

## 論文の内容の要旨

論文題目 低温動作 $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計の研究

氏名 牛島 一郎

### 1. 研究の背景

時間・周波数は、現在、物理量の中でも最も精度良く測定する事が可能な量となっている。時間・周波数計測において、その基準となる「秒」は、原子時計によって定められている。新たな高精度原子時計の開拓は、国際単位系の一つである「秒」の再定義においてインパクトを与えるだけでなく、社会基盤への活用や科学的応用においても重要である。原子時計の社会基盤への活用としては、全地球測位システム（GPS）の精度向上や通信ネットワークの高速・大容量化などが挙げられる。また、科学的面でも、物理定数の恒常性や、アインシュタインの等価原理の検証、宇宙からのスペクトルを分光し太陽系外惑星の探索を行うなど、様々な応用が期待されている。

「秒」の定義は現在、セシウム（Cs）原子の基底状態における超微細準位間マイクロ波遷移（9.2 GHz）によって定義されている。このCs原子時計は、世界各国の研究拠点において開発されており、それらの加重平均を取ることにより15桁の精度で全世界共通の時間（国際原子時）が定められている。しかし、2000年頃から開発された光周波数コムにより、 $10^{14}\sim 10^{15}\text{ Hz}$ の光周波数が測定出来るようになった事で、マイクロ波周波数から、光周波数を用いた原子時計へと研究の中心が移行しつつある。原子時計の精度は、時計周波数に比例して向上するため、光時計はマイクロ波時計に比べ5桁ほどの利点がある。

光時計は、次世代の時間・周波数標準として期待されており、現在主に二種類の時計が研究されている。一つは、RF電場を用いて単一イオンを捕獲し観測する「単一イオン時計」、もう一つは、光格子を用いて中性原子を多数個捕獲し観測する「光格子時計」である。これらの光時計の精度は、すでに国際原子時の精度を遥かに上回り、特に単一イオン時計においては、18桁の精度での時計動作が示されている[1]。しかし、単一イオン時計は、1000個の原子を用いる光格子時計に比べ、量子射影ノイズ限界により同じ精度を出すために1000倍の積算時間が必要となる。本研究では、短時間で高精度を実現する時計の開発を目指し、現在、光格子時計の精度を制限している黒体輻射の影響を低減する低温動作光格子時計の開発を行った。

## 2. 研究の課題

本研究で開発するストロンチウム (Sr) 原子を用いた光格子時計は、2001年の提案以降、18桁精度実現を目指して、さまざまな不確かさ要因の評価が進められ、現在、最も大きい不確かさとなっているのは、室温の黒体輻射によって生じる周波数シフトの影響である。Sr原子の時計周波数は $\nu_0=429$  THzであり、相対周波数 $\delta\nu/\nu_0=1\times 10^{-18}$ の精度とは周波数シフト $\delta\nu$ を0.4 mHz以下に抑える事に相当する。Sr光格子時計における室温の黒体輻射シフトは $\sim 2$  Hzであり、 $\delta\nu/\nu_0=1\times 10^{-18}$ の精度に到達するためには、原子の室温環境温度の不確かさを14 mK以内に抑える必要がある。また、現在まで、2台の原子時計比較において、17桁で周波数の不一致が見られている。これは、イオン時計では長時間の積算時間が必要な事により精度評価が難しく、またSr光格子時計では黒体輻射シフトによる影響が主な原因となっている。よって、本研究では以下2つの課題について研究を行った。

- ・ 温度制御によるSr光格子時計の黒体輻射シフトの観測と評価
- ・ 2台の低温動作Sr光格子時計による18桁周波数比較

## 3. 本研究の実験方法

本研究では、Sr光格子時計における黒体輻射シフトの不確かさ低減を目的として、低温動作Sr光格子時計の開発を行った。黒体輻射シフトは、ステファンボルツマンの法則に従う温度 $T$ の4乗に比例する項と、分極率の周波数依存性により生じる $T$ の6乗に比例する項で書けるため、原子の周囲環境温度を低温に冷却することでその影響を抑制できる事に着目した。本研究では、真空槽内に冷却可能な恒温槽を導入した。この系では、Sr原子の磁気光学トラップによる捕獲・冷却と、光格子による光トラップは恒温槽の外部で行い、その後、移動光格子によって恒温槽内に原子を移行し、恒温槽内で時計周波数の測定を行う[図1]。恒温槽の冷却装置にはスターリング冷凍機を用い、その電流を制御する事により温度制御を行った。恒温槽を冷却し、温度制御した結果が図2であり、低温下で温度揺らぎを2 mK以下に制御出来た。しかし温度センサ自身の不確かさが22 mKあるため、この温度不確かさにより制限される。本研究では恒温槽を95 Kに冷却し黒体輻射シフトを約1%に抑えた。95 Kでの温度不確かさ22 mKは周波数不確かさにして $2.5\times 10^{-20}$ であるため、 $1\times 10^{-18}$ に対して十分な低温環境を実現する事が出来た。

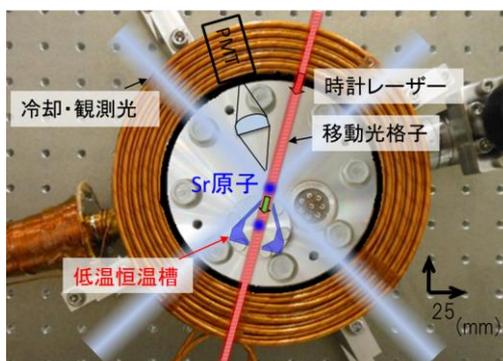


図1. 低温動作 Sr 光格子時計の実験系

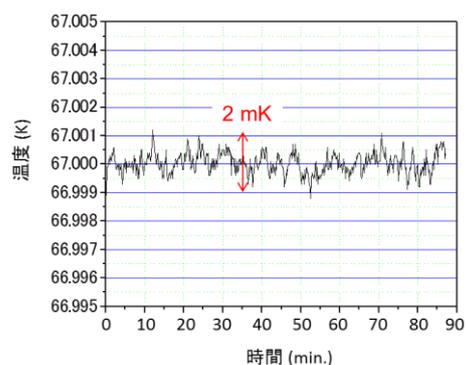


図2. 低温恒温槽の温度制御

#### 4. 黒体輻射シフトの観測と評価

恒温槽を備えたSr光格子時計を2台開発し、1台を一定温度、もう1台の恒温槽の温度を変化させる事によって、温度変化によって生じる時計周波数の変化を観測し、黒体輻射シフトを測定した。図3は、青線が2台を95 Kの低温環境で動作させ周波数差を測定した結果であり、周波数の一致が示された。また赤線が1台を95 Kで動作させ、もう1台を室温296 Kで動作させた時の周波数差を測定した結果であり、温度差による黒体輻射シフトが測定された。得られた黒体輻射シフトの値 $-2.1384(21)$  Hzは、恒温槽の温度とドイツのグループが測定した分極率の値を用いて計算される黒体輻射シフト $-2.1395(21)$  Hz[2]と誤差の範囲内で一致し、恒温槽を用いて黒体輻射シフトが評価出来る事が示された。

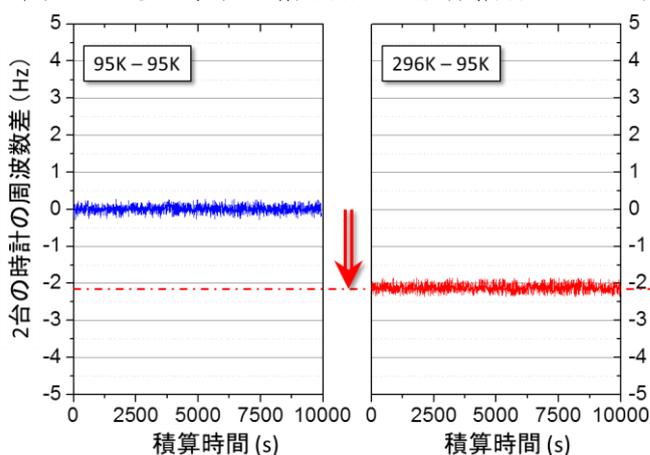


図 3. Sr 光格子時計の温度制御による  
黒体輻射シフト測定

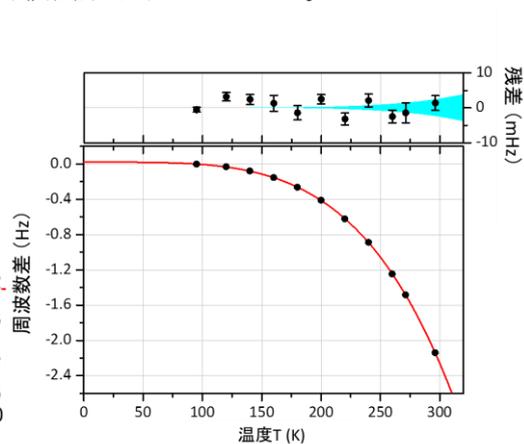


図 4. ステファンボルツマンの法則に  
従う黒体輻射シフトの温度依存性

また、黒体輻射シフトの $T^4$ に比例する項と $T^6$ に比例する項において、 $T^4$ に比例する項は静電場による分極率測定により高精度に実験的評価がなされているが、 $T^6$ に比例する項は計算値 $-0.1476(23)$  Hz[2]が用いられている。よって、本研究では様々な温度で黒体輻射シフトを評価し $T^6$ の項を決定した。図4が1台を95 Kで動作させ、他方を室温から低温まで様々な温度で制御して周波数差を測定した結果である。赤線は、 $T$ の4次と6次でフィッティングした線である。この実験結果から6次の項は $-0.1480(26)$  Hzと求まり、温度制御によってSr光格子時計の黒体輻射シフトを18桁精度で評価する事に成功した。

#### 5. 低温動作光格子時計による18桁周波数比較

2台の時計を低温環境で動作させて、それらの周波数比較を行うことによって、低温動作Sr光格子時計の性能評価を行った。周波数比較には同期比較測定を用いる事で、レーザノイズを同相除去し、短い積算時間で高精度な周波数比較を実現した[3]。2台の周波数比較の安定度(アラン分散)が図5である。現在、最も精度の高い単一イオン時計[1]では、20日の積算時間が必要な精度 $2 \times 10^{-18}$ に、本研究の低温動作Sr光格子時計ではわずか2時間の積算時間で到達することができた。

本研究で開発した低温動作Sr光格子時計の精度評価のため、約1ヶ月間にわたり2台の周波数比較を行った。図6が比較により得られた周波数差をプロットした結果である。それぞれのエラーバーは図5の安定度により得られる統計不確かさである。2台の周波数差は $(-1.1 \pm 1.6) \times 10^{-18}$ となり、18桁で2台の時計の周波数が一致した。また、2台の時計比較の系統不確かさは、詳細な評価により $4.4 \times 10^{-18}$ となり、2台の高精度光格子時計の実現と18桁の周波数比較に成功した事が示された[4]。これまでの2台の時計比較では、17桁台で周波数のずれが観測されており[1,5,6]、18桁での2台の時計の一致は、本研究が初の結果である。

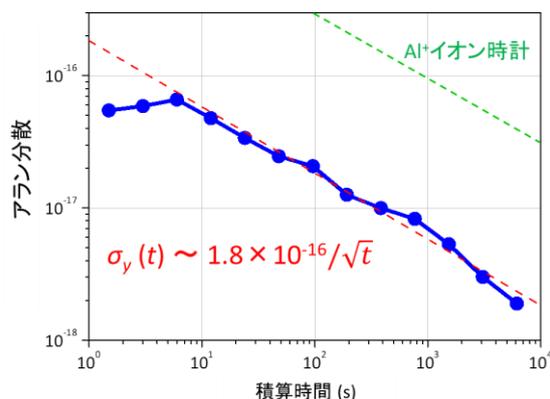


図 5. 低温動作 Sr 光格子時計比較の安定度

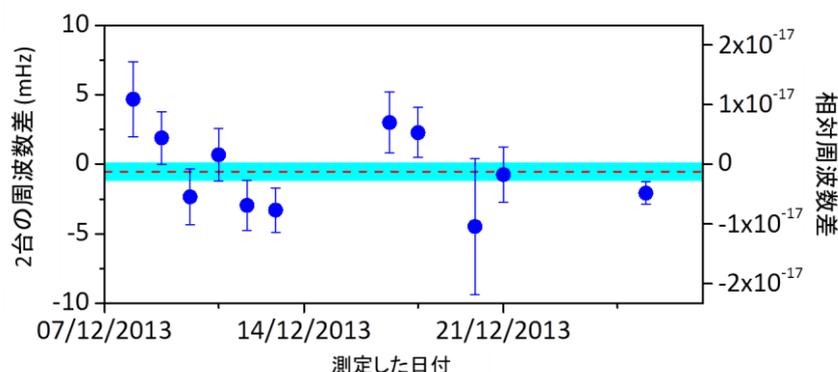


図 6. 2 台の低温動作 Sr 光格子時計の周波数差測定

このような18桁の周波数精度では、2台の時計に1 cmの標高差があると、その重力ポテンシャル差を2台の時計の周波数差として検知できる。そのため、光格子時計を各地に配置、もしくは可搬型光格子時計の開発し、それらの周波数比較を行うことによって、重力ポテンシャルの変動の実時間高精度計測、ジオイド・重力場のマッピングが可能となる。本研究で実現した18桁周波数比較は、光格子時計による「秒」の再定義を加速させるだけでなく、このような時計の応用的研究を促進させることが期待される。

#### 参考文献

- [1] C. W. Chou *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**, 070802 (2010).
- [2] T. Middlemann *et al.* Phys. Rev. Lett. **109**, 263004 (2012).
- [3] M. Takamoto, T. Takano and H. Katori, Nat. Photon. **5**, 288-292 (2011).
- [4] I. Ushijima *et al.* arXiv:physics/1405.4071.
- [5] N. Hinkley *et al.* Science **341**, 1215-1218 (2013).
- [6] B. J. Bloom *et al.* Nature **506**, 71-75 (2014).