

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：63903

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14639

研究課題名（和文）極低温原子集団を用いたエッジ状態の研究

研究課題名（英文）Edge states using ultracold atoms

研究代表者

素川 靖司 (Sugawa, Seiji)

分子科学研究所・光分子科学研究領域・助教

研究者番号：70768556

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）：量子系の幾何学的・トポロジカルな特性は物性を特徴づけ、マクロな振る舞いさえも決定する。本研究では、ボース・アインシュタイン凝縮したルビジウム原子集団に対して、精緻に位相・強度を制御したマイクロ波を照射することで、非可換なSU(2)人工ゲージ場を量子エンジニアリングし、非可換な幾何学的位相を観測・制御することに成功した。閉じた軌道を描くように断熱的にハミルトニアンを変化させることで、ベリー位相を一般化したWilczek-Zee位相を観測・制御するとともに、量子プロセス・トモグラフィを用いて、Wilczek-Zee位相を評価し、ゲージ依存しないウィルソン・ループによって特徴付けることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子系の幾何学的・トポロジカルな特性は、物理や化学など分野横断的に議論されており、物性を特徴づけ、マクロな振る舞いさえも決定するなど重要性が高い。冷却原子系は量子シミュレータ、量子コンピュータ、量子センサーのプラットフォームとして注目されており、本研究は、非可換な幾何学的位相を用いたスピン・デバイスや量子シミュレーション、量子センサー、ホロノミック量子コンピューティングへの応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In physics and chemistry, geometrical and topological properties of quantum systems can characterize their physical properties and even determines their macroscopic behaviors. Here, using Bose-Einstein condensate of rubidium atoms dressed with precisely-tuned microwave-fields, we successfully quantum-engineered a non-Abelian SU(2) gauge field. By adiabatically controlling the Hamiltonian such that the state follows an adiabatic closed trajectory, we observed a Wilczek-Zee phase, a non-Abelian extension of Berry's geometric phase. We successfully evaluated the Wilczek-Zee phase using quantum process tomography and characterized them in a gauge-independent way in terms of the Wilson loop.

研究分野：冷却原子実験

キーワード：冷却原子 人工ゲージ場 ボース・アインシュタイン凝縮体 量子制御 幾何学的位相 非可換ベリー位相 リュードベリ状態

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子系の幾何学的・トポロジカルな特性は物性を特徴づけ、マクロな振る舞いさえも決定する。固体物性の分野では、トポロジカル絶縁体やワイル半金属の発見などトポロジカル量子物質の研究が盛んに行われ、その物性が調べられている。

冷却原子系では、その高い制御性と大きな自由度を生かして、量子シミュレーションによるアプローチから、固体物理の難問を「解く」ことや、冷却原子系ならではの新奇な物性を発見することが期待されている。長年、電荷のない中性原子は磁場を印加してもローレンツ力は働かないため、量子ホール効果をはじめとする磁場中の電子物性やトポロジカル量子物質のシミュレーションは難しいかごく一部に限られると考えられてきた。しかし、近年、冷却原子に対して人工的に仮想磁場(仮想ベクトルポテンシャル)やスピン・軌道相互作用を創り出す手法が考案され、幾何学的現象やトポロジカル量子物質の研究が可能となった。

トポロジカル絶縁体では、バルクのトポロジカル性質が、物質の界面の性質に現れる「バルク・エッジ対応」と呼ばれる性質が理論的に知られており、固体系の実験においても、量子ホール効果におけるコンダクタンスの量子化などを通してエッジ状態の観測などが行われてきた。一方、冷却原子系の実験では、トポロジカルな格子模型を実装されたが(**Nature 515, 237 (2014).**)実空間中の格子でエッジ状態を観測することは実現していない。冷却原子集団は、ガウシアンビームを集光して作られる光トラップによって緩やかに閉じ込められるために、原子密度は端に行くほど低くなり、明確な界面(エッジ)が存在しないことが大きな要因の一つとしてあげられる。

研究代表者は、冷却原子集団を用いて量子系に現れる新奇で非自明なトポロジー[S. Sugawa et al., **Science 360, 1429 (2018).**]やボース・アインシュタイン凝縮体の幾何学的電荷ポンピング[H-I. Lu et al., **Phys. Rev. Lett. 116, 200402 (2016).**]スピン・軌道相互作用するボース・アインシュタイン凝縮体の長距離コヒーレンスの観測[A. Putra et al., **Phys. Rev. Lett. 124, 053605 (2020).**]などこれまで先駆的な研究を進めてきた。

2. 研究の目的

これまでの研究の背景と研究代表者の成果を踏まえて、本研究では、冷却原子系で幾何学的、及びトポロジカルな量子現象や新奇な物性を研究するためのプラットフォームを構築し、特に実空間でエッジ状態を観測することを目標とする。達成へ向けた初段階として、以下の研究項目を設定した。

(1) 非可換な人工ゲージ場の量子エンジニアリングと幾何学的位相の研究

冷却原子系にユニークな点として、非可換ゲージ場中のトポロジカル模型が実現できる可能性があることがあげられる[PRL **103, 035301 (2009).**]。本研究では、冷却原子に対して人工ゲージ場(非可換ベリー接続)を量子エンジニアリングし、幾何学的位相によって特徴付ける。特に、研究代表者が実装方法を考案した非可換な **SU(2)**人工ゲージ場に着目し、人工ゲージ場中の原子が獲得する非可換な幾何学的位相を観測・制御および評価する。

(2) 極低温リユードベリ原子集団を用いた多体ダイナミクスの研究

ドレスト原子を用いた人工ゲージ場とは異なる相補的なアプローチとして、リユードベリ励起された極低温原子配列に着目し、多体リユードベリ原子系に関する研究を進める。リユードベリ原子間に働く双極子相互作用を介して、物理系のトポロジーによって保護された励起(エッジ状態)が原子配列の周りを伝播することが理論的に期待されている(**Quantum Sci. Technol. 3 044001 (2018).**)。欠陥のない極低温原子配列を生成し、電子基底状態のある原子をリユードベリ励起した後、局所的なアドレッシング・パルスによって、多体リユードベリ原子集団を集団励起することで、トポロジカル不変量である **Chern** 数によって保護されたカイラル・エッジ電流が誘起されることが期待される。本研究では、まず、リユードベリ原子系における多体ダイナミクスへの知見を深めることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 非可換な人工ゲージ場の量子エンジニアリングと幾何学的位相の研究

ボース・アインシュタイン凝縮したルビジウム(**Rb**)原子気体に対して、位相安定化したマイクロ波を照射し、ドレスト原子を生成する。**4**つの **Rb** 原子の超微細構造基底状態間 ($|F = 2, m_F = 1\rangle$ 、 $|F = 2, m_F = 0\rangle$ 、 $|F = 1, m_F = -1\rangle$ 、 $|F = 1, m_F = 0\rangle$) を結ぶようにマイクロ波で結合した量子4準位系を構築することで、ドレスト原子に対して非可換 **SU(2)**ゲージ場(非可換ベリー曲率)を創り出せる[S. Sugawa et al., **Science 360, 1429 (2018).**]。この非可換 **SU(2)**ゲージ場中を断熱的に閉じたループ曲線を描くように遷移させたとき、原子は **Wilczek-Zee** 位相(非可換ベリー位

相)を獲得することが期待される。この **Wilczek-Zee** 位相 (非可換ベリー位相) は、非可換なベクトルポテンシャル中を運動する荷電粒子が獲得する非可換なアハラノフ・ボーム位相とアナロジーがある。本研究では、この **Wilczek-Zee** 位相を制御・観測し、さらに量子プロセス・トモグラフィによって特徴付ける。

(2) 極低温リユードベリ原子集団を用いた多体ダイナミクスの研究

ほぼ欠陥のない極低温原子配列として光格子中の単一占有モット絶縁体を用意する。また、リユードベリ・プロクテッドを回避して、**Rb** 原子をリユードベリ状態へ励起するために広帯域パルスレーザーを用いる。さらに、長距離相互作用による多体ダイナミクスを観測するために、アト秒精度の時間領域ラムゼイ干渉法を用い、1 ナノ秒程度まで時間発展を測定する。本研究課題の期間では、長距離イジング模型に着目し、実験結果と近似理論と比較を行い、多体ダイナミクスについて知見を得ることを目標とする。

4. 研究成果

(1) 非可換な人工ゲージ場の量子エンジニアリングと幾何学的位相の観測

ボース・アインシュタイン凝縮した **Rb** 原子気体に対して、4 つの **Rb** 原子の超微細構造基底状態間 ($|F=2, m_F=1\rangle$, $|F=2, m_F=0\rangle$, $|F=1, m_F=-1\rangle$, $|F=1, m_F=0\rangle$) を結びついでマイクロ波を照射し、周期結合した量子4準位系を構築した。マイクロ波強度と位相を精緻に制御することで、以下のように5つのガンマ行列の線形結合で書かれるハミルトニアンをエンジニアリングした。

$$H(\mathbf{q}) = -\frac{\hbar}{2} \sum_{i=1}^5 q_i \gamma_i$$

このハミルトニアンの固有エネルギーは任意のパラメータに対して基底と励起エネルギーがそれぞれ二重縮退するという特徴がある。実験で、パラメータ空間上の一点で、固有状態の一つを準備し、マイクロ波の位相を **2**、エネルギーギャップに対してゆっくりと変化させた。始状態と終状態を比べたところ、同じパラメータ空間上の固有状態であるはずにもかかわらず、全く異なることが明らかとなった。これは、量子状態が幾何学的位相を獲得したことに起因する。良く知られているベリー位相は、エネルギー非縮退を仮定しており、**0** から **2** までの値しか取らない。従って、始状態と終状態の違いは高々、位相因子の分だけである。これに対して、固有エネルギーが二重縮退している場合には、幾何学的位相を獲得によって **2x2** ユニタリー行列で表現されるユニタリー変換が可能である (図1)。この幾何学的位相は **Wilczek-Zee** 位相 (非可換ベリー位相) と呼ばれ、以下のように表現される。

$$U_C = P \exp \left(i \int_C \mathbf{A}_q \cdot d\mathbf{q} \right)$$

ここで、 \mathbf{A}_q はベリー接続 (人工ゲージ場) であり、本研究の非可換で **SU(2)** のゲージ対称性を有する。私たちはまず、上記の実験で終状態が理論的に期待される状態と矛盾が無いことを確認した。

1 つの始状態のみでは **Wilczek-Zee** 位相 (因子) U_C は決定できない。そこで、私たちは複数の始状態に対して終状態の測定を行い、量子プロセス・トモグラフィを用いて、測定した **Wilczek-Zee** 位相 (因子) を評価することにした。まず、最尤推定を用いて、プロセス行列を推定し、フィデリティを評価した。理論値との比較から、位相掃引の向きが互いに異なる **2** つの測定でそれぞれ **98%**、**96%** という高いフィデリティで幾何学的な量子操作を行うことができていることが明らかとなった。このフィデリティは状態準備と測定のエラー (**SPAM** エラー) も含んでいる。 **Wilczek-Zee** 位相 (因子) U_C は固有状態の取り方に因るゲージ依存する物理量である。そこで、ゲージ不変な測定量として、ウィルソン・ループによって特徴付け、理論とよく一致することが明らかとなった。これらの成果は論文 [S. Sugawa et al., *Science* **360**, 1429 (2018).] に掲載された。本研究は、**Berry** 位相を一般化した幾何学的 **Wilczek-Zee** 位相の観測に成功した本成果

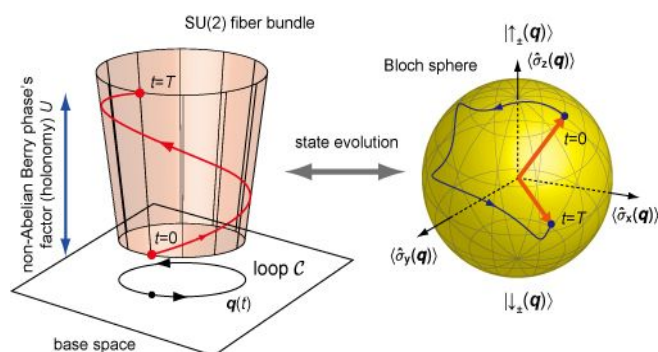


図1. (左) ファイバー束による非可換な **SU(2)** ベリー位相獲得のイメージ。ループに沿って擬断熱的に量子状態を周期的に時間発展させると、非可換ベリー位相の獲得により、終状態は位相因子の分だけ始状態と異なる。(右) ブロッチ球による **SU(2)** ベリー位相獲得のイメージ。縮退部分空間、**SU(2)** ベリー位相の獲得はブロッチ球とブロッチベクトルの回転で表現できる。

は非可換幾何学的位相を用いたスピン・デバイスや高エネルギー現象等の量子シミュレーションや量子センサー、ホロノミック量子コンピューティングへの応用展開が期待される。

(2) 極低温リュードベリ原子集団を用いた多体ダイナミクスの観測

光格子によって立方格子状に配列された原子集団をリュードベリ励起することで、ファンデルワールス相互作用に起因するピコ秒スケールの多体スピンドイナミクスを観測することに成功した (V. Bharti *et al.*, arXiv:2201.09590, 責任著者, 論文投稿中)。光格子中に生成した約3万原子からなる極低温 Rb 原子の単一占有モット絶縁体を広帯域パルスレーザーによって **35D** のリュードベリ状態へ励起し、多体スピンドイナミクスをアト秒精度の時間領域ラムゼイ干渉によって観測した (図 2)。その結果、長距離リュードベリ相互作用によって干渉縞のコントラストと位相がピコ秒スケールで高速に時間変化していることが明らかになった。長距離イジング模型を用いた理論解析によって、平均場近似と半古典近似である **Discrete Truncated Wigner** 近似では実験結果を全く説明できないことが明らかになった。これらの結果は、ピコ秒スケールでリュードベリ原子間に働く長距離相互作用によって多体相関が形成されていることを意味している。さらに、移動平均クラスター展開を用いた理論解析によって、少なくとも第 2 近接相互作用による寄与があることも明らかにした。

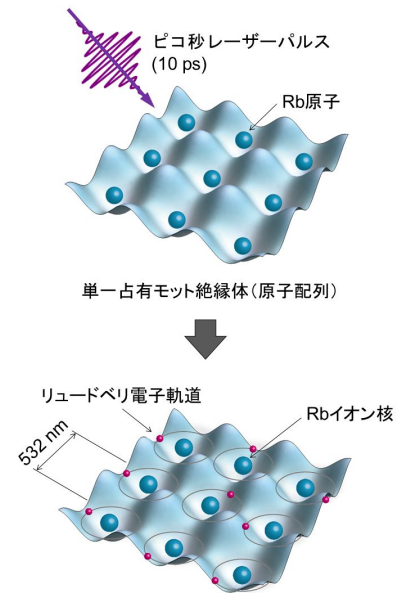


図 2. 光格子中の極低温 Rb 原子の単一占有モット絶縁体を広帯域パルスレーザーによってリュードベリ励起し、多体ダイナミクスを誘起する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Schaefer Florian, Fukuhara Takeshi, Sugawa Seiji, Takasu Yosuke, Takahashi Yoshiro	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 素川 靖司	4. 巻 58
2. 論文標題 冷却原子で探るトポロジカル不変量とモノポール	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 数理科学 2020年6月号（サイエンス社）	6. 最初と最後の頁 53-59
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Putra Andika, Salces-Carcoba F., Yue Yuchen, Sugawa Seiji, Spielman I.B.	4. 巻 124
2. 論文標題 Spatial Coherence of Spin-Orbit-Coupled Bose Gases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 053605 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.053605	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 該当する
1. 著者名 V. Bharti, S. Sugawa, M. Mizoguchi, M. Kunimi, Y. Zhang, S. de Leseleuc, T. Tomita, T. Franz, M. Weidemüller, K. Ohmori	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultrafast many-body dynamics in an ultracold Rydberg-excited atomic Mott insulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv.2201.09590	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） 10.48550/arXiv.2111.12314	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Yeelai Chew, Takafumi Tomita, Tirumalasetty Panduranga Mahesh, Seiji Sugawa, Sylvain de Leseleuc, Kenji Ohmori	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultrafast energy exchange between two single Rydberg atoms on the nanosecond timescale	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv.2111.12314	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) 10.48550/arXiv.2111.12314	査読の有無 無
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 Sugawa Seiji, Salces-Carcoba Francisco, Yue Yuchen, Putra Andika, Spielman I. B.	4. 巻 7
2. 論文標題 Wilson loop and Wilczek-Zee phase from a non-Abelian gauge field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 144, 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41534-021-00483-2	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 該当する

1. 著者名 素川靖司、富田隆文、Sylvain de Leseleuc、安藤太郎、武井宣幸、大森賢治	4. 巻 56
2. 論文標題 アト秒精度の極低温・超高速量子シミュレータ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理 (アグネ技術センター)	6. 最初と最後の頁 243~256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Seiji Sugawa
2. 発表標題 Geometric Wilczek-Zee phase from a non-abelian gauge field and its application
3. 学会等名 第2回冷却原子研究会「アトムの会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 素川靖司、F. Salces-Carcoba、Y. Yue、A. Putra、I. B. Spielman
2. 発表標題 幾何学的Wilczek-Zee位相の観測
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 素川 靖司
2. 発表標題 光格子を用いたアト秒精度の極低温・超高速多体量子シミュレータの開発
3. 学会等名 第1回Q-LEAP次世代レーザー領域シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021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		
ドイツ	Heidelberg University		