

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：32606
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2021
課題番号：19K14635
研究課題名（和文）一様スピノールBECの研究

研究課題名（英文）Study of a homogeneous spinor BEC

研究代表者

柴田 康介 (Shibata, Kosuke)

学習院大学・理学部・助教

研究者番号：90735440

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）：本研究は、スピン自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮体（スピノールBEC）の一様系における振る舞いを実験的に明らかにすることを目的とする。本研究では、箱型の斥力ポテンシャル中の一様なスピノールBECの全光学的手法による生成に取り組んだ。一様BEC生成における最重要課題は重力ポテンシャルの補正であり、光ペインティング法による重力補正を実現した。また、トラップ光の誘起する磁気副準位依存のエネルギーシフト（仮想磁場）の除去がスピノールBEC研究に不可欠であり、量子ロックイン検出による仮想磁場の高精度測定および除去に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮体（スピノールBEC）は、超流動性と磁性を併せ持つ量子流体であり、実験・理論の両面からその特性が調べられてきた。従来の実験研究では主として調和型の引力ポテンシャルで閉じ込めたBECが用いられていたが、外部閉じ込めの影響を排した一様系を用いた実験により得られる知見は、スピノールBECのより深い理解につながる。本研究では、その実験的生成の基礎技術を開発することができた。

研究成果の概要（英文）：The study aims to clarify the behavior of a homogeneous Bose-Einstein condensate of the spin degrees of freedom (spinor BEC) experimentally. We have tackled all-optical generation of a spinor BEC in a box repulsive potential. One of the most important issues in homogeneous BEC generation is compensation of gravity. We have realized gravity compensation by optical painting technique. Elimination of magnetic sublevel dependent energy shift induced by the trap light (fictitious magnetic field) is also important in the study of a spinor BEC. We have successfully performed sensitive measurement of the fictitious magnetic field with quantum lock-in detection and its elimination.

研究分野：冷却原子気体

キーワード：ボースアインシュタイン凝縮体 一様系 光ペインティング 量子ロックイン検出

1. 研究開始当初の背景

本研究は、スピン自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮体（スピノール BEC）の一様系を対象とする。スピノール BEC は、超流動性と磁性を併せ持つ量子流体であり、実験・理論の両面からその特性が調べられてきた。従来の実験研究では主として調和型の引力ポテンシャルで閉じ込めた BEC が用いられている。研究開始時点で、高度な光空間変調技術の適用によって、一様な BEC を実験室で生成できることが報告されていた。この一様 BEC は、スピン自由度こそ持たないものの、理論上でしかなかった物理を体現する系として注目を集めていた。一方、スピノール BEC の実験的研究を行っている代表的なグループとして、バークレー大学の他に、NIST、ジョージア大学の研究室がある。しかし、いずれも一様スピノール BEC の生成は報告していない。

2. 研究の目的

本研究は、空間的に一様なスピノール BEC の振る舞いを実験的に調べることを目的とする。外部閉じ込めの影響を排した一様系を用いた実験により得られる知見は、スピノール BEC のより深い理解につながる。外部閉じ込めポテンシャルの影響を極力取り除くことで、スピノール BEC の本質的な特性に迫ることもできる。

上記の通り、一様 BEC は、スピン自由度のない単一成分 BEC についてしか実現されていない。一様なスピノール BEC を生成し研究することは、重要な新たな方向性であると考えた。本研究では、従来手法を発展させた全光学的手法によって一様なスピノール BEC を実現し、スピノール BEC 研究を発展させることを目指した。

3. 研究の方法

本研究との比較のため、先行研究 [1]における一様 BEC の生成手法をまず説明する。先行研究では、空間変調器によって形成された中空ビームと、中空ビームに蓋をする2つのシート状ビームとで形成される箱型の斥力ポテンシャル内に BEC が準備された(図1(a)参照)。さらに、重力を補正する磁場勾配を印加している。

上記の重力補正法は、異なる磁場依存性をもつ複数のスピン成分に対しては適用できず、スピノール BEC 研究にそぐわない。本研究では、重力補正“光”ポテンシャルを利用し、一様スピノール BEC を実現する。具体的には、光ペインティング[2]の手法によって線型な強度分布をもつ光を作る。磁気トラップ中に生成した ^{87}Rb BEC (原子数最大約 10^6 個)を、この重力補正光と中空の斥力光とで作ったポテンシャルに移行し、一様に広がったディスク形状の BEC を実現する(図1(b)参照)。なお、斥力光は、形状設計に自由度を与えるため空間光変調器で作る。例えば四角あるいはより複雑な形状の BEC も作ることも可能である。

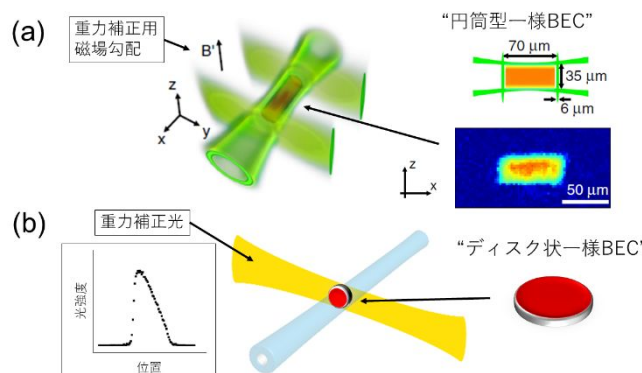


図1 先行研究と本研究の手法。

4. 研究成果

^{87}Rb のスピノール BEC を光トラップ中で生成することは、当研究室において、以前より実現している。一様系の生成に関し、研究開始時点では、通常の高スビームによる引力ポテンシャルと空間光変調器を用いて生成したリング状の斥力ポテンシャルとを組み合わせることで、一方向に一様な密度分布をもった BEC の生成に成功していた(図2)。本研究で目指す2次元(もしくは3次元の)一様 BEC を生成するには、光ビームによる鉛直方向の閉じ込めを弱めるとともに、重力補正ポテンシャルを加えることが必要であった。

そこで、重力補正に適した線型な強度分布を持つ光を光ペインティングによって形成することとした。ここで、光ペインティングとは、音響光学素子に与える RF 周波数を時間的に変化させることで、音響光学素子による回折光のスポット位置を掃引し、時間平均として所望の形状の光強度分布を得る手法である。

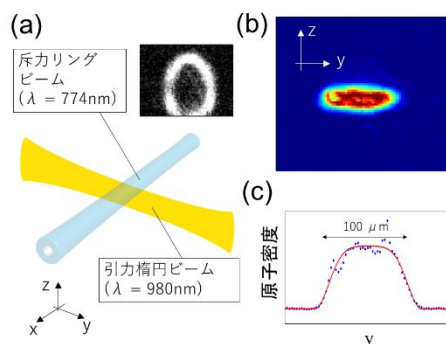


図2 一方向に一様な BEC。

R F 周波数の変化速度を遅くすると光の滞留時間が長くなるため平均強度を強められ、早くすると弱められる。

図 1 (b) にテスト系で撮影した平均光強度分布を示している。重力補正に必要な線形的な光強度分布を実現できていることがわかる。実際に、このような光を B E C に照射し、適切に補正光の (総) 光パワーを調整することで重力ポテンシャルを補正することに成功した。別ビームによる鉛直方向の閉じ込めを弱めると、重力を補正していない場合、重力と光ポテンシャルを合計したポテンシャルの極小点が消失し、原子集団を保持することができない。適切な重力補正光を入れることで、鉛直閉じ込めを弱めても原子集団が保持されていることをもって重力ポテンシャルが補正されていることを確認した。また、重力補正によって可能となった弱い閉じ込めポテンシャル中で B E C が作られることも確認した (図 3)。これらの結果をまとめた論文は Physical Review Research 誌から出版された。

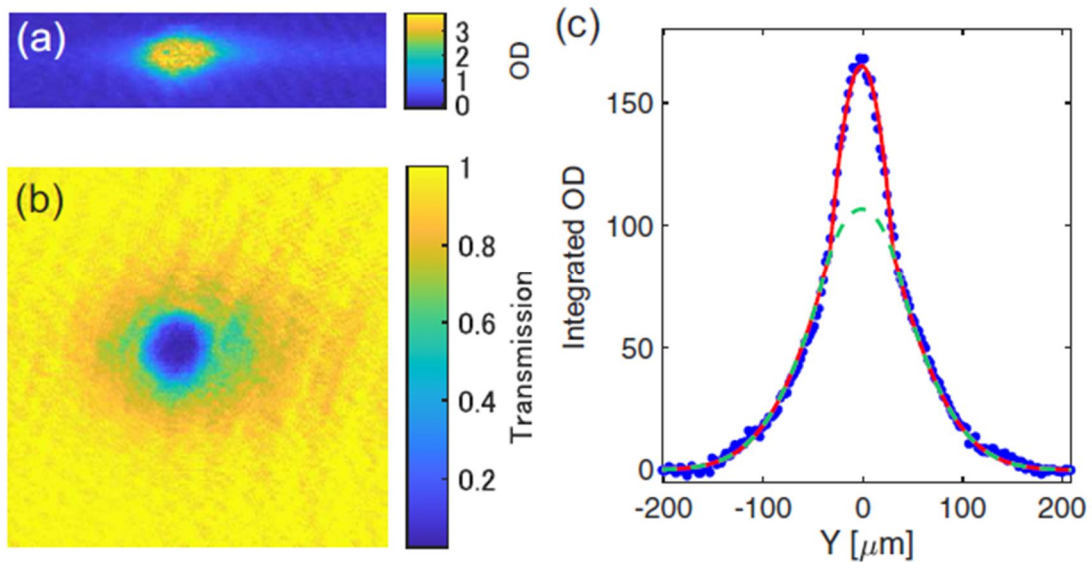


図 3 弱い鉛直閉じ込めポテンシャル中の BEC。(a) TOF = 0.2 ms の吸収像。原子集団の密度分布を反映する。(b) TOF = 16 ms の吸収像。原子集団の運動量分布を反映する。(c) (b) の一方向積分によって得られた線光学密度。赤線は、熱的原子とボース凝縮体の広がりを合成したバイモーダルフィット。緑破線は、バイモーダルフィットのボース凝縮体成分。

研究を遂行する中で、一様スピノール B E C を安定に生成するには、B E C を捕獲するトラップ光が作る、いわゆる仮想磁場が問題となった。仮想磁場は、光が原子に誘起するエネルギーシフト (ライトシフトもしくは ac シュタルクシフト) のうち、磁気副準位に比例する成分である。仮想磁場は、光の円偏光成分に由来するのだが、通常の実験環境では、原子が存在する位置での光は完全に直線偏光していない。そのために、スピノール B E C を支配するエネルギーに比べて無視できない仮想磁場が発生する。重力補正光も例外ではなく、円偏光成分をもつと仮想磁場を作る。一方で、真空セル中の原子位置の光の直線偏光度を直接に測定することはできない。セル外側でも偏光測定は可能だが、セルのガラス壁はわずかに応力複屈折を持っているため原子位置での偏光測定にはならない。B E C 実験のパラメータでは、ガラスの応力複屈折性によって、スピノール B E C 研究を妨げるほどの仮想磁場が作られうる。

そこで、量子ロックイン法を用いた仮想磁場計測に想到し、実際に仮想磁場を高精度に計測すること、ならびに測定結果を用い仮想磁場を消去することに成功した。結果を図 4 に示す。この技術は、全光学的手法を用いた一様スピノール B E C の生成という本研究の目標を実現するにあたり、極めて重要と考えられる。量子ロックイン検出を用いた仮想磁場計測および消去についてまとめた論文は、Physical Review A 誌から出版された。

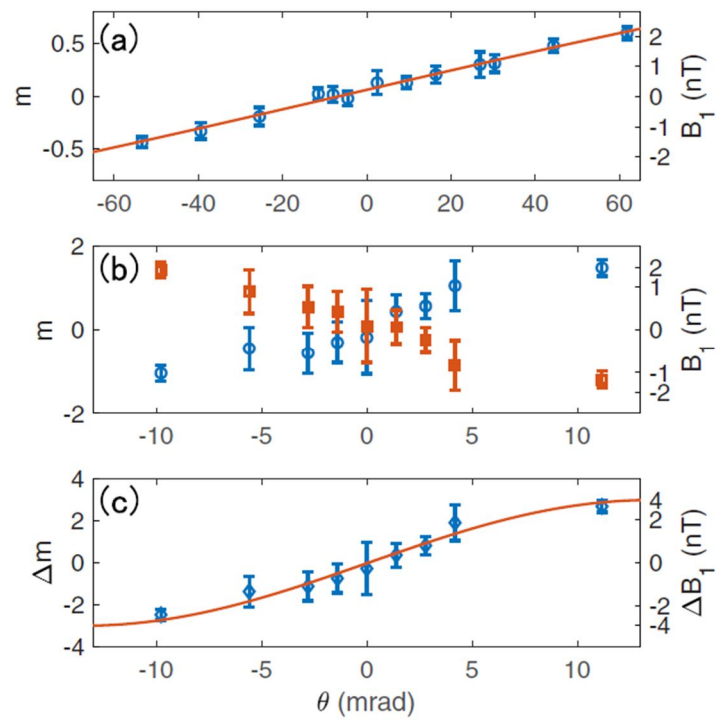


図4 量子ロックイン検出による仮想磁場測定。横軸は光パス中に設置した $\lambda/4$ 波長板の角度を表す。縦軸（左）は、量子ロックインシーケンス後の原子集団（BEC）の磁化であり、加えた交流仮想磁場の振幅 B_1 （右軸）に近似的に比例する。(a)測定時間（量子ロックイン検出における位相蓄積時間） $T = 7$ ms の時の結果。(b)(c) $T = 28.2$ ms の結果。(b)の赤、青は検出位相を反転させたデータ、(c)はそれらの差である。この結果をもとに $\lambda/4$ 波長板角を精密に調整することで、仮想磁場を消去できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Shibata Kosuke, Ikeda Hidehiko, Suzuki Ryota, Hirano Takuya	4. 巻 2
2. 論文標題 Compensation of gravity on cold atoms by a linear optical potential	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013608-1、6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.013068	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 Shibata Kosuke, Sekiguchi Naota, Hirano Takuya	4. 巻 103
2. 論文標題 Quantum lock-in detection of a vector light shift	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043335-1、6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.043335	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 柴田康介, 関口直太, 平野琢也
2. 発表標題 光仮想磁場の量子ロックイン検出
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0件

〔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
---------	---------