

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	原 秀明
論文題目	Production of Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms (アルカリ原子とアルカリ土類様原子の量子縮退混合系の生成)		
(論文内容の要旨)			
<p>Owing to the development of laser cooling techniques for neutral atoms, the study of quantum many-body systems such as Bose-Einstein condensation and Fermi degeneracy can be done with excellent controllability. Among many interesting systems of quantum degenerate gases, especially important is a system of ultracold atomic gas mixtures consisting of different elements, because they have new interesting possibilities such as dipolar physics with polar molecules, study of heteronuclear Efimov resonances, and exploration of novel quantum phases.</p> <p>The applicant focuses on a pair of alkali lithium and alkaline-earth-like ytterbium atoms, which has unique features different from other mixed gases. One of the distinct features of this mixture is the very large mass ratio of 29. Because of this large mass ratio, the tunneling rate of ytterbium atoms is more than three orders of magnitude smaller than that of lithium in an optical lattice with a wavelength of 1064 nm, for example. Therefore light fermionic atoms of lithium 6 behave as itinerant electrons and heavy atoms of ytterbium behave as localized impurities, which are thought to play a key role in Anderson localization, and some novel quantum phases such as Bose glass etc. This mixture, thus, provides the various possibilities for quantum simulation of disorder and impurity problems.</p> <p>To reach these goals, it is desirable to achieve quantum degenerate regime simultaneously in a mixed gas. In the first half of this thesis the applicant reports the first production of a quantum degenerate Bose-Fermi mixture of 174 ytterbium and 6 lithium and a Fermi-Fermi mixture of 173 ytterbium and 6 lithium. The experiment begins with a simultaneous magneto-optical trapping of ytterbium and lithium. After evaporative cooling the applicant successfully creates quantum degenerate mixtures of ytterbium and lithium. The equality of the temperatures between ytterbium and lithium atoms is confirmed within the experimental error, which indicates that ytterbium cloud provide good thermometry for the very cold Fermi gas of 6 lithium. Using cross-thermalization measurements, the absolute values of <i>s</i>-wave scattering lengths are obtained, the result of which is consistent with mass-scaling analysis.</p> <p>In the second half of this thesis, the applicant reports the development of an optical lattice system with a wavelength of 1064 nm for the ultracold atom mixture of ytterbium and lithium. The applicant successfully loads a Bose-Einstein condensate of 174 ytterbium and Fermi degeneracy of 6 lithium into a three dimensional optical lattice, which is confirmed by observing the matter-wave interference patterns of 174 ytterbium atoms in a time-of-flight image at a relatively shallow optical lattice. The applicant also measures the coherence</p>			

property of ^{174}Yb in an optical lattice with and without 6 lithium atoms at various lattice potential depths. Furthermore, the applicant performs a high resolution laser spectroscopy of ^{174}Yb in the mixture loaded in an optical lattice using the ultra-narrow optical transition. In addition, the applicant also measures the polarizabilities of the $3P_2$ state with a wavelength of 1070 nm for ^{174}Yb atoms and determines the scalar and the tensor polarizabilities.

The production of quantum degenerate mixtures of ytterbium and lithium and the successful loading of this mixture into the optical lattice, realized in this thesis, are the essential first steps toward the quantum simulation of impurity or disordered systems and exploration of novel quantum phases.

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

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、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、大きく性質の異なる異種の原子の混合系に着目し、研究を行った。これまで、アルカリ原子どうしの混合系の実験は幾つか報告されているが、申請者は、アルカリ原子とアルカリ土類様原子の混合系というこれまでにない系に着目した。この系では、スピン自由度を持った極性分子の電気双極子相互作用による異方性長距離相互作用の物理を研究することが可能となるなど、世界的にも注目されている系である。申請者は特に質量比が2.9という非常に大きいものとして、アルカリ原子のリチウム原子、アルカリ土類様原子のイッテルビウム原子を選んだ。それにより、ユニバーサルな3体束縛状態であるエフィモフ状態に関するユニークな研究や、リチウムを遍歴する電子、イッテルビウムを局在した不純物とみなした不純物系の研究が可能となる。

以上のような背景のもと、申請者は、このリチウムとイッテルビウムの量子気体混合系に関して、以下のような先駆的な実験を行った。まず、1) イッテルビウムとリチウムの同時レーザー冷却、同時光トラップ、そして、その光トラップ中でのイッテルビウム原子の蒸発冷却とそれとの衝突によってリチウム原子を冷却する、いわゆる協同蒸発冷却に成功し、リチウム原子とイッテルビウム原子の混合量子気体である、ボース・フェルミ混合系およびフェルミ・フェルミ混合系を生成することに世界で初めて成功した。さらに、2) リチウム原子とイッテルビウム原子間の相互作用を正確に決定し、その結果が質量スケール理論と一致することを確認した。そして、3) イッテルビウム原子とリチウム原子のボース・フェルミ混合系を3次元光格子に導入することに成功し、特に、光格子中のイッテルビウム原子のコヒーレンス特性の研究や高分解能分光を遂行した。さらに、4) イッテルビウム原子の準安定状態について分極率を正確に測定し、その磁場および偏光の依存性を明らかにした。

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9月19日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日：2014年4月1日以降