

## 研 究 報 告 書

### 「極低温ドレスト原子集団の超精密制御による非可換トポロジカル量子現象の探索」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 素川 靖司

#### 1. 研究のねらい

レーザー冷却によって生成される極低温原子は、高い制御性を有し、不純物の影響を受けないという特長があり、量子多体現象の量子シミュレーションを行うプラットフォームとして注目されている。例えば、光格子中にトラップされたフェルミ原子は強相関電子系を記述する重要なモデルであるフェルミ・ハバードモデルで記述され、高温超伝導体のメカニズム解明など寄与することが期待されている。一方で、中性原子は、「電荷」がないために、電子のように電磁場中のローレンツ力やスピン軌道相互作用に起因する多様でかつ重要な物理現象をそのままではシミュレートできない。これに対して、近年、これらの効果を量子エンジニアリングする人工ゲージ場と呼ばれる手法で複写、考案され、電子の Aharonov-Bohm 位相をレーザーによる量子力学的な位相の獲得によって模擬することでトポロジカル格子モデルを光格子で実現したり、さらにはスピン・軌道相互作用を人工的に冷却原子に対して導入したりすることができるようになった。これらの系は量子多体効果によって、基礎的にも実用上においても重要性の高い多体量子状態が現れることが理論的に予測されており、分数量子ホール状態における非可換エニオンや2次元ラシュバ・スピン軌道相互作用をするフェルミ原子系におけるマヨラナ・フェルミオンはトポロジカル量子計算を行う量子ビットへの応用が非常に期待されている。これらのトポロジカル秩序相をはじめとする量子多体状態の学理を解明することは、制御性の高い冷却原子系を用いた量子情報処理のプラットフォームを構築していく上で重要である。本研究課題では、これらの将来的な応用上の重要性を見据えて、この人工ゲージ場の手法を非可換ゲージ場へ応用・展開することで、これに起因する幾何学的、トポロジカル量子多体現象の実現とその学術的理解を目指す。具体的には、スピン・軌道相互作用には含まれない、縮退したエネルギーバンドに人工非可換ゲージ場をエンコードする量子エンジニアリング技術の開発し、量子シミュレーションによって新奇な幾何学的・トポロジカル量子現象の観測と理解、および制御することを目指す。

## 2. 研究成果

### (1) 概要

実験プラットフォームとなるルビジウム原子(Rb)のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成装置の開発を進め、キーとなるシステムの多くを完成させた。超高真空装置を立ち上げ、3次元磁気光学トラップによって  $10^8$  個以上の Rb 原子を 100 マイクロケルビン以下までレーザー冷却することに成功した。高出力近赤外レーザーを集光した光トラップにレーザー冷却によって生成された原子集団を用いた移行することにも成功した。冷却の最適化を進めていくことで、BEC 生成へと至る。

人工非可換ゲージ場をパラメータ空間内に量子エンジニアリングすることに成功し、原子が獲得する非可換なベリー位相を観測することに、量子縮退原子気体において初めて成功した。さらに、これを特徴づけるゲージ依存しない物理量であるウィルソン・ループを断熱的に測定することにも世界に先駆けて成功した。ルビジウム原子の超微細構造基底状態の内の4準位系をラジオ波とマイクロ波によって結合し、縮退したエネルギー基底状態を構築した。縮退したエネルギー状態は、人工非可換ゲージ場の影響を受けて、非可換なベリー位相を獲得する。さらに、量子プロセス・トモグラフィによって、非可換ベリー位相因子のプロセス行列を再構成し、高いフィデリティで量子操作が実現していることと示すとともに、プロセス行列からウィルソン・ループを評価することに成功した。ウィルソン・ループは人工非可換ゲージ場を特徴づける重要な物理量であり、精度よく測定できたことは、量子シミュレーションを進めていく上でとても意義がある。

上記の研究を踏まえて、極低温原子を用いた幾何学的・トポロジカル量子現象を観測するためのプラットフォームの実装を進めた。具体的には、光格子とドレスト原子のための光源のために光学系を設計し構築した。また、マクロな原子集団を用いて、幾何学的な量子現象を具体的な実験提案方法と手法を考案し、この量子現象の観測へ向けて実装を進めた。

### (2) 詳細

#### 研究テーマ A「超高安定な量子縮退原子気体の生成装置の開発」

実験プラットフォームとなるルビジウム原子(Rb)のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成装置の開発を進めた。超高真空装置を立ち上げ、2次元磁気光学トラップによって、Rb 蒸気から低速 Rb 原子ビームを生成するとともに、生成された Rb 原子ビームを超高真空槽内で3次元磁気光学トラップをすることで  $10^8$  個の Rb 原子を捕捉・冷却をした。さらに光糖蜜中にドップラー冷却限界を下回る 40 マイクロケルビンまで Rb 原子をレーザー冷却することに成功した。高出力近赤外レーザーを集光した光トラップにレーザー冷却によって生成された原子集団を用いた移行することにも成功しており、交差型の光トラップを構築し、光強度を下げながら、蒸発冷却を効率よく行うことで、さらに冷却が可能である。冷却の最適化を進めていくことで、本テーマの目的であった BEC 転移温度以下の原子集団の生成装置が達成できる。また、レーザー冷却に必要なレーザー冷却光源の光学系、レーザー周波数安定化システムを設計し、実装した。

#### 研究テーマ B「非可換ベリー位相の観測と Wilson ループによる特徴付け」

非可換ベリー位相の観測とウィルソン・ループによる特徴付けに成功した。幾何学的位相で

ある Berry 位相は様々な物理系・化学系において現れる普遍的な量子効果であり、凝縮系（電子・冷却原子系）においては量子状態を特徴づけるとともに、幾何学的にある種の揺らぎに対して堅牢であることを生かして、量子ビットの量子操作や磁力計などへの応用としても重要である。一方で、これを F. Wilczek と A. Zee らが 1984 年に理論的に拡張した非可換 Berry 位相は、ホロノミック量子計算や光格子系などで理論的に議論されることがあったが、実験的な観測例がほとんどなかった。非可換 Berry 位相は量子エンジニアリングした人工非可換ゲージ場中の原子の運動を決める上で重要な物理量であり、非可換 Berry 位相を観測し、特徴付けることは、本研究課題を進めていく上で取り組むべき重要なテーマの一つである。特に非可換ゲージ場においては、可換な場合ではゲージ依存しない物理量であるベリー位相やベリー曲率は、非可換な場合ではゲージ依存する物理量になるため、その特徴付けには注意が必要となる。本研究テーマでは、非可換 Berry 位相をゲージ依存しないウィルソン・ループを用いて高精度に特徴付けをすることに成功した。ウィルソン・ループは、クォークの閉じ込め問題において提唱され、高エネルギー理論、トポロジカル量子計算、トポロジカル絶縁体の分類などでほぼ理論でのみ議論されており、縮退したエネルギー状態を用いて断熱的操作によって測定された例はこれまでに一切なく、本研究で初めて実現した。

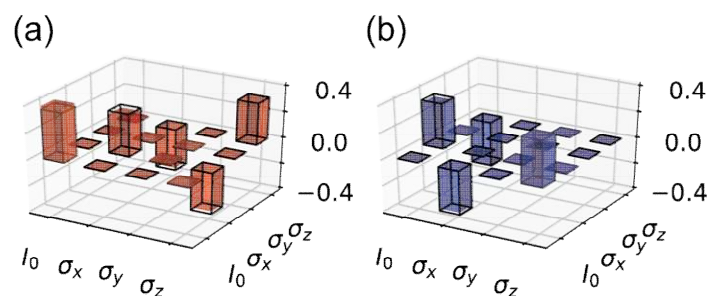


図1. 量子プロセス・トムグラフィによって得られた非可換ベリー位相因子のプロセス行列の(a)実部と(b)虚部。縮退部分空間中の量子操作のフィデリティは 98%。

実験系としては、内部自由度のある光トラップされたルビジウム原子ボース・アインシュタイン凝縮体を用意して、4つの超微細構造基底状態をラジオ波とマイクロ波で結合することで、堅牢な 2 重エネルギー縮退構造を持つ基底状態を用意した。制御パラメータが閉じた軌跡を描くように、断熱的にラジオ波の位相を制御して、始状態と終状態を比べることで、量子状態が幾何学的位相を獲得していることを観測した。さらに、量子プロセス・トムグラフィを取り入れた手法によって縮退部分空間内での幾何学的位相因子を評価することで、高いフィデリティで量子制御ができていることを明らかにした。また、量子プロセス・トムグラフィによって得られたプロセス行列からウィルソン・ループを評価し、非可換なベリー位相が満たす特性についても注目して、閉曲線を掃く向きに対する関係式とよく一致することも示した。さらに、ウィルソン・ループから、幾何学的位相に付随するホロノミーの固有値の偏角についての測定量も実験的に測定した。なお、本研究の実験測定は、研究テーマ A に先駆けて、アメリカ・メリーランド州 Joint Quantum Institute の Spielman 博士の研究グループ(2016年10月末まで所属)において、研究代表者が提案・主導して行ったものである。量子プロセス・トムグラフィを用いた解析、それによるウィルソン・ループ、ホロノミーの固有値の偏角の評価、理論的な解析を本研究課題

での位置づけを明確にした上で、本研究テーマに沿って原著論文としてまとめた。共著者の了解のもと、さがけ研究の成果として学術論文誌に投稿した。

#### 研究テーマ C「新奇的幾何学的・トポロジカル量子現象」

上記の研究テーマを踏まえて、極低温原子を用いた幾何学的・トポロジカル量子現象を観測するためのプラットフォームの実装を進めた。また、マクロな原子集団を用いて、幾何学的な量子現象を具体的な実験提案方法と手法を考案し、この量子現象の観測へ向けて実装を進めた。

### 3. 今後の展開

極低温原子を用いた幾何学的・トポロジカル量子現象の量子シミュレーションを進めていくことで、新奇的幾何学的・トポロジカル量子現象を観測できることが期待される。また、量子シミュレーションのもつ多様な自由度を制御する基盤技術を開発していくことで、観測手法や制御方法を発展させて、量子シミュレータとしての機能を高めていく。

### 4. 自己評価

#### 研究目的の達成状況

極低温原子を用いた量子シミュレーションを行うプラットフォームの開発を進め、キーとなるシステムの多くが完成し、人工非可換ゲージ場の量子エンジニアリングや量子シミュレーションへ向けて具体的な実験提案のもとで、開発を進めることができた。当初の研究計画と比較して、期間中に所属研究機関が変わったことなども影響して、装置開発が全体的として遅れたことは否めず、今後の課題としたい。一方で、当初の計画には大きな位置づけにはなかった非可換ゲージを特徴づける物理量として、非可換ベリー位相から得られるウィルソン・ループ等を実験的に観測して評価できることを世界に先駆けて示したことは大きな進展であり、今後、研究を発展させていくための基礎付けができたと考えている。

#### 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)、

本研究課題は研究代表者が個人で進めた。ゼロからの研究の立ち上げであったが、研究実施機関において研究スペース等、周囲のサポートもあり、比較的スムーズに進めることができた。また、研究費は、装置開発、レーザー光源の購入など備品を中心に効果的に使用することができたと考えている。

#### 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)

本研究で観測を目指した人工ゲージ場に起因する多体量子状態には、基礎的にも実用上においても重要性の高い量子状態が現れることが期待される。従って、これらの量子多体状態の学理を解明することは、物性機能を理解する基礎研究のみならず、高い制御性をもつ冷却原子系を用いた量子情報処理のプラットフォームを構築していく上でも重要であり、今後、研究を発展させていくことで、基礎科学及び社会・経済への波及効果が期待できる。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

Seiji Sugawa, F. Salces-Carcoba, Y. Yue, A. Putra, and I. B. Spielman, “Observation and characterization of a non-Abelian gauge field’s Wilczek-Zee phase by the Wilson loop”, arXiv:1910.13991 (2019).

### (2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

[口頭発表]

1. (招待講演) Seiji Sugawa, “Experimental extraction of Chern numbers from quantum-simulated monopoles”, Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 2018.12.15.
2. (招待講演) 素川靖司、「冷却原子を用いたトポロジカル不変量の測定」、応用物理学会量子エレクトロニクス研究会、軽井沢、2018.12.8.
3. (学会発表) 素川靖司, F. Salces-Carcoba, Y. Yue, A. Putra, I. B. Spielman, 「幾何学的 Wilczek-Zee 位相の観測」、日本物理学会 第 75 回年次大会(名古屋大学)、2019 年 3 月予定.
4. (学会発表) 素川靖司, F. Salces-Carcoba, A. Perry, Y. Yue, I. B. Spielman, 「ボース凝縮体の量子制御による非可換ヤン・モノポール観測と第 2 チャーン数の測定」、日本物理学会 第 72 回年次大会(大阪大学)、2017.3.19.