氏　　　　名　高　須　洋　介（たか　す　よう　すけ）

学位の種類　博　士（理　学）

学位記番号　理　博　第　2733　号

学位授与の日付　平　成 16 年　3　月 23　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　イッテルビウム原子のボーズ・アインシュタイン凝縮の実現

論文調査委員　（主　査）教　授　藪　崎　　努　　教　授　水　崎　隆　雄　　助教授　高　橋　義　朗

論　文　内　容　の　要　旨

1995年にレーザー冷却された ^{87}Rb 原子を用いた希薄原子気体によるボーズ・アインシュタイン凝縮の実現以来，量子凝縮体のさまざまな物性が世界的に精力的に研究されてきた。それらの背景としてさまざまな原子系でボーズ凝縮が達成されてきたことが挙げられる。中性原子のレーザー冷却はアルカリ原子を中心として行われてきたことを反映して，現在までにアルカリ原子を中心とした ^{87}Rb，^{23}Na，^{7}Li，^{85}Rb，^{41}K，^{133}Cs，^{1}H および準安定 ^{4}He の系でボーズ凝縮が実現されてきた。申請論文は対象とする原子として今までに全く研究がなされていなかった２つの価電子を持つイッテルビウム（Yb）のボーズ・アインシュタイン凝縮の実現とそれに関連する研究を述べたものである。特に本研究でボーズ・アインシュタイン凝縮に成功した同位体 ^{174}Yb は核スピンがゼロであり，また基底状態はスピン一重項で電子スピンもゼロであるという点で従来の原子と全く異なるという特徴を持っている。

近年アルカリ土類原子およびイッテルビウム（Yb）原子のレーザー冷却実験が広く行われるようになった。これらの原子は線幅の狭い１重項－３重項間遷移の存在や準安定（6s6p）$^{3}P_{2}$ 状態および（6s6p）$^{3}P_{0}$ 状態の存在などアルカリ原子にはない特徴を持っていることから注目されている。また，Yb 原子はボゾン５種，フェルミオン２種の豊富な同位体を持っており，ボーズ凝縮やフェルミ縮退した原子団の統一的な研究に有利であると考えられる。しかし，従来の研究では，アルカリ土類様原子のボーズ凝縮の実現にまでは至っていなかった。上述のようにアルカリ土類様原子のボーズ同位体は基底状態が $^{1}S_{0}$ でありすべてスピンがない。アルカリ原子のボーズ凝縮およびフェルミ縮退実現で広く使われている磁気トラップおよび磁気共鳴による蒸発冷却法は外部磁場による原子のゼーマン効果を利用したものであり，スピンが０であるアルカリ土類様原子のボーズ同位体は原理的に磁気トラップに捕獲できない。

本研究では，^{174}Yb 原子の全光学的手法によるボーズ凝縮実現を最終目的として実験を行っている。まず磁気光学トラップに捕獲された原子を交差型光双極子力トラップに再捕獲することを行った。その結果，光双極子力トラップに捕獲し終わった後に原子が交差領域に集まってくることを発見している。さらに，遅延交差型光双極子力トラップという新しい実験手法を開発し，交差領域に原子が集まってくる様子をより詳しく観測することに成功している。

交差型光双極子力トラップにおいては，強制蒸発冷却を試みているが位相空間密度は蒸発冷却前よりも向上しなかった。そのため，申請者は実験系の種々の最適化を試みている。特に以下の２点についての改善を行なっている。その一つはそれまで適用してきた水平・水平交差型双極子力トラップの配置が蒸発冷却に向いていないことを見出し，一方のレーザー光を重力方向に向けた，いわゆる水平・垂直配置への変更を行なっている。次に，光双極子力トラップに捕獲された原子の減衰時間が短か過ぎたことから，真空度の大幅な改善を行い原子の寿命の長時間化をはかっている。そのように改善された実験系で強制蒸発を行なった結果，^{174}Yb 原子について，トラップポテンシャルの非等方性に由来するトラップから解放した後の原子分布の非等方的拡がりを観測することに成功している。更に，凝縮相と非凝縮相の２成分の共存も観察することができた。これらはいずれも凝縮体のもつ重要な特徴であり，この実験で初めて ^{174}Yb のボーズ凝縮に成功したことを確実なも

のとしている。

また，凝縮体の振舞いから，^{174}Ybのs波散乱長を求めている。s波散乱長はボーズ凝縮体の性質を決める重要なパラメーターである。しかし，^{174}Ybのs波散乱長は，理論的にも実験的にも研究が全くされていなかった。^{174}Yb原子の凝縮体の研究のためには，^{174}Ybのs波散乱長を別の方法で求めることが望ましい。そこで，申請者は^{174}Ybのs波散乱長の決定を目的に，1光子によるフォトアソシエーション分光実験を行っている。その結果は，ボーズ凝縮体の振舞いにより得られたs波散乱長と矛盾しない値を得ることに成功している。

論文審査の結果の要旨

希薄原子気体によるボーズ・アインシュタイン凝縮は1995年にレーザー冷却された^{87}Rb原子を用いて実現されたが，それて以来，量子凝縮体としてさまざまな研究が世界的に精力的に研究されてきている。従来実現された希薄原子のボーズ・アインシュタイン凝縮が実現されたのは^{87}Rb，^{23}Na，^{7}Li，^{85}Rb，^{41}K，^{133}Cs，^{1}Hおよび準安定^{4}Heで，殆どの研究がアルカリ原子を用いて行なわれてきている。その理由はアルカリ原子の基底状態がスピン1/2を持ち，そのため冷却原子を磁場でトラップできること，更なる冷却（蒸気冷却）に磁気共鳴法が利用できるなど実験的な容易さがあるためであった。申請者が研究の対象とした原子は，今までに実現されていなかった種類の原子であるイッテルビウム（Yb）原子で，本研究により初めてその実現に成功したものである。申請論文はボーズ・アインシュタイン凝縮の実現に至った研究を中心として関連した基礎研究を報告したものである。

イッテルビウム原子は2つの価電子を持ち基底状態では電子スピンはゼロである。このような原子であるアルカリ土類原子および希土類原子であるイッテルビウム（Yb）が種々の面から関心が高まり，レーザー冷却実験が広く行われるようになってきた。これらの原子は線幅の狭い1重項-3重項間遷移の存在や準安定（6s6p）$^{3}P_{2}$状態および（6s6p）$^{3}P_{0}$状態の存在などアルカリ原子にはない特徴を持っている。また，Yb原子はボゾン5種，フェルミオン2種の豊富な同位体を持っており，ボーズ凝縮やフェルミ縮退した原子団の統一的な研究に有利であると考えられる。しかし，アルカリ土類様原子のボーズ凝縮はいままで実現されなかった。アルカリ土類様原子のボーズ同位体は基底状態が$^{1}S_{0}$でありすべてスピンがない。アルカリ原子のボーズ凝縮およびフェルミ縮退実現で広く使われている磁気トラップおよび磁気共鳴による蒸発冷却法は外部磁場による原子のゼーマン効果を利用したものであり，スピンが0であるアルカリ土類様原子のボーズ同位体は原理的に磁気トラップに捕獲できないことが主な理由として挙げられる。

申請者は，^{174}Yb原子を非共鳴のレーザー光でトラップし全光学的手法にボーズ凝縮の実現を目指した実験を行った。まず磁気光学トラップに捕獲されたYb原子を非共鳴光を互いに交差させた交差型光双極子力トラップに再捕獲する実験を行なっている。その結果，光双極子力トラップに捕獲し終わった後に原子が交差領域に集まってくることを発見している。さらに，遅延交差型光双極子力トラップという新しい実験手法を開発し，交差領域に原子が集まってくる様子をより詳しく観測することに成功している。

交差型光双極子力トラップにおいては，光によるポテンシャルを次第に浅くしていく蒸発冷却を試みているが位相空間密度は蒸発冷却前よりも向上しなかった。そのため，申請者は実験系の最適化を行なっているが，特に以下の2点についての改善を行なった。その一つは水平・水平交差型双極子力トラップの配置が蒸発冷却に向いていないことを見出し，水平・垂直配置に変更した。次に，光双極子力トラップに捕獲された原子数の減衰時間を長くするために，真空系の改善を行なった。その結果，^{174}Yb原子について，トラップポテンシャルの非等方性に由来するトラップから解放した後の非等方的拡がりの観測に成功した。また，凝縮相と非凝縮相の2成分の共存も観察することができた。これらはいずれも凝縮体のもつ重要な特徴である。以上のことから，^{174}Ybのボーズ凝縮に成功したのである。

また，凝縮体の振舞いから，^{174}Ybのs波散乱長を求めた。s波散乱長はボーズ凝縮体の性質を決める重要なパラメーターである。しかし，^{174}Ybのs波散乱長は，理論的にも実験的にも求まっていなかった。^{174}Yb原子の凝縮体の研究のためには，^{174}Ybのs波散乱長を別の方法で求めることが望ましい。そこで，^{174}Ybのs波散乱長の決定を目的に，1光子によるフォトアソシエーション実験を行った。その結果は，ボーズ凝縮体による振舞いにより得られたs波散乱長と矛盾しない値を得ることに成功している。

以上のように，申請者はYbのボーズ・アインシュタイン凝縮の実現に世界で初めて成功している。Ybのボーズ凝縮の実現で新たな量子縮退に関する新しい扉が開かれたと言える。また，従来全く知られていなかったYb原子間の相互作用に関する詳細な情報もフォトアソシエーション分光で初めて得ることにも成功し，さらに，交差型双極子トラップ中の冷却原子の振る舞いに関する新しい現象も見出している。これらの研究は世界に先駆けた極めて独創的なもので，既に学術誌や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，原子・分子物理学，低温物理学，量子エレクトロニクス，凝縮系物理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，本申請論文は博士（理学）の学位論文として充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。