

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐藤 拓海

レーザー冷却された原子集団は、例えば磁場、重力加速度、周波数など、さまざまな物理量の精密測定の道具として利用されてきた。特に、レーザー冷却されたストロンチウム原子集団を用いた光格子時計の精度は、現在 10^{-18} に達し、これは地上における 1 cm の標高差を一般相対論的な時間の遅れによって検出できる精度である。このことから、光格子時計を用いた相対論的測地学という研究分野が新たに開拓されようとしている。また、光格子時計を用いた重力波検出も提案されている。このような光格子時計の応用の障害となっているのが、光格子時計の実験装置の複雑さである。今後、例えば海底や宇宙空間への設置を考えると、光格子時計のさらなる小型化、簡便化が不可欠である。本論文は、光格子時計の基盤技術であるストロンチウム原子のレーザー冷却装置の簡便化、具体的には、レーザーの周波数安定化法、超高真空装置、レーザー冷却手法の簡便化に関する研究についてまとめたものである。

本論文は 8 章からなる。

第 1 章は序論であり、光格子時計の測地学への応用に関する研究背景、本論文の目的、および本論文の構成について述べられている。

第 2 章および第 3 章では、レーザー周波数安定化法の簡便化について述べられている。これまでの典型的なレーザー周波数安定化法は、周波数変調を用いて原子の吸収曲線の微分信号、つまり誤差信号を得るものであるが、周波数変調器やロックインアンプを必要とするため、装置全体が煩雑になるという欠点がある。第 2 章では、周波数変調を用いずに磁場によって誘起された原子気体の複屈折性を利用して微分信号を得る手法 (birefringent atomic vapor laser lock, BAVLL) をストロンチウム原子のホローカソードランプに適用した実験について述べられ、その周波数安定度 (約 1 MHz) はストロンチウム原子のレーザー冷却に十分であることが示されている。また、第 3 章では、第 2 章で開発されたホローカソードランプにおける BAVLL 手法を、準安定状態を含む多くの遷移にも適用した実験について述べられている。

第 4 章および第 5 章では、超高真空装置の簡便化について述べられている。原子を供給するための原子オープンとレーザー冷却のための真空チャンバーは別々の真空ポンプによって差動排気されるのが通常であり、これが真空装置全体の小型化を阻んできた。本論文では、ストロンチウム金属膜がもつ背景気体の吸着作用に注目し、差動排気を用いず、原子オープンとレーザー冷却のための真空チャンバーを 1 台のイオンポンプで排気するという条件下で、 10^{-10} Torr という超高真空を実現し、かつ光格子時計に十分な 10^6 個のストロンチウム原子を磁気光学トラップすることが可能であると報告している。これはストロンチウム原子のレーザー冷却装置の著しい簡便化につながる成果と言える。

第 6 章では、461nm 光を用いたストロンチウム原子の磁気光学トラップに用いられる様々なリボン遷移の効率に関する系統的な実験結果について述べられている。適切なりボン遷移の選択に関する重要な知見が得られている。

第 7 章では、レーザー冷却手法の簡便化について述べられている。ストロンチウム原子集

団を光格子に閉じ込めるためには、原子集団を数 μK まで冷却する必要があるが、そのためには線幅が 7kHz と非常に狭いスピン禁制遷移のレーザー冷却がこれまで用いられてきた。しかしながら、このスピン禁制遷移のレーザー冷却には線幅が 1kHz 程度まで狭窄化されたレーザーが必要であり、レーザー冷却のため光源システムを複雑化していた。この問題を解決するレーザー冷却手法として、本論文では準安定状態の偏光勾配冷却を提案し、その前段階である準安定状態の磁気光学トラップを実現し、偏光勾配冷却に十分な長さである 65ms という寿命を得たことを報告している。これは先行研究の 13ms より5倍程度長く、準安定状態の偏光勾配冷却につながる重要な成果である。

第8章では、結論および今後の展望が述べられている。

なお、本論文の第2章の内容は、早川悠介氏、岡本直大氏、下村優輔氏、青木貴稔氏、鳥井寿夫氏、第3章から第7章の内容は、岡本直大氏、青木貴稔氏、鳥井寿夫氏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。

よって本論文は博士（学術）の学位請求論文として合格と認められる。