

令和 4 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01854

研究課題名(和文)カゴメ格子量子気体顕微鏡による量子スピン液体の研究

研究課題名(英文) Kagome-lattice quantum gas microscope for study of quantum spin liquids

研究代表者

福原 武 (Fukuhara, Takeshi)

国立研究開発法人理化学研究所・量子コンピュータ研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：30742431

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：カゴメ格子の基本的な構造となる三角格子において、極低温原子気体を単一格子・単一原子レベルで測定することに世界で初めて成功した。また、量子気体(ボース・アインシュタイン凝縮体)を生成し、三角光格子に導入することで超流動-モット絶縁体の量子相転移の観測にも成功した。その際に、トラップ中での飛行時間測定法を行うことで、量子気体顕微鏡を用いた運動量分布の測定が可能であることも実証できた。更に、光格子の位相を変調することで格子間トンネリングの符号を反転させるフロケ制御も実装した。負のトンネリングは反強磁性結合となるので、これによりフラストレートした量子スピン系の研究を行う準備ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質の性能を向上させたり、これまでにない機能を持った物質などを開発したりするには、固体物質という量子多体系を理解することが不可欠である。これに対して、制御性に優れた別の量子多体実験を用いて、固体物質を実験的に理解しようとする量子シミュレーションが注目を集めている。本研究は、冷却原子実験系を用いて、フラストレート磁性体の量子シミュレーションを行い、量子スピン液体などの新奇な状態の解明を目指すものである。フラストレート磁性体研究の舞台となるフラストレートした量子スピン系の準備が整い、量子シミュレーションの実現に向けて大きく前進した。

研究成果の概要(英文)：In a triangular lattice, which is the basic structure of a Kagome lattice, we succeeded for the first time in the world in observing ultracold atoms at the single-site and single-atom level. By loading a quantum gas (a Bose-Einstein condensate) into the triangular optical lattice, we have successfully observed the quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator. In this measurement, we demonstrated that the momentum distribution is accessible by a quantum gas microscope by performing time-of-flight measurements in a trap. Furthermore, we implemented a Floquet control that inverts the sign of the tunneling between lattice sites by modulating the phase of the optical lattice. The negative tunneling works as an antiferromagnetic coupling, and therefore we can now study frustrated quantum spin systems.

研究分野：冷却原子

キーワード：光格子 量子気体顕微鏡 フラストレートスピン系 ラマンサイドバンド冷却 機械学習 フロケ制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

隣り合うスピン間に反強磁性相互作用が働いている（隣にあるスピンが反平行に向くとエネルギーが最小となる）状況を考える。この時、三角格子やカゴメ格子のような幾何学的フラストレーションを有する格子構造においては、全ての隣り合うスピンを反平行にするスピン配置を取ることができず、磁気秩序の形成が抑制される。このようなフラストレートしたスピン系においては、秩序状態の抑制により通常では現れることのない状態や現象が顔を出し、新たな機能的物質の開発へとつながることが期待されている。

しかしながら、フラストレート量子スピン系の研究はいくつもの困難が立ちはだかっている。まず、理論的な計算においては負符号問題という大きな壁が存在し、その理解が限定的である。そして、実験研究においても、格子の歪みや欠陥、複雑な相互作用が意図しない形で入ってくるため、物理的解釈が容易ではない。更に、量子スピン液体のような磁気秩序を持たない量子状態は、従来の測定手法では直接的に観測することが難しい。この困難な状況を乗り越える方法として、制御性に優れた量子多体系を用いて実験的にフラストレート量子スピン系の理解を深める、量子シミュレーションが考えられる。本研究は、光格子中の極低温原子を用いて量子シミュレーションを行い、フラストレート量子スピン系の物理を解明できないか、という問いからスタートした。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、光格子中の極低温原子という実験系を用いて、フラストレート量子スピン系の量子シミュレーションを実現し、量子スピン液体などの新奇な量子状態や未知の量子現象を明らかにしていくことである。そのためには、主に二つの実験的な課題をクリアする必要がある。まず、一つ目はフラストレート量子スピン系が構築できるかである。これに関して、三角光格子中の極低温原子を用いることで、フラストレート古典スピン系の量子シミュレーションがすでに実現されている。これを量子スピン系に拡張するためには、光格子の各格子点の原子数を1個程度まで少なくし、またより低温なサンプルを準備できればよい。もう一つの課題は、量子スピン液体などの新奇な量子状態を解明していくための測定手法を準備できるか、である。これらの課題は量子気体顕微鏡という技術を実装することにより克服できると考えられる。

量子気体顕微鏡とは、光格子中の原子気体に対して単一原子・単一格子レベルでの操作・測定を可能にする技術である。これを用いることで少数個原子のサンプルに対しても感度良く測定できる。また、システムのエントロピーを効率的に取り除くことも可能であり、より低温のサンプルを準備できる。量子相関を直接的に測定することもでき、量子スピン液体などの解明にも役に立つと期待される。本研究を始めた段階では量子気体顕微鏡が実現されているのは光格子の形状として標準である正方格子についてのみであった。そのため本研究で重要となるのは、フラストレーションの物理が研究できる、三角格子やカゴメ格子のような幾何学的フラストレーションを持つ光格子系に対してこの量子気体顕微鏡を構築することである。

3. 研究の方法

まず三角光格子において量子気体顕微鏡を実現し、それから量子スピン液体が現れると期待されるカゴメ格子へとシステムを拡張する方針をとった。また、フラストレートスピン系の実現には反強磁性結合が必要となるが、それを実装するための実験技術も同時に開発していった。

(1) 三角格子に対する量子気体顕微鏡の構築

量子気体顕微鏡を用いた観測では、各格子の原子からの蛍光を電子増倍 CCD カメラにより検出することで原子分布を測定する。蛍光を出す際に光散乱で原子が加熱され元の格子点から動いてしまうため、原子の強い閉じ込めと冷却が必要となる。波長 1064nm の 3 本の光を 120 度の角度で重ねることで三角型の光格子を形成する。また、それに垂直な方向にも光格子（便宜上、鉛直光格子と呼ぶ）を形成することで、三角光格子と同時に用いることで原子に対して 3 次元の強い閉じ込めを実現する。冷却に関しては、光格子中でのラマンサイドバンド冷却を用いることにした。

(2) 三角光格子の位相の制御・安定化

カゴメ格子型の光格子は、三角光格子に対し、その 2 倍の波長のレーザー光を重ねて入れ、三角格子の 2 倍の周期で原子が入れない格子点を作ることによって実現できる。本研究では、波長が 532nm と 1064nm の二つのレーザー光を用いることでカゴメ光格子を構築することを計画した。カゴメ格子形成において、2 つのレーザー光の位相を合わせることが重要となる。ところが、光格子を構成するビームは、そのポインティングの安定化のため光ファイバーを通して原子の近くまで運ばれるが、光ファイバーを通過する際に位相揺らぎが光に印加されてしまう。ビート測定によって位相揺らぎを測定し、音響光学素子にフィードバックすることでこの位相揺らぎを抑制することを計画した。

(3) 反強磁性結合の実装：光格子の位相変調によるトンネリングの符号反転

反強磁性結合を作り出す実験手法としては二つの方法が考えられる。一つ目は、フェッシュバハ共鳴と呼ばれる現象を用いて、原子間相互作用の符号を反転させる方法である。本研究ではルビジウム-87 原子を用いたが、ルビジウム-85 原子に変えることで 155 ガウス付近のフェッシュバハ共鳴を用いることができる。もう一つの方法は、光格子の位相を変調することで、原子の格子間トンネリングの符号を反転させるものである。こちらの方法は、使用する原子種をルビジウム-87 原子から変更させる必要がないため、比較的容易に実装できる。特に、位相の変調に関しては上記の(2) 三角光格子の位相の制御・安定化、において音響光学素子への信号に変調を加えることで実現される。

4. 研究成果

(1) 三角光格子での単一原子観測

光格子中の原子からの蛍光信号を得るためには、強い閉じ込めと冷却が重要となる。三角光格子を形成するビームの半径を片側だけ小さくして楕円形にすることで、三角光格子の方向にビーム形状に由来するシステムの非均一性を増やすことなく、光強度を上げることができる。これにより、100 マイクロケルビン程度の十分に深いポテンシャルを形成することができた。三角光格子と直交する方向の閉じ込めを強めるために鉛直光格子を用いた。冷却された原子集団を鉛直光格子に導入したところ、7 程度の格子に分布することがわかった。このままでは、蛍光イメージングのフォーカスからずれている格子に入った原子がぼやけて映ってしまう。これを回避するため、鉛直光格子の方向に磁場勾配を印加し格子ごとにマイクロ波遷移の共鳴周波数をずらし、フォーカスした格子のみ選択的に原子の内部状態を変えることを行った。もとの内部状態のままの原子は、この後に共鳴するレーザー光を照射することでシステムから取り除く。これにより、フォーカスする場所の原子のみを残すことに成功した。

蛍光測定の際の冷却にはラマンサイドバンド冷却を用いた。この冷却手法ではラマン遷移のためのビームやラマン遷移によって変わった内部状態を戻すための光ポンピング用のビームが必要となる。我々のラマンサイドバンド冷却を用いた蛍光測定では合計 6 個のビームを使用する。それぞれのビームの光強度と周波数を調整する必要があるため、良い条件を実験的に探索することが困難となる。そこで、機械学習（ベイズ最適化）を用いた自動最適化を行った。パラメータ 11 個（ラマン遷移のビームでは相対周波数が重要となるため片方のビームの周波数は固定して最適化から除いた）に対して、13 時間ほど最適化を行うことで良いパラメータを見つけることができた。これにより、三角光格子中の極低温原子を単一原子・単一格子レベルで観測することに世界で初めて成功した（図 1）。

単一原子からの蛍光プロファイルを調べることで、イメージングの分解能（点像分布関数の半値全幅）が 679nm であることがわかった。これは三角光格子の格子間隔 709nm と同程度であるので隣り合う格子の原子からの蛍光が十分に分離できていないことになるが、原子が格子点という離散的な場所にしかいないという情報を用いることで、原子の空間分布を高精度に導き出すことができた。蛍光測定は 500 ミリ秒程度で行われ、その間に原子が別の場所に移動してしまう可能性がある。時間を空けて二つの画像を撮り、その間の原子分布の違いからこの影響を評価した。その結果、イメージングのフィデリティは 96% と高いものであることが分かった。ラマンサイドバンド冷却の更なる最適化によりフィデリティを向上させることができると考えている。

(2) 光格子の位相の安定化

光格子ビームのポインティング・空間プロファイルの安定化のため光ファイバーを用いるが、ファイバーを経由する際に位相ノイズが加わってしまう。光ファイバー後の光を一部打ち返し、ファイバー入射前の光とビート測定を行うことで位相ノイズの情報を得て、それを音響光学素子にフィードバックするシステムを構築した。これにより位相ドリフトを抑えることに成功した。

一方で、実際の実験においては、物理を行う光格子の光強度と、蛍光イメージングを行う際の光強度が約 3 桁異なる。これは一つの実験においてビート信号の強度が大幅に変わることを意味しており、そのような状況下ではダイナミックレンジの問題でフィードバック系をうまく動作させることができなかった。ビート信号の光を別の音響光学素子に通し、強度安定化を施すことで解決することができると考えられる。しかし、本研究期間内には達成できず、これは今後の課題となる。

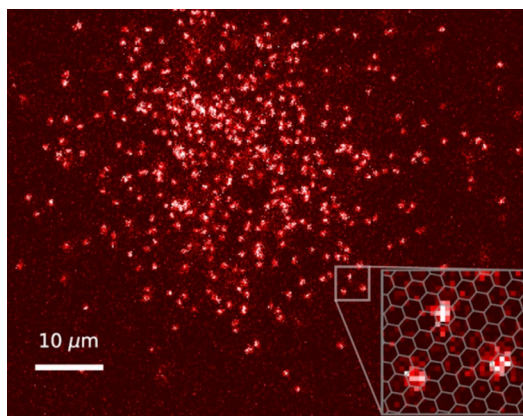


図 1：三角型光格子での単一原子観測。

(3) 少数原子数の量子気体生成

単一原子観測のためには、高開口数の対物レンズを光格子中の原子の近くに配置する必要があり、レーザー冷却に必要なビームの光学アクセスとの両立が難しい。これに対処するため、レーザー冷却した原子気体を非共鳴の光に捕獲し、対物レンズの近くに輸送するという行っていた。しかしながら、この輸送により原子ロスが生じ、結果、その後の蒸発冷却がうまくいかず、量子気体を生成することができないという問題が生じていた。そこで輸送後の原子数が少なくても蒸発冷却を効率的に行えるよう改良を施した。具体的には、既存の光トラップのビーム径を小さくしたり、顕微鏡の対物レンズの側からビーム径を絞ったトラップ光を新たに追加したりすることで原子密度を高くし、蒸発冷却において重要となる原子間衝突を大きくすることで対処した。これらにより、数千個と少数ながら安定した原子数のボース・アインシュタイン凝縮体を生成することに成功した。

(4) 超流動-モット絶縁体間の相転移の観測

ボース・アインシュタイン凝縮体を三角光格子に導入し、原子波干渉パターン(密度分布のピーク)を確認することで、光格子への移行が問題なく行われていることを確認した。通常、干渉パターンを観測する際、全てのポテンシャルから解放し、自由膨張させ、運動量分布を空間分布に反映させた後で測定を行う(飛行時間測定法)。少数の原子に対して、通常の飛行時間測定法を用いると、測定感度が足りず干渉パターンを確認することが難しい。一方で、研究成果(1)で開発した単一原子観測を用いる場合、イメージングのフォーカス方向にも原子が膨張するため、きれいな画像を得ることができない。そこで、三角光格子のポテンシャルのみを切り、鉛直光格子のトラップ内での飛行時間測定を行った。これにより、光格子中の超流動状態を特徴づける原子波干渉パターンを測定することに成功した(図2左)。

三角光格子のポテンシャルを更に深くすると、運動エネルギー(格子間トンネリング)よりも相互作用エネルギー(格子内での原子間相互作用)が大きくなり、超流動状態からモット絶縁体状態への量子相転移が起こる。モット絶縁体状態では、各格子での原子揺らぎが抑えられ、位相コヒーレンスが失われていくので、干渉パターンの消失として確認することができる(図2右)。光格子のポテンシャル深さを再度下げると干渉パターンが復活することから、干渉パターンの消失が加熱などによるものではないことも確認した。

量子気体顕微鏡を用いたトラップ中での飛行時間測定法が、少数個原子のサンプルに対する運動量分布の測定に有効であることを示すことができた。今後は、光格子中原子の空間分布に対する観測と合わせることで、対象となる量子多体状態の情報を引き出し、その理解に貢献することが期待される。

(5) 反強磁性結合の実装:フロケ制御によるトンネリングの符号反転

光格子の位相を周期的に変調すること(フロケ制御)で、格子間トンネリングの大きさや符号を変えることができる(図3(a))。二次元の三角光格子の場合、円状に変調することでトンネリングを制御できる(図3(b))。これを実装するため三角光格子を形成する3本のレーザー光の間の周波数差を制御できるシステムを開発した。光格子の位相を変調した状態で原子を蛍光観測し、円状に変調できていることを確認した(図3(c))。この技術を用いることで反強磁性結合が実装でき、フラストレートした量子スピン系を研究する準備が整った。

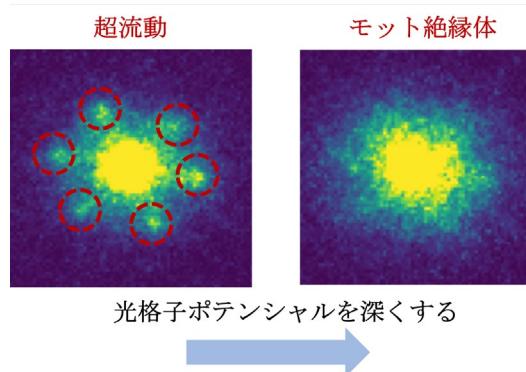
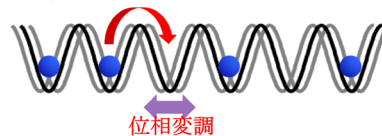
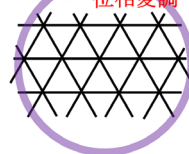


図2: 超流動-モット絶縁体間の相転移。超流動状態では原子波干渉パターン(点線丸)が観測できる。光格子ポテンシャルを深くするとモット絶縁体になり、干渉パターンが消失する。

(a) 格子間トンネリングの大きさ・符号を制御



(b) 位相変調



(c)

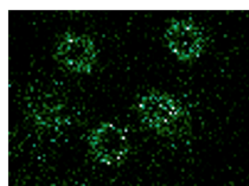


図3: 光格子の位相変調(フロケ制御)によるトンネリングの符号反転

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Florian Schaefer, Takeshi Fukuhara, Seiji Sugawa, Yosuke Takasu, Yoshiro Takahashi	4. 巻 2
2. 論文標題 Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Reviews Physics	6. 最初と最後の頁 411-425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42254-020-0195-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryuta Yamamoto, Hideki Ozawa, David C. Nak, Ippei Nakamura, Takeshi Fukuhara	4. 巻 22
2. 論文標題 Single-site-resolved imaging of ultracold atoms in a triangular optical lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1367-2630/abcdc8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Daisuke Yamamoto, Takeshi Fukuhara, Ippei Danshita	4. 巻 3
2. 論文標題 Frustrated quantum magnetism with Bose gases in triangular optical lattices at negative absolute temperatures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-020-0323-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Takeshi Fukuhara
2. 発表標題 Single-site-resolved imaging of ultracold atoms in a triangular lattice
3. 学会等名 Workshop on Quantum Information Science with Cold Atoms（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本隆太
2. 発表標題 Quantum Simulation using Quantum Gas Microscope
3. 学会等名 第3回 冷却原子研究会「アトムの会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中祐太郎、山本隆太、小沢秀樹、畠山温、福原武
2. 発表標題 量子気体顕微鏡実験に向けた少数原子の蒸発冷却
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福原武
2. 発表標題 冷却原子量子シミュレーション
3. 学会等名 2021年度量子情報工学研究会 量子情報工学の最前線（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideki Ozawa, Ryuta Yamamoto, Takeshi Fukuhara
2. 発表標題 Single-Atom-Resolved Imaging in a Triangular Optical Lattice
3. 学会等名 51th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (DAMOP 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本隆太、小沢秀樹、福原武
2. 発表標題 三角光格子における量子気体顕微鏡の実現
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Fukuhara
2. 発表標題 Towards quantum simulation of frustrated systems with ultracold atoms
3. 学会等名 The 5th Conference on Condensed Matter Physics (CCMP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Yamamoto、Takeshi Fukuhara、Ippei Danshita
2. 発表標題 Simulating frustrated quantum magnetism using negative-temperature Bose gases in triangular optical lattices
3. 学会等名 The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Ozawa、David C. Nak、Ryuta Yamamoto、Takeshi Fukuhara
2. 発表標題 Raman-Sideband Cooling in an Optical Triangular Lattice
3. 学会等名 The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Yamamoto, Takeshi Fukuhara, Ippei Danshita
2. 発表標題 Synthetic Frustrated Quantum Systems with Bose Gases in a Triangular Lattice at Negative Absolute Temperatures
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Yamamoto, Takeshi Fukuhara, Ippei Danshita
2. 発表標題 Theoretical Modeling of Cold-Atom Simulations for Frustrated Quantum Magnetism
3. 学会等名 IAS Workshop on Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 David C. Nak, B, Hideki Ozawa, Ryuta Yamamoto, Takeshi Fukuhara
2. 発表標題 Raman-Sideband Cooling in a Triangular Optical Lattice
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 量子多体ダイナミクス研究チーム ホームページ
<https://qmbd.riken.jp/jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------