

平成22年4月30日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540422

研究課題名 (和文) スケーラブル量子コンピューティングを目指した量子ビット間相互作用の研究

研究課題名 (英文) Study of Qubit-Interaction toward a Scalable Quantum Computer.

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

研究成果の概要 (和文) : 現在提案されているさまざまな量子ビットの中から, 最もデコヒーレンスに強く, かつ制御可能性が期待される系として中性原子を取り上げ, この系の弱点である「選択的制御の欠如」を克服する方法を研究した. 中性原子を, 共存する近接場光と光格子のポテンシャルでトラップすれば, 量子コンピュータとして要求されるすべての条件を満たすスケーラブルな量子コンピュータが, 既存の技術で実現できることを示した.

研究成果の概要 (英文) : After through study of existing proposals of qubits, we have chosen neutral atom as a candidate for a potentially scalable qubit, which is controllable and robust against decoherence. We proposed a scheme to overcome the lack of selective controllability, which is a difficulty associated with this system. We have shown that a system of neutral atoms trapped by near-field optical traps and optical lattices satisfies all the requirements for a scalable quantum computer within currently available technology.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：量子コンピュータ, 量子ビット, 中性原子, トポロジカル量子計算, 冷却 Fermi 原子, 非古典的相関

## 1. 研究開始当初の背景

スケーラブルな量子コンピュータを実現する上で, 大きな障害として, デコヒーレンスと量子ビット間相互作用がある. 相互作用は2つの量子ビット間に2量子ビットゲート

を作用させる上で, 重要な役割を果たすが, 一方, 必要のないときにそれが存在すると, 意図しないゲートを作用させることになるので, 不要な時にはオフにできることが望まれる. NMRでは refocusing をもちいて, 実効

的に相互作用を切ることはできるが、そのために、余分なパルスを用いるので、ゲート設計が煩雑となる。

本研究では、いくつかの物理系を用いて、各物理系の持っているメリットを持ち寄ることにより、相互作用の問題点の克服を図ることを提案した。

## 2. 研究の目的

1. に述べた問題点を克服するために、複数の種類の量子ビットを用いることを提案する。ある量子ビットは外界との相互作用が弱く、デコヒーレンスに強いが、一方量子ビット間の相互作用も弱く、2量子ビットゲートを実装することが困難である。一方、ある量子ビットは強く相互作用するが、相互作用をオフにできない。これらの問題を克服するには、その用途に応じて量子ビットを使い分けることが必要となる。本研究では、そのために必要な量子ビットの探索と、相異なる量子ビット間の量子情報の交換を研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 現在使われている量子ビットの検証を行い、その中から、もっともデコヒーレンスに強く、かつ制御可能性が期待される系として中性原子を選んだ。この系のゲートの実装を理論的に研究し、そのメリットとデメリットの検証を行った。

(2) トポロジカル量子コンピュータを実現することが期待される冷却フェルミ原子の  $p$  波超流体を研究する。

(3) ゲートを実装する上で、通常の物理学者の研究では見落とされがちな、数学的手法を研究する。これには Lie 群の Cartan 分解などが含まれる。

(4) 量子コンピュータを実現するには、物系の研究だけでなく、量子系の特性を知らなければならない。本研究では、このような基礎研究もその範囲に含めた。

## 4. 研究成果

(1) 現在提案されている量子ビットを総括的に研究し、その成果を中原と大見の著書 "Quantum Computing: From Linear Algebra to Physical Realizations" の Part II に約 200 ページにまとめた。そこで取り扱った物理系の中から、もっともデコヒーレンスに強く、かつ制御可能な系として中性原子を取り上げた。この系の弱点である「選択的制御の欠如」を克服する方法を構築した。当初は複数の種類の量子ビットを使わなければ相互作用を制御できないと考えていたが、中性原子を近接場光と光格子のポテンシャルでトラップすれば、すべての条件を満たすスケーラブルな量子コンピュータが実現できることを示した。

(2) 実現すれば、同じくデコヒーレンスに強く、完全な制御が可能であると思われる冷却フェルミ原子の  $p$  波超流体を用いたトポロジカル量子コンピュータにおける 1 量子ビット・ゲートと 2 量子ビットゲートの実装を提案した (arXiv: 0906.4444)。

(3) デコヒーレンスを克服するには、能率的なゲートの実装が必要である。そのために Lie 群の Cartan 分解を用いてゲートの実装をすることを解析した。

(4) 物理系における量子コンピュータの実現のみならず、エンタングルメント以外の量子系の特徴を表す「非古典的相関」などの基礎的な研究をした。

## 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 10 件)

① Y. Ota, Y. Goto, Y. Kondo and M. Nakahara, "Geometric quantum gates in liquid-state NMR based on a cancellation of dynamical phases", Physical Review A, 査読有, vol. 80, 2009, pp. 052311 1-7.

② A. SaiToh, R. Rahimi and M. Nakahara, "Economical  $(k, m)$ -threshold controlled quantum teleportation", Physical Review A, 査読有, vol. 79, 2009, 062313 1-9.

③ K. Sato, S. Nakazawa, R. Rahimi, T. Ise, S. Nishida, T. Yoshino, N. Mori, K. Toyota, D. Shiomi, Y. Yakiyama, Y. Morita, M. Kitagawa, K. Nakasuji, M. Nakahara, H. Hara, P. Carl, P. Hofer, and T. Takui, "Molecular electron-spin quantum computers and quantum information processing: pulse-based electron magnetic resonance spin technology applied to matter spin-qubits", Journal of Materials Chemistry, 査読有, vol. 19, 2009, pp. 3739-3754.

④ Y. Ota, M. Bando, Y. Kondo and M. Nakahara, "Implementation of holonomic quantum gates by an isospectral deformation of an Ising dimer chain", Physical Review A, 査読有, vol. 78, 2008, pp. 052315 1-5.

⑤ A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara, "Nonclassical correlation in a multipartite quantum system: Two measures and evaluation" Physical Review A, 査読有, vol. 77, 2008, pp. 052101 1-9.

⑥ A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara, "Evaluating measure of nonclassical correlation in a multiparticle quantum system", International Journal of Quantum Information, 査読有, vol. 6, Supp.

1, 2008, pp. 787-793.

⑦R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Coherence Conservation of a Qubit Coupled to a Thermal Dissipating Environment", International Journal of Quantum Information, 査読有, vol. 6, Supp. 1, 2008, pp.779-785.

⑧R. Rahimi, A. SaiToh and M. Nakahara "Bang-Bang Control of Entanglement in Spin-Bus-Boson Model", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, vol. 76, 2007, pp. 114007 1-7.

⑨Y. Kondo, M. Nakahara, S. Tanimura, S. Kitajima, C. Uchiyama, and F. Shibata, "Generation and Suppression of Decoherence in Artificial Environment for Qubit System", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, vol. 76, 2007, pp. 074002 1-7.

⑩K. Sato, R. Rahimi, N. Mori, S. Nishida, K. Toyota, D. Shiomi, Y. Morita, A. Ueda, S. Suzuki, K. Furukawa, T. Nakamura, M. Kitagawa, K. Nakasuji, M. Nakahara, H. Hra, P. Carl, P. Hofer, and T. Takui, "Implementation of molecular spin quantum computing by pulsed ENDOR techniques: direct observation of quantum entanglement and spinor," Physica E, 査読有, vol. 40, 2007, pp. 363-366.

[学会発表] (計 40 件)

①中原幹夫, 近藤康, 井手俊毅, 大見哲巨, "近接場光や赤方離調されたレーザ光にトラップされた多量子ビットレジスター", 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 23 日, 岡山大学.

②M. Nakahara and T. Ohmi, "Topological Quantum Computing with p-Wave Superfluid", American Physical Society March Meeting, 16 March, 2010.

③A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara, "Nonclassical correlations in quantum systems: detection and quantification", Workshop on Quantum Information Science, Hong Kong University, Hong Kong, China, January 7-8 2010.

④ M. Nakahara, "Scalable neutral atom quantum computer with interaction on demand", Workshop on Quantum Information Science, Hong Kong University, Hong Kong, China, January 7-8 2010.

⑤M. Nakahara, "Physical realizations of quantum computer", Pre-workshop lectures of Workshop on Quantum Information Science, Hong Kong University, Hong Kong, China, January 6, 2010.

⑥A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara,

"Linear and Nonlinear Maps for Detection and Quantification of Nonclassical Correlations", International Conference on Quantum Information and Technology, National Institute of Informatics, Tokyo, Japan, December 2-5, 2009.

⑦ M. Nakahara, "Topological Quantum Computing with p-Wave Superfluid", Max-Planck Institute fur Quantenoptics MPQ, Garching, Germany, November 20, 2009.

⑧R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Nonclassical Correlation Witness", International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics, Komaba, University of Tokyo, Japan, November 18-20, 2009.

⑨M. Nakahara, "Computing with Quanta", The College of William & Mary, Williamsburg, VA, USA, November 2, 2009.

⑩R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Time Evolution of Non-Classical Correlated States for an Economical Approach to Quantum Information Processing", 2nd International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems, Koshiba Hall, Tokyo University, Tokyo, Japan, October 13-16, 2009.

⑪H. Tomita, V. Ebrahimi and M. Nakahara, "Automatic factorization of SU(2n) matrix", QIT20, 広島大学, 5月 21-22 日, 2009.

⑫A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara, "Economical Measure of Nonclassical Correlation", QIT20, 広島大学, 5月 21-22 日, 2009.

⑬A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara, "Economical  $(k, m)$ -threshold controlled quantum teleportation", The 4th Workshop on Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography, University of Waterloo, Waterloo, Canada, May 11-13, 2009.

⑭H. Tomita, V. Ebrahimi and M. Nakahara, "Simple method for automatic factorization of SU(2n) matrix", 日本物理学会第 64 回年次大会, 立教大学, 3月 30 日, 2009.

⑮ 安田泰雅, 多田雅人, 中原幹夫, "アゾベンゼンの量子ビットへの応用についての検討", 日本物理学会第 64 回年次大会, 立教大学, March 3月 27 日, 2009.

⑯ M. Nakahara, "Topological Vortex Formation in BEC of Alkali Atoms as Quantum State Engineering", Condensed Matter Seminar, Department of Physics, Princeton University, Princeton, US, March 13, 2009.

⑰M. Nakahara, "NMR Quantum Computing"

Symposium on Experimental Aspects of Quantum Computing, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, January 5, 2009.

⑱ M. Nakahara, "Holographic Quantum Computing", Symposium on Quantum Computing and Quantum Information Processing, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, January 3-4, 2009.

⑲ A. SaiToh, R. Rahimi and M. Nakahara, "Quantum Metagame Extension", 日本物理学会, 岩手大学, 盛岡, Japan, 9月20-23, 2008.

⑳ 大見哲巨, 中原幹夫, "Quantum Computing Using Vortices and Majorana Modes in a Cold Fermi  $p$ -Wave Superfluid", 日本物理学会, 岩手大学, 盛岡, Japan, 9月20-23, 2008.

21) A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara, "Quantum Wipe Effect", Symposium on Decoherence Suppression in Quantum Systems, 神戸, 9月7-10日, 2008.

22) Y. Ota, M. Bando, Y. Kondo, and M. Nakahara, "Holographic Quantum Gates using Isospectral Deformations of Ising Model", The 8th Asian Conference on Quantum Information Science, Korean Institute of Advanced Study, Seoul, Korea, August 25-31, 2008.

23) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Variants of Controlled Quantum Teleportation: Toward Controllers' Majority Vote", The 8th Asian Conference on Quantum Information Science, Korean Institute of Advanced Study, Seoul, Korea, August 25-31, 2008.

24) A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara, "Quantum metagame of a noncooperative bimatrix game", The Ninth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, University of Calgary, Calgary, Canada, August 19-24 2008.

25) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Multiparty Controlled Quantum Teleportation of an Arbitrary Quantum State via W-State", The Ninth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, University of Calgary, Calgary, Canada, August 19-24 2008.

26) A. SaiToh, R. Rahimi, and M. Nakahara, "EnCE: a class of maps to detect and quantify nonclassical correlation", The 4th Asia Pacific Conference in Quantum Information Science, Palm Cove, Cairns, Australia, July 2-5.

27) M. Nakahara "Lecture on Quantum Computing", Introduction to Quantum

Systems and Devices, Finland, 15-18 June, 2008

28) Y. Ota, M. Bando, Y. Kondo, and M. Nakahara, "Analytic construction of holographic quantum gates in an Ising-type dimer-chain model", QIT18, 東京大学, 5月22-23日, 2008.

29) V. Ebrahimi, R. Rahimi, and M. Nakahara, "Controlled teleportation of an arbitrary unknown two-qubit entangled state", 日本物理学会第63回年次大会, 近畿大学, 3月25日, 2008.

30) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Entanglement and Decoherence in Molecular-Based Quantum Computer", 日本物理学会第63回年次大会, 近畿大学, 3月26日, 2008.

31) M. Goto, Y. Ota, Y. Kondo, and M. Nakahara, "Implementation of geometrical quantum gates by a two-loop method in liquid-state NMR systems", 日本物理学会第63回年次大会, 近畿大学, 3月26日, 2008.

32) M. Bando, Y. Ota, Y. Kondo, and M. Nakahara, "Holographic quantum computing in a dimer model", 日本物理学会第63回年次大会, 近畿大学, 3月26日, 2008.

33) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Quantum wipe effect for coherence conservation," First International Conference on Quantum Error Correction, Univ. of Southern California, Los Angeles, USA, 17-21 December, 2007.

34) Y. Ota, Y. Kondo, and M. Nakahara, "Implementation of geometrical quantum gates by a two-loop method in liquid-state NMR systems", QIT17, 岡山, 11月21-22日, 2007.

35) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Coherence conservation by quantum wipe effect," Noise, Information and Complexity at Quantum Scale, Ettore Majorana Centre, Erice, Italy, 4-10 November, 2007.

36) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Generation of entanglement and suppression of decoherence in ENDOR based quantum computing," The IICQI'07, Kish Island, Iran, 7-10 September, 2007.

37) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Entanglement and decoherence in electron spin bus systems for quantum computing," The 7th AQIS'07, Kyoto Univ., 2-6 September, 2007.

38) M. Nakahara, "Quantum Computing: An Overview", Summer School on Mathematical Aspects of Quantum Computing, Kinki Univ., Japan, 27-29 August, 2007.

- 39) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Bang-bang control of entanglement in spin-bus-boson model," Summer School on Mathematical Aspects of Quantum Computing, Kinki Univ., Japan, 27-29 August, 2007.
- 40) R. Rahimi, A. SaiToh, and M. Nakahara, "Generation of entanglement and suppression of decoherence for ensemble quantum computing," The 7th Canadian Summer School on Quantum Information, Univ. of Waterloo, Canada, 27-31 May, 2007

[図書] (計1件)

- ① Mikio Nakahara and Tetsuo Ohmi, Taylor & Francis, "Quantum Computing: From Linear Algebra to Physical Realizations", 2008, pp. 1-421 + xvi.

[その他]

- ・ホームページ等

<http://alice.math.kindai.ac.jp>

- ・サイエンスカフェ

三省堂 (京都店) 「量子と情報」講演, 2009年6月13日, 京都駅西利にて.

[http://www.books-sanseido.co.jp/event/sc/history/post\\_10.html](http://www.books-sanseido.co.jp/event/sc/history/post_10.html)

- ・日本物理学会大阪支部公開シンポジウム「量子力学と技術の接点: 量子暗号・量子情報」にて「NMR量子コンピューティング」を講演. 2008年12月21日(日), 大阪大学中之島センター10F 佐治敬三メモリアルホールにて.

<http://www.phys.sci.osaka-u.ac.jp/jps-osk/2008koukai/index.html>

## 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

大見哲巨 (OHMI TETSUO)

近畿大学・理工学部・シニアサイエンティスト

研究者番号: 70025435