

氏 名	とよ だ けん じ 豊 田 健 二
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2429 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 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	^{87}Rb の Bose-Einstein 凝縮

論文調査委員	(主 査) 教 授 藪 崎 努	教 授 大 見 哲 巨	助教授 高 橋 義 朗
--------	--------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

近年、レーザー冷却・トラッピングの研究が急速に発展し、気体原子を室温 (300K) から 1 秒以内に μK の超低温にまで冷却し、その冷却原子を空間の狭い領域に閉じ込めることができるようになってきた。更に、閉じ込めた原子集団の中のエネルギーが高い原子をトラップから選択的に放出することによる、いわゆる蒸発冷却法が開発され、気体原子集団の温度を 10nK 程度まで冷却することが可能になった。このような超低温原子に関して様々な基礎研究が盛んになされているが、とりわけ脚光を浴びているのが希薄気体原子のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) である。申請論文は、Rb 原子のボース・アインシュタインを実現する実験研究、非常に小さな空間にトラップされた原子集団を高分解能空間分布を可能にする新しい方法の提案、さらに低温原子集団中での特異的な光伝播に関連する研究からなっている。

申請論文ではまず最初に、申請者が成功した ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体の生成実験につき、まず、二重磁気光学トラップを用いて超高真空セル中に冷却された原子を集め、それらを偏極磁気トラップに導入し、高周波磁場を印加して強制蒸発冷却を行なう手順について詳細に述べている。申請者が製作した実験系で特徴的な点のの一つは、二つの磁気光学トラップ間を原子を移送するための移送管として非常に小さな断面積のものをを用いたことで、原子の移送量を減少させること無しに、BEC を実現させる低圧セルの真空度を向上させていることである。この磁気光学トラップで 1×10^9 個以上の原子のトラップに成功している。更にトラップされた冷却原子に対して偏光冷却、圧縮、光ポンピングによるスピン偏極を行なった上で、clover leaf 型磁気トラップに導入している。この段階で原子数は 6×10^8 個、温度 $200 \mu\text{K}$ 、密度 $6 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ を得ている。更に、高周波磁場を印加してその周波数を変化させて蒸発冷却を行ない、磁気トラップの寿命約 70 秒以内に温度 500nK、密度約 $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ までになったところで BEC を実現させている。原子の速度分布は、トラップを切った後の原子集団の空間分布を観測することによりおこない、等方的な Boltzmann 分布から非等方の鋭いピークへの急激な変化として BEC 転移を観測している。

次に、高い空間分解能で原子集団の観測を可能にするために磁気光学イメージング法の提案を行なっている。従来、原子集団の空間分布の観測には光学イメージング法が用いられてきたが、この方法の分解能は本質的に光の波長で抑えられ、可視光領域の光を用いた場合、通常の条件下では数ミクロン程度となる。申請者が提案した方法では、原子集団に不均一な磁場を与え、原子スピンを光ポンピングにより一方向に揃え、磁場の周りの歳差運動の周波数分布から空間分布を測定する方法である。原子スピンの歳差運動の観測には非共鳴光に対するファラデー効果を利用することで、観測が原子系に与える擾乱を最小にする方法をとっている。理論的解析ならびに数値シミュレーションから、ボース・アインシュタイン凝縮体に対して分解能は $0.48 \mu\text{m}$ 程度であり、光学イメージング法に比べて大幅に高い分解能を持つことを示している。

最後に、冷却原子集団中の光パルスの伝播に関する研究を報告している。冷却原子からなる媒質ではドップラー効果による吸収線の広がりが無視でき、均質な媒質となるため、高温における気体原子中とは異なる光伝播を示す。本研究はこのような超低温原子中の光伝播に関する初めての研究で、実験は磁気光学トラップ中の 1mK 以下の低温 Rb 原子に対して数十

ns のパルス光を照射し、透過光を高速光検出器で観測している。観測結果は、位相緩和が全く無いとした Bloch の方程式による計算結果と良い一致を示し、光自由誘導減衰 (Optical Free Induction Decay) がパルスの位相変化に極めて敏感であることを示している。またパルスが2つの部分に分裂するという新しい現象を見出している。

論文審査の結果の要旨

中性原子を室温から μK の超低温まで冷却するレーザー冷却・トラッピングの開発は近年盛んに研究され、物理学における種々な基礎研究にとって極めて重要になり、1997年のノーベル物理学賞の対象となった。このような基礎研究の一つとして重要な研究は、レーザー光によるレーザー冷却と磁気共鳴による蒸発冷却を組み合わせることにより実現された希薄気体原子のボース・アインシュタイン凝縮であり、その研究も2001年のノーベル物理学賞の対象となった。申請論文は、我が国でいち早くボース・アインシュタイン凝縮を実験的に実現した研究を中心として、関連する冷却原子集団の空間分布の高分解能観測を可能にする方法の提案、開発と冷却原子集団中の特異な光パルス伝播に関する研究から成っている。

申請者は ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を達成させるための実験装置の製作から始め、実験装置、方法の最適化を精密に行い、最終的には BEC の実現に成功している。実験では、まず、二重磁気光学トラップを用いて超高真空セル中に冷却された原子を集め、それらを偏極し磁気トラップに導入し、高周波磁場を印加して強制蒸発冷却を行なうという手順をとっている。この実験系で特徴的な点はの一つは、二つの磁気光学トラップ間に原子を移送するための移送管として非常に小さな断面積のものを用いたことで、原子の移送量を減少させること無しに、BEC を実現させる低圧セルの真空度を向上させていることである。この磁気光学トラップで 1×10^9 個以上の原子のトラップに成功している。更にトラップされた冷却原子に対して偏光冷却、圧縮、光ポンピングによるスピン偏極を行なった上で、clover leaf 型磁気トラップに導入している。この段階で原子数は 6×10^8 個、温度 $200 \mu\text{K}$ 、密度 $6 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ を得ている。更に、高周波磁場を印加し、その周波数を変化させて蒸発冷却を行うことにより、磁気トラップの寿命約70秒以内に温度 500nK 、密度約 $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ まで冷却し、BEC を実現させている。原子の速度分布は、トラップを切った後の原子集団の空間分布を観測することによりおこない、等方的な Boltzmann 分布から非等方の鋭いピークへの急激な変化として BEC 転移を観測している。これら BEC を実現した実験は、我が国で最初のものであるといて良く（ほぼ同時期に東大も成功）高く評価されている。

次に、高い空間分解能で原子集団の観測を可能にするために磁気光学イメージング法の提案を行なっている。従来、原子集団の空間分布の観測には光学イメージング法が用いられてきたが、この方法の分解能は本質的に光の波長で抑えられ、可視光領域の光を用いた場合、通常の条件下では数ミクロン程度となる。申請者が提案した方法では、原子集団に不均一な磁場を与え、原子スピンを光ポンピングにより一方向に揃え、磁場の周りの歳差運動の周波数分布から空間分布を測定する方法である。原子スピンの歳差運動の観測には非共鳴光に対するファラデー効果を利用することで、観測が原子系に与える擾乱を最小にする方法をとっている。理論的解析ならびに数値シミュレーションから、ボース・アインシュタイン凝縮体に対して分解能は $0.48 \mu\text{m}$ 程度であり、光学イメージング法に比べて大幅に高い分解能を持つことを示している。申請者が提案したこの方法は全く独創的なもので、BEC 中の構造、例えばソリトンや量子渦の観測に適しており注目を浴びている。

最後に、申請者は冷却原子集団中の光パルスの伝播に関する研究を行なっている。冷却原子からなる媒質ではドップラー効果による吸収線の広がりが無視でき、均質な媒質となるため、高温における気体原子中とは異なる光伝播を示す。本研究はこのような極低温原子中の光伝播に関する初めての研究で、磁気光学トラップ中の 1mK 以下の低温 Rb 原子に対して数十 ns のパルス光を照射し、透過光を高速光検出器で観測している。観測結果は、位相緩和が全く無いとした Bloch の方程式による計算結果と良い一致を示し、光自由誘導減衰 (Optical Free Induction Decay) がパルスの位相変化に極めて敏感であることを示している。またパルスが2つの部分に分裂するという新しい現象を見出している。この研究は最近世界的に研究がなされ注目を浴びている、極端に低速の光伝播現象や、光パルスの情報を媒質内に閉じ込め任意の時間に再び取り出すことができる現象など、低温で高密度原子中での特異な光伝播の研究の端緒となる研究で、非常に高く評価できる。

以上のように申請者は、Rb 原子を用いて BEC を実現させた研究と関連する研究として、高分解能光 MRI イメージング法の提案・開発研究、および低温高密度原子集団中の特異な光伝播の研究を行なったが、いずれも独創的なもので学術誌や国際会議などを通して国の内外を問わず注目を浴びている。これらの研究は今後、原子・分子物理学、低温物理学、量子エ

レクトロニクスなど多くの研究分野への貢献も大きいと思われ、高く評価できる。

よって、本申請、論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を持つものと認める。

なお、主論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関連した研究分野について試問した結果、合格と認めた。