

光格子時計: 開発と共に実利用へ

—周波数標準として15桁の高速な光周波数測定を実現—



井戸 哲也 (いど てつや)

経営企画部 企画戦略室 プランニングマネージャー

大学院修了後、JST-ERATO研究員、JILA (米国NIST/コロラド大学) Research Associate、JST-さきがけ研究者を経て、2006年、NICT入所。2012年10月まで電磁波計測研究所 時空標準研究室 主任研究員。大学院修了後よりSr原子のレーザー冷却及びその光格子時計への応用、また精密光計測技術や周波数コム技術を利用した真空紫外光発生の研究に従事。博士(工学)。

背景

NICTは周波数の標準値を設定し、標準電波を発射すると共に日本標準時を通報しています。標準電波等から得られる基準周波数が手元にあると、我々は測定したい周波数と基準周波数の比率を取ることによって周波数を測定することができます。そしてこの基準周波数(周波数標準)を供給することはNICTの任務の1つとなっています*1。高精度な周波数標準は原子時計によって生成されます。現在、秒及びその逆数である周波数はセシウム原子の2つの最低エネルギー状態間のエネルギー差に相当する電磁波(約9.2GHz)に基づいて定義されており、NICTにおいてもこれまでセシウム原子を使って原子時計を作り、秒の基準としてきました。セシウム原子時計による周波数計測は、16桁の精度が得られることが確認されつつありますが、残念ながらこの精度は3時間以上の計測を継続して行い、その平均を取ることによってようやく得られます。

従って長時間に渡ってその値が変動しない保証がある安定した周波数しか計測することができません。そこで周波数が5桁高い光領域(周波数約400THz)で原子時計を作ることによって精度16桁の計測を100秒以内の信号積算で可能とし、さらには18桁の精度を実現することが期待されており、そのような光原子時計の方式として日本発の光格子時計方式と欧米発の単一イオン光時計方式が世界中の研究機関で精力的に研究されています。NICTではストロンチウム(Sr)原子による光格子時計(不確かさ 5×10^{-16} 、図1)とカルシウムイオン(Ca^+)による単一イオン光時計(不確かさ 2×10^{-15} 、図2)の双方の方式について研究開発を進めています。今回、我々は6500万年に1秒という16桁の信頼性が既に得られているSr光格子時計を利用して、 Ca^+ 単一イオン光時計が生成する光の周波数を15桁の精度で測定しました。これはSr光格子時計を基準として、他の光周波数測定を行ったことを意味しており、来たる光領域の周波数を標準とする時代のさきがけとなるものです。

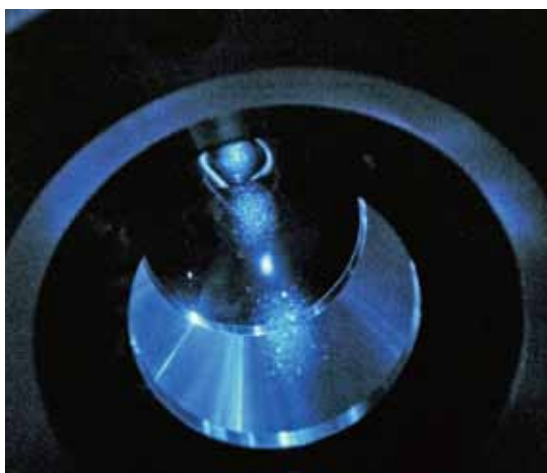


図1 Sr光格子時計

真空槽内の中心に数万個のSr原子をトラップして、単一イオントラップより強い信号強度で原子の共鳴周波数を得ることが出来る。

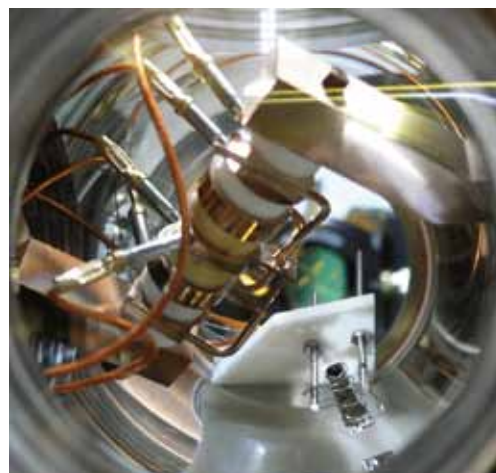


図2 Ca^+ 単一イオン光時計

金属板に空けた直径2mmの円の中心にたった1個のイオンをトラップし、イオンにレーザー光を当てて常に共鳴するように光周波数を調整して標準周波数を得る。

*1 標準電波には振幅の大小を時間的に変化させることによって時刻情報が載せてあり、これを利用しているのが電波時計です。しかし、長波帯にある40kHzや60kHzの搬送波そのものが周波数標準として12桁の精度で送出されており、伝搬中に多少精度が劣化しますが11桁の精度で受信することが出来ます。

Sr光格子時計

NICTのSr光格子時計については、日本標準時が生成する1秒を基準として絶対周波数を測定した結果、図3に示すように日米仏独の他のSr光格子時計とよい周波数一致を示しています。さらに、NICT本部（東京都小金井市）にて生成される光信号を全長60kmの光ファイバで東京大学本郷キャンパスに伝送して、相対的に56m標高が低い東京大学の光格子時計と周波数を比較したところ、重力差が引き起こす2.6Hz程度の一般相対性理論の効果による周波数差が明瞭に検出され、これを補正すると周波数が 7×10^{-16} の不確かさで一致することが確認されました*2。こうした結果からSr光格子時計は異なる研究機関の間で16桁の周波数一致が確認された世界初かつ唯一の光時計方式となっています。Sr光格子時計については、図3の5研究機関の他にも産業技術総合研究所や英国・中国等で開発が進められており、将来、秒の再定義を実現する原子時計となることが期待されています。

NICTではこのSr光格子時計の周波数に対するCa⁺単一イオン光時計の周波数の比率を

$$\frac{\nu_{Ca}}{\nu_{Sr}} = 0.957\ 631\ 202\ 358\ 049\ 9$$

と不確かさ 2.3×10^{-15} で測定することに成功しました。これは単に高精度な測定をただでなく、実効的にSr光格子時計を基準としてCa⁺単一イオン光時計の周波数を測定したことに相当します。1秒がセシウム原子時計で定義されている今、周波数測定とは被測定周波数とセシウム原子の超微細構造間遷移周波数の比率を測定することであり、測定した比率にセシウム原子時計の定義周波数9,192,631,770Hzを掛け算して我々は周波数として利用しています。つまり「基準周波数との比率を取る」こそが周波数測定の本質であり、今回初めてSr光格子時計を基準として比率を測定し、その結果が従来のセシウム標準による長時間測定から得られる結果と矛盾がないことを確認しました。測定時間についても従来のマイクロ波基準を利用した場合には15桁の測定に3時間以上の信号積算が必要だったのに対して、今回の光周波数標準を基準とした場合にはわずか20分の積算で測定できました。

時間周波数諮問委員会 (CCTF)

上述の①Sr光格子時計の絶対周波数の測定、②Ca⁺単一イオン光時計の絶対周波数の測定、及び③周波数比の測定については国際学術誌に掲載され、それを受けてNICTは2012年9月に開催された国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会に測定結果を提出しました。委員会ではこの論文の結果について承認がなされ、NICTの測定値は委員会が推奨するSrの時計遷移周波数とCa⁺の時計遷移周波数の決定に寄与しています。とりわけ、Sr光格子時計は、将来実施が検討されている秒の再定義の候補とされる「秒の二次表現」の中で現在最も小さい不確かさ(1×10^{-15})を実現しています。

また、次の会合以降、委員会では光周波数標準の開発結果の報告に際して、従来通りの（セシウム標準に対する周波数比である）絶対周波数に加えて、別の光周波数標準に対する周波数比の報告も要請されるようになり、今回のNICTからの報告はその流れを先取りしたものとなりました。

展望

今回の我々の成果によって、Sr光格子時計が光周波数測定の標準として機能することが実証されました。今後はSr原子を摂氏-170度以下の低温環境に置くことによって、室温の真空槽内壁からのわずかな黒体放射を無くして原子がこの放射を感じることに伴う周波数シフトをなくす、等の改良を重ね、17桁の不確かさを実現することが次の目標です。地球上での重力は月と太陽から受ける引力によってごくわずかに変化し、これが潮の満ち干を引き起こしていることが知られています。このわずかな重力の変化の影響は一般相対性理論の予言によると時の進み方において17桁目に現れると言われています。近い将来、光時計はそんな効果をもしっかりと捉えて我々に示してくれることでしょう。

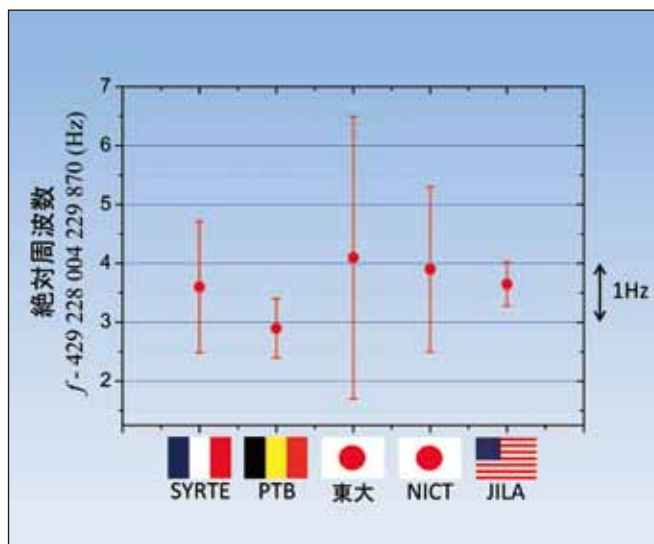


図3 世界4ヶ国5研究機関で動作しているSr光格子時計の周波数
各研究機関で得られる約429THz (429×10^{12} Hz)の周波数はわずか±1Hzの範囲内で一致している。

*2 詳しくはNICT NEWS 2011年10月号を参照ください。