

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 向山 敬

レーザー冷却法はレーザー光と原子の相互作用を巧みに利用して、原子の速度分布を極限的に抑制する技術である。これは周波数標準などの精密分光や超低速の原子が示す物質波を利用する原子波工学などの応用も期待されている。また、極低温に冷却された原子の密度を上げると、原子の量子統計性を反映した集団の量子現象が発現する。その典型例はボース統計に従うアルカリ原子において1995年に観測されたボースアインシュタイン凝縮である。レーザー冷却法は1997年、中性原子のボースアインシュタイン凝縮は2001年のノーベル物理学賞に選ばれるなど、この一連の研究は物理学の分野で最も注目されているものの一つであり、現在世界中で活発に研究が進められている。本論文は、ストロンチウム・フェルミ同位体である ^{87}Sr について、そのスピン禁制遷移を利用したレーザー冷却法、トラッピングの手法を開発し、高密度極低温の原子集団を従来にはない方法で効率よく生成する手法を開拓したものである。

特に、レーザー冷却遷移の上準位と下準位のゼーマン効果の大きさが著しく異なる場合にレーザー冷却トラップを効率よく行う為に、光ポンピング法を用いて磁気量子数分布を変えることでドップラー冷却効果を高める方法を考案し、それを実証した点は非常に独創的である。さらにこの手法で冷却された原子を、量子縮退実現に向けて光双極子トラップを用いて高密度化を行い、光トラップ中で禁制遷移によるレーザー冷却の限界温度である400nKを達成し、 $T/T_F \sim 2.8$ という量子縮退に近い状況を実現した。

以下に各章の内容を要約する。

第1章：序論としてこの研究の背景である中性原子の量子縮退に関するこれまでの実験を紹介し、本研究の位置付けを行っている。特に全光学的手法による量子縮退実現が期待できる系であるストロンチウム原子を用いた実験についてその特徴を述べ、 ^{87}Sr のレーザー冷却を行う際の問題点や解決策を含めた本研究の概要を述べている。

第2章： ^{87}Sr のレーザー冷却を行う動機づけとして、冷却 ^{87}Sr ガスを用いて期待される実験について述べている。特に自然幅7.1kHzといった弱い遷移や準安定状態などアルカリ土類金属原子の特徴である準安定状態を利用した実験について述べている。

第3章：レーザー冷却、トラップの一般的手法について述べている。特に磁気光学トラップについて、それが効率良く働くための上下準位のg因子についての条件を議論している。磁気光学トラップにおいて、遷移の上下準位のg因子が同じオーダーの大きさのときに効率良く機能することを一般的に示し、 ^{87}Sr のように、(i)上下準位のg因子が大きく異なる、(ii)基底状態のFが $F > 1$ 、(iii)狭い自然幅($\gamma \sim 7.1\text{kHz}$)、という性質を持つ系に対して非常に効率が悪いことを示している。また、磁気光学トラップの安定性と遷移強度、磁場勾配の間の関係について述べている。

第4章：第3章で議論した問題点に対する解決策として、通常の磁気光学トラップが適

用可能な系では十分な復元力が得られるために議論の対象にならない光ポンピングの現象に着目し、この光ポンピングによって生じた磁気量子数分布の偏りを利用したトラップの手法を考案した。光吸収による遷移の確率は遷移間のクレプシュ・ゴードン係数の2乗に比例し、このクレプシュ・ゴードン係数の差を原子が復元力の方向に向かって光吸収の偏光選択性が生じるようにすることができれば効率良いトラップが可能となる。本研究ではg因子の比較的小さい $^3P_1(F=9/2)$ を利用し、 $^1S_0(F=9/2) \rightarrow ^3P_1(F=9/2)$ 遷移に共鳴したレーザーを入射することで禁制遷移のような遷移強度の弱い遷移でも効率良く光ポンピングが起るようにした。さらに量子化軸と垂直方向の光吸収による磁気モーメントの反転を議論に加えることで、動的に復元力を与える構造になっていることを示した。

第5章：本研究に必要な光源の構造や周波数安定化の方法についての説明を行っている。また周波数安定化の対象としてのストロンチウムセルと、トラップの際の磁場を作るためのコイル、原子源についての説明を述べている。

第6章：第4章で提案した手法を用いて実際に実験を行った結果を述べている。磁気光学トラップ中の原子の蛍光を観測することにより、ポンピング用のレーザーとトラップ用のレーザーの2本が入射されてはじめて効率良いトラップが実現できることを示した。またトラップ原子数の、それら2本のレーザーの離調に対する依存性を調べることでそれぞれのレーザーの役割がはっきりわかれていることが示された。また、禁制遷移の磁気光学トラップでのトラップ原子数の増大のために作成した原子線コリメータや準安定状態にたまった原子のポンピングの効果について述べている。

第7章：量子縮退を目指した更なる冷却と高密度化のために光トラップに原子を導入して行ったレーザー冷却の実験の結果を述べている。自然幅が7.1kHzと非常に弱い遷移であるために、最適な冷却条件下では冷却に数十ミリ秒かかることが示されており、重力下では冷却の際に光トラップで原子をトラップしておくことが本質的に重要であることがモンテカルロシミュレーションによって示されている。また、フェルミ縮退を目指して原子の磁気副準位をそろえてレーザー冷却を行い、禁制遷移の冷却限界である反跳温度400nKを実現し、 $T/T_F \sim 2.8$ に到達している。本研究では常温の原子から始めて500ミリ秒程度で上記の温度に到達しており、従来の蒸発冷却法による量子縮退の生成とくらべて1~2桁短い時間で量子縮退近傍に到達することに成功している。

第8章：本研究で得られた結果がまとめられ、今後の研究の課題と展望が述べられている。

以上のように、本研究で著者は、 ^{87}Sr に適用可能な磁気光学トラップの手法を確立した。この研究は量子縮退したフェルミ気体の物理の研究や新しい時間標準の開発などに大きく貢献する研究である。これは理工学の発展への貢献が大きいと認められる。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認める。