

博士論文（要約）

イッテルビウム・ストロンチウム  
光格子時計の  
時計遷移周波数比測定

大久保 拓哉

## 1. 研究の背景

近年、光遷移を利用した原子時計（光時計）の研究が進展し、現在の1秒の定義であるセシウム (Cs) 原子のマイクロ波遷移を利用した原子時計（Cs原子時計）を下回る系統不確かさが複数の光時計で実現している。こうした状況を受けて、光時計を用いた秒の再定義の可能性が議論されている。

そうした次世代の光周波数標準の有力な候補として、光格子時計が挙げられる。光格子時計では、光の定在波が作るポテンシャル（光格子ポテンシャル）によって一度に多数の原子をラム・ディッケ束縛し、ドップラーフリーな時計遷移分光を行う。これによって量子射影雑音の影響を抑えた高安定な測定が実現する。また光格子ポテンシャルで原子を捕獲することで時計遷移に周波数シフト（光シフト）が生じるが、光格子ポテンシャルを形成するために用いるレーザー光（光格子レーザー）の周波数を適切に選ぶことによってその影響を抑えている。

光格子時計の中では、ストロンチウム (Sr) 原子・イッテルビウム (Yb) 原子を用いたものが秒の二次表現に採択されており、秒の再定義の有力な候補と期待されている。本論文ではYb原子を用いた光格子時計（Yb光格子時計）を新しく開発し、その系統不確かさ評価およびSr原子を用いた光格子時計（Sr光格子時計）との比較による時計遷移周波数比測定を行った。

光時計の系統不確かさがCs原子時計を下回る状況下で光時計の再現性を実証するためには、光時計の遷移周波数同士の直接比較が重要になる。この比較には同じ原子種を用いた光時計の比較と異なる原子種を用いた光時計の比較の2通りが考えられ、このうち後者の比較は時計遷移周波数比測定によって実現される。このようにして得られた比の値の不確かさは、光時計自身の不確かさで制限されるため、Cs原子時計との比較である絶対周波数測定の不確かさよりも小さくすることが可能である。

また異なる原子種の時計の比較では1ではない周波数比が測定される。こうした比の値および不確かさの情報は、世界中で共有し、追試・検証することが可能である。このため時計遷移周波数比の測定は、将来の秒の再定義に向けた重要な過程であると考えられる。

## 2. 低温動作イッテルビウム光格子時計の開発

Sr原子およびYb原子を用いた光格子時計では、原子と常温の黒体輻射光との相互作用による周波数シフト（黒体輻射シフト）が不確かさを制限する要因であった。Yb原子の場合、0.3 Kの温度変動が $1 \times 10^{-17}$ の相対不確かさに変換される。

黒体輻射シフトに制限されない光格子時計として、Sr原子を用いた低温動作光格子時計が近年実現された。低温動作光格子時計では、原子を低温環境 (<100 K) 下で分光する。こうすることで、黒体輻射シフトは系統不確かさを制限する要因ではなくなる。Yb光格子時計においても、低温環境での分光は不確かさを低減するうえで有用な手段

であり、本論文ではこうした観点から低温動作Yb光格子時計を開発した。

Yb原子はSr原子と同様に遷移波長が近赤外から可視光の領域に分布している。そのため実験に使用する光学系を共有できる。したがって本論文では、Sr原子用に開発された低温動作光格子時計の系を利用して低温動作Yb光格子時計を開発した。真空槽および周辺の光学系は共有できるため、その他の装置開発として2原子種用の原子源およびYb原子の冷却・トラップおよび時計遷移分光用のレーザー光源を開発した。

開発した装置を用いたゼーマン冷却・磁気光学トラップによって、Yb原子は15  $\mu\text{K}$ の極低温まで冷却された。それらの極低温原子は光格子ポテンシャルにロードされた後、低温恒温槽に輸送される。

低温恒温槽内に輸送された原子はサイドバンド冷却によって光格子中での振動量子数がほぼゼロの状態まで冷却される。またスピン偏極という手法によって内部状態が同一の磁気副準位に揃い、原子同士のs波散乱の抑制が期待される。

時計遷移の狭線幅分光においては、パルス幅を200 msとしたラビ分光を行った。その結果、フーリエ限界に迫る線幅5 Hzのスペクトルを得た。またスペクトルにおける励起率の情報を用いて時計レーザー周波数の時計遷移への安定化を実現し、後述する系統不確かさ評価および時計遷移周波数比測定に用いた。

### 3. 低温動作イッテルビウム光格子時計の系統不確かさ評価

開発した低温動作Yb光格子時計について、各種の周波数シフト要因に対して系統不確かさ評価を行った。これまでにYb光格子時計では $10^{-16}$ のオーダーの系統不確かさが実現しており、その値は主に黒体輻射シフトと光シフトで制限されている。

黒体輻射シフトについては、96 Kの低温環境で分光することにより、シフトの大きさをおよそ1/100に抑えている。原子・光格子レーザーを通す穴からは常温の黒体輻射光も流入するが、その影響を考慮しても黒体輻射シフトの不確かさは $0.7 \times 10^{-18}$ と見積もられている。

光格子レーザーの影響は、その周波数を調整することにより上下準位でほぼキャンセルしている。本論文では、周波数の調整ではキャンセルしきれない高次の相互作用に由来する光シフトの影響を考慮した。原子と光の相互作用には電気双極子の他に、多重極、超分極といった高次の寄与が存在し、不確かさの小さい評価ではそれらを考慮する必要がある。本論文では先行研究で提案されたモデルを使用し、モデルのパラメータを決定する形で光シフトの評価を行った。

多重極シフトは原子の光格子ポテンシャル中の原子の振動量子数とカップルするため、パラメータの決定のためには、異なるポテンシャル深さにおける光シフト評価だけではなく、異なる振動量子数における周波数シフト評価が必要になる。そこで本研究では光格子ポテンシャル中でのサイドバンド冷却の有無による光シフトを測定し、多重極シフトの寄与を評価した。

高次の項を考慮したモデルのパラメータを用いた結果、典型的な実験条件における光シフトは $(-0.9 \pm 3.3) \times 10^{-17}$ と求められた。またこのとき電気双極子と超分極の寄与によって光シフトのポテンシャル深さ依存性がほぼフラットになっている。

本論文では低温動作イッテルビウム光格子時計の系統不確かさを全体で $3.5 \times 10^{-17}$ と見積もった。この値には上記の黒体輻射シフトおよび光シフトの他に、衝突シフト、二次ゼーマンシフト、プローブ光シフト等の寄与が含まれている。この不確かさは先行研究で得られている $10^{-16}$ のオーダーの系統不確かさをおよそ一桁下回り、Yb原子を用いた光格子時計ではこれまでで最も小さい系統不確かさを実現した。

#### 4. 低温動作ストロンチウム光格子時計との比較による時計遷移周波数比測定

上記の系統不確かさ評価を行った低温動作Yb光格子時計を、低温動作Sr光格子時計と直接比較することで、時計遷移周波数比の測定を行った。参照器に用いた低温動作Sr光格子時計においては、 $5.8 \times 10^{-18}$ の系統不確かさが実現している。

周波数比較においては、産業技術総合研究所で開発された光周波数コムを用いて周波数リンクを構築した。光周波数コムによってSr原子用時計レーザーとYb原子用時計レーザーは超高安定参照共振器を共有する。そのため2台の時計レーザーの周波数に参照共振器由来のノイズがコモンモードで生じるが、その影響は同期比較という測定手法によって抑制できる。

同期比較は2台の時計でコモンモードノイズを持つ時計レーザーを同時に照射し、時計の励起ノイズに相関を持たせる手法である。これによって周波数比の値に対する励起ノイズの影響がコモンモードで打ち消される。この手法を採用して測定したところ、 $4 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau}$ の安定度が得られた。この安定度は、先行して行われた単一イオン時計同士の周波数比測定の安定度と比較してほぼ1/10であり、同じ統計不確かさに到達するための積算時間がおよそ1/90に短縮されている。

比の測定は2015年の2月から6月にかけて10回行った。測定値の不確かさは各測定の実験条件に起因する系統不確かさで制限されており、 $2.9 \times 10^{-17}$ の統計不確かさで比の値の再現性を確認した。得られた測定データを解析した結果、比の値を $R=1.207\ 507\ 039\ 343\ 337\ 749\ (55)$ と求めた。相対不確かさは $4.6 \times 10^{-17}$ であり、これまでに得られた異原子種間の周波数比測定の中で最も小さな不確かさを実現した。

#### 5. まとめ

本論文では低温動作Yb光格子時計を開発し、低温動作Sr光格子時計との周波数比較により時計遷移周波数比を測定した。低温動作Yb光格子時計では黒体輻射シフトおよび光シフトの不確かさを抑制し、従来のYb光格子時計よりも一桁小さい系統不確かさを実現した。また時計遷移周波数比測定では同期比較の手法により従来よりも安定度の高い測定を実現した。比の値の相対不確かさとしては、異原子種間の周波数比較のなか

ではこれまでで最も小さい不確かさを実現した。

今回得られた比の測定値の不確かさは、低温動作Yb光格子時計の系統不確かさによって制限されており、低温動作Yb光格子時計の系統不確かさには主として光シフトの不確かさが寄与している。従って光格子中の原子のさらなる冷却やより深いポテンシャル中での光シフト評価などにより、光シフトの不確かさを抑制することで時計遷移周波数比の不確かさもさらに低減すると考えられる。