

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 山中 一宏

現在の SI 単位系の「秒の定義」を与えるセシウム (Cs) 原子時計は 16 桁の不確かさに到達し、時間・周波数計測の拠り所として、基礎科学、工学の両面から重要な役割を担っている。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、 $(\nu =) 10^{14} - 10^{15}$ Hz の光周波数の自在な計測が可能になった。Cs 原子のマイクロ波遷移 ($\nu = 9.2$ GHz) 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 桁の周波数精度 ($\Delta\nu/\nu$) 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、単一イオンをポール・トラップに捕獲し観測する「単一イオン時計」であり、他方は、2001 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。N 個の原子の同時観測を可能にした光格子時計では、同じ統計不確かさに到達するのに必要な測定時間を「単一イオン時計」の場合の $1/N$ に短縮する。この結果、18 桁精度を目指す、長い平均時間を必要とする周波数計測では、光格子時計の優位性がいっそう顕著となってきている。

これまでストロンチウム (Sr) やイッテルビウム (Yb) 原子を用いた光格子時計では、Cs 原子時計を凌駕する不確かさが実現され、次世代時間標準の有力候補である「秒の二次表現」に採択されている。これらの光格子時計での大きな不確かさ要因は、原子を囲む壁からの黒体放射の電場による時計遷移のシュタルクシフト—黒体放射シフト—であった。

光格子時計の手法を適用可能な原子種の中で、水銀 (Hg) 原子は、(i) 黒体放射シフトが最小で、かつ、(ii) 核電荷 Z が最大であり、これまで開発されてきた Sr、Yb 光格子時計にはない特長をもつ魅力的な時計候補である。Hg の黒体放射シフトは Sr や Yb に比べて一桁以上小さく、光格子時計の高精度化が期待される。一方、微細構造定数 α に対する時計遷移周波数の変化は $(\alpha Z)^2$ の依存性をもつことから、(Z の大きい) Hg 光格子時計では、微細構造定数の恒常性について、これまでにない厳しい制限値を与えることが期待される。

本論文では、 ^{199}Hg 同位体を用いた光格子時計を開発し、系統シフトの詳細な検討の結果、不確かさ 7.5×10^{-17} で評価を行った。光格子中の原子運動に起因する光シフトを取り入れた解析を導入することで、この評価が達成されたことは特筆に値する。現行の SI 秒では、この精度で周波数を記述することができない。 (7×10^{-18}) の不確かさで評価された Sr 光格

子時計を参照することにより、Hg と Sr 光格子時計の周波数比を、

$$\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}} = 2.629,314,209,898,909,57(23) \text{ (相対不確かさ } 8.6 \times 10^{-17}\text{)}$$

と決定した。

本論文は6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・周波数標準に関する研究の歴史、光格子時計の優位性について述べている。次に、本研究の目的と概要を述べ、本研究の構成を示している。

第2章では、本研究で用いたレーザー光源、真空装置などの実験装置について述べている。

第3章では、Hg 光格子時計の動作方法と時計遷移スペクトルを得た結果について述べている。原子の光格子への捕獲、スピン偏極、時計遷移の励起、励起率の測定方法を示した上で、時計遷移スペクトルを観測し、 $Q \approx 1.5 \times 10^{14}$ の遷移の Q 値を得た結果を述べている。最後に、時計遷移スペクトルに対して時計レーザーの周波数を安定化する方法とその結果について述べている。

第4章では、開発した Hg 光格子時計の系統不確かさの評価について述べている。特に、フランスグループによる先行研究で、最大の不確かさ要因であった、光格子の光シフトについて詳細な測定と議論を行っている。ここでは、先行研究で考慮されていない光格子中の原子運動に起因する周波数シフトを含めた解析を述べている。その他、磁場、原子間相互作用、黒体輻射など系統不確かさを与える詳細な評価について述べている。

第5章では、Hg 光格子時計と Sr 光格子時計の周波数比の測定実験について議論している。双方の時計周波数を光周波数コムを使ってリンクすることによって周波数比を計測し、そのアラン標準偏差、計測の統計不確かさ、系統不確かさを求めた結果について述べている。また測定された周波数比の再現性を評価し、全測定データから、周波数比を 17 桁の不確かさで算出している。

第6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、本論文は Hg 光格子時計を構築し、綿密な評価を行った。特に、光格子中の原子運動に起因する光シフトを考慮した解析を行うことで、先行研究の結果をおよそ 2 桁改善する、17 桁の系統不確かさを実現し、その時計周波数 ν_{Hg} を Sr 光格子時計との周波数比 $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$ で記述した。これらの成果は水銀原子・光格子時計を次世代時間標準の有力候補として検討する上で重要な知見と示唆を与えるばかりか、現行の SI 秒の定義が基礎物理学の探究に不十分であることを如実に示し、「秒の再定義」の必要を迫るものである、これ

らの成果は、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。