

京都大学	博士（物理学）	氏名	田家 慎太郎
論文題目	Ultracold Fermi Gases with High Spin Symmetry in an Optical Lattice		
(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、本論文では、基底状態に電子スピンをもたないイッテルビウム（Yb）原子を対象として、多くの同位体の中でも特に、核スピン 5/2 を持つフェルミ同位体 173 Yb 原子がもつ、SU(6)と呼ばれる高いスピン対称性に着目して研究を行った。さらに、その SU(6)対称性をもつフェルミ原子を光格子に導入した系を用いて、特に、強相関領域の量子多体系であるモット絶縁体相を実現したことを、様々な手法により明らかにしたことを報告するものである。 実験では、173 Yb 原子をまず光トラップ中で蒸発冷却の手法により超低温に冷却した。核スピン成分を分離して測定することのできる光シュテルン・ゲルラッハ法を新たに開発し、超低温の173 Yb 原子が実際に6成分を含んでいることを確認した。その後、それを3次元光格子に断熱的に導入し、強相関のモット絶縁状態を生成した。モット絶縁体相を特徴づける、2重占有数の測定、および励起のギャップ構造の測定、さらに、周期的摂動による2重占有の生成レートの測定による近接サイト間の相関関数の決定、などを行い、高温展開の理論計算も実施し、これらから SU(6)対称性をもったモット絶縁体の生成に成功したことを確認した。これらは、ユニークな特徴を持った173Yb 中性原子系を用いて初めて実現可能になったものである。 さらに、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ニチュク冷却の機構が関与していることも突き止めた。光ポンピングの手法により、SU(2)の系を用意して、SU(6)の系と直接的に比較することで、スピンの自由度が大きい方が、冷却効率が高いことを実験的に明らかにした。これは、今後、SU(6)の量子磁性を達成するために必要な超低温を実現するための重要な冷却法となりうることを示したことになる。 このほかにも、スピン2成分のフェルミ同位体である 171Yb 原子と、スピン6成分の173 Yb 原子との量子気体混合系を生成することに成功した。特に、これらの量子気体混合系を3次元光格子に導入して、SU(2)と SU(6)対称性を持った原子混合系のハバードモデルの系を実装することに成功した。これは、バンドマッピングという、光格子中の擬運動量分布を測定する手法を適用して明らかにした。			

(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、基底状態に電子スピンをもたないイッテルビウム (Yb) 原子を対象として、多くの同位体の中でも特に、核スピン $5/2$ を持つフェルミ同位体 173Yb 原子がもつ、 $SU(6)$ と呼ばれる高いスピン対称性に着目して研究を行い、さらに、その $SU(6)$ 対称性をもつフェルミ原子を光格子に導入した系を用いて、強相関領域の量子多体系であるモット絶縁体相を実現したことを、様々な手法により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、 173Yb 原子をまず光トラップ中で蒸発冷却の手法により超低温に冷却した。核スピン成分を分離して測定することのできる光シュテルン・ゲルラッハ法を新たに開発し、超低温の 173Yb 原子が実際に 6 成分を含んでいることを確認した。その後、それを 3 次元光格子に断熱的に導入し、強相関のモット絶縁状態を生成した。モット絶縁体相を特徴づける、2 重占有数の測定、および励起のギャップ構造の測定、さらに、周期的摂動による 2 重占有の生成レートの測定による近接サイト間の相関関数の決定、などを行い、高温展開の理論計算も実施し、これらから $SU(6)$ 対称性をもったモット絶縁体の生成に成功したことを確認した。これらは、ユニークな特徴を持った 173Yb 中性原子系を用いて初めて実現可能になったものである。

さらに、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ニチュク冷却の機構が関与していることも突き止めた。光ポンピングの手法により、 $SU(2)$ の系を用意して、 $SU(6)$ の系と直接的に比較することで、スピンの自由度が大きい方が、冷却効率が高いことを実験的に明らかにした。これは、今後、 $SU(6)$ の量子磁性を達成するために必要な超低温を実現するための重要な冷却法となりうることを示したことになる。

申請者はこれ以外にも、スピン 2 成分のフェルミ同位体である 171Yb 原子と、スピン 6 成分の 173Yb 原子との量子気体混合系を生成することに成功した。特に、これらの量子気体混合系を 3 次元光格子に導入して、 $SU(2)$ と $SU(6)$ 対称性を持った原子混合系のハバードモデルの系を実装することに成功した。これは、バンドマッピングという、光格子中の擬運動量分布を測定する手法を適用して明らかにした。

以上のように、申請者の、光格子中の高いスピン対称性を持った超低温フェルミ原子気体の研究によって、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 25 年 1 月 15 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