

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14422

研究課題名（和文）負温度ボース縮退気体を用いた量子フラストレート系のシミュレータ

研究課題名（英文）Simulating Quantum Frustrated System by a Bose-Einstein Condensated Gas at Negative Temperature

研究代表者

小沢 秀樹 (Ozawa, Hideki)

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・特別研究員

研究者番号：50826013

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、87Rb原子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)を実現し、量子気体顕微鏡(QGM)を使って、三角光格子中のBECの干渉パターンやフィリングを測定した。これまで我々の実験系においてBECの生成が大きな課題であった。この課題を解決するために急激な光トラップを導入し、BECの生成が確認できた。またSF-MI転移が発現する浅い光格子とQGM観測を行う深い光格子を共存させるために、ログスケールPDを用いて、4桁ダイナミックレンジを実現した。以上の改善の後、浅い三角光格子中にBECを導入し、干渉ピークが現れることが確認できた。さらに、深い格子ではフィリング80%程度のMI相を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SF-MI転移の観測は、光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーターとしてのベンチマークテストをクリアしたことになる。n=1のユニットフィリングが準備できたことで、より高度な物理現象を探求するための下地ができたと言える。さらに、三角光格子中のBECとQGMを組み合わせることで、TOF測定とin-situ測定の両立が可能になった。これにより、空間的な相分離の可能性まで含めて量子フラストレーション系の相図をより正確に描けるようになった点で、本研究は学術的に意義深いと考える。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have realized a Bose-Einstein Condensate (BEC) of 87Rb atoms and measured the interference patterns and fillings of the BEC in a triangular optical lattice using a Quantum Gas Microscope (QGM).

The generation of a BEC has been a significant issue in our experimental system. To solve this problem, we introduced an optical trap called a dimple trap, and as a result, the formation of a BEC was confirmed. It is also necessary to coexist a shallow optical lattice where the SF-MI transition occurs and a deep optical lattice for QGM observation. We installed log-scale PDs to achieve a dynamic range of 4 orders of magnitude to overcome this issue.

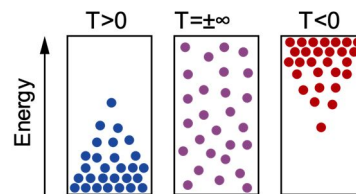
After the above improvements, we introduced the BEC in the shallow triangular optical lattice and observed that interference peaks appeared at positions corresponding to the reciprocal lattice vectors. Furthermore, we achieved an MI phase of about 80% filling in a deeper lattice.

研究分野：物理学

キーワード：冷却原子 ボース気体 超流動 モット絶縁体 三角格子 量子気体顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

通常、我々に馴染みのある系では絶対温度の符号は正である。もし仮に系のエネルギースケールを反転することができると、エネルギーが最も高い状態が最も高確率で占有される「負の絶対温度」になる (Fig. 1)。



本研究開始当初では、負温度状態のボース・アインシュタイン Fig. 1 負温度の概念図。

凝縮体(Bose-Einstein Condensate, BEC)を三角格子中で実現し、量子フラストレーションの振舞いの実験的シミュレーションを目的とした。負温度 BEC の位相はフラストレートした状態が安定なため、位相自由度をスピン自由度と見なすことで量子スピンフラストレーションが実現される。三角格子およびカゴメ格子構造を光の干渉を使って構築し、その光学系へレーザー冷却されたボース気体を導入する。光格子中の冷却原子系は非常に高い自由度を持っており、パラメータの符号を変えることも可能なので、負の絶対温度を実現し、量子フラストレート系の相図を描くことができると考えた。

光格子中のボース気体の振舞いは、次のボース・ハバードモデル(Bose-Hubbard Model, BHM)で記述されることが知られている。

$$\hat{H} = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{b}_i^\dagger \hat{b}_j + \frac{U}{2} \sum_i \hat{n}_i (\hat{n}_i - 1) + V \sum_i r_i^2 \hat{n}_i$$

ここで、J は最近接サイト間のトンネリング、U はオンサイトの原子間相互作用、V は光格子をガウシアンビームで構築することに由来する調和トラップの強さである。通常、J・U・Vの符号はすべて正である。この場合、BEC はバンド構造の最低エネルギー点に分布する (Fig. 2(a))。一方で、UとVの符号を負にした場合には、系のエネルギースケールが反転するので、光格子中のバンド構造の中で最も運動エネルギーが高い状態が安定化される (Fig. 2(b))。その準運動量点では、トンネリングすると波動関数の位相が反転するようになっている。つまり、実効的にトンネリングの符号を反転させた状態に対応する(J → -J)。また、統計力学的観点では、粒子があるエネルギーE_iに分布する確率P_iはボルツマン係数に比例するが (P_i ∝ exp[-E_i/(k_BT)])、エネルギーが高い状態の占有確率が高いということは絶対温度が負(T<0)であることを意味している。

このような負温度 BEC を三角格子中で用意すると、実効的にトンネリングは負符号なので、最近接のサイト間の位相は反転したが。しかし、すべての最近接サイトで位相反転を満足することは不可能である。その結果、幾何学的フラストレーションを部分的に解消するために、BEC の位相は 120° 構造をとる。バンド構造で見ると、負温度 BEC は K 点に分布し、その準運動量点での波動関数の位相は 120° 構造になっている。ブリルアンゾーンの中で等価でない K 点が 2 つあり、BEC はどちらかの K 点に分布するが、これが 120° 構造のカイラリティに対応しているので、カイラル超流動 (Chiral Superfluid, CSF) が実現される。この系を用いてカイラリティと超流動の破れを調べることは学術的に興味深い。

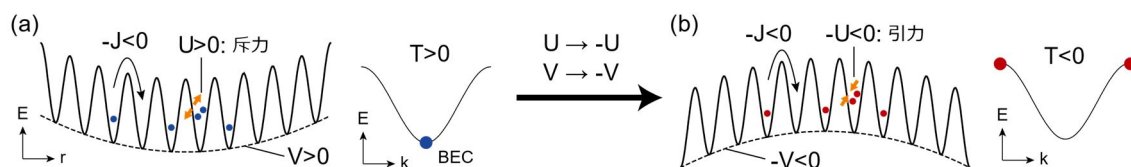


Fig. 2 (a) U, V > 0 の場合の BHM (左) とバンド構造中の BEC (右). (b) -U, -V < 0 の場合.

2. 研究の目的

本研究の目的は、光格子中の負温度BECを用いて、三角格子中のCSF相からMI相への相転移をシミュレートすることである。

相互作用が弱い極限($|U|/J \ll 1$)では、三角格子中の負温度ボース粒子はサイト間を動き回っている超流動状態であり、かつ運動量分布を見ると2つの異なるK点のどちらかに凝縮するカイラリティがある。一方、相互作用が強い極限($|U|/J \gg 1$)では、粒子はサイトに局在したモット状態であり、運動量分布を見るとブリルアンゾーン内に一様に分布する。それらの中間領域では、超流動だけが破れた「カイラルモット絶縁体」の存在が予言されている。本研究では、 $|U|/J$ を精緻に制御し運動量分布を系統的に調べることを目標とした。

上記の目的において、相互作用が重要な役割を果たす。冷却原子系では、フェッシュバハ共鳴と呼ばれる現象を用いて、磁場をかけることで容易に原子間相互作用の強弱や符号を変化させることが可能である。実際の固体結晶の系では、三角格子中の負温度BECや平坦バンド中のボース気体を用意することは難しいが、光格子中の冷却原子による「人工結晶」ならば可能である。この人工結晶を使って新しい物理系を開拓し、人工結晶の特徴であるパラメータの高い自由度を利用して新物理系の物性に対し統一的な理解を得ることは、基礎研究として非常に意義があると考えられる。

さらに、申請者は量子気体顕微鏡(Quantum-Gas Microscope, QGM)と呼ばれる観測手法を三角光格子に拡張した装置開発を進めている。QGMによる観測では、光格子中の原子集団に共鳴光を照射し、各サイトの原子から放出される光を高分解能な対物レンズで集光し、CCDカメラで検知する。つまり、光格子中の原子分布を単一格子点・単一原子レベルで知ることができる。本研究で提案した負温度BECの系とQGMを組み合わせることを計画した。QGMを使うことで、実空間・実時間のダイナミクスを観測できることから、光格子中の負温度BECが超流動しているのか、もしくはサイトに局在してMIになっているのかどうかを、空間的な相分離の可能性を含めて判断することができる。したがって、量子フラストレート系の相図をより正確に描くことができ、より理解が深まるという展開が期待できた。

<引用文献>

M. P. Zaletel *et al.*, Phys. Rev. B **89**, 155142 (2014).

3. 研究の方法

(1) BECの生成

これまで、我々の実験系において量子縮退気体の生成が大きな課題であった。蒸発冷却の初期段階における原子数が少なく、密度が低いため効率的な蒸発冷却を行うことが困難であった。この課題を解決するために以下に挙げる2つの改善を行った。1つ目に、FORT(Far-Off resonance trap)のビーム径を絞ることで、原子集団の密度を上げて、鉛直光格子の1層あたりの原子数を増やした。2つ目に、FORTとは別に、新たに急峻な光トラップ(dimple trap)を導入した。Dimple trapにより蒸発冷却効率を上げて、少数原子でも量子気体を生成できるようにした。以上の改善を施した後に、位相空間密度(Phase-Space Density, PSD)を測定したところ、PSDが1を超えており、ボース・アインシュタイン凝縮していることがわかった。

(2) 光格子深さのダイナミックレンジ拡張

また、三角光格子中の超流動-モット絶縁体(Superfluid-Mott Insulator, SF-MI)転移の観測の準備として、ログスケール光強度検出器を導入した。SF-MI 転移が発現する浅い光格子と、観測を行う深い光格子を共存させる必要がある。この問題に対して、ログスケール PD を用いて、4桁のダイナミックレンジを稼ぐことに成功した。

4. 研究成果

(1) 三角光格子 QGM の実現

QGM を実現させるためには、各格子点を区別するのに十分な分解能、および単一原子を検知するのに十分な感度が必要となる。高分解能を得るために、高い NA をもつ対物レンズを使ったイメージング系を構築した。一方で、高感度を得るために、蛍光イメージングを用いた。発光観測の際に、光子の吸収と放出による原子の加熱が伴い、原子のホッピングやロスが起こり、観測のフィデリティが下がる。この加熱の影響を抑えるために、ラマンサイドバンド冷却(Raman Sideband Cooling, RSC)を適用した。この冷却機構が動作するには、ラマン光やポンピング光の強度・周波数といったパラメータを最適化する必要がある。我々は、ベイズ推定に基づく自動最適化をこの問題に適用した。自動最適化の結果、長寿命(>6 sec.)かつ高感度(240 photons/atom at 500 ms)の蛍光イメージングが可能になった。上記の装置実装、パラメータ最適化作業の結果、三角光格子中の ^{87}Rb 原子からの発光を単一原子レベルで観測することに成功した(Fig.4(a))。さらに、点広がり関数を評価し、各サイトを分離することができる分解能(点広がり関数の FWHM = 679 nm < 三角格子の格子間隔 = 709 nm)があることを確認した。また、観測のフィデリティも評価し、96.3%の高いフィデリティが得られていることがわかった。

(2) SF-MI 転移の観測

Dimple trap 中の BEC を光格子に導入し、SF 相・MI 相をそれぞれ観測した(Fig.4(b,c))。浅い光格子に導入し、TOF により運動量分布を観測したところ、三角格子に特有な干渉パターンが見られた。一方で、SF-MI 転移点より十分深い光格子に BEC を導入したところ、フィリング 80%程度の MI 相が観測できた。 $n=1$ のユニットフィリングが準備できたことで、より高度な物理現象を探求するための下地ができたと言える。さらに、三角光格子中の BEC と QGM を組み合わせることで、TOF 測定と in-situ 測定の両立が可能になった。これにより、空間的な相分離の可能性まで含めて量子フラストレーション系の相図をより正確に描けるようになった。

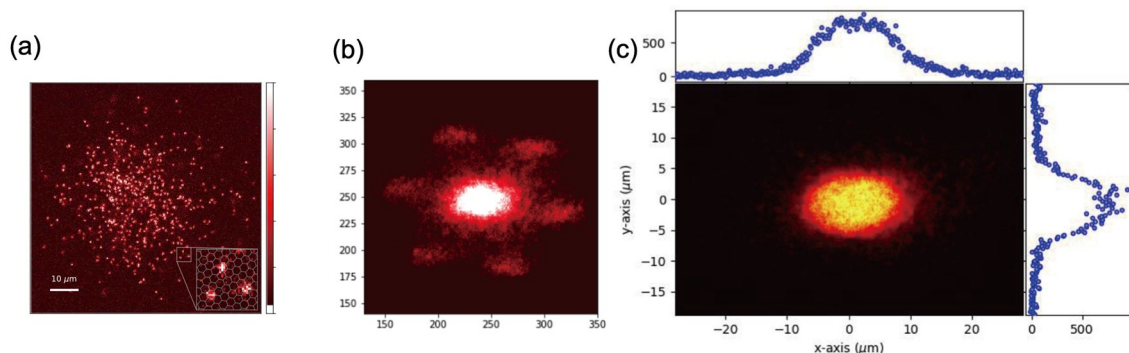


Fig. 3 (a) 三角光格子中の ^{87}Rb 原子の単一原子・単一サイトレベルでの発光観測. (b) 三角光格子中のSF相の干渉パターン. (c) 三角光格子中のMI相($n=1$)の実空間分布.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamamoto Ryuta, Ozawa Hideki, Nak David C., Nakamura Ippei, Fukuhara Takeshi	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 123028 ~ 123028
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

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 51st Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小沢秀樹
2. 発表標題 冷却原子実験におけるパラメータ自動最適化および画像解析
3. 学会等名 量子技術・機械学習融合ミーティング
4. 発表年 2020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 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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hideki Ozawa, Shintaro Taie, Yosuke Takasu, Yoshiro Takahashi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer, Singapore	5. 総ページ数 219-243
3. 書名 Hybrid Quantum System of Fermionic Neutral Atoms in a Tunable Optical Lattice	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------