

氏 名	こ ばやし じゅん 小 林 淳
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3078 号
学位授与の日付	平 成 18 年 7 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	全光学的に生成したスピン自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮 体：光会合とスピン操作
論文調査委員	(主 査) 助教授 高 橋 義 朗 教 授 田 中 耕 一 郎 教 授 山 本 潤

論 文 内 容 の 要 旨

近年、レーザー光により中性原子を冷却する技術が飛躍的に進歩した。申請者は、光トラップを用いて、全光学的に原子数 2×10^4 個、数密度が $4 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 程度の ^{87}Rb ボース・アインシュタイン凝縮を生成することに成功した。特に、光トラップ用のビームのポインティングに関して、安定化の工夫を施すことにより、極めて安定に、再現性よくボース・アインシュタイン凝縮を生成することに成功した。

また、最近、原子のボース・アインシュタイン凝縮から分子のボース・アインシュタイン凝縮の生成が実現し、冷却分子の実験が益々盛んになっているが、スピンを持った量子縮退気体としては、原子のボース・アインシュタイン凝縮だけでなく、この分子ボース・アインシュタイン凝縮、およびスピンスクイーズ分子ボース・アインシュタイン凝縮、も対象になる。申請者は、全光学的に生成した ^{87}Rb ボース・アインシュタイン凝縮に対して、レーザー光を用いて分子状態に遷移させる手法（光会合）を適用し、これまで報告されていない、スピン自由度を持った分子 BEC の生成に成功した。実験では、全光学的に生成した ^{87}Rb ボース・アインシュタイン凝縮にパワー 1mW、ビーム半径 $100 \mu\text{m}$ 程度の 2 本のレーザー光を一定時間照射し、周波数差が分子の結合エネルギーに一致したときに、励起分子状態を中間状態とした非共鳴誘導ラマン遷移をおこし、基底状態の分子が生成される。光会合レーザーの周波数差を掃引しながら吸収イメージング法を用いて残った原子数を測定することで、基底分子準位のスペクトルを観測した。前述した光トラップは原子のスピン成分に依存しないため、原子のボース・アインシュタイン凝縮はスピン自由度を持っており、更に、光会合による分子生成もスピン成分によらず可能であることから、このような、分子ボース・アインシュタイン凝縮のスピン成分の選択的生成や、スピン自由度を持った分子ボース・アインシュタイン凝縮の生成を達成することができた。

一方、光パルスと相互作用する原子スピン集団に対しての重要な手法として、緩和の影響なく、コヒーレントにスピン系を操作する技術が挙げられる。これまでの原子スピンの有効なコヒーレント操作法としては、原子の特定の共鳴に近共鳴な光を用いた、誘導ラマン過程が挙げられる。しかし、これは必然的に利用する共鳴準位による光散乱を伴ってしまうという難点がある。一方、高周波磁場を用いた通常の磁気共鳴法が有効であるのはもちろんであるが、磁場に敏感な環境での実験などにおいては都合が悪い状況も多々ある。申請者は、原子のいかなる準位とも共鳴していない準静的な電場による、光散乱のほとんど無視できるコヒーレントなスピン操作法の開発に成功した。実験は、 CO_2 レーザー中で全光学的に生成した ^{87}Rb BEC および超低温 ^{87}Rb 原子を用いて、その基底状態 $^2\text{S}_{1/2}$ の $F=1$ 超微細準位のスピンに対して、円偏光した波長 $10.6 \mu\text{m}$ の CO_2 レーザの強度を、ゼーマン周波数で変調することにより、コヒーレントにスピンを操作した。最初に、 $m_F = -1$ 状態に準備しておき、その後 CO_2 レーザの強度をゼーマン周波数で変調すると、スピン間に遷移が誘起され、 $m_F = 0$ および $m_F = +1$ が生成される。特に、このとき、スピン間に遷移が誘起された後も BEC 状態であることが確認でき、デコヒーレンスの影響がほとんどないことが分かった。

論文審査の結果の要旨

本論文は、 ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体を、 CO_2 レーザーを用いて全光学的に安定に再現性よく生成することに成功し、これを用いて、光会合を実施し、スピン自由度を持った分子のボース・アインシュタイン凝縮体の生成およびそのスピン構造の解明に成功したことを報告している。さらに、光散乱の無視できる新しいコヒーレントなスピン操作法を提案し、さらに全光学的に生成された ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体を用いて、実験的にその有効性を確認し、この手法を、擬似磁場という概念を用いて、定量的に説明することに成功したことも報告している。

本研究では、まず、 ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体を、 CO_2 レーザーを用いて全光学的に生成することに成功した。特に、 CO_2 レーザーのビーム位置の不安定性の原因となる音響光学素子の熱問題について、新しい工夫を行い、これを解決した。この改善を行った結果、安定に再現性よくボース・アインシュタイン凝縮体を生成することに成功した。

また、全光学的に生成された ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体の特徴である、スピン自由度に関する実験として、光会合を実施し、スピン自由度を持った分子の BEC の生成およびそのスピン構造の解明に成功した。

さらに、光散乱の無視できる新しいコヒーレントなスピン操作法を提案し、さらに全光学的に生成された ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体を用いて、実験的にその有効性を確認した。また、この手法を、擬似磁場という概念を用いて、定量的に説明することに成功した。

以上は、ボース・アインシュタイン凝縮体研究、とりわけスピノールボース・アインシュタイン凝縮体の研究分野において今後の応用上重要な実験的成果である。

以上のように、申請者の研究によって、スピノールボース・アインシュタイン凝縮の研究において、新しい知見が得られた。これらの研究は、世界に先駆けた極めて独創的なもので、すでに学術雑誌や国内・国際会議などを通して、国の内外を問わず脚光を浴びている。これらの研究は、今後、光・原子・分子物理学、量子情報処理、量子エレクトロニクス、など、多くの研究分野への貢献も多大であり、高く評価できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。