

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高本将男

高精度な原子時計は、全地球測位システム（GPS）精度の向上や将来の高速大容量通信ネットワーク等、工学的に重大なインパクトをもつだけでなく、物理定数の測定精度向上、さらにはそれら基礎定数の恒常性の検出等、基礎物理学の検証に大きな威力を発揮する。現在 SI 単位系の"秒"は、セシウム原子基底状態、超微細準位間の 9.2 GHz のマイクロ波吸収によって定義されており、このセシウム原子時計のもつおよそ 14~15 桁の精度がすべての時間計測の測定精度の限界を支配している。マイクロ波の代わりに、100 万 GHz にもおよぶ周波数をもつ近赤外から紫外に渡る光の吸収を使えば、同一観測時間で 5 桁の安定度向上が期待されることから、高安定な光時計実現に向けた議論は数十年にわたってなされてきた。この光時計実現の上での大きな困難は光周波数の電氣的計測法の欠如であったが、この数年間に急速な進歩を遂げた可視光周波数とラジオ周波数を直接つなぐフェムト秒モード同期レーザーによる光周波数の分周技術によってこの困難が解決され、光標準研究の本格的スタートの機は熟した。

現在、光標準研究は 10^{-18} の安定度を到達目標として進んでいるが、その手法面では伝統的な 2 つの手法、「レーザー冷却された中性アルカリ土類原子集団を対象としたラムゼー分光」と、「ラム・ディッケ束縛された単一イオンの無反跳分光」で行われている。両手法とも技術的には完成しその限界が見えつつあるにもかかわらず、新たな分光法の発想を拒んでいたのは、「被観測原子への摂動の排除」という標準研究の伝統に支えられた大原則であった。本研究では、巧みな摂動の印加により両手法の特長を両立させる新たな分光手法「光格子時計」について理論的検討を加えるとともに、ストロンチウム原子を用いた分光計測を行うことで、光格子時計の実現可能性についての詳細な実験的検討を行っている。

本論文は以下の 7 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、研究の背景として、原子時計の現状および現在行われている光周波数標準の研究、さらに論文の研究課題である光格子時計の背景について述べている。さらに、原子時計の高性能化を行う動機の一つとして、光周波数標準を用いた微細構造定数の時間変動検出の研究の現状について言及している。

第 2 章では、光格子を用いた原子時計の原理について述べている。ドップラーシフトを抑制する原子の精密分光の手法として、ラム・ディッケ束縛された原子のスペクトルについて述べ、光格子にトラップされた原子ではこのラム・ディッケ束縛条件が満たされ、多数原子を同時に精密分光できることを示している。また、光格子ポテンシャルの光格子レーザー波長、偏光、磁気副準位依存性を計算することにより、精密分光を行う上で必要となるパラメータの算出、および摂動の大きさを示している。

第 3 章では、ストロンチウム原子フェルミ同位体の冷却・トラップ実験について述べてい

る。光格子へ原子を捕捉するために必要となる実験装置、光源、実験スキームを示し、光格子に捕捉された原子の個数および温度の評価を行っている。

第 4 章では、時計遷移の超精密分光を行うために必要となる高安定半導体レーザーシステムの開発、およびその安定度の評価について述べている。レーザーの安定化に用いた高ファイネス参照共振器の Q 値の評価、参照共振器のジッター低減のための防音、防振、および狭スペクトル線幅レーザーの伝送に伴う光ファイバの位相雑音の補償について詳述している。これらによって達成されたレーザー線幅・安定度の評価には、2 台の安定化レーザーのビート信号を用い、短期線幅 $\sim 20\text{Hz}$ 、長期ドリフト 25Hz/s をもつことを示している。

第 5 章では、光格子中での時計遷移の分光実験について述べている。前章で述べられた高安定化レーザーを用い、(1)原子の光格子中での振動スペクトルの観測およびそのスペクトルによる原子の温度評価、(2)光格子ポテンシャルキャンセル波長の同定実験、さらに、(3)そのキャンセル波長を用いた精密分光によるスペクトルの観測について述べている。

第 6 章では、光周波数コムを用いた時計遷移の絶対周波数計測について述べている。絶対周波数を計測するため、光周波数コム、GPS によりストロンチウム原子の時計遷移の周波数を TAI(世界原子時)とリンクする実験手法について説明した後、計測に用いたセシウム時計から精度よく絶対周波数を定めるための実験手法について説明している。また、最終的な不確定性の要因についての詳細を示している。

第 7 章では、まとめと本系における今後の展望について述べている。今後の課題として、衝突シフト、2 光子共鳴による高次のシュタルクシフトの評価、観測光源の安定度の向上、原子数の校正等を挙げている。

以上のように、本研究は光格子時計の手法をストロンチウム原子に適用し、その詳細な実験的検討を行っている。この結果得られたスペクトル線幅 27Hz は、ここ 10 年以上更新されることがなかった中性原子のラムゼー分光を用いた光時計のスペクトル線幅 300Hz を一桁以上改善したのみならず、時計安定度においても単一イオンを用いる光時計を凌ぐレベルになっていることを示した。また、SI 単位の 1 秒を基準として原子の遷移周波数を 14 桁の精度で決定し、この光格子時計の手法が次世代の原子時計として、有効な手法であることを国際的にも認知させた。本研究は、このような 20 年来の光標準研究の方向性に大きな変革を迫る実験成果を提示している点で意義があり、物理工学の発展への寄与は大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。