

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 牛島 一朗

現在、SI 単位系の 1 秒は、セシウム ( $^{133}\text{Cs}$ ) 原子の基底状態の超微細準位間のマイクロ波遷移 ( $\nu \approx 9.2 \text{ GHz}$ ) によって定義され、世界各国の Cs 原子時計の加重平均によって 15 桁の精度で国際原子時として維持されている。1990 年後半に、光周波数のシンセサイザー「光周波数コム」が発明・開発されると、 $(\nu =) 10^{14} - 10^{15} \text{ Hz}$  の光周波数の自在な計測が可能になった。原子のマイクロ波遷移の代わりに、光遷移を用いれば、同レベルの分光計測の不確かさ ( $\Delta\nu$ ) に対して、4-5 桁の時計精度 ( $\Delta\nu/\nu$ ) 向上が期待できることから、光遷移を用いる原子時計—光原子時計—の研究・開発が急ピッチで進んだ。

この光原子時計は、次世代の時間・周波数標準として期待され、2つのアプローチで研究が行われている。一方は、1980年代にデーメルトによって提案された、高周波で駆動する四重極電場の中心に単一イオンを捕獲し観測する「単一イオン時計」であり、他方は、2001年に提案された、原子に正味の摂動を与えないように設計された光格子を用いて、多数個の中性原子を同時に捕獲し観測する「光格子時計」である。これら2種類の光原子時計は、すでに国際原子時の精度を上回り18桁に迫る精度で評価が進んでいる。

原子の遷移周波数測定における量子射影ノイズによって、 $N$ 個の原子を用いる光格子時計に比べ、「単一イオン時計」では、同じ統計的不確かさを得るのに $N$ 倍長い平均化時間が必要となる。18桁の周波数計測では、「単一イオン時計」で必要とされる約10日にも及ぶ長い平均化時間は大きな実験的困難であることから、多数個原子の同時観測を可能にする光格子時計の優位性がいっそう顕著となる。

これまで光格子時計はSr原子、Yb原子を用いて研究・開発が行われてきたが、18桁の時計精度を達成するための最大のハードルは、室温の黒体輻射によって生じるシュタルクシフト—黒体輻射シフト—の評価であった。

本研究では、Sr 光格子時計の精度を制限する黒体輻射の影響を劇的に低減する「低温動作 Sr 光格子時計」の開発を行った。黒体輻射シフトの主たる寄与は、ステファン・ボルツマンの法則に従う電磁場のエネルギー密度に起因するシュタルクシフトであることから、環境温度 $T$ の4乗に比例して増大する。従って、原子の周囲温度を(室温の $T = 293 \text{ K}$ から) $T = 95 \text{ K}$ に冷却すれば、黒体シフトをおよそ1/100に低減できる。この低温動作光格子時計を2台構築し、その周波数を比較することで、Sr 原子の黒体輻射シフトの観測・評価、および制御を行った。この結果、2台の光格子時計の一致は $1.6 \times 10^{-18}$ に達し、1台の時計の系統的不確かさは $7.2 \times 10^{-18}$ で評価された。

本論文は7章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、本論文の序論として、時間・周波数標準の変遷と、その中での光格子時計

の優位性について述べた後、周波数計測の意義について紹介している。次に、本研究の目的と概要を述べ、本論文の構成を示している。

第2章では、本研究の理論的な背景として、光格子時計の原理を説明している。原子の運動によって生じる周波数シフトについて議論し、 $^{87}\text{Sr}$  原子を用いた1次元光格子時計の概略とレーザー電場によって生じる周波数シフトの除去について述べている。その後、黒体輻射、磁場、原子間相互作用によって生じる周波数シフトについて議論している。

第3章では、 $^{87}\text{Sr}$  原子をレーザー冷却し1次元光格子に捕獲する方法について述べている。まず、Sr 原子のエネルギー準位構造から原子の冷却・捕獲に用いる遷移を述べ、準備した光源について説明している。次に、実験装置について述べた後、光格子捕獲までの実験シーケンス、観測系の構成、そして、原子数評価について述べている。

第4章では、Sr 光格子時計における最大の不確かさ要因である黒体輻射シフトについて述べ、黒体輻射シフトの低減方法を議論している。また本研究で用いた恒温槽の設計について説明し、恒温槽の冷却実験について述べている。

第5章では、まず光格子中に捕獲した  $^{87}\text{Sr}$  原子を低温恒温槽内に輸送する移動光格子について述べている。次に、時計遷移スペクトルに必要な光源について述べた後、 $^{87}\text{Sr}$  原子の時計遷移スペクトルを用いて、原子のスピン偏極や光格子中の振動準位、 $^{87}\text{Sr}$  原子の黒体輻射シフトの観測について議論している。観測されたスペクトルにレーザーの周波数を安定化する手順を述べた後、黒体輻射シフトを18桁精度で評価した結果について述べている。

第6章では、2台の低温動作  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計による周波数比較実験について議論している。2台の時計のビート信号からアラン分散を計算することで安定度を評価するとともに、それらの周波数差を長期間にわたって測定し、18桁での時計周波数の一致を報告している。さらに、系統的不確かさの各要因について測定、計算を行い評価した結果について述べている。

第7章では、本研究の結果をまとめ、課題と今後の展望を述べている。

以上のように、本研究では、黒体輻射シフトの影響を劇的に低減する低温動作光格子時計の構築、評価を行なっている。温度制御可能な低温恒温槽を導入することで、18桁の精度で黒体輻射シフトを計測し、制御可能なことを実証した。さらに積分時間 6,000 秒で  $2 \times 10^{-18}$  の安定度で時計の不確かさ評価を行い、2台の時計周波数の一致を  $1.6 \times 10^{-18}$  不確かさで示した。本研究により光格子時計が、高安定度で、かつ、18桁の精度を実現可能な手法であることが初めて実証された。この成果は、次世代の時間標準技術の最有力候補として光格子時計を検討する上で重要な知見と示唆を与えるものであり、今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。