

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 赤塚 友哉

近年の光周波数コム技術の発達により、 $10^{14} \sim 10^{15}$ Hz にも及ぶ光周波数を電氣的に直接計測することが可能になった。この結果、従来マイクロ波周波数で行われてきた原子時計の研究は、より振動数が高く、安定度の向上が期待できる光周波数に舞台を移した。この光時計の研究は、1秒の定義であるセシウム原子時計や、それらをもとに維持されている国際原子時の不確かさ—およそ 5×10^{-16} —を凌駕する勢いで進み、次世代の時間・周波数標準として期待されている。光時計では、ポールトラップ中に捕獲した単一イオンを観測する「単一イオン時計」が数十年にわたって有望な手法として研究されてきた。この一方、光格子に捕獲された多数原子の観測により、「単一イオン時計」における信号強度の改善を目指す「光格子時計」手法が 2001 年に提案され、これまでに 1次元の光格子に捕獲された Sr 原子や Yb 原子のボーズ、フェルミ同位体で実験的研究がなされてきた。この結果、2008 年現在、光格子時計は、世界の複数の研究機関でおよそ 1×10^{-15} の不確かさで評価されるに至った。

本研究では、光シフトの偏光依存性や原子間衝突の影響を最小にする究極の光格子時計の実現手法を(1)光格子の幾何学的な配置に由来する偏光状態と(2)被観測原子の量子統計性の観点から検討している。この結果、「フェルミ同位体の 1次元光格子時計」と「ボーズ同位体の 3次元光格子時計」が最適設計であることを議論し、その実験的検証を行った。特に、ボーズ同位体 ^{88}Sr 原子を用いた 3次元光格子時計を初めて構築し、フェルミ同位体 ^{87}Sr 原子を用いた 1次元光格子時計と光周波数を比較することで、 1×10^{-15} 不確かさで、2つの同位体の時計遷移の周波数比を決定している。

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、過去の光格子時計の研究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。外部磁場の印加による波動関数の混合により ^{88}Sr 原子の時計遷移に遷移双極子モーメントを誘起する手法と、原子の運動や電場・磁場、原子間相互作用、黒体輻射等の要因によって生じる周波数シフトについて議論し、これらを除く方法について説明している。そして、 ^{87}Sr 原子を用いた 1次元光格子時計と ^{88}Sr 原子を用いた 3次元光格子時計について、それぞれ概略を述べている。

第 3章では、まず一般的な光格子ポテンシャルについて記述し、周期ポテンシャル中にトラップされた原子が持つエネルギーバンド構造や、重力ポテンシャルによるサイト間トン

ネリングの抑制手法について述べている。次に、位相が安定な 2 次元以上の光格子を構成する方法を説明し、本研究で用いられている 3 次元光格子の構成とポテンシャルの形状について述べている。

第 4 章では、Sr 原子の冷却手法と実験装置について説明し、原子を光格子へ供給するまでの手順を詳細に述べている。また、光格子にトラップされた原子数、寿命、温度について評価している。

第 5 章では、3 次元光格子中で ^{88}Sr 原子の時計遷移スペクトルを観測し、振動準位やプローブ光の影響によるラビ周波数の不均一性について考察している。次に、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ている。

第 6 章では、 ^{88}Sr 原子の 3 次元光格子時計と ^{87}Sr 原子の 1 次元光格子時計による周波数比較実験について述べている。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の評価し、それぞれの時計について各周波数シフトを測定・補正することで同位体シフトを求めている。

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。

付録では、本論文に関連するアラン分散やディック効果についての知識や計算の詳細を説明している。

以上のように、本研究では、究極の光格子時計の実現手法を議論するとともに、これまでに実現されていなかった 3 次元光格子時計の設計、構築、評価を行なった。2 台の光格子時計の相互比較によって、積分時間 2,000 秒で 5×10^{-16} の不確かさでの周波数比較を実現するとともに、本研究で初めて実現した「 ^{88}Sr を用いた 3 次元光格子時計」では、計測の不確かさの範囲では衝突シフトが検出されず、その手法の有効性を示した。光格子時計の手法が次世代の時間標準技術として有望な候補と目されている中で、本研究はこの手法の展開を検討する上で、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。