

氏名	カタ オカ ケイ スケ 片岡啓介
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第859号
学位授与の日付	平成25年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	場の量子論的手法による光学格子にトラップされた極低温原子系の研究 (Field-theoretical study on ultra-cold atoms in an optical lattice)

論文審査委員	主査	教授	一瀬 郁夫
		准教授	在田 謙一郎
		准教授	伊藤 桂
		教授	高橋 聡
		教授	松井 哲生 (近畿大学)

## 論文内容の要旨

近年、レーザー冷却や光学格子などの技術の発達が著しい。今まで理論的には考えられていたものの、実際の物質ではなかなか実現せず、扱うことができなかったような系が光学格子系により実現されはじめている。従来の物質とは異なり、不純物がないクリーンな系であり、相互作用、系の格子形状や次元など自由に制御することができる。光学格子系は、既存のモデルやそれに対する解析方法などの方法論を確かめることができる系と考えられる。そのためエレクトロニクス等への応用を含め、実験・理論ともに精力的に研究が行われている。本論文ではこのような光学格子系を想定し、現時点ではまだ実験的な研究が十分でない系に対して、起こりうる現象の予言を試みた。前半の第2, 3章ではスピン自由度の大きい fermion 系を扱った。後半の第4, 5章ではフラストレーションのある2成分 boson 系を扱った。それぞれの系の相構造を場の量子論的手法とモンテカルロシミュレーションによって調べた。

第1章では、導入として相転移の基本的な概念の導入とその説明を行う。スピン系における様々な秩序を示し、幾何学的なフラストレーションがある場合にどのような秩序を形成するのか、具体的なモデルで検討する。レーザー冷却と光学格子の基本的な原理を示し、最後に、極低温原子系の特徴的な現象である BEC、超流動、超固体の概要を示した。

第 2 章では、光学格子に閉じ込められたスピン 3/2 の fermion 系を表すモデルである、 $Sp(N)$  Heisenberg モデルを扱った。スピン 3/2 の fermion 系が実現すると考えられている物質の候補はいくつか挙げられている。しかし、現時点ではまだこのような物質群に対して、実験的にも理論的にも十分な研究が行われていない。はじめにこの系を記述する  $Sp(N)$  Heisenberg モデルの説明を行った。このモデルはスピン自由度が大きいため、 $SU(2)$  対称性を持つスピン 1/2 の Heisenberg モデルよりも対称性が高く、様々な秩序が存在すると考えられる。このモデルに対して絶対零度  $T=0$  の量子系を記述する有効場理論を導出し、その解析を場の量子論の手法である  $1/N$  展開によって行った。その結果得られた各相の基底状態における状態を分類した。

第 3 章の前半では、モンテカルロ法の基本的な原理と物理量の評価法を示した。第 2 章で導いた有効場理論のモデルを格子化したモデルを導出し、モンテカルロシミュレーションを行った。比熱などの各種の物理量を測定することによって相構造を決定し、2 種類のスピン相関を用いて各相の特徴を見出した。モンテカルロシミュレーションによって得られた相構造と、場の量子論的手法によって得られた相構造で比較を行った。また、有限温度系への拡張を行いホールの導入により各相の影響、変化について調べた。

第 4 章では、まず既に研究が行われている 1 成分 Bose-Hubbard モデルによって示される超流動-Mott 絶縁体転移の概略を示した。次に 2 成分 Bose-Hubbard モデルから bosonic  $t$ - $J$  モデルの導出を示した。粒子が存在しない状態をホールの自由度として扱うスレーブ粒子表現を用いて、このモデルの積層三角格子における有限温度系の相構造をモンテカルロシミュレーションによって調べた。このモデルは、高温超伝導現象を記述すると考えられている  $t$ - $J$  モデルで、fermion である電子を boson に対応させたものになっている。多成分系であることとフラストレーションによって秩序が競合することで、多彩な相構造が見られた。それぞれの相の特徴を擬スピン相関と超流動状態の指標となる boson 相関によって調べた。超流動と擬スピンによる磁性秩序が共存する相や、結晶秩序と超流動状態が共存する超固体状態など様々な相が出現することがわかった。また、1 次転移に伴う不均一な構造を扱うために、粒子数を一定にしたカノニカルアンサンブルに対するモンテカルロシミュレーションを行った。今までの研究では扱われてこなかった不整合な充填率の場合を扱い、粒子のホッピングの増加による系の変化を調べた。

第 5 章では、第 4 章で得られた bosonic  $t$ - $J$  モデルの絶対零度  $T=0$  の  $(2+1)$  次元三角格子量子系を記述する有効場理論を導出した。2 種類の原子が Bose 凝縮を起こし、かつ擬スピンの長距離秩序が見られる特徴的な相に対して、有効理論を表し基底状態とその低エネルギー励起の記述を試みた。第 4 章で扱った 3 次元積層三角格子のモデルの低温領域を考え、 $(2+1)$  次元三角格子量子系との比較を行った。

第 6 章では、以上の内容から得られた結果について総括し、議論を行った。

## 論文審査結果の要旨

片岡啓介氏の博士論文は、近年多く物理学者の注目を集めている極低温原子系に関するものである。その中で特にレーザー技術の進歩により可能となった光学格子にトラップされた原子系について、原子間相互作用が強い極限における相構造および各相の物性を解析的および数値実験により調べた結果を基に構成されている。

片岡氏の興味の中心は原子間相互作用や幾何学的フラストレーションの結果、光学格子上の原子系において新しい量子物質状態が実現される可能性にある。また、これまでアカデミックな興味でのみ研究されて来た多体量子モデル上のダイナミクスが、光学格子上の原子系で実現される可能性についても広い視野で論じられている。

第1章は博士論文の内容を理解する準備に当てられ、相転移、量子スピン系の物理や光学格子の説明がなされている。

第2章ではフェルミオン原子系について、特に斥力が強い場合に系が量子スピン系として記述されることを示し、そのスピンモデルである $Sp(N)$ 量子スピンモデルを、主に場の量子論的手法を用いて調べている。その結果、詳細な相構造や低エネルギー励起の構造が明らかにされた。

第3章は数値計算的手法により、第2章で論じられた $Sp(N)$ スピンモデルを調べている。その結果は第2章の解析的手法により得られた結果と一致し、用いた解析的手法の正しさを立証し、さらにこのスピン系にホールをドープした場合の構造も明らかにした。また、数値計算の結果に対して有限サイズスケール解析を行い、種々の臨界指数を得ることが出来た。

第4章では三角光学格子上のボソン系について、主に数値計算的手法によって、その相構造や臨界現象が調べられている。基本となるBose-Hubbardモデルから原子間斥力が強い状況では有効低エネルギーモデルとしてbosonic t-J モデルが導出されることを示し、そのモデルの解析をスレーブ粒子表示を用いることにより行った。この点は先行研究では成されていない本質的に新しい点である。得られた結果は極めて興味深いものであり、特にその相図では超流動、固体秩序、相分離などの要素が複雑に絡み合った物理が示されている。

第5章では第4章の研究を受け、絶対ゼロ度での光学格子上の斥力原子系の相構造の研究を行った。まず解析的手法により、bosonic t-J モデルから一種の量子XYモデルが導かれることを示し、その後その有効モデルを数値計算的手法により調べた。得られた結果は第4章の結果と良い一致を示し、解析の信頼性を立証することになった。

以上、第2章から5章まで、新しく興味深い結果を得ており、また第1章の概論で片岡氏が十分な研究素養を有していることが分かる。この事実は公聴会において確認することが出来た。これより片岡氏が提出した論文は博士論文として十分に価値のあるものと判断する。なお、得られた結果はPhys. Rev. B等の著名な学術雑誌に3篇の学術論文として公表されていることを申し添えておく。