

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03795

研究課題名（和文）量子回路のモジュール化と量子制御の数学的および実験的研究

研究課題名（英文）Modularization of quantum circuits and mathematical and experimental study of quantum control

研究代表者

中原 幹夫（Nakahara, Mikio）

近畿大学・理工学総合研究所・研究員

研究者番号：90189019

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：中原は制御可能な非マルコフ環境下での量子情報の劣化を研究し、NMR量子コンピュータを用いて実証を行った。デコヒーレンスを抑制する方法として、断熱制御を短時間で実現する非断熱量子制御を研究し、非断熱量子制御を網羅的にまとめたPhilosophical Transactions of the Royal Society Aの特集号を編集した。

BuschとNic Chormaicは光・物質相互作用の研究を行い、光ファイバーをキャビティとして用いて複数の原子を結合することを提案した。ナノファイバー近傍での電気四重極遷移に伴うガイド光から原子への角運動の伝達などを研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在のNISQ(Near Term Intermediate Quantum)コンピュータを超える大規模量子コンピュータは、物流、創薬、物質設計、量子AIなど我々の生活に革命的な変革をもたらすと期待されている。その実現に対する障壁の一つにデコヒーレンスがある。本研究ではデコヒーレンスを解析し、それを克服する方法を提案した。分担者は、新たな複雑量子システムの探索とテストによって、量子技術の進化に貢献した。特に量子計測や量子シミュレーションの装置の改善に活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：Nakahara conducted research on the degradation of quantum information in controllable non-Markovian environments and demonstrated it using an NMR quantum computer. As a method to suppress decoherence, he studied non-adiabatic quantum control, which achieves adiabatic control in a short time, and edited a special issue of Philosophical Transactions of the Royal Society that comprehensively summarized non-adiabatic quantum control.

Busch and Nic Chormaic conducted research on the interaction of light and matter and proposed using optical nanofibers as cavities to couple multiple atoms. They studied the transfer of angular momentum from guided light associated with electric quadrupole transitions in the vicinity of a nanofiber to atoms.

研究分野：量子情報，量子計算

キーワード：デコヒーレンス 非マルコフ過程 非断熱量子制御 ナノ光ファイバー 光・物質相互作用 近接光

1. 研究開始当初の背景

量子系にたいして所望の操作,例えば(1)量子計算に必要なユニタリ行列(量子ゲート,量子回路)を量子系の時間発展演算子として実現する,(2)ある量子状態を別の量子状態に遷移させる,などを行うには Hamiltonian の制御が必要である.多くの場合,これは逆問題である.前者の例では必要とする量子ゲート U が与えられ,それを実現する Hamiltonian を求める.後者の例では2つの量子状態が与えられ,その間の遷移を起こさせる Hamiltonian を求める.しかし,例えば前者の場合 $U = e^{-iHt}$ を満たす H が求められても,それは現実の Hamiltonian ではない.なぜならば,この H は,多数の粒子が相互作用する項を含んでおり,1体および2体相互作用の和では表わされないからである.量子力学の教科書では,時間に依存する Hamiltonian $H(T)$ が与えられた時の時間発展演算子を $U(T) = \mathcal{T} \exp[-i \int_0^T H(t) dt]$ と書くが, $U(T)$ が与えられて $H(t)$ を求める逆問題を解くことは一般に困難で,多くの場合数値的解法に頼っている.本研究課題の核心をなす学問的問いは,一般の次元で $U(T) = U_n U_{n-1} \dots U_2 U_1$ と効率よく分解することである.ただし U_k は少数の量子ビット,例えば高々3量子ビットまたは4量子ビットのみに非自明に作用するユニタリ行列である.この U_n をモジュールとよぼう.このモジュールへの分解により,与えられたユニタリ行列を効率的に実装することが期待される.また実行時間が最短にする分解の探索など最適化問題も議論する.さらに各モジュールをサブリーマン測地線を用いて最短時間で実装することに挑戦する.

2. 研究の目的

本研究の目的は,前節で述べた問い,量子回路のモジュール化と各モジュールの実装,に対して,リー代数,微分幾何学,量子制御理論の専門家が一丸となって研究を行い,問いに対する解答を得ることである.さらに,より実験寄りの理論家と実験家を分担者および協力者に招き,我々が求めた解を具体的な物理系(原子系,光学・原子系,核スピン系など)の制御に適用することである.量子回路のモジュールへの分解が Cartan 分解により機械的に行えるようになると,量子回路の実装は,モジュールを積み木のように組み合わせる構成できる.その結果,回路の複雑さは変わらないものの,量子回路の実装が飛躍的に簡単化するものと期待される

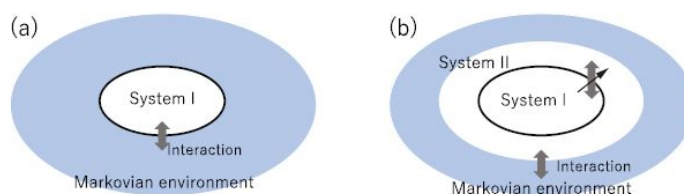
3. 研究の方法

上に述べた研究目的を遂行するために,量子制御の数学的研究を専門とする物理学者中原は他の物理学者,数学者とともに学際的解析を行い,その成果を Busch が実験的に検証できる形に応用し,それを近藤が NMR で, Nic Chormaic が光・原子系で実証する.中原は物理学のみならず,リー代数,微分幾何学にも造詣が深く,また近藤とは NMR 実験に関する共著論文もある. Nic Chormaic は中性原子を用いた量子コンピュータで中原,近藤と共著論文がある.本研究ではこれらの経験を生かして目的を達成する.また,中原は2004年にフィンランドの研究者と量子回路の数値的モジュール化を行い,論文として発表している.現在このグループは超伝導量子コンピュータを保有しており,可能であればそれを用いた実証も試みる.

4. 研究成果

いくつかの要因により,当初の研究計画は変更を余儀なくされた.量子回路の最適化は,量子コンピュータの制御プログラムである qiskit が,プログラム transpiler を提供しており,ある程度の最適化が自動的にできるようになった.また,新型コロナの流行により,沖縄やフィンランドへの訪問も妨げられた.その結果,中原と近藤は近畿大学で NMR を用いたデコヒーレンスの研究を行い,またデコヒーレンスの克服を目的とする非断熱量子制御の研究に集中した.沖縄の Busch と Nic Chormaic は予定通り光・物質相互作用の研究を行った.

(1) 中原,近藤,ポスドクの久木田は,TMS 分子 $C_4H_{12}Si$ を用いて,制御可能な非マルコフ緩和過程を研究した.通常開放系のモデルでは,下図の(a)のように注目する系 System I と



環境系は直接相互作用するが,我々のモデル(b)ではその間に System II が存在して, System I の情報が環境に散逸する前に,いったん System II に保存される.これにより,散逸は非マルコフ的になる.TMS 分子では,中央の Si が System I, H_{12} が System II としてふるまう.環境は,分子が溶け込んでいる溶媒である.下図は TMS 分子を概念的に図示したものである.中央の白丸が Si (System I) を,周りの黒丸が 12 個の H (System II) を表す.さらに, System

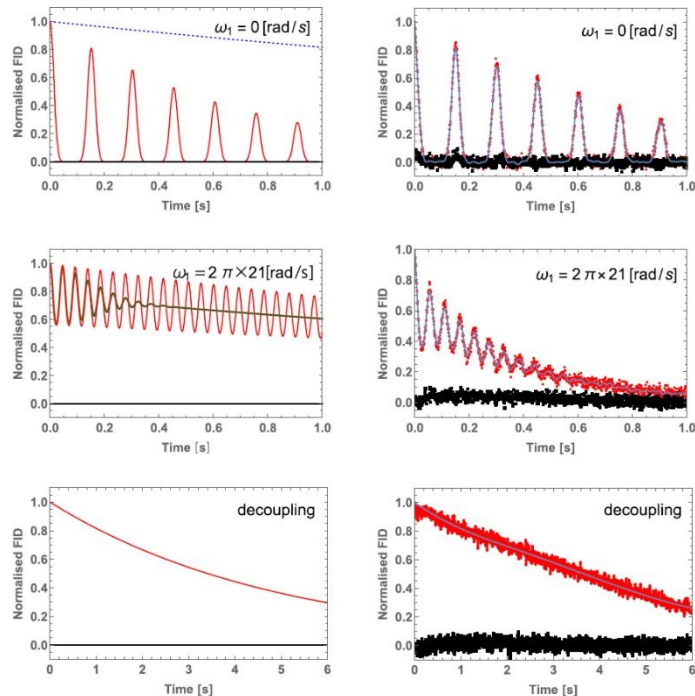
II の水素核に共鳴する高周波を印可して，System I と System II の間の相互作用を連続的に制御することにより，散逸はマルコフ的から非マルコフ的まで連続的にスキャンすることができる．この系のハミルトニアンは

$$H = J \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_z^{(0)} \cdot \sigma_z^{(i)}}{4} + \omega_1 \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_x^{(i)}}{2}$$

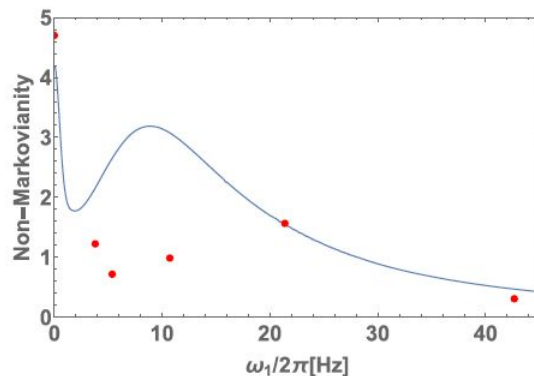
で与えられる．ここに(0)は Si 核を表し，(i)は i 番目の水素核を表す． ω_1 は x 方向の横磁場を表し，これを制御することにより，スピン間の結合定数 J を実効的に変化させることができる．



我々は，この系の時間変化を記述する Gorini-Kossakowski-Lindblad-Sudarshan (GKLS) マスター方程式を厳密に解くことにより，緩和を解析した．右に理論および対応する実験結果の一部を図示する．左側の図は Free Induction Decay (FID) の理論曲線で，右側の図は対応する実験結果である．赤は FID の実部を，黒は虚部を表す．横磁場は，上から $\omega_1 = 0, 2\pi \times 21, \infty$ である． $\omega_1 = 0$ は非マルコフ極限で，FID の指数関数的減衰は見られない．一方 $\omega_1 = \infty$ の極限では，System I と System II の間の結合は実効的に切断され，通常のマコフ的減衰を示している．中間領域 $\omega_1 = 2\pi \times 21$ では定量的な不一致が見られるが，定性的には整合している．



Non-Markovianity \mathcal{N} はトレース距離を用いて定義することができる．右の図は \mathcal{N} を ω_1 の関数としてプロットしたものである．ただし ω_1 の空間的非一様性は考慮してある．実線は理論値，赤点は実験値である．ここでも定量的なずれはあるが，ディップがある減衰曲線など定性的な振る舞いは再現されている．



- (2) 中原はデコヒーレンスを克服する方法として，ゲートや量子状態の遷移を短時間でやる方法を長らく研究してきた．断熱量子制御は忠実度の高い量子制御を行うことができるが，制御に長時間かかるのでデコヒーレンスの影響を受ける．そこで断熱量子制御と同じ結果を短時間で実現する方法がいくつか提唱された．これらは総称して”Shortcuts to adiabaticity”と呼ばれる．中原は共同研究者の Xi Chen, Yue Ban, 増田俊平とともにイギリス Royal Society が出版する学術誌 Philosophical Transactions of Royal Society A の特集号 “Shortcuts to adiabaticity: theoretical, experimental and interdisciplinary perspectives” の編集を行い，最先端の研究者の総合報告とオリジナルの記事をまとめた．また非断熱量子制御の 1 方法である Counter-diabatic 量子制御について総合報告を執筆した．この論文は総合報告ではあるが，いくつかオリジナルの例を構築した．

沖縄科学技術大学院大学の分担者 Thomas Busch と Sile Nic Chormaic は，全期間を通して光・物質相互作用の研究を行った．光と原子の間の結合は，量子ゲートの実装や離れた原子を結合させる上で重要な要素である．

彼らは光ナノファイバーの近接場に閉じ込められた原子を考えた。光ナノファイバーはキャビティとして機能するため、ほぼ任意の距離だけ離れた原子を結合するのに使用できる。

単一のナノファイバ から結合したナノファイバー系へ拡張した解析を行い、それらが原子の新しいトラップ配置を与えることを示した。このトラップは近接光の干渉に基づき、約 1mK で十分な深さをもち、数秒のコヒーレンス時間と数時間のトラップ寿命を持つ。今後の実験で結合を最適化することで、4 波混合の光学的深さを増すことができるように、実験作業に深層学習アルゴリズムを導入した。

ナノファイバーの近くの多重準位のアルカリ金属原子における Casimir-Polder ポテンシャルを解析し、(1)低エネルギーの励起状態のポテンシャルは正となりうる、(2)ゼロの周りで減衰振動をする、(3)原子とファイバーの距離のある領域で反発力となることを示した。これはポテンシャルが常に引力である基底状態と対比される。

2つの同一の平行ナノファイバー間の力を厳密なアレイ・モード理論を用いて解析した。その結果、偶アレイ・モードによる力は引力で、奇アレイ・モードによる力は斥力であることを示した。現在2つのファイバーの結合について、その輻射モードの決定による完全な記述が完成しつつある。

光ナノファイバーと2準位原子との相互作用を理論的および実験的に特徴づける研究に多くの進展があった。特に、光ナノファイバーの近接場を介した4重極相互作用、アレイ・モード理論を使った2つの平行な光ナノファイバー間の光学力、光ナノファイバー近傍での電気四重極遷移に伴うガイド光から原子への角運動量の伝達などの研究成果を強調したい。

これらすべての研究が、原子+ナノファイバーのハイブリッド量子システムのより良い制御につながると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Le Kien Fam, Nic Chormaic Sile, Busch Thomas	4. 巻 103
2. 論文標題 Optical trap for an atom around the midpoint between two coupled identical parallel optical nanofibers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063106 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.063106	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 -
1. 著者名 Kukita Shingo, Kondo Yasushi, Nakahara Mikio	4. 巻 22
2. 論文標題 Controllable non-Markovianity in phase relaxation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 103048 ~ 103048
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1367-2630/abbfcf	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 Nakahara Mikio, Chen Xi, Ban Yue, Masuda Shumpei	4. 巻 380
2. 論文標題 Preface to 'Shortcuts to adiabaticity: theoretical, experimental and interdisciplinary perspectives'	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20210284 1-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsta.2021.0284	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 Nakahara Mikio	4. 巻 380
2. 論文標題 Counterdiabatic formalism of shortcuts to adiabaticity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20210272 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsta.2021.0272	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 Le Kien Fam, Kornovan D. F., Nic Chormaic Sile, Busch Thomas	4. 巻 105
2. 論文標題 Repulsive Casimir-Polder potentials of low-lying excited states of a multilevel alkali-metal atom near an optical nanofiber	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 042817 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.105.042817	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 Le Kien Fam, Nic Chormaic Sile, Busch Thomas	4. 巻 105
2. 論文標題 Optical force between two coupled identical parallel optical nanofibers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063517 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.105.063517	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 -

1. 著者名 Le Kien Fam, Nic Chormaic Sile, Busch Thomas	4. 巻 106
2. 論文標題 Transfer of angular momentum of guided light to an atom with an electric quadrupole transition near an optical nanofiber	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013712 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.013712	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 -

1. 著者名 Le Kien Fam, Nic Chormaic Sile, Busch Thomas	4. 巻 107
2. 論文標題 Direction-dependent coupling between a nanofiber-guided light field and a two-level atom with an electric quadrupole transition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013713 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.013713	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 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 9件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Optical fiber-based traps for particle trapping, manipulation and characterization
3. 学会等名 SPIE Optics & Photonics: Optical Trapping and Optical Manipulation XVIII, San Diego, USA (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Using optical fibers for particle trapping and manipulation
3. 学会等名 Optical Manipulation and Structured Light, Yokohama, Japan (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikio Nakahara
2. 発表標題 Continuously Controllable Non-Markovianity in Phase Relaxation
3. 学会等名 NCTS Annual Theory Meeting 2021: Quantum Physics, Quantum Information, and Quantum Technologies (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S Nic Chormaic, A Vylegzhanin, Z Shahrabifarahani, A Raj, A Zaitsev, S Abdrakhmanov, W Li, J L Everett, D Brown
2. 発表標題 Probing cold atom interactions via optical nanofibers
3. 学会等名 SPIE Photonics West (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 From cold atoms to microbead manipulation using ultrathin optical fibres
3. 学会等名 IEEE-Optica IIT Bombay Photonics Student Chapters (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Using optical nanofibres to mediate cold atom interactions
3. 学会等名 DAALI Workshop "Delving into light-matter interactions and their applications" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Using optical nanofibres to mediate cold atom interactions
3. 学会等名 EOSAM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Manipulating and trapping particles from atoms to Janus spheres using optical nanofibres
3. 学会等名 Photon UK (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Optical nanofibre dipole traps and Rydberg atom interactions
3. 学会等名 APPC 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic, A Vylegzhani, Z Shahrabifarahani, A Raj, RK Gupta, D Brown, JL Everett
2. 発表標題 Hybrid quantum systems using optical nanofibres integrated with cold rubidium atoms
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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
研究 分担者	N I C C H O R M A I C S I L E (Nic Chormaic Sile) (10715288)	沖縄科学技術大学院大学・量子技術のための光・物質相互作用ユニット・教授 (38005)	
研究 分担者	B U S C H T h o m a s (Busch Thomas) (30715272)	沖縄科学技術大学院大学・量子システム研究ユニット・教授 (38005)	

	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
研究 協力者	森本 徹 (Morimoto Tohru)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	ギュンギョルド ウトカン (Gungordu Utkan)		
研究協力者	近藤 康 (Kondo Yasushi)		

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			
ロシア連邦	ITMO University			
中国	上海大学			