

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	小沢秀樹
論文題目	Ultracold Ytterbium Atoms in a Tunable Non-Primitive Optical Lattice (高い制御性をもつ非標準型光格子中の極低温イッテルビウム原子)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>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、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。さらに、量子気体を、光格子と呼ばれるレーザー光の定在波によってつくられた周期的なポテンシャルに導入した系は、固体中の電子系とのアナロジーから、強相関量子多体系を研究する新しい実験系として注目を集め、盛んに研究されている。特に、不純物や格子欠陥のない、理想的な系を対象とすることができることや、系のパラメーターを高い精度で制御可能であることが大きな特徴であり、このようなことから、光格子中の冷却原子を用いた実験は、量子多体系に対する量子シミュレーション実験と認識されている。</p> <p>このような背景のもと、本論文では、特に、原子種としてイッテルビウム (Yb) 原子を用い、それを、標準的な正方格子や立方格子ではなく、リーブ格子や超格子などの非標準型の光格子に導入した系に着目した。Yb原子は同位体が豊富で、<math>^{174}\text{Yb}</math>などのボソン、原子間相互作用のほとんどないフェルミオン<math>^{171}\text{Yb}</math>、および斥力相互作用をするフェルミオン<math>^{173}\text{Yb}</math>を用いることで様々な系を準備することができる。また、非標準格子であるリーブ格子では、バンド分散のない、平坦バンドと呼ばれるバンドが第2励起バンドに存在し、さらに線形な分散をしめすディラックコーンを有する。このため、十分低温では、ボソンに関しては超固体と呼ばれる新奇な量子相が出現することが理論的に予想されていて、また、フェルミ原子系では強磁性を発現することが示されている。また、斥力相互作用するフェルミオンを光超格子に導入した系では、その2重井戸内のトンネルエネルギーをコントロールすることで、超交換相互作用を増大させることが可能となり、量子磁性の発現に繋がることが期待される。特に、<math>^{173}\text{Yb}</math>原子系は高いスピン対称性であるSU(6)対称性を有しており、その大きなスピン自由度を利用したポメラランチュク冷却効果が期待される。</p> <p>本論文の成果として、まず、1) 3種類の光格子をその相対位相を制御して組み合わせることで、初めてリーブ型光格子を実現し、さらにボソン<math>^{174}\text{Yb}</math>のボース・アインシュタイン凝縮体を第2励起バンドの平坦バンドに導入する位相刷り込み法を新たに開発し、平坦バンド中のボース・アインシュタイン凝縮体の特異な振る舞いを観測することに成功した。また、2) リーブ型光格子におけるバンド構造の相互作用による影響を実験的に明らかにし、それを理論計算により説明することに成功した。さらに、3) リーブ格子の3サイトと2つのレーザー光で結合した3準位系とのアナロジーに着目し、原子間相互作用のほとんどないフェルミオン<math>^{171}\text{Yb}</math>を用いて、中間地点を経由せずに空間的に離れた場所に粒子を高効率で移動させる空間断熱移送を物質波で初めて実現することに成功した。最後に、4) 斥力相互作用をするフェルミオン<math>^{173}\text{Yb}</math>を光超格子に導入して、量子磁性の発現を観測し、特にスピン4成分のSU(4)系とスピン2成分のSU(2)系とを比較することで、量子磁性においてもポメラランチュク冷却効果が働</p>			

くことを確認することに成功した。

これらの成果は、どれも世界で初めての重要な成果であり、光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーション研究を大きく前進させたと言える。

(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、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、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。さらに、量子気体を、光格子と呼ばれるレーザー光の定在波によってつくられた周期的なポテンシャルに導入した系は、固体中の電子系とのアナロジーから、強相関量子多体系を研究する新しい実験系として注目を集め、盛んに研究されている。特に、不純物や格子欠陥のない、理想的な系を対象とすることができることや、系のパラメーターを高い精度で制御可能であることが大きな特徴である。このようなことから、光格子中の冷却原子を用いた実験は、量子多体系に対する量子シミュレーション実験と認識されている。

このような背景のもと、本論文では、原子種としてYb原子を用い、それを非標準型の光格子に導入した系に着目して研究を行った。非標準格子であるリーブ格子では、バンド分散のない平坦バンドが第2励起バンドとして存在する。このため、十分低温では、ボソンに関しては超固体と呼ばれる新奇な量子相が出現することが理論的に予想されていて、また、フェルミ原子系では強磁性を発現することが示されている。また、光超格子に導入した系では、その2重井戸内のトンネルエネルギーをコントロールすることで、斥力相互作用するフェルミ粒子に対して超交換相互作用を増大させることが可能となり、量子磁性の発現に繋がることが期待される。

本論文の成果として、まず、1) 3種類の光格子をその相対位相を制御して組み合わせることで、初めてリーブ型光格子を実現し、さらにボソン<sup>174</sup>Ybのボース・アインシュタイン凝縮体を第2励起バンドの平坦バンドに導入する位相刷り込み法を新たに開発し、平坦バンド中のボース・アインシュタイン凝縮体の特異な振る舞いを観測することに成功した。また、2) リーブ型光格子におけるバンド構造の相互作用による影響を実験的に明らかにし、それを理論計算により説明することに成功した。さらに、3) リーブ格子の3サイトと2つのレーザー光で結合した3準位系とのアナロジーに着目し、原子間相互作用のほとんどないフェルミオン<sup>171</sup>Ybを用いて、中間地点を経由せずに空間的に離れた場所に粒子を高効率で移動させる空間断熱移送を物質波で初めて実現することに成功した。最後に、4) 斥力相互作用をするフェルミオン<sup>173</sup>Ybを光超格子に導入して、量子磁性の発現を観測し、特にスピン4成分のSU(4)系とスピン2成分のSU(2)系とを比較することで、量子磁性においてもポメラニチュク冷却効果が働くことを確認することに成功した。

以上の結果は、光格子中の冷却原子という新しい量子多体系に関する重要な発展をもたらすものであると認められる。これらは、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。今後、光・原子物理学、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30年1月18日、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。

要旨公表可能日： 年 月日以降