、電場、磁場の影響も受けない「自由空間」という最高の条件のなかで、正確な測定ができるのだ。

しかし大きな難点があった。対象がイオン1個しかないので、何度も測定を繰り返して、平均値を求めなければならない。例えば、秒の精度を今より1000倍上げようとする、「1秒」を計測するのに10日もかかるのだ。「これでは研究にならない」。香取さんは思った。

「やはり、多くの原子を使って測定のスPEEDをあげたい。かといって、そのことによって

起きる原子同士の相互作用の問題などは避けたい。それを解決する方法を、何とか考えなければと思いました」

これもまた、光格子時計のアイデアにつながっていく大事なポイントだった。

「光格子」と「魔法波長」

そこで「光格子時計」である。測定の主な流れは次のようになっている。①オープンで個体のストロンチウムを気体化する、②レーザーを用い、2段階に分けてストロンチウム原子を絶対零度(マイナス273.15℃)近くにまで冷却する、③冷却した原子を、メインチャンバー内の光格子に閉じ込める、④光格子にレーザー光を当て、原子の放射する光の振動数を測定する。

ここには極低温操作、量子制御技術、レーザー制御技術といった、最先端の技術が駆使されているが、アイデアの核心は、やはり「常識破りの」光格子と魔法波長だ。

「光格子」とは、レーザー光の干渉縞で作った、三次元の小さな空間である(前頁上図)。この格子のくぼみに、ストロンチウム原子を1個1個閉じ込める。100万個を一度に測定できれば「1秒」の精度は確実に上がる。

子どもの頃から
ずっと電気回路
ばかり見て
きました。

しかし、これは“常識破り”の考え方だ。時間測定にとって理想的な対象は、「電場と磁場のない自由空間に静止した単一の原子」である。その大前提として、原子に影響を及ぼすさまざまな要因を排除することが必要だ。「光格子」では原子は各格子に孤立して閉じ込められているため、原子同士の衝突はないし、原子の熱運動によるドップラー効果をきたすこともないのでこの点はクリアしている。しかし、そもそも原子は、真っ先に排除すべき電磁場（格子）に閉じ込められており、これが原子に影響しないわけがない。つまり「時間測定に適した環境ではない」ということだ。

たしかに、閉じこめられている原子は、その分だけエネルギーがシフトしていく。そのままでは精密な測定はできないだろう。

しかし香取さんは、素晴らしい解決策を用意していた。閉じ込められて基底状態にあるエネルギーシフトに対して、励起状態でも同じだけエネルギーシフトさせることができれば、両者の差は一定だから、放射される振動数は変わらない。原子は自分を取り巻く電磁場（格子）の存在に気づくことなく、固有の振動を続けていくことになる(7ページ図)。

そして実際に、特定の波長のレーザー光を使って原子を閉じ込め、原子から放射される光の振動数が、閉じ込めによる影響を受けないことを確認した。このレーザー光の波長を「魔法波長」と呼んだのだ。

時計の精度が18桁を超えたら

「光格子時計」は昨年、2台の時計を比較して17桁の安定度を達成した。これは、2台の時計の周波数を17桁まで読み出したという意味である。だからこの数字は、大きくなれば大きくなるほど、精度が高いことを意味している。現在、世界時となっているセシウム原子時計の精度は15桁だから、それより100倍の精度ということになる。

香取さんが設計した光格子時計の精度は、18桁である。これは300億年に1秒の誤差だという。宇宙のすべてが始まったといわれるビッグ・バン(137億年前)から、わずか0.4秒しか狂っていない計算だ。

18桁の精度を達成すると、いろいろなことが変わる。たとえばアインシュタインのいう「時空のゆがみ」を実感できるらしい。

「1cm高い所にある時計では重力が弱くなった分だけ、時間が速く進むのを測定でき

る。相対論の時空のゆがみを、人間が実測できるようになるわけです。

そうすると、時計は、人間が時間の流れを認識するツールだけでなく、時空のゆがみを読み出すためのツールとしても期待されるようになるでしょう」

たとえば、原っぱのある場所だけ時計の進み方が遅ければ、この地面の下には、何か密度の高いものがあるに違いないということになる。

「軽々しくはいえないけれども、たとえば資源探査、地震予知といったものへの応用の可能性は考えていいと思います」

もう一つ、香取さんにとって大きな命題もある。

「物理定数は、本当に定数か」——これも時計の精度が上がれば、普遍性と恒常性が検証されていこう。時計が物理定数を変えるかもしれないのである。

ERATO「香取創造時空間プロジェクト」では、18桁に向けて「光格子時計」の精度を上げることに努めながら、「東京圏光格子時計のネットワーク」をつくって、超高精度な時計の新たな役割も考えていきたいと語る香取さん。18桁達成の快挙が待ちどおしい。■