

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400246

研究課題名(和文) 数値計算によるゲージ理論の研究とその量子現象への応用

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

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は主に計算機を用いた数値実験的研究手法によりゲージ理論の相構造と低エネルギー励起等を明らかに、関連する量子多体現象を解明することにある。特に近年発展が著しい極低温原子系や強相関多体系に焦点を当てている。その中で極低温原子系は物理的に興味がある種々の系やモデルを実際の原子系でシミュレートし、その動力学を解明する手法として注目を集めている。本研究においては、格子ゲージ理論に対して量子シミュレートする処方および実験的なセットアップを提唱し、期待される観測結果を「古典」数値シミュレーションにより求めた。また人工磁場の導入により可能となったHaldaneモデル等の研究も行った。

研究成果の概要(英文)：Purpose of the present study is to investigate phase diagrams of various gauge models and apply the obtained results to interesting quantum many-body systems. In particular, we focus on ultra-cold atomic systems and possibility of the quantum simulation using the ultra-cold atomic gases. Quantum simulations are very useful tool to investigate physically interesting various quantum systems and models by mimicking them. In particular, real-time dynamics can be studied by the quantum simulation with ultra-cold atomic systems. We studied lattice gauge theory by the quantum simulation, and proposed feasible experimental set up for it. We also study the bosonic analogs of Haldane model, which is also realized in experiments on ultra-cold atomic systems in recent years.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ゲージ理論 量子シミュレーション 量子多体現象 計算機実験 閉じ込め ヒッグス機構

## 1. 研究開始当初の背景

近年、量子多体系の研究において極低温原子系を用いた研究が理論、実験ともに重要な位置づけを得ている。特に、格子上的多体量子モデルに対して、格子の形状、格子の次元を自由に操る光格子の実現により、新たに量子シミュレーションという概念が生まれつつあった。極低温原子系の原子は電氣的に中性であるが、ボーム・アハローノフ効果を用いて、人工的に外部磁場と同様な効果をもたらす手法が実現するなど、量子多体系においてゲージ場の効果を直接検証する機運が高まっていた。さらに、格子上に構築されたゲージ理論に対する量子シミュレーションも提案されていたが、局所ゲージ対称性を担保する点に問題があった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の状況を踏まえて、主に数値実験、モンテ・カルロ法による格子上的場の理論および量子多体系の相構造の研究、特に新奇量子状態の探索と、実験的に実現可能な格子ゲージ理論の量子シミュレーションについて調べることである。特に、人工ゲージ場と相互作用する格子モデルにおいては、物理的に興味深い状態相が出現されると期待されているが、その典型がハミカム格子上で複素ホッピング項を持つ Haldane モデルである。また、格子ゲージ理論の量子シミュレーションにおいては、問題となっていた局所ゲージ対称性の構築と、その対称性を持つ原子系の提案、観測可能な動的な振る舞いについて詳細に調べることを目的とした。

## 3. 研究の方法

主に、計算機を用いた数値実験、モンテ・カルロシミュレーション、およびボース・アインシュタイン凝縮の動的挙動を記述する Gross・Pitaevskii 方程式の数値的解析による。

## 4. 研究成果

得られた研究成果を以下にまとめる。

- (1) ランダムな外部変数によって新たな秩序が得られる可能性をボソン t-J モデルを用いて調べた。
- (2) 物性理論に出現するゲージ理論に関する総合報告を依頼され、発表した。
- (3) Dipole を持つ原子が長距離相関をする性質を用いて、極低温原子系にて新たな量子相が出現する可能性を計算機実験にて検証した。
- (4) 格子ゲージ理論で重要な役割を果たすゲージ・ヒッグスモデルの量子シ

ミュレーション実現の可能性について検証し、極低温原子系で観測される現象について計算機実験を行った。

- (5) レーザー技術の進歩により複素数のホッピング振幅をもつ格子上的原子系が実現された。この進歩を受けて六角格子(ハミカム格子)上に実現されるボソン系の相構造と低エネルギー励起を調べた。

## 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)

- Quantum simulation of (1+1)-dimensional U(1) gauge-Higgs models on a lattice by cold Bose gases, Y.Kuno, S.Sakane, K.Kasamatsu, I.Ichinose, T.Matsui, Phys.Rev. D95,094507(2017)(査読あり)  
Phase diagrams of the extended Bose-Hubbard model in one dimension with the help of a stochastic-series expansion, K.Kawaki, Y.Kuno, I.Ichinose, Phys.Rev.B95,195101(2017) (査読あり)  
Bosonic analogs of fractional quantum Hall state in the vicinity of Mott states, Y.Kuno, K.Simizu, I.Ichinose, Phys.Rev.A95,013607(2017) (査読あり)  
Atomic quantum simulation of a three-dimensional U(1) gauge-Higgs model, Y.Kuno, S.Sakane, K.Kasamatsu, I.Ichinose, T.Matsui, Phys.Rev.A94,063641(2016) (査読あり)  
Phase diagram of dipolar hard-core bosons on honeycomb lattice, T.Nakafuji, T.Ito, Y.Nagamori, I.Ichinose, Phys.Rev.A94,023613(2016) (査読あり)  
Phase diagrams of Bose-Hubbard model and Haldane-Bose-Hubbard model with complex hopping amplitudes, Y.Kuno, T.Nakafuji, I.Ichinose, Phys.Rev.A92,063630(2015) (査読あり)  
Real time dynamics and proposal for feasible experiments of lattice gauge-Higgs model simulated by cold atoms, Y.Kuno, K.Kasamatsu, Y.Takahashi, I.Ichinose, T.Matsui, New J. Phys.17 (2015) 063005, (査読あり)  
Superfluidity and solid orders in two-component Bose gas with dipolar interactions in an optical lattice, Y.Kuno, K.Suzuki, I.Ichinose,

Phys.Rev.A90,063620(2014),  
(査読あり)  
Lattice gauge theory for condensed  
matter physics: Ferromagnetic  
superconductivity as its example,  
I.Ichinose, T.Matsui.  
Mod.Phys.Lett.B28,1430012(2014),  
(査読あり)

Random-field-induced order in bosonic  
t-J model, Y.Kuno, T.Mori, I.Ichinose.  
New J.Phys.16(2014)083030,  
(査読あり)

[学会発表](計 20 件)

清水啓太「ボーズ・ハバードモデルにお  
ける Cluster-Gutzwiller 近似法の応用」  
日本物理学会 2017年3月17日、大  
阪大学

久野義人「1次元光超格子中 Bose 粒子系  
におけるトポロジカルモット相の研究」  
日本物理学会 2017年3月17日、大  
阪大学

加藤良祐「2次元光格子微小磁場下 Bose  
凝縮体における熱ノイズに起因する量子  
渦とコルモゴロフ則」日本物理学会 20  
17年3月17日、大阪大学

榊原和彦「Slave-fermion 表示を用いた  
t-J モデルの局在・非局在転移の研究：  
2次元及び3次元モデルの比較」日本物  
理学会 2017年3月17日、大阪大学

清水啓太「Chern-Simons 理論からみる人  
工ゲージ場中における Bose-Hubbard モ  
デルの分数量子ホール状態と粒子 磁束  
結合状態」日本物理学会 2016年9月  
13日、金沢大学

長森裕也「Honeycomb 光格子中における  
Bose 粒子系の研究 I」日本物理学会 20  
16年9月13日、金沢大学

中藤敬「Honeycomb 光格子中における  
Bose 粒子系の研究 II」日本物理学会 20  
16年9月13日、金沢大学

久野義人「3次元拡張ボーズ・ハバード  
モデルとU(1)格子ゲージ・ヒッグス理論」  
日本物理学会 2016年9月13日、金  
沢大学

久野義人「冷却原子系に構築される  
U(1)gauge-Higgs モデルがもつ  
Schwinger mechanism と閉じ込め電束の  
実時間発展」日本物理学会 2016年9  
月23日、宮崎大学

河木啓真「Stochastic series expansion  
法を用いた Quantum Monte-Carlo シミュ  
レーションによる1次元スピン-XXZモデル  
と拡張 Bose-Hubbard モデルの研究」日  
本物理学会 2016年3月19日、東北  
学院大学

久野義人「1D 拡張 Bose-Hubbard モデル  
の格子ゲージ理論による解釈」日本物理  
学会 2016年3月19日、東北学院大  
学

中藤敬「Honeycomb 光格子中における  
hard-core Haldane-Hubbard model の研  
究」日本物理学会 2016年3月19日、  
東北学院大学

中藤敬「光格子人工磁場下における  
Bose-Hubbard model」日本物理学会、2  
015年9月16日、関西大学

久野義人「Honeycomb 光格子上の Haldane  
Bose Hubbard model の研究」日本物理学  
会、2015年9月16日、関西大学

久野義人「極低温原子系における格子ゲ  
ージ理論の量子シミュレーション」日本  
物理学会、2015年9月16日、関西  
大学

鈴木啓太「光格子上 dipole 相互作用する  
2成分 Bose 系の相構造」日本物理学会、  
2015年3月21日、早稲田大学

久野義人「冷却原子を用いた格子ゲージ  
理論の量子シミュレーション」日本物理  
学会、2015年3月21日、早稲田大  
学

稲生隼人「形状の異なる2つのポテンシ  
ャルにトラップされた極低温原子系の  
Ginzburg-Landau 理論による研究」日本  
物理学会、2014年9月8日、中部大  
学

森崇将「光格子上2成分 boson 系におけ  
るランダムラビ振動による新しい秩序 I」  
日本物理学会、2014年9月8日、中  
部大学

久野義人「光格子上2成分 boson 系にお  
けるランダムラビ振動による新しい秩序  
II」日本物理学会、2014年9月8日、  
中部大学

[その他]

ホームページ

t-Phys3.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・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 20159841

(3) 連携研究者

松居哲生 (MATSUI, Tetsuo)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号: 60257962

笠松健一 (KASAMATSU, Kenichi)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号: 70413763

榊原和彦 (SAKAKIBARA, Kazuhiko)  
奈良工業専門学校・一般教科・教授  
研究者番号 : 30270309