

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400371

研究課題名(和文) ゲージ場が創成する冷却原子気体の量子ダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Emergent quantum dynamics of cold atomic gases in synthetic gauge fields

研究代表者

笠松 健一 (KASAMATSU, Kenichi)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：70413763

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)：人工的に作られた磁場(ゲージ場)下における冷却原子気体で実現する量子相 および非平衡ダイナミクスを弱相関および強相関の両方の視点から理論的に研究をおこなった。スピン軌道相互作用をもつ2成分ボース凝縮体に存在する量子渦が示す運動を理論的に調べ、スピン軌道相互作用の強さの違いで実現する凝縮相において非自明な渦の運動が生じることを予言した。また、冷却原子を用いた格子ゲージ理論、特にゲージヒッグス模型の量子シミュレーションに関して、1次元、2次元、3次元の光格子系で実装の提案と実現する相構造、観測される非平衡ダイナミクスを実験的実現性を重視して包括的に調べ上げた。

研究成果の概要(英文)：We study theoretically nonequilibrium dynamics of cold atomic gases in artificial magnetic field, refereed to as synthetic gauge field in a view from weakly- to strongly-interacting regime. We study the vortex dynamics in spin-orbit coupled two-component Bose-Einstein condensates, clarifying the nontrivial dynamical behavior depending on the condensed phase for different strength of the spin-orbit coupling. We also study the atomic quantum simulations of lattice gauge theory, especially gauge-Higgs model, in one-, two-, and three dimensional optical lattice. We discuss the implementation, phase structure, and observable non equilibrium dynamics thoroughly, paying much attention to the experimental observation.

研究分野：数物系科学

キーワード：冷却原子 ボースアインシュタイン凝縮 量子シミュレーション 超流動 光格子

1. 研究開始当初の背景

冷却原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)は1995年の実現以来、莫大な研究がなされており、物理学における一大分野を築き上げた。冷却原子気体の特徴としては以下が挙げられる。(i)系の温度がナノケルビンのオーダーの極低温であるために熱的擾乱がほとんどない。(ii)外場によってトラップされているために不純物が存在しない。(iii)量子エレクトロニクス技術を用いて、量子凝縮状態を特徴づけるほぼ全てのパラメータを自由自在に制御することができる。(iv)原子の挙動を直接可視化できる。これらの特徴より、技術的困難から不可能と考えられていた量子現象に関する様々な思考実験を実際に検証する事が可能となった。また、上記の特徴を生かして、古典的計算機では計算が困難な量子多体問題を、優れたパラメータ制御下にある冷却原子系で実験的に実現して「量子シミュレーション」を行う格好の系として注目を集め始めていた。

冷却原子気体 BEC の超流動性に関する研究はその実現から約 10 年で徹底的に調べられ、その基本的な物理はほぼ理解されている状況である。一方で、2009 年実現した中性原子に対する「人工ゲージ場 (synthetic gauge field)」は超流動を含む巨視的量子現象の物理に新しい展開をもたらした。中性原子は電荷を持たないために、(普通の)磁場を作用させても電子のようにサイクロトロン運動はしない。従って、強磁場下の電子が示す様々な現象 (量子ホール効果等) を中性原子系で実現する事は困難であった。2009 年に NIST の Spielman 等のグループが原子の内部状態を結合するラマン過程と空間勾配をもつ磁場を原子集団に作用させる事で、原子系のハミルトニアンに実効的なベクトルポテンシャル項を作り出す事に成功した。彼らのスキームの特徴は、内部状態を結合するレーザーの離調を調節する事により、実効的なベクトルポテンシャル (ゲージ場) の性質を可換から非可換に変換できる点にある。非可換ゲージ場はスピン軌道相互作用と解釈でき、スピン軌道相互作用を持つボース系という、全く新しい量子凝縮系が実現した。

2. 研究の目的

本研究では、人工ゲージ場がある冷却原子系および BEC を想定し、超流動体における新しい量子流体力学の構築、および原子気体を用いたエキゾチック量子相を検証する量子シミュレーションの提案を行う。特に、スピン軌道相互作用を与える非可換ゲージ場下におけるボソン系の相構造および非平衡ダイナミクスを理論的・数値的に解明する。粒子間の相互作用の強さはフェシュバック共鳴と呼ばれる原子間の散乱長を変える技

術や光格子のポテンシャルの高さで制御すると考え、弱い相互作用をもつ BEC 状態から強相関領域にあるボース原子気体までを念頭において研究を進める。明らかにする具体的内容を以下に記す。

(1) スピン軌道結合 BEC における量子流体力学

スピン軌道結合 BEC は 2011 年に実験的に実現した。主な特徴としては、スピン軌道相互作用の効果によって 1 粒子エネルギー分散の最小が有限の波数で起こるため、原子間相互作用の存在を考慮すると凝縮状態の性質が全く非自明であることである。基底状態の性質は最近の研究で活発に議論されているが、本研究ではこの系の動的な量子流体力学的不安定性を議論し、原子間相互作用やスピン軌道相互作用の強さの依存性から、新しい超流動現象を開拓する。

(2) 可換および非可換ゲージ場中の格子ボソンの非平衡ダイナミクス、および格子ゲージ理論の量子シミュレーションの提案

ゲージ場下の光格子中のボソンの振る舞いは、サイト間ホッピングに位相因子のついたボース・ハバード模型で記述される。この模型の基底状態の構造や励起状態は数多くの研究によって明らかになっているが、例えば人工磁場の強さのようなパラメータをクエンチすることによる非平衡ダイナミクスに関しての報告例は少ない。量子相転移のダイナミクスはゲージ場の強さに敏感に依存すると考えられ、実験での実時間観測の可能性を強く念頭において解析する。

また、この研究課題を申請する前に我々は $U(1)$ ゲージ・ヒッグス模型模型と呼ばれる格子ゲージ理論で重要な模型を、冷却原子系を用いて量子シミュレーションを行う提案を行った。本研究では、その量子シミュレーションの実装に関して実験的実現を踏まえて具体的に議論し、観測されうる相構造と実時間ダイナミクスを予言することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) スピン軌道相互作用をもつ BEC のダイナミクスは凝縮体の軌道 (運動量) とスピン自由度が結合した項を含むグロス・ピタエフスキー方程式で記述される。流体現象および非線形ダイナミクスに関しては、グロス・ピタエフスキー方程式の数値解析を中心に計算を行う。2 次元超流体に存在する量子渦の運動は解析的に渦点模型で記述される。数値的な結果と解析結果との比較を行い、流体や渦の運動を理論的に理解する。

(2) 光格子中のボソン系の運動に対する解析として、最も簡単なものとしては各サイトのボソンが凝縮状態にあり、系全体が位相コヒ

ーレンスを有している超流動状態の場合、各サイトの巨視的波動関数が従う離散的グロス・ピタエフスキー方程式がある。一方、オンサイトの相互作用が相対的に強くなると、強相関効果によりモット相へ転移するが、この領域も記述する平均場的記述としてグッツヴィラー近似が知られている。このグッツヴィラー近似を時間依存する問題へ適応する事も様々な状況で考えられている。格子ボソン系の問題ではグロス・ピタエフスキー方程式と動的グッツヴィラー近似の両方を用いて系の時間発展を考える。

4. 研究成果

上記の目的に沿って研究を進めていき、得られた研究成果は以下のとおりである。

(1) 2成分 BEC における半整数量子渦ペアの相互作用と実時間発展

以前の我々の研究 [Phys. Rev. A vol. 83, 063603 (2011)] では、2成分の BEC に存在する2つの半整数量子渦の間にはたらく相互作用の漸近形を導出した。本研究ではこの相互作用の下で、2つの渦がどのような実時間発展を行うのかを2次元グロス・ピタエフスキー方程式の数値解析により調べ、異成分間相互作用の性質および渦の循環の方向に依存して非自明な振る舞いをするを明らかにした。leading order の寄与を取り込んだ渦点モデルから導出される運動方程式の解析は数値計算結果を十分に説明できず、何らかの sub-leading の寄与を取り込んだ理論構築を行うことが今後の課題である。

(2) レーザーで誘起されたスピン軌道相互作用をもつ BEC における量子渦のダイナミクス

NIST の実験グループで実現しているスピン軌道相互作用をもつ BEC に1本の量子渦がある場合の動力学を理論的に調べた。この系ではスピン軌道相互作用の強さに依存して3つの安定な相が実現するが、それぞれの相で渦は特徴的な構造およびダイナミクスを示すことを明らかにした。

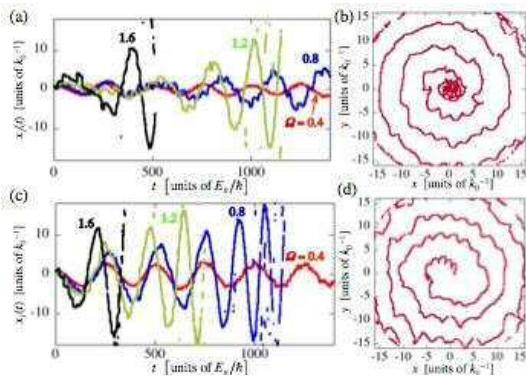


図1: スピン軌道相互作用をもつ BEC の平面波相で実現する、量子渦の異方的な運動。

(3) 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の実装と実時間発展

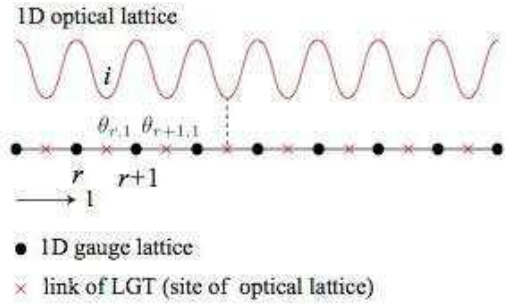


図2: 1次元光格子で格子ゲージ理論の量子シミュレーターを実現するための配置。

光格子中の原子気体を用いた U(1) ゲージ・ヒッグス模型の量子シミュレーターの提案およびその実装に関して、具体的な実験的提案を含めた詳細な解析を行った。原子系が格子ゲージ理論のシミュレーターとして機能するためには、局所ゲージ対称性を保ち、電場に対応する密度ゆらぎの拘束条件としてガウス則を満たす必要があるため、系のパラメータに強い制約がかかる。その制約を満たすためには原子系の巧妙なデザインやセッティングが必要となる。まず、2次元光格子系において、我々は現状の実験技術を踏まえ、実現可能な2つのモデルを提案した。1つは光格子の励起バンドに凝縮した原子を利用する方法、もう一つは3層の2次元光格子系を用意し、層間の長距離原子間相互作用を媒介として層内の原子間相互作用をチューニングする方法である。3次元光格子系に関しては、体心正方格子構造をもつ光格子ポテンシャルを準備することで、原子のボース凝縮体をリンク変数に持つゲージ格子を準備できること示し、格子のサイトに補助的なヒッグス場を導入することで、ゲージ不変な格子ゲージ模型を原子系にマッピングできることを示した。

次に実験での観測の指標として、原子系の量子シミュレーターの相構造と実時間発展をボース・ハバード模型に基づいて調べた。モンテカルロ法により相図を計算し、2次元と3次元系の場合は、ヒッグス相と閉じ込め相と呼ばれる相が安定となるパラメータ領域が存在することを明らかにした。これにより、原子系の適切な操作を行って、興味あるパラメータ領域に系を制御できれば、ゲージ・ヒッグス模型の相転移を研究する量子シミュレーションが可能であることが結論される。より実験的に容易に量子シミュレーションが実現できる系として、1次元系が考えられる。この場合、ヒッグス相と閉じ込め相の間の相転移の相転移で特徴付けられることを明らかにし、転移点となるパラメータを同定した。

実時間発展として、まずは平均場近似で得られるグロス・ピタエフスキー方程式を用いて解析を行った。初期状態として用意した電束が閉じ込め相では動的に安定となり、ヒッグス相では不安定であることが示され、相の動的な特徴を平均場の枠内でも捉えることができる事を示した。1次元系では量子揺らぎが重要となるが、量子揺らぎ補正を含んだ切断 Wigner 法により解析し、ここでもヒッグス相と閉じ込め相で顕著な違いが生じることを示した。

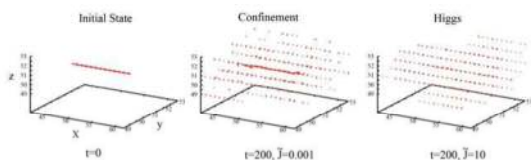


図3: 3次元モデルにおける、閉じ込め相とヒッグス相における電束密度の運動の違い。

(4) 中性原子を用いた量子コンピューターの実装

以前の研究[J. Phys. Soc. Jpn. vol. 80 114003(2011)]で周期的な光トラップ中の中性原子を用いたオンデマンド選択2量子ビットの実装に関する提案を行ったが、その実験的実現にはいくつかの課題が残っている。本研究では隣接サイト間の原子にしか操作が機能しないが、より現実的な2量子ビットの実装を提案した。ゲートの操作時間の評価をして現在の実験の範囲内に収まる事を明らかにした。

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 7 件)

- ① H. Takeuchi, M. Kobayashi, K. Kasamatsu,
Is a Doubly Quantized Vortex Dynamically Unstable in Uniform Superfluids?
Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, vol. 87, 023601(5 pages) (2018)
DOI:10.7566/JPSJ.87.023601
- ② Y. Kuno, S. Sakane, K. Kasamatsu, I. Ichinose, T. Matsui
Quantum simulation of (1 + 1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model on a lattice by cold Bose gases
Physical Review D, 査読有, vol. 95, 094507 (16 pages) (2017)
DOI:10.1103/PhysRevD.95.094507
- ③ Y. Kuno, S. Sakane, K. Kasamatsu, I. Ichinose, T. Matsui
Atomic quantum simulation of a three-dimensional U(1) gauge-Higgs

model,

Physical Review A, 査読有, vol. 94, 063641 (22 pages) (2016)

DOI:10.1103/PhysRevA.94.063641

- ④ K. Kasamatsu, M. Eto, M. Nitta,
Short range inter-vortex interaction and interacting dynamics of half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates
Physical Review A, 査読有, vol. 93, 013615 (16 pages) (2016)
DOI:10.1103/PhysRevA.93.013615

- ⑤ K. Kasamatsu,
Dynamics of quantized vortices in Bose-Einstein condensates with laser-induced spin-orbit coupling
Physical Review A, 査読有, vol. 92, 063608 (8 pages) (2015)
DOI: 10.1103/PhysRevA.92.063608

- ⑥ Y. Kuno, K. Kasamatsu, Y. Takahashi, I. Ichinose, T. Matsui
Real time dynamics and proposal for feasible experiments of lattice gauge-Higgs model simulated by cold atoms,
New Journal of Physics, 査読有, vol. 17, 063005(16 pages) (2015)
DOI:10.1088/1367-2630/17/6/063005

- ⑦ E. Hosseini Lapasar, K. Kasamatsu, S. N. Chormaic, T. Takui, Y. Kondo, M. Nakahara, T. Ohmi,
Two-Qubit Gate Operation on Selected Nearest-Neighbor Neutral Atom Qubits,
Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, vol. 83, 044005(7 pages) (2014)

[学会発表] (計 18 件)

- ① 笠松健一、大見哲巨、中原幹夫
有限磁場下における超流動 3He-B 相の渦芯構造と相図
日本物理学会 第 73 回年次大会 東京理科大学 2018 年 3 月
- ② H. Takeuchi, M. Kobayashi, K. Kasamatsu,
Splitting instability of a doubly quantized vortex in homogeneous superfluids
APS March Meeting 2018 Los Angeles 2018 年 3 月
- ③ K. Kasamatsu,
Dynamics of half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates
28th International Conference on Low Temperature Physics Gothenburg 2017 年 8 月

- ④ K. Kasamatsu,
Vortex dynamics in Bose-Einstein condensates with laser-induced spin-orbit coupling
APS March Meeting 2017 New Orleans
2017年3月
- ⑤ 笠松健一, L. Barbiero, C. Menotti, A. Recati, L. Santos,
光格子中の極性ハードコアボソンにおける異常分散と擬多体局在
日本物理学会 2016 年秋季大会 金沢大学 2016年9月
- ⑥ 笠松健一, 衛藤稔, 新田宗土
2成分ボース凝縮体における半整数量子渦ペアの実時間発展
日本物理学会 2016 年秋季大会 金沢大学 2016年9月
- ⑦ K. Kasamatsu, R. Mizuno, U. Gungordu, T. Ohmi, M. Nakahara
Effects of a magnetic field on vortex states in superfluid $^3\text{He-B}$
International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2016 Prague 2016年8月
- ⑧ K. Kasamatsu, Y. Kuno, S. Sakane, I. Ichinose, T. Matsui
Atomic quantum simulation of a three-dimensional $U(1)$ gauge-Higgs model
The 25th International Conference on Atomic Physics ICAP 2016 Seul 2016年7月
- ⑨ K. Kasamatsu, M. Eto, M. Nitta
Interacting dynamics of half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates
The 25th International Conference on Atomic Physics ICAP 2016 Seul 2016年7月
- ⑩ 久野義人、河木啓真、笠松健一、一瀬郁夫、松居哲生
1D拡張Bose-Hubbardモデルの格子ゲージ理論による解釈： $U(1)$ 格子gauge-Higgsモデルとの相構造対応
日本物理学会 第71回年次大会 東北学院大学 2016年3月
- ⑪ 久野義人、笠松健一、高橋義朗、一瀬郁夫、松居哲生
極低温原子系を用いた $U(1)$ gauge-Higgs model の研究：閉じ込め flux の実時間ダイナミクスの計測
日本物理学会 2015 年秋季大会 関西大学 2015年9月
- ⑫ 久野義人、笠松健一、坂根真矢、一瀬郁夫、松居哲生
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： $(3+1)D$ $U(1)$ gauge-Higgs model の構築とその相構造
日本物理学会 2015 年秋季大会 関西大学 2015年9月
- ⑬ K. Kasamatsu
Cold atom simulation of $U(1)$ lattice gauge-Higgs model
Cold Atoms Meet High Energy Physics, European centre for theoretical studies in nuclear physics and related areas Trento 2015年6月
- ⑭ 久野義人、笠松健一、高橋義朗、一瀬郁夫、松居哲生
冷却原子系を用いた量子シミュレーション： $U(1)$ gauge-Higgs model における閉じ込め相、Higg相のダイナミクス
日本物理学会 第70回年次大会 早稲田大学 2015年3月
- ⑮ K. Kasamatsu, Y. Kuno, Y. Takahashi, I. Ichinose, and T. Matsui
Cold-atom quantum simulation of $U(1)$ lattice gauge-Higgs model
APS March Meeting 2015 San Antonio 2015年3月
- ⑯ 笠松健一
原子気体 BEC における量子渦の動力学
日本物理学会 2014 年秋季大会 中部大学 2014年9月
- ⑰ 久野義人、笠松健一、一瀬郁夫、松居哲生
冷却原子系を用いた量子シミュレーション： $U(1)$ gauge-Higgs model の Gross-Pitaevskii 方程式による研究
日本物理学会 2014 年秋季大会 中部大学 2014年9月
- ⑱ K. Kasamatsu, Y. Kuno, I. Ichinose, T. Matsui
Implementation, phase structure and real time dynamics in atomic quantum simulators of lattice Gauge-Higgs theory
The 24rd International Conference on Atomic Physics ICAP 2014 Washington 2014年8月

[図書] (計 1 件)

- ① 坪田 誠、笠松 健一、小林 未知数、竹内 宏光
丸善出版、量子流体力学、2018年1月、352頁
ISBN: 978-4-621-30247-7

[その他]

ホームページ等
<http://qube.phys.kindai.ac.jp/users/kenichi/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠松 健一 (KASAMATSU Kenichi)
近畿大学・理工学部・准教授
研究者番号: 70413763

