

2023

国立研究開発法人理化学研究所

量子コンピュータ研究センター

年間活動報告



目次

センター長ご挨拶	4
量子コンピュータ研究センター概要	5
連携	10
プレスリリース	11
受賞報告	12
量子技術イノベーション拠点概要	14
RQC 2023年度トピックス	17
チーム概要・活動報告	
• 超伝導量子エレクトロニクス研究チーム	18
• 超伝導量子シミュレーション研究チーム	20
• 超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット	22
• 超伝導量子計算システム研究ユニット	24
• ハイブリッド量子回路研究チーム	26
• 光量子計算研究チーム	28
• 光量子制御研究チーム	30
• 量子多体ダイナミクス研究チーム	32
• 浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム	34
• 半導体量子情報デバイス研究チーム	36
• 半導体量子情報デバイス理論研究チーム	38
• 量子計算理論研究チーム	40
• 量子情報物理理論研究チーム	42
• 量子計算科学研究チーム	44
• 量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム	46
• 量子複雑性解析理研白眉研究チーム	48
• 数理量子情報理研白眉研究チーム	50
• 理研 RQC- 富士通連携センター	52
• センター長室	54
研究紹介記事	55
発表論文リスト	60

センター長ご挨拶



量子コンピュータ研究センターは2021年4月に発足し、量子情報科学という新しい分野の最先端を切り開く量子コンピュータの開発を目標とし、ハードウェアからソフトウェア、基礎科学から応用技術までを対象とした幅広い研究に取り組んでいます。

来年2025年は量子力学理論の誕生100周年に当たります。量子力学は数多くの研究者の努力によって発展を遂げ、物理学の基礎理論として、科学技術の広範な領域にわたりその展開に寄与してきました。そして20世紀後半に生まれた量子情報科学では、量子力学の考え方を情報科学の領域にも適用して、新しい可能性を引き出すということに注目が集まっています。

量子コンピュータの研究開発は世界的にますます盛んに進められており、日進月歩で新しいアイデアや技術が生まれてきています。当センターでも、量子コンピュータの実現を目指して、超伝導方式、光方式、半導体方式の研究に挑んできましたが、2024年度からは冷却原子方式に関する取り組みも拡大して、研究開発を一層加速する予定です。異なる物理系を対象とする研究を同時並行で遂行することにより、互いに気付きあい学びあう機会を得て、シナジー効果により新たな知恵を生み出すことに期待しています。当センターでは他にも、新たなアプローチで量子情報処理のための基盤技術開発を目指す実験系研究チームや、量子情報理論、量子計算理論、量子アルゴリズム、量子アーキテクチャ、量子ソフトウェアなどの研究に取り組む理論系チームを擁し、基礎から応用、実験から理論まで多様な人材が協働し、日々、ブレイクスルーを目指した研究を行っています。

昨年度は、国産初号機となる超伝導量子コンピュータ実機「観」の公開に引き続き、クラウドサービスの運用を開始しました。また理研RQC-富士通連携センターでの2号機の公開も行い、大阪大学量子情報・量子生命研究センターでの3号機の公開にも協力しています。まだ発展途上の技術ですが、研究開発の輪を広げることでより多くの人々の叡智を結集して、将来の発展へつなげていくことを期待しています。

また当センターは、政府が推進する量子技術イノベーション戦略に基づき設置された「量子技術イノベーション拠点」全11拠点の中核となるヘッドクォーターおよび量子コンピューティング開拓拠点として、日本の量子技術研究開発の発展・連携促進に向けた活動を行っています。産学官に跨る拠点活動を通して、各分野の専門家が垣根を超えて互いの知見を共有し横の連携を深めることにより、イノベーションのサイクルを加速し科学技術の発展に寄与するとともに、社会へ貢献することを目指しています。

2023年度にはセンター内に新たに3つのチームを設置し、研究分野の拡充を図っています。

AI・高性能スーパーコンピュータ・半導体・光通信など発展の著しい最先端技術分野と、量子情報科学の融合も重要なトピックスになっています。今後さらに理研内外との連携を強化して、多様な考え方や専門性を持った研究者を集めて学際的な議論を活性化し、次世代の量子技術を担う人材を育成するとともに、量子コンピュータの実現に向けた研究開発に邁進します。

量子コンピュータ研究センター概要

量子力学の原理に基づく革新的な情報処理技術としての量子コンピュータの実現を目指して、ハードウェアからソフトウェアまで、また基礎科学から応用まで一貫した研究開発に取り組み、量子技術の可能性を拡げていきます。

量子コンピュータ研究センターは2023年度に新たに3つの研究チームを設置し、合計18の研究チームからなり、超伝導方式、光方式、半導体方式などさまざまな物理系での量子コンピュータ開発、さらには、量子アルゴリズム、量子計算理論など理論系の研究開発を推進しています。

量子コンピュータ研究センター

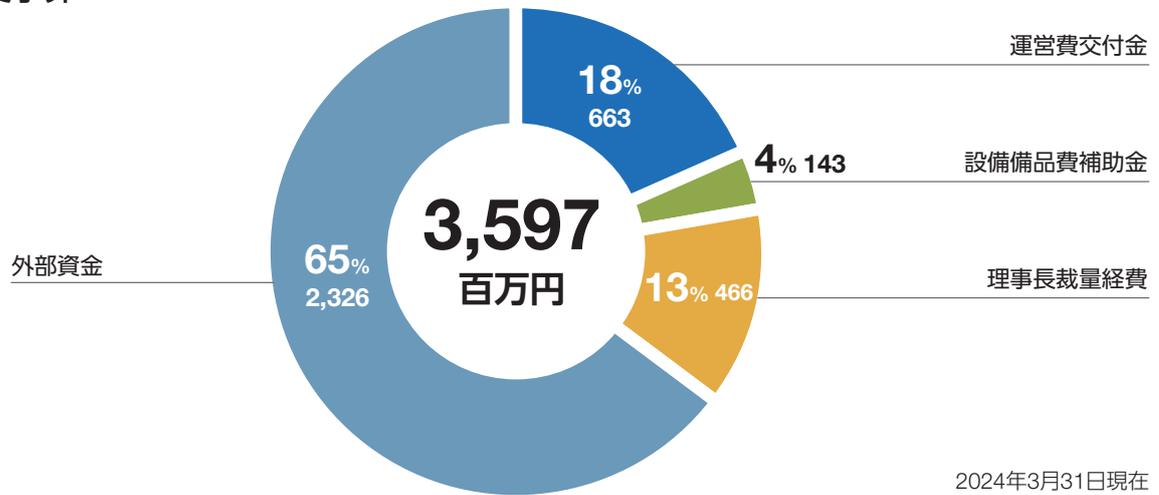
センター長： 中村 泰信
副センター長： 古澤 明・萬 伸一

- RQCアドバイザー・カウンシル
- 超伝導量子エレクトロニクス研究チーム：中村 泰信
- 超伝導量子シミュレーション研究チーム：蔡 兆申
- 超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット：阿部 英介
- 超伝導量子計算システム研究ユニット：田淵 豊
- ハイブリッド量子回路研究チーム：野口 篤史
- 光量子計算研究チーム：古澤 明
- 光量子制御研究チーム：米澤 英宏
- 量子多体ダイナミクス研究チーム：福原 武
- 浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム：川上 恵里加
- 半導体量子情報デバイス研究チーム：樽茶 清悟
- 半導体量子情報デバイス理論研究チーム：LOSS Daniel
- 量子計算理論研究チーム：藤井 啓祐
- 量子情報物理理論研究チーム：NORI Franco
- 量子計算科学研究チーム：柚木 清司
- 量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム：後藤 隼人
- 量子複雑性解析理研白眉研究チーム：桑原 知剛
- 数理量子情報理研白眉研究チーム：REGULA Bartosz
- 理研RQC-富士通連携センター：中村 泰信
- センター長室：萬 伸一

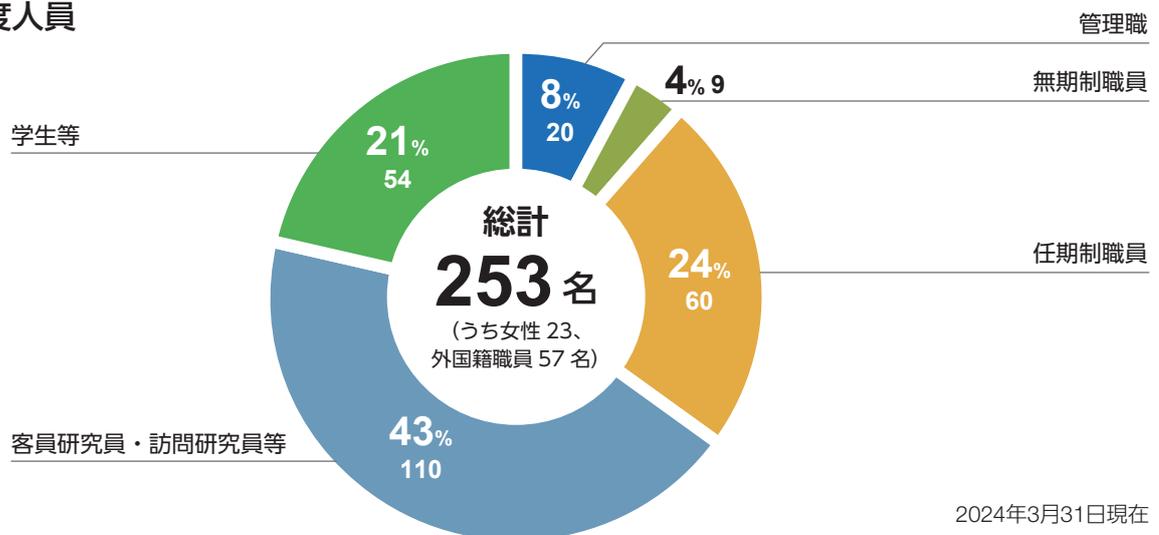
■ 超伝導 ■ 光 ■ 原子 ■ 電子 ■ 半導体 ■ 理論 ■ マネジメント

量子コンピュータ研究センター概要 (つづき)

2023年度予算



2023年度人員



RQC Colloquiums and RQC Seminars

FY2023 RQC Colloquium

量子コンピュータセンターでは、著名な研究者を定期的に招聘しRQC Colloquiumを開催しています。2023年度は12回実施し、RQCだけでなく他センターにも周知し、活発な議論を行いました。

No.	Date	Speaker	Affiliation	Title
11	April 19, 2023 (online)	Prof. Michel Devoret	Yale University	Error correction of a logical quantum bit
12	May 17, 2023 (online)	Prof. Scott Aaronson	University of Texas at Austin	How much information is in a quantum state?
13	June 21, 2023	Prof. Kenji Ohmori	Institute for Molecular Science	Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit
14	July 7, 2023	Prof. Jacob Taylor	National Institute of Standards and Technology	Exploring fundamental physics with quantum information science
15	July 21, 2023	Prof. Ulrik Lund Andersen	Technical University of Denmark	Advancements in continuous variable quantum information technology
16	September 13, 2023	Prof. Takao Aoki	Waseda University	Nanofiber cavity quantum electrodynamics systems for distributed quantum computing
17	October 25, 2023	Prof. Mio Murao	The University of Tokyo	Fully-quantum learning: Higher-order quantum algorithms for comparison and inversion of unknown unitary operations
18	November 21, 2023 (online)	Prof. Charles Marcus	University of Washington	New views of a classic (but not classical) system the Josephson Junction Array
19	December 27, 2023	Prof. Kihwan Kim	Tsinghua University	Scalable and programmable phononic network using vibrational modes of trapped ions
20	January 31, 2024	Prof. Seth Lloyd	Massachusetts Institute of Technology	Quantum machine learning
21	February 14, 2024	Prof. Hidetoshi Nishimori	Tokyo Institute of Technology	Quantum simulations of problems in statistical physics
22	March 19, 2024	Prof. Eric Lutz	University of Stuttgart	Converting quantum statistics into work

FY2023 RQC Seminar

RQCではまた、各チームが自主的に主催するRQC Seminarを対面で開催しています。2023年度は72回実施し、量子コンピューター研究開発に関するブレイクスルーを目指してチームやセンターの枠を超えた活発な議論が行われました。

No.	Date	Speaker	Affiliation
37	April 3, 2023	Prof. Mauro Antezza	University of Montpellier
38	April 10, 2023	Dr. Fabrizio Minganti	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
39	April 12, 2023	Mr. Yi-Te Huang	National Cheng Kung University
40	April 14, 2023	Dr. Onur Oktay	University of Surrey
41	April 17, 2023	Dr. Carlos Sánchez Muñoz	Autonomous University of Madrid
42	April 20, 2023	Prof. Kyungwon An	Seoul National University
43	May 1, 2023	Prof. Wolfgang Lorenzon	University of Michigan
44	May 9, 2023	Prof. Xuedong Hu	University of Buffalo
45	May 11, 2023	Prof. Oleksandr Dobrovolskiy	University of Vienna
46	May 15, 2023	Dr. Daria Smirnova	Australian National University
47	May 19, 2023	Ms. Therese Karmstrand	Chalmers University of Technology
48	May 25, 2023	Dr. Bartosz Regula	RIKEN RQC
49	May 26, 2023	Dr. Takuya Okuda	The University of Tokyo
50	June 2, 2023	Mr. Yuma Kawaguchi	The City College of New York
51	June 5, 2023	Dr. Josephine Dias	Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University
52	June 14, 2023	Dr. Hayato Goto	RIKEN RQC
53	June 16, 2023	Mr. Vaibhav Gautam	University of Surrey
54	June 23, 2023	Dr. Fredrik Brange	Aalto University
55	June 27, 2023	Prof. Chia-Yi Ju	National Sun Yat-Sen University
56	June 28, 2023	Dr. Yosuke Ueno	RIKEN RQC
57	June 30, 2023	Prof. Guang-Yin Chen	National Chung Hsing University
58	July 11, 2023	Prof. Rainer Dumke	Nanyang Technological University, National University of Singapore
59	July 12, 2023	Prof. Omar Di Stefano	Università degli Studi di Messina
60	July 14, 2023	Prof. Salvatore Savasta	Università degli Studi di Messina
61	July 18, 2023	Dr. Steve Brierley	Riverlane

No.	Date	Speaker	Affiliation
62	July 20, 2023	Mr. Daniele Lamberto	Università degli Studi di Messina
63	July 21, 2023	Prof. Britton Plourde	Syracuse University
64	July 24, 2023	Mr. Po-Rong Lai	National Cheng Kung University
65	July 13, 2023	Prof. Hou Ian	University of Macau
66	July 27, 2023	Dr. Hirofumi Yanagisawa	Shizuoka University
67	July 28, 2023	Dr. Antoine Reserbat-Plantey	CNRS, CRHEA, Université Nice Côte d'Azur
68	July 28, 2023	Dr. Reiko Yamada	The Institute of Photonic Sciences
69	July 31, 2023	Dr. Martin Rodriguez-Vega	Physical Review Letters
70	August 4, 2023	Prof. Adam Miranowicz	Adam Mickiewicz University
71	August 7, 2023	Prof. Enectali Figueroa-Feliciano	Northwestern University
72	August 8, 2023	Ms. Zara Yu	Massachusetts Institute of Technology
73	August 9, 2023	Prof. Xin Wang	Xi'an Jiaotong University
74	August 10, 2023	Mr. Harvey Cao	Imperial College London
75	August 18, 2023	Prof. Masaki Tezuka	Kyoto University
76	August 14, 2023	Dr. Vanja Maric	Université Paris-Saclay
77	August 21, 2023	Prof. Mark Mitchison	Trinity College Dublin
78	August 22, 2023	Mr. Isaac Layton	University of College Longon
79	August 29, 2023	Mr. Donghoon Kim	KAIST
80	August 31, 2023	Prof. Hong-Bin Chen	National Cheng Kung University
81	September 4, 2023	Dr. Roberto Stassi	Messina University
82	September 7, 2023	Prof. Valentin Freilikher	Bar-Ilan University
83	September 12, 2023	Dr. Éric Giguère	ISC Applied Systems
84	September 14, 2023	Prof. Martin Kliesch	Hamburg University of Technology
85	September 15, 2023	Prof. Mauricio Gutiérrez	University of Costa Rica
86	October 12, 2023	Dr. Gustav Andersson	The University of Chicago

No.	Date	Speaker	Affiliation
87	October 24, 2023	Prof. Hideo Kosaka, Dr. Hodaka Kurokawa	Yokohama National University
88	October 26, 2023	Prof. Igor Aronson	The Pennsylvania State University
89	October 27, 2023	Dr. Huan-Yu Ku	National Cheng Kung University
90	October 30, 2023	Priv.-Doz. Dr. Hans Huebl	Bavarian Academy of Sciences and Humanities
91	October 30, 2023	Prof. Stephen A. Lyon	Princeton University and EeroQ Corp
92	October 31, 2023	Mr. Feng-Jui Chan	National Cheng Kung University
93	November 1, 2023	Prof. Yueh-Nan Chen	National Cheng Kung University
94	November 9, 2023	Dr. Takahiro Tsunoda	Yale University
95	November 13, 2023	Mr. Zhiyu Jiang	Hokkaido University
96	November 17, 2023	Mr. Juan Román Roche	University of Zaragoza
97	November 20, 2023	Prof. Simone De Liberato	University of Southampton
98	November 22, 2023	Dr. Suguru Endo	NTT
99	December 4, 2023	Dr. Edwin Ng	NTT
100	December 14, 2023	Dr. Maja Cassidy	University of New South Wales
101	December 15, 2023	Mr. Dolev Bluvstein, Mr. Marcin Kalinowski	Harvard University
102	December 15, 2023	Dr. Emanuele Mendicelli	York University
103	December 28, 2023	Dr. Anton Frisk Kockum	Chalmers University of Technology
104	January 9, 2024	Dr. Shingo Kono	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
105	January 24, 2024	Dr. Satoya Imai	QSTAR, INO-CNR, and LENS
106	February 2, 2024	Mr. Siddhant Singh	Delft University of Technology
107	March 18, 2024	Prof. Ludovico Lami	QuSoft / University of Amsterdam
108	March 21, 2024	Prof. Mario Berta	RWTH Aachen University

海外

【ヨーロッパ】

- アールト大学
- チャルマース工科大学
- デルフト工科大学
- imec
- ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ
- モスクワ物理技術研究所
- パラツキー大学
- キューテック
- スイス連邦工科大学ローザンヌ校
- アムステルダム大学
- バーゼル大学
- テュービンゲン大学
- ヴァルター・マイスナー研究所
- ほか

【北米】

- アルゴンヌ国立研究所
- Intel Corporation
- マサチューセッツ工科大学
- Nord Quantique
- ペリメーター理論物理学研究所
- ノートルダム大学
- ほか

【アジア・オセアニア】

- オーストラリア国立大学
- 基礎科学研究所 (IBS) アクシオン・精密物理研究センター (CAPP)
- グリフィス大学
- 湖南師範大学
- 清華大学
- ニューサウスウェールズ大学
- シドニー工科大学
- ほか

国内

【研究機関】

- 国立天文台
- 産業技術総合研究所
- 情報通信研究機構
- ほか

【大学】

- 国際基督教大学
- 慶應義塾大学
- 京都大学
- 名古屋大学
- 沖縄科学技術大学院大学
- 大阪大学
- 静岡大学
- 東京大学
- 東北大学
- 東京工業大学
- 東京医科歯科大学
- 東京理科大学
- ほか

【民間企業】

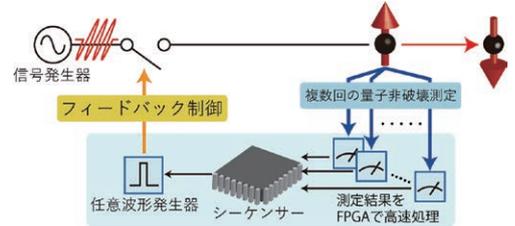
- 富士通株式会社
- 日立中央研究所
- 三菱電機株式会社
- 日本電気株式会社
- 株式会社ニコン
- 日本電信電話株式会社
- 株式会社東芝
- ほか

プレスリリース

2023/6/1

シリコン量子ビットのフィードバック型初期化技術を開発
—量子コンピュータデバイスの不完全性に処方箋—

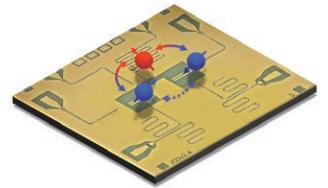
半導体量子情報デバイス研究チーム



2023/6/30

超伝導量子コンピュータにおける
新しい2量子ビットゲート方式の発明・実証

ハイブリッド量子回路研究チーム



2023/7/12

「掛け算」のできる光量子コンピュータへ
—柔軟・高速な非線形計算で光電場の非線形測定を実現—

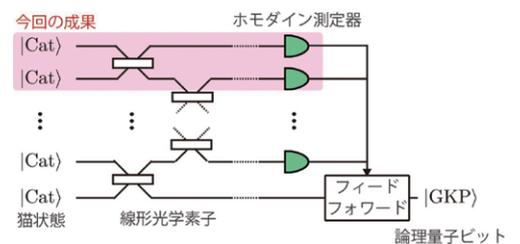
光量子計算研究チーム



2024/1/19

伝搬する光の論理量子ビットの生成
—大規模誤り耐性型量子計算への第一歩—

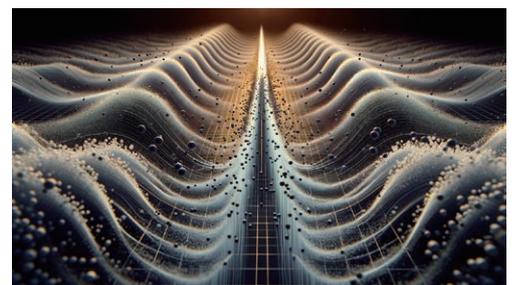
光量子計算研究チーム



2024/3/29

量子もつれの伝達速度限界を解明
—ボーズ粒子系における新たな理論的発見と量子計算への応用—

量子複雑性解析理研白眉研究チーム



受賞報告

2023/4/7

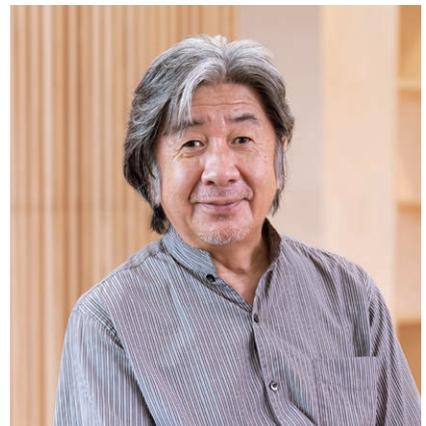
池田 達彦 研究員が文部科学大臣表彰を受賞

量子計算理論研究チームの池田 達彦 研究員が、令和5年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞致しました。この賞は、科学技術に関する研究開発、理解増進等において顕著な成果を収めた者を表彰する賞で、業績名「フロケ理論を用いた光物性現象の解析と新現象探索の研究」で受賞致しました。

2023/9/5

中村 泰信 センター長、蔡 兆申 チームリーダーが服部報公会 報公賞を受賞

中村 泰信 センター長と超伝導量子シミュレーション研究チームの蔡 兆申 チームリーダーが、2023年（第93回）服部報公会 報公賞を受賞致しました。この賞は、工学に関する優秀な研究成果を挙げた研究者を表彰する賞で、業績名「量子コンピュータ実現に向けた超伝導量子ビット回路の先駆的研究」で受賞致しました。



2023/7/18

Nori Franco チームリーダーが Academia Europaea に選出

量子情報物理理論研究チームのNori Franco チームリーダーが、Academia Europaeaに選出されました。Academia Europaeaは、年に一度、会員の推薦と選考によりメンバーが選定されており、Noriチームリーダーは、影響力のある研究業績と、ヨーロッパの研究者との多くの重要な共同研究により選定されました。



2023/10/10

■ **中村 泰信 センター長、蔡 兆申 チームリーダーがC&C賞を受賞**

中村 泰信 センター長と超伝導量子シミュレーション研究チームの蔡 兆申 チームリーダーが、2023年度C&C賞を受賞致しました。この賞は、情報処理技術、通信技術、電子デバイス技術、およびこれらの融合する技術分野の開拓または研究、この分野の進歩をもたらす社会科学的研究活動に関し顕著な貢献のあった者を表彰する賞で、業績名「超伝導量子ビットの実現と量子コンピュータをはじめとする量子情報技術分野への貢献」で受賞致しました。

2023/10/19

■ **Shang Cheng 大学院生リサーチ・アソシエイトが北京量子信息科学研究院 最優秀ポスター賞を受賞**

量子複雑性解析理研白眉研究チームのShang Cheng 大学院生リサーチ・アソシエイトが、北京量子信息科学研究院 最優秀ポスター賞を受賞致しました。The 5th International Symposium on Quantum Physics and Quantum Information Sciences (QPQIS-2023)において、タイトル「Equivalence between operator spreading and information propagation」で受賞致しました。

2023/11/15

■ **Nori Franco チームリーダーが Clarivate Highly Cited Researchers 2023に選出**

量子情報物理理論研究チームのNori Franco チームリーダーがClarivate Highly Cited Researchers 2023に選出されました。Clarivate Highly Cited Researchers は、Clarivate Analytics社のEssential Science Indicators データベースで、被引用数の多さが上位1%に入る論文の著者を研究分野毎に選定したものです。

2024/3/8

■ **Nori Franco チームリーダーがThe 2024 Charles Hard Townes Medal Recipient (Optica) に選出**

量子情報物理理論研究チームのNori Franco チームリーダーがThe 2024 Charles Hard Townes Medal Recipient (Optica) に選出されました。量子光学、量子情報処理、量子回路に関する多くの基礎的貢献と、主要な量子ソフトウェアツールの開発に対する業績について受賞致しました。

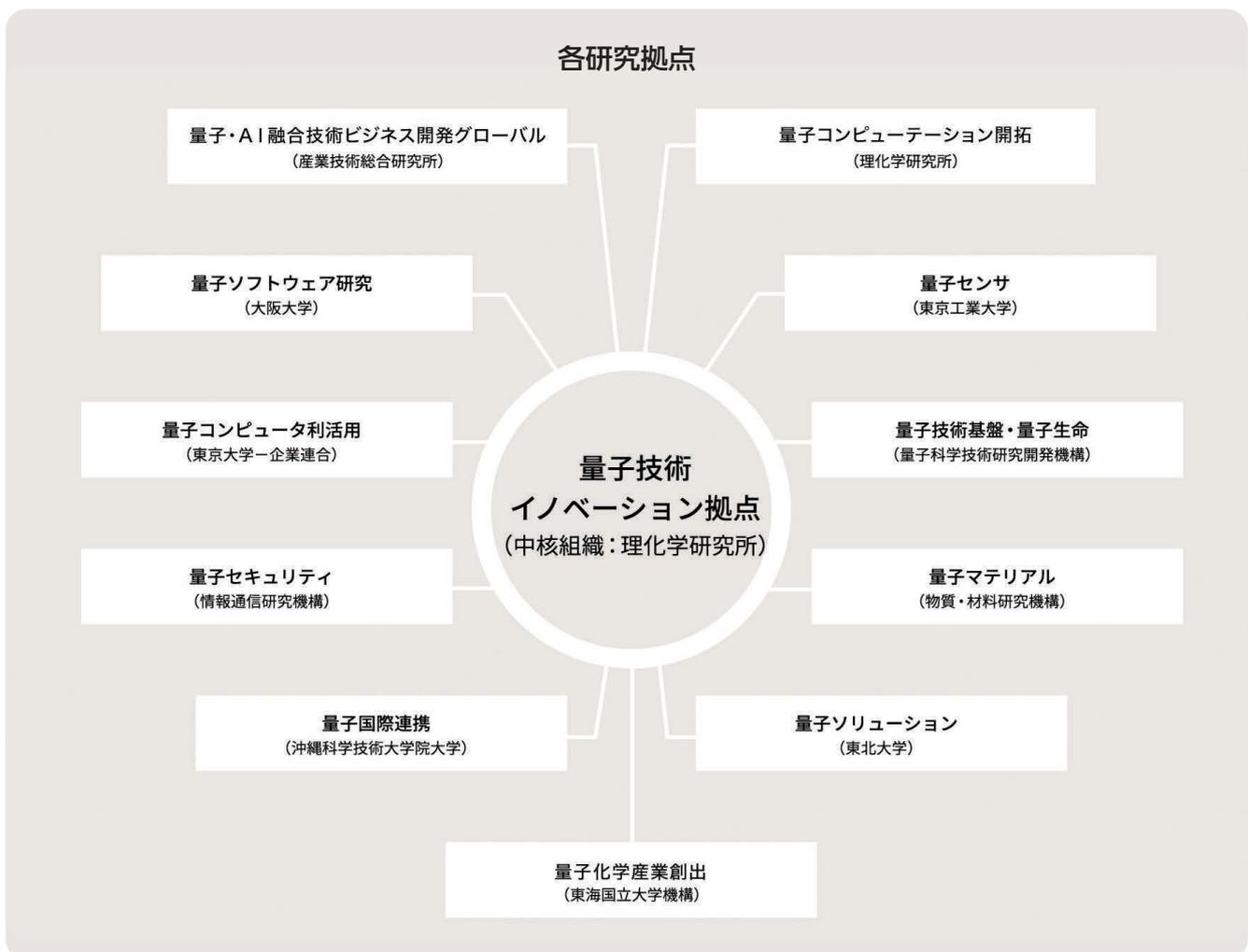
量子技術イノベーション拠点概要

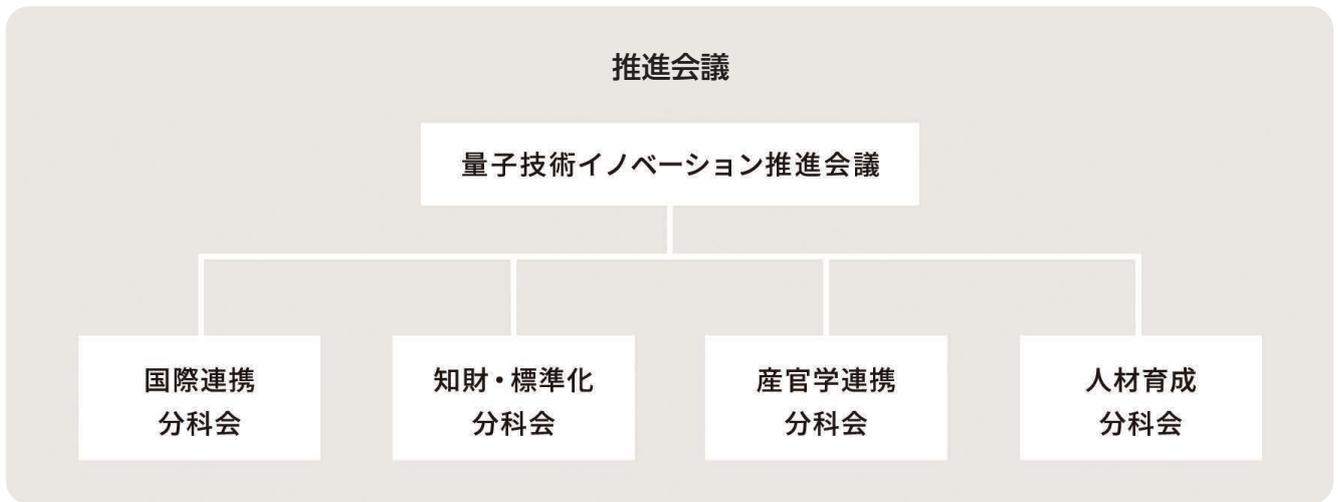


量子技術イノベーション11拠点の中核組織として、 全拠点一体で、量子技術の社会実装を加速

政府策定の「量子技術イノベーション戦略」(2020年1月)、「量子未来社会ビジョン」(2022年4月)、及び、「量子未来産業創出戦略」(2021年4月)に基づき、国際競争力を確保・強化する観点から、量子技術の基礎研究から技術実証、知財管理、人材育成に至るまで産学官で一気通貫に取り組む拠点として量子技術イノベーション拠点(以下QIH)は整備されました。

理化学研究所は、QIHの中核組織として、11拠点間の協調を図るヘッドクォーター機能を担っております。また、理化学研究所は、国内11拠点の内、量子コンピュータシステムの実現・確立を目指す量子コンピュータ開発拠点として活動しています。





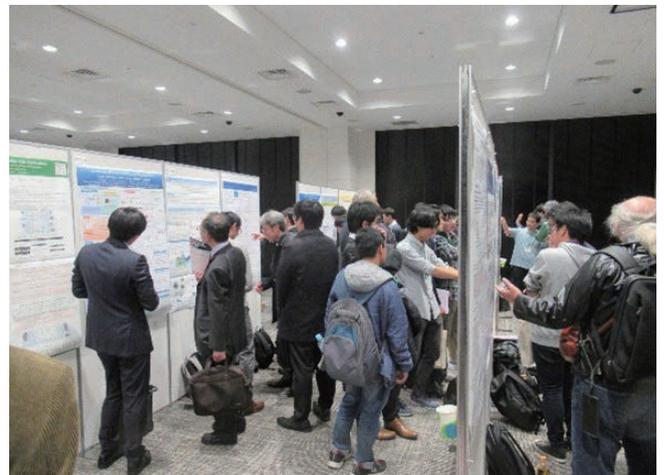
各分科会の位置づけ

QIHは量子技術の社会実装に向け、共同提言や推進を行う会議体として量子技術イノベーション拠点推進会議を設置・運営し、推進会議の下に4つの分科会を設け、各拠点が課題について意見交換と意識・戦略共有を行っています。

- 国際連携分科会：国際シンポジウムの開催や国際共同研究などの国際連携の推進
- 知的財産・標準化分科会：知的財産、国際標準化に関する拠点間での戦略の共有
- 産官学連携分科会：量子技術の社会実装を目指す産官学連携の推進
- 人材育成分科会：若手研究者の参入や機関・研究分野を超えた人材育成の強化

2023年度活動事例

QIHの活動の一環として、2023年11月15-17日に量子科学技術イノベーションに関する国際シンポジウム「Quantum Innovation 2023」を東京にて開催しました。コロナが収束し、今回は初めての対面開催となりました。3日間の講演数は132、パネルセッション3、ポスター講演は140となりました。参加登録は参加国数14カ国、600人以上となり、543名が来場されました。貴重な情報発信の場であるとともに、レセプションを開催、国際交流の機会ともなりました。また、若手育成のため、学生によるポスター講演のうち、優秀な15件に優秀ポスター賞を授与いたしました。

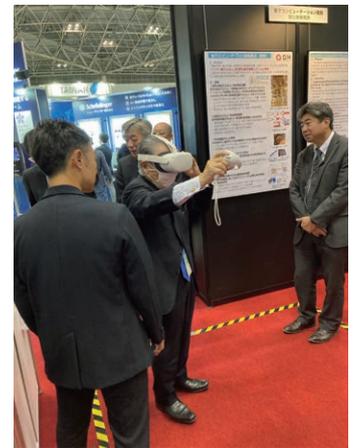


量子技術イノベーション拠点概要 (つづき)

量子コンピュータ・量子技術の将来を担う人材の育成・確保や産業界との連携推進のため、アウトリーチ活動にも注力しております。



夏休み科学イベント「量子コンピュータって何だろう?」
8月11日(金)から13日(日) 科学技術館にて



nano tech展2024
(2024年1月31日-2月2日@東京ビックサイト)



登内 敏夫 (Ph.D.) コーディネーター

主要論文

- 1 Toshio Tonouchi *et al.*, "A fast method of verifying network routing with back-trace header space analysis", IEEE/IFIP IM 2015
- 2 CS Hong, Toshio Tonouchi ed., Internet for Changing Business and New Computing Services: 12th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium, APNOMS 2009, LNCS 5787
- 3 Yoshinori Watanabe *et al.* "UTRAN O&M Support System with Statistical Fault Identification and Customizable Rule Sets", NOMS 2008
- 4 Nicholas Damianou, Naranker Dulay, Emil Lupu, Morris Sloman, Toshio Tonouchi, "Tools for Domain-Based Policy Management of Distributed Systems", IEEE/IFIP NOMS 2002
- 5 Toshio Tonouchi *et al.*, "An Implementation of OSI Management Q3 Agent Platform for Subscriber Networks", IEEE Int Conf on Communication (ICC) 1997

略歴

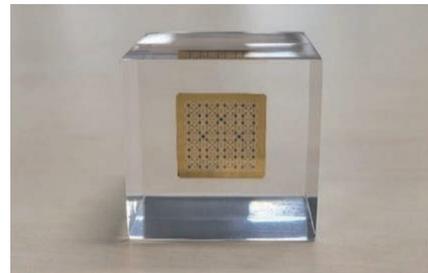
- 1990 東京大学 理学部 情報科学科卒業
- 1992 東京大学 理学系大学院 情報科学専攻 修士
- 1992 日本電気株式会社 入社 C&Cシステム研究所配属
- 1999 英国 Imperial College 客員研究員
- 2004 インターネットシステム研究所 主任研究員
- 2008 大阪大学 博士(情報科学)
- 2011 サービスプラットフォーム研究所 主幹研究員
- 2018 内閣府 政策統括官(科学技術・イノベーション担当)付 政策企画調査官
- 2020 理研 量子コンピュータ研究センター準備室 副主幹
- 2021 理研 量子コンピュータ研究センター センター長室 高度研究支援専門職
- 2022 理研量子コンピュータ研究センター センター長室 コーディネーター(現職)

※登内コーディネーターは量子技術イノベーション拠点の取りまとめを行う中核組織に関わる業務に従事しております。

RQC FY2023 Pick-up Topics

クラウドファンディング「量子コンピュータ開発のサポーター募集 | 理研 RQC」を実施

2023年4月7日～2023年5月31日に、RQCでクラウドファンディングを実施しました。多くの方からのご支援により、目標金額を達成することができ、量子に関する人材育成や、アウトリーチ（研究成果発信）活動の強化に向け活用させて頂いています。



返礼品の例 左：クラウド公開初号機アクリルスタンド 右：超伝導量子ビットチップレプリカ

国産量子コンピュータ初号機の名前、ロゴマークを決定

2023年3月27日にクラウド利用を開始した国産超伝導量子コンピュータ初号機について、愛称を一般公募し、「叡（えい、英語表記は“A”）」に決定しました。また、より多くの皆様に「叡」への親しみを持って頂けるよう、「叡」が持つ特徴を表現するロゴマークを作成しました。



「叡」ロゴマーク



超伝導量子コンピュータ「叡（えい）」

理研 RQC-富士通連携センター 国産実機クラウド公開・記者会見開催

2023年10月5日に、理研 RQC-富士通連携センターにおいて、国産量子コンピュータ初号機「叡」の開発ノウハウをベースとした新たな超伝導量子コンピュータを開発し、富士通のハイブリッド量子コンピューティングプラットフォームで運用を開始しました。また、同日に記者会見が開催され、新聞・テレビなど多くのメディアに取り上げられました。



記者会見での記念撮影



実機見学での記念撮影

「第53回 日本産業技術大賞」の最高位「内閣総理大臣賞」を受賞

2024年3月15日に、理化学研究所、富士通等の共同研究グループが、「超伝導量子コンピュータを用いた超高性能計算プラットフォーム」にて、日刊工業新聞社が主催する「第53回 日本産業技術大賞」の最高位となる「内閣総理大臣賞」を受賞しました。



贈賞式での記念撮影



贈賞式の様子

超伝導量子エレクトロニクス研究チーム

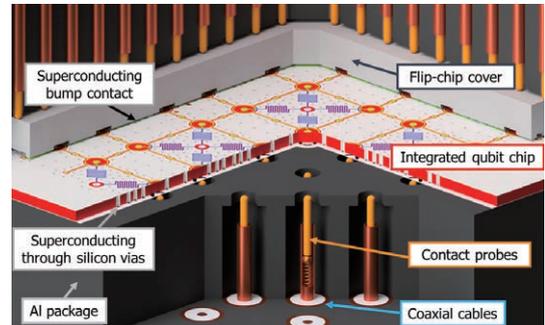
キーワード：量子コンピュータ、超伝導回路、ジョセフソン接合、マイクロ波量子光学、回路量子電磁力学

研究室概要

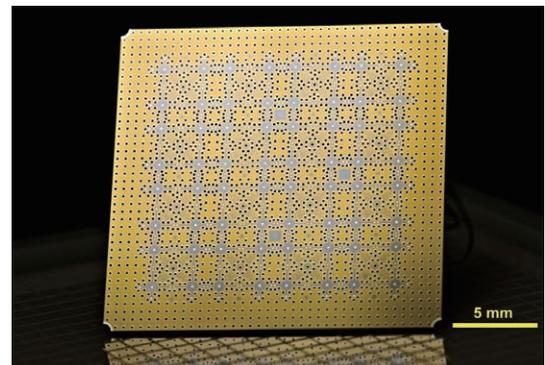
RQC内の他のチームや外部の機関と共同で、量子計算やその他の量子技術への応用に向けた超伝導量子回路の研究開発に取り組んでいる。現在、集積化された超伝導量子ビットを用いた量子コンピューティングプラットフォームの構築に注力している。拡張性の高い量子ビットチップとして、超伝導シリコン貫通ビアを有するチップの上に、周波数固定のトランズモン型量子ビットを2次元配列に並べ、マイクロ波入出力ポートは基板裏面から垂直に導入された同軸ケーブルからなり、ばねピンで接続されている。我々は並行して、希釈冷凍機の立ち上げや、制御用のエレクトロニクスやソフトウェアの整備をしている。

我々はまた、マイクロ波量子光学に関わる様々な現象や技術についても調べている。共振器や導波路に強く結合した量子ビットを用いたマイクロ波光子の保存や伝送の制御についても研究を進めている。トピックスとして、マイクロ波単一光子生成器・受信機、ジョセフソン接合を用いた非相反素子、非線形マイクロ波量子光学、パラメトリック増幅器などが挙げられる。これらは研究のターゲットであると同時に、他の実験のためのツールとなりうる。

これらの研究活動を通じて、一層理解を深め、超伝導量子エレクトロニクスを究めていくことが、次のブレークスルーにつながるものと考えている。



超伝導量子ビット集積回路パッケージの模式図



64量子ビットチップの写真



中村 泰信 (Ph.D.) センター長、チームリーダー

主要論文

- 1 S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, and Y. Nakamura, "Quantum non-demolition detection of an itinerant microwave photon", *Nature Physics* 14, 546 (2018).
- 2 O. Astafiev, A. M. Zagoskin, A. A. Abdumalikov, Jr., Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, K. Inomata, Y. Nakamura, and J.S. Tsai, "Resonance fluorescence of a single artificial atom", *Science* 327, 840 (2010).
- 3 T. Yamamoto, K. Inomata, M. Watanabe, K. Matsuba, T. Miyazaki, W. D. Oliver, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, "Flux-driven Josephson parametric amplifier", *Appl. Phys. Lett.* 93, 042510 (2008).
- 4 I. Chiorescu, Y. Nakamura, C.J.P.M. Harmans and J.E. Mooij, "Coherent quantum dynamics of a superconducting flux-qubit", *Science* 299, 1869 (2003).
- 5 Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box", *Nature* 398, 786 (1999).

略歴

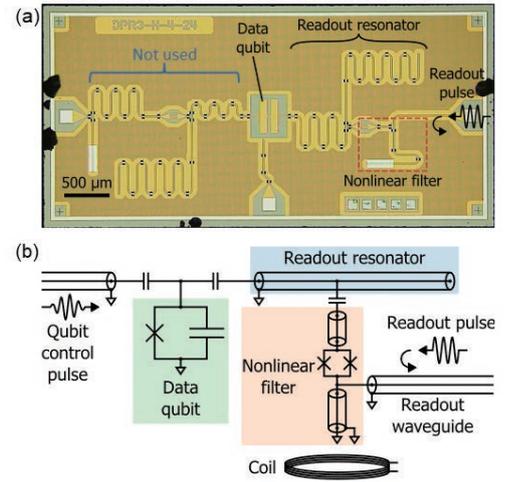
- 1992 日本電気株式会社基礎研究所 研究員
- 1997 日本電気株式会社基礎研究所 主任
- 2001 日本電気株式会社基礎研究所 主任研究員(-2005年)
- 2001 デルフト工科大学応用物理学科 客員研究員(-2002年)
- 2002 理化学研究所フロンティア研究システム 研究員(-2013年)
- 2005 日本電気株式会社基礎・環境研究所 主席研究員(-2012年)
- 2007 日本電気株式会社ナノエレクトロニクス研究所 主席研究員
- 2010 日本電気株式会社グリーンイノベーション研究所 主席研究員(-2012年)
- 2012 東京大学先端科学技術研究センター 教授(-2022年)
- 2014 理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー
- 2020 理化学研究所創発物性科学研究センター グループディレクター
- 2021 理化学研究所量子コンピュータ研究センター センター長 (現職)
- 2022 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授 (現職)

研究紹介

非線形パーセルフィルタを用いた量子ビット分散読み出し

超伝導量子ビットの読み出し手法として、量子ビットの状態に依存したマイクロ波共振器の周波数変化を通じた分散読み出しが広く用いられている。しかし、高速かつ高忠実度の読み出しに向けたパラメータの最適化が進むとともに、読み出しを行っていないときの、読み出し用のフィルタ共振器に残存する雑音マイクロ波光子による量子ビット位相緩和が問題になりつつある。我々は非線形フィルタ共振器の利用によりこの課題を解決することを提案し、原理実証実験を行った。読み出し用パルスの入射時に非線形効果によりフィルタ共振器の周波数がシフトして読み出し感度を向上させ、それ以外のときは感度および位相緩和を抑制するものである。残存雑音光子に対する耐性を3倍向上するとともに、40 nsの信号積算時間で、読み出し忠実度99.4%の高速・高忠実度量子ビット読み出しを実現した。

Y. Sunada *et al.*, “Photon-noise-tolerant dispersive readout of a superconducting qubit using a nonlinear Purcell filter”, PRX Quantum 5, 010307 (2024).



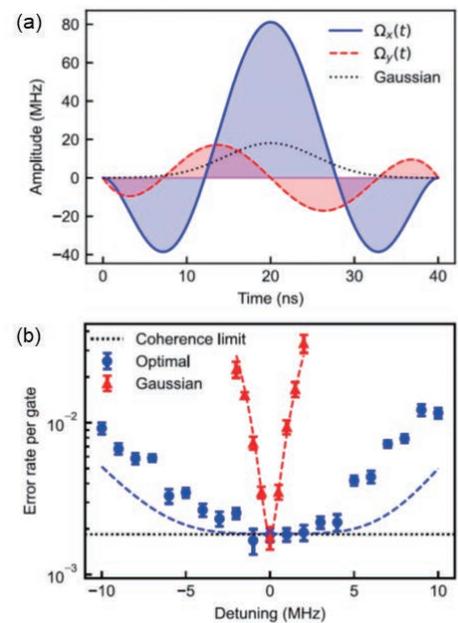
非線形パーセルフィルタを実装した量子ビット読み出し回路。(a) チップの全体写真。(b) 分布定数型回路モデル。

超伝導量子ビット間の残留ZZ相互作用の影響を受けにくい量子ゲート制御手法

固体素子を用いた量子コンピュータ実装においては、個々の量子ビットの周波数揺らぎによる悪影響を取り除くための手段が重要になる。量子ビット間の残留ZZ相互作用は近接する量子ビット間で互いの状態に依存した周波数シフトをもたらすため、特に固定周波数型の超伝導量子ビットを集積化する際に、抑制すべき課題となる。我々は摂動理論に基づく半解析的な手法を用いて、量子ビット周波数の揺らぎの影響を受けにくい量子ゲート制御パルスの最適化する方法を提案し実装した。これにより、付加的な回路要素の追加によりハードウェアの複雑性を増すことなく、効率的に残留ZZ相互作用の問題を回避することが可能になる。

S. Watanabe *et al.*, “ZZ-interaction-free single-qubit-gate optimization in superconducting qubits”, Phys. Rev. A 109, 012616 (2024).

(a) 最適化された1量子ビットゲート制御パルス波形。
(b) 制御パルス周波数の離調に対する1ゲート当たりの誤り率依存性。



主要メンバー

(研究員) 玉手 修平
(研究員) BADRUTDINOV Alexander
(基礎科学特別研究員) CHANG Chung Wai Sandbo
(特別研究員) YAN Zhiguang
(特別研究員) LI Rui
(特別研究員) HUNG Chih-Chiao
(特別研究員) WANG Zhiling

(特別研究員) WANG Shiyu
(訪問研究員) SPRING Peter Anthony
(上級テクニカルスタッフ) 楠山 幸一
(テクニカルI) SZIKSZAI Laszlo
(テクニカルI) 早川 晴美
(テクニカルI) 皆藤 真智恵

超伝導量子シミュレーション研究チーム

キーワード: 超伝導、ジョセフソン効果、巨視的量子コヒーレンス、超伝導量子ビット、超伝導量子情報処理

研究室概要

超伝導量子コンピュータや量子シミュレーターの実現を目指し研究を進めている。一方向型量子コンピュータやゲートモデル型量子コンピュータに向けた研究を行っている。固体素子回路である超伝導量子ビットは、ビット数の集積性、素子パラメータ設計の自由度、回路の制御手段の多様性など、多くの特徴を持っている。

量子コンピュータのエラー訂正が比較的容易なボゾニックコードと呼ばれる手法は、無限にある共振器の自由度を活かし量子情報をエラーから守る。我々は、カーパラメトリック発振器 (KPO) を利用することで、実用的なボゾニックコードの一つである Cat コードを実現する Cat Qubit の研究を、超伝導回路を使って行っている。2次元のKPO回路 (図1と2) で猫状態を生成し、量子トモグラフィーの手法で忠実度の評価を行い、1ビットゲートと2ビットのゲート操作が可能で、万能量子ゲートを実現に成功した。

2ビットの回路では、我々はKPOの独特な特性を利用して二つの方式でエンタングルした猫状態を生成した。第一の方式では、Fock状態に基づいたエンタングルした状態 (ベル状態) をエンタングルした猫状態に変換することである。第2の方式では、二つの独立した猫状態に $\sqrt{\text{ISWAP}}$ ゲートを加えてエンタングルした猫の状態を作ることである。

以上の成果は、今回開発に成功した平面超伝導KPO回路が、新たなスケラブルな量子情報処理のプラットフォームになる可能性を示している。

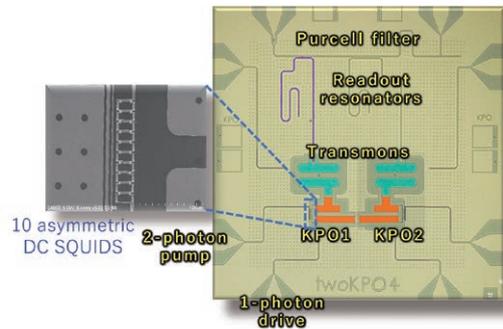


図1. 2次元のKPO回路のチップ写真。2つの結合したKPOが含まれている。

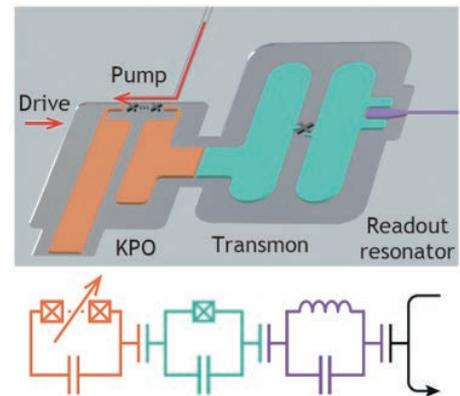
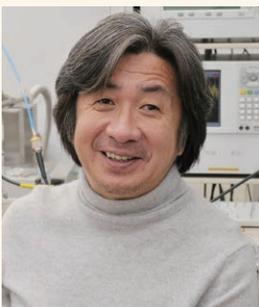


図2. 1ビットのKPOの模式図と等価回路。読み出しを補助するために transmon が配置されている。



蔡兆申 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

- 1 Daisuke Iyama, Takahiko Kamiya, Shiori Fujii, Hiroto Mukai, Yu Zhou, Toshiaki Nagase, Akiyoshi Tomonaga, Rui Wang, Jiao-Jiao Xue, Shohei Watabe, Sangil Kwon & Jaw-Shen Tsai, "Observation and manipulation of quantum interference in a superconducting Kerr parametric oscillator", *Nature Communications*, 15:86 (2024), doi.org/10.1038/s41467-023-44496-1
- 2 A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura, S. Lloyd and J. S. Tsai, "Quantum Coherent Tunable Coupling of Superconducting Qubits", *Science*, 316, 723 (2007)
- 3 T. Yamamoto, Yu. Y. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, "Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubits", *Nature*, 425, 941 (2003)
- 4 Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D. V. Averin and J. S. Tsai, "Quantum oscillations in two coupled charge qubits", *Nature*, 421, 823 (2003)
- 5 Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J. S. Tsai, "Coherent Control of Macroscopic Quantum States in a Single-Cooper-pair Box", *Nature*, 398, 786 (1999)

略歴

- 1975 米国 カルフォルニア大学バークレー校 文理学部 物理学科卒業
- 1983 米国 ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校 物理学部 理学博士 (Ph.D.)
- 1983 日本電気株式会社 マイクロエレクトロニクス研究所
- 2001 日本電気株式会社 基礎研究所 主席研究員
- 2001 理化学研究所 巨視的量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー
- 2012 理化学研究所 単量子操作グループ グループディレクター
- 2012 理化学研究所 巨視的量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー
- 2014 理化学研究所 超伝導量子シミュレーション研究チーム チームリーダー (現職)
- 2015 東京理科大学 理学部第一部物理学科 教授 (現職)
- 2022 東京理科大学 総合研究院 嘱託教授 (現職)

研究紹介

超伝導 KPO での猫状態の実現と1量子ビット操作

我々は10個のDC SQUID からなるKPOを製作した。Fock状態を準備し、2光子ポンプの強さを0からゆっくりと増加させ数猫状態を生成し、KPOの量子干渉をWigner tomographyで初めて観測した。

我々は猫状態で1ビット論理量子ゲート演算を行った。X/2ゲートは単一量子ドライブを印加して具現し、Z/2ゲートはポンプの周波数を変調する方式で具現した。KPOの猫状態の場合、ポンプが基準位相になるため、XゲートによるRabi振動を観測するにはドライブの位相 (ϕ_d) と周波数変調 (Δ_d) の二つを合わせなければならない。Quantum process tomographyを利用してX/2とZ/2遂行後のfidelityを求め、その値はそれぞれ0.844と0.794であった (図3)。

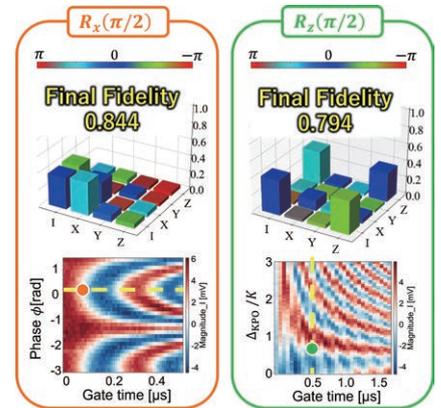


図3. 超伝導 KPO での猫状態 X ゲートと Y ゲートのプロセストモグラフィとラビ振動

超伝導 KPO でのエンタングルメント生成と2ビットゲート実現

二つの KPO を利用してエンタングルした Fock 状態 (Bell-Fock) をエンタングルした猫状態 (Bell-Cat) に一対一変換されることを示した。2-モード Wigner トモグラフィを試み、干渉模様を観測した。これは二つの猫状態が単純な相関関係ではなく、エンタングルしていることを意味する。

またゲート演算を通じて互いに独立な二つの猫状態を直接 iSWAP ゲート操作によりエンタングルさせることにも成功した (図4)。今回の研究は KPO に基づいた猫の状態を利用した2次元回路の万能ゲートセットを実現したもので、KPO システムがスケーリング可能であることを示したということに大きな意義がある。

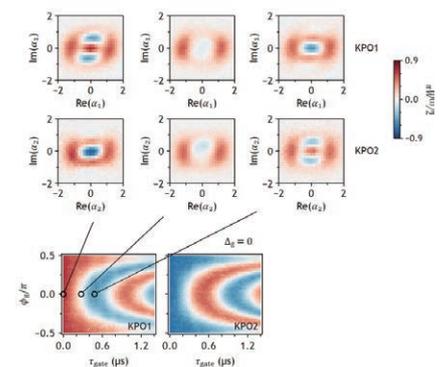


図4. 2つの猫状態のエネルギー交換によって引き起こされるラビ振動。 \sqrt{i} SWAP ゲート時間は275ns。

共振器ネットワークを用いた5量子ビットの集積

当チームでは、提案した擬2次元型アーキテクチャに基づいた量子ビットの集積化を行っている。その実証として、5個のトランズモン型超伝導量子ビットを、共振器結合を用いて集積した。擬2次元型アーキテクチャでは量子ビットの制御配線をすべて、平面状に配置できる。そのためには、エアブリッジを用いた、交差した共振器ネットワークを使用する必要がある (図5)。

本チップの特性を評価したところ、寿命が40 us程度であった。引き続き集積した量子ビットチップの性能向上を行う。テスト用の単一量子ビットチップでは、基本的には同じ製造プロセスで寿命が100 us を超えるものが作成できているため、その違いを明らかにし、集積化したチップでの寿命も引き続き向上させる。

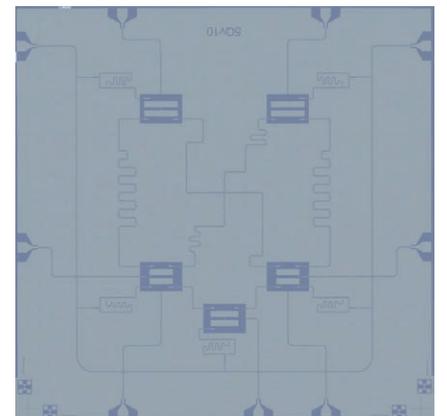


図5. チップの大きさは10 mm角である。中心の2つの共振器はエアブリッジを使用して交差している。

主要メンバー

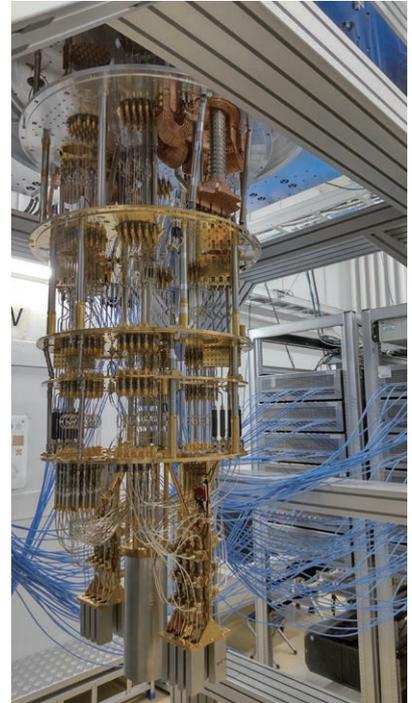
(基礎科学特別研究員) 向井 寛人
(特別研究員) XUE, Hang

超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット

キーワード：超伝導量子回路、量子計算、量子技術、マイクロ波工学、量子もつれ

研究室概要

当ユニットでは、超伝導量子エレクトロニクス研究チームと連携し、拡張可能なデザインに基づく多量子ビットの超伝導量子コンピュータの開発を行っている。ジョセフソン接合、マイクロ波共振器、伝送路、フィルタ回路などからなる超伝導量子回路を設計し、量子ビットと量子状態のコヒーレント制御・非破壊測定を行うための機能を同一チップ上に実装する。さらに、チップとマイクロ波同軸配線を繋ぐパッケージ、ジョセフソンパラメトリック増幅器をはじめとする低温マイクロ波素子、極低温環境実現のための希釈冷凍機、室温の制御エレクトロニクスから構成されるハードウェアを50～150量子ビットの中規模量子コンピュータとして動作させる。現在、64量子ビットからなる超伝導量子コンピュータ「叡」が稼働しており、100量子ビット以上のシステムの立ち上げも進めている。量子ビットチップの歩留まり・均一性向上とコヒーレンス時間の改善を進め、1量子ビットおよび2量子ビットゲート、初期化、読み出しの忠実度の向上を図る。古典コンピュータとのハイブリッドによるNISQ（ノイズな中規模量子コンピュータ）アプリケーションの探索や、小規模の量子エラー訂正符号の実装、多体量子系のシミュレーションなどの実験を進める。今後、さらなる量子ビット数の拡大に向けた要素技術—マイクロ波配線の高密度化やマイクロ波素子の小型化、複数のチップにまたがる量子制御など—の研究を行い、大規模量子エラー訂正可能なシステム実現への方向性を示し、古典コンピュータでは実行困難な計算を実行可能な量子コンピュータをより現実のものに近づけることを目指す。



64量子ビット超伝導量子コンピュータ「叡」



阿部 英介 (D.Sc.) ユニットリーダー

主要論文

- 1 K. Sasaki and E. Abe, "Suppression of Pulsed Dynamic Nuclear Polarization by Many-Body Spin Dynamics", *Physical Review Letters* 132, 106904 (2024).
- 2 E. Abe, "Superconducting route to quantum computing", *Proceeding of 2023 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)*, P.1-4 (2023).
- 3 K. Sasaki, H. Watanabe, H. Sumiya, K. M. Itoh, and E. Abe, "Detection and control of single proton spins in a thin layer of diamond grown by chemical vapor deposition", *Applied Physics Letters* 117, 114002 (2020).
- 4 S. Ishizu, K. Sasaki, D. Misonou, T. Teraji, K. M. Itoh, and E. Abe, "Spin coherence and depths of single nitrogen-vacancy centers created by ion implantation into diamond via screening masks", *Journal of Applied Physics* 127, 244502 (2020).
- 5 D. Misonou, K. Sasaki, S. Ishizu, Y. Monnai, K. M. Itoh, and E. Abe, "Construction and operation of a tabletop system for nanoscale magnetometry with single nitrogen-vacancy centers in diamond", *AIP Advances* 10, 025206 (2020).

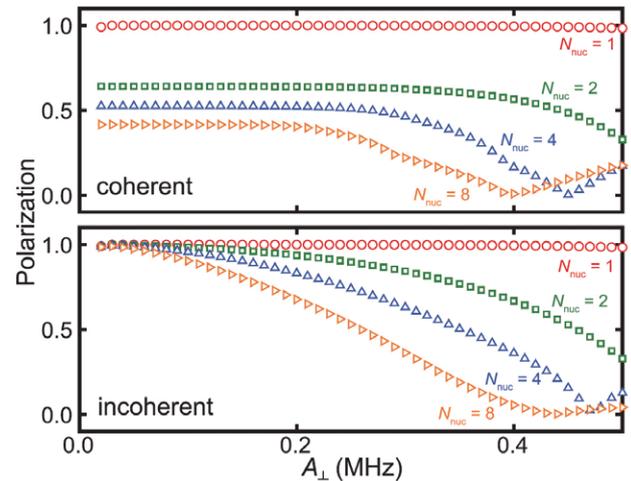
略歴

- 2005 日本学術振興会 特別研究員DC2
- 2006 慶應義塾大学大学院理工学研究科 博士(理学)取得
- 2006 東京大学物性研究所 助手 (2007年より助教)
- 2010 オックスフォード大学材料学科 博士研究員
- 2011 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任研究員
- 2012 国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系 特任研究員
- 2013 理化学研究所創発物性科学研究センター 研究員
- 2015 慶應義塾大学理工学部 特任講師
- 2016 慶應義塾大学先導研究センター 特任准教授
- 2019 理化学研究所創発物性科学研究センター ユニットリーダー
- 2021 理化学研究所量子コンピュータ研究センター ユニットリーダー(現職)

研究紹介

多体スピンドYNAMIXによるパルス動的核分極の抑制

量子ビットの初期化は、どの物理系においても量子操作の最初のステップである。核スピン系は、環境との相互作用の弱さと磁場によるゼーマン分裂の小ささから、初期化率、すなわち分極率が極めて低いことが課題である。近年、電子スピンの相互作用をマイクロ波パルスで制御することで核スピン分極率の改善を目指す、パルス動的核分極法が注目を集めている。本研究では、複数の核スピンが存在する場合、核スピン間相互作用と核スピン緩和を無視できる条件下であっても、電子スピンを介して核スピンが高次の相互作用をすることで、パルス動的核分極法により達成可能な分極が抑制される現象を解析計算・数値計算を通じて明らかにした。多体核スピン系での分極抑制効果としては、暗状態の形成が知られているが、電子-核スピン相互作用が強い系では、高次効果がより効果的となる場合がある。本成果は、核スピン制御パルス列のデザインにおいて高次の多体効果を考慮することの重要性を示している。



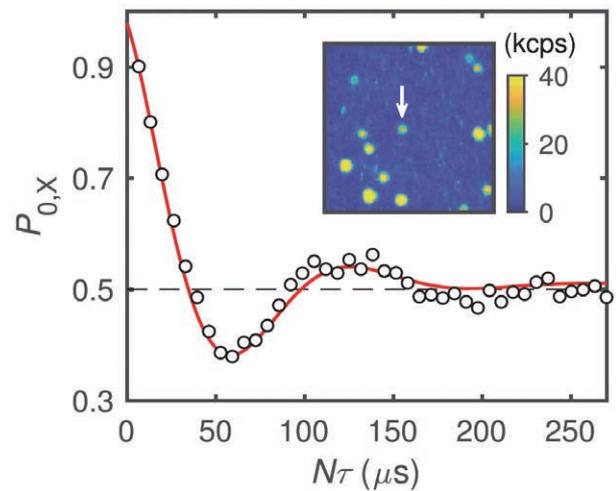
超微細相互作用強度 (A_{\perp}) と核スピン数 (N_{nuc}) を変化させたときの核スピン分極率の変化を数値計算したもの。超微細相互作用強度と核スピン数の増加により分極率が抑制される様子が確認できる。上(下)図は核スピン暗状態形成を考慮した(しない)場合。

©American Physical Society

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.106904>

固体量子センサによる単一プロトン核スピンの検出と制御

超伝導量子ビットをはじめとする固体量子ビットの制御には、しばしば数~数十GHzの高周波信号が用いられるため、マイクロ波工学は共通の技術基盤となっている。本研究では、マイクロ波技術を、室温で動作する固体量子ビットであり、量子センサとして注目されるダイヤモンド中の単一窒素-空孔(NV)中心に適用することで、単一プロトン核スピンの高感度検出を実現した。プロトン核スピンは、磁気共鳴イメージング(MRI)や核磁気共鳴(NMR)分子構造解析における最重要検出対象である。従来のNMRにおいては検出感度の低さが難点であったが、NV中心の有する電子スピンを量子センサとして用いることで、単一プロトン核スピンの検出・制御に成功した。さらに、単一核スピンの位置情報の測定、ラビ振動および自由歳差運動の観測にも成功した。これらの結果は、単一分子を構成する個別の核スピンの位置を決定することで分子構造を推定する、「単一分子構造解析」への道を拓く成果である。



量子センサによる単一プロトン核スピン制御。横軸は操作時間、縦軸はセンサ・スピンの状態に対応。データは核スピンのコヒーレント回転を捉えたもの。挿入図は、試料の共焦点顕微鏡図。矢印が測定に用いられた量子センサからの発光。

©American Institute of Physics

<https://doi.org/10.1063/5.0016196>

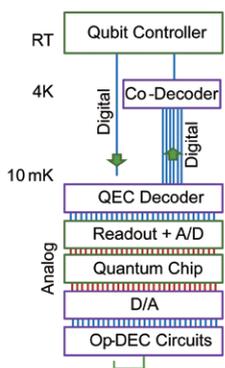
超伝導量子計算システム研究ユニット

キーワード: 超伝導量子コンピュータ、システムインパッケージ、ヘテロジニアスインテグレーション

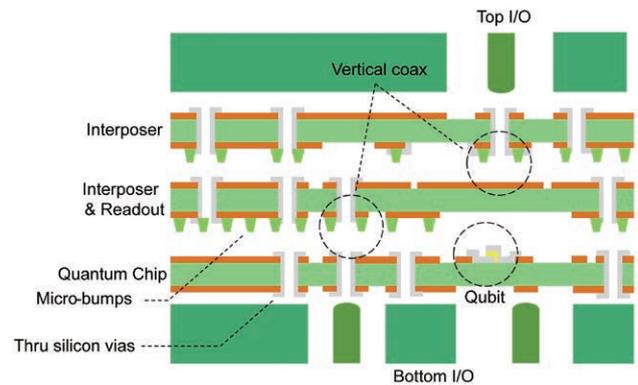
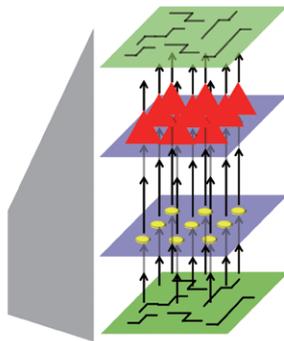
研究室概要

当ユニットでは、超伝導回路を用いた量子コンピュータの研究に取り組んでいる。実用的な超伝導量子コンピュータを実現するためには、量子ビットの量子力学的な性質を最大限に引き出すための量子ビット構造、読み出し回路、制御、配線、エレクトロニクス、冷却にわたる全体を組み合わせたシステムを考える必要がある。私たちは超伝導回路の集積化技術を研究する。超伝導量子回路の設計をシステムレベルに統合し、素子全体の性能と拡張性を飛躍させることを目指す。

例えば、デバイス構造の研究として、現実的な3次元空間における量子ビット、量子ビット間配線、制御線などのスケーラブルな配置を模索する。耐故障量子計算の誤り訂正機構では、超伝導量子ビットのリフレッシュ（更新）動作を継続的に行う必要があり、デバイス構造を簡略化するための時分割多重の余地が無い。誤り訂正符号として表面暗号を用いた場合、符号そのものは冗長化のために2次元平面内に拡張可能だが、制御線と読み出し線を量子ビットチップに導入するためには、あと1次元しか残されない。我々は、量子ビット、制御回路、読み出し回路を少数の基板に集積し、耐故障量子計算を実現するために必要な拡張性を備えた積層型モジュールシステムの可能性を探索している。さらに、光インターコネクトや単一磁束量子回路など、様々な信号処理回路を1つのモジュールにまとめられる異種混載システムの可能性を研究する。



積層型モジュールシステム概念



積層型モジュールシステムの実装例



田淵 豊 (Ph.D.) ユニットリーダー

主要論文

- 1 Y. Ueno, M. Kondo, M. Tanaka, Y. Suzuki, Y. Tabuchi "QULATIS: A Quantum Error Correction Methodology toward Lattice Surgery," *28th IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA)*, pp.274-287 (2022).
- 2 Y. Ueno, M. Kondo, M. Tanaka, Y. Suzuki, Y. Tabuchi "QECCOL: On-Line Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder for Surface Code," *58th IEEE/ACM Design Automation Conference (DAC)*, pp.451-456 (2021).
- 3 D. Lachance-Quirion, S. Wolski, Y. Tabuchi, S. Kono, K. Usami, Y. Nakamura. "Entanglement-based single-shot detection of a single magnon with a superconducting qubit," *Science*, 367, pp.425-428 (2020).
- 4 Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, Y. Nakamura. "Coherent coupling between a ferromagnetic magnon and a superconducting qubit," *Science*, 348, pp.405-408 (2015).
- 5 Y. Tabuchi, S. Ishino, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, Y. Nakamura. "Hybridizing ferromagnetic magnons and microwave photons in the quantum limit," *Physical Review Letters*, 113, p.083603 (2014).

略歴

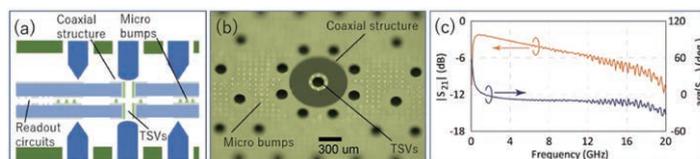
- 2012 東京大学先端科学技術研究センター 特任研究員
- 2015 日本学術振興会 特別研究員
- 2017 東京大学先端科学技術研究センター 助教
- 2020 理化学研究所 創発物性科学技術研究センター ユニットリーダー
- 2021 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター ユニットリーダー(現職)

研究紹介

スケーラブルな量子コンピュータ：制御エレクトロニクスから誤り訂正符号復号回路まで：量子ビット素子構造編

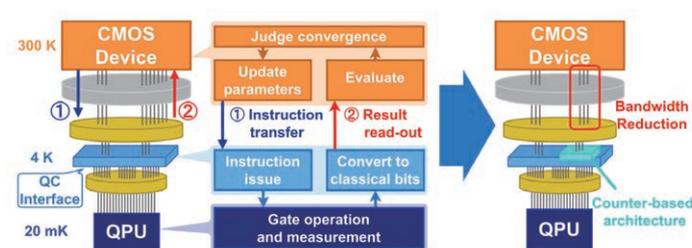
超伝導量子コンピュータは、量子ビット、物理ゲート、デバイス、デバイス構造（パッケージングを含む）、冷凍機や信号処理回路など多くの要素から構成される。それぞれの要素はスケーラブルかつ集積性を備えている必要があり、誤り耐性を備えた量子コンピュータによりアプリ開発を十分に楽しむためには数百万個の物理量子ビットを用意する必要がある。

我々はデバイス構造拡張性向上のため、量子ビット素子の積層化技術の研究を行っている。これまで数層で構成される超伝導量子回路を3次元的に展開し、より大きな実装面積の確保による高密度化を目指す。我々は3次元構造の実証のため、基板間のアナログインタフェースとして基板を垂直に導波する信号導波路を実証した [Bunpei Masaoka *et al.*, “Vertical signal transmission in stacked substrates for superconducting quantum circuits,” The 36th International symposium on superconductivity (2023)]. 基板内を貫通する線路は中心線と疑似接地電極ビアからなる疑似同軸構造であり、2-10 GHzまでの広帯域信号を2 dB以下通過損失にて伝搬する線路を実現した。本成果で実現した基板内貫通導波路に、内層の超伝導量子回路が接続し、より集積化した素子の実現を目指す。



スケーラブルな量子コンピュータ：制御エレクトロニクスから誤り訂正符号復号回路まで：信号処理と計算機アーキテクチャ

極低温下に設置される信号処理回路と室温の制御装置間の帯域幅は、NISQと呼ばれる雑音の多い中規模の超伝導量子コンピュータにおける深刻なボトルネックの1つである。我々は、このボトルネックを克服するため、アルゴリズムを意識したシステムレベルの最適化を実証した [Yosuke Ueno *et al.*, Inter-Temperature Bandwidth Reduction in Cryogenic QAOA Machines, IEEE Computer Architecture Letters 23, 6-9 (2023)]. 量子近似最適化アルゴリズムに焦点を当てて、システムの帯域幅ボトルネックを定式化し、量子ビット演算結果のビット間のコインシデンスを計数するデジタル回路が有効であることが分かった。極低温で動作する単一磁束量子ロジックを使用して4Kにて動作する計数回路を設計し、その詳細な分析により回路の指数関数的な帯域幅の減少、同軸線の熱流入や周辺回路の電力消費に起因する熱生成の抑制を示し、超伝導量子コンピュータのさらなる拡張性を示した。



(左) 低温信号処理回路を用いた量子コンピュータ概念図 (右) 計数回路の導入により配線数（信号帯域幅）の圧縮

©See <https://www.computer.org/publications/author-resources/peer-review/copyright>, saying that “Personal use of the material on this website is permitted. However, permission to reprint or republish this material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution to servers or lists, or to reuse any copyrighted component of this work in other works must be obtained from the IEEE. The IEEE uses Rightslink for permissions to reuse copyrighted material. Please visit <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html#request-permission-to-reuse-copyrighted-%20material>, or go to the article abstract page in IEEE Xplore and click on the copyright symbol to initiate a request.”

主要メンバー

(基礎科学特別研究員) 上野 洋典
(テクニカルスタッフ) 政岡 文平
(テクニカルスタッフ) 小沢 みゆき

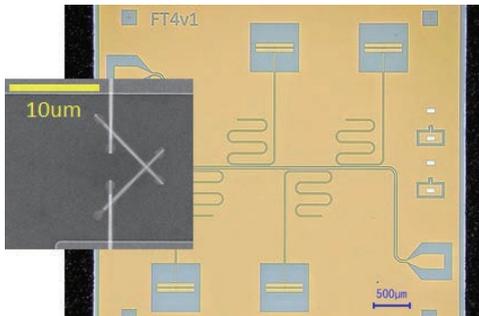


ハイブリッド量子回路研究チーム

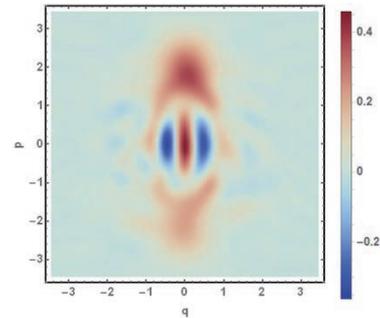
キーワード：ハイブリッド量子系、マイクロ波量子光学、電子トラップ、量子制御

研究室概要

超伝導回路は単に電気抵抗がない回路ではなく、ジョセフソン接合におけるトンネル効果を利用することで、量子ビットやパラメトリック回路などの様々な量子的な機能を発現させることができる。とくに近年私たちのチームでは、世界最先端に匹敵する非常に長い寿命を持った超伝導量子ビットの作製に成功している。また、設計自由度の高い超伝導回路の性質を活かし、様々な量子ゲート手法やその忠実度向上を目指した研究を行っている。さらに、このような高性能な超伝導回路と他の量子系を組み合わせたハイブリッド量子系に関する研究開発に興味を持ち、特にマイクロ波共振器やトラップ電子という高寿命量子系を構築し、それらを超伝導回路で観測・制御することで既存の性能を大きく凌駕する量子制御技術を確認しようとしている。誤り耐性量子コンピュータを初めとした究極の量子技術の実現は、現在の最先端を優に超えた高精度量子制御の可否にかかっているとんでも過言ではない。こうした課題に対し、超伝導回路を用いたボソニック符号による量子誤り訂正符号の実現や、宙に浮いた電子を用いる物理系として究極の性能を持つ電子トラップの技術開発により、これまでの量子系の限界を超えた精度を実現することを目指している。さらには、様々な物理系が活躍する量子系において、量子と量子の共存・協奏による新たな量子基盤技術の開発を目指す。



窒化チタン電極超伝導量子ビット。数百マイクロ秒以上の世界でも有数の寿命を持つ量子ビットを作製している。



マイクロ波共振器に対する量子測定の反作用によって生成されたシュレーディンガーの猫状態。



野口 篤史 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

- 1 S. Shirai, Y. Okubo, K. Matsuura, A. Osada, Y. Nakamura, and A. Noguchi, "All-microwave manipulation of superconducting qubits with a fixed-frequency transmon coupler", Phys. Rev. Lett. 130, 260601 (2023).
- 2 M. Shigefuji, A. Osada, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, and A. Noguchi, "Efficient low-energy single-electron detection using a large-area superconducting microstrip", arXiv:2301.11212.
- 3 A. Osada, K. Taniguchi, M. Shigefuji, and A. Noguchi, "Feasibility study on ground-state cooling and single-phonon readout of trapped electrons using hybrid quantum systems", Phys. Rev. Research 4, 033245 (2022).
- 4 A. Noguchi, A. Osada, S. Masuda, S. Kono, K. Heya, S. Piotr Wolski, H. Takahashi, T. Sugiyama, D. Lachance-Quirion, and Y. Nakamura, "Fast parametric two-qubit gates with suppressed residual interaction using a parity-violated superconducting qubit". Phys. Rev. A 102, 062408 (2020).
- 5 A. Noguchi, R. Yamazaki, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, "Single-photon quantum regime of artificial radiation pressure on a surface acoustic wave resonator", Nat. Commun. 11, 1183 (2020).

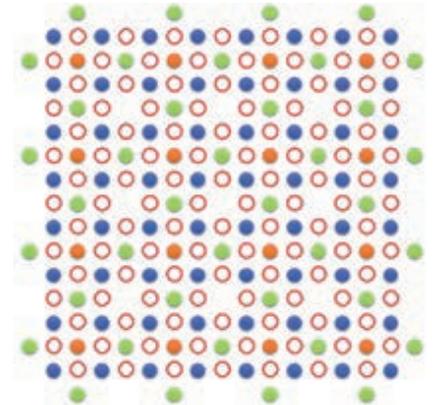
略歴

- 2013 大阪大学基礎工学研究科 学振特別研究員(PD)
- 2014 東京大学先端科学技術研究センター 特任研究員
- 2015 東京大学先端科学技術研究センター 学振特別研究員(PD)
- 2015 東京大学先端科学技術研究センター 特任助教 (-2018年)
- 2016 JST さきがけ研究員(兼任) (-2019年)
- 2019 東京大学総合文化研究科 准教授(現職)
- 2020- 稲盛科学研究機構 InaRISフェロー(現職)
- 2020 理化学研究所 創発物性科学研究センター チームリーダー (-2021年)
- 2021 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター チームリーダー(現職)
- 2022 JST さきがけ研究員(兼任)(現職)

研究紹介

周波数固定型超伝導量子ビットによるマイクロ波だけからなる高性能ゲートの実現

量子コンピュータの性能は量子操作の精度によって大きく左右されることが知られている。超伝導量子ビットとして用いられる回路のうち、最も性能が高いものは周波数固定型トランズモン量子ビットと呼ばれる回路である。この回路は、外部から周波数を変える機構を量子ビットに持たせないことにより、ノイズに強い量子ビットとなる。しかしながら、周波数が変わらないがゆえに、ゲート手法に制限が出ることや、ゲートを作用させていない間にも常時生じる相互作用によってゲートの精度が悪化することが知られている。そこで本研究では、周波数固定型量子ビットの間に、ビット間のカプラーとなるもう一つの周波数固定型量子ビットを挟んだ回路を提案し、この回路での新たなゲート手法を開発した。この手法は、上記の残留相互作用を減減できるだけでなく、さらに残った相互作用によるゲート精度の悪化が起こらない特徴を持っている。また、カプラーの駆動のみですべての量子ゲートが可能である特徴を活かし、配線数少なく多くの量子ビットを集積可能な構造を検討した。



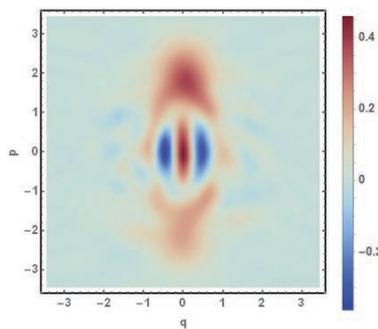
周波数固定型カプラーを用いた集積化アーキテクチャ。

S. Shirai, Y. Okubo, K. Matsuura, A. Osada, Y. Nakamura, and A. Noguchi, Phys. Rev. Lett. 130, 260601 (2023).

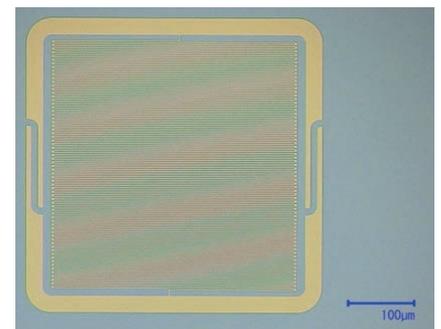
マイクロ波光子の量子測定とその反作用測定

量子回路のエラーを訂正し、量子状態の寿命を延ばす操作を量子誤り訂正と呼ぶ。特に量子ビットに比べて大きな自由度を持つ共振器中のマイクロ波光子を用いることで、量子誤り訂正を少ないオーバーヘッドで実現することができ、より高性能な量子チップを実現することができる。従来、こうした研究は、その長い寿命のために3次元マイクロ波共振器を用いて行われてきたが、拡張性の観点で、2次元回路での実現が望まれている。当チームでは、2次元共振器の性能を向上させ、高い集積性と高い性能を両立した量子マイクロ波光子系の実現を目指している。

本年度には、高性能な窒化チタン超伝導膜を用いた集中要素型のマイクロ波共振器を作製し、Q値で1,000,000を超える2次元共振器の開発を行った。このマイクロ波共振器と、当チームで開発した cubic transmon を互いに結合させた量子チップの開発に成功した。このチップを用いることで、マイクロ波光子を使った量子誤り訂正に重要なモジュラー測定と呼ばれる量子測定を実現し、さらに測定の反作用により、マイクロ波光子の量子状態を制御し、共振器内にシュレーディンガーの猫状態と呼ばれる巨視的な量子状態を生成することに成功した。



量子ビットを用いたモジュラー測定を実現し、そのマイクロ波共振器に対する反作用によってシュレーディンガーの猫状態を生成した。



集中要素型の高Q値マイクロ波共振器

主要メンバー

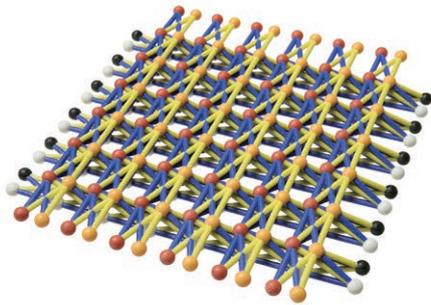
(基礎特別研究員) 佐々木 遼
(特別研究員) 富永 雄介

光量子計算研究チーム

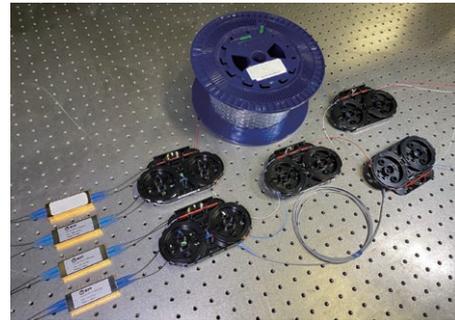
キーワード：量子情報科学、量子光学

研究室概要

量子コンピュータは、量子力学における波動性から生じる干渉を利用して、古典コンピュータを上回る計算を行う。波には定在波と進行波が有るが、我々の光を用いる方式は進行波を扱うことが大きな特徴である。他のほとんどの方式では定在波を扱い、短いデコヒーレンス時間が問題になるのに対し、我々の方式では量子状態は進行波の光パルスとして次々に生成されては測定されて消えていくため、デコヒーレンスは問題にならない。我々の方式では、広義の量子テレポーテーションを繰り返すことで、次々に生成される光パルスに量子情報を受け渡していき、計算を行う。量子テレポーテーションを繰り返すための巨大な量子エンタングルメントは、クラスター状態と呼ばれ、これはあらゆる入出力関係を重ね合わせとして持つ、量子的なルックアップテーブルと言える。これを、我々の方式では、時間領域多重の手法によりコンパクトな光学系で大規模に作る事ができる。我々の方式の大きな強みは、原理的に高速な計算が可能であることである。量子的な光を生成する光パラメトリック増幅器の帯域は、10テラヘルツ程度もある。テレポーテーションが速度のネックになるが、5Gのテクノロジーと組み合わせることで、数十ギガヘルツの非常に速いクロックを持つ量子コンピュータの実現が可能である。更には、将来的に全光テレポーテーションと組み合わせることにより、10テラヘルツの帯域を有効利用する超高速の量子コンピュータも期待できる。



光の量子状態で作ることができる二次元クラスター状態の構造を表す模型。



大規模クラスター状態を生成するための光学系。光ファイバーを用いて干渉計を作っている。



古澤 明 (Ph.D.) 副センター長、チームリーダー

主要論文

- 1 S. Konno, W. Asavanant, F. Hanamura, H. Nagayoshi, K. Fukui, A. Sakaguchi, R. Ide, F. China, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, K. Takase, M. Endo, P. Marek, R. Filip, P. van Loock, and A. Furusawa, "Logical states for fault-tolerant quantum computation with propagating light", *Science* 383, 6680 (2024).
- 2 A. Sakaguchi, S. Konno, F. Hanamura, W. Asavanant, K. Takase, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, J. Yoshikawa, E. Huntington, H. Yonezawa, and A. Furusawa, "Nonlinear feedforward enabling quantum computation" *Nature Communications* 14, 3817 (2023).
- 3 F. Hanamura, W. Asavanant, S. Kikura, M. Mishima, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, F. China, K. Fukui, M. Endo, and A. Furusawa, "Single-shot single-mode optical two-parameter displacement estimation beyond classical limit", *Phys. Rev. Lett.* 131, 230801 (2023).
- 4 A. Inoue, T. Kashiwazaki, T. Yamashima, N. Takanashi, T. Kazama, K. Enbutsu, K. Watanabe, T. Umeki, M. Endo, and A. Furusawa, "Toward a multi-core ultra-fast optical quantum processor: 43-GHz bandwidth real-time amplitude measurement of 5-dB squeezed light using modularized optical parametric amplifier with 5G technology", *Appl. Phys. Lett.* 122, 104001 (2023).
- 5 K. Takase, A. Kawasaki, B. K. Jeong, T. Kashiwazaki, T. Kazama, K. Enbutsu, K. Watanabe, T. Umeki, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, F. China, W. Asavanant, M. Endo, J. Yoshikawa, and A. Furusawa, "Quantum arbitrary waveform generator", *Science Advances* 8, eadd4019 (2022).

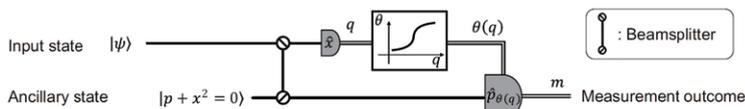
略歴

- 1991 東京大学大学院工学系研究科 博士(工学)取得
- 1986 株式会社ニコン(-2000年)
- 1988 東京大学先端科学技術研究センター 研究員
- 1996 カリフォルニア工科大学客員 研究員
- 2000 東京大学大学院工学系研究科 助教授
- 2007 東京大学大学院工学系研究科 教授(現職)
- 2021 理化学研究所量子コンピュータ研究センター 副センター長、兼光量子計算研究チーム チームリーダー (現職)

研究紹介

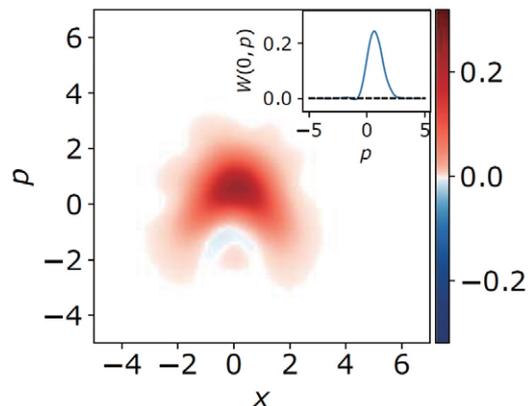
量子計算を可能にする非線形フィードフォワード

光の量子状態の時間領域多重を測定型量子コンピュータとして利用する手法はスケーラビリティの観点から有力である。この手法において、量子計算の誤り耐性とユニバーサル性は、適切な量子状態の準備と測定結果の電気光学的なフィードフォワードによって得られる。線形なフィードフォワードは技術として確立しており、それを用いて様々なガウス型操作が実現されてきたが、決定論的な非ガウス型操作に繋がる非線形フィードフォワードはこれまで実現されていなかった。我々は初めて高速でフレキシブルな非線形フィードフォワードを実現し、さらに非ガウス型の補助状態と組み合わせることで非ガウス型測定を実証した。これは光を用いた高速でユニバーサルな量子計算に繋がる成果である。



非線形フィードフォワードを用いた非線形測定の概念図。上部の測定結果に非線形な計算を行った結果に従って下部の測定をアダプティブに変えている。

©A. Sakaguchi et al. Nat. Commun. 14, 3817 (2023).

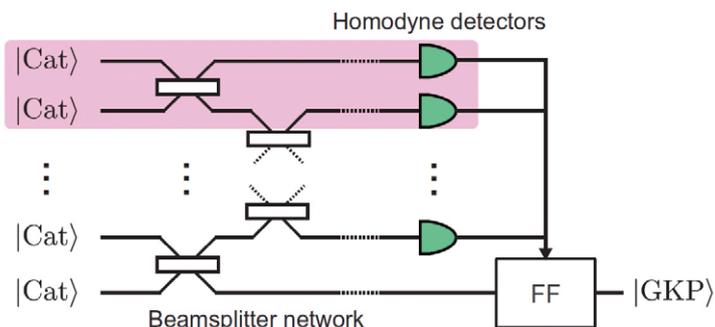


非線形測定を表す仮想的な量子状態。二次の非線形を表す放物線の形状と、非古典を表す干渉縞の兆候が見える。

©A. Sakaguchi et al. Nat. Commun. 14, 3817 (2023).

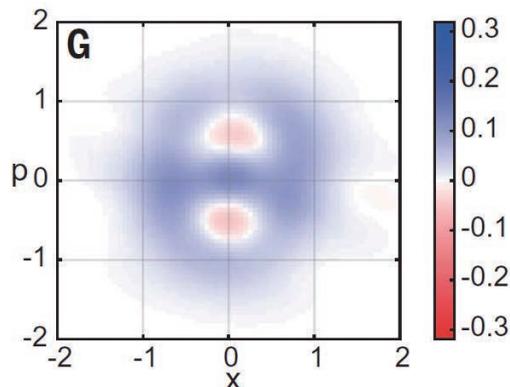
光の進行波を用いた誤り耐性型量子計算のための論理状態生成

光などのボゾン量子系において誤り耐性型量子コンピュータを実現するには、Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP) 量子ビットを利用する方法が有力である。これはボゾン量子系の連続量で表される広い状態空間の中に、格子状の分布を持つ状態として埋め込まれた量子ビットである。GKP量子ビットを光の進行波で生成するのは容易ではないが、シュレディンガーの猫状態を複数干渉させてホモダイン測定を行うことで近似状態を生成できることが知られている。我々は光の進行波において初めてシュレディンガーの猫状態2つの干渉から近似的なGKP量子ビットの生成に成功した。元となるシュレディンガーの猫状態の数を増やしていくことでGKP量子ビットの質を高めていくことができる。



シュレディンガーの猫状態からGKP量子ビットを生成する系。

©S. Konno et al., Science 383, 289 (2023).



2つのシュレディンガーの猫状態の干渉とホモダイン測定から生成されたGKP量子ビットの近似状態。

©S. Konno et al., Science 383, 289 (2023).

主要メンバー

(研究員) 吉川 純一
(特別研究員) 阪口 淳史

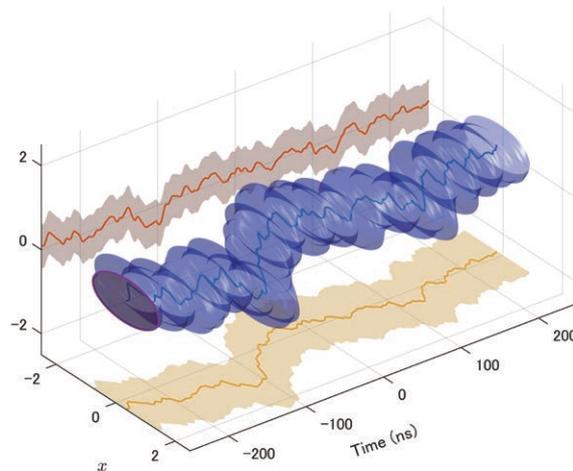
光量子制御研究チーム

キーワード: 量子コンピュータ、量子光学、量子制御、光量子コンピュータ、量子推定

研究室概要

当チームでは、光量子コンピュータの実現を目指し研究を行っている。特に光量子制御技術及び測定型光量子計算に関する研究を行っている。光を用いた量子技術には多くの利点があり、例えば室温で殆ど動作可能であることや、拡張性が高いこと、通信技術との高い親和性などが挙げられる。この光量子技術の核心技術の一つとして、量子制御がある。量子系の特徴として、通常量子状態は外乱の影響や測定によって変動しやすいため、これらを考慮に入れ、量子状態をうまく操ることが必要となる。例えば、外乱下で量子状態を一定に保つまたは所望の量子状態に収束させる、または基本測定器と制御技術を組み合わせて高性能な測定器を実現する、といった技術が重要になる。また、量子制御では、量子状態を何らかの形で推定し、それを基に制御を行うため、量子推定がコア技術となる。

我々は、光量子系に対する高精度な測定と推定器の実現、それを用いた制御技術の開発、さらに測定型光量子計算器の開発や関連する光量子技術の研究を行っている。図は、光パラメトリック発振器内の量子状態のダイナミクスを推定した結果である。特にここでは、量子スムージングという技術を用いて量子状態の高精度な推定を実現している。量子スムージングでは、光パラメトリック発振器の外部出力を測定し、順方向及び逆方向に推定を行い、その加重平均をとることで、通常手法を超える精度の推定を実現している。また、このような推定技術に加えて、高度なコヒーレント制御と測定ベース制御の研究も行っている。コヒーレント制御とは測定を介さない制御技術であり、測定器を用いることで生じる狭帯域化・複雑化を避けることができる。測定ベース制御技術は、測定を基にした制御であり、測定の持つ強い作用を利用することでコヒーレント制御より複雑な処理が可能となる。当チームではこれらの研究を通じ、光量子コンピュータや関連する量子情報処理技術の実現と高性能化を目指している。



光の量子状態の推定



米澤 英宏 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

- 1 S. Yokoyama, *et al.*, "Feasibility study of a coherent feedback squeezer," *Phys. Rev. A* 101, 033802 (2020).
- 2 S. Yokoyama, *et al.*, "Characterization of entangling properties of quantum measurement via two-mode quantum detector tomography using coherent state probes," *Opt. Express* 27, 34416 (2019).
- 3 W. Asavanant, *et al.*, "Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state," *Science* 366, 373 (2019).
- 4 S. Yokoyama, *et al.*, "Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain," *Nature Photon.* 7, 982 (2013).
- 5 H. Yonezawa, *et al.*, "Quantum-Enhanced Optical-Phase Tracking," *Science* 337, 1514 (2012).

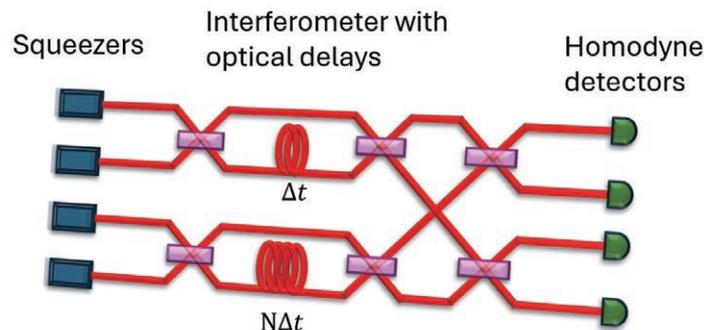
略歴

2007 東京大学 博士(工学)
 2007 東京大学 助教
 2009 東京大学 講師
 2013 ニューサウスウェールズ大学 上級講師
 2023 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 光量子制御研究チーム チームリーダー(現職)

研究紹介

測定型光量子コンピュータの開発

当チームは、光量子計算研究チームと共同で測定型光量子コンピュータの開発を行っている。この光量子コンピュータは4つのスクイズド光源、遅延付き干渉計、4つのホモダイン測定系からなる。スクイズド光源はNTT社製のLN導波路モジュールであり、帯域はおよそ6THzと極めて広帯域となっている。この広帯域スクイズド光源により超高速な量子計算が将来的に可能と期待されている。遅延付き干渉計では、2つの長さの異なる遅延路を用いることで、時間領域多重化を行い、超巨大エンタングルメントが生成される。光量子コンピュータの入力はこの遅延路で決まり、現在の我々の光量子コンピュータでは102入力が可能である。また時間領域多重化のため、計算ステップには原理的な制限はない。4つのホモダイン測定系では、生成された超巨大エンタングルメントを測定し、量子演算を行う。ここで測定の基底を変えることで、量子演算を実現している。この光量子コンピュータのハードウェア制作を行い、超巨大エンタングルメントの相関を測定することに成功している。



光量子コンピュータ概念図

量子状態スムージングの研究

量子スムージングは、量子推定において、時間的に順方向の推定と、時間的に逆方向の推定を両方行い、それらの加重平均を取り推定値を決定する手法である。この手法ではリアルタイム推定はできないが、後処理の許される問題設定において、より高い精度の推定が可能となる。これまで主に量子パラメータ推定において量子スムージングは適用されてきた。特にパラメータ推定においては、古典的に知られているスムージング手法がほぼそのまま量子系の推定に応用可能であった。近年では、さらに量子スムージングを量子状態推定へ拡張・定式化する研究が進み、量子状態をスムージングによってより高精度に推定できることが分かってきた。我々は、量子光学的手法を用い、光共振器内の量子状態の推定に量子スムージングを適用する研究を行っている。光共振器が外部環境と相互作用することで内部の場がデコヒーレンスを起こすが、光共振器からの漏れ光を測定し、さらにスムージングを適用することで、精度よく推定を行うことができる。これにより、光共振器内部のデコヒーレンスが抑制される。我々は、この量子スムージングの効果について研究を行った。

主要メンバー

(上級研究員) 横山 翔竜

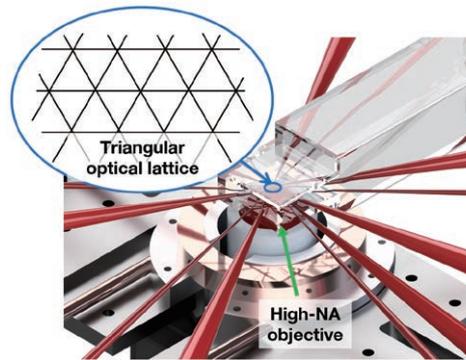
量子多体ダイナミクス研究チーム

キーワード: 量子シミュレーション、量子ダイナミクス、冷却原子、光格子

研究室概要

量子多体系を研究することは、様々な現象の発見と理解や、新しい技術の基盤へとつながる。制御性の良い量子多体系を用いて、興味の対象となる量子多体系を実験的に明らかにする、量子シミュレーションと呼ばれる手法が注目を集めている。当チームでは、光格子中の極低温原子を用いた量子シミュレーションの実現を目標としている。光格子系は、高温超伝導や量子フラストレーションなど物性科学における重要な課題について取り組む格好の舞台を提供してくれる。また、散逸やデコヒーレンスの影響が少ないため、量子多体系における非平衡ダイナミクスの研究にも適している。

我々は、特にフラストレートスピン系に焦点を絞って研究に取り組んでいる。フラストレートスピン系では、さまざまな量子相や量子スピン液体のような新たな量子状態が発現することは知られているが、その統一的な理解は得られていない。更には、実験においてまだ発見されていない量子相の存在も指摘されている。これらを解明するための基盤として、幾何学的にフラストレートしている三角格子を構築し、量子気体を導入することに成功している。また、光格子中の極低温原子気体を単一原子レベル測定できる量子気体顕微鏡も構築しており、量子相関やダイナミクスをマイクロなレベルから調べることが可能となっている。この技術を用いて、フラストレートスピン系の解明と未知の量子多体現象や量子相の探求を行う。



実験装置の模式図。空間高分解能な対物レンズにより、三角光格子中の原子集団を単一原子レベルで測定することができる。



福原 武 (D. Sci.) チームリーダー

主要論文

- 1 H. Ozawa, R. Yamamoto, and T. Fukuhara, "Observation of chiral-mode domains in a frustrated XY model on optical triangular lattices", *Phys. Rev. Res.* 5, L042026 (2023).
- 2 R. Yamamoto, H. Ozawa, D. C. Nak, I. Nakamura, and T. Fukuhara, "Single-site-resolved imaging of ultracold atoms in a triangular optical lattice", *New J. Phys.* 22, 123028 (2020).
- 3 F. Schäfer, T. Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y. Takahashi, "Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices", *Nat. Rev. Phys.*, 2, 411 (2020).
- 4 D. Yamamoto, T. Fukuhara, and I. Danshita, "Frustrated quantum magnetism with Bose gases in triangular optical lattices at negative absolute temperatures", *Commun. Phys.*, 3, 56 (2020).
- 5 I. Nakamura, A. Kanemura, T. Nakaso, R. Yamamoto, and T. Fukuhara, "Non-standard trajectories found by machine learning for evaporative cooling of 87Rb atoms", *Opt. Express*, 27, 20435 (2019).

略歴

- 2009 京都大学大学院理学研究科博士課程修了
- 2009 科学技術振興機構 ERATO上田マクロ量子制御プロジェクト 研究員
- 2010 ドイツ マックスプランク量子光学研究所 博士研究員
- 2014 理化学研究所 創発物性科学研究センター統合物性科学研究プログラム 量子多体ダイナミクス研究ユニット ユニットリーダー
- 2021 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 量子多体ダイナミクス研究ユニット ユニットリーダー
- 2022 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 量子多体ダイナミクス研究チーム チームリーダー(現職)

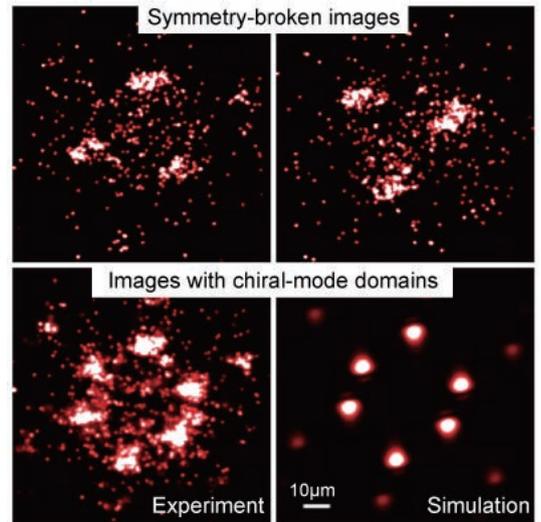
研究紹介

カイラルモード・ドメインの観測

光格子中のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の位相をスピンとみなすことでXYスピンモデルが実現される。三角格子中のBECに対し光格子の位相変調を行い、スピン間結合の符号を変えることで、フラストレートのない状況からある状況へと変化させることができる。変化を十分にゆっくり行くと、基底状態のままシステムを変化させることができ、フラストレートスピン系の基底状態である2つの縮退したカイラルモードが得られる。自発的対称性の破れにより、実験毎にランダムに片方のカイラルモードが観測された。更に、システムの変化に関する非平衡ダイナミクス (緩和と励起) を調べた。比較的早く変化させた際に、カイラルモードのドメイン構造が形成されることを観測した。

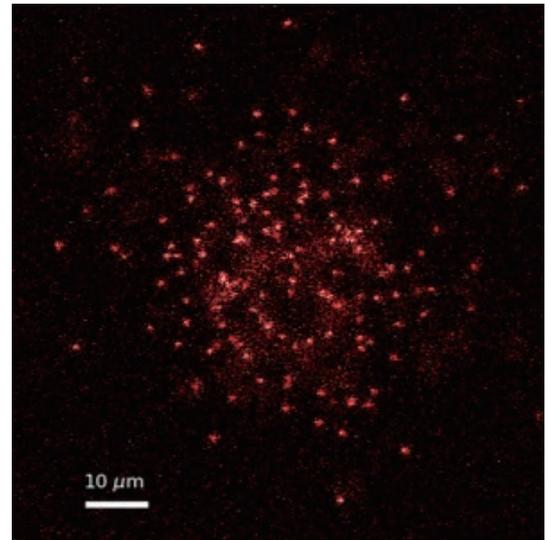
(上図) 自発的対称性の破れにより生じた二つのカイラルモードの画像。(下図) カイラルモード・ドメインが形成された場合の画像。実験データ (左) と数値シミュレーション (右)。

©Hideki Ozawa, Ryuta Yamamoto, and Takeshi Fukuhara, "Observation of chiral-mode domains in a frustrated XY model on optical triangular lattices", Physical Review Research 5, L042026 (2023).



極低温⁸⁵Rb原子気体の単一原子観測

ボース原子を光格子に導入して、各格子点に1個ずつ原子が詰まったモット絶縁体状態を準備し、原子の二つの内部状態を擬スピンとみなすと、スピン-1/2のハイゼンベルク模型に従う量子スピン系が実現される。フェッシュバツハ共鳴を用いて原子間相互作用を変えることにより、ハイゼンベルク模型におけるスピン-スピン相互作用の異方性を制御することが可能になる。これまで量子気体顕微鏡実験においてはルビジウム-87原子が用いられていた。本研究では、155ガウス付近にフェッシュバツハ共鳴を有したルビジウム-85原子を用いた実験を行った。マイクロケルビン程度の極低温まで冷却し、三角光格子で単一原子レベルでの測定を行うことに世界で初めて成功した。このシステムを用いた、スピン-1/2の三角格子反強磁性ハイゼンベルク模型に従うフラストレート磁性体の量子シミュレーションが期待される。



極低温⁸⁵Rb気体の単一原子レベルでの測定

主要メンバー

(研究員) 山本 隆太
(特別研究員) 小沢 秀樹
(テクニカルスタッフ) 大塚 陽一郎



浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム

キーワード：量子技術、量子コンピュータ、量子ビット、2次元電子系、マイクロ波

研究室概要

当チームは、液体ヘリウム表面上の電子という真空中に浮かんでいる電子を用いて量子情報処理技術に応用するための研究に取り組んでいる。液体ヘリウム表面上の電子は、その移動度の高さからわかるように非常に綺麗な二次元電子系である。電子は真空中に浮かんでいるため、周りからの揺動を受けづらく、高性能な量子ビットを実現出来ることが期待される。電子のヘリウム液面に対して垂直な方向の量子化状態はリュードベリ状態と呼ばれ、基底状態は液面から10 nm程、第一励起状態は30 nm程離れた位置に存在する。リュードベリ状態は長距離相互作用があるため、量子ビットの集積性を担保しつつ、2量子ビットゲートを実現出来ることが期待される。

また、我々は量子コンピュータ大規模化のための低温マイクロ波測定機器の開発にも取り組んでいる。量子ビットは多くの場合極低温下に置かれ、マイクロ波で制御・読み出しされる。現在実現している小規模な量子コンピュータでは、室温に置かれているマイクロ波測定機器と極低温下の量子ビットを繋ぐための太い電線が設置されている。多数の量子ビットが集積化された量子コンピュータを実現するために必要な数の太い電線を設置することは難しい。この問題を解決するために、トンネルダイオードと呼ばれる電子素子を活用して、極低温下で動作する小型で低消費電力のマイクロ波測定機器を開発することを目標とする。



液体ヘリウムを貯めるセルと呼ばれる実験器具



川上 恵里加 (Ph. D.) 理研白眉研究チームリーダー

主要論文

- 1 A. Jennings, X. Zhou, I. Grytsenko, E. Kawakami, "Quantum computing using floating electrons on cryogenic substrates: Potential And Challenges", *Appl. Phys. Lett.* 124, 120501 (2024).
- 2 E. Kawakami, A. Elarabi, and D. Konstantinov "Relaxation of the excited Rydberg States of Surface Electrons on Liquid Helium", *Phys. Rev. Lett.*, 126, 106802 (2021).
- 3 E. Kawakami, A. Elarabi, and D. Konstantinov "Image-Charge Detection of the Rydberg States of Surface Electrons on Liquid Helium", *Phys. Rev. Lett.*, 123 086801 (2019).
- 4 E. Kawakami, T. Jullien, P. Scarlino, D. R. Ward, D. E. Savage, M. G. Lagally, Viatcheslav Dobrovitski, Mark Friesen, S. N. Coppersmith, M. A. Eriksson, and L. M. K. Vandersypen, "Gate fidelity and coherence of an electron spin in a Si/SiGe quantum dot with micromagnet", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113, 42, 11738 (2016).
- 5 E. Kawakami, P. Scarlino, D. R. Ward, F. R. Braakman, D. E. Savage, M. G. Lagally, Mark Friesen, S. N. Coppersmith, M. A. Eriksson, and L. M. K. Vandersypen, "Electrical control of a long-lived spin qubit in a Si/SiGe quantum dot", *Nat. Nanotechnol.*, 9, 666-670 (2014).

略歴

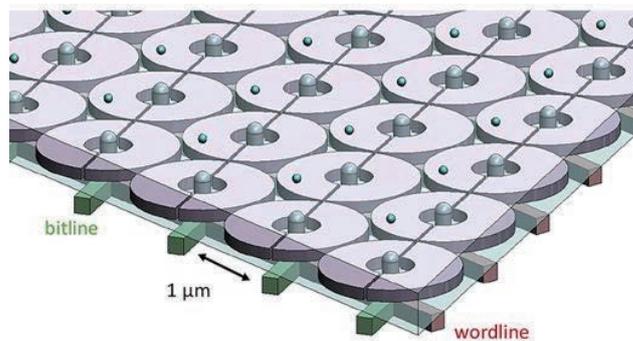
- 2016 デルフト工科大学(オランダ) 博士号取得
- 2016 沖縄科学技術大学院大学 博士研究員
- 2017 科学技術振興機構 さきがけ研究員
- 2020 理化学研究所 浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム 理研白眉研究チームリーダー (現職)

研究紹介

ヘリウム表面上の電子を用いた量子コンピュータの理論的提案

ヘリウム表面上に浮揚する電子のリュードベリ状態とスピン状態のハイブリッド量子ビットを提案し、それを用いて量子ビットを集積化する方法を提案した。リュードベリ状態とスピン状態の間に人工的な相互作用を作り出し、それを介してリュードベリ状態とスピン状態間で量子ビットの状態を移すことが出来ることを可能にする。こうすることによって、スピン状態の長いコヒーレンス時間とリュードベリ状態の長距離相互作用のどちらも必要に応じて利用することが出来る。

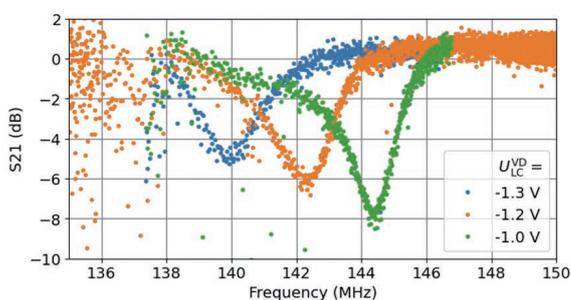
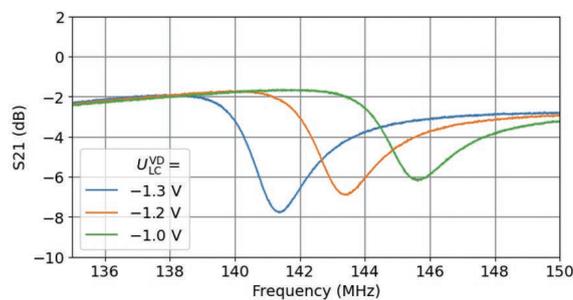
微小磁石を電子近傍に置くことによって、リュードベリ状態とスピン状態の間に人工的な相互作用を作り出す。この相互作用によってスピン状態の緩和時間は50 ms程と短くなってしまうが、量子操作の信頼度には影響しないことが理論的に計算された。1量子ビットゲートの信頼度は>99.9999%、2量子ビットゲートの信頼度は~99%と理論的に見積もられた。



電子（青い円）は、スケーラブルな量子コンピュータを実現するために二次元配列で配置されます。私たちの目標は、古典コンピュータのDRAM方式を模して、ビットラインとワードラインの交差点に量子ビットを統合することです。

極低温で動作するマイクロ波発振器

誤り耐性のある拡張可能な量子コンピュータ実現のために必要な機能の一つに、信頼性が高くエネルギー効率性の高い量子ビットの操作と読み出しがある。近年では、量子ビットの操作のための機能が極低温で動作するCMOS技術や超伝導 Josephson junctionを用いて実現された。これに対し、我々は、トンネルダイオード発振器を用いた量子ビット読み出しのための極低温で動作するマイクロ波発振器を開発している。トンネルダイオード発振器はCMOSデバイスや超伝導 Josephson junctionと比べて、発熱量が少ない(~1μW)という利点がある。最近、我々は極低温で動作するトンネルダイオード発振器を用いて、同じく極低温に置かれた共振器の特性を測定することに成功した。



上図は、極低温環境下で置かれたマイクロ波発振器を使用して、同様に極低温に置かれた共振器の測定結果。下図は、比較のために室温で置かれたマイクロ波発振器を使用して、極低温に置かれた共振器の測定結果。

主要メンバー

(技師) **GRYTSENKO Ivan**

(特別研究員) **JENNINGS Asher**

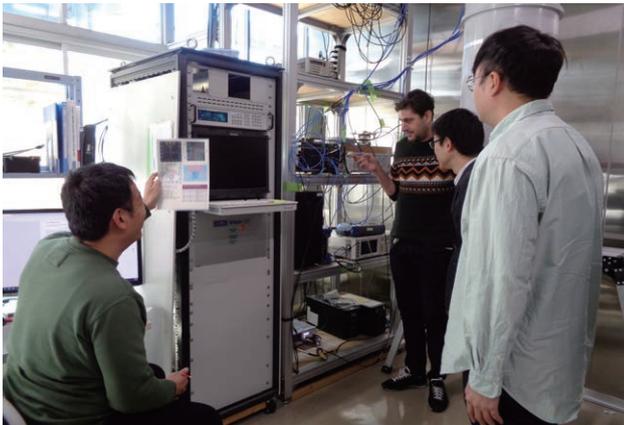
(研究パートタイマーI) **RYBALKO Oleksiy**

半導体量子情報デバイス研究チーム

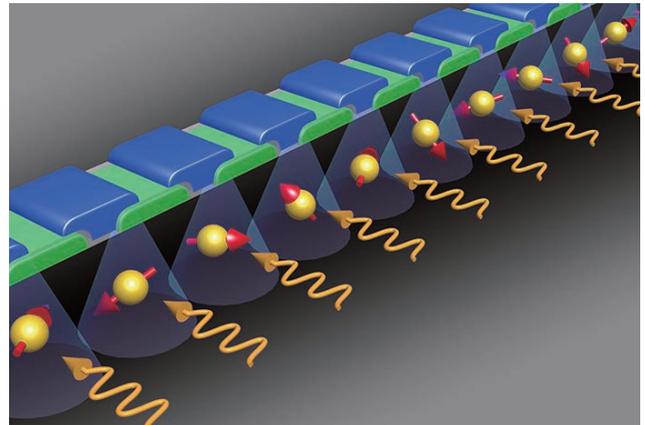
キーワード：量子コンピュータ、半導体、量子ビット、量子ドット、電子スピン

研究室概要

我々は半導体量子ドット中の電子（あるいは正孔）のスピンを量子情報の単位（量子ビット）として量子コンピュータへ応用するための技術開発を行っている。半導体量子コンピュータは、コヒーレンス時間が長いこと、半導体集積化技術と互換性があること、1ケルビンを超える温度で動作が可能であることから、その将来性が期待されている。我々は、これまでに、シリコン量子ドット中の電子スピンを量子ビットとする主要な量子操作（単一量子ビット、2量子ビットゲート、初期化、読み出し）において、誤り耐性の閾値を超える操作忠実度を達成した。これらの知見と技術を基盤として中～大規模量子コンピュータを構築することを目指して、量子論理演算技術、システムアーキテクチャ、半導体デバイスの集積化に互換性のある量子ビットデバイスなどの開発を行う。



実験室の様子



一次元スピン量子ビットデバイスのイメージ



樽茶 清悟 (D.Eng.) チームリーダー

主要論文

- 1 T. Kobayashi, T. Nakajima, K. Takeda, A. Noiri, J. Yoneda, and S. Tarucha, "Feedback-based active reset of a spin qubit in silicon", *npj Quantum Information* 9, 52 (2023).
- 2 J.S. Rojas-Arias, A. Noiri, P. Stano, P. (Stano, P), T. Nakajima, J. Yoneda, K. Takeda, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, D. Loss, and S. Tarucha, "Spatial noise correlations beyond nearest neighbors in 28Si/Si-Ge spin qubits", *Phys. Rev. Appl.* 20, 5 (2023).
- 3 K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, T. Kobayashi, and S. Tarucha, "Quantum error correction with silicon spin qubits", *Nature*, 608, 682-686 (2022).
- 4 M. Tadokoro, T. Nakajima, T. Kobayashi, K. Takeda, A. Noiri, K. Tomari, J. Yoneda, S. Tarucha, and T. Kodera, "Designs for a two-dimensional Si quantum dot array with spin qubit addressability", *Sci. Rep.*, 11, 19406 (2021).
- 5 T. Nakajima, Y. Kojima, Y. Uehara, A. Noiri, K. Takeda, T. Kobayashi, and S. Tarucha, "Real-time feedback control of charge sensing for quantum dot qubits", *Phys. Rev. Applied*, 15, L031003 (2021).

略歴

- 1978 日本電信電話公社基礎研究所
- 1986 工学博士
- 1990 同研究所グループリーダー
- 1998 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授
- 2004 同 工学系研究科理工学専攻 教授
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 部門長 (現職)
- 2013 理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子機能システム研究グループ グループディレクター (現職)
- 2018 同創発物性科学研究センター 副センター長
- 2019 東京理科大学大学院理学研究科物理学専攻 客員教授 (現職)
- 2020 理化学研究所 創発物性科学研究センター 半導体量子情報デバイス研究チーム (現職)

研究紹介

シリコン量子ビットの高精度スピン読み出し

スピン量子ビットでは、通常、単一のスピンを直接単発測定することは困難なため、スピン状態を電荷状態に変換し、その電荷状態の測定によってスピンを測定する（スピン-電荷変換）。これにはエネルギー選択トンネルと呼ばれる方法が用いられていた。しかし、この方法では、測定に長い時間がかかる上、高精度な測定が難しいという問題があった。我々はシリコン量子ドット中の二つの電子スピんに起こるスピン閉塞現象を用いることで、従来の方法に比べて量子ビット読み出しの速度と精度を大きく改善した。

試料には同位体制御したSi/SiGe量子井戸中に作製した四重量子ドットのうちの二重量子ドットを用いた。(図1) この二重量子ドット中に2個の電子スピンがある場合、パウリの排他原理のために、両者が反平行な場合にのみ電子はドット間を移動して、二重占有(2,0)が生じる。一方平行な場合は、電子は移動できないので単一占有(1,1)に留まる。今回、電子占有の差を検知する電荷計のデザインを改良し、電子移動に対する電荷計の感度を改善することにより、スピンを識別するための電荷計信号の可視度を99.6% (世界最高値)に向上し(図2)、また測定時間を短縮することに成功した。

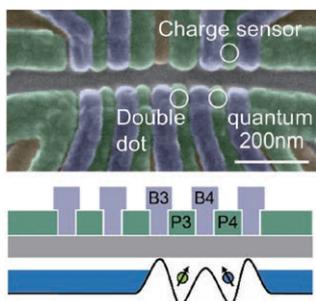


図1: 2量子ビットデバイス

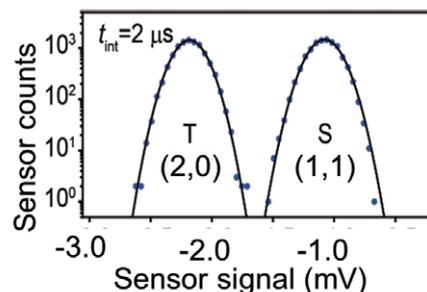


図2: スピン読み出し

シリコンスピン量子ビットのフィードバック量子操作による状態準備

量子誤り訂正のような高度な量子情報技術の実現には、量子ビットの測定結果をフィードバックした量子操作による量子ビットの準備が求められる。近年シリコンスピン量子ビットでも実装されたが準備忠実度が測定の忠実度に制限されて低かった。本研究ではフィードバック方法の改良により準備忠実度の向上に成功した。

複数回の量子非破壊測定結果をハードウェアシークエンサー上で処理し、その結果に基づいてフィードバック操作を行った(図1)。複数回の測定の結果から量子ビットの状態を推測することで1回ごとの測定のエラーの影響を抑制し98%以上の忠実度を実現した(図2)。この手法をもちいることで、測定の忠実度の向上および測定時間の短縮に伴い、準備忠実度のさらなる向上を見込める。

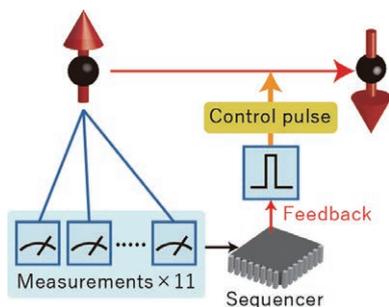


図1: 複数回の測定によるフィードバック量子操作の概略図。

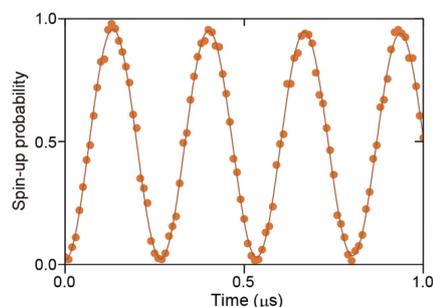


図2: 状態準備された量子ビットに対する量子操作の一例。振幅の大きさから準備忠実度の高さを評価できる。

主要メンバー

(研究員) 小林 嵩

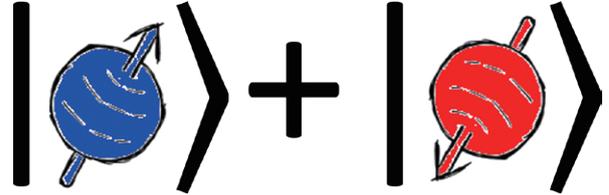
(テクニカルスタッフ) 黒田 玲子

半導体量子情報デバイス理論研究チーム

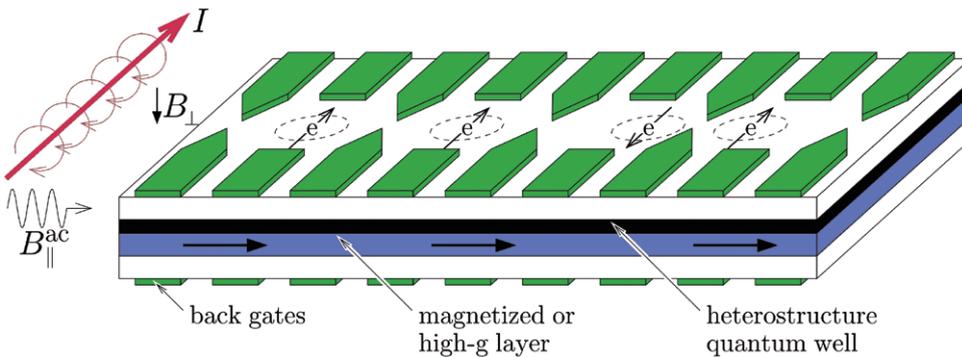
キーワード: 量子ドット、スピンを用いた量子情報処理、量子ビット、スピン-軌道相互作用、量子情報処理

研究室概要

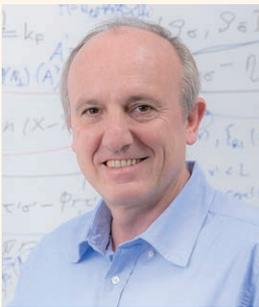
当チームではスピンを用いた量子コンピュータの理論に取り組み、SiとGeを用いたゲート制御量子ドットを用いてCMOS技術と互換な量子コンピュータをデザインすることを目指している。我々は、スピン軌道相互作用を用いて電場による制御を実現できるスピン量子ビットに着目しており、適切なバンド構造モデルを用いて、低次元に閉じ込めた正孔と電子の性質を調べ、量子ビットをノイズから守るための最適なセットアップやその方法について研究している。また、量子ビット間結合の解析も行っており、これにより多数の量子ビットを用いたネットワークを実現できる可能性がある。我々の究極の目的は、高速で微小かつ拡張可能な未来の量子コンピュータ素子を特定することである。



Spin-based quantum computing uses the spin of an electron in a solid to represent a quantum bit.



An array of quantum dots envisioned to realize a quantum processor.



LOSS Daniel(Ph.D.)チームリーダー

主要論文

- 1 J. S. Rojas-Arias, A. Noiri, P. Stano, T. Nakajima, J. Yoneda, K. Takeda, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, D. Loss, and S. Tarucha, "Spatial noise correlations beyond nearest neighbors in $^{28}\text{Si}/\text{Si-Ge}$ spin qubits", *Phys. Rev. Appl.* 20, 054024 (2023).
- 2 J. Yoneda, J. S. Rojas-Arias, P. Stano, K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, D. Loss, and S. Tarucha, "Noise-correlation spectrum for a pair of spin qubits in silicon", *Nat. Phys.* 19, 1793 (2023).
- 3 P. Stano and D. Loss, "Review of performance metrics of spin qubits in gated semiconducting nanostructures," *Nat. Rev. Phys.* 4, 672 (2022).
- 4 A. Gutierrez-Rubio, J. S. Rojas-Arias, J. Yoneda, S. Tarucha, D. Loss, and P. Stano, "Bayesian estimation of correlation functions," *Phys. Rev. Research* 4, 043166 (2022).
- 5 D. Loss, D. DiVincenzo, "Quantum computation with quantum dots", *Phys. Rev. A* 57, 120 (1998).

略歴

- 1985 スイス チューリッヒ大学理論物理学 博士学位取得
- 1985 スイス チューリッヒ大学 博士研究員
- 1989 米国 イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 フェロー
- 1991 米国 IBMトーマス・J・ワトソン研究所 研究員
- 1993 カナダ サイモンフレーザー大学 助教授
- 1995 同 准教授
- 1996 スイス バーゼル大学物理学科 教授 (現職)
- 2012 理化学研究所 創発量子システム研究チーム チームリーダー
- 2013 同 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 量子システム理論研究チーム チームリーダー (現職)
- 2021 同 量子コンピュータ研究センター 半導体量子情報デバイス理論研究チーム チームリーダー (現職)

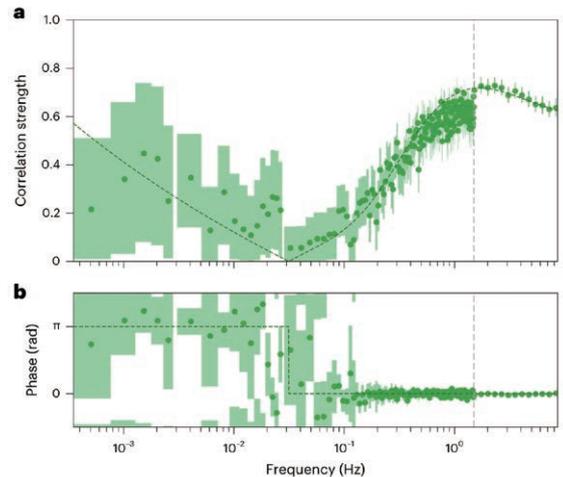
研究紹介

シリコンスピン量子ドット対のノイズ相関スペクトル

スピンキュービットの典型的な大きさは数十ナノメートルほどであり、量子コンピュータの微細化・大規模化の観点から非常に適している。ところが、同時に系の微細化は、キュービットが同じ局所環境を共有するために相関ノイズの影響を受けることを意味し、量子誤り訂正の実装において大きな障害となる可能性がある。我々は、実験グループと協同で、隣接する2つのスピンキュービット間のノイズ相関を初めて定量化し、ノイズがキュービット間の交換相互作用と強く相関する可能性を見出した。我々のモデルが、フィッティングパラメータなしに測定値と定量的な一致を達成していることから、このモデルがデバイス内のデコヒーレンスの主要な物理的要因を網羅していることを示しており、従ってノイズ相関の起源が理解された。

隣接スピン量子ビットのペアに対する正規化されたノイズの相互相関振幅(a)と位相(b)。低周波数では位相のずれた相関が、高周波数では完全に位相の揃った相関が見られます。これはスピン量子ビットにおける相関ノイズの最初の定量化である。

©J. Yoneda, J. S. Rojas-Arias, P. Stano, K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, D. Loss, and S. Tarucha, "Noise-correlation spectrum for a pair of spin qubits in silicon", *Nat. Phys.* 19, 1793 (2023).

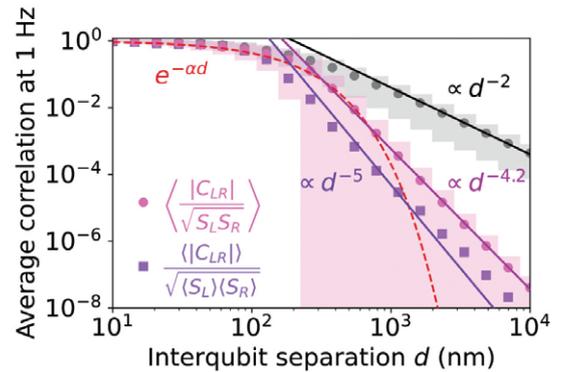


電荷ノイズ相関のキュービット間距離依存性

スピンキュービットのノイズが相関していることを知ると、「ノイズ相関の範囲はどの程度なのか?」という自然な疑問が生じる。この問いは単純ではなく、量子エラー訂正にとって極めて重要である。そこで我々は、電荷ノイズを、クーロン相互作用するキュービットのつくる電荷二準位系の揺らぎの効果としてモデル化した。このモデルを用いて、実際のデバイスのノイズクロススペクトルにフィッティングし、定量的な一致を得た。最後に、モンテカルロシミュレーションを行い、キュービット間の平均相関振幅の相互距離依存性を定量化した。我々は、表面の金属ゲートからのスクリーニングの存在下では、より急な冪的な減衰を見出した。本研究は、ノイズ相関を抑制するために金属ゲートの高密度デバイスを製作することが好ましいことを示唆し、その範囲についての情報を提供するものである。

量子ビット間距離の関数としての平均ノイズ相互相関振幅。ピンク(グレー)は金属ゲートからの遮蔽がある(ない)場合の結果を示す。丸と四角は2種類の平均操作を示す。

©J. S. Rojas-Arias, A. Noiri, P. Stano, T. Nakajima, J. Yoneda, K. Takeda, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, D. Loss, and S. Tarucha, "Spatial noise correlations beyond nearest neighbors in $^{28}\text{Si}/\text{Si-Ge}$ spin qubits", *Phys. Rev. Appl.* 20, 054024 (2023).



主要メンバー

(特別研究員) ROJAS ARIAS Juan



量子計算理論研究チーム

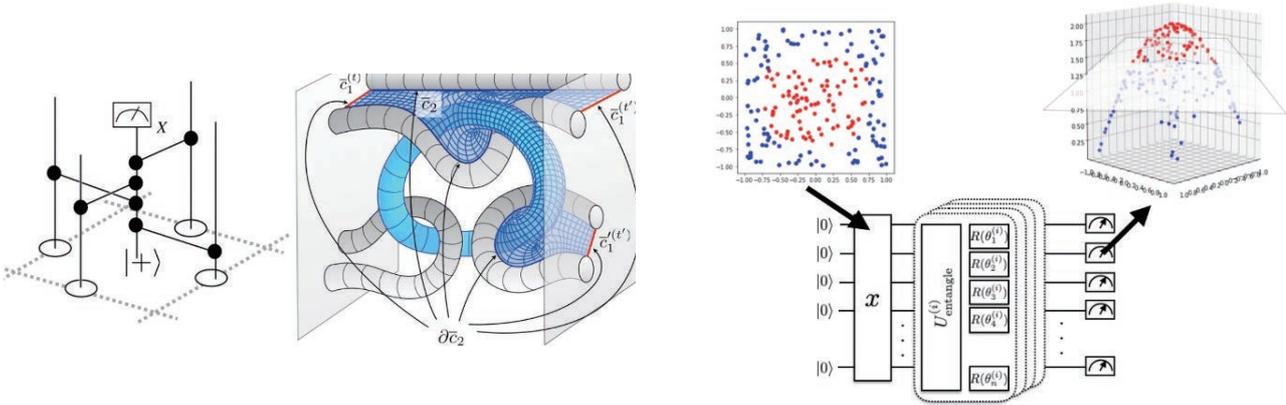
キーワード: 量子コンピューティング、量子情報科学、量子機械学習、量子誤り訂正

研究室概要

量子コンピューティングは革新的な計算技術であり、量子計算理論研究チームはこの変革の最前線にいる。量子コンピュータの実現に不可欠な量子計算理論やソフトウェアの開発、新しい量子アルゴリズムの設計、性能の解析に重点を置いている。

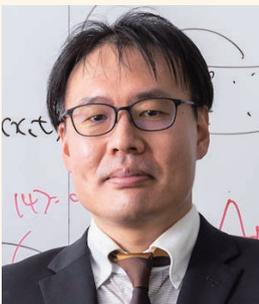
特に、当チームは、現在および近い将来に実現可能な規模で量子コンピュータの性能を活用するための技術に取り組んでいる。基礎物理学、量子化学、量子機械学習における応用を探索する一方で、量子コンピュータアーキテクチャの最適化にも取り組んでいる。また、複雑な計算を高い信頼性で実行できる、量子エラー訂正機能を備えた大規模な耐障害性量子コンピュータの設計も目指している。

量子情報科学は、基礎物理学、量子化学、機械学習、高性能計算機などの分野と、学際的な研究を推進している。我々は、量子コンピュータや量子情報科学を通して、新たな科学的フロンティアを切り開くことを目指している。このような協同的なアプローチにより、量子コンピュータとその実社会への応用の進歩を推進し、RQCを量子テクノロジーの未来を形作る重要なプレーヤーとして位置づけている。



量子誤り訂正のための量子回路 (左)、表面符号を用いた誤り耐性量子計算 (右)。

量子回路学習: パラメータ付き量子回路をモデルとする教師あり機械学習。



藤井 啓祐 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

- 1 Y. Akahoshi, K. Maruyama, H. Oshima, S. Sato, and K. Fujii, "Partially fault-tolerant quantum computing architecture with error-corrected clifford gates and space-time efficient analog rotations" *PRX Quantum* 5, 010337 (2024).
- 2 K. Mizuta, Y. O. Nakagawa, K. Mitarai, and K. Fujii, "Local variational quantum compilation of a large-scale Hamiltonian dynamics" *PRX Quantum* 3, 040302 (2022).
- 3 K. Fujii, K. Mizuta, H. Ueda, K. Mitarai, W. Mizukami, and Y. O. Nakagawa, "Deep Variational Quantum Eigensolver: a divide-and-conquer method for solving a larger problem with smaller size quantum computers" *PRX Quantum* 3, 010346 (2021).
- 4 K. Mitarai, M. Negoro, M. Kitagawa and K. Fujii, "Quantum Circuit Learning", *Phys. Rev. A*, 98, 032309 (2018).
- 5 K. Fujii and K. Nakajima, "Harnessing Disordered-Ensemble Quantum Dynamics for Machine Learning", *Phys. Rev. Applied* 8, 24030 (2017).

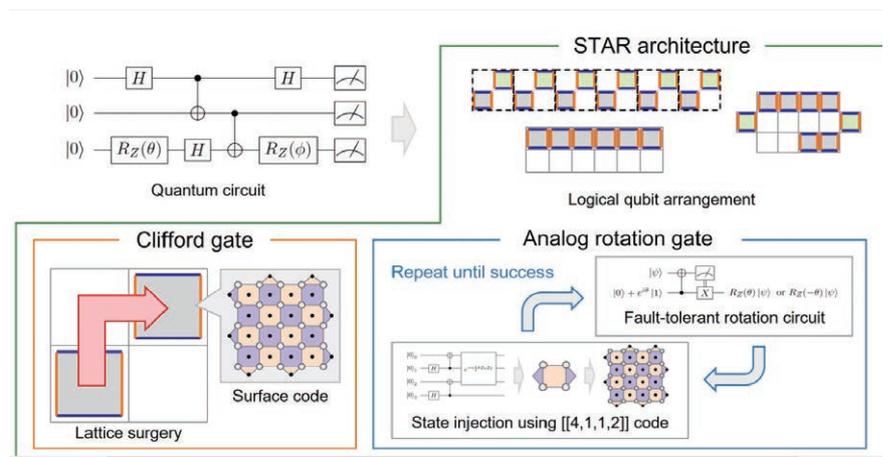
略歴

- 2011 京都大学 博士(工学)
- 2011 大阪大学 特任研究員
- 2013 京都大学 特定助教
- 2016 東京大学 助教
- 2017 京都大学 特定准教授
- 2019 大阪大学大学院基礎工学研究科 教授(現職)
- 2020 大阪大学量子情報・量子生命研究センター 副センター長(現職)
- 2020 理化学研究所量子コンピュータ研究センター チームリーダー(現職)

研究紹介

部分的に誤り訂正を利用する新概念量子コンピュータアーキテクチャの提案

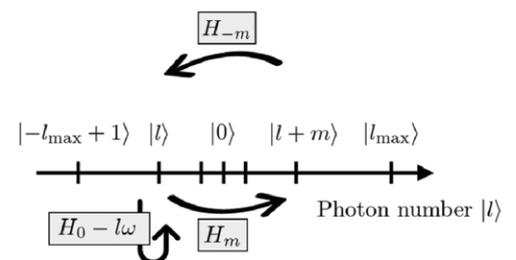
現在実現している規模の数十から数百量子ビット規模の量子コンピュータ (NISQ) ではノイズの問題があるため、実行可能な計算規模が制限されてしまう。このため、量子優位性が理論的に保証されているような複雑な量子アルゴリズムの実行には、量子誤り訂正機能を有する誤り耐性量子コンピュータ (FTQC) の実現が必要である。誤り耐性量子コンピュータには、100万量子ビット規模のハードウェアが必要であると見積もられており、NISQとFTQCには4桁ものギャップがある。本研究では、量子アルゴリズムで頻繁に必要となるクリフォード演算を誤り訂正によって守り、一方で誤り訂正のために通常多くのオーバーヘッドを必要とする連続回転ゲートはエラー検出をしつつノイズを許容して実行する新たなアーキテクチャ、準誤り耐性量子計算 (earlyFTQC) を提案した。エラー確率が 10^{-4} 程度であれば、1万量子ビットであっても、スーパーコンピュータでもシミュレーションが難しいタスクを精度保証して実行できることが明らかとなった。本アーキテクチャは、NISQ時代から持続可能な形でFTQCへと量子コンピュータが進化していくための新たなマイルストーンとなると同時に、早期の量子コンピュータの実問題への応用を可能とする。



準誤り耐性量子コンピュータアーキテクチャの概念図

時間に依存したハミルトニアンダイナミクスのシミュレーションのための最適な量子アルゴリズムの構築

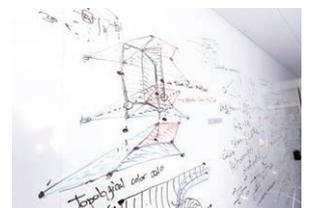
リチャード・ファインマンが「自然界を効率よくシミュレーションしたければ、量子力学の原理で動くコンピュータを作らなければならない」と言って、量子コンピュータという概念を提唱して以来、量子多体系のシミュレーションは、量子コンピュータの最も有望なアプリケーションの1つである。特に近年、量子特異値変換アルゴリズムという新たなタイプのアルゴリズムが登場し、時間に依存しないハミルトニアンダイナミクスのシミュレーションのための最適な量子アルゴリズムが構築されている。本研究では、時間に依存したハミルトニアンに対してフロッケ理論を応用することで、時間に依存するハミルトニアンでの時間発展を最適にシミュレーションする量子アルゴリズムを構築した。この結果は、非平衡現象や化学反応など複雑な現象を高速化かつ精密にシミュレーションすることを可能にするものである。



時間に依存するハミルトニアンをフロッケヒルベルト空間で記述したときの実効ハミルトニアン概念図

主要メンバー

(研究員) 池田 達彦
(基礎科学特別研究員) 米田 靖史



量子情報物理理論研究チーム

キーワード: 量子物理学、量子光学、量子情報処理と量子コンピューティング、人工知能、マシンラーニング、量子物理学のためのソフトウェア、超伝導キュービット

研究室概要

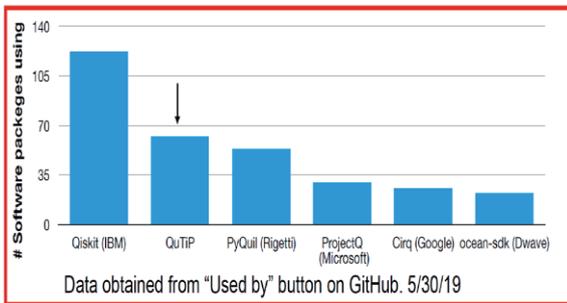
当研究チームは、ナノサイエンス、量子計算、量子情報処理、超伝導量子回路、量子光学、原子物理、ナノメカニクス、メゾスコピック物理、計算物理、そして物性物理といった分野の境界における学際的な研究を行っている。

我々は、量子情報処理、量子光学、量子オープンシステムなどで、世界中で使用されているソフトウェア QuTiP を開発した。また、AI や機械学習の技術を利用し、計算が困難な問題の解決にも取り組んでいる。Web of Science では、過去7年間 (2017~2023年) に渡り、我々の研究成果が高被引用論文として掲載された。このマイルストーンに到達する研究者は0.1%未満である。

我々は幾つもの企業 (NEC、日立、東芝、NTT、IBM など) と共同で30以上の論文を発表してきた。現在、NTT 研究所と難解な計算問題の解決を目指した長期的な共同研究を行っている。

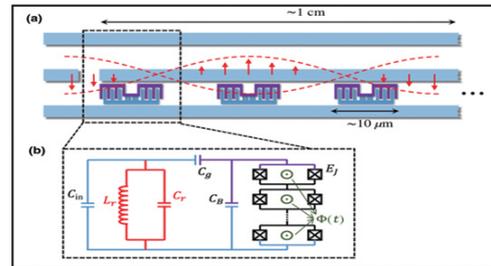
More than 1.5 Million downloads!

Our quantum software (QuTiP) is used by more groups than the ones by Google, Microsoft, D-Wave, etc.



Our software QuTiP is widely used by very many research groups, and it has been downloaded more than 1.5 million times.

Quantum Information with quantum cat states



Quantum cat states play a very important role in quantum science and technology, and we have obtained several interesting results in this area.

Quantum cat states play an important role in quantum computing and we have obtained interesting results in this area.



NORI Franco (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

- 1 W. Qin, A. Miranowicz, F. Nori, "Beating the 3 dB Limit for Intracavity Squeezing and Its Application to Nondemolition Qubit Readout", *Phys. Rev. Lett.* 129, 123602 (2022).
- 2 W. Qin, A. Miranowicz, H. Jing, F. Nori, "Generating Long-Lived Macroscopically Distinct Superposition States in Atomic Ensembles", *Phys. Rev. Lett.* 127, 093602 (2021).
- 3 Y. Nomura, N. Yoshioka, F. Nori, "Purifying Deep Boltzmann Machines for Thermal Quantum States", *Phys. Rev. Lett.* 127, 060601 (2021).
- 4 X. Wang, T. Liu, A.F. Kockum, H.R. Li, F. Nori, "Tunable Chiral Bound States with Giant Atoms", *Phys. Rev. Lett.* 126, 043602 (2021).
- 5 Y.H. Chen, W. Qin, X. Wang, A. Miranowicz, F. Nori, "Shortcuts to Adiabaticity for the Quantum Rabi Model: Efficient Generation of Giant Entangled Cat States via Parametric Amplification", *Phys. Rev. Lett.* 126, 023602 (2021).

略歴

- 1982 Conic Fellow and Graduate Research Assistant; Physics Department. Also at the Materials Research Laboratory; University of Illinois, USA
- 1987 Postdoctoral Research Fellow, Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, USA
- 1990 Assistant Professor, Associate Professor, Full Professor and Research Scientist, Department of Physics, University of Michigan, Ann Arbor, USA. (-present)
- 2002 Team Leader, Frontier Research System and, afterwards, Advanced Science Institute, RIKEN, Saitama, Japan.
- 2013 Concurrent positions as: Group Director of the Quantum Condensed Matter Research Group, CEMS, and also Team Leader at iTHES (Interdisciplinary Theoretical Sciences). RIKEN
- 2013 Chief Scientist. Theoretical Quantum Physics Laboratory, Cluster for Pioneering Research, RIKEN, Japan. (-present)
- 2020 Team Leader for the Quantum Information Physics Theory Research Team, Quantum Computing Center, RIKEN, Japan. (-present)

研究紹介

量子猫状態を持つ量子情報

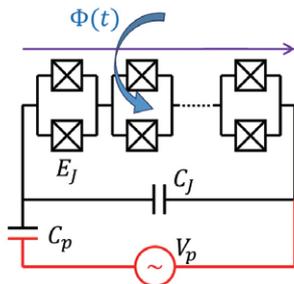
量子猫状態は量子科学技術において非常に重要な役割を担っており、我々はこの分野でいくつかの興味深い結果を得ている。この分野における我々の最近の成果は、次の4つの例を含む出版物に掲載されている。

Y.H. Kang et al., *Nonadiabatic geometric quantum computation with cat-state qubits via invariant-based reverse engineering*, Phys. Rev. Research 4, 013233 (2022).

Z.Y. Zhou et al., *Enhancing dissipative cat-state generation via nonequilibrium pump fields*, Phys. Rev. A 106, 023714 (2022).

Y.H. Chen et al., *Fault-Tolerant Multiqubit Geometric Entangling Gates Using Photonic Cat-State Qubits*, Phys. Rev. Applied 18, 024076 (2022).

W. Qin, A. Miranowicz, F. Nori, *Beating the 3 dB Limit for Intracavity Squeezing and Its Application to Nondemolition Qubit Readout*, Phys. Rev. Lett. 129, 123602 (2022).



我々の提案を実現するための超伝導量子回路。この回路は、SQUID アレイ (黒)、分路コンデンサ (黒)、フラックスバイアスライン (紫)、およびACゲート電圧 (赤) で構成されている。

©APS. Reference: Y.H. Kang et al., *Nonadiabatic geometric quantum computation with cat-state qubits via invariant-based reverse engineering*, Phys. Rev. Research 4, 013233 (2022).

超強力な光と物質の結合の分野で、いくつかの一般的な結果を得ている

超強力な光と物質の結合の分野で、最近の結果を含め、いくつかの一般的な結果を得た。

V. Macri et al., *Revealing higher-order light and matter energy exchanges using quantum trajectories in ultrastrong coupling*, Phys. Rev. A 105, 023720 (2022).

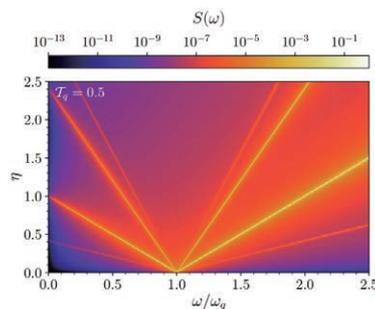
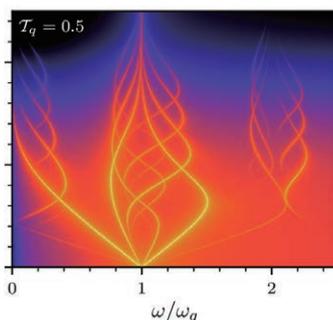
W. Salmon et al., *Gauge-independent emission spectra and quantum correlations in the ultrastrong coupling regime of open system, cavity-QED*, Nanophotonics 11, pp. 1573 (2022).

A. Mercurio et al., *Regimes of cavity QED under incoherent excitation: From weak to deep strong coupling*, Phys. Rev. Research 4, 023048 (2022).

Y.H. Chen et al., *Enhanced-Fidelity Ultrafast Geometric Quantum Computation Using Strong Classical Drives*, Phys. Rev. Applied 18, 064059 (2022).

V. Macri et al., *Spontaneous scattering of Raman photons from cavity-QED systems in the ultrastrong coupling regime*, Phys. Rev. Lett., 129, 273602 (2022).

L.B. Fan et al., *Quantum coherent control of a single molecular-polariton rotation*, Phys. Rev. Lett., 130, 043604 (2023).



有効量子ビット温度 T_q を用いた超強力結合領域と深部強結合領域に達する η の空洞発光スペクトル $S_c(\omega)$ の対数2Dプロット

©APS. Reference: A. Mercurio, V. Macri, C. Gustin, S. Hughes, S. Savasta, F. Nori, *Regimes of cavity QED under incoherent excitation: From weak to deep strong coupling*, Phys. Rev. Research 4, 023048 (2022).

主要メンバー

(研究員) **GNEITING Clemens**

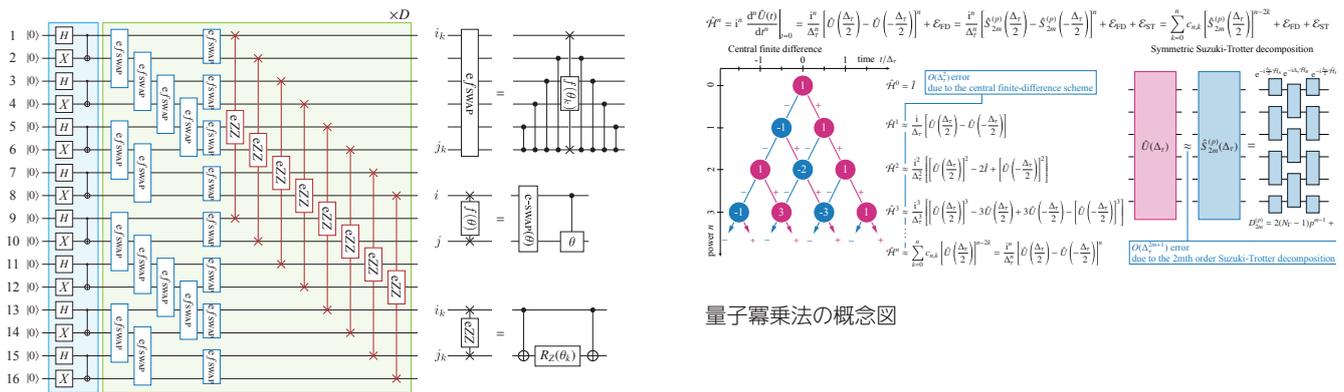
(JSPS外国人特別研究員) **MENCZEL Paul**

量子計算科学研究チーム

キーワード: 量子多体系、量子ダイナミクス、量子情報物理、テンソルネットワーク、高性能計算

研究室概要

当チームは量子多体系に対する量子コンピュータを用いた量子シミュレーションの実現を目指し、量子-古典ハイブリッド法を中心とした量子アルゴリズムの研究開発を行なっている。その実証研究のために、古典コンピュータによる量子計算のシミュレーション開発も行なっている。また、量子回路内で行われる量子計算を量子多体系の量子ダイナミクスと考えた場合の量子情報的な解析を行なっている。さらに、将来の高性能計算に向けた「富岳」などのスーパーコンピュータと量子コンピュータのハイブリッドシステムにも興味を持っている。



Hubbard 模型に対する VQE 計算のための量子回路



柚木 清司 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

- 1 Q. Xie, K. Seki, and S. Yunoki, "Variational counterdiabatic driving of the Hubbard model for ground-state preparation", Phys. Rev. B 106, 155153 (2022).
- 2 K. Seki and S. Yunoki, "Energy-filtered random-phase states as microcanonical thermal pure quantum states", Phys. Rev. B 106, 155111 (2022).
- 3 K. Seki, Y. Otsuka, and S. Yunoki, "Gutzwiller wave function on a quantum computer using a discrete Hubbard-Stratonovich transformation", Phys. Rev. B 105, 155119 (2022).
- 4 K. Seki and S. Yunoki, "Spatial, spin, and charge symmetry projections for a Fermi-Hubbard model on a quantum computer", Phys. Rev. A 105, 032419 (2022).
- 5 K. Seki and S. Yunoki, "Quantum Power Method by a Superposition of Time-Evolved States", PRX Quantum 2, 010333 (2021).

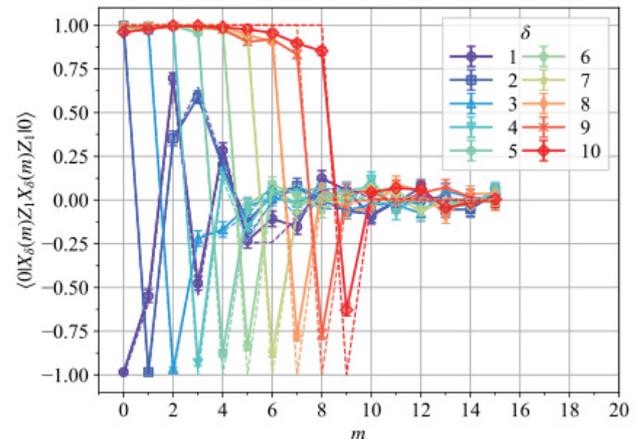
略歴

- 1996 名古屋大学 博士(工学)
- 1996 国立強磁場研究所(アメリカ) ポスドク研究員
- 1999 グローニンゲン大学(オランダ) ポスドク研究員
- 2001 国際高等研究所(イタリア) ポスドク研究員
- 2006 オークリッジ国立研究所及びピネシー大学(アメリカ) Long-Term Visiting Scientist / Research Assistant Professor
- 2008 理化学研究所 柚木計算物性物理研究室 准主任研究員
- 2010 理化学研究所 計算科学研究機構 量子系物質科学研究チーム チームリーダー
- 2012 理化学研究所 創発物性科学研究センター 計算量子物性研究チーム チームリーダー(現職)
- 2017 理化学研究所 柚木計算物性物理研究室 主任研究員(現職)
- 2018 理化学研究所 計算科学研究センター 量子系物質科学研究チーム チームリーダー(現職)
- 2021 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 量子計算科学研究チーム チームリーダー(現職)

研究紹介

イオントラップ型量子コンピュータを用いたFloquetスクランブリング回路のシミュレーション

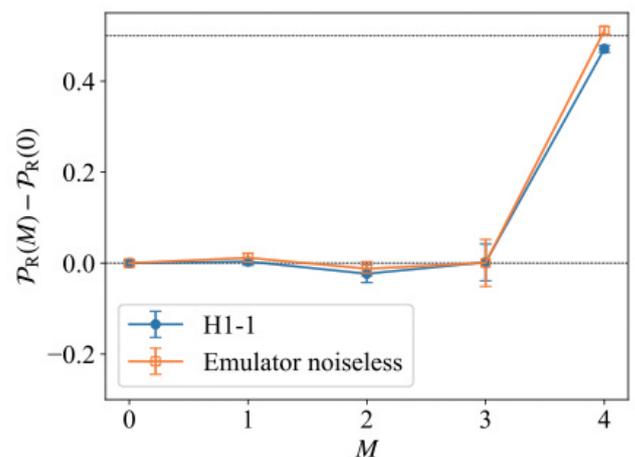
複雑な量子多体ダイナミクスは、ダイナミクス初期に局所化していた量子情報を、ダイナミクス末期においてシステム全体に拡散させる。情報スクランブリングはこのような過程を指し、そのシミュレーションは量子計算の有望な応用例の1つである。我々は、20量子ビットのイオントラップ型量子コンピュータ上で、1次元kicked-Ising 模型に基づくFloquet 量子回路における情報スクランブリングを、Hayden-Preskill プロトコルと時間外順序相関関数を計算する干渉法プロトコルにより検証した。その結果、量子多体ダイナミクス末期において、Hayden-Preskill プロトコルでのシグナルの増加と、時間外順序相関関数の減衰を実験的に確認した。これらの結果は、用いたFloquet 量子回路における情報スクランブリングを示唆している。



図は様々なバタフライ演算子の位置 δ (凡例) に関する、時間外順序相関関数のFloquet時間ステップ数 m 依存性を示す。

Su-Schrieffer-Heeger 模型のトポロジカルに異なる基底状態間の遷移の変分量子回路による記述

Su-Schrieffer-Heeger (SSH) 模型は、ユニットセル内およびユニットセル間のホッピングパラメータの相対的な大きさによって、トポロジカルに異なる2つの基底状態を示す。我々は、トポロジカルに自明または非自明な基底状態を準備するために必要な量子リソースを研究するために、量子交代演算子仮説 (QAOA) 型の変分量子回路を用いて、SSH 模型の基底状態に対する古典シミュレーションを行なった。その結果、以下のことが分かった：初期状態と終状態が同じトポロジカル相に属する場合、変分エネルギーは回路深さに関して指数関数的に厳密な基底状態エネルギーに近づく。(ii) 初期状態と最終状態が異なるトポロジカル相に属する場合、システムサイズの4分の1の回路深さが常に必要である。さらに、18サイトシステムに対してイオントラップ型量子コンピュータを用いたトポロジカルな秩序変数の計算を行い、トポロジー相転移を実験的に検証した。



図は18量子ビットにおける分極 P_R の変分量子回路深さ M 依存性である。トポロジカルに自明な初期($M=0$)状態から非自明な終($M=4$)状態への遷移を示している。

主要メンバー

(研究員) 関 和弘

(特別研究員) XIE Qing

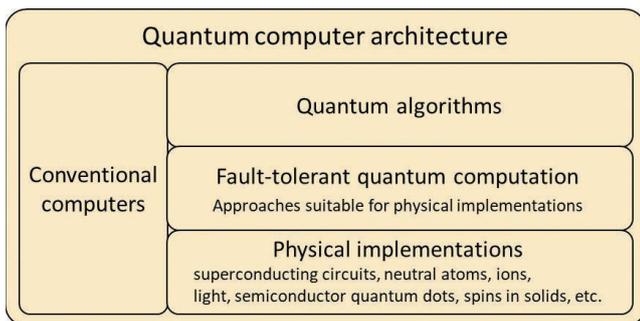
量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム

キーワード: 量子コンピュータ、量子誤り訂正、誤り耐性量子計算、物理実装

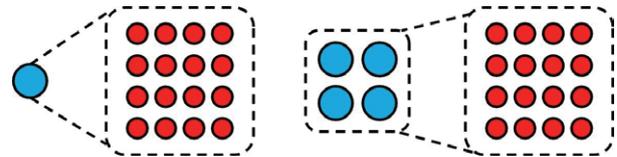
研究室概要

当チームは、誤り耐性量子計算方式からその物理実装まで、量子コンピュータの全体設計、すなわち、量子コンピュータアーキテクチャに関する理論研究を行っている。現在、量子コンピュータの実装方式として、超伝導回路、中性原子、イオン、光、半導体量子ドット、固体中のスピンなど、様々な方式が研究開発中である。これら実装方式の違いによって生じやすい誤りのタイプや実現しやすい結合方式が異なるため、実際の物理実装に適した誤り耐性量子計算方式を開発することが効果的である。また、初期の量子コンピュータはASICやアクセラレータのような役割を果たすと予想されるため、実行したい量子アルゴリズムを考慮した設計も重要と考えられる。さらに、物理系の制御、誤り訂正における復号、アルゴリズムの量子古典ハイブリッド実装など、従来コンピュータも全体に渡って重要な役割を果たすことから、量子と古典の協調システム設計も必要となる。以上のように、量子コンピュータアーキテクチャ研究では、量子コンピュータに関わるすべてを考慮した設計が求められる。

誤り耐性量子計算の実現には膨大な計算リソースが必要となることが現在課題となっている。この問題の解決策として、我々は高レート符号に着目している。従来の誤り耐性量子計算方式では1つの論理量子ビットを多数の物理量子ビットで符号化しており、これがリソース増大を招いている。そこで、多数の論理量子ビットをまとめて符号化する高レート符号が近年注目を集めている。しかし、その誤り耐性量子計算方式はまだ確立されていない。我々はこの高レート符号を用いた誤り耐性量子計算の研究によって量子コンピュータのリソース問題の解決を目指す。



量子コンピュータアーキテクチャ



従来の1論理量子ビット符号化 (左)、高レート符号 (右)



後藤 隼人 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

- 1 H. Goto, "Many-hypercube codes: High-rate quantum error-correcting codes for high-performance fault-tolerant quantum computation", arXiv:2403.16054 (2024).
- 2 H. Goto, Y. Ho, and T. Kanao, "Measurement-free fault-tolerant logical-zero-state encoding of the distance-three nine-qubit surface code in a one-dimensional qubit array", *Phys. Rev. Research*, 5, 043137 (2023).
- 3 H. Goto, "Minimizing resource overheads for fault-tolerant preparation of encoded states of the Steane code", *Sci. Rep.*, 6, 19578 (2016).
- 4 H. Goto, "Step-by-step magic state encoding for efficient fault-tolerant quantum computation", *Sci. Rep.*, 4, 7501 (2014).
- 5 H. Goto and H. Uchikawa, "Fault-tolerant quantum computation with a soft-decision decoder for error correction and detection by teleportation", *Sci. Rep.*, 3, 2044 (2013).

略歴

- 2003 株式会社東芝入社
- 2007 博士(理学)取得(東京大学)
- 2016 株式会社東芝 主任研究員
- 2020 株式会社東芝 フェロー
- 2023 株式会社東芝 シニアフェロー (現職)
- 2023 理化学研究所量子コンピュータ研究センター 量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム チームリーダー (現職)

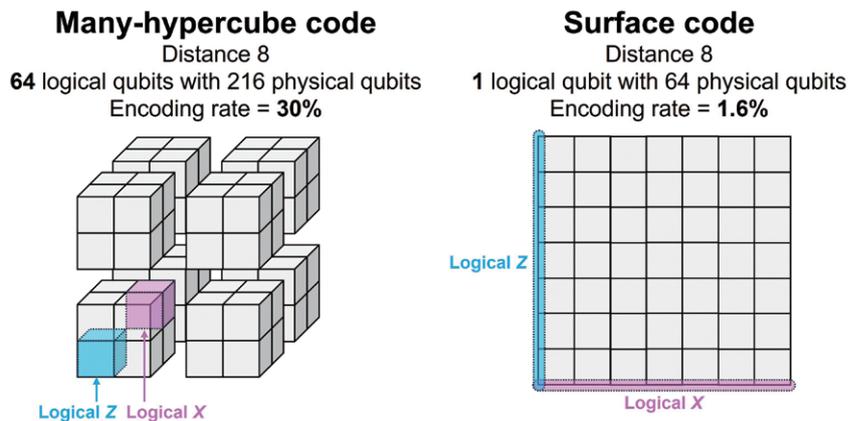
研究紹介

独自の高速符号“多超立方体符号”を用いたハイパフォーマンス誤り耐性量子計算

従来の誤り耐性量子計算では、1つの論理量子ビットを多数の物理量子ビットで符号化していた。例えば、符号距離 d の表面符号の場合、1つの論理量子ビットを d^2 個の物理量子ビットで符号化する。ここで、符号距離とは符号のサイズを表す指標であり、符号距離 d の符号は原理的に $d/2$ より少ない数の量子ビットエラーを訂正することができる。表面符号の場合、符号化率 r は $1/d^2$ であり、符号サイズを大きくしていくと r は漸近的にゼロになってしまう。これが、誤り耐性量子計算における巨大なリソースオーバーヘッドの主な原因である。そこで近年、符号化率が一定の高速符号が注目されており、その代表例が量子LDPC (low-density parity check) 符号である。例えば、符号化率が4%の量子LDPC符号を用いた誤り耐性量子計算がよく研究されている。しかし量子LDPC符号には、符号化率がまだ低いことに加え、論理ゲートを並列に実行することが難しいという課題がある。つまりこれまで、高い符号化率と論理ゲートの並列実行を両立できる「ハイパフォーマンス誤り耐性量子計算」は実現困難であった。

我々は、最もシンプルな量子符号の1つである $[[6,4,2]]$ 符号（4個の論理量子ビットを6個の物理量子ビットで符号化する符号距離2の量子符号）を接続して得られる $[[6^L, 4^L, 2^L]]$ 符号を提案した。この符号の構造は一般に 4^L 個の L 次元ハイパーキューブ（超立方体）で表現できることから、「多超立方体符号 (many-hypercube code)」と名付けた。この符号の符号化率は $(4/6)^L$ であり、漸的にゼロになるが、符号距離8と16 ($L=3, 4$) の場合の符号化率はそれぞれ約30%と20%と高い。我々はこの高速量子符号の高性能な復号器を開発した。さらに、本符号専用の誤り耐性的な符号化方法も開発し、数値シミュレーションにより、論理制御NOTゲートに対して1%近い高い誤りしきい値を達成した。また、万量子計算に必要な論理ゲートを並列実行する方法も提案した。以上から、我々が提案した多超立方体符号は、ハイパフォーマンス誤り耐性量子計算を可能にすると期待される。

H. Goto, “Many-hypercube codes: High-rate quantum error-correcting codes for high-performance fault-tolerant quantum computation”, arXiv:2403.16054 (2024).



多超立方体符号 (左) と表面符号 (右) の比較 (符号距離8の場合)

主要メンバー

(研究員) 仲井 良太

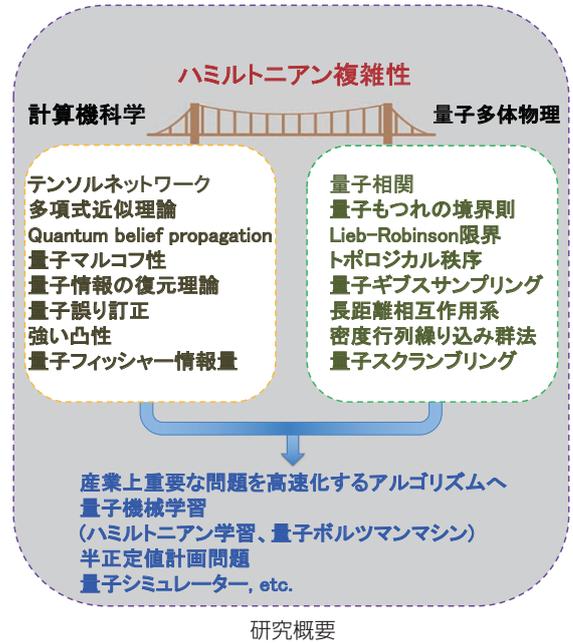
量子複雑性解析理研白眉研究チーム

キーワード: 量子コンピューティング、量子エンタングルメント、ハミルトニアン複雑性、量子多体物理、量子アルゴリズム

研究室概要

過去20年間、量子情報理論の中で量子計算は主に理論的な提案に留まっていた。その現実的な応用の可能性には疑問が投げかけられていたが、最近の進展がその状況を変えつつある。特に2019年、Googleが開発した53量子ビットの「Sycamore」量子コンピュータは、従来のコンピュータよりも遥かに高速に特定の計算を行うことができる「量子優越性」を実証した。しかし、実用的な利用という点においてはまだまだ解決すべき問題が数多く残っている。

この新しい挑戦に応えるため、世界中の研究者たちはより有益なアルゴリズムの開発に向けて取り組んでいる。特に、量子多体理論はこの問題に対する鍵を握っている。多数の量子粒子の相互作用を扱うこの理論では、予期しない現象が起こることがあり、それを計算することの難しさを探求する研究分野がハミルトニアン複雑性となる。ハミルトニアン複雑性の研究は、量子ハミルトニアンをいつ、どのように効率的にシミュレートできるかに焦点を当てている。重要なのは、量子計算で扱う問題の多くが、QMA (量子版 NP) と呼ばれるクラスに属し、これらは量子多体問題に還元できるということが知られている。つまり、量子多体問題の解決に向けたアルゴリズムの開発は、QMAクラスに属する全ての問題にアプローチするための鍵となっている。ハミルトニアン複雑性は計算機科学と物理学の間の研究領域であり、解決されていない多くの問題が数学的に定義されている。本研究室では、これらの数学的な問題に対する解決策を探求しており、量子もつれの境界則予想、量子マルコフ予想、Lieb-Robinson 限界における線形光円錐問題、量子ハミルトニアン学習、有限温度における長距離量子もつれなど、重要な問題に対して部分的または完全な解決を既に達成している。当チームの目標は、これまでの研究成果をさらに発展させ、新たな未解決問題にも取り組むことにある。



桑原 知剛 (Ph.D.) 理研白眉研究チームリーダー

主要論文

- 1 Tomotaka Kuwahara, Tan Van Vu, Keiji Saito, "Effective light cone and digital quantum simulation of interacting bosons" Nature Communications 15(1) 2520 (2024).
- 2 T. Kuwahara, K. Saito, "Exponential Clustering of Bipartite Quantum Entanglement at Arbitrary Temperatures," Physical Review X, 12, 021022 (2022).
- 3 A. Anshu, S. Arunachalam, T. Kuwahara, M. Soreimanifar (alphabet order), "Sample-efficient learning of quantum many-body systems," Nature Physics, 17, 931–935 (2021), Featured in News&Views.
- 4 T. Kuwahara, A. M. Alhambra, and A. Anshu, "Improved thermal area law and quasi-linear time algorithm for quantum Gibbs states," Physical Review X, 11, 11047 (2021).
- 5 T. Kuwahara, K. Saito, "Area law of noncritical ground states in 1D long-range interacting systems," Nature Communications, 11 4478 (2020).

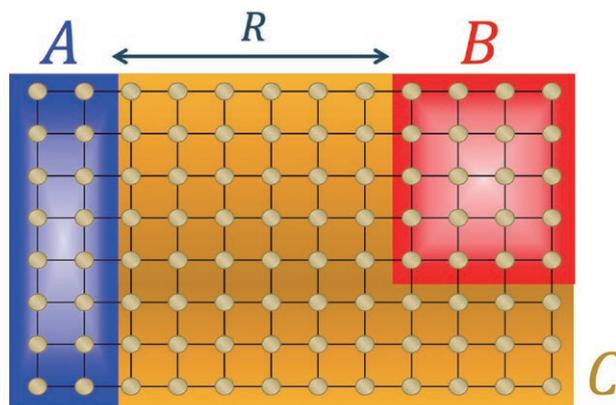
略歴

- 2015 東京大学 日本学術振興会特別研究員(学振PD)
- 2016 東北大学 材料科学高等研究所 (AIMR) 助教
- 2017 理化学研究所 革新知能統合研究センター 研究員
- 2021 科学技術振興機構さきがけ研究員(兼任) (現職)
- 2022 理化学研究所 開拓研究本部/量子コンピュータ研究センター 理研白眉チームリーダー(現職)

研究紹介

量子多体系における量子マルコフ予想の部分的解決

古典確率理論の最も基本的な性質として、条件付き独立を規定するマルコフ性が挙げられる。マルコフ性を満たす多変数確率分布をマルコフネットワークと呼ぶが、マルコフネットワークは機械学習等において最も基本的な研究対象である。マルコフ性における古典理論の金字塔としてHammersley–Cliffordの定理があり、これはマルコフネットワークとギブス分布の等価性を保証する。この量子版が成立するかどうかは量子マルコフ予想と呼ばれており、数学的には「任意の量子ギブス状態における条件付き相互情報量の指数減衰」として記述される。本研究では小さな部分系の間で相互情報量の指数減衰することを一般的に証明した。この結果は全ての量子ギブス状態が少なくともPairwiseマルコフネットワークであることを一般的に示すものである。この成果はQuantum Information Processing 2024 (QIP2024)にてLong Plenary Talkに採択された(全体の0.4%ほどが採択)。

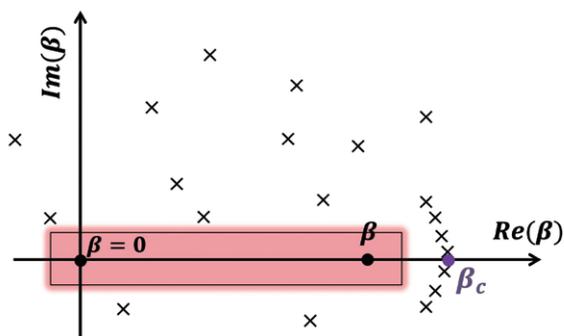


有限温度の量子状態が一般的に量子マルコフ性を満たすことを証明する。言い換えれば、条件付き相互情報量が指数的に減衰することを示す。従来の結果は温度閾値より高い高温相でのみの証明であり、これを全ての温度領域に拡張することを目指す。

一次元長距離相互作用量子系におけるクラスタリング定理

統計力学における最も基本的な定理の一つとして、1次元系における相転移の非存在性が挙げられる。量子系への拡張は荒木不二洋氏による1969年の有名な論文で達成されたが、この結果は相互作用距離が有限であるという条件が課せられている。近年、この成果の長距離相互作用系への拡張が議論されたが、複素Lieb-Robinson限界の発散という本質的な問題が存在することが明らかになり、長距離相互作用系における相転移の非存在性は最も基本的な未解決問題となっている。本研究は当チームの木村裕介氏と共同でこの問題に取り組み、2体相関の減衰定理(Clustering定理)の拡張に初めて成功した。今後の方向性として、長距離相互作用系における相転移の非存在の完全に解決するために分配関数のゼロ点の性質を解析していく予定である。

この成果はTheory of Quantum Computation, Communication and Cryptography 2024 (TQC2024)にてOutstanding posterに選出された。



有限温度の量子多体系を特徴づけるものとして分配関数のゼロ点がある。これは逆温度を複素数に拡張したときに分配関数がゼロになる点を指し、ゼロフリーの領域は計算機科学的な意味において複雑性が小さくなることが知られている。本研究ではゼロ点の分布構造に関する普遍的な定理の確立を目指す。特に長年の未解決問題である一次元長距離相互作用系の相転移の非存在を解決する。

主要メンバー

(研究員) 木村 裕介
(特別研究員) Donghoon Kim
(特別研究員) Tan Van Vu

(大学院生リサーチ・アソシエイト, JRA) 尚 程
(パートタイマー) 西川 秀明

数理量子情報理研白眉研究チーム

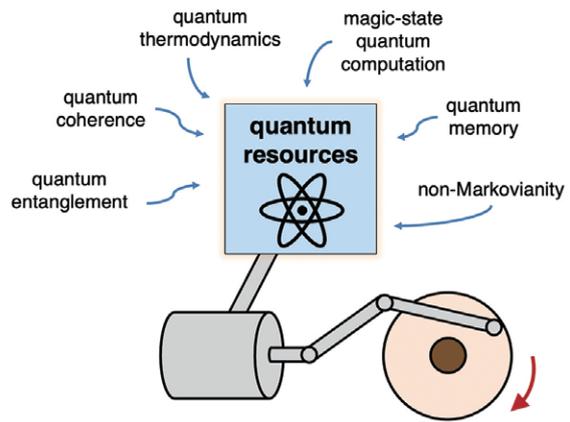
キーワード: Quantum information, Quantum resource theories, Quantum Shannon theory, Mathematical physics

研究室概要

Our group studies the mathematical underpinnings of quantum information theory, with a particular focus on the investigation of the mathematical structure of quantum resources — physical phenomena that underlie practical advantages of quantum technologies in areas such as communication and computation.

We aim to develop technical frameworks that help address the fundamental questions of how to quantify, manipulate, and take advantage of physical resources in quantum information and communication tasks. Our approach is to establish a solid and rigorous mathematical foundation which can be directly used to study a variety of physical settings, allowing for broad applications and generalisations. In addition to advancing the frontiers of knowledge on the fundamental laws governing quantum systems, we hope to provide insight into the physically achievable limits of the advantages of quantum resources, which can then find use in benchmarking practical quantum technologies. We will directly apply our methods to shed light on the properties of resources such as quantum entanglement, quantum coherence, magic-state quantum computation, as well as the dynamical quantum resources of quantum channels.

Beyond that, we are broadly interested in the mathematical problems of quantum information theory, e.g. the properties and applications of entropic quantities, the characterisation of operational tasks such as quantum hypothesis testing, and convex optimisation problems, which can be encountered in almost every area of quantum information.



There are many different quantum resources that can fuel the practical applications of quantum technologies. Understanding their properties is thus an important problem, but their complex mathematical structure often makes this very difficult. (Schematic figure adapted from *Phys. Rev. X* 9, 031053 (2019).)



REGULA Bartosz (Ph.D.) 理研白眉研究チームリーダー

主要論文

- 1 B. Regula and L. Lami, "Reversibility of quantum resources through probabilistic protocols", *Nat. Commun.* 15, 3096 (2024)
- 2 L. Lami and B. Regula, "No second law of entanglement manipulation after all", *Nat. Phys.* 19, 184–189 (2023)
- 3 B. Regula, "Probabilistic transformations of quantum resources", *Phys. Rev. Lett.* 128, 110505 (2022)
- 4 B. Regula and R. Takagi, "Fundamental limitations on distillation of quantum channel resources", *Nat. Commun.* 12, 4411 (2021)
- 5 J. R. Seddon, B. Regula, H. Pashayan, Y. Ouyang, and E. T. Campbell, "Quantifying quantum speedups: improved classical simulation from tighter magic monotones", *PRX Quantum* 2, 010345 (2021)

略歴

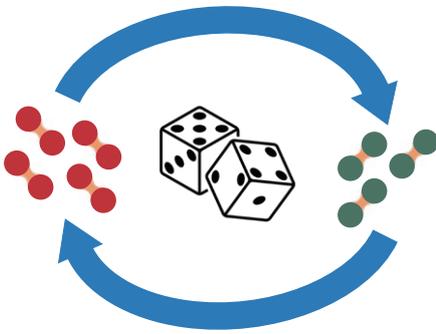
- 2018 Ph.D. Mathematics, University of Nottingham, UK
- 2019 Presidential Postdoctoral Fellow, Nanyang Technological University, Singapore
- 2021 JSPS Postdoctoral Research Fellow, University of Tokyo, Japan
- 2023 RIKEN Hakubi Team Leader, Mathematical Quantum Information RIKEN Hakubi Research Team, RIKEN, Japan (-present)

研究紹介

A probabilistic “second law” of quantum resources

The second law of thermodynamics is a fundamental law of physics. It tells us that the thermodynamic transformations of physical systems are governed by a single function: the entropy. We show that a similar result can be obtained not only in thermodynamics, but also for general quantum phenomena that find use as resources in physical settings — in particular, for quantum entanglement, whose dynamics are notoriously hard to characterise exactly.

We showed that the transformations of quantum systems can be described by a single entropic measure of resources, and all transformations can be made asymptotically reversible in a suitable probabilistic setting. The result simplifies the characterisation of the transformations of quantum resources and the understanding of their limitations. The price to pay in our approach is that reversibility, and thus the second law, is only achievable with some probability.



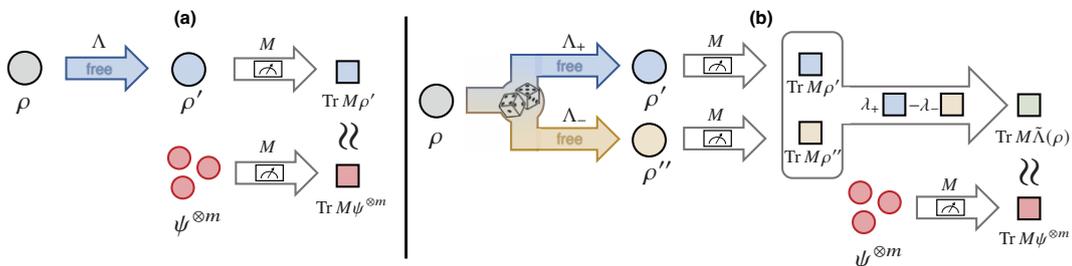
Schematic illustration of probabilistic reversibility of quantum entanglement. Transformations between many copies of entangled quantum states (here represented by red and green shapes) are made reversible by using probabilistic protocols, with the transformation rate given by the regularised relative entropy of entanglement. This leads to a consistent and unique notion of an entropic measure of entanglement.

©B. Regula and L. Lami, “Reversibility of quantum resources through probabilistic protocols”, Nature Communications 15, 3096 (2024)

Virtual distillation of quantum resources

Distillation (purification) is central to the practical use of quantum resources in noisy settings often encountered in quantum communication and computation. Conventionally, distillation requires using some restricted ‘free’ operations to convert a noisy state into one that approximates a desired pure state. We propose to relax this setting by only requiring the approximation of the measurement statistics of a target pure state. This allows us to integrate the power of classical postprocessing to enhance the capabilities of free quantum operations.

We show that this extended scenario of virtual resource distillation provides considerable advantages over standard approaches, allowing for the purification of noisy states from which no resources can be distilled conventionally. Our methods can be applied to various settings such as the theories of entanglement, coherence, or non-stabiliser quantum computation.



Comparison of conventional and virtual resource distillation. (a) Conventional resource distillation employs a free operation Λ to map a noisy state ρ into a state that approximates (many copies of) the target state ψ . (b) Virtual distillation approximates the measurement outcomes of copies of ψ by using a virtual operation, that is, a linear combination of free operations.

©X. Yuan, B. Regula, R. Takagi, and M. Gu, “Virtual quantum resource distillation”, Physical Review Letters 132, 050203 (2024)

主要メンバー

(特別研究員) 荒井 駿

理研RQC-富士通連携センター

キーワード：量子コンピュータ、超伝導量子ビット、エラー緩和技術、エラー訂正技術、量子アプリケーション

研究室概要

2021年4月1日に開設した当連携センターでは、理研が取り組む超伝導回路を使った量子コンピュータの先端技術と、富士通が保有するコンピューティング技術、顧客視点に基づいた量子技術の応用知見を統合し、共同で超伝導量子コンピューティングの実用化に向けた研究開発を行う。

具体的には、1000量子ビット級への大規模化を可能とする、ハードウェア、ソフトウェア技術の開発や、実機を活用したアプリケーションの研究開発を行う。ハードウェアにおいては、量子ビットの製造ばらつきの改善や、周辺部品および配線部の小型化と低ノイズ化、パッケージやチップの低温実装などの基盤技術の研究開発を行う。さらに、これらのハードウェアに関する要素技術の研究開発を統合し、超伝導量子コンピュータ試作機を開発し、要素技術の有用性を検証する。また、ソフトウェアにおいては、量子コンピュータを動作させる

ために必要となるミドルウェアおよびクラウドコンピューティングシステムの開発、アプリケーションを実行するためのアルゴリズムの研究開発を行う。これらの研究により開発した超伝導量子コンピュータ試作機において、量子化学計算アルゴリズムと量子エラー緩和技術を統合した、量子アルゴリズムを実行することにより、実応用でのエラー緩和技術の有用性を検証する。また、並行して、量子エラー検出、訂正などの基礎的な実証実験も行い、量子エラー訂正機能を実現するための課題の抽出と技術の改善に取り組む。

当連携センターでは、量子コンピュータを活用した科学技術の発展に向けて、様々な研究機関や企業との共創の場を形成し、持続可能な社会を実現するイノベーションの創出を目指す。



理研RQC-富士通連携センターの開設



佐藤 信太郎 (Ph.D.) 副連携センター長*

主要論文

- 1 Y. Akahoshi, K. Maruyama, H. Oshima, S. Sato, K. Fujii, "Partially Fault-tolerant Quantum Computing Architecture with Error-corrected Clifford Gates and Space-time Efficient Analog Rotations," *PRX Quantum* 5, 010337 (2024)
- 2 T. Takahashi, N. Kouma, Y. Doi, S. Sato, S. Tamate, and Y. Nakamura "Uniformity improvement of Josephson-junction resistance by considering sidewall deposition during shadow evaporation for large-scale integration of qubits", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 62 SC1002 (2023)
- 3 T. Kurita, M. Morita, H. Ohshima, and S. Sato "Pauli String Partitioning Algorithm with the Ising Model for Simultaneous Measurements", *J. Phys. Chem. A*, 127, 4, 1068–1080 (2023)
- 4 J. Fujisaki, H. Oshima, S. Sato, and K. Fujii "Practical and scalable decoder for topological quantum error correction with an Ising machine", *Physical Review Research* 4, 043086 (2022)
- 5 Y. Yamaguchi, H. Hayashi, H. Jippo, A. Shiotari, M. Ohtomo, M. Sakakura, N. Hieda, N. Aratani, M. Ohfuchi, Y. Sugimoto, H. Yamada, and S. Sato "Small bandgap in atomically precise 17-atom-wide armchair-edged graphene nanoribbons." *Commun. Mater.* 1, 36 (2020)

略歴

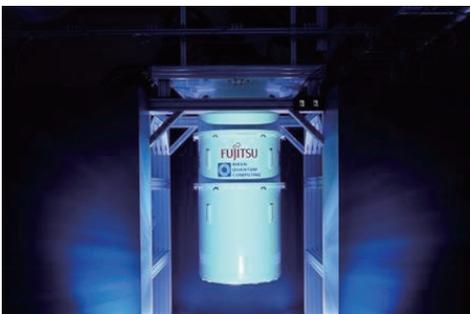
- 1990 筑波大学修士課程理工学研究科修了 (物理学)
- 1990 ウシオ電機株式会社入社 (-1997年)
- 2001 米国ミネソタ大学にてPh.D. (機械工学) 取得
- 2001 富士通株式会社入社 電子デバイス事業本部配属
- 2002 株式会社富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター 研究員
- 2006 株式会社半導体先端テクノロジーズ (兼務、-2010年)
- 2007 株式会社富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター 主任研究員
- 2010 産業技術研究所 グリーンナノエレクトロニクス研究センター グループリーダー (富士通より出向、-2014年)
- 2014 株式会社富士通研究所 デバイス&マテリアル研究所 機能デバイス研究部 主管研究員
- 2018 株式会社富士通研究所 デバイス&マテリアル研究所 次世代材料プロジェクト プロジェクトディレクター
- 2018 応用物理学会フェロー
- 2020 株式会社富士通研究所 ICTシステム研究所 量子コンピューティングプロジェクト プロジェクトディレクター
- 2021 富士通株式会社 富士通研究所 量子コンピューティング研究センター長
- 2021 理化学研究所 理研RQC-富士通連携センター 副連携センター長 (現職)
- 2022 富士通株式会社 富士通研究所 量子研究所長
- 2023 富士通株式会社 富士通研究所 フェロー 兼量子研究所長 (現職)

*連携センター長は中村泰信センター長が兼務

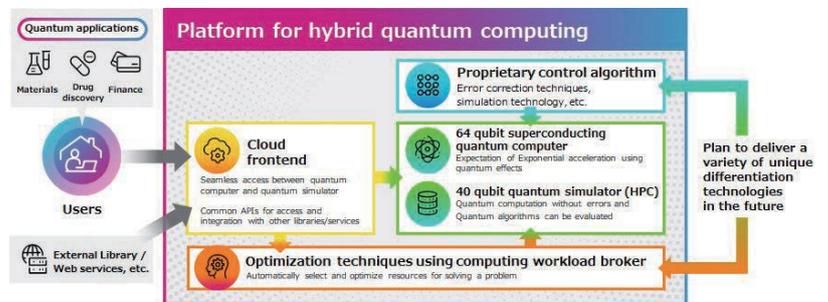
研究紹介

超伝導量子コンピュータを開発し、量子シミュレータと連携可能なプラットフォームを提供

理化学研究所が2023年3月に公開した国産初号機となる64量子ビット超伝導量子コンピュータの開発ノウハウをベースに、新たな64量子ビットの超伝導量子コンピュータを開発した。本超伝導量子コンピュータと世界最大級の40量子ビットの量子コンピュータシミュレータを連携させて利用できるハイブリッド量子コンピューティングプラットフォーム「Fujitsu Hybrid Quantum Computing Platform」を開発し、富士通と理研との共同研究の下で、企業や研究機関に2023年10月5日より提供した。本プラットフォームにより、利用者は、ノイズによるエラーを含む量子コンピュータを用いた計算結果とノイズを含まないシミュレーションによる計算結果の比較などが容易に可能になり、量子アプリケーションにおけるエラー緩和アルゴリズムの性能評価などの研究の加速が期待できる。



連携センターで開発した超伝導量子コンピュータ

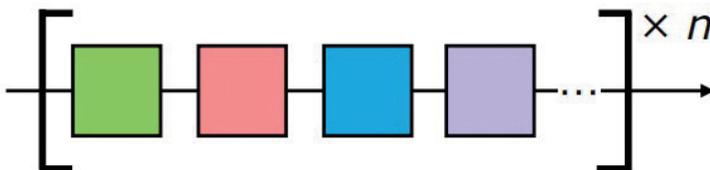


ハイブリッド量子コンピューティングプラットフォームの概要

量子演算の高精度化に向けた、実装精度評価手法の改良

量子コンピュータの実用化に向けて、計算素子となる量子演算のさらなる高精度化が主要な課題の一つとなっている。量子演算の実装精度を評価することは高精度化において基本となる技術であるが、現在標準的に利用されている評価手法はどれも優れた性質を持つ一方で欠点も抱えており、さらなる改善が必要となっている。当グループでは、評価手法の中でも量子トモグラフィとよばれる手法の効率と信頼性の向上を目的とした手法開発に取り組んでいる。具体的には、Gate-Set Tomography (GST) とよばれる既存手法の実験部分とデータ処理部分の効率を改善する手法の開発に取り組んでいる。

エラー増幅機構の解析をどのように行うのがGSTの効率化において鍵となる。当グループがこれまでに開発したGSTの軽量版となる手法は、180度回転ゲートと呼ばれる重要なクラスの量子ゲートを扱えないという問題があった。近年我々は、エラー増幅機構の解析手法を改良することで180度回転ゲートも扱えるよう軽量版の手法の評価対象範囲を拡張することに成功した。



エラー増幅機構を行う量子回路の概念図

センター長室

キーワード：量子コンピュータ研究センターマネジメント、量子技術イノベーションハブ中核組織

概要

我々は、量子コンピュータ研究センターの技術、知財、標準化動向調査、情報発信、イベント開催などセンター全体の運営に係るマネジメント業務を行っている。

政府の量子技術イノベーション戦略に基づき、理化学研究所が量子技術の基礎研究から社会実装まで取り組む国内11の量子技術イノベーション拠点と、その取りまとめを行う中核組織に位置づけられている。我々はこの中核組織の運営に取り組んでいる。さらに文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）の量子情報処理分野のヘッドクォーターとして量子技術の発展に向けた研究推進活動を行っている。また、2023年3月に公開した超伝導量子コンピュータ“叡”の運用管理を担当している。

私は以下の研究開発も推進している。

- ・内閣府-CSTIの戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進」の研究テーマの一つ「国産量子コンピュータによるテストベッドの利用環境整備と運用」の研究開発責任者として叡のシステム運用と利用環境の構築に取り組んでいる。
- ・内閣府の「ムーンショット研究開発プログラム」の課題6の課題推進者のひとりとして、量子エラー耐性のある量子コンピュータのための超伝導集積システムの研究開発に取り組んでいる。



センター長室メンバー

主要メンバー

(コーディネーター) **登内 敏夫**
 (高度研究技術専門職) **井門 考治**
 (高度研究支援専門職) **富田 賢**
 (研究支援専門職) **小鷲 貴美子**

(嘱託職員) **新井 正伸**
 (嘱託職員) **岩淵 晴行**
 (事務パートタイマーI) **山口 未奈子**



萬 伸一 (Ph.D.) 副センター長、室長

主要論文

- 1 Y. Iwasaki, R. Sawada, V. Stanev, M. Ishida, A. Kirihara, Y. Omori, H. Someya, I. Takeuchi, E. Saitoh, S. Yorozu, Identification of advanced spin-driven thermoelectric materials via interpretable machine learning, npj Computational Materials volume 5, Article number: 103 (2019)
- 2 A. Kirihara, M. Ishida, R. Yuge, K. Ihara, Y. Iwasaki, R. Sawada, H. Someya, R. Iguchi, K. Uchida, E. Saitoh, S. Yorozu, Annealing-temperature-dependent voltage-sign reversal in all-oxide spin Seebeck devices using RuO₂, 2018 J. Phys. D: Appl. Phys. 51 154002
- 3 K. Uchida, H. Adachi, T. Kikkawa, A. Kirihara, M. Ishida, S. Yorozu, S. Maekawa, E. Saitoh, Thermoelectric Generation Based on Spin Seebeck Effects, Proceedings of the IEEE (Volume: 104, Issue: 10, Oct. 2016) 1946 – 1973
- 4 K. Takemoto, Y. Nambu, T. Miyazawa, Y. Sakuma, T. Yamamoto, S. Yorozu, Y. Arakawa, Quantum key distribution over 120 km using ultrahigh purity single-photon source and superconducting single-photon detectors, Scientific Reports 5, Article number: 14383 (2015)
- 5 A. Kirihara, K. Uchida, Y. Kajiwara, M. Ishida, Y. Nakamura, T. Manako, E. Saitoh, S. Yorozu, Spin-current-driven thermoelectric coating, Nature Materials, Vol. 11, pp. 686–689 (2012)

略歴

1993 東京大学大学院工学系東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了 博士(工学)
 1993 日本電気株式会社 基礎研究所
 1997 ニューヨーク州立大 滞在研究員
 2015 日本電気株式会社 スマートエネルギー研究所 所長代理
 2018 日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所 主席技術主幹
 2019 理化学研究所 創発物性科学研究センター コーディネーター
 2021 理化学研究所 量子コンピュータセンター 副センター長 (現職)

Simplifying quantum computation

A novel protocol for quantum computers could reproduce the complex dynamics of quantum materials

Category: Exploratory Physical Sciences **Field:** Quantum computers

A quantum-computational algorithm that could be used to efficiently and accurately calculate atomic-level interactions in complex materials has been developed by RIKEN researchers¹. It has the potential to bring an unprecedented level of understanding to condensed-matter physics and quantum chemistry—an application of quantum computers first proposed by brilliant physicist Richard Feynman in 1981.

Quantum computers bring the promise of enhanced number-crunching power and the ability to crack problems that are out of the reach of conventional computers.

Qubits, the building blocks of quantum computers, are essentially tiny systems—nanocrystals or superconducting circuits, for example—governed by the laws of quantum physics. Unlike bits used in conventional computers, which can be either one or zero, qubits can have multiple values simultaneously. It is this property of qubits that gives quantum computers their advantage in terms of speed.

An unconventional way of computation also requires a new perspective on how to efficiently process data in order to tackle problems too difficult for conventional computers.

One notable example of this is the so-called time-evolution operator. “Time-evolution operators are huge grids of numbers that describe the complex behaviors of quantum materials,” explains Kaoru Mizuta of the RIKEN Center for Quantum Computing. “They’re of great importance because they give quantum computers a very practical application—better understanding quantum chemistry and the physics of solids.”

The prototype quantum computers demonstrated to date have achieved time-evolution operators using a relatively simple technique called Trotterization. But Trotterization is thought to be unsuitable for the quantum computers of the future because it requires a huge number of quantum gates and thus a lot of computational time. Consequently, researchers have been striving to create quantum algorithms for accurate quantum simulations that use fewer quantum gates.

Now, Mizuta, working with colleagues from across Japan, has proposed a much more efficient and practical algorithm. A hybrid of quantum and classical methods, it can compile time-evolution operators at a lower computational cost, enabling it to be executed on small quantum computers, or even conventional ones.

“We have established a new protocol for constructing quantum circuits that efficiently and accurately reproduce time-evolution operators on quantum computers,” explains Mizuta. “By combining small quantum algorithms with the fundamental laws of quantum dynamics, our protocol succeeds in designing quantum circuits for replicating large-scale quantum materials, but with simpler quantum computers.”

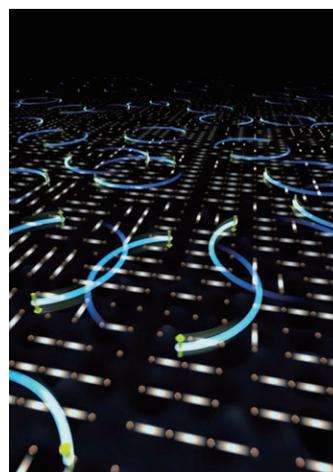


Figure: An illustration showing the two states of a cuprate high-temperature superconductor. A new protocol for constructing quantum circuits could help with calculations on quantum materials such as superconductors.

© US DEPARTMENT OF ENERGY/SCIENCE PHOTO LIBRARY
[<https://www.sciencephoto.com/media/1075086/view>]

Mizuta and his team next intend to clarify how the time-evolution operators optimized by their method can be applied to various quantum algorithms that can compute the properties of quantum materials. “We anticipate that this work will demonstrate the potential of using smaller quantum computers to study physics and chemistry.”

Related content:

Quantum computing and deep learning could help solve the mysteries of quantum gravity

[https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20220411_1/index.html]

Scientists achieve key elements for fault-tolerant quantum computation in silicon spin qubits

[https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2022/20220120_1/index.html]

Quantum entanglement of three spin qubits demonstrated in silicon

[https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20210903_1/index.html]

Reference

1. Mizuta, K., Nakagawa, Y. O., Mitarai, K. & Fujii, K. Local variational quantum compilation of large-scale Hamiltonian dynamics. *PRX Quantum* 3, 040302 (2022). (doi: 10.1103/PRXQuantum.3.040302)

RIKEN Research Summer 2023 (p.21)

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Feedback system could fix quantum-computing errors

Quantum circuit can reset quantum bits carried by electron spins in silicon

Category: Applied Physical Sciences **Field:** Quantum computing

A method to reset the data held in silicon-based, quantum-computing devices has been developed by RIKEN researchers¹. This could help to enhance the reliability of quantum computers by forming a crucial part of an error-correction system.

Quantum computers promise to dramatically increase our computing power, but these highly sensitive devices are prone to errors.

Data in quantum computers is encoded by the quantum states of particles, such as the spin of an electron. These quantum bits (qubits) can be linked together through a phenomenon called entanglement, and then process information through a combination, or superposition, of their quantum states. This enables quantum computers to perform certain complex calculations much more rapidly than conventional computers.

Electrical confinement in silicon formed by metallic electrodes, known as quantum dots, is a promising candidate to host an electron-spin qubit. But quantum states can be delicate, and the qubits often acquire errors that need to be corrected.

To help address this problem, RIKEN researchers have devised a way to rapidly and accurately read a spin qubit, and then reset it. This kind of control system will be essential to build fault-tolerant quantum computers based on silicon quantum dots.

One challenge the team faced is that a qubit loses correlation between the readout result and the qubit state after reading. To overcome this, the team used a pair of silicon quantum dots to accommodate two entangled qubits. While one qubit carried data, the other served as an auxiliary. By using a charge sensor to read the auxiliary qubit, the researchers could estimate the state of the data qubit without destroying its information—a method known as a quantum non-demolition (QND) measurement. Depending on the outcome of the measurement, the system could then deliver a microwave pulse that resets the data qubit.

The team constructed a quantum circuit to repeatedly perform the QND measurements, producing a single microwave pulse to reset the data qubit with cumulatively improved reliability. “Since the quantity measured by a quantum non-demolition measurement is not disturbed by the measurement, it can be measured again and again to estimate the data-qubit state more accurately,” says Takashi Kobayashi of the RIKEN Center for Quantum Computing.

The whole reset process currently takes about 60 microseconds at least, which might be too slow for a practical quantum computer. To shorten this time, the researchers suggest adding a second auxiliary qubit, which would allow

them to use a faster measurement method.

“The time for the protocol might be reduced to a few microseconds,” says Kobayashi. “This would pave the way to feedback-based quantum error correction.”

Related content:

Researchers demonstrate error correction in a silicon qubit system
https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2022/20220825_1/index.html

Two-electron qubit points the way to scaling up quantum computers

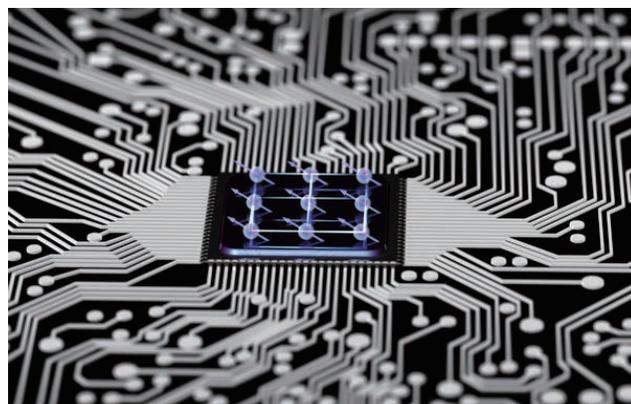
https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20200619_1/

Scientists succeed in measuring electron spin qubit without demolishing it

https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2020/20200303_2/

Faster technique for resetting quantum circuits proposed

https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20220121_1/index.html



Conceptual illustration of a computer microchip with a grid of quantum spin states. RIKEN researchers have shown how a quantum circuit can reset quantum bits carried by electron spins in silicon.

<https://www.sciencephoto.com/media/948603/view>
 © ELLA MARU STUDIO/SCIENCE PHOTO LIBRARY

Reference

1. Kobayashi, T., Nakajima, T., Takeda, K., Noiri, A., Yoneda, J. & Tarucha, S. Feedback-based active reset of a spin qubit in silicon. *npj Quantum Information* 9, 52 (2023). doi:10.1038/s41534-023-00719-3

RIKEN Research Winter 2023 (p.11)

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Machine learning realizes better quantum error correction

Harnessing machine learning helps to correct errors that develop in quantum computers

Category: Applied Physical Sciences **Field:** Quantum computing

In a step toward realizing practical quantum computers, RIKEN researchers have demonstrated that machine learning can be used to perform error correction for quantum computers¹.

Classical computers perform operations using bits, which can take the values 0 and 1. In contrast, quantum computers use qubits, which can assume any superposition of these two states. When combined with quantum entanglement—a quantum way of linking distant objects—qubits enable quantum computers to perform entirely new operations. This gives them a potential advantage over conventional computers for some tasks, such as large-scale searches, optimization and cryptography.

The main hurdle to realizing quantum computers for practical applications is the extremely fragile nature of quantum superpositions. Tiny perturbations from the environment can generate errors that rapidly destroy quantum superpositions.

To tackle this problem, sophisticated methods for quantum error correction have been developed. While they can, in theory, neutralize the effect of errors, they often greatly increase device complexity, which itself is error prone and thus potentially even increases exposure to errors. Consequently, full-fledged error correction has remained elusive.

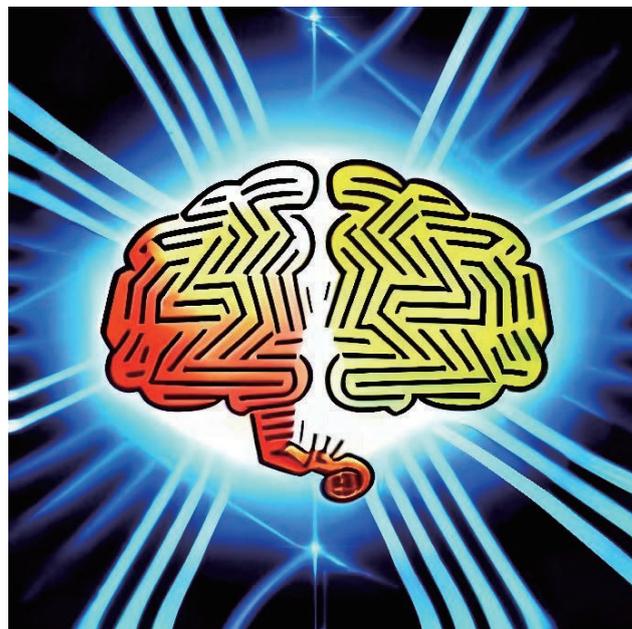
Now, a team led by Franco Nori of the RIKEN Center for Quantum Computing (RQC) has leveraged machine learning in a search for error-correction schemes that minimize the device overhead while maintaining good error-correction performance.

The team adopted an autonomous approach to quantum error correction, where a cleverly designed, artificial environment replaces the need to perform frequent measurements to detect errors.

They also looked at ‘bosonic qubit encodings’, which are, for instance, available and utilized in some of the currently most promising and widespread quantum-computing machines based on superconducting circuits.

Finding high-performing candidates in the vast search space of bosonic qubit encodings was a complex optimization task. The team addressed this problem by using reinforcement learning, an advanced machine learning method in which an agent explores a possibly abstract environment to learn and optimize its action policy.

Using this approach, the team found a surprisingly simple, approximate qubit encoding that could not only greatly reduce the device complexity compared to other proposed encodings, but that also outperformed its competitors in



terms of its ability to correct errors.

“Our work not only demonstrates the potential for deploying machine learning towards quantum error correction, but it may also bring us a step closer to the successful implementation of quantum error correction in experiments,” says Yexiong Zeng, also of the RQC.

“Machine learning can play a pivotal role in addressing large-scale quantum computation and optimization challenges,” says Nori. “Currently, we are actively involved in a number of projects that integrate machine learning, artificial neural networks, quantum error correction, and quantum fault tolerance.”

Reference

1. Zeng, Y., Zhou, Z.-Y., Rinaldi, E., Gneiting, C. & Nori, F. Approximate autonomous quantum error correction with reinforcement learning. *Physical Review Letters* 131, 050601 (2023).

RIKEN Research Winter 2023 (p.19)

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Quantum computers start to measure up

An alternative approach to quantum computers that stores and processes information as light could enable reprogrammable systems.

Category: Applied Physical Sciences **Field:** Quantum computing

The race to develop quantum computers has really heated up over the past few years. State-of-the-art systems can now run simple algorithms using dozens of qubits—or quantum bits—which are the building blocks of quantum computers.

Much of this success has been achieved in so-called gate-based quantum computers. These computers use physical components, most notably superconducting circuits, to host and control the qubits. This approach is quite similar to conventional, device-based classical computers. The two computing architectures are thus relatively compatible and could be used together. Furthermore, future quantum computers could be fabricated by harnessing the technologies used to fabricate conventional computers.

But the Optical Quantum Computing Research Team at the RIKEN Center for Quantum Computing has been taking a very different approach. Instead of optimizing gate-based quantum computers, Atsushi Sakaguchi, Jun-ichi Yoshikawa and Team Leader Akira Furusawa have been developing measurement-based quantum computing.

MEASUREMENT-BASED COMPUTING

Measurement-based quantum computers process information in a complex quantum state known as a cluster state, which consists of three (or more) qubits linked together by a non-classical phenomenon called entanglement. Entanglement is when the properties of two or more quantum particles remain linked, even when separated by vast distances.

Measurement-based quantum computers work by making a measurement on the first qubit in the cluster state. The outcome of this measurement determines what measurement to perform on the second entangled qubit, a process called feedforward. This then determines how to measure the third. In this way, any quantum gate or circuit can be implemented through the appropriate choice of the series of measurements.

Measurement-based schemes are very efficient when used on optical quantum computers, since it's easy to entangle a large number of quantum states in an optical system. This makes a measurement-based quantum computer potentially more scalable than a gate-based quantum computer. For the latter, qubits need to be precisely fabricated and tuned for uniformity and physically connected to each other. These issues are automatically solved by using a measurement-based optical quantum computer.

Importantly, measurement-based quantum computation offers programmability in optical systems. "We can change the operation by just changing the measurement," says



Atsushi Sakaguchi and his team are exploring the possibility of using light to produce quantum computers that are measurement based rather than gate based.



Gate-based quantum computers are becoming more common. But the Optical Quantum Computing Research Team at the RIKEN Center for Quantum Computing has been developing measurement-based quantum computing, with digital circuitry for electrical-optical control (pictured). Measurement-based systems are potentially more scalable than gate-based quantum computing.

Sakaguchi. "This is much easier than changing the hardware, as gate-based systems require in optical systems."

But feedforward is essential. "Feedforward is a control methodology in which we feed the measurement results to a different part of the system as a form of control," explains Sakaguchi. "In measurement-based quantum computation, feedforward is used to compensate for the inherent randomness in quantum measurements. Without feedforward operations, measurement-based quantum computation becomes probabilistic, while practical quantum computing will need to be deterministic."

The Optical Quantum Computing Research Team and their

co-workers—from The University of Tokyo, Palacký University in the Czech Republic, the Australian National University and the University of New South Wales, Australia—have now demonstrated a more advanced form of feedforward: nonlinear feedforward. Nonlinear feedforward is required to implement the full range of potential gates in optics-based quantum computers.

“We’ve now experimentally demonstrated nonlinear quadrature measurement using a new nonlinear feedforward technology,” explains Sakaguchi. “This type of measurement had previously been a barrier to realizing universal quantum operations in optical measurement-based quantum computation.”

OPTICAL COMPUTERS

Optical quantum computers use qubits made of wave packets of light. At another institution, some of the current RIKEN team had previously constructed the large optical cluster states needed for measurement-based quantum computation. Linear feedforward has also been achieved to construct simple gate operations, but more advanced gates need nonlinear feedforward.

A theory for practical implementation of nonlinear quadrature measurement was proposed in 2016. But this approach presented two major practical difficulties: generating a special ancillary state (which the team achieved in 2021) and performing a nonlinear feedforward operation.

The team overcame the latter challenge with complex optics, special electro-optic materials and ultrafast electronics. To do this they exploited digital memories, in which the desired nonlinear functions were precomputed and recorded in the memory. “After the measurement, we transformed the optical signal into an electrical one,” explains Sakaguchi. “In linear feedforward, we just amplify or attenuate that signal, but we needed to do much more complex processing for nonlinear feedforward.”

The key advantages of this nonlinear feedforward technique are its speed and flexibility. The process needs to be fast enough that the output can be synchronized with the optical quantum state.

“Now that we have shown that we can perform nonlinear feedforward, we want to apply it to actual measurement-based quantum computation and quantum error correction using our previously developed system,” says Sakaguchi. “And we hope to be able to increase the higher speed of our nonlinear feedforward for high-speed optical quantum computation.”

“But the key message is that, although superconducting circuit-based approaches may be more popular, optical systems are a promising candidate for quantum-computer hardware,” he adds.

Reference

For a full list of references, check the online version of this article: www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/

RIKEN Research Winter 2023 (p.26)

This feature looks at the work of ATSUSHI SAKAGUCHI

Atsushi Sakaguchi completed his PhD under the supervision of Akira Furusawa at the University of Tokyo in 2021. He then joined his current team, the Optical Quantum Computing Research Team at the RIKEN Center for Quantum Computing. Here he works on experimental quantum optics and quantum information research. He is currently collaborating on research into classical operations for quantum computing.

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

発表論文リスト

2023年度データ

Title	Authors	Article
Black hole graviton and quantum gravity	Y. Kimura	Physica Scripta 99, 045024 (2024).
Effective light cone and digital quantum simulation of interacting bosons	T. Kuwahara, T. V. Vu, and K. Saito	Nature Communications 15, 2520 (2024).
Kekule valence bond order in the Hubbard model on the honeycomb lattice with possible lattice distortions for graphene	Y. Otsuka and S. Yunoki	Physical Review B 109, 115131 (2024).
Quantum computing using floating electrons on cryogenic substrates: Potential And Challenges	A. Jennings, I. Grytsenko, and E. Kawakami	Applied Physics Letters Perspective 124, 120501 (2024).
Realizing quantum optics in structured environments with giant atoms	X. Wang, H. B. Zhu, T. Liu, and F. Nori	Physical Review Research 6, 013279 (2024).
Emergent parallel transport and curvature in Hermitian and non-Hermitian quantum mechanics	C. Y. Ju, A. Miranowicz, Y. N. Chen, G. Y. Chen, and F. Nori	Quantum 8, 1277 (2024).
Passive magnetic-free broadband optical isolator based on unidirectional self-induced transparency	H. Wu, J. Tang, M. Chen, M. Xiao, Y. Lu, K. Xia, and F. Nori	Optics Express 32, 11010 (2024).
Proposal of ensemble qubits with two-atom decay	W. Qin, A. Miranowicz, and F. Nori	New Journal of Physics 26, 033006 (2024).
Suppression of pulsed dynamic nuclear polarization by many-body spin dynamics	K. Sasaki and E. Abe	Physical Review Letters 132, 106904 (2024).
Partially fault-tolerant quantum computing architecture with error-corrected Clifford gates and space-time efficient analog rotations	Y. Akahoshi, K. Maruyama, H. Oshima, S. Sato, and K. Fujii	PRX Quantum 5, 010337 (2024).
Control and readout of a transmon using a compact superconducting resonator	J. Zotova, S. Sanduleanu, G. Fedorov, R. Wang, J. S. Tsai, and O. Astafiev	Applied Physics Letters 124, 102601 (2024).
Experimental demonstration of a high-fidelity virtual two-qubit gate	A. P. Singh, K. Mitarai, Y. Suzuki, K. Heya, Y. Tabuchi, K. Fujii, and Y. Nakamura	Physical Review Research 6, 013235 (2024).
Dissipation, quantum coherence, and asymmetry of finite-time cross-correlations	T. V. Vu, V. T. Vo, and K. Saito	Physical Review Research 6, 013273 (2024).
Topological temporally mode-locked laser	C. R. Leefmans, M. Parto, J. Williams, G. H. Y. Li, A. Dutt, F. Nori, and A. Marandi	Nature Physics 20, 852 (2024).
Rapid single-shot parity spin readout in a silicon double quantum dot with fidelity exceeding 99%	K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, L. C. Camenzind, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, and S. Tarucha	npj Quantum Information 10, 22 (2024).
Tuning the initial phase to control the final state of a driven qubit	P. O. Kofman, S. N. Shevchenko, and F. Nori	Physical Review A 109, 022409 (2024).
Virtual quantum resource distillation	X. Yuan, B. Regula, R. Takagi, and M. Gu	Physical Review Letters 132, 050203 (2024).
Tunable compact on-chip superconducting switch	J. Zotova, A. Semenov, R. Wang, Y. Zhou, O. Astafiev, and J. S. Tsai	Physical Review Applied 21, 024059 (2024).
Virtual quantum resource distillation: General framework and applications	R. Takagi, X. Yuan, B. Regula, and M. Gu	Physical Review A 109, 022403 (2024).
Water-wave vortices and skyrmions	D. A. Smirnova, F. Nori, and K. Y. Bliokh	Physical Review Letters 132, 054003 (2024).
Quantum phase transitions in optomechanical systems	B. Wang, F. Nori, and Z. L. Xiang	Physical Review Letters 132, 053601 (2024).
Identifying topology of leaky photonic lattices with machine learning	E. Smolina, L. Smirnov, D. Leykam, F. Nori, and D. Smirnova	Nanophotonics 13, 271 (2024).
Photon-noise-tolerant dispersive readout of a superconducting qubit using a nonlinear Purcell filter	Y. Sunada, K. Yuki, Z. Wang, T. Miyamura, J. Ilves, K. Matsuura, P. A. Spring, S. Tamate, S. Kono, and Y. Nakamura	PRX Quantum 5, 010307 (2024).
Logical states for fault-tolerant quantum computation with propagating light	S. Konno, W. Asavanant, F. Hanamura, H. Nagayoshi, K. Fukui, A. Sakaguchi, R. Ide, F. China, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, K. Takase, M. Endo, P. Marek, R. Filip, P. van Loock, and A. Furusawa	Science 383, 289 (2024).
ZZ-interaction-free single-qubit-gate optimization in superconducting qubits	S. Watanabe, Y. Tabuchi, K. Heya, S. Tamate, and Y. Nakamura	Physical Review A 109, 012616 (2024).
Hamiltonian phase error in resonantly driven CNOT gate above the fault-tolerant threshold	Y. H. Wu, L. Camenzind, A. Noiri, K. Takeda, T. Nakajima, T. Kobayashi, C. Y. Chang, A. Sammak, G. Scappucci, H. S. Goan, and S. Tarucha	npj Quantum Information 10, 8 (2024).
Sudden change of the photon output field marks phase transitions in the quantum Rabi model	Y. H. Chen, Y. Qiu, A. Miranowicz, N. Lambert, W. Qin, R. Stassi, Y. Xia, S. B. Zheng, and F. Nori	Communications Physics 7, 5 (2024).
Observation and manipulation of quantum interference in a superconducting Kerr parametric oscillator	D. Iyama, T. Kamiya, S. Fujii, H. Mukai, Y. Zhou, T. Nagase, A. Tomonaga, R. Wang, J. J. Xue, S. Watabe, S. Kwon, and J. S. Tsai	Nature Communications 15, 86 (2024).
Quantifying quantum coherence of multiple-charge states in tunable Josephson junctions	J. He, D. Pan, M. Liu, Z. Lyu, Z. Jia, G. Yang, S. Zhu, G. Liu, J. Shen, S. N. Shevchenko, F. Nori, J. Zhao, L. Lu, and F. Qu	npj Quantum Information 10, 1 (2024).
Ising model formulation for highly accurate topological color codes decoding	Y. Takada, Y. Takeuchi, and K. Fujii	Physical Review Research 6, 013092 (2024).

Title	Authors	Article
Recursive quantum eigenvalue and singular-value transformation: Analytic construction of matrix sign function by Newton iteration	K. Mizuta and K. Fujii	Physical Review Research 6, L012007 (2024).
Simulation and performance analysis of quantum error correction with a rotated surface code under a realistic noise model	M. Katsuda, K. Mitarai, and K. Fujii	Physical Review Research 6, 013024 (2024).
Inter-temperature bandwidth reduction in cryogenic QAOA machines	Y. Ueno, Y. Tomida, T. Tanimoto, M. Tanaka, Y. Tabuchi, K. Inoue, and H. Nakamura	IEEE Computer Architecture Letters 23, 9 (2024).
Reply to: Gauge non-invariance due to material truncation in ultrastrong-coupling quantum electrodynamics	O. D. Stefano, A. Settineri, V. Macrì, L. Garziano, R. Stassi, S. Savasta, and F. Nori	Nature Physics 20, 379 (2024).
The tangled state of quantum hypothesis testing	M. Berta, F. G. S. L. Brandão, G. Gour, L. Lami, M. B. Plenio, B. Regula, and M. Tomamichel	Nature Physics 20, 172 (2024).
Quantum error correction with an Ising machine under circuit-level noise	J. Fujisaki, K. Maruyama, H. Oshima, S. Sato, T. Sakashita, Y. Takeuchi, and K. Fujii	Physical Review Research 5, 043261 (2023).
Phase engineering of anomalous Josephson effect derived from Andreev molecules	S. Matsuo, T. Imoto, T. Yokoyama, Y. Sato, T. Lindemann, S. Gronin, G. Gardner, M. Manfra, and S. Tarucha	Science Advances 9, ead3698 (2023).
Phase-dependent Andreev molecules and superconducting gap closing in coherently-coupled Josephson junctions	S. Matsuo, T. Imoto, T. Yokoyama, Y. Sato, T. Lindemann, S. Gronin, G. Gardner, S. Nakosai, Y. Tanaka, M. Manfra, and S. Tarucha	Nature Communications 14, 8271 (2023).
Single-shot single-mode optical two-parameter displacement estimation beyond classical limit	F. Hanamura, W. Asavanant, S. Kikura, M. Mishima, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, F. China, K. Fukui, M. Endo, and A. Furusawa	Physical Review Letters 131, 230801 (2023).
Classically optimized variational quantum eigensolver with applications to topological phases	K. N. Okada, K. Osaki, K. Mitarai, and K. Fujii	Physical Review Research 5, 043217 (2023).
Higher-order singularities in phase-tracked electromechanical oscillators	X. Zhou, X. Ren, D. Xiao, J. Zhang, R. Huang, Z. Li, X. Sun, X. Wu, C. W. Qiu, F. Nori, and H. Jing	Nature Communications 14, 7944 (2023).
Quantum field heat engine powered by phonon-photon interactions	A. Ferreri, V. Macrì, F. K. Wilhelm, F. Nori, and D. E. Bruschi	Physical Review Research 5, 043274 (2023).
Universal bounds on the performance of information-thermodynamic engine	T. Tanogami, T. V. Vu, and K. Saito	Physical Review Research 5, 043280 (2023).
Variational generation of spin squeezing on one-dimensional quantum devices with nearest-neighbor interactions	Z. H. Sun, Y. Y. Wang, Y. R. Zhang, F. Nori, and H. Fan	Physical Review Research 5, 043285 (2023).
A fully pipelined architecture of quantum-classical interface for realizing fault-tolerant quantum computer	T. Miyoshi, K. Koike, S. Morisaka, H. Shiomi, R. Matsuda, K. Ogawa, Y. Tabuchi, and M. Negoro	2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) 2, 322 (2023).
Kondo QED: The Kondo effect and photon trapping in a two-impurity Anderson model ultrastrongly coupled to light	P. C. Kuo, N. Lambert, M. Cirio, Y. T. Huang, F. Nori, and Y. N. Chen	Physical Review Research 5, 043177 (2023).
Observation of chiral-mode domains in a frustrated XY model on optical triangular lattices	H. Ozawa, R. Yamamoto, and T. Fukuhara	Physical Review Research 5, L042026 (2023).
Superconducting route to quantum computing	E. Abe	Proceeding of 2023 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD) (2023).
Optimization of quantum noise in space gravitational-wave antenna DECIGO with optical-spring quantum locking considering mixture of vacuum fluctuations in homodyne detection	K. Tsuji, T. Ishikawa, K. Komori, K. Nagano, Y. Enomoto, Y. Michimura, K. Umemura, R. Shimizu, B. Wu, S. Iwaguchi, Y. Kawasaki, A. Furusawa, and S. Kawamura	Galaxies 11, 111 (2023).
Spatial noise correlations beyond nearest neighbors in ²⁸ Si/Si-Ge spin qubits	J. S. Rojas-Arias, A. Noiri, P. Stano, T. Nakajima, J. Yoneda, K. Takeda, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, D. Loss, and S. Tarucha	Physical Review Applied 20, 054024 (2023).
Blueprint for quantum computing using electrons on helium	E. Kawakami, J. Chen, M. Benito, and D. Konstantinov	Physical Review Applied 20, 054022 (2023).
Selecting active matter according to motility in an acoustofluidic setup: self-propelled particles and sperm cells	V. R. Misko, L. Baraban, D. Makarov, T. Huang, P. Gelin, I. Mateizel, K. Wouters, N. De Munck, F. Nori, and W. De Malsche	Soft Matter 19, 8635 (2023).
Unveiling and veiling an entangled light-matter quantum state from the vacuum	R. Stassi, M. Cirio, K. Funo, J. Puebla, N. Lambert, and F. Nori	Physical Review Research 5, 043095 (2023).
Fully solvable finite simplex lattices with open boundaries in arbitrary dimensions	I. I. Arkhipov, A. Miranowicz, F. Nori, Ş. K. Özdemir, and F. Minganti	Physical Review Research 5, 043092 (2023).
An efficient Julia framework for hierarchical equations of motion in open quantum systems	Y. T. Huang, P. C. Kuo, N. Lambert, M. Cirio, S. Cross, S. L. Yang, F. Nori, and Y. N. Chen	Communications Physics 6, 313 (2023).
Fast generation of Schrödinger cat states using a Kerr-tunable superconducting resonator	X. L. He, Y. Lu, D. Q. Bao, H. Xue, W. B. Jiang, Z. Wang, A. F. Roudsari, P. Delsing, J. S. Tsai, and Z. R. Lin	Nature Communications 14, 6358 (2023).
Gottesman-Kitaev-Preskill qubit synthesizer for propagating light	K. Takase, K. Fukui, A. Kawasaki, W. Asavanant, M. Endo, J. Yoshikawa, P. van Loock, and A. Furusawa	npj Quantum Information 9, 98 (2023).
Noise-correlation spectrum for a pair of spin qubits in silicon	J. Yoneda, J. S. Rojas-Arias, P. Stano, K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, D. Loss, and S. Tarucha	Nature Physics 19, 1793 (2023).

発表論文リスト(つづき)

Title	Authors	Article
Fabrication of superconducting quantum circuits on 12-inch wafers using an ArF immersion lithography system	S. Odate, N. Saito, K. Suzuki, H. Aoyama, K. Kusuyama, Y. Nakamura, and H. Tsukamoto	Proc. SPIE 12652, UV and Higher Energy Photonics: From Materials to Applications 2023, 1265205 (2023).
Continuous-variable quantum computation with optical quantum entanglement and quantum teleportation in time domain	W. Asavanant, A. Kawasaki, R. Ide, T. Suzuki, H. Brunel, B. Charoensombutamon, A. Sakaguchi, K. Fukui, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, K. Takase, J. Yoshikawa, M. Endo, and A. Furusawa	Proc. SPIE 12692, Quantum Communications and Quantum Imaging XXI, 1269202 (2023).
Active initialization experiment of a superconducting qubit using a quantum circuit refrigerator	T. Yoshioka, H. Mukai, A. Tomonaga, S. Takada, Y. Okazaki, N. Kaneko, S. Nakamura, and J. S. Tsai	Physical Review Applied 20, 044077 (2023).
Dynamical nuclear spin polarization in a quantum dot with an electron spin driven by electric dipole spin resonance	P. Stano, T. Nakajima, A. Noiri, S. Tarucha, and D. Loss	Physical Review B 108, 155306 (2023).
Squeezed quantum hybrid system: Giant enhancement of magnon-phonon-spin interactions	F. Nori	Science China Physics, Mechanics & Astronomy 66, 110331 (2023).
Hybrid spin and anomalous spin-momentum locking in surface elastic waves	C. Yang, D. Zhang, J. Zhao, W. Gao, W. Yuan, Y. Long, Y. Pan, H. Chen, F. Nori, K. Y. Bliokh, Z. Zhong, and J. Ren	Physical Review Letters 131, 136102 (2023).
Observation of a superradiant phase transition with emergent cat states	R. H. Zheng, W. Ning, Y. H. Chen, J. H. Lü, L. T. Shen, K. Xu, Y. R. Zhang, D. Xu, H. Li, Y. Xia, F. Wu, Z. B. Yang, A. Miranowicz, N. Lambert, D. Zheng, H. Fan, F. Nori, and S. B. Zheng	Physical Review Letters 131, 113601 (2023).
Non-Hermitian waveguide cavity QED with tunable atomic mirrors	W. Nie, T. Shi, Y. Liu, and F. Nori	Physical Review Letters 131, 103602 (2023).
On a gap in the proof of the generalised quantum Stein's lemma and its consequences for the reversibility of quantum resources	M. Berta, F. G. S. L. Brandão, G. Gour, L. Lami, M. B. Plenio, B. Regula, and M. Tomamichel	Quantum 7, 1103 (2023).
Simulating Chern insulators on a superconducting quantum processor	Z. C. Xiang, K. Huang, Y. R. Zhang, T. Liu, Y. H. Shi, C. L. Deng, T. Liu, H. Li, G. H. Liang, Z. Y. Mei, H. Yu, G. Xue, Y. Tian, X. Song, Z. B. Liu, K. Xu, D. Zheng, F. Nori, and H. Fan	Nature Communications 14, 5433 (2023).
Non-Gaussian-state generation with time-gated photon detection	T. Sonoyama, K. Takahashi, B. Charoensombutamon, S. Takasu, K. Hattori, D. Fukuda, K. Fukui, K. Takase, W. Asavanant, J. Yoshikawa, M. Endo, and A. Furusawa	Physical Review Research 5, 033156 (2023).
Roadmap on structured waves	K. Y. Bliokh, E. Karimi, M. J. Padgett, M. A. Alonso, M. R. Dennis, A. Dudley, A. Forbes, S. Zahedpour, S. W. Hancock, H. M. Milchberg, S. Rotter, F. Nori, Ş. K. Özdemir, N. Bender, H. Cao, P. B. Corkum, C. Hernández-García, H. Ren, Y. Kivshar, M. G. Silveirinha, N. Engheta, A. Rauschenbeutel, P. Schneeweiss, J. Volz, D. Leykam, D. A. Smirnova, K. Rong, B. Wang, E. Hasman, M. F. Picardi, A. V. Zayats, F. J. Rodríguez-Fortuño, C. Yang, J. Ren, A. B. Khanikaev, A. Alù, E. Brasselet, M. Shats, J. Verbeeck, P. Schattschneider, D. Sarenac, D. G. Cory, D. A. Pushin, M. Birk, A. Goriach, I. Kaminer, F. Cardano, L. Marrucci, M. Krenn, and F. Marquardt	Journal of Optics 25, 103001 (2023).
High-cooperativity cavity magnon-polariton using a high-Q dielectric resonator	K. Kato, R. Sasaki, K. Matsuura, K. Usami, and Y. Nakamura	Journal of Applied Physics 134, 083901 (2023).
Quantum microwave parametric interferometer	F. Kronowetter, F. Fesquet, M. Renger, K. Honasoge, Y. Nojiri, K. Inomata, Y. Nakamura, A. Marx, R. Gross, and K. G. Fedorov	Physical Review Applied 20, 024049 (2023).
Quantum simulation of topological zero modes on a 41-qubit superconducting processor	Y. H. Shi, Y. Liu, Y. R. Zhang, Z. Xiang, K. Huang, T. Liu, Y. Wang, J. C. Zhang, C. L. Deng, G. H. Liang, Z. Y. Mei, H. Li, T. M. Li, W. G. Ma, H. T. Liu, C. T. Chen, T. Liu, Y. Tian, X. Song, S. P. Zhao, K. Xu, D. Zheng, F. Nori, and H. Fan	Physical Review Letters 131, 080401 (2023).
Coherent-cluster-state generation in networks of degenerate optical parametric oscillators	Z. Y. Zhou, C. Gneiting, J. Q. You, and F. Nori	Physical Review A 108, 023704 (2023).
Quantum-classical decomposition of Gaussian quantum environments: A stochastic pseudomode model	S. Luo, N. Lambert, P. Liang, and M. Cirio	PRX Quantum 4, 030316 (2023).
Approximate autonomous quantum error correction with reinforcement learning	Y. Zeng, Z. Y. Zhou, E. Rinaldi, C. Gneiting, and F. Nori	Physical Review Letters 131, 050601 (2023).
Optimal and nearly optimal simulation of multiperiodic time-dependent Hamiltonians	K. Mizuta	Physical Review Research 5, 033067 (2023).
Postselected quantum hypothesis testing	B. Regula, L. Lami, and M. M. Wilde	IEEE Transactions on Information Theory 70, 3453 (2023).
Search for the Sagittarius tidal stream of axion dark matter around 4.55 μeV	A. K. Yi, S. Ahn, Ç. Kutlu, J. Kim, B. R. Ko, B. I. Ivanov, H. Byun, A. F. van Loo, S. Park, J. Jeong, O. Kwon, Y. Nakamura, S. V. Uchaikin, J. Choi, S. Lee, M. Lee, Y. C. Shin, J. Kim, D. Lee, D. Ahn, S. Bae, J. Lee, Y. Kim, V. Gkika, K. W. Lee, S. Oh, T. Seong, D. Kim, W. Chung, A. Matlashov, S. Youn, and Y. K. Semertzidis	Physical Review D 108, L021304 (2023).
Key observable for linear thermalization	Y. Chiba and A. Shimizu	Physical Review Research 5, 033037 (2023).

Title	Authors	Article
Probing the symmetry breaking of a light-matter system by an ancillary qubit	S. P. Wang, A. Ridolfo, T. Li, S. Savasta, F. Nori, Y. Nakamura, and J. Q. You	Nature Communications 14, 4397 (2023).
Nonlinear feedforward enabling quantum computation	A. Sakaguchi, S. Konno, F. Hanamura, W. Asavanant, K. Takase, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, J. Yoshikawa, E. Huntington, H. Yonezawa, and A. Furusawa	Nature Communications 14, 3817 (2023).
Pseudofermion method for the exact description of fermionic environments: From single-molecule electronics to the Kondo resonance	M. Cirio, N. Lambert, P. Liang, P. C. Kuo, Y. N. Chen, P. Menczel, K. Funo, and F. Nori	Physical Review Research 5, 033011 (2023).
Generalized Dicke model and gauge-invariant master equations for two atoms in ultrastrongly-coupled cavity quantum electrodynamics	K. Akbari, W. Salmon, F. Nori, and S. Hughes	Physical Review Research 5, 033002 (2023).
Exotic quantum light-matter interactions in bilayer square lattices	X. L. Dong, P. B. Li, J. Q. Chen, F. L. Li, and F. Nori	Physical Review B 108, 045407 (2023).
Fast classical simulation of Hamiltonian dynamics by simultaneous diagonalization using Clifford transformation with parallel computation	Y. Kawase and K. Fujii	Computer Physics Communications 288, 108720 (2023).
All-microwave manipulation of superconducting qubits with a fixed-frequency transmon coupler	S. Shirai, Y. Okubo, K. Matsuura, A. Osada, Y. Nakamura, and A. Noguchi	Physical Review Letters 130, 260601 (2023).
Over-8-dB squeezed light generation by a broadband waveguide optical parametric amplifier toward fault-tolerant ultra-fast quantum computers	T. Kashiwazaki, T. Yamashita, K. Enbutsu, T. Kazama, A. Inoue, K. Fukui, M. Endo, T. Umeki, and A. Furusawa	Applied Physics Letters 122, 234003 (2023).
Feedback-based active reset of a spin qubit in silicon	T. Kobayashi, T. Nakajima, K. Takeda, A. Noiri, J. Yoneda, and S. Tarucha	npj Quantum Information 9, 52 (2023).
Coherent dynamics of a photon-dressed qubit	M. P. Liul, C. H. Chien, C. Y. Chen, P. Y. Wen, J. C. Chen, Y. H. Lin, S. N. Shevchenko, F. Nori, and I. C. Hoi	Physical Review B 107, 195441 (2023).
Quantum biology: An overview	N. Lambert and F. Nori	in <i>Encyclopedia of Condensed Matter Physics, 2nd Edition</i> (Elsevier 2023), pp. 577-583.
Low-loss polarization control in fiber systems for quantum computation	T. Nakamura, T. Nomura, M. Endo, R. He, T. Kashiwazaki, T. Umeki, J. Yoshikawa, and A. Furusawa	Optics Express 31, 19236 (2023).
CAPP axion search experiments with quantum noise limited amplifiers	S. V. Uchaikin, B. I. Ivanov, J. Kim, Ç. Kutlu, A. F. van Loo, Y. Nakamura, S. Oh, V. Gkika, A. Matlashov, W. Chung, and Y. K. Semertzidis	JPS Conference Proceedings 38, 011201 (2023).
Four-channel system for characterization of Josephson parametric amplifiers	B. I. Ivanov, J. Kim, Ç. Kutlu, A. F. van Loo, Y. Nakamura, S. V. Uchaikin, S. Oh, V. Gkika, A. Matlashov, W. Chung, and Y. K. Semertzidis	JPS Conference Proceedings 38, 011200 (2023).
Josephson parametric amplifier in axion experiments	J. Kim, B. I. Ivanov, Ç. Kutlu, S. Park, A. F. van Loo, Y. Nakamura, S. V. Uchaikin, S. Oh, V. Gkika, A. Matlashov, W. Chung, and Y. K. Semertzidis	JPS Conference Proceedings 38, 011199 (2023).
Systematic approach for tuning flux-driven Josephson parametric amplifiers for stochastic small signals	Ç. Kutlu, S. Ahn, S. V. Uchaikin, S. Lee, A. F. van Loo, Y. Nakamura, S. Oh, and Y. K. Semertzidis	JPS Conference Proceedings 38, 011202 (2023).
Novel Union-Find-based decoders for scalable quantum error correction on systolic arrays	M. J. Heer, E. Del Sozzo, K. Fujii, and K. Sano	2023 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW), 524 (2023).
Fermionic quantum approximate optimization algorithm	T. Yoshioka, K. Sasada, Y. Nakano, and K. Fujii	Physical Review Research 5, 023071 (2023).
Subspace variational quantum simulator	K. Heya, K. M. Nakanishi, K. Mitarai, Z. Yan, K. Zuo, Y. Suzuki, T. Sugiyama, S. Tamate, Y. Tabuchi, K. Fujii, and Y. Nakamura	Physical Review Research 5, 023078 (2023).
Spectral stabilizability	T. Linowski, Ł. Rudnicki, and C. Gneiting	Physical Review A 107, 042218 (2023).
Dynamically crossing diabolic points while encircling exceptional curves: A programmable symmetric-asymmetric multimode switch	I. I. Arkhipov, A. Miranowicz, F. Minganti, Ş. K. Özdemir, and F. Nori	Nature Communications 14, 2076 (2023).
Half-metal and other fractional metal phases in doped AB bilayer graphene	A. L. Rakhmanov, A. V. Rozhkov, A. O. Sboychakov, and F. Nori	Physical Review B 107, 155112 (2023).
Elucidation of spin-correlations, Fermi surface and pseudogap in a copper oxide superconductor	H. Kamimura, M. Araidai, K. Ishida, S. Matsuno, H. Sakata, K. Sasaoka, K. Shiraiishi, O. Sugino, J. S. Tsai, and K. Yamada	Condensed Matter 8, 33 (2023).
Non-Gaussian quantum state generation by multi-photon subtraction at the telecommunication wavelength	M. Endo, R. He, T. Sonoyama, K. Takahashi, T. Kashiwazaki, T. Umeki, S. Takasu, K. Hattori, D. Fukuda, K. Fukui, K. Takase, W. Asavanant, P. Marek, R. Filip, and A. Furusawa	Optics Express 31, 12865 (2023).
Compact superconducting microwave resonators based on Al-AlOx-Al capacitors	J. Zotova, R. Wang, A. Semenov, Y. Zhou, I. Khrapach, A. Tomonaga, O. Astafiev, and J. S. Tsai	Physical Review Applied 19, 044067 (2023).
Universal noise-precision relations in variational quantum algorithms	K. Ito, W. Mizukami, and K. Fujii	Physical Review Research 5, 023025 (2023).



量子コンピュータ研究センター
〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1
Email: rqc_info@ml.riken.jp
<https://rqc.riken.jp>