

(論文内容の要旨)

近年、量子縮退した原子気体の研究が盛んに行われているが、そのほとんどはアルカリ原子を用いたものである。今後の応用・発展を考えたとき、ユニークな原子種で量子縮退を実現し、研究を行うことが重要である。申請者は、アルカリ原子とは性質が大きく異なる、イッテルビウム原子 (Yb) に着目し、研究を行った。Yb 原子には、まず、5 種類のボース同位体と 2 種類のフェルミ同位体という多様な同位体が存在する。また、準安定な電子励起状態と基底状態との間に、非常に狭い光学遷移が存在することも大きな特徴であり、この超狭線幅光学遷移を用いたイッテルビウム原子ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の高分解能分光が可能である。本論文では、極低温イッテルビウム原子の多種にわたる量子縮退を実現し、その量子多体系研究への応用研究を行ったことを報告している。

まず最初に、申請者は Yb 原子同位体のレーザー冷却および光トラップ、さらにその光トラップ中での蒸発冷却について最適化を行い、これまで実現していた ^{174}Yb 原子の BEC の原子数を約 10 倍増大させることに成功した。次に、この方法を ^{170}Yb 原子同位体に適用し、 ^{170}Yb 原子のボース・アインシュタイン凝縮を実現した。また、同様に ^{173}Yb 原子の冷却を行い、フェルミ縮退を実現した。このフェルミ縮退は、6 成分のスピ成分全てが同時にフェルミ縮退しているという、大変ユニークな特徴があり、様々な応用が期待されている。また、 ^{174}Yb 原子との共同冷却を用い ^{176}Yb ボース原子及び ^{171}Yb フェルミ原子の量子縮退領域への冷却にも成功している。特に、 ^{176}Yb ボース原子の BEC と ^{174}Yb 原子の BEC の同時 BEC に成功している。更に、 ^{174}Yb – ^{173}Yb の同位体対のボース・フェルミ混合系を実現することに成功している。

これらの冷却実験の振舞いや、BEC した原子の振舞いから、原子間相互作用を特徴付ける散乱長に関する情報を引き出すことに成功している。そして、求められた値は、別の光会合分光法により後に高精度に求められた値とほぼ一致しており、その正しさが確認されている。

さらに、申請者は、 ^{174}Yb – ^{173}Yb の同位体対のボース・フェルミ混合系の集団運動に関する実験を行った。光ポテンシャルを急に変化させることにより ^{174}Yb 原子 BEC に 4 重極振動を誘起し、フェルミ原子である ^{173}Yb 原子があるときとの精密な比較を行ない、わずかばかりの振動周波数のずれを見出した。

そして、量子気体の強相関物理に対する重要な応用として、光格子を用いた ^{174}Yb 原子の BEC の研究を行った。まず、光格子の研究が可能になる多数の光学窓を有する特殊な真空チャンバーを組み上げ、高真空を実現し、実験に用いることを可能にした。さらに、光格子用レーザーについても強度安定化を施し、安定な実験が長時間行えることを可能にした。この装置を用いて、 ^{174}Yb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体を、3 次元の光格子に導入し、期待される光格子の深さで超流動・モット絶縁体状態の転移を観測することに成功した。これは、Yb 原子を用いた光格子時計や、光格子量子計算機に向けた大変重要な成果であるといえる。

(論文審査の結果の要旨)

近年、量子縮退した原子気体の研究が盛んに行われているが、そのほとんどはアルカリ原子を用いたものである。今後の応用・発展を考えたとき、ユニークな原子種で量子縮退を実現し、研究を行うことが重要であるとの考えのもと、申請者は、アルカリ原子とは性質が大きく異なる、イッテルビウム原子 (Yb) に着目し、研究を行った。本論文では、極低温イッテルビウム原子の多種にわたる量子縮退を実現し、その量子多体系研究への応用研究を行ったことを報告している。

まず最初に、申請者は Yb 原子同位体のレーザー冷却および光トラップ、さらにその光トラップ中での蒸発冷却について最適化を行い、これまで実現していた ^{174}Yb 原子の BEC の原子数を約 10 倍増大させることに成功した。次に、この方法を ^{170}Yb 原子同位体に適用し、 ^{170}Yb 原子の BEC を実現した。また、同様に ^{173}Yb 原子の冷却を行い、フェルミ縮退を実現した。このフェルミ縮退は、6 成分のスピン成分全てが同時にフェルミ縮退しているという、大変ユニークな特徴があり、様々な応用が期待されている。また、 ^{174}Yb 原子との共同冷却を用い ^{176}Yb ボース原子及び ^{171}Yb フェルミ原子の量子縮退領域への冷却にも成功している。特に、 ^{176}Yb ボース原子の BEC と ^{174}Yb 原子の BEC の同時 BEC に成功している。更に、 ^{174}Yb - ^{173}Yb の同位体対のボース・フェルミ混合量子縮退系を実現することに成功している。

これらの冷却実験の振舞いや、BEC した原子の振舞いから、原子間相互作用を特徴付ける散乱長に関する情報を引き出すことに成功している。そして、求められた値は、別の光会合分光法により後に高精度に求められた値とほぼ一致しており、その正しさが確認されている。

さらに、申請者は、 ^{174}Yb - ^{173}Yb の同位体対のボース・フェルミ混合量子縮退系の集団運動に関する実験を行った。光ポテンシャルを急に変化させることにより ^{174}Yb 原子 BEC に 4 重極振動を誘起し、フェルミ原子である ^{173}Yb 原子があるときとの精密な比較を行ない、わずかばかりの振動周波数のずれを見出した。

最後に、量子気体の強相関物理に対する重要な応用として、光格子を用いた ^{174}Yb 原子の BEC の研究を行った。新しく組み上げた装置を用いて、 ^{174}Yb 原子の BEC を、3 次元の光格子に導入し、期待される光格子の深さで超流動・モット絶縁体状態の転移を観測することに成功した。これは、Yb 原子を用いた光格子時計や、光格子量子計算機に向けた大変重要な成果であるといえる。

以上のように、申請者の研究によって量子縮退原子気体の研究に新たな可能性がもたらされた。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。