

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 5 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21740267

研究課題名（和文）フラストレーションを持つ光格子中のボース原子気体の新奇量子相の解明

研究課題名（英文）Revealing novel quantum phases in Bosons in an optical lattice with frustration

研究代表者

笠松 健一（KASAMATSU KENICHI）

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：70413763

研究成果の概要（和文）：光格子ポテンシャルに捕獲された極低温における中性原子気体の系において光格子の回転やフラストレーションによりもたらされる新たな量子相の発見とその動的な現象に関して研究を進めた。回転する光格子中のボースアインシュタイン凝縮体における量子渦に形成に関してオックスフォード大学の実験結果を理論的に解析した。また有限温度における光格子中のボース原子気体の相構造を、フラストレーションをもつ拡張された XY モデルを用いて解析した。

研究成果の概要（英文）：We study emergence of novel quantum phases and their dynamical properties in ultracold gases of atoms in an optical lattice with rotation or frustration. We consider the vortex formation of a Bose-Einstein condensates in an optical lattice and analyze the relevant experimental results done by a group of Oxford university. We also study phase structures of bosons in an optical lattice using the generalized frustrated XY model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：ボースアインシュタイン凝縮，超流動，冷却原子，量子渦，光格子

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮は 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。ボース・アインシュタイン凝縮とは、巨視的な数のボース粒子の集団が、ある温度以下で最低エネルギー量子状態に落ち込む現象である。結果、個々の粒子のド・ブロイ波の位相が大域的にそろい、粒子系全体が巨大

な波として振る舞うマクロな量子系が実現する。原子気体のボースアインシュタイン凝縮体の優れた特徴としては、系の温度は約 1 ナノケルビン程度と超低温であるために熱的拡散がほとんどない、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、量子エレクトロニクスの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、凝縮体の挙動を

直接可視化できる、等が挙げられる。したがって、これまで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検証する事が可能となった。

(2) 複雑な相互作用が支配する固体物理のモデルハミルトニアンをそのモデルで記述される系を人工的に構築してシミュレートする研究は「量子シミュレーション」と呼ばれている。2001年に「光格子」と呼ばれるレーザーで作られた周期ポテンシャル中の冷却原子を用いて、光格子の振幅を変化させる事によって超流動-モット絶縁体転移が観測された。この現象は絶対零度でも起こり、原子間の相互作用が本質的な役割を担う量子相転移現象であり、現代の物性物理学において活発に議論されている強相関係物理学の代表例である。この2001年の実験的発見を皮切りに、冷却原子系は量子シミュレーターとして最も汎用な系と考えられている。超低温かつ不純物のないスーパークリーンな系であるため、そこで実現している「人工物質」の挙動は対象となるモデルハミルトニアンの挙動がそのまま実現しているといっても過言ではない。この系を用いた基礎研究は物性物理学の更なる理解と発展につながるものである。

2. 研究の目的

本研究課題では、光格子で作られた周期ポテンシャル中の原子ボース気体、およびボース・アインシュタイン凝縮体で実現する新しい量子相の発現機構、動的性質、およびその制御性を理論的に解明する事である。光格子中の原子気体はこれまで膨大な研究がなされているが、本研究では光格子の極小に局在しているボース気体およびボース凝縮体間の結合にフラストレーションが生じている状態を考える。フラストレーションは多彩な物性を引き起こすが、冷却原子を用いてそのような物理を研究し、統計物理学、および物性分野に新たな方向性を示す事を目的とする。

2006年にアメリカコロラド大学・宇宙物理学総合研究所のグループが回転する2次元光格子ポテンシャルを実験的に実現し、そこにトラップされたボース凝縮体における量子渦のピンニング効果が実験的に観測された。この光格子の振幅が非常に大きな状況では、ボース凝縮体はポテンシャルの各極小に局在し、複数の局在した凝縮体が弱く結合したジョセフソン接合列が実現する。2007年に同グループがそのような2次元ジョセフソン接合列を実現し、2次元系特有の渦対の解離に伴った熱的相転移（コストリッツ・サウレス転移）の兆候が直接的に観測された。また、空間的に変調されたレーザー光を原子の内部状態と結合させて、原子の状態に幾何学的位相をプ

リントする事により、中性原子に対する「合成磁場」を印可することにアメリカ国立標準技術研究所のグループが成功した。ここで中性原子に対する回転の効果は、電荷に対して一様磁場が印可されている状況と類似している。

上記に示した効果の融合、すなわち「回転する（一様磁場下の）ジョセフソン接合列」を考えるとさらに多彩な物理現象が期待される。この系の振る舞いは一様なフラストレーションをもつXY模型で記述される。フラストレーションは光格子の単位胞あたりの磁束（渦）数で特徴づけられ、サイト間結合に非一様性をもたらす。この模型を用いて、フラストレーションのために生じる多彩な基底状態の構造や相転移の特性がこれまで数多くの研究により議論されている。

申請者はこれらのフラストレーション系の物理が原子気体を用いて研究できる可能性に注目をした。本課題の申請期間中に、回転光格子中のボース気体およびボース凝縮体で実現する多彩な新奇量子相を理論的・数值的に解明を行なう。その詳細は以下のようなものである。

(1) 光格子中の極低温のボース気体の振る舞いは、各サイトあたりの平均粒子数が小さい時にはボース・ハバード模型で記述される。一方、平均粒子数が大きいときには各サイトをボース凝縮体が占有し、サイト間のジョセフソン結合によってネットワークを組んだジョセフソン接合列となり、有効ハミルトニアンはXY模型となる。前述のように2次元光格子の回転によって、フラストレーションを持つジョセフソン接合列が実現するので、回転光格子中の冷却原子系を用いてそれらの物理を検証することが可能であることを示唆する。まず、冷却原子ボース凝縮体の回転ジョセフソン接合列で実現する多彩な基底状態の構造や相転移の詳細を理論的に明らかにする。この系の特徴は各サイトの粒子数が揺らぐ効果やトラップポテンシャルによる有限サイズ効果が現れることであり、それによってもたらされる新しい知見を獲得し、統計物理学の深い理解と発展へつなげることを目的とする。

(2) 一方で各サイトの平均粒子数が小さい強相関係領域の場合、系の振る舞いは回転系におけるボース・ハバード模型で記述される。いくつかのグループが平均場理論で量子相を求めているが、その全貌は明らかになっていない。とくに注目すべき点はこの系で実現する量子ホール状態である。これまでBECを高速回転させて量子ホール状態を実現させる提唱がなされていたが、遠心力による凝縮体の膨張という実験的困難のため、議論は停滞していた。しかしながら、光格子系ではポテン

シャルを回転することなしに「人工磁場」の効果原子にもたらすことが可能であり、現在冷却原子系を用いて量子ホール状態を実現する最有力候補として挙げられている。この系は占有率を幅広い領域で調整できるという利点があり、固体の電子系では困難であった「Hofstadterの蝶」として知られるエネルギースペクトルや、占有率 $5/2$ の分数量子ホール状態でおこる非アベール統計エニオン準粒子の観測など興味深い話題が数多く持ち出される。この強相関多体系の領域に踏み込んで新奇量子相の全貌を明らかにし、量子現象を利用した新たな応用の可能性を提唱することを目的とする。

3. 研究の方法

研究課題を達成するために、以下のような方法に基づいて実行した。取り組むべきテーマとしては、おおまかにジョセフソン接合列の古典的問題と強相関領域の2テーマに分けられる。すでに取り組んでいる古典系に関してまず研究を進め、その後に相互作用の効果が本質である強相関系の問題を着手した。また本課題の研究期間中にイギリスのオックスフォード大学のグループがボース凝縮体を用いた回転するジョセフソン接合列を実験的に成功させた。この実験に関していくつか理論的説明が必要な議論が存在するため、その解析も行った。

(1) 「回転するボース凝縮体のジョセフソン接合列における量子渦状態の構造」

オックスフォード大学のグループは振幅の大きな光格子を準備し、そこにボース凝縮体をロードすることでジョセフソン接合列を実現した。この系を回転させると、以下のような特徴が見いだされた。

①光格子がないときに理論的に知られているに渦の臨界回転振動数よりも小さい振動数で渦ができ始め、安定化した。

②回転振動数に対する系に入る渦の本数の依存性が通常知られている規則とは異なる非自明な振る舞いを示した。

この系の振る舞いはボース凝縮体が従う平均場理論であるグロスピタエフスキー模型によって良く記述されることが知られており、この方程式の数値シミュレーションによって実験で見られた観測結果を解析する。

(2) 「有限温度における拡張されたフラストレーションをもつXY模型の相転移」

次に回転がある場合のボソンジョセフソン接合列の有限温度の効果調べる。先行研究では一様系のフラストレーションを持つXY模型はフラストレーションパラメータ f (単位胞あたりの磁束数) の値によってエキジチックな相転移がおこる。例えば $f = 1/2$ の時

には連続的U(1)対称性の破れに伴うコスタリッツサウレス的な渦対の乖離を伴う相転移と離散的 Z_2 対称性の破れに伴うイジング的な相転移が競合する。また、それ以外の f の場合の相転移の全貌はまだ未解明の問題である。XY模型では各サイトの位相の自由度のみを考えるが、冷却原子の系では各サイトの粒子数も変化する。今回はボース粒子として剛体球モデルを採用し、高温極限を考えることで古典的な問題へとマップすることで、モンテカルロシミュレーションを系統的に行い、粒子数揺らぎの効果が上記の相転移の性質にどのように影響を及ぼすのかを調べた。

4. 研究成果

本研究で明らかになった事は以下の通りである。

(1) オックスフォード大学の実験の状況において量子渦形成のメカニズムと複数の量子渦の構造を数値シミュレーションにより明らかにし、実験結果と詳細な比較検討を行った。光格子の影響により渦の形成のダイナミクスは、光格子がない場合の表面波励起を介した形成とは異なることを発見した(図1)。これにより、渦の臨界回転振動数が結果、実験で観測された平衡状態の渦数の回転振動数依存性は、光格子を作るレーザービーム強度のガウス分布が大きな影響を与えている事が明らかになった。

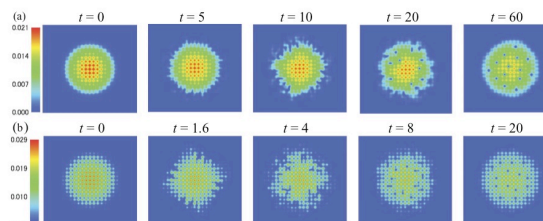


図1：回転光格子中のボース凝縮体における渦形成のプロセス

(2) 有効磁場中の光格子ポテンシャルに閉じ込められたハードコアボソンの基底状態の相図を粒子数の揺らぎの効果まで取り入れた拡張XY模型のモンテカルロシミュレーションにより調べた。有限温度の相転移の性質は、転移温度は自由度の増加により減少するものの、そのユニバーサリティクラスを含めて通常のXY模型の性質に従う事を明らかにした。従って、冷却原子系はフラストレーションしたXY模型のシミュレーターとして汎用性がある事を示した。

(3) ナノテクノロジーの発展を鑑み、シリコン基盤にあけた光の波長程度の穴を通して漏れるフレネル回折光を用いて、個別の原子をトラップし、そのトラップと1次元光格子を併用することにより、任意の2つの原子間に

2量子ビット・ゲートを作用させることが可能であることを提案し、数値計算でゲートの動作時間と忠実度を求めた(図2)。

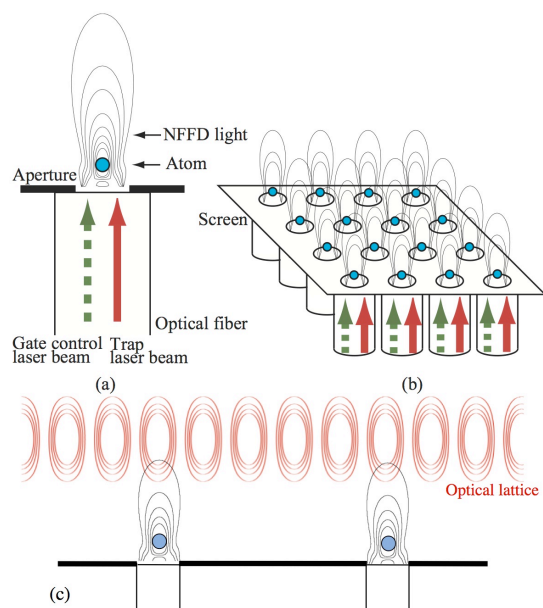


図2：近接光トラップと光格子を用いた原子の量子ゲートの実装の提案

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14件)

- ① H. Takeuchi, K. Kasamatsu, M. Tsubota, M. Nitta, Tachyon condensation due to domain-wall annihilation in Bose-Einstein condensates, *Physical Review Letters*, vol. 109, 245301 (1-5) (2012) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevLett.109.245301
- ② M. Nitta, K. Kasamatsu, M. Tsubota, and H. Takeuchi, Creating vortons and three-dimensional skyrmions from domain wall annihilation with stretched vortices in Bose-Einstein condensates, *Physical Review A*, vol. 85, 053639 (1-11) (2012) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.85.053639
- ③ Y. Nakano, K. Kasamatsu, T. Matsui, Finite temperature phase structure of hard-core bosons in an optical lattice with an effective magnetic field, *Physical Review A*, vol. 85, 023622 (1-11) (2012) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.85.023622
- ④ A. Kato, Y. Nakano, K. Kasamatsu, T. Matsui, Vortex formation of a Bose-Einstein condensate in a

rotating deep optical lattice, *Physical Review A*, vol. 84, 053623 (1-6) (2011) 査読有

DOI:10.1103/PhysRevA.84.053623

- ⑤ E. H. Lapasar, K. Kasamatsu, Y. Kondo, M. Nakahara, T. Ohmi, Scalable Neutral Atom Quantum Computer with Interaction on Demand: Proposal for Selective Application of Two-Qubit Gate, *Journal of Physical Society of Japan*, vol. 80, 114003 (1-10) (2011) 査読有

DOI: 10.1143/JPSJ.80.114003

- ⑥ M. Eto, K. Kasamatsu, M. Nitta, H. Takeuchi, M. Tsubota, Interaction of half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates, *Physical Review A*, vol. 83, 063603 (1-8) (2011) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.83.063603

- ⑦ J. A. Seman, K. Kasamatsu (10番目), 他9名 Route to turbulence in a trapped Bose-Einstein condensate, *Laser Physics Letters*, vol. 8, 691-696 (2011) 査読有

DOI:10.1002/lapl.201110052

- ⑧ N. Suzuki, H. Takeuchi, K. Kasamatsu, M. Tsubota and H. Saito, Crossover between Kelvin-Helmholtz and counter-superflow instabilities in two-component Bose-Einstein condensates, *Physical Review A*, vol. 82, 063604 (1-9) (2010) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.82.063604

- ⑨ K. Kasamatsu, H. Takeuchi, M. Nitta, and M. Tsubota, Analogues of D-branes in Bose-Einstein condensates, *Journal of High Energy Physics* vol. 11, 068 (1-11) (2010) 査読有
DOI:10.1007/JHEP11(2010)068

- ⑩ H. Takeuchi, N. Suzuki, K. Kasamatsu, H. Saito, M. Tsubota, Quantum Kelvin-Helmholtz instability in phase-separated two-component Bose-Einstein condensates, *Physical Review B*, vol. 81, 094517 (1-5) (2010) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevA.82.063604

[学会発表] (計43件)

- ① 笠松健一, 一瀬郁夫, 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 第68回年次大会 2013年3月29日 広島大学
- ② 笠松健一, 中野勇氣, 松居哲生, 有効

磁場下における光格子中のハードコアボソン系の相構造 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年 3 月 26 日 関西学院大学

- ③ K. Kasamatsu, Y. Nakano, and T. Matsui, Finite temperature phase structures of hard-core bosons in an optical lattice with a synthetic magnetic field, MAR12 Meeting of The American Physical Society, 2012 年 2 月 29 日 ポストン アメリカ合衆国
- ④ K. Kasamatsu, A. Kato, Y. Nakano, and T. Matsui, Dynamical properties of bosons in an optical lattice with a synthetic magnetic field, 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011 年 8 月 12 日、北京、中国
- ⑤ 中野勇氣, 加藤昌, 笠松健一, 松居哲生, 有効磁場下における光格子中のハードコアボソン系のダイナミクス, 日本物理学会 第 66 回年次大会 2011 年 3 月 26 日 新潟大学
- ⑥ 加藤昌, 中野勇氣, 笠松健一, 松居哲生, 深い 2 次元光格子中のボース凝縮体における渦形成, 日本物理学会 第 66 回年次大会 2011 年 3 月 26 日 新潟大学
- ⑦ E. H. Lapasar, K. Kasamatsu, Y. Kondo, M. Nakahara, T. Ohmi, Selective Application of Two-Qubit Gate in Neutral Atom Quantum Computer, 日本物理学会 第 66 回年次大会 2011 年 3 月 27 日 新潟大学
- ⑧ M. Nakahara, E. H. Lapasar, K. Kasamatsu, T. Ohmi, Y. Kondo, Scalable Neutral Atom Quantum Computer with Interaction on Demand, MAR11 Meeting of The American Physical Society, 2011 年 3 月 27 日 ダラス アメリカ合衆国
- ⑨ 中野勇氣, 笠松健一, 松居哲生, 有効磁場下における光格子中のハードコアボソン系の相図, 日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 26 日 大阪府立大学
- ⑩ 中野勇氣, 笠松健一, 松居哲生, 有効磁場中の光格子ハードコアボソン系の相構造, 日本物理学会 第 65 回年次大会 2010 年 9 月 22 日 岡山大学

[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・講師

研究者番号 : 70413763