

博士論文 要旨

秒の再定義に向けた Yb/Sr 時計遷移  
周波数比の測定

Yb/Sr clock frequency measurement  
toward the redefinition of the second

横浜国立大学大学院

理工学府 数物・電子情報系理工学専攻

物理工学教育分野 洪研究室

久井 裕介

Hisai Yusuke

2021 年 3 月

光格子時計は次世代の原子時計で、新しい「秒」の定義の最も有力な候補となっている。現在の秒の定義であるセシウム原子時計はおよそ 10 年に 1 桁のペースで不確かさの低減が進み、現在では約  $3 \times 10^{-16}$  に到達した。しかし、これ以上の不確かさの低減は困難となっている。そこで、マイクロ波を基準周波数としているセシウム原子時計の代わりに、新たに光の周波数を基準とする光時計の開発が世界各国の研究機関で進められている。光時計には大きく分けて「単一イオン光時計」と「光格子時計」の 2 種類がある。単一イオン光時計は、1 個のイオンをイオントラップに閉じ込め、時計遷移を分光する方式の原子時計である。単一イオン光時計は 1 個のイオンから得られる信号を用いているため、量子射影ノイズによる周波数安定度の制限が大きいという短所がある。一方、光格子時計では多数の中性原子を光格子と呼ばれるレーザーの定在波によって形成されるポテンシャルにトラップし、分光する方式を取っている。したがって、多数の原子からの信号を用いることができ、短時間で高い周波数安定度を得ることができる。光時計の進歩に伴い国際度量衡委員会 (CIPM) は将来の秒の定義の改定に向けた候補リストとして「秒の 2 次表現」を採択し、実現されている単一イオン光時計や光格子時計のうちいくつかの原子種の時計遷移周波数を採用している。本研究で扱っている Sr 光格子時計も秒の 2 次表現の中に含まれている。また、CIPM は秒の再定義に向けたロードマップを策定しており、その中に 5 つのマイルストーンを設定している。そのうちの 2 つを紹介すると、「光時計が定期的に国際原子時 (TAI) に貢献する」、「少なくとも 5 つの研究機関で、異なる光周波数標準の周波数比が  $5 \times 10^{-18}$  より小さい不確かさで測定され一致する」ことが求められている。特に  $5 \times 10^{-18}$  より小さい不確かさでの周波数比計測を行ったという報告は世界でもまだ 1 つも無く、挑戦的な課題である。この目標を世界として達成するためには、1 つの研究機関がトップデータを出せばよいだけでなく、複数の研究機関で得られた知見を報告しあうことによって世界の光時計のレベルを高めていく、競争と協力が不可欠である。

我々産総研・横浜国大のグループでは、Yb と Sr の 2 種類の光格子時計の研究を進めてきた。特に最近では長期運転可能な Yb 光格子時計を開発し、6 か月にわたる断続的な長期運転を行い、実際に TAI に貢献した。そこで、本研究では上記の 2 つのマイルストーンの達成を目標に Sr 光格子時計の改善と不確かさの再評価、さらに Yb 光格子時計との時計遷移周波数比の測定を行った。さらに、準備段階として、光格子時計の不確かさの大きな要因となる光格子による光シフトの影響を低減するために用いられる、光格子レーザーの周波数安定化の方法の 1 つである遅延線によるオフセットロックの手法について周波数安定度の評価を行った。また、Sr・Yb 光格子時計に用いられる各種レーザーの周波数安定化と、時計レーザーの周波数計測を一度に行うための 8 ブランチ光周波数コムを開発を行った。これらの技術を用いて光格子時計の不確かさ低減およびロバスト化を行ってから不確かさ評価を行い、以前我々のグループで報告したよりも小さな系統不確かさを達成した。さらに、Yb/Sr 時計遷移周波数比計測においては統計不確かさを以前よりも大きく低減し、系統不確かさで制限される測定を行った。以上の研究により、CIPM に新たな Yb/Sr 周波数比の値

を報告し、光格子時計による秒の再定義の議論に貢献することが期待される。