

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	すがわ せいじ 素川 靖司
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 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) Strongly Correlated Quantum Phases in Ultracold Mixtures of Bosons and Fermions in an Optical Lattice (光格子中の極低温ボース・フェルミ原子混合系における強相関 量子相)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 高橋義朗 教授 川上則雄 教授 前野悦輝 教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士（理学）	氏名	素川靖司
論文題目	Strongly Correlated Quantum Phases in Ultracold Mixtures of Bosons and Fermions in an Optical Lattice (光格子中の極低温ボース・フェルミ原子混合系における強相関量子相)		
(論文内容の要旨)			
近年、中性原子のレーザー冷却技術が開発され、マイクロケルビン台の極低温の原子集団を用意することが可能になり、物性、量子情報、原子時計、その他様々な研究に用いられている。さらに、蒸発冷却とよばれる方法により、ナノケルビン台まで冷却することが可能になり、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子気体が生成され、その物性研究が盛んに研究されている。特に、光格子といわれる周期的なポテンシャル中に量子気体を導入した系は、固体中の結晶格子の中を運動する電子の系とのアナロジーから、大変注目され、ハバードモデルと呼ばれる凝縮系物理における重要なモデル系を理想的に実現する新しい量子多体系として研究が行われている。 このような背景のもと、本論文は、イッテルビウム原子のボース同位体とフェルミ同位体の混合系を光格子に導入した系を用いて、特に、強相関係であるモット絶縁体領域の振る舞いに着目し、そこで発現する様々な相を実際に実験的に実現し、その振る舞いを詳細に調べて、ボース・フェルミ間の相互作用やボース粒子とフェルミ粒子の相対的な占有数により多様な相が実現することを明らかにしたことを報告するものである。 実験では、イッテルビウム原子のボース・フェルミ混合系をまず光トラップ中で超低温に冷却したのち、それを3次元光格子に導入した。ボース粒子系およびフェルミ粒子系が、単独ではそれぞれ強相関のモット絶縁状態にあるような温度・原子数に対して、ボース・フェルミ混合系を生成し、その光格子点での占有率の様子を、同核光会合および異核光会合の手法を用いて、ボースおよびフェルミ粒子の原子数を系統的に変えながら測定することに成功した。特にボース・フェルミ粒子間の相互作用について、引力相互作用および斥力相互作用する2種類の混合系を用意して、比較することにより、相分離、混合モット状態、複合粒子形成とその変遷、等の興味深い現象を明らかにすることに成功した。これらは、中性原子系を用いて初めて実現可能になったものであり、世界で初めての成果である。さらに、新規な相の実現には、フェルミ原子のスピン自由度が本質的に大きく寄与したいわゆるポメランチュク冷却の機構が関与していることも突き止めた。 このほかにも、まず、新しいイメージング法の開発にも取組んで、3次元光格子中のイッテルビウム原子のボース凝縮体に対して、新たに光トラップ中での光モラシスによる高感度の蛍光観測システムを構築し、基底状態と準安定状態³P₂との狭線幅遷移を用いた高分解能分光に成功した。それにより、1kHz台の極めて鋭いスペクトルを得ることに成功した。さらに、自然同位体比が0.13%と非常に小さい¹⁶⁸Yb同位体についても、ボース凝縮を実現し、超流動ーモット絶縁体転移を観測することに成功した。それだけでなく、¹⁶⁸Ybボース凝縮と¹⁷⁴Ybボース凝縮の安定な混合系も生成することに成功し、今後の様々な研究の可能性を広げることに成功した。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

申請者は、通常使われているアルカリ原子ではなく、イッテルビウム原子という希土類原子に着目し、そのボース同位体とフェルミ同位体の混合系を光格子に導入した系を用いて、特に、強相関係であるモット絶縁体領域の振る舞いに着目し、そこで発現する様々な相を実際実験的に実現し、その振る舞いを詳細に調べて、ボース・フェルミ間の相互作用やボース粒子とフェルミ粒子の相対的な占有数により多様な相が実現することを明らかにしたことを報告した。

このような研究の背景として、中性原子のレーザー冷却技術が開発され、マイクロケルビン台の極低温の原子集団を用意することが可能になり、物性、量子情報、原子時計、その他様々な研究に用いられていることが上げられる。特に、蒸発冷却とよばれる方法により、ナノケルビン台まで冷却することが可能になり、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子気体が生成され、その物性研究が盛んに研究されている。光格子とは、中性原子にとっての周期的なポテンシャルをレーザー光で作りに出したものであり、その中に量子気体を導入した系は、固体中の結晶格子の中を運動する電子の系とのアナロジーから、大変注目され、ハバードモデルと呼ばれる凝縮系物理における重要なモデル系を理想的に実現する新しい量子多体系として研究が行われている。

申請者は、イッテルビウム原子のボース・フェルミ混合系をまず光トラップ中で超低温に冷却する実験を行った。次にそれを 3 次元光格子に導入し、ボース粒子系およびフェルミ粒子系が、単独ではそれぞれ強相関のモット絶縁状態にあるような温度・原子数に対して、ボース・フェルミ混合系を生成し、その光格子点での占有率の様子を、同核光会合および異核光会合の手法を用いて、ボースおよびフェルミ粒子の原子数を系統的に変えながら測定した。特にボース・フェルミ粒子間の相互作用について、引力相互作用および斥力相互作用する 2 種類の混合系を用意して、比較することにより、相分離、混合モット状態、複合粒子形成とその変遷、等の興味深い現象を明らかにした。これらは、中性原子系を用いて初めて実現可能になったものであり、世界で初めての成果である。さらに申請者は、このような新規な相の実現には、フェルミ原子のスピン自由度が本質的に大きく寄与したいわゆるポメラランチュク冷却の機構が関与していることも突き止めた。

申請者はこれ例外にも、まず、自然同位体比が 0.13% と非常に小さい ^{168}Yb 同位体についても、ボース凝縮を実現し、超流動—モット絶縁体転移を観測することに成功した。それだけでなく、 ^{168}Yb ボース凝縮と ^{174}Yb ボース凝縮の安定な混合系も生成することに成功し、今後の様々な研究の可能性を広げることに成功した。

さらに、新しいイメージング法の開発にも取組んで、3 次元光格子中のイッテルビウム原子のボース凝縮体に対して、新たに光トラップ中での光モラシスによる高感度の蛍光観測システムを構築し、基底状態と準安定状態 $^3\text{P}_2$ との狭線幅遷移を用いた高分解能分光に成功した。それにより、1kHz 台の極めて鋭いスペクトルを得ることに成功した。

以上のように、申請者の、光格子中のボース・フェルミ 2 重モット絶縁体の研究によって、新しい強相関量子多体系の物理に関する重要な知見が得られた。これらの研究は、世界に先駆けたもので、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、平成 23 年 12 月 27 日、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った。その結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降