

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 早川悠介

光格子時計は、光定在波に閉じ込められた冷却原子集団の光学遷移の周波数を基準とする原子時計であり、その精度は 10^{-18} に達している。この光格子時計を用いれば、1cm の高さの違いによる一般相対論的重力シフトを検出することが可能となり、相対論的測地学という新たな研究分野の開拓が期待されている。しかし、光格子時計の実験装置は煩雑であり、最近開発された可搬型光格子時計の総重量は約 800 kg に達する。本博士論文は、可搬型光格子時計の小型化に向けたストロンチウム原子のレーザー冷却システムの開発に関するものである。

本論文は 7 章からなる。第 1 章は序論で、研究背景と本論文の位置付けが述べられている。第 2 章では、本研究の基本的なツールであるホローカソードランプの諸特性が説明されている。第 3 章では、適切な磁場を加えられたホローカソードランプを用いたレーザー周波数安定化法について述べられている、第 4 章では、第 3 章で述べられた手法によって周波数安定化されたレーザーを用いたストロンチウム原子の磁気光学トラップの実現について述べられている。第 5 章は、これまで観測が困難であったストロンチウムの準安定状態の分光をホローカソードランプ内で実現した実験について述べられ、続く第 6 章では、これまで不確定であった準安定状態の超微細構造定数の決定について述べられている。第 7 章では結論と今後の展望が記されている。

本論文の研究成果は大きく分けて 2 つある。1 つは、第 3 章で述べられている、磁場を加えたホローカソードランプによるレーザー冷却遷移 (461nm) へのレーザー周波数安定化である。簡便なレーザー周波数安定化法として、原子気体にプローブ光と平行な磁場を加え、円偏向 2 色性 (dichroism) を誘起し、レーザー周波数安定化の分散型の誤差信号を得る手法 (DAVLL, dichroic atomic vapor laser lock) はよく知られているが、ホローカソードランプの場合、原子気体を生成するホローカソードが磁性体でできているため、均一な磁場を原子気体に加えることが困難であった。本論文では、プローブ光と垂直な磁場をホローカソードに加え、原子集団に複屈折性を誘起し、レーザー周波数安定化に十分な信号強度で分散型の誤差信号を得る手法を開発した。その安定性は、この手法でレーザー周波数安定化されたレーザー光を用いたストロンチウム原子の磁気光学トラップが 1 日以上維持されたことによって証明された。

本論文のもう 1 つの研究成果は、ホローカソードランプを用いたストロンチウム原子の準安定準位の分光である。準安定状態の原子はホローカソードランプのようなプラズマ内で生成することができるが、ホローカソードランプを用いた準安定状態の分光に関しては、

先行研究が 1 例しかなく、しかもレーザー周波数安定化に十分な信号強度は得られていなかった。これは、ホローカソードランプ内のバッファガスの圧力が高く、衝突シフトが大きいこと、および原子の平均自由行程が短く、原子がホローカソード内のプラズマ領域に届きにくいことが原因であった。本論文では、キセノン 0.5 Torr およびネオン 0.5 Torr の混合ガスを用いてバッファガスの圧力を下げた特別なホローカソードランプを用いることで、この問題を解決した。準安定状態 $5s5p: {}^3P_2, {}^3P_1, {}^3P_0$ 全ての準安定状態からの遷移のドップラーフリー分光を周波数安定化に十分な信号強度で観測することに成功した。特に、冷却原子を用いた先行研究において 15 本中 4 本しか観測されなかった $5s5d: {}^3P_2-{}^3D_3$ 遷移の超微細構造遷移を、本論文では 9 本観測し、その遷移強度を理論値と比較することによってアサイメントを確定し、 $5s5d: {}^3D_3$ 状態の超微細構造定数（磁気双極子結合定数および電気 4 重極結合定数）を先行研究より小さい不確かさで決定した。

なお、本論文の、第 3 章および第 4 章の内容は、佐藤拓海、下村優輔、青木貴稔、鳥井寿夫との共同研究、第 5 章および第 6 章の内容は、佐藤拓海、渡辺千嘉、青木貴稔、鳥井寿夫との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験および解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。また、5, 6 章の内容は *Applied Optics* 誌に出版済みである。

したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認める。