

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887034

研究課題名(和文) スケーラブル量子情報処理のための新奇制御法の構築

研究課題名(英文) Proposal of novel control schemes for scalable quantum information processing

研究代表者

藤井 啓祐 (Fujii, Keisuke)

京都大学・白眉センター・特定助教

研究者番号：40708640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模な量子情報処理を実現するための多体量子系における新奇な制御法の理論的提案を行い、実験的実現性の検討を行った。個々の物理系の特性に基づいて、分散型とバルク型に分類し、それぞれの物理系にあった制御法の構築を行った。特に、大域的制御と散逸過程による量子誤り訂正を用いることによって超寿命の量子コヒーレンスが実現できることが明らかになった。核・電子スピン系を用いた実装提案も行った。

研究成果の概要(英文)：In this project, we proposed novel schemes for scalable quantum information processing and investigated their experimental feasibility. Specifically, we classify physical systems for quantum information processing into distributed systems with modular scalability and bulk systems with monolithic scalability. Then, we constructed schemes for scalable and fault-tolerant quantum information processing for each type of the physical systems. Especially, we show that in a bulk system we can realize a long-time quantum coherence by using quantum error correction with global control and dissipative feedback without any selective addressing of each individual particle in the system. We performed a feasibility study for an experimental realization with a nuclear-electron spin system and clarified experimental requirements.

研究分野：量子情報処理

キーワード：量子情報 量子計算 量子誤り訂正 トポロジカル符号

1. 研究開始当初の背景

実験室における現象を除いて、我々の日常の世界は、古典的世界観によって説明するものが殆どであり、量子的重ね合わせ状態や量子エンタングルメント等を垣間みる事はほぼあり得ない。これは、量子状態のもつ量子コヒーレンスが外界との結合に非常に脆く、我々の日常レベルのマクロな世界で量子性を保持することが困難なためである。しかし、この事実は裏を返すと、人類の未踏領域である巨大な量子コヒーレンスの制御が実現されると、量子シミュレーションや量子コンピュータに代表される量子情報処理、磁気センサーや標準技術といった超精密計測など、我々の日常の常識を遥かに超えた新たなパラダイムを提供する可能性があることを意味している。

ここ 10 年の量子系の制御に関する実験の発展はめざましく、光学系・イオントラップ・超伝導量子ビット・光格子中の中性原子・固体中の電子・核スピン・半導体量子ドット等さまざまな物理系において、真に量子的な現象の観測や制御が普遍的に行えるようになってきた。例えば、最近のイオントラップ系の実験では 6 量子ビットに対する 100 回の量子演算が高い精度で成功している [B. P. Lanyon *et al.*, *Science* **334**, 57 (2011)]. また、超伝導量子ビットの実験では 5-9 量子ビットの制御が超高忠実度で実現されている [R. Barends *et al.*, *Nature* **508**, 500 (2014); J. Kelly *et al.*, *Nature* **519**, 66 (2015)]. しかし、100 量子ビットや 1000 量子ビットの規模の量子系を制御下に置き、「量子工学的」応用を行うのは依然として困難である。これは量子系の制御におけるスケラビリティ(大規模化)とフォールトトレランス(誤り耐性)の問題に起因する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スケールする、つまり大規模化を前提とした多体量子系における新奇な制御法を構築し、これまで人類の未踏領域である、多体量子系における巨大(多粒子

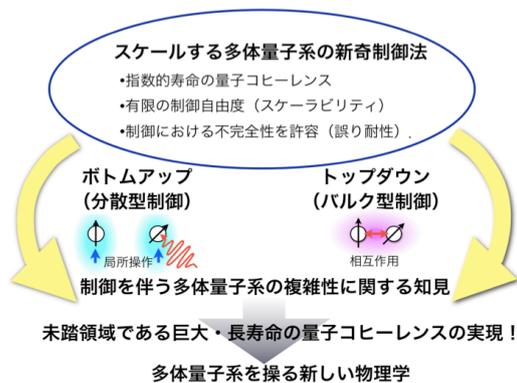


図1 本研究の目的とアプローチ.

数)で長寿命な量子コヒーレンスを実現するための理論を構築する事である(図1参照). このために、制御に要求される自由度はシステムサイズに依存せず有限であり、かつ有限の不完全性(雑音やシステムエラーなど)を許容するような制御法を構築・解析する. この結果、上質の量子コヒーレンスを必要とする量子コンピュータや量子シミュレータの実現に寄与する事は言うまでもなく、制御下にある多体量子系の複雑性・雑音に対する耐性に関する新たな知見を得ることにより、多体量子系を操る量子情報を新展開する.

3. 研究の方法

そもそも、なぜ量子系を制御し、本質的に量子的な現象を観測することが難しいのだろうか? 例えば、エンタングルメント(量子もつれ)は量子情報処理に必要な要素であり、量子性を示す代表的存在である. このエンタングルメントを生成するためには異なる量子系間の相互作用を必要とし、一方でエンタングルメントを利用(もしくは観測)するためには2つの量子系に選択的にアクセスする必要がある. しかし、この2つの要求を同時に満たすことは非常に難しい. 例えば、相互作用を強くするために2つの粒子を接近させると、個々の粒子に対して光子等を用いた選択的アクセスが困難となる. このような二つの相矛盾する要求が量子情報処理の実現が困難である所以である. この点を克服するために、本研究では量子情報処理を担う個々の物理系固有の性質に着目し、どのようなモデルであれば現実世界において実現可能であるか検討し、スケラブルな量子情報処理への近道を探索するという方法を採用した. 具体的には、少数量子系からボトムアップ的にシステムを構成する「分散型制御」と大規模な量子系に対する限定的な制御を用いてトップダウン的にシステムを構成する「バルク型制御」に分けて検討を行った(図2参照).

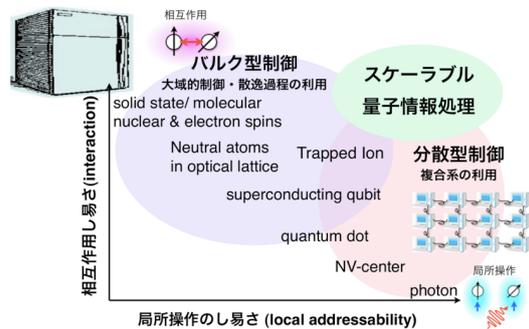


図2 個々の物理系の特性を少数自由度の高度な制御を得意とする「分散型」と、大自由度の大域的制御を得意とする「バルク型」で整理した図.

4. 研究成果

(1) 分散型制御

分散型量子計算では、離れた局所量子系間に光子等を用いてエンタングルメント生成をする必要がある。集光効率や光子損失などを考慮するとエンタングルメント生成の速度は、局所量子系内部の量子演算の速度に比べ非常に遅いことが予想される。このため、局所系には長いコヒーレンス時間を持つ量子メモリとしての性質が要求される。一方、局所量子系内の演算を行うプロセッサには、制御に使う相互作用が必要となるため、必然的に雑音も増える。このため、局所量子系に求められるこれらメモリとプロセッサは別々の物理系を用いて複合的(ハイブリッド)に構成するのが理想的である。このハイブリッド局所量子系の実現を目指し、コヒーレンス時間は短い制御の自由度が高い超伝導量子ビットと、長いコヒーレンス時間を有する NV-中心・核スピンからなる複合量子系を用いた分散型量子計算のモデルを構築し、制御に要求される条件を明らかにした。特に、量子メモリのコヒーレンス時間が長くなることによって、演算を担う超伝導量子ビットに求められる条件が緩和されることが明らかになった。

(2) バルク型制御

固体や分子(配位結合によって秩序だてて配列する超分子など)中の電子・核スピンなど、単一の物理系に大量の量子ビットが詰め込まれている物理系(バルク量子系)には、相互作用が豊富に存在している。しかし、このようなバルク量子系において、外界から個々の量子ビットに対して選択的にアクセスすることは不可能である。この問題を克服するために大域的制御(global control)を用いた新奇制御法を構成した(図3参照)。

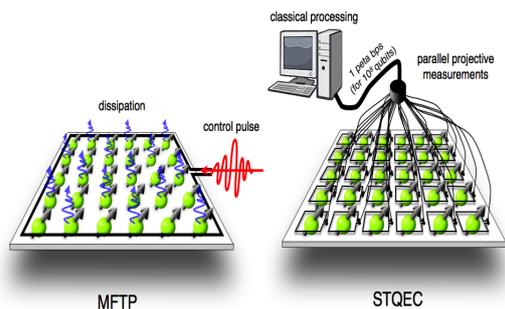


図3 大域的制御による量子誤り訂正(左)と選択的制御による量子誤り訂正(右)。大域的制御では、バルクの粒子すべてに選択的操作をする必要は全くない。

制御はシステム全体に対する包括的パルス制御によって実現が可能のため、量子ドット、超伝導量子ビット、光格子上的中性原子等の物理系においても、その制御の複雑性を著しく改善することが期待できる(例えば、超伝導量子ビットであれば情報の読み出し、

射影測定を制御するための電極を配する必要が無くなり、各超伝導量子ビットのエネルギーの不均一性を修正する DC 電極の配線だけでよくなる)。

特に、外界からの雑音によって生じたエントロピーを下げるための操作として、散逸過程を積極的に利用した量子誤り訂正法を構築した。具体的には、雑音から保護する量子層と、量子層において増加したエントロピーを吸い上げるための冷却層の2つの層から構成されるような物理系から成る(図4参照)。冷却層における散逸過程と2つの層の間の相互作用を用いて間接的に量子層の量子コヒーレンスを安定化する方法について数値的・理論的解析を行い、量子コヒーレンス時間を大きく改善できることを示した(図5参照)。

固体や超分子中の核・電子スピンの用いることを想定し、実装の議論を行った。核・電子スピン系は、核スピンが長い量子コヒーレンスを持つ一方、電子スピンは操作性が良く、またエネルギーの散逸(縦緩和)も核スピンに比べると容易であるからである。具体的な物理系の構成は、大阪大学基礎工学研究科北川研究室の根来氏と共同して進めた。最近の実験で得られている核スピン系のデコヒーレンス時間は1sec程度であり、電子スピンの初期電子化時間は100nsec、核・電子スピン間のハイパーファイン結合や電子スピン間のダイポール結合の強度は1-100MHzとして解析を行った。この結果、1msec毎に包括的制御による量子誤り訂正を行う事によって量子コヒーレンスが 10^6 sec持続することが明らかになった。今後実装にむけた更なる研究を行う。また、包括的制御と散逸によるバルク型制御は、スピン増幅等の精密測定への応用も可能であり、現在発展的研究を鋭意進めている。

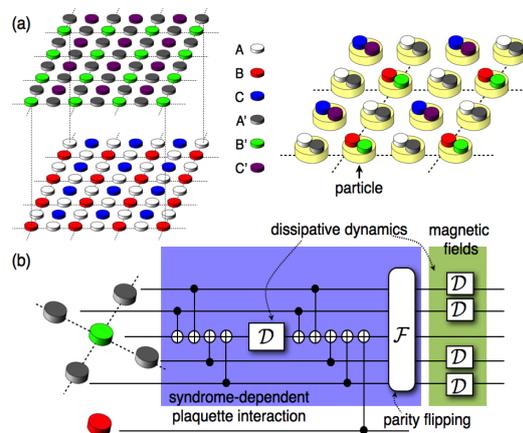


図4 (a) 提案したシステム。6種類の粒子を(核スピン A, B, C 及び、電子スピン A', B', C') が正方格子状に並べたもの。(b) 散逸を用いた量子誤り訂正のための大域的制御シーケンス。

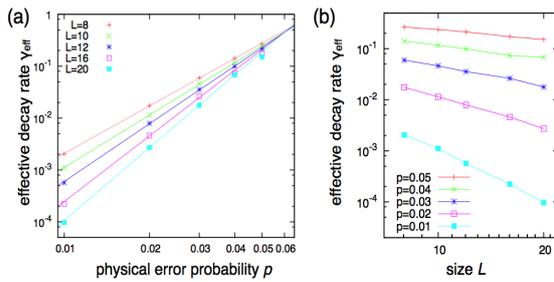


図 5 (a) 物理系のエラー確率に対して、大域的制御による量子誤り訂正を行った場合の実効デコヒーレンス率をプロットした図. システムサイズが大きくなるに従って、実効デコヒーレンス率は低くなる. (b) 実効デコヒーレンス率をシステムサイズに対してプロットした図. システムサイズに対して実効デコヒーレンス率は多項式の逆数で減少することが明らかとなった. つまり、システムサイズを大きくすることによって多項式的に量子コヒーレンスの寿命が伸びる.

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 8 件)

- (1) T. Morimae, K. Fujii, and J. F. Fitzsimons, “Hardness of classically simulating the one-clean-qubit mode”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 130502 (2014) [査読有り]
DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.130502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.130502)
- (2) A. Matsuo, K. Fujii, and N. Imoto, “Quantum algorithm for an additive approximation of Ising partition functions”, *Phys. Rev. A* **90**, 022304 (2014) [査読有り]
DOI: [10.1103/PhysRevA.90.022304](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.90.022304)
- (3) K. Fujii, M. Negoro, N. Imoto, and M. Kitagawa, “Measurement-Free Topological Protection Using Dissipative Feedback”, *Phys. Rev. X* **4**, 041039 (2014) [査読有り] DOI: [10.1103/PhysRevX.4.041039](https://doi.org/10.1103/PhysRevX.4.041039)
- (4) K. Fujii and T. Morimae, “Quantum Commuting Circuits and Complexity of Ising Partition Functions”, arXiv:1311.2128 [査読無し]
<http://arxiv.org/abs/1311.2128>
- (5) K. Fujii and S. Tamate, “Computational quantum-classical boundary of commuting quantum circuits” arXiv:1406.6932 [査読無し]
<http://arxiv.org/abs/1406.6932>

[学会発表] (計 27 件)

- (1) 藤井啓祐, 「ダイナミクスにおける量子と古典の境界」, 第 6 回基礎物理セミナー合宿, 箱根太陽山荘 (神奈川県足柄下郡), 2013/12/8 [招待講演]
- (2) 藤井啓祐, 「量子計算と基礎物理」, 基研研究会 量子情報物理学～量子情報と量子物理の本質的融合から新たな地平を開く, 京都大学基礎物理学研究所 (京都府京都市), 2013/12/05 [招待講演]
- (3) K. Fujii “Measurement-free topological protection using dissipative feedback”, Quantum Science Symposium ASIA-2013 Meeting, 東京大学山上会館 (東京都文京区), 2013/11/26 [招待講演]
- (4) K. Fujii and S. Tamate, “Computational quantum-classical boundary of commuting quantum circuits”, Gordon Research Conference on Quantum Science, Easton Massachusetts (United States of America), 2014/7/28
- (5) 藤井啓祐 「量子は何を計算できるのか?」 第 4 6 回 GRL 浜松セミナー” 若手研究者のための光・電子・情報科学に関する情報交換”, 静岡大学浜松キャンパス (静岡県浜松市), 2014/8/6 [招待講演]
- (6) 藤井啓祐, 「量子計算の基礎」, 基研研究会 若手のための量子情報基礎セミナー, 京都大学基礎物理学研究所 (京都府京都市), 2014/8/8 [招待講演]
- (7) K. Fujii, “Measurement-based quantum computation using thermal states of many-body Hamiltonian”, Australia-Japan Workshop on Multi-user Quantum Networks 2014, Sydney (Australia), 2014/10/22 [招待講演]
- (8) K. Fujii “Belief propagation in quantum information science: a brief review and possible applications”, Statistical Physics of Disordered Systems and Its Applications (SPDSA2015), 京都大学吉田泉殿 (京都府京都市) 2015/2/19 [招待講演]
- (9) 藤井啓祐, 「Instantaneous quantum polynomial time model とイジング分配関数」, 非ユニバーサル量子計算に関する研究会, 感パスイノベーションセンター東京 (東京都港区) 2015/3/30 [招待講演]

〔図書〕（計 2 件）

- (1) K. Fujii “TOPOLOGICAL PROTECTION OF QUANTUM INFORMATION” in Kinki University Series on Quantum Computing: Volume 9 Physics, Mathematics, and All that Quantum Jazz (edited by S. Tanaka, M. Bando, and U. GÜNGÖRDÜ) pp.103-118 (World Scientific 2014)
- (2) K. Fujii, “Quantum Computation with Topological Codes: from qubit to topological fault-tolerance”, 155 pages, to be published from SpringerBriefs,
<http://jp.arxiv.org/abs/1504.01444>

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

〔その他〕

アウトリーチ活動：

- (1)長野県立屋代高校・中学校（平成 25 年 7 月 19 日）「見るだけで変わる（分かる？）不思議な量子の世界」
- (2)大阪府立天王寺高校（平成 25 年 11 月 1 日）「見るだけで変わる（分かる？）不思議な量子の世界」
- (3)青森県立三本木高校（平成 26 年 1 月 16 日）「光でのぞく不思議な量子の世界」
- (4)大阪府立天王寺高校（平成 26 年 10 月 15 日）「量子コンピュータを創ろう」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 啓祐 (FUJII, Keisuke)

京都大学・白眉センター/大学院情報学研究科・特定助教

研究者番号：40708640