

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 橋口 幸治

1980年代初頭に行われた中性原子のレーザー冷却の実証実験から30年を経て、レーザー冷却手法は光原子物理学の研究に不可欠のツールとなった。当初から予想された通り、レーザー冷却、トラップ技術はレーザー分光精度の劇的な向上をもたらした。この結果、現在では 10^{-17} の不確かさをもつ原子時計が相次いで開発され、さらなる精度向上に向けた取り組みが世界中で行われている。なかでもストロンチウム原子を用いた光格子時計は、「秒の再定義」を視野に入れる次世代原子時計の有力候補と目されている。本研究では、ストロンチウム原子の $5s5p^3P_2$ 準安定状態に着目し、光格子時計の性能向上に向けた(i)連続冷却スキームの提案、(ii)黒体輻射シフトの動的寄与の測定、を行っている。

光格子時計の運転の1サイクルは、レーザー冷却による極低温原子の生成、時計遷移の分光計測、この結果に基づく時計レーザーの周波数制御からなる。原子時計の安定度の向上のためには、1サイクル中の時計レーザーの周波数計測の不感時間を最小にすること、これには、極低温原子の生成時間を可能な限り短時間に行うことが重要である。(i)では従来の基底状態からの遷移を使ったレーザー冷却と電子状態を共有しないレーザー冷却遷移を用いることで、時間・空間的に共存可能な2段階レーザー冷却を実証した。特に、中赤外遷移($5s5p^3P_2-5s4d^3D_3$)でレーザー冷却を行うことで、 $2\mu\text{K}$ の極低温原子を得ることに成功している。

他方、ストロンチウム光格子時計では $5s5p^3P_0$ の黒体輻射シフトが不確かさの評価の大部分を占める。近年、PTBグループは、この評価のために $5s5p^3P_0$ 状態のDC分極率を測定している。ところが、室温の黒体輻射スペクトルは、 $5s5p^3P_0-5s4d^3D_1$ 遷移波長($2.6\mu\text{m}$)に僅かに重なるために、黒体輻射シフトの高精度評価ではこの遷移に起因する動的補正と呼ばれる項の評価が重要になる。本研究では(i)の連続冷却スキームで得た極低温原子を使って、 $5s5p^3P_2-5s4d^3D_3$ 遷移寿命を決定することで、動的補正に必要な $5s5p^3P-5s4d^3D$ の双極子モーメントを決定した。

本論文は以下の10章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、本研究の背景について述べた後、本研究の目的、構成を述べている。

第2章では、本研究の背景であるレーザー冷却の理論について述べている。

第3章では、周波数標準について、特に光格子時計について、仕組みと現在の課題について述べている。

第4章では、本研究で用いたレーザー光源の原理について、特にファイバコムと光パラメトリック共振器(OPO)について述べている。

第5章では、本研究におけるレーザー光源の安定化の方法について述べている。

第 6 章では、前章で開発したレーザーを用いた ^{88}Sr の $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ の遷移周波数の測定について述べている。観測が困難な中赤外の蛍光を観測する代わりに、中赤外光子の反跳による原子の運動量変化を空間イメージングによって観測することで、中赤外遷移の共鳴励起を観測した。この手法によって、 $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移周波数を自然線幅程度の不確かさで決定した。

第 7 章では、 $5s4d^3D_3$ 準位の寿命測定について述べている。この結果を用いた、時計遷移の黒体輻射シフトの見積りについて示している。

第 8 章では、 $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ の遷移を用いた磁気光学トラップ (MOT) の生成について述べている。この遷移を用いた冷却により、 $1.4\mu\text{K}$ の極低温原子を生成した。

第 9 章では、 $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ の遷移を用いた高速冷却について述べている。2 段階冷却を同時並行して行うことで、 100ms の冷却時間で $2\mu\text{K}$ の極低温原子の生成に成功した。

第 10 章では、本研究の成果をまとめ、今後の展望について述べている。

以上のように、本研究では商業には入手困難な中赤外の狭線幅レーザーを新規に開発し、ストロンチウム原子の $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ の遷移周波数の測定、 $5s4d^3D_3$ 状態寿命の測定を行うとともに、電子状態を共有しない二つのレーザー冷却遷移を用いた時間・空間的に共存可能な 2 段階冷却法を実証した。本研究の成果は、中赤外遷移における超高分解能分光の実現のみならず、ストロンチウム光格子時計の黒体輻射シフトの不確かさの低減、連続運転光格子時計の実装など、光格子時計の性能向上に大きく貢献する技術基盤の構築の観点からも重要な意義があるものと認められる。

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。