

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 18 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540301

研究課題名(和文) 計算機シミュレーションによるゲージ理論の研究とその量子多体現象への応用

研究課題名(英文) Numerical study of gauge theories and its application to quantum many-body phenomena

研究代表者

一瀬 郁夫 (ichinose, ikuo)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20159841

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は近年特に注目を集めている量子多体現象について、解析的および数値実験的手法を用いてその本質を解明し、新たなる可能性についての知見を得ることである。特にその中心となった研究テーマは、ゲージ理論と密接に関連したものであり、新規超電導現象、光格子上的極低温原子系で実現される種々の強相関多体系などである。特に、それらの相構造は素粒子物理学で中心的役割を果たすゲージ理論の枠内で理解されるものである。実験パラメータを変化させることにより相転移が起こり、種々の相が出現するが、それぞれの相での低エネルギー励起の様子は、その系が内在する局所ゲージ対称性の実現形態にて決定される。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we investigate phase diagrams of various quantum many-body systems including strongly-correlated electron systems and multi-species ultra-cold atomic gases on an optical lattice. By varying parameters of the models, a phase transition takes place and low-energy excitations in each phase are investigated by the gauge theory, which is most important theory in elementary particle theory. Besides analytical study, we use the numerical study including Monte-Carlo simulations and numerical investigation of the Gross-Pitaevskii and/or Ginzburg-Landau equations describing superfluid and superconductivity. We particularly focus on systems of ultra-cold atomic gases on an optical lattice, which are quite controllable. Numerical Monte-Carlo experiments reveals various interesting properties of these systems.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子

キーワード：ゲージ理論 モンテ・カルロ計算実験 量子相転移 極低温原子系 強相関多体系

## 1. 研究開始当初の背景

1980年代後半に発見された高温超伝導現象と量子ホール効果は、物性物理学の新しい扉を開いた。この2つの現象に共通する点は、電子間相互作用が本質的な役割を果たす現象においては、元の電子以外の低エネルギー励起が本質的な役割を果たす可能性を如実に示した点にある。それから四半世紀を経た2010年においても、上記の可能性は多くの物理学研究者の興味を引く、重要な問題である。

特にそれらの新規な励起粒子は、スピノン、ホロン、複合粒子(ボソン、フェルミオン)と呼ばれ、その存在の実験的検証と共に、理論的研究の重要性が認識されている。特に、理論的研究においては、上記の現象が所謂ゲージ理論の言葉を用いて理解可能であるとの認識は、多くの研究者に受け入れられつつある。しかしながら、それらの可能性を示す物質は、時としてあまりに複雑であり、その本質を明確な形で任意性なく解明することが困難である。

近年、上記の強相関現象の解明に対して、大きな可能性を提示する物理系が見いだされた。それは強相関電子系とは全く異なる物理分野である原子・電子物理学分野において出現した極低温原子系である。特に近年レーザー技術の進歩により、希薄原子ガスを絶対ゼロ度にまで冷やすことが可能となり、さらに極めて最近、レーザーを使って人為的に空間内に格子を構築し、そこに原子をトラップすることが可能となった。トラップされた原子間相互作用は以前より知られていたフェッシュバハ共鳴という技術を用いて自在に制御され、上記の強相関電子系に類似した実験系を自在に構築し、その物性現象を調べることが可能となった。この極低温原子系の分野は、現在最も活発に進展している分野と言える。

本研究では、特に上記の極低温原子系の多体量子系としての物性現象を数値計算的手法を用いて調べ、強相関物理系における低エネルギー励起の性質を調べることを行った。ここでは、素粒子物理学で中心的な役割を果たすゲージ理論の知見が、重要な役割を果たしていると同時に、極低温原子系を用いてゲージ理論に類似した実験系としての極低温ガス系の可能性も明らかにした。この発見は今後、有限密度ゲージ理論そのものの研究に大きな寄与を与えると期待される。

## 2. 研究の目的

上記の背景で述べたように、量子多体系の研究において、その粒子間相互作用に効果を明

確に検証しうる実験系として、極低温原子系が大きな注目を集めている。その系の大きな特徴は、ほぼすべての実験パラメータをコントロールすることが可能であり、かつ不純物等の余計な効果が排除されたことにある。

本研究の目的は、主に上記の極低温原子系のなかで、高温超伝導に密接に関連した2成分ガス系に注目し、数値実験の観点よりよりシミュレーションが可能なボソン系についてその相構造・低エネルギー励起を詳細に調べることにある。

近年、光格子を回転することにより、また外部レーザーの巧妙な操作により、外部磁場と同様の効果を系に与えることに成功した。この結果を受けて、本研究においても、外部有効磁場による系の基底状態の変化に注目し、その効果を数値実験により調べる。

更に、この光格子上のボソン系が超流動状態に陥ることにより、その位相自由度をゲージ場と見なし、ゲージ理論の動力学を実験的に調べる可能性が指摘された。本研究では、更に深くこの可能性を調べる。

## 3. 研究の方法

(1) 冷却原子の斥力が大きい極限の物理を記述する  $t$ - $J$  モデルを解析的に調べる。経路積分法により系の分配関数を表し、ボソン自由度の密度自由度を解析的に積分する。得られた有効理論は位相自由度のものであり、この位相自由度が超流動の可能性およびそこでの位相励起等を記述する。拡張された Hubbard-Storatonovichi 変換を用いて有効場の理論を導き、有効ポテンシャルを解析することにより、系の相構造を求め、南部・ゴールドストーンボソンの自由度を確認する。また、Higgs ボソンの出現についての考察を行う。

(2) 計算機による数値実験的手法  
上で求めた有効理論を、計算機を用いた数値実験で調べる。特に手法としては、次の2つが挙げられる。

- 1 モンテ・カルロ法によるシミュレーション
- 2 グロス・ピアエフスキー方程式を数値的に解き、系の時間発展を追う

どちらの方法も試行錯誤の後に成功し、その有効性の確認後、興味深い結果を得ることが出来た。

## 4. 研究成果

主に2成分ボソン系で、その相互作用が強くゲージ理論的な記述が適応される場合について上記の2つの方法で調べた。

絶対ゼロ度、有限温度、有効外部磁場中の系、  
について、それぞれの相構造、位相励起の空間的配位構造、競合する秩序の形成、ゲージ対称性の自発的破れと超流動・超伝導の関連について、興味深い知見を得た。

同時進行で、格子ゲージ理論の直接的対応現象である、新奇超伝導現象の解明も、数値実験的手法により行った。

これらの成果は、以下の10編の学術論文や学会発表により公表されている。

(1) 極低温原子系の実現が期待される量子スピン系の研究を行った。スレーブボソン表示を用いるとこの系は  $U(1)$ ゲージ場と相互作用するスピノンの系となる。解析的に有効場の理論を導き、その理論でのゲージ対称性が破れた相と長距離秩序相の関係を明らかにした。

(2) 2成分ボソン系の研究を、広いパラメータ領域、実験環境について行った。特に興味深い結果として、超流動と固体秩序が共存する超固体相が実現するパラメータ領域を見出した。これは数値計算的手法による寄与が大きい、同時に解析的な手法の適応限界の重要な示唆を与えるものである。

(3) Gross-Pitaevskii 方程式を時間的に解くことにより、超流動状態の位相励起の時間発展を調べることに成功した。近い将来に、実験的に観測されることが期待される。

(4) 最後に、極低温原子系を用いて、格子ゲージ理論のシミュレーションを行う可能性について研究を行い、ゲージ理論に対応する原子系のパラメータ領域を明らかにした。この研究は現在発展・進行中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

K.Kataoka, S.Hattori, I.Ichinose,  
Effective field theory for  $Sp(N)$   
antiferromagnets and their phase  
structure, (査読あり)  
Phys. Rev. B83, 174449(2011),  
DOI: 10.1103/PhysRevB.83.174449

Y.Nakano, T.Ishima, N.Kobayashi,  
K.Sakakibara, I.Ichinose, T.Matsui  
Finite-temperature phase diagram of  
the three-dimensional hard-core  
bosonic t-J model, (査読あり)  
Phys. Rev. B 83, 235116(2011),

DOI: 10.1103/PhysRevB.83.235116

Y.Nakano, T.Ishima, N.Kobayashi,  
T.Yamamoto, I.Ichinose, T.Matsui,  
Finite-temperature phase diagram of  
two-component bosons in a cubic  
optical lattice: Three-dimensional  
t-J model of hard-core bosons,  
(査読あり)  
Phys. Rev. A 85, 023617(2012),  
DOI: 10.1103/PhysRevA.85.023617

A.Shimizu, H.Ozawa, I.Ichinose,  
T.Matsui,  
Lattice Ginzburg-Landau model of a  
ferromagnetic p-wave pairing phase in  
superconducting materials and an  
inhomogeneous coexisting state,  
(査読あり)  
Phys. Rev. B 85, 144524(2012),  
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.144524,

H.Ozawa, I.Ichinose,  
Phase structure of repulsive hard-core  
bosons in a stacked triangular lattice,  
(査読あり)  
Phys. Rev. A 86, 015601(2012),  
DOI: DOI: 10.1103/PhysRevA.86.015601,

K.Kataoka, Y.Kuno, I.Ichinose,  
Bosonic t-J model in a stacked  
triangular lattice and its phase  
diagram, (査読あり)  
J.Phys.Soc.Jpn. 81, 124502(2012),  
DOI: 10.1143/JPSJ.81.124502,

Y.Kuno, K.Kataoka, I.Ichinose,  
Effective field theories for  
two-component repulsive bosons on  
lattice and their phase diagrams,  
(査読あり)  
Phys. Rev. B 87, 014518(2013),  
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.014518,

K.Kasamatsu, I.Ichinose, T.Matsui,  
Atomic quantum simulations of the  
lattice gauge-Higgs model: Higgs  
coupling and emergence of exact local  
gauge symmetry, (査読あり)  
Phys. Rev. Lett. 111, 115303(2013),  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.115303,

Y.Kuno, K.Suzuki, I.Ichinose,  
Effective field theory for two-species  
bosons in an optical lattice: Multiple  
order, the Nambu-Goldstone bosons, the  
Higgs modes, and the vortex lattice,  
(査読あり)  
J.Phys.Soc.Jpn. 82, 124501(2013),  
DOI: 10.7566/JPSJ.82.124501,

Y.Kuno, K.Suzuki, I.Ichinose,  
Superfluid, supersolid, checkerboard  
solid in two-component bosons in an  
optical lattice: Study by means of  
Gross-Pitaevskii theory and  
Monte-Carlo simulations, (査読あり)  
J.Phys.Soc.Jpn. (掲載決定)

[学会発表](計19件)

小林直弘、「光学格子上の2成分ボソン系の相構造と臨界現象」日本物理学会、2011年9月21日、富山大学

石間匠、「3次元光学格子上にトラップされた2成分ボソン系の相構造と臨界現象」日本物理学会、2011年9月21日、富山大学

久野義人、「3次元光学格子上の2成分ボソン系の相構造：長距離相互作用によるペア超流動の存在の可能性について」日本物理学会、2011年9月21日、富山大学

小澤秀敏、「層構造三角光学格子上のハード・コアボソン系の相構造」日本物理学会、2011年9月21日、富山大学

小島康輔、「ドープされた層状三角格子反強磁性ハイゼンベルグモデルの相構造」日本物理学会、2011年9月22日、富山大学

久野義人、「光学格子上の極低温2成分ボソン系の有効場の理論とその相構造」日本物理学会、2012年3月25日、関西学院大学

片岡啓介、「積層光三角格子上の bosonic t-J model の相構造の研究」日本物理学会、2012年9月18日、横浜国立大学

久野義人、「三角格子上の2成分ボソン系の有効理論とその相構造」日本物理学会、2012年9月18日、横浜国立大学

野口剛裕、「格子 Ginzburg-Landau 理論による強磁性超伝導現象の数値シミュレーション」日本物理学会、2012年9月18日、横浜国立大学

小澤秀敏、「2成分超伝導現象を記述する Ginzburg-Landau 理論における位相れいきについて」日本物理学会、2012年9月18日、横浜国立大学

小島康輔、「三次元積層三角格子上の拡張された反強磁性ハイゼンベルグモデルの相構造とホールドープの効果」日本物理学会、2012年9月21日、横浜国立大学

黒川雄一郎、「Sn/Si コアシェルクラスターにおけるエキシトン超伝導の可能性」日本物理学会、2013年3月27日、広島大学

長谷川涼太、「2成分 Ginzburg-Landau 理論による金属 半導体コアシェルクラスター超伝導の研究」日本物理学会、2013年3月27日、広島大学

久野義人、「光学格子上の2成分 Bose 粒子系における相構造と渦度分布、回転格子下における相構造」日本物理学会、2013年3月27日、広島大学

松居哲生、「光格子中の冷却原子系 U(1) 格子ゲージ理論対応とゲージ対称性の破れ」日本物理学会、2013年3月29日、広島大学

鈴木啓太、「光学格子上の2成分斥力ボソン系での超固体の可能性と安定性について」日本物理学会、2013年9月25日、徳島大学

久野義人、「光学格子上の2成分斥力ボソン系の有効場の理論の導出と低エネルギー励起の研究」日本物理学会、2013年9月25日、徳島大学

稲生隼人、「異なる形状のポテンシャルにトラップされた2成分ボソン系の Ginzburg-Landau 理論による研究」日本物理学会、2013年9月26日、徳島大学

久野義人、「光学格子中2成分 Bose 粒子系における超固体相の研究」日本物理学会、2013年3月27日、東海大学

[その他]

ホームページ

<http://t-phys.web.nitech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

一瀬 郁夫 (ICHINOSE, Ikuo)  
名古屋工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号：20159841