

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400422

研究課題名(和文)リー代数を用いた非断熱量子制御の研究

研究課題名(英文)Lie algebraic study of nonadiabatic quantum control

研究代表者

中原 幹夫 (NAKAHARA, Mikio)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：90189019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：中原は量子ゲートの高精度実装を研究した。また、BECにおけるベリー位相を用いた渦糸の作成を、大見とともに非断熱量子制御の方法で研究し、より効率の高い渦の生成を提唱した。さらに、高い効率を利用して十数回にわたりベリー位相を刻印する渦糸ポンプを研究した。丸山はアクセスが制限された状況下での量子制御の研究を行った。Nic Chormaicは、ナノ光ファイバーを用いて原子をトラップし、量子干渉、数個の光子のスイッチング、牽引ビームの実験を行った。Buschは非自明な幾何学配置におけるBECの相分離、回転超流体、1原子の任意の空間的重ね合わせ状態の非断熱生成、断熱通過の非線形物理系への適用を研究した。

研究成果の概要(英文)：Nakahara conducted research on high-precision implementation of quantum gates. He also analyzed formation of a vortex in BEC with Ohmi. The vortex phase is imprinted in terms of the Berry phase, where non-adiabatic quantum control has been fully employed to attain high efficiency. The method can be applied more than ten times to pump the vortex phase to create a vortex with a huge winding number. Maruyama conducted research on quantum control of a physical system under restricted access. Nic Chormaic conducted experiments on quantum coherence, switching of several photons and tractor beam by making use of atoms trapped by a nano-optical fiber. Busch studied the phase separation of a BEC under nontrivial geometric configurations, rotating superfluid, non-adiabatic formation of an arbitrary spatial superposition state of a single atom, and application of adiabatic passage to nonlinear physical systems.

研究分野：数理系科学

キーワード：量子制御 断熱通過 非断熱量子制御 量子ゲート ナノ光ファイバー 冷却原子 ボース凝縮 制限アクセス

## 1. 研究開始当初の背景

量子ゲートの実装や、原子やイオンの状態の操作には多くの場合断熱制御が含まれる。このとき、ゲートの実装時間や状態操作の時間は、関係するエネルギー固有値のギャップの逆数によって制限される。例えば、我々は [E. H. Lapasar et al., J. Phys. Soc. Jpn., 80, 044002 (2011)] において、1次元光格子の中で原子を断熱的に移動させ、衝突させることにより、選択的に2量子ビットゲートを実現する提案を行った。この提案は、いくつかのステップに断熱量子制御が含まれており、それにより、与えられたフィデリティを実現するには実装時間が10ms前後と長くなることを示した。限られたコヒーレンス時間の中でできるだけ多くのゲート操作を行うには、この実装時間を短くすることが望まれる。また、原子やイオンで、直接行列要素がない状態  $|1\rangle, |3\rangle$  の間で遷移を起こすには、STIRAP (Stimulated Raman Adiabatic Passage) という方法が知られている。STIRAPでは、Dark State とよばれる状態  $|2\rangle$  を導入し、まず  $|2\rangle$  から  $|3\rangle$  の遷移を起こす Stokes パルス照射し、そのパルスに重ねて  $|1\rangle$  から  $|2\rangle$  へのポンパルス照射することにより、Dark State を量子状態が占有することなく  $|1\rangle$  から  $|3\rangle$  への遷移を起こさせるものである。これらのパルスは十分ゆっくり変化しており、制御は断熱的である。

本研究は、量子ゲートの実装や量子系の制御にこれらの過程を適用する上で、非断熱量子制御をとりこみ、実装時間や制御時間を短縮する可能性を追求する。

## 2. 研究の目的

量子回路に基づく量子コンピュータや量子情報処理においては、高精度の量子ゲートの実装が本質的である。中性原子やイオンを使った量子コンピュータでは、従来量子ゲートの実装には1で述べたように、STIRAPなど断熱量子ゲートを用いる操作が用いられてきた。しかし断熱量子制御はその実装に時間がかかる。デコヒーレンスを避けるためには、短時間でゲートを実装する非断熱量子制御がはるかに有利である。本研究では、Lewis-Riesenfeld不変量を用いた非断熱量子制御や Demirplak, Rice, Berry による、断熱過程を非断熱的に再現する非断熱量子制御を用いて、量子ゲートを短時間で実装することを目的とする。また、光・物質相互作用

の実験家と協力して、本研究で提案する非断熱量子ゲートの実証実験を行う。

また、従来から研究している、低精度のゲートを組み合わせて高精度のゲートを実装する複合パルスの研究も継続して行う。

## 3. 研究の方法

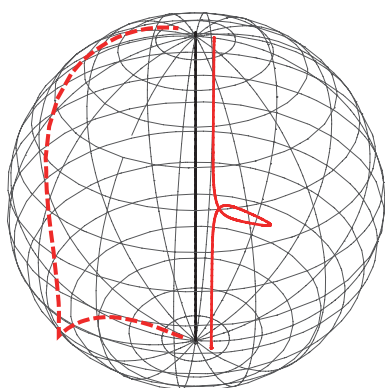
研究代表者中原はすでに、研究分担者、研究協力者と量子制御に関する共同研究を行っているが、本研究では、日本、アメリカ、ヨーロッパ、中国で独立に研究を行っているこれらの共同研究者を一つにまとめ、一致協力して非断熱量子制御の研究を行う。海外の研究協力者はすべて自分の研究資金を持っているので、毎年1回は全員が集まり、研究成果の発表や意見交換ができるワークショップを開催する。本科研費は主に中原がこの組織の中で活動することに使用される。また、統括グループ(中原, Busch, Gungordu)と各グループの限定ワークショップも随時開催し、意見交換を頻繁に行う。場合によっては、沖縄科学技術大学院大学で開催される量子制御のワークショップに代表者、分担者、協力者が参加し、ワークショップのサテライトセッションとして議論を行う。

この研究グループは、様々な非断熱量子制御を用いて断熱制御プロセスを非断熱化する。研究対象は、量子ゲートのみならず、冷却原子や量子ドットなども視野に入れる。得られた研究成果は専門雑誌に公表し、研究者の間にひろく知らしめる。

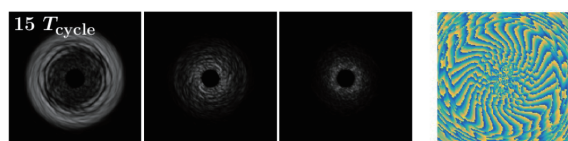
## 4. 研究成果

代表者中原は、分担者大見、研究協力者増田、Güngördü と協力して、冷却原子(アルカリ金属原子のボース凝縮体)における渦糸のトポロジカルな生成に Demirplak, Rice, Berry による、非断熱量子制御を適用し、より効率の高い渦糸の生成を理論的に提案した。渦糸のトポロジカルな生成では、磁気トラップされた凝縮体に時空間的に変化する磁場を印可し、Berry位相を凝縮体に押印することにより、非自明な巻き数をもつ位相を実現する。Berry位相は断熱変化に伴う位相であるために、この方法では渦糸の生成に時間を要するが、渦糸の生成途中で原子の準位間のギャップが消滅する時空点があり、多くの原子がトラップから漏れてしまう。漏れる原子数を減らすには、Berry位相を短時間で非断熱的に押印すればよい。我々は

そのために Demirplak, Rice, Berry の非断熱量子制御を使って、外場を制御することにより、断熱的な制御と同じ結果を非断熱的に得ることができることを示した (S. Masuda *et al*, Phys. Rev. A **93**, 013626 (2016).). 下図の実線は制御磁場、破線はスピンの期待値を表す。スピンの期待値は本来の断熱変化からずれているが、これは制御磁場を閉じ込め磁場と同一のコイルで発生させるためにゲージ変換を施したためであり、最終結果は変わらない。



上に述べた方法では、渦系生成後も多くの原子を残すことができる。したがって、渦系の位相を何度も押印する「渦系ポンプ」が可能となる。中原と増田はフィンランド Aalto 大学のグループと共同研究を行い T. Ollikainen *et al*, Phys. Rev. A **95**, 013615 (2017) を出版した。この研究では、凝縮体を光トラップし、磁場はスピンの制御のみに用いた。数値計算の結果では、渦系の位相を 10 回以上押印することが可能であると示された。下図は押印を 15 回行ったときの、巻き数 30 の渦の密度プロファイルと位相を表す。



現在、量子ドットを用いた量子ゲートの実装にスピンに依存する STIRAP を用いる提案において、それを非断熱的に実装する方法を研究し、投稿中である (arXiv:1612.08389)。

分担者丸山は多体量子系において人為的アクセスが大きく制限された状況下で、系に関する予備知識がない条件でそのハミルトニアンなどのダイナミクスを決定するものを特定する方法を見出した。また、アクセスが限定されることによって誘起されるヒルベルト空間の構造についても知見を得、観測可能なダイナミクスについての同値類や、

制御 (不) 可能空間について数学的特徴付けを行った。また、制限アクセス状況下でのハミルトニアン集合はジョルダン代数をなすことを見出し、これまでの結果をさらに精緻化することに成功した。現実の量子制御も多体系の部分自由度へのアクセスにより実行されるため、本研究の結果は一般論の構築に役立つ。

分担者 Nic Chormaic は、光ナノファイバーで冷却原子をトラップする実験を行った。この実験は、原子と光ナノファイバーを用いた量子ネットワークの構築に寄与する。また、光ナノファイバーを用いて、AT 分離や EIT などの量子干渉実験を行った。EIT を用いて原子による完全に光学的なスイッチングを数個の光子レベルで実証した。さらに、モード間干渉を用いた冷却原子の牽引ビームを開発した。光ナノファイバーにおいて、カイラル光効果を生じる高次のモード伝播の完全な理論解析を行った。

分担者 Busch は非自明な幾何学的配置における、多成分 BEC の相分離、キック下の回転超流体における Abrikosov 格子上の密度超格子の出現、光格子の中の p 波状態の生成、1 原子の任意の空間的重ね合わせ状態の非断熱生成、BEC における空間的な断熱通過の最適条件の決定と非線形領域での最適パラメタ領域の解析的決定を行った。

毎年ワークショップを開催し、お互いの研究成果を公表して、次のステップにつながる議論を行った。ワークショップのリストは

1. Shortcut to Adiabaticity 2014, 2014 年 6 月 30 日-7 月 4 日, 上海大学 (中国).  
本研究グループからの発表者: 中原, Nic Chormaic, Busch, Chen.
2. QCLM 2015: Quantum Control of Light and Matter, 2015 年 1 月 14 日-16 日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県).  
本研究グループからの発表者: 中原, Nic Chormaic, Busch, 丸山, Chen, 増田, Sjöqvist, Güngördü.
3. Workshop on Quantum Control, 2016 年 2 月 25 日-26 日, 近畿大学 (大阪府).  
本研究グループからの発表者: 中原, Busch, 丸山.
4. OIST Workshop on Quantum Control, 2017 年 3 月 22 日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県).

本研究グループからの発表者:中原, Nic Chormaic, Busch, 丸山, Chen.

5. 主な発表論文等 (研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 13 件)

1. F. Le Kien, T. Busch, V. G. Truong, and S. Nic Chormaic, Chirality of light in hybrid modes of vacuum-clad ultrathin optical fibers, to appear in Communications in Physics (2017)
2. T. Ollikainen, S. Masuda, M. Möttönen, and M. Nakahara, Counterdiabatic vortex pump in spinor Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 査読有 **95**, 013615 1–7 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevA.95.013615
3. 丸山耕司, エントロピーの認識論的理解, 数理科学 査読無 **635**, 37–42 (2016).
4. J. L. Rubio, V. Ahufinger, Th. Busch, and J. Mompart, Optical conditions for spatial adiabatic passage of a Bose-Einstein condensate, Pys. Rev. A 査読有 **94**, 053606 1–9 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevA.94.053606
5. M. Sadgrove, S. Wimberger, and S. Nic Chormaic, Quantum coherent tractor beam effect for atoms trapped near a nanowaveguide, Scientific Report 査読有 **6**, 28905 1–13 (2016). DOI:10.1038/srep28905
6. S. Masuda, U. Güngördü, X. Chen, T. Ohmi, and M. Nakahara, Fast control of topological vortex formation in Bose-Einstein condensates by counterdiabatic driving, Phys. Rev. A 査読有 **93**, 013626 1–8 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevA.93.013626
7. L. J. O’Riordan, A. C. White, and Th. Busch, Moiré superlattice structures in kicked Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 査読有 **93**, 023609 1–6 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevA.93.023609
8. A. White, T. Hennessy, and T. Busch, Emergence of classical rotation in superfluid Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A 査読有 **93**, 033601 1–5 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevA.93.033601
9. A. Hosoya, K. Maruyama, Y. Shikano, Operational derivation of Boltzmann distribution with Maxwell’s demon model, Scientific Report 査読有 **5**, 1–9 (2015). DOI: 10.1038/srep17011
10. R. Kumar, V. Gokhroo, K. Deasy, S. Nic Chormaic, Autler-Townes splitting via frequency up-conversion at ultralow-power levels in cold  $^{87}\text{Rb}$  atoms using an optical nanofiber, Phys. Rev. A 査読有 **91**, 053842 1–5 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevA.91.053842
11. R. Kumar, V. Gokhroo, and S. Nic Chormaic, Multi-level cascaded electromagnetically induced transparency in cold atoms using an optical nanofiber interface, New J. Phys. 査読有 **17**, 123012 1–7 (2015). DOI: 10.1088/1367-2630/17/12/123012
12. M. Owari, K. Maruyama, T. Takui, and G. Kato, Probing an untouchable environment for its identification and control, Phys. Rev. A 査読有 **91**, 012343 1– (2015). DOI: 10.1103/PhysRevA.91.012343
13. T. Ichikawa, J. G. Filgueiras, M. Bando, Y. Kondo, M. Nakahara, and D. Suter, Construction of arbitrary robust one-qubit operations using planar geometry, Phys. Rev. A 査読有 **90**, 052330 1–6 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevA.90.052330

[学会発表](計 30 件)

1. M. Nakahara, Counter-diabatic vortex pump in spinor Bose-Einstein condensate, OIST workshop on Quantum Control, 2017 年 3 月 22 日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県).
2. K. Maruyama, Hilbert space structure induced by limited access to quantum system,

- OIST workshop on Quantum Control, 2017年3月22日, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄県).
3. Th. Busch, Interactions in rotating quantum systems,  
OIST workshop on Quantum Control, 2017年3月22日, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄県).
  4. S. Nic Chormaic, Ultrathin optical fibres for studies on cold Rb atoms,  
OIST workshop on Quantum Control, 2017年3月22日, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄県).
  5. M. Nakahara, Quantum computer solves traveling salesman problem efficiently,  
Shanghai Jiao-Tong University Combinatorics Seminar, 2017年3月18日, 上海交通大学(中国).
  6. M. Nakahara, Solving traveling salesman problem with quantum computer,  
Japan-Korea workshop on algebra and combinatorics (招待講演, 国際学会), 2017年2月09-11日, 熊本大学(熊本県).
  7. M. Nakahara, Two topics from quantum computing you may be interested in ,  
2016 China-Korea International Conference on Matrix Theory with Applications (招待講演)(国際学会), 2016年12月28-31日, 上海大学(中国).
  8. S. Nic Chormaic, Atomic quantum engineering with nanofibres II,  
Invited lecture (招待講演), 2016年12月03日, QSciTech, Macquarie University, Australia.
  9. 中原幹夫, T. Ollikainen, 増田俊平, Mikko Möttönen,  
非断熱量子制御を用いた Spinor BEC における Vortex Pumping, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016年09月13-16日, 金沢大学(石川県).
  10. M. Nakahara, Designing Robust Quantum Gates against Errors,  
Workshop on Quantum Computing and Computational Quantum Mechanics, 2016年08月12日-13日(招待講演)(国際学会), University of Jyväskylä, Finland.
  11. Th. Busch, Controlling Quantum Systems with Spatial Adiabatic Passage,  
New Trends in Complex Quantum System Dynamics (招待講演)(国際学会), 2016年5月27日, Cartagena, Spain.
  12. Th. Busch, Superfluid Properties of multi-component BECs,  
Workshop on Cold Atoms (招待講演)(国際学会), 2016年5月16-17日, Pune, India.
  13. S. Nic Chormaic, Probing cold  $^{87}\text{Rb}$  using ultrathin optical fibres,  
Coherent Control of Complex Quantum Systems (招待講演)(国際会議), 2016年04月18-21日, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄県).
  14. M. Nakahara, Fast Control of Topological Vortex Formation in BEC by Counter-Diabatic Driving,  
Finnish Physical Society Meeting (国際学会), 2016年03月29-31日, Oulu, Finland.
  15. K. Maruyama, Partial Identification of Hamiltonian,  
Workshop on Quantum Control (招待講演)(国際学会), 2016年02月25-26日, 近畿大学(大阪府).
  16. Th. Busch, Controlling Quantum Systems with Spatial Adiabatic Passage,  
Workshop on Quantum Control (招待講演)(国際学会), 2016年02月25-26日, 近畿大学(大阪府).
  17. K. Maruyama, Hamiltonian identification under limited access with minimal pre-knowledge,  
Workshop on Recent Topics in Quantum Information Science (招待講演)(国際学会), 2016年01月08日, Adam Mickiewicz University, Poland.
  18. K. Maruyama, Hamiltonian identification under limited access with minimal pre-knowledge,  
Workshop on quantum information processing and quantum control, (招待講演)(国際学会).

- 学会), 2015年11月05日, CNRS-Telecom ParisTech INFRES, France.
19. M. Nakahara, Decoherence Free Subspace, Noiseless Subsystem and Group Representation, Workshop on Mathematical Aspects of Quantum Information Science (招待講演) (国際学会), 2015年07月13-17日, Tsinghua Sanya International Mathematics Forum, China.
  20. M. Nakahara, Improved Topological Vortex Formation in BEC of Alkali Atoms, QCLM2015: Quantum Control of Light and Matter (招待講演), 2015年1月14日-16日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県).
  21. K. Maruyama, Hamiltonian identification under limited access with minimal pre-knowledge, QCLM2015: Quantum Control of Light and Matter (招待講演), 2015年1月14日-16日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県).
  22. S. Nic Chormaic, A hybrid system based on optical nanofibres for probing and trapping atoms, QCLM2015: Quantum Control of Light and Matter (招待講演), 2015年1月14日-16日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県).
  23. Th. Busch, Engineering of Quantum Systems by Controlling Interactions, QCLM2015: Quantum Control of Light and Matter (招待講演), 2015年1月14日-16日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県).
  24. M. Nakahara, Nonadiabatic holonomic quantum gates, Shortcuts to Adiabaticity 2014, Shanghai (招待講演) (国際学会), 2014年6月30日-7月4日, Shanghai University, China.
  25. S. Nic Chormaic, Manipulation cold atoms with optical nanofiber guided light, Shortcuts to Adiabaticity 2014, Shanghai (招待講演) (国際学会), 2014年6月30日-7月4日, Shanghai University, China.
  26. Th. Busch, Controlled dynamics in Strongly correlated many body systems,

Shortcuts to Adiabaticity 2014, Shanghai (招待講演) (国際学会), 2014年6月30日-7月4日, Shanghai University, China.

ほか4件.

〔図書〕(計1件)

1. K. Maruyama and D. Burgarth, Gateway Schemes of Quantum Control for Spin Networks in Electron Spin Resonance (ESR) Based Quantum Computing, pp. 167-192, Springer (2016).

〔その他〕

(該当無し)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中原 幹夫 (NAKAHARA, Mikio)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号: 90189019

(2) 研究分担者

丸山 耕司 (MARUYAMA, Koji)

大阪市立大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 00425646

ニコーマック シーレ (NIC CHORMAIC, Sile)

沖縄科学技術大学院大学・その他の研究科・教授

研究者番号: 10715288

ブッシュ トーマス (BUSCH, Thomas)

沖縄科学技術大学院大学・その他の研究科・教授

研究者番号: 30715272

大見 哲巨 (OHMI, Tetsuo)

削除: 平成27年3月13日

近畿大学・理工学部・研究員

研究者番号: 70025435