

2024

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	12
受賞報告	13
量子技術イノベーション拠点概要	14
RQC 2024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
• ナノフォトニック共振器量子電気力学研究チーム	32
• 量子多体ダイナミクス研究チーム	34
• 冷却原子量子システム研究チーム	36
• 浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム	38
• 半導体量子情報デバイス研究チーム	40
• 半導体量子情報デバイス理論研究チーム	42
• 量子計算理論研究チーム	44
• 量子情報物理理論研究チーム	46
• 量子計算科学研究チーム	48
• 量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム	50
• 量子複雑性解析理研白眉研究チーム	52
• 数理量子情報理研白眉研究チーム	54
• 理研 RQC- 富士通連携センター	56
• センター長室	58
研究紹介記事	59
発表論文リスト	65

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。

これまで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。

今年2025年は量子力学理論の誕生100周年に当たり、ユネスコが「国際量子科学技術年」と定めています。そのため、量子に関する様々なイベントやシンポジウムが開催されます。また、日本科学未来館では「量子コンピュータ」について新規の常設展示を開始し、当センターは144量子ビット搭載の集積回路チップを提供しています。

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。2024年度には新たに2チームを設置し、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しています。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、光方式による新型量子コンピュータを開発に成功しました。これは世界に先駆けた汎用型光量子計算のためのプラットフォームです。これにより当センターは、国産量子コンピュータ初号機「叡」をはじめとする超伝導量子コンピュータ、世界で初めて始動した汎用型光量子計算プラットフォームといった異なる方式の量子コンピュータ実機を開発・保有する国際的にも極めてユニークな研究組織となりました。

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12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。

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。

2025年6月30日

量子コンピュータ研究センター概要

量子コンピュータ研究センターは2024年度に新たに2つの研究チームを設置し、合計20の研究チームとなりました。超伝導方式、光方式、半導体方式、冷却原子方式などさまざまな物理系での量子コンピュータの研究開発を行い、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、多様なアプローチで量子コンピュータ実機開発と性能向上に取り組み、計算科学・エレクトロニクス技術と融合しながら、社会課題解決に向けて計算可能領域の拡張を図ると同時に、次世代の量子コンピュータ技術を確立するための基礎研究を推進しています。

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

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

ナノフォトニック共振器量子電気力学研究チーム：青木 隆朗

量子多体ダイナミクス研究チーム：福原 武

冷却原子量子システム研究チーム：DE LESELEUC Sylvain

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

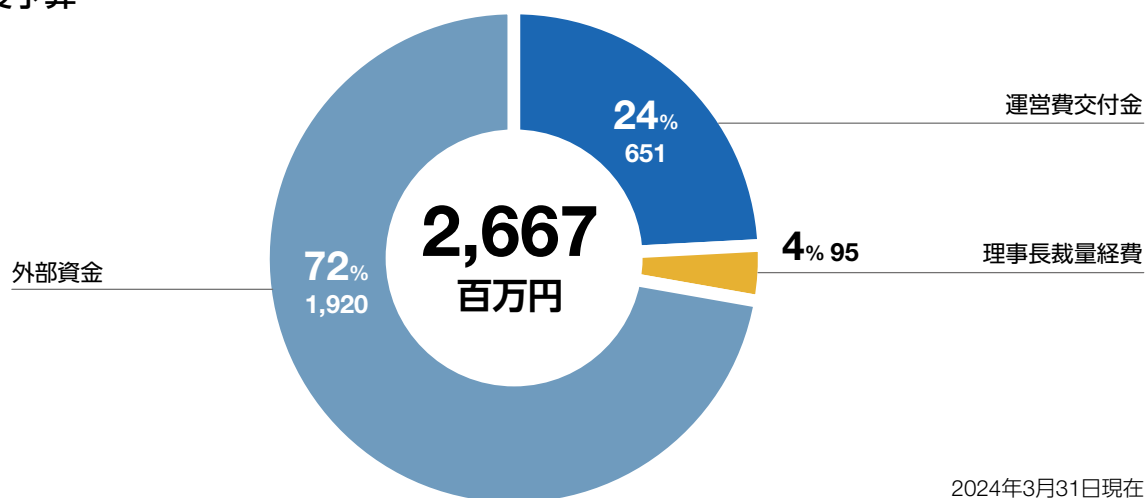
理研RQC-富士通連携センター：中村 泰信

センター長室：萬 伸一

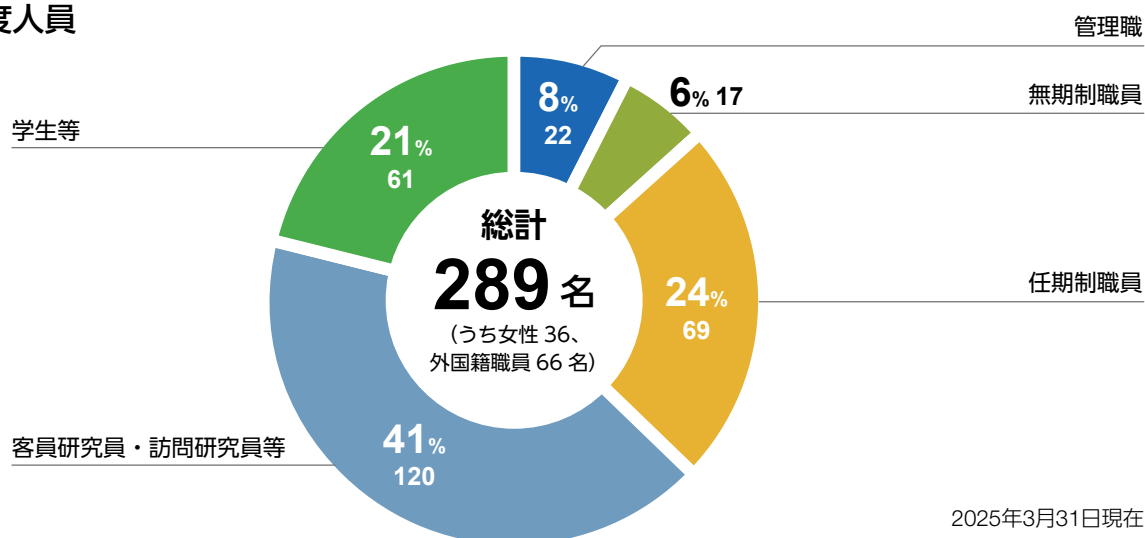
■ 超伝導 ■ 光 ■ 原子 ■ 電子 ■ 半導体 ■ 理論 ■ マネジメント

量子コンピュータ研究センター概要 (つづき)

2024年度予算



2024年度人員



RQC Colloquiums and RQC Seminars

FY2024 RQC Colloquiums

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。2024年度は10回開催し、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
23	April 24, 2024 (online)	Prof. John J.L. Morton	UCL, Quantum Motion, Phasecraft, UK	The role of silicon in quantum computing
24	June 3, 2024	Prof. Andreas Wallraff	Department of Physics, ETH Zurich	Quantum Science and Technology with Superconducting Circuits
25	June 17, 2024	Prof. Dafei Jin	University of Notre Dame, USA	Single electrons on solid neon – a long- coherence high-fidelity qubit platform
26	July 9, 2024	Prof. Nicolas C Menicucci	RMIT University, Australia	Quantum computing with continuous-variable optical systems: recent breakthroughs in scalability and fault tolerance
27	September 24, 2024	Prof. David Elkouss	Okinawa Institute of Science and Technology, Japan	Exploiting near-term quantum networks
28	November 6, 2024	Prof. Dan Stamper-Kurn	University of California, Berkeley, USA	Quantum systems and devices built of ultracold atoms and light
29	December 10, 2024	Dr. Emmanuel Flurin	CEA-Saclay, French	Single Atom Magnetic Resonance by Microwave Photon Counting
30	January 6, 2025 (online)	Prof. Dorit Aharonov	Hebrew University, Israel	The search for evidence of quantum advantage
31	February 26, 2025 (online)	Dr. Bharti Kishor	Agency for Science, Technology and Research (A*STAR), Singapore	What is Quantum Contextuality and Why Should You Care?
32	March 13, 2025	Prof. Oliver Benson	Humboldt-Universität zu Berlin, Germany	Experimental Resources for Quantum Information Processing via Quantum Networks

FY2024 RQC Seminars

またRQCでは、各PIが自主的に主催するRQC Seminarも実施しています。2024年度は80回開催し、量子コンピュータ研究開発に関するブレイクスルーを目指してチームの枠を超えた活発な議論が行われました。

No.	Date	Speaker	Affiliation
109	April 5, 2024	Mr. Boxi Li	Forschungszentrum Jülich, Germany
110	April 17, 2024	Dr. Hidehiro Yonezawa	RQC, Optical Quantum Control Research Team, Japan
111	April 10, 2024	Dr. Rui Li	RQC, Superconducting Quantum Electronics Research Team, Japan
112	April 25, 2024	Prof. Alireza Marandi	California Institute of Technology, USA
113	April 22, 2024	Mr. Jonah Peter	Harvard University, USA
114	April 23, 2024	Dr. Tomasz Linowski	University of Gdansk, Poland
115	April 24, 2024	Mr. Enze Li	University of science and technology of China
116	May 21, 2024	Dr. Nicolò D'Anna	The University of California San Diego (UCSD), USA
117	May 23, 2024	Prof. Yuri Kivshar	Australian National University, Australia
118	July 22, 2024	Prof. Konstantinos Makris	Department of Physics, University of Crete, Greece
119	June 14, 2024	Dr. Stefano Carrazza	Department of Physics, University of Milan, Italy
120	June 10, 2024	Dr. Alexander Tzalenchuk	National Physical Laboratory, Teddington UK Royal Holloway, University of London, Egham, UK
121	June 3, 2024	Mr. Trip Thripsuwan	Chiang Mai University, Thailand
122	June 11, 2024	Dr. Lara Faoro	Google Quantum AI, USA
123	June 12, 2024	Dr. Lev Ioffe	Google Quantum AI, USA
124	June 28, 2024	Dr. Patryk Gumann	IBM Quantum, USA
125	July 29, 2024	Dr. Stephen Jordan	Google Quantum AI, USA
126	July 8, 2024	Dr. Sylvain de Léséleuc	RQC, Cold-Atom Quantum System Research Team, Japan
127	July 19, 2024	Dr. Erkkä Haapasalo	National University of Singapore
128	August 21, 2024	Mr. András Márton Gunyhó	Department of Applied Physics, Aalto University, Finland
129	August 22, 2024	Prof. Xing Fan	Northwestern University, USA
130	September 13, 2024	Dr. Youngkyu Sung	Atlantic Quantum, USA
131	July 30, 2024	Prof. Alexandre Zagoskin	Department of Physics Loughborough University, UK
132	July 31, 2024	Dr. Po-Chen Kuo	Department of Physics, National Cheng Kung University, Taiwan

No.	Date	Speaker	Affiliation
133	August 2, 2024	Prof. Hossein Sadeghpour	ITAMP- Harvard University, USA
134	August 5, 2024	Dr. Zhengyang Zhou	Zhejiang Sci-Tech University, China
135	August 7, 2024	Prof. Chia-Yi Ju	Department of Physics, National Sun Yat-Sen University, Taiwan
136	August 8, 2024	Prof. Tao Liu	South China University of Technology, School of Physics and Optoelectronics, China
137	August 9, 2024	Prof. Guang-Yin Chen	Dept. of Physics, National Chung Hsing University, Taiwan
138	August 6, 2024	Prof. Keyu Xia	Nanjing University, China
139	August 13, 2024	Prof. Yuran Zhang	School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, China
140	August 20, 2024	Prof. IoChun Hoi	Department of Physics City University of Hong Kong, China
141	August 14, 2024	Dr. Masanori Hanada	School of Mathematical Sciences, Queen Mary University of London, UK
142	August 15, 2024	Prof. Valentin Freilikher	Bar-Ilan University, Israel
143	August 16, 2024	Prof. Adam Miranowicz	Institute of Spintronics and Quantum Information, Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University, Poland
144	August 19, 2024	Prof. Ravindra Chhajlany	Solid State Theory Division, Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University, Poland
145	August 21, 2024	Prof. Karol Bartkiewicz	Nonlinear Optics Division, Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University in Poznań, Poland
146	August 22, 2024	Prof. Peng-Bo Li	School of Physics, Xi'an Jiaotong University, China
147	August 23, 2024	Prof. Lin Zhirong	Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, China
148	August 26, 2024	Prof. Roberto Stassi	University of Messina, Italy
149	August 28, 2024	Prof. Yuxi Liu	Institute of Integrated Nanoelectronics Science, Tsinghua University, China
150	September 4, 2024	Prof. Michał Oszmaniec	Center for Theoretical Physics, Polish Academy of Sciences, Poland

No.	Date	Speaker	Affiliation
151	September 27, 2024	Prof. Eduardo Fradkin	Director, Anthony J. Leggett Institute for Condensed Matter Theory Department of Physics University of Illinois, USA
152	August 27, 2024	Mr. Gerardo Suarez	Director, Anthony J. Leggett Institute for Condensed Matter Theory Department of Physics University of Illinois, USA
153	September 5, 2024	Mr. Riya Baruah	Department of Applied Physics Aalto University, Finland
154	September 17, 2024	Dr. Lirandë Pira	Centre for Quantum Technologies, the National University of Singapore
155	September 18, 2024	Mr. Alberto Del Ángel Medina	Chalmers University of Technology, Sweden
156	September 25, 2024	Prof. Dario Poletti	Chalmers University of Technology, Sweden
157	September 13, 2024	Prof. Roei Ozeri	The Weizmann Institute of Science, Israel
158	September 18, 2024	Mr. Francesco Anna Mele	Scuola Normale Superiore di Pisa, Italy
159	October 10, 2024	Prof. Lincoln Carr	Quantum Engineering Program, Department of Physics, Colorado School of Mines, USA
160	October 11, 2024	Dr. Katuscia Cassemiro	American Physical Society, USA
161	October 15, 2024	Mr. Kumar Saurav	University of Southern California, USA
162	October 17, 2024	Mr. Maximilian Meyer-Mölleringhof	Uppsala University, Sweden
163	October 31, 2024	Ms. Aziza Almanakly	Massachusetts Institute of Technology, USA
164	November 1, 2024	Mr. Gavin Barclay Crowder	Massachusetts Institute of Technology, USA
165	November 5, 2024	Ms. Sofia Arranz Regidor	Queen's University, Canada
166	October 23, 2024	Prof. Masaya Nakagawa	The University of Tokyo, Japan
167	October 25, 2024	Prof. Stephen Hughes	The Department of Physics, Engineering Physics & Astronomy, Queen's University, Canada
168	November 19, 2024	Dr. Ulysse Reglade	Alice & Bob, French
169	October 18, 2024	Dr. Kushal Das	Quantum Nanoscience Laboratory School of Physics, Faculty of Science, The University of Sydney, Australia
170	October 30, 2024	Mr. Artem Ryzhov	B. Verkin ILTPE of NASU, Kharkiv, Ukraine

No.	Date	Speaker	Affiliation
171	November 25, 2024	Dr. Sebastian de Graaf	National Physical Laboratory, UK
172	December 6, 2024	Dr. Patrice Bertet	Quantronics Group SPEC/CEA Saclay, French
173	December 6, 2024	Prof. Yangsen Ye	Department of Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale and School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China
174	November 21, 2024	Mr. Finn Schmolke	Institute for Theoretical Physics I, University of Stuttgart, Germany
175	November 28, 2024	Dr. Kasra Nowrouzi	Advanced Quantum Testbed, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA
176	December 24, 2024	Dr. Nana Shumiya	Department of Electrical and Computer Engineering, Princeton University, USA
177	December 9, 2024	Mr. Linus Ekstrom	Honda Research Institute EU, Germany
178	December 27, 2024	Dr. Anton Frisk Kockum	Chalmers University of Technology, Sweden
179	January 17, 2025	Prof. Gabriel Aeppli	ETH Zurich, the Department of Physics, Switzerland
180	February 7, 2025	Dr. Alberto Mercurio	École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland
181	January 24, 2025	Prof. Hui Jing	Hunan Normal University, China
182	January 29, 2025	Prof. Lewis Antill	Institute of Quantum Biophysics, Department of Biophysics, Sungkyukwan University, South Korea
183	January 27, 2025	Mr. Alex Chapple	Département de physique, Faculté des sciences, Université de Sherbrooke, Canada
184	January 31, 2025	Dr. Ben Criger	Quantinuum Ltd., USA
185	February 5, 2025	Prof. Mackillo Kira	University of Michigan, USA
186	February 4, 2025	Prof. Steven T. Cundiff	Department of Physics and Quantum Research Institute, University of Michigan, USA
187	March 27, 2024	Prof. Andrei Faraon	William L Valentine Professor of Applied Physics and Electrical Engineering, California Institute of Technology, USA
188	March 31, 2025	Dr. Marcello Dalmonte	International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Italy

海外

【ヨーロッパ】

- アールト大学
- B. ヴェルキン低温物理工学研究所
- 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
- カザン連邦大学
- マックス・プランク量子光学研究所
- モスクワ物理技術研究所
- パラツキー大学
- パリ・サクレ大学
- Stefan Meyer Institute
- スイス連邦工科大学ローザンヌ校
- バーゼル大学
- ハンブルク大学
- オックスフォード大学
- シュトゥットガルト大学
- 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】

- ハーバード大学
- Intel Corporation
- マギル大学
- マサチューセッツ工科大学
- Nord Quantique
- カリフォルニア大学バークレー校
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
- インド工科大学バラナシ校
- 国立交通大学
- 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】

- 分子科学研究所
- 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
- 近畿大学
- 京都大学
- 名古屋大学
- 日本大学
- 沖縄科学技術大学院大学
- 大阪大学
- 静岡大学
- 総合研究大学院大学
- 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
- 早稲田大学
ほか

【民間企業】

- 株式会社 Fixstars Amplify
- 富士通株式会社
- 株式会社日立製作所
- 株式会社ニコン
- 日本電気株式会社
- 日本電信電話株式会社
- OptQC 株式会社
- キュエル株式会社
- 株式会社東芝
- 株式会社 Yaquumo
ほか

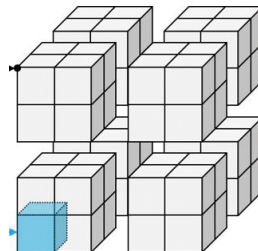


プレスリリース

2024/9/5

量子コンピュータ用誤り訂正技術の高効率化に成功
ー高性能な誤り耐性量子コンピュータの実現に道ー

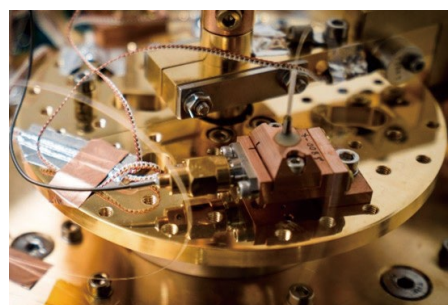
量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム



2024/11/5

光量子状態の高速生成
ー光通信技術による光量子コンピュータの加速ー

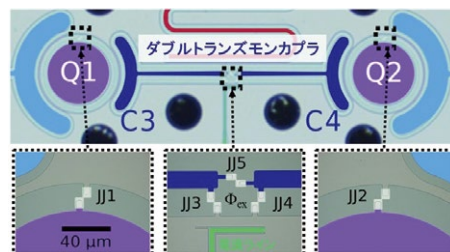
光量子計算研究チーム



2024/11/22

超伝導量子コンピュータに利用される東芝提案の素子「ダブルトランズモンカプラ」で
世界トップレベルの2量子ビットゲート性能を達成
ー量子コンピュータの高性能化を実現し、社会課題の解決に貢献へー

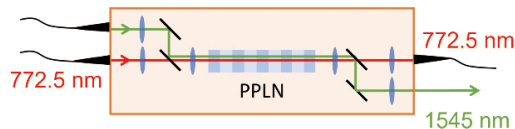
超伝導量子エレクトロニクス研究チーム



2025/1/30

高速でリアルタイムな光量子もつれ生成
ー従来の1000倍以上の高速量子相関が開拓する新時代ー

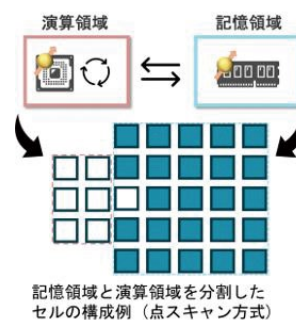
光量子計算研究チーム



2025/3/4

メモリとプロセッサを分離した新たな量子コンピュータのアーキテクチャを提案
ー移植性の優れた高メモリ効率な設計で実用的な量子計算への道を切り拓くー

超伝導量子計算システム研究ユニット



受賞報告

2024/5/18

川上 恵里加 理研白眉研究チームリーダーが船井情報科学振興財団 船井学術賞を受賞

浮揚電子量子情報理研白眉研究チームの川上 恵里加 理研白眉研究チームリーダーが船井情報科学振興財団 船井学術賞を受賞されました。この賞は、情報科学、情報技術分野を中心に広く理工系分野において、顕著な研究業績があった若手研究者に授与される賞で、真空中に浮いている電子の量子状態の読み出しと量子コンピュータ実現への展開に対する業績について受賞致しました。



2024/11/19

Nori Franco チームリーダーがClarivate Highly Cited Researchers 2024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 2024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。



2025/3/26

米田 靖史 基礎科学特別研究員がSelected by JSTAT Scientific Directors for the Highlights collection に選出

量子計算理論研究チームの米田 靖史 基礎科学特別研究員がSelected by JSTAT Scientific Directors for the Highlights collection に選出されました。この賞は、統計物理学の分野において発表された研究成果の中から、特に洞察力と有用性が高いと認められた論文に授与される賞で、論文タイトル“Statistical ensembles for phase coexistence states specified by noncommutative additive observables”で受賞されました。

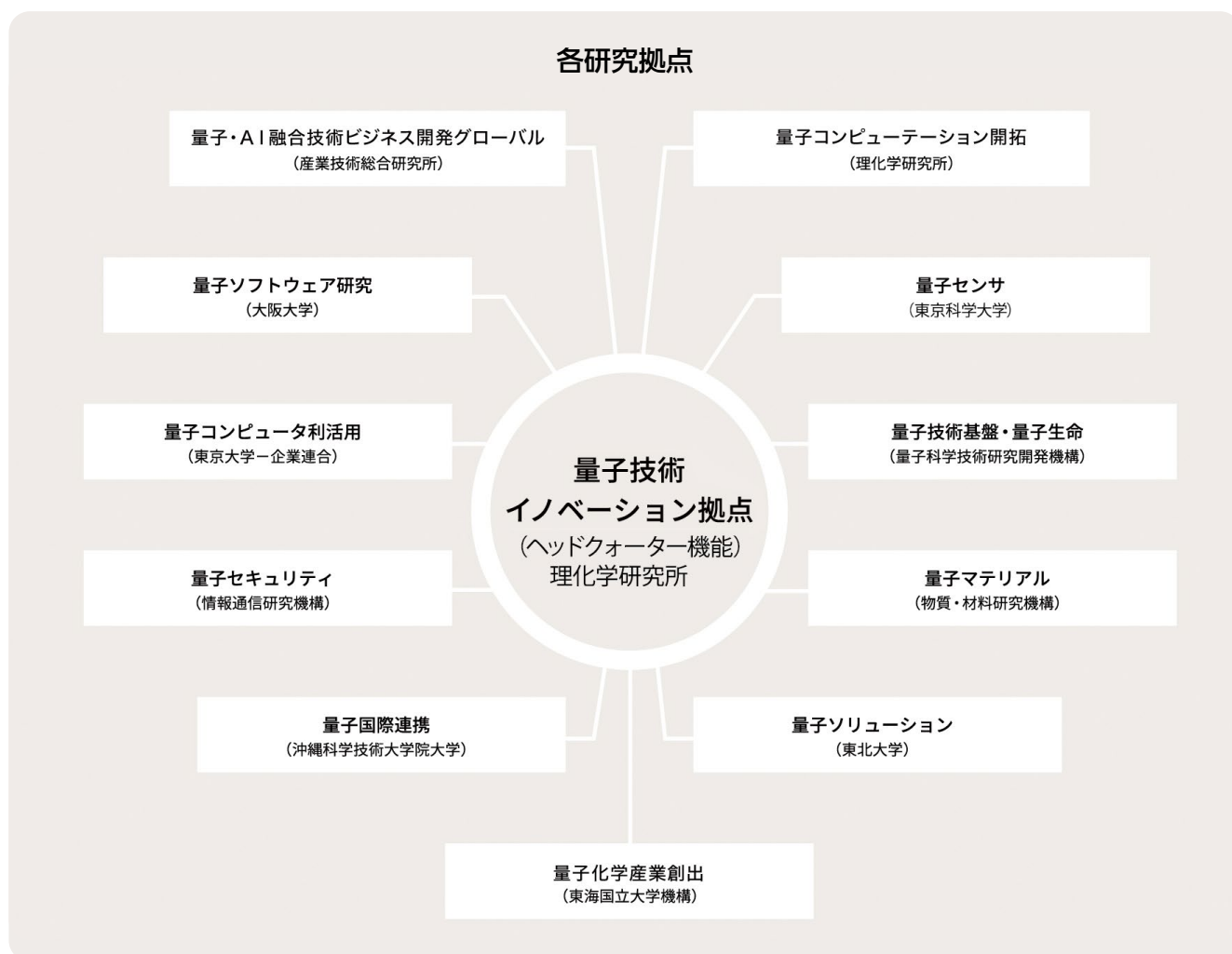
量子技術イノベーション拠点概要

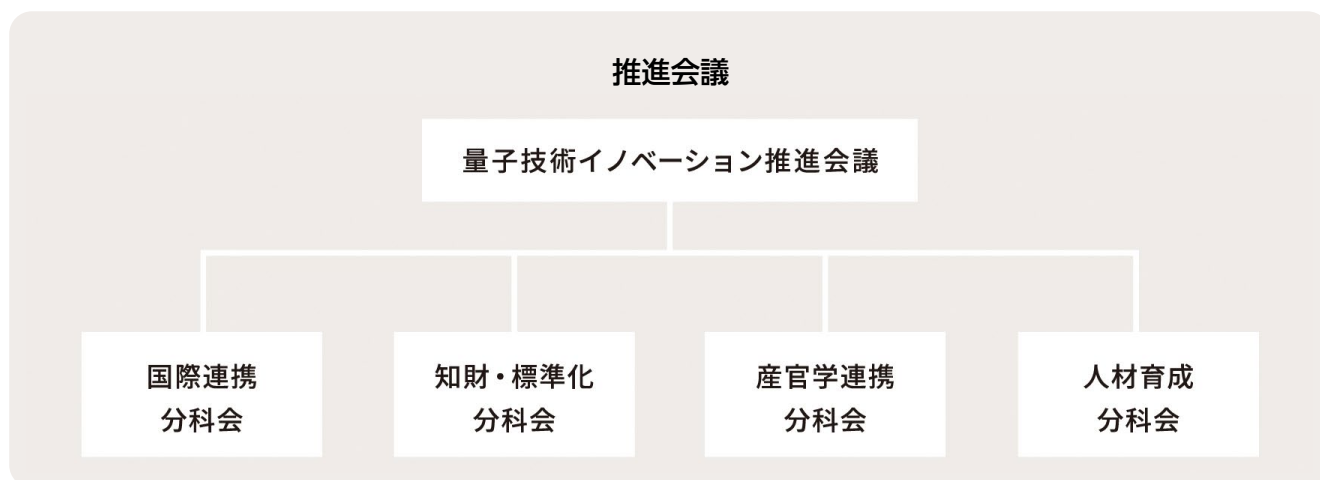


量子技術イノベーション11拠点の中核組織として、 全拠点一体で、量子技術の社会実装を加速

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拠点の一つであり、量子コンピュータシステムの研究開発を遂行する量子コンピューテーション開拓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：量子分野の若手研究者増加や機関・研究分野を超えた人材育成強化の推進

2024年度活動事例

QIHの活動の一環として、2024年10月21日(月)から23日(水)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 2024」を東京にて開催しました。3日間の講演数は82、パネルセッション2、ポスタ講演160となりました。講演の中には、日本を含む9か国の政府関係者から各国の量子戦略の紹介もありました。本シンポジウムに23か国から714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し、国際交流の機会となりました。また、若手育成のため、学生によるポスタ講演のうち、優秀な18件に優秀ポスタ賞を授与いたしました。



Quantum Innovation 2024より



その他にも、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、夏休み科学イベントなどのアウトリーチ活動にも注力しております。また、量子技術に関する情報を集めた Q-Portal¹を運営しております。2025年4月で開設より2年となり、Q-Portal のX²のフォロワーが約2,000名となりました。

¹ Q-Portal <https://q-portal.riken.jp/>

² Q-PortalのX https://x.com/Q_Portal_

量子技術イノベーション拠点概要 (つづき)

2024年度実施のアウトリーチ活動より



夏休み科学イベント「クイズとゲームでせまる! 量子コンピュータ」を開催
(8月3日 - 5日 日本科学未来館にて)



サイエンスアゴラに量子コンピュータVRを出展
(10月26日 - 27日 テレコムセンタービルにて)



nano tech展2025に出展
(1月29日 - 31日 東京ビックサイトにて)



大阪・関西万博プレイベントに出展
(3月23日 渋谷にて)



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。

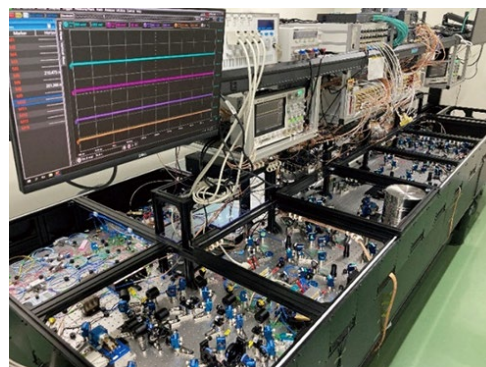
RQC FY2024 Pick-up Topics

新方式の量子コンピュータを実現

ー世界に先駆けて汎用型光量子計算プラットフォームが始動ー

2024年11月8日に、光量子計算研究チーム、光量子制御研究チーム、日本電信電話株式会社、株式会社 Fixstars Amplify の共同研究グループは、新方式の量子コンピュータの開発に成功しました。今回開発した光量子コンピュータは、インターネットを介したクラウドシステムから利用可能となっています。当面は共同研究契約を通じた利用となりますが、今後、国内の量子計算プラットフォームの利用拡大、量子コンピュータのユースケース（活用法）の創出、国内量子産業の発展と国際競争力の向上に寄与すると期待されます。

光量子コンピュータ実機

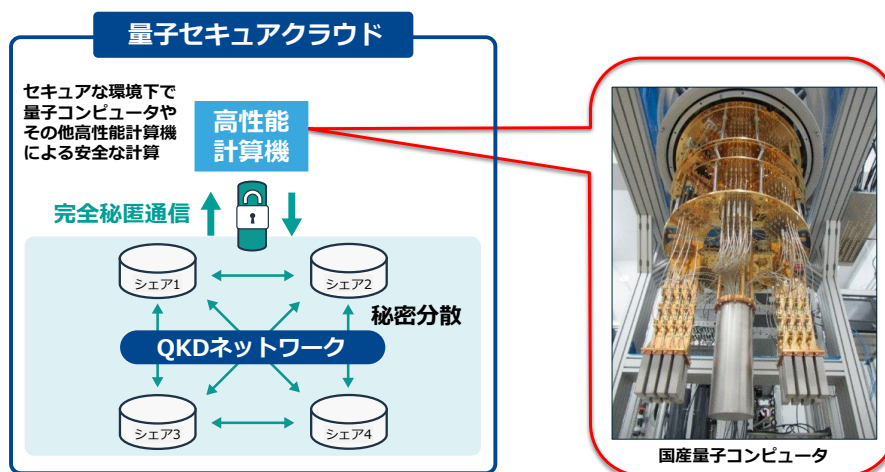


量子セキュアクラウドと量子コンピュータの統合実証に成功

ー量子コンピュータから生み出される付加価値の高い情報の安全な伝送・保管を実証ー

2025年3月13日に、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）が整備して研究開発及び運用を進めている量子セキュアクラウドと当センターが中心となって開発した国産ゲート型量子コンピュータを接続し、国産ゲート型量子コンピュータを安全に利用するための相互接続環境を構築しました。量子セキュアクラウドのユーザーが国産量子コンピュータ機能を利活用でき、生み出されたデータを安全に伝送・保管できることを実証しました。

量子セキュアクラウドが構築されているNICTの東京QKDネットワークから当センターの超伝導量子コンピュータを操作する様子



NICTの量子セキュアクラウド（左）と理研の量子コンピュータ（右）の統合

超伝導量子コンピュータの技術移転を達成

2021年4月に理研RQC-富士通連携センターを設立し、超伝導量子コンピュータの大規模化を目指した共同研究を実施してきました。連携センターにて培った技術を活用し、富士通が実用化したコンピュータシステムが、2025年初旬に産業技術総合研究所量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センターにて稼働する予定です。国内ベンダーが、商用量子コンピュータシステムを受注したのは初めての事例となり、超伝導量子コンピュータの技術移転を達成しました。

超伝導量子エレクトロニクス研究チーム

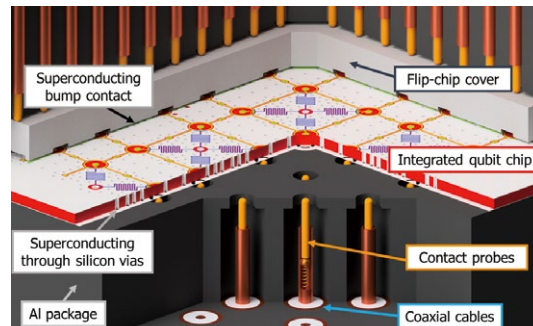
キーワード: 量子コンピュータ、超伝導回路、ジョセフソン接合、マイクロ波量子光学、回路量子電磁力学

研究室概要

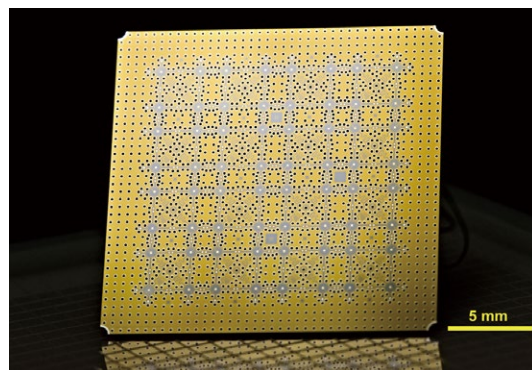
RQC内の他のチームや外部の機関と共同で、量子計算やその他の量子技術への応用に向けた超伝導量子回路の研究開発に取り組んでいる。現在、集積化された超伝導量子ビットを用いた量子コンピューティングプラットフォームの構築に注力している。拡張性の高い量子ビットチップとして、超伝導シリコン貫通ビアを有するチップの上に、周波数固定のトランズモン型量子ビットを2次元配列に並べ、マイクロ波入出力を基板裏面から行う方式を考案し、100量子ビット以上の量子ビットからなる超伝導量子コンピュータの開発を進めている。大規模量子ビットチップの制御に必要な希釈冷凍機の立ち上げや、制御用エレクトロニクスのソフトウェアの整備、測定の自動化などにも注力している。

また、個々の量子ビット操作の性能を向上させるための要素技術の開発についても並行して取り組んでいる。残留相互作用の小さい2量子ビットゲート方式や量子ビットの高速多重化読み出し手法など、集積化に適した技術の開発に特に注力している。進行波型ジョセフソンパラメトリック増幅器など、量子ビットの多重化読み出しに不可欠な量子限界増幅器の研究開発にも取り組んでいる。

これらの研究活動を通じて、量子コンピュータに関する理解を深め、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、チームディレクター

主要論文

- 1 R. Li, K. Kubo, Y. Ho, Z. Yan, Y. Nakamura, and H. Goto, "Realization of high-fidelity CZ gate based on a double-transmon coupler", *Phys. Rev. X* 14, 041050 (2024).
- 2 Y. Sunada, K. Yuki, Z. Wang, T. Miyamura, J. Ilves, K. Matsuura, P. A. Spring, S. Tamate, S. Kono, and Y. Nakamura, "Photon-noise-tolerant dispersive readout of a superconducting qubit using a nonlinear Purcell filter", *PRX Quantum* 5, 010307 (2024).
- 3 Y. Sunada, S. Kono, J. Ilves, S. Tamate, T. Sugiyama, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, "Fast readout and reset of a superconducting qubit coupled to a resonator with an intrinsic Purcell filter", *Phys. Rev. Applied* 17, 044016 (2022). Editors' Suggestion
- 4 N. Gheeraert, S. Kono, and Y. Nakamura, "Programmable directional emitter and receiver of itinerant microwave photons in a waveguide", *Phys. Rev. A* 102, 053720 (2020).
- 5 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).

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

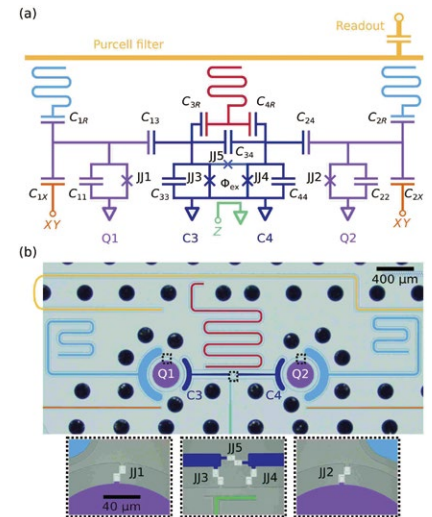
二重トランズモン可変結合回路を用いた高忠実度2量子ビットゲートの実現

超伝導量子コンピュータの実装においては、多数の量子ビットが格子状に接続されている。そのため、量子操作を行わないときに残留相互作用を極限まで抑制しつつ、高忠実度な2量子ビットゲート実現することが重要となる。このため、量子ビット間にオンオフ比の高い相互作用を最小限の回路要素で実現することが集積化の際の課題となる。

我々は、固定周波数の量子ビットの間に二重トランズモンカプラと呼ばれる2つのトランズモン量子ビットが結合した可変周波数のカプラ量子ビットを導入することで、 10^4 以上の非常に高いオンオフ比をもつZZ相互作用を実現した。また、強化学習によるパルス波形の最適化を用いることで、ゲート忠実度99.9%の非常に高精度な2量子ビットゲートを実現した。

提案方式では、データ量子ビットにコヒーレンス時間の比較的長い固定周波数の量子ビットを採用でき、量子ビット間の周波数制約も従来よりも緩和されているため、集積化に適したゲート方式となっている。

R. Li *et al.*, “Realization of high-fidelity CZ gate based on a double-transmon coupler”, Phys. Rev. X 14, 041050 (2024).



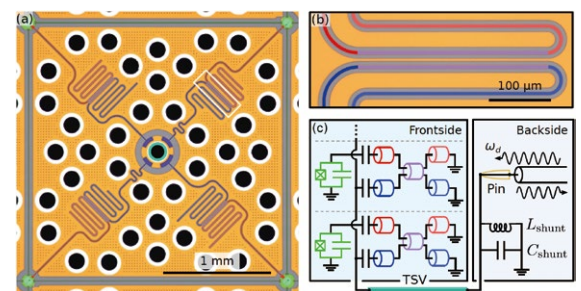
(a) 二重トランズモン可変結合回路を組み込んだ回路図。(b) 色付けしたデバイス写真。それぞれの色は(a)の中の回路要素に対応している。

高速・高忠実度周波数多重量子ビット読み出し

超伝導量子ビットの高速かつ高忠実度な読み出しは、誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた重要な課題の1つである。超伝導量子ビットの分散読み出しを高速化するためには、量子ビットと共振器間の結合および共振器と読み出し線路間の結合を十分大きく設計する必要がある。一方で、読み出し線路への結合強度の増加は量子ビットのデコヒーレンスにもつながるため、量子ビットの周波数帯のマイクロ波が読み出し線路に放出されることを防ぐパーセルフィルタと呼ばれるマイクロ波フィルタの実装が必要不可欠である。しかしながら、十分な遮蔽性能のパーセルフィルタを実装するためには比較的大きな回路面積が必要となり、量子ビットの集積化との両立が困難であった。

我々は量子ビットの読み出し共振器とフィルタ共振器に用いられるコプラナ線路間の結合回路内に追加のノッチフィルタ回路を内在させることで、最小限の回路面積で高性能なパーセルフィルタを実装した。この結果、読み出し時間56 nsで最小誤り率0.09%、平均誤り率0.23%という非常に高速かつ高忠実度な4量子ビット多重読み出しを実現した。

P.A. Spring *et al.*, “Fast multiplexed superconducting-qubit readout with intrinsic Purcell filtering using a multiconductor transmission line”, PRX Quantum 6, 020347 (2025).



(a) 4量子ビット多重読み出し用量子ビットデバイス (b) 読み出し共振器とフィルタ共振器間の内在的フィルタ構造 (c) 多重読み出しの回路図。表面のフィルタ共振器は図(a)中央部のシリコン貫通ビアを通して裏面の同軸ケーブルに接続される。

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
(特別研究員) SPRING Peter Anthony
(特別研究員) MAMGAIN Arvind
(上級テクニカルスタッフ) 楠山 幸一
(上級テクニカルスタッフ) 秋元 彦太

(テクニカルI) SZIKSZAI Laszlo
(テクニカルI) 早川 晴美
(テクニカルI) 迫田 祐治
(テクニカルI) 皆藤 真智恵
(テクニカルI) 武藤 耕喜

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

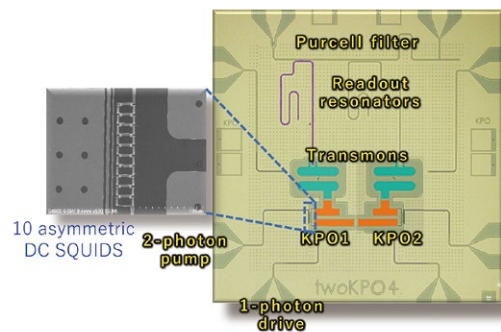
研究室概要

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。

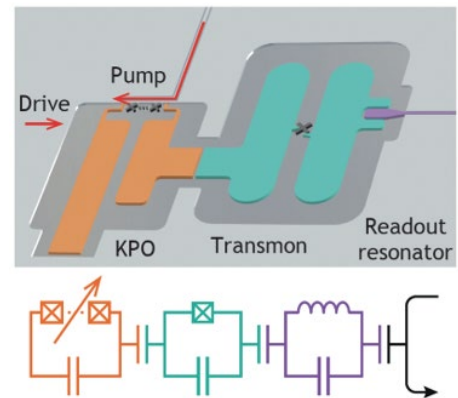
量子コンピュータのエラー訂正が比較的容易なボゾニックコードと呼ばれる手法は、無限にある共振器の自由度を活かし量子情報をエラーから守る。我々は、カーパラメトリック発振器(KPO)を利用することで、実用的なボゾニックコードの一つであるCatコードを実現するCat Qubitの研究を、超伝導回路を使って行っている。2次元のKPO回路(図1と2)で猫状態を生成し、量子トモグラフィの手法で忠実度の評価を行い、1ビットゲートと2ビットのゲート操作が可能な、万能量子ゲートを実現に成功した。

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 $\sqrt{i}$ SWAP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。

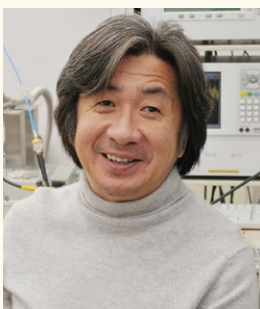
以上の成果は、今回開発に成功した平面超伝導KPO回路が、新たなスケールアップな量子情報処理のプラットフォームになる可能性を示している。



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。



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.)チームディレクター

主要論文

- 1 D. Hoshi, T. Nagase, S. Kwon, D. Iyama, T. Kamiya, S. Fujii, H. Mukai, S. Ahmed, A. F. Kockum, S. Watabe, F. Yoshihara and J. S. Tsai, "Entangling Schrödinger's cat states by bridging discrete- and continuous-variable encoding", *Nature Communications*, 16, 1309 (2025).
- 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

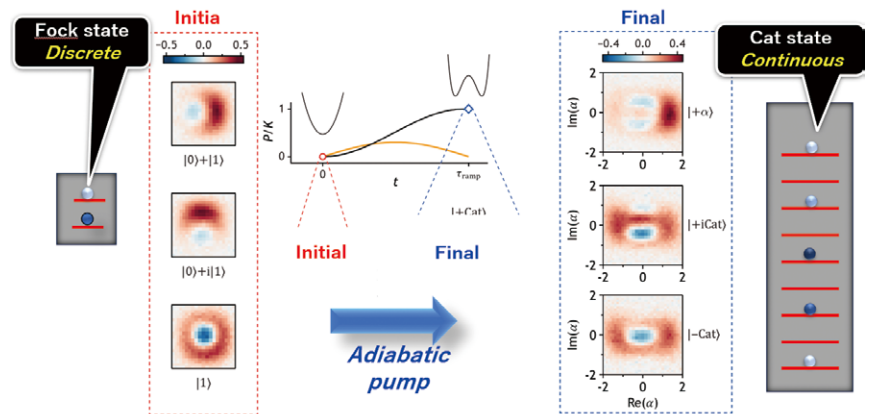
- 1975 米国 カルフォルニア大学バークレー校 文理学部 物理学科卒業
- 1983 米国 ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校 物理学部 理学博士 (Ph.D.)
- 1983 日本電気株式会社 マイクロエレクトロニクス研究所
- 2001 日本電気株式会社 基礎研究所 主席研究員
- 2001 理化学研究所 巨視的量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー
- 2012 理化学研究所 単量子操作グループ グループディレクター
- 2012 理化学研究所 巨視的量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー
- 2014 理化学研究所 超伝導量子シミュレーション研究チーム チームリーダー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

離散変数量子状態（Fock状態）から連続変数量子状態（Cat状態）への変換

超伝導KPO量子ビットを断熱的に2光子ポンピングすることにより、任意の離散変数量子状態であるFock状態から、連続変数量子状態であるCat状態への自由に変換できる。離散変数量子状態をポンプすることで、多くのマイクロ波光子がKPO量子ビットに注入され、それらが干渉を起こし、Cat状態が生まれる。下の図では、代表的な例として3種類のFock状態をポンプした結果得られたCat状態の実験結果を示す。

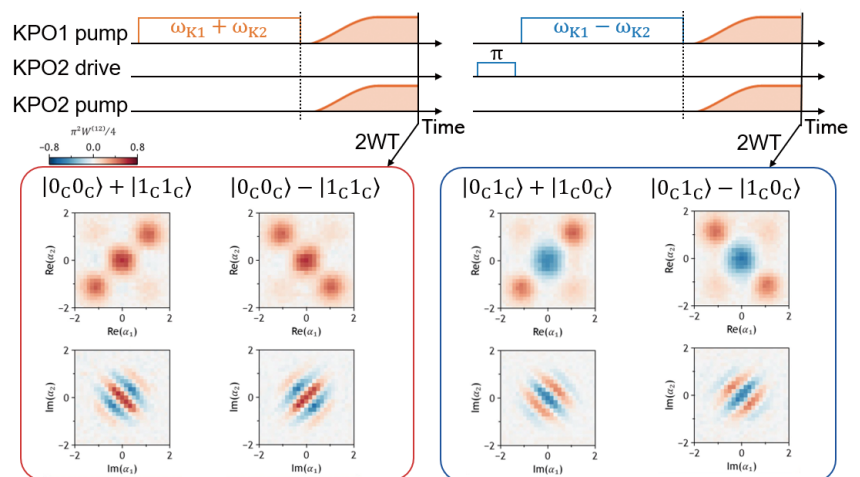
量子状態はWignerトモグラフィーの結果である。上から順に： $|0\rangle + |1\rangle$ のFock状態を断熱的にポンプすることにより、連続変数量子状態である $|+a\rangle$ 状態が生まれる。 $|0\rangle + i|1\rangle$ のFock状態を断熱的にポンプすることにより、連続変数量子状態である $|+iCat\rangle$ 状態が生まれる。 $|1\rangle$ のFock状態を断熱的にポンプすることにより、連続変数量子状態である $|-Cat\rangle$ 状態が生まれる。最終状態の忠実度の見積りはおおむね0.8程度であった。



Fock状態からCat状態の変換

2-KPOゲート：Bell-Cat状態の生成

2つの結合した超伝導KPO量子ビットを、この2つのKPOの和周波数パルスと差周波数パルスを使った制御により、任意のエンタングルしたBell-Fock状態を作ることができる。このBell-Fock状態を断熱的に2光子ポンピングすることにより、それに相当する様々なエンタングルしたBell-Cat状態を生成することに成功した。図では実験で使ったパルスシーケンスと最終的に生成されたエンタングルしたBell-Cat状態のjoint Wignerトモグラフィーの結果を示してある。この実験では、全ての組み合わせのBell-Cat状態が生成されたことを示している。下段のjoint Wignerトモグラフィーの虚位相空間での干渉縞は、2つのKPOがエンタングルしていることを示している。この2ビットKPO操作の最終状態の忠実度の見積りはおおむね0.6程度であった。



Bell-Cat状態生成のパルスシーケンスとjoint Wignerトモグラフィー結果

主要メンバー

(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「観」が稼働しており、144量子ビットシステムのテストを開始している。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「観」



阿部 英介 (D.Sci.) ユニットリーダー

主要論文

- 1 K. Ishibashi *et al.*, "Research on Quantum Materials and Quantum Technology at RIKEN", *ACS Nano* 19, 12427 (2025).
- 2 K. Sasaki and E. Abe, "Suppression of Pulsed Dynamic Nuclear Polarization by Many-Body Spin Dynamics", *Physical Review Letters* 132, 106904 (2024).
- 3 E. Abe, "Superconducting route to quantum computing", *Proceeding of 2023 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)*, P.1–4 (2023).
- 4 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).
- 5 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).

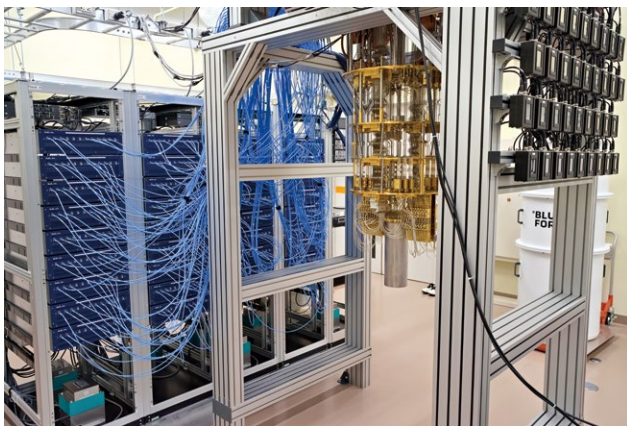
略歴

- 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)

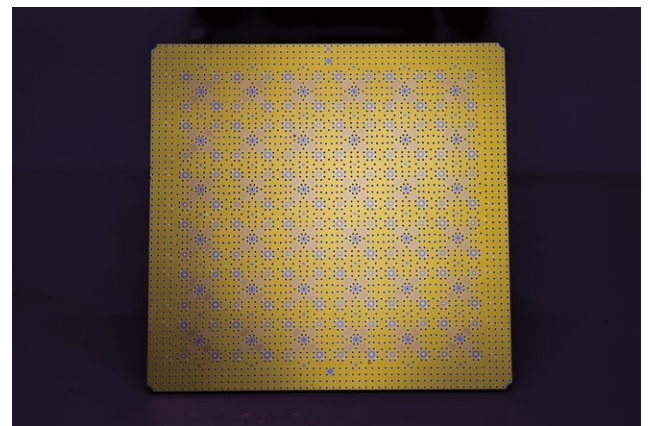
研究紹介

144量子ビット超伝導量子コンピュータシステムの開発

64量子ビット超伝導量子コンピュータ「叡」では、量子ビット制御・読み出しのための同軸ケーブルを量子ビットチップ背面へ垂直配線したタイラブルな正方格子配置の量子ビットデザインが採用されている。この方式の著しい特徴は、より大きな系への自然な拡張性である。我々は、 12×12 の正方格子配置144量子ビットからなるシステムの開発を進めた。64量子ビットシステムからの大きな変更点は、(1)量子ビット周波数を8-GHz帯から5-GHz帯へ下げたこと、(2)冷凍機サイズを保ちつつ、必要とされる同軸ケーブル数を確保するために高密度同軸配線技術を採用したこと、(3)出力信号の初段の増幅のために、5-GHzのバンド幅と20 dB以上のゲインを有するジョセフソン進行波パラメトリック増幅器を開発したことである。我々はハードウェアの構築を完了し、量子ビットチップの性能評価を開始している。



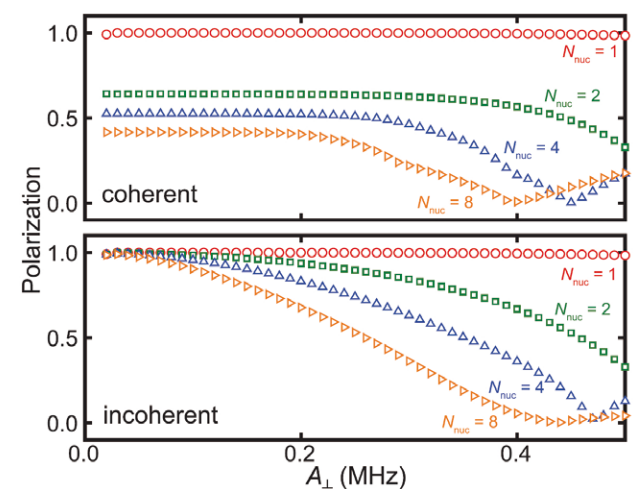
144量子ビット超伝導量子コンピュータシステム



144量子ビットチップ

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>

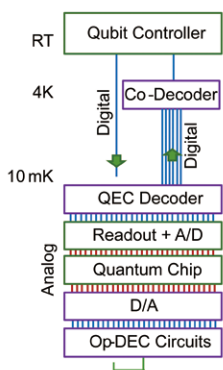
超伝導量子計算システム研究ユニット

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

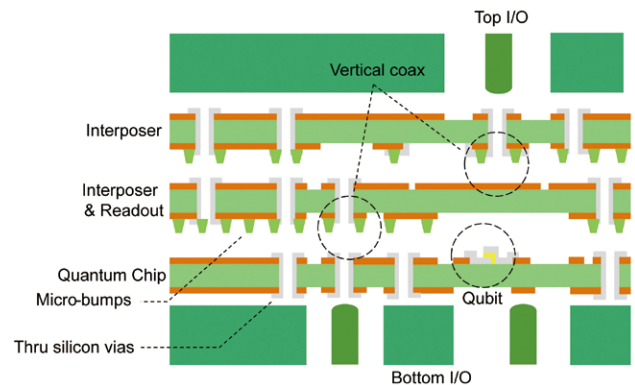
研究室概要

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, S. Imamura, Y. Tomida, T. Tanimoto, M. Tanaka, Y. Tabuchi, K. Inoue, H. Nakamura, C3-VQA: Cryogenic counter-based co-processor for variational quantum algorithms, *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 6, 1-17 (2025).
- 2 T. Kobori, Y. Suzuki, Y. Ueno, T. Tanimoto, S. Todo, Y. Tokunaga, LSQCA: Resource-efficient load/store architecture for limited-scale fault-tolerant quantum computing, 2025 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), 304-320 (2025).
- 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

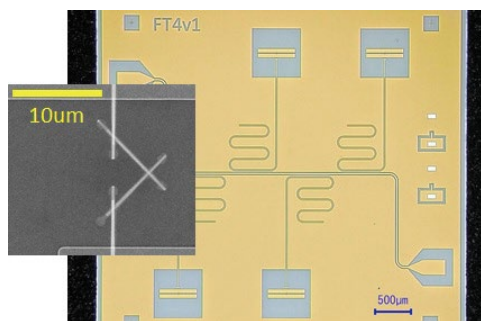
- 2012 東京大学先端科学技術研究センター 特任研究員
- 2015 日本学術振興会 特別研究員
- 2017 東京大学先端科学技術研究センター 助教
- 2020 理化学研究所 創発物性科学技術研究センター ユニットリーダー
- 2021 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター ユニットリーダー(現職)

ハイブリッド量子回路研究チーム

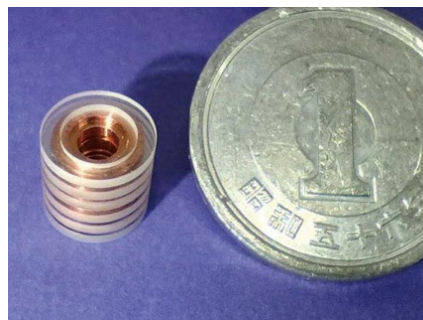
キーワード: ハイブリッド量子系、マイクロ波量子光学、電子トラップ、量子制御

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いっても過言ではない。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している。



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。



電子トラップ量子ビット実現のための小型電子トラップ電極



野口 篤史 (Ph.D.) チームディレクター

主要論文

- 1 Y. Tsuchimoto, I. Nakamura, S. Shirai, and A. Noguchi, "Superconducting surface trap chips for microwave-driven trapped ions", *EPJ Quantum Technology* 11, 56 (2024).
- 2 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).
- 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

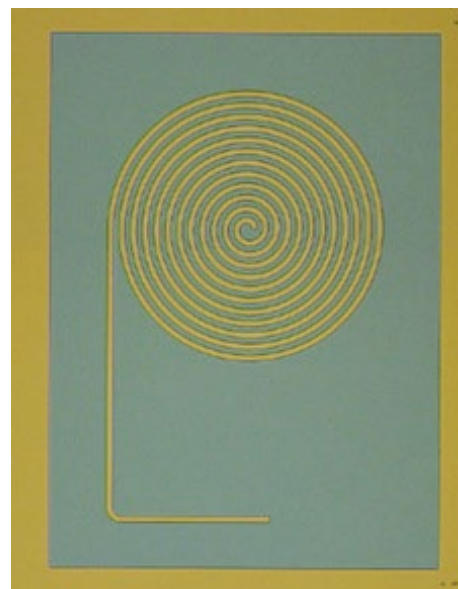
- 2013 大阪大学基礎工学研究科 学振特別研究員(PD)
- 2014 東京大学先端科学技術研究センター 特任研究員
- 2015 東京大学先端科学技術研究センター 学振特別研究員(PD)
- 2015 東京大学先端科学技術研究センター 特任助教 (-2018年)
- 2016 JST さきがけ研究員(兼任) (-2019年)
- 2019 東京大学総合文化研究科 准教授(現職)
- 2020- 稲盛科学研究機構 InaRISフェロー(現職)
- 2020 理化学研究所 創発物性科学研究センター チームリーダー (-2021年)
- 2021 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター チ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

研究紹介

スパイラル構造による超高性能マイクロ波共振器の実現

超伝導共振器は、超伝導量子ビットの読み出しや、ボソニック符号におけるホスト量子系として用いられている。また、トラップイオンやトラップ電子などのその他の物理系を制御・読み出すための回路としても活用されている。これら超伝導共振器の量子機能の性能は、共振器のQ値によって制限されており、どれだけ高いQ値が実現可能であるかにより、性能が決まる。これまで、2次元の超伝導回路は主にコプラナー導波路構造を持つものが主に利用されてきた。これらの研究により、超伝導薄膜と基板界面などに損失が集中していることが指摘されてきた。本研究では、新しくスパイラル型の構造を持つ超伝導共振器に着目し、この構造が界面への電場集中を小さくすることを発見した。実際にシリコン基板上の窒化チタン薄膜を用いてサンプルを作製し、コプラナー共振器とスパイラル共振器とを比較することで、スパイラル共振器がより高いQ値を持つことを明らかにした。単一光子強度におけるQ値は10,000,000に達し、2次元集積回路としては世界一のQ値を達成した。

[1] Yusuke Tominaga, Shotaro Shirai, Yuji Hishida, Hiroataka Terai, and Atsushi Noguchi, arXiv:2502.17901 (2025).

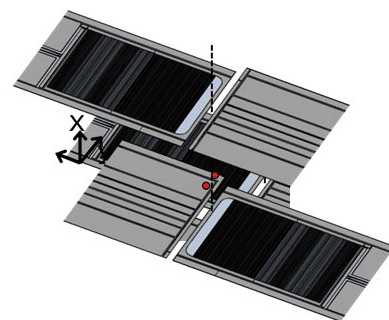


スパイラル構造を持つ超伝導共振器の光学顕微鏡写真。

トラップイオンのマイクロ波制御に向けた超伝導回路集積電極

イオントラップ量子コンピュータは、レーザーを用いた高精度な量子ゲートが可能なハードウェアとして注目を浴びている。さらなる高忠実度化に向けて、近年、レーザーの代わりに振動磁場勾配を用いたイオンの制御が研究されている。現在、イオントラップにおいて世界最高性能の2量子ビットゲートは、振動磁場勾配を用いたものである。一方で、このゲート手法は非常に大きなRF強度が必要であり、拡張性への課題が指摘されている。また、さらなる高精度化にも、より大きな磁場勾配が必要となり、熱の問題があることが分かっている。そこで、この問題を解決する手法として、高Q値の超伝導共振器を利用する方法を提案し、実際にイオントラップ電極に組み込まれた超伝導共振器を開発し、その性能を評価した。Q値100,000程度のマイクロ波共振器の作製に成功し、従来用いられてきた磁場勾配が、千倍以上小さなRF強度で実現可能であることを実験的に示した。

[1] Yuta Tsuchimoto, Ippei Nakamura, Shotaro Shirai, and Atsushi Noguchi, EPJ Quantum Technology 11, 56 (2024).



超伝導マイクロ波共振器が集積されたイオントラップ電極。一対の超伝導マイクロ波共振器により増幅されたマイクロ波磁場勾配がイオンに照射される。

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

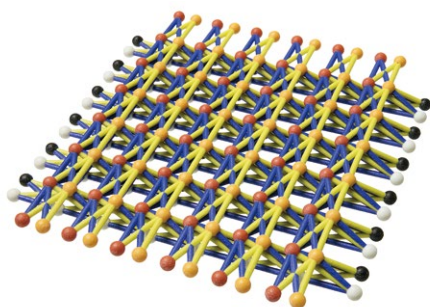
(特別研究員) 白井 菖太郎
(特別研究員) FLECK Markus

光量子計算研究チーム

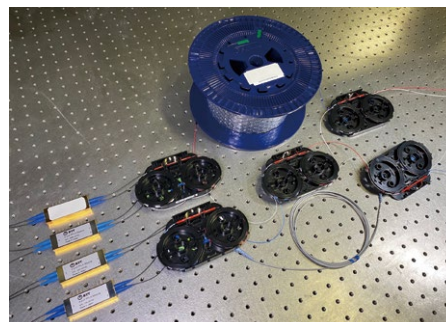
キーワード: 量子情報科学、量子光学

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あるが、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ことができる。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。



量子計算に用いる大規模エンタングルド状態のグラフ



大規模エンタングルド状態を作る光学系の簡易セットアップ



古澤 明 (Ph.D.) 副センター長、チームディレクター

主要論文

- 1 A. Kawasaki, H. Brunel, R. Ide, T. Suzuki, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, T. Yamashima, A. Sakaguchi, K. Takase, M. Endo, W. Asavanant, and A. Furusawa, "Real-time observation of picosecond-timescale optical quantum entanglement toward ultrafast quantum information processing", *Nature Photonics* 19, 271–276 (2025).
- 2 A. Kawasaki, R. Ide, H. Brunel, T. Suzuki, R. Nehra, K. Nakashima, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, F. China, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, T. Yamashima, A. Sakaguchi, K. Takase, M. Endo, W. Asavanant, and A. Furusawa, "Broadband generation and tomography of non-Gaussian states for ultra-fast optical quantum processors", *Nature Communications* 15, 9075 (2024).
- 3 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)
- 4 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)
- 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)

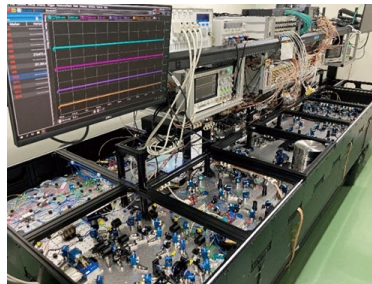
略歴

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
 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)
 2024 OptQC株式会社の創業者の1人となり取締役就任

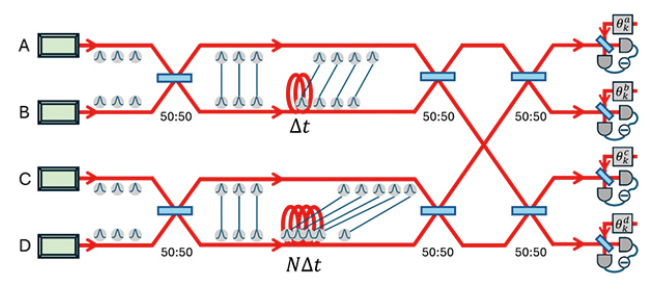
研究紹介

汎用型光量子計算プラットフォームの始動

光量子制御研究チームと共同で、世界に先駆けた汎用型光量子計算のためのプラットフォームの開発に成功した。光方式では、従来の量子コンピュータと比べて高速かつ大規模な量子計算が可能になると期待されている。今回開発した光量子コンピュータは、時間分割多重化手法を用いた測定誘起型の連続量量子コンピュータである。基幹部である超広帯域量子光生成デバイスは、NTT先端集積デバイス研究所によって研究されている超高速通信用光デバイスを基に開発した量子光源が提供され、クラウドシステムは株式会社 Fixstars Amplify の協力により整備された。本光量子コンピュータはクラウドベースの量子コンピュータであり、理研内にある光量子コンピュータ実機がクラウドと接続されている。ユーザーはデザインした量子回路をクラウドへ送信し、実行結果をクラウド経由で受け取る。



光量子コンピュータ実機写真

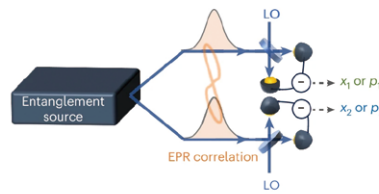


光量子コンピュータ光学装置概略図

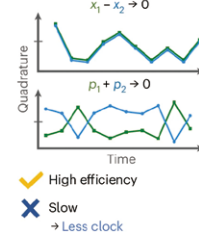
ピコ秒時間スケールでの量子エンタングルメントの実時間測定

光の量子エンタングルメントは様々な量子情報処理アプリケーションのリソースであるが、高速な量子情報処理を行うためには短い光波束の間の量子エンタングルメントを扱う必要がある。しかし、従来の方法では、量子エンタングルメントを測るためのホモダイン測定に、測定精度と高速性の間のトレードオフがあった。ここで、測定精度の低下は、測定器の量子効率落ちることによるものである。我々は、ホモダイン測定の前段階で、広帯域の導波路型光パラメトリック増幅器を用いた位相敏感増幅を行うことで、測定器の量子効率の低下の影響を実効的に抑え、このトレードオフを解消した。これにより、高速なホモダイン測定器を用いることができるようになり、40ピコ秒という短い光波束の間で、光ショットノイズとの比較で4.5 dB 圧搾された量子相関を測定することに成功した。40ピコ秒は2.5 GHzの繰り返しレートに相当し、過去の量子相関の測定例より1000倍高速である。

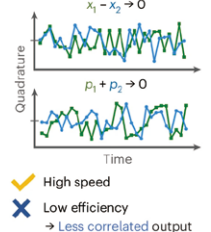
a Standard HD detection



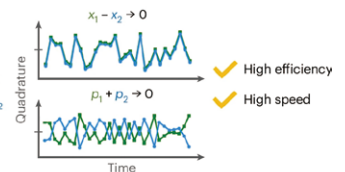
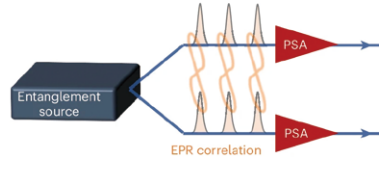
(i) HD for quantum optics



(ii) HD for optical communications



b HD detection with PSA



上：従来の量子相関測定における測定精度と速度のトレードオフの概念図。
下：本研究において実現された、高速かつ高精度の量子相関測定。

©A. Kawasaki et al., Nature Photonics 19 271-276 (2025).

主要メンバー

(研究員) 吉川 純一
(特別研究員) 阪口 淳史

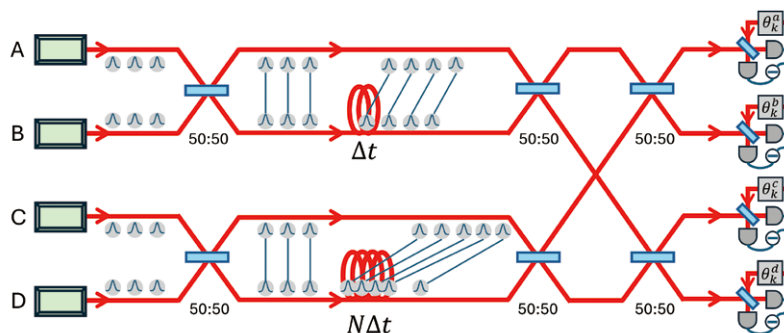
光量子制御研究チーム

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

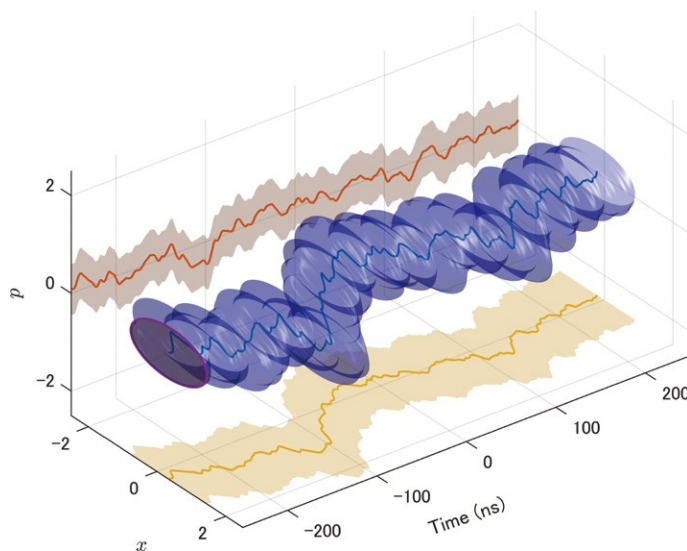
研究室概要

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。

測定誘起型光量子計算の研究では、時間分割多重化手法を用いたスケーラブルな光量子コンピュータの開発を行っている。時間領域で大規模量子エンタングルメントを生成し、それを順次測定基底を変えながら測定をすることで量子演算を行うことができる。実機開発だけでなくクラウドシステムの構築などの環境整備も行い、光量子コンピュータの応用探索と実用化を目指している。



測定誘起型光量子コンピュータ



光の量子状態の推定



米澤 英宏 (Ph.D.) チームディレクター

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).

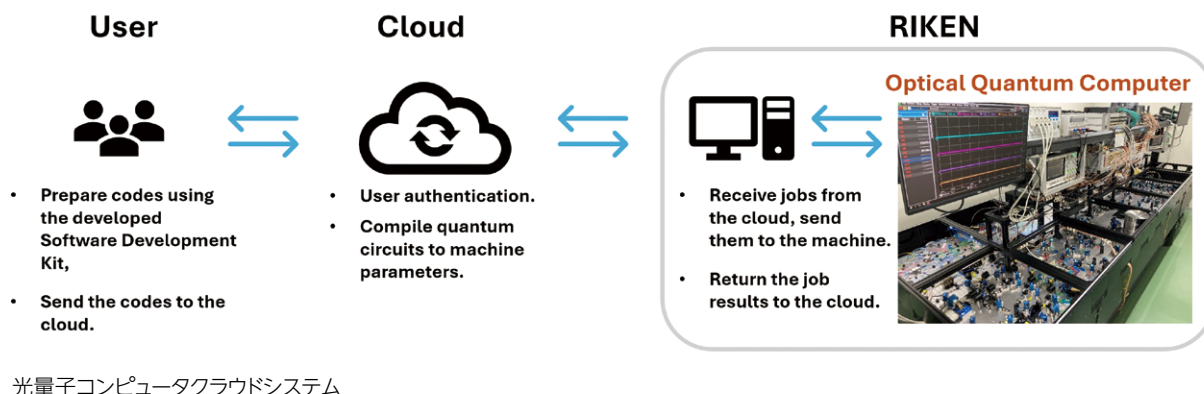
略歴

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 チームディレクター(現職)

研究紹介

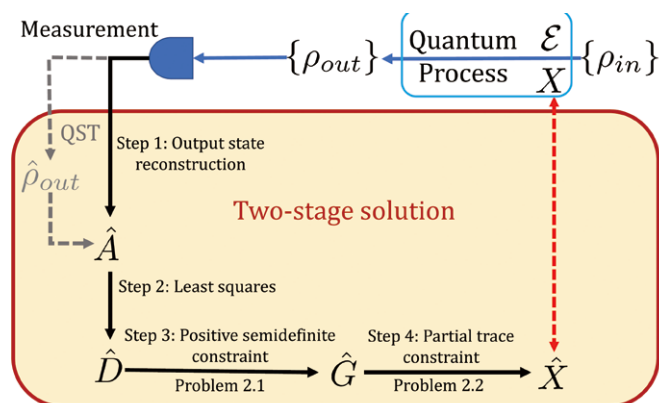
光量子コンピュータクラウドシステムの開発

当チームは、光量子計算研究チームと共同で光量子コンピュータクラウドシステムの開発を行った。今回開発した光量子コンピュータ実機は、時間分割多重化手法を用いた測定誘起型のアナログタイプの光量子コンピュータである。本実機は、4つのNTT社製スウィーズド光源、遅延付き干渉計、4つのホモダイン測定系からなっている。遅延付き干渉計では二つの長さの異なる光遅延路を用いることで時間領域の大規模エンタングルメントを生成し、これを様々な基底で測定することで演算を行う。本実機のクロック周波数は100MHzであり、101個の量子モードが持つ連続変数に対して線形変換が可能となっている。また、本実機はクラウドと接続されており、クラウドを介して実機を実行することができる。ユーザーは今回開発された本実機用のソフトウェア開発キットを用いて、量子回路を設計することができ、その量子回路を自動的に実機パラメータに変換し実機を実行することができる。このクラウドシステムにより、連続量の最適化問題やニューラルネットワークなどの光量子コンピュータの応用研究が進展すると期待されている。



量子プロセストモグラフィの2段階解法の研究

量子情報処理において、量子状態、プロセス、測定を正確に特徴付けかつ制御することは非常に重要である。量子プロセストモグラフィは既知の入量子状態と測定器から、量子プロセスを推定する手法である。我々は、トレースを保存する場合としないプロセスの両方に適用できる2段階解法を提案した。また、本アルゴリズムの計算量のスケーリング、解析的な最大誤差、最適な入力と測定を明らかにした。さらに、本アルゴリズムの効率性と有効性を数値シミュレーションによって示した。



量子プロセストモグラフィの2段階解法の概念図

©S. Xiao, Y. Wang, J. Zhang, D. Dong, G. J. Mooney, I. R. Petersen, H. Yonezawa, "A Two-Stage Solution to Quantum Process Tomography: Error Analysis and Optimal Design," IEEE Trans. Inf. Theory 71, 1803-1823 (2025).

主要メンバー

(上級研究員) 横山 翔竜

ナノフォトニック共振器量子電気力学研究チーム

キーワード: ナノフォトニクス、共振器 QED、量子光学、量子コンピュータ、量子ネットワーク

研究室概要

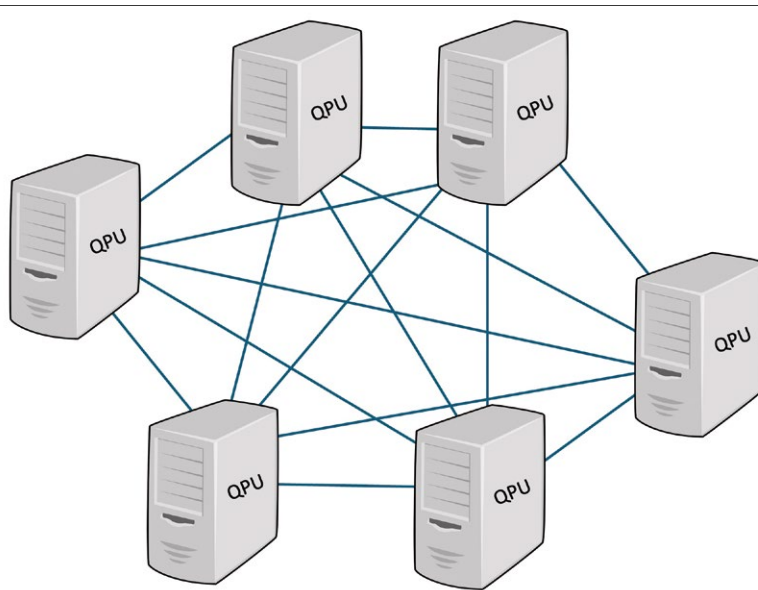
当チームでは、ナノフォトニックデバイスを用いた共振器量子電気力学 (QED) の実験的研究を推進している。共振器 QED 系は、光共振器に閉じ込められた光子と原子からなるハイブリッド系であり、原子量子ビットと光子量子ビットを接続する理想的な量子インターフェースである。

従来の共振器 QED の実験では、バルクミラーを用いた空間光学共振器に基づく系によって、単一光子やシュレディンガーの猫状態といった光の非古典状態の決定論的生成や、光子の量子非破壊測定など、重要な光量子技術の原理実証が行われてきた。

しかし、これらの空間光学共振器はファイバー光学との整合性が低く、また極めて複雑かつ精密な調整・制御を必要とするため、低損失で多数の共振器 QED 系を連結することが困難であった。

当チームでは、こうした接続性や集積性の課題を解決するため、ナノフォトニックデバイスに基づく新しい共振器 QED 系を構築し、スケーラビリティに優れた量子技術の実現を目指している。

具体的には、極限的な微細加工技術を用いて強い光閉じ込め性能を持つナノフォトニックデバイスを開発し、レーザー冷却・トラップされた原子との強結合を実現する。さらに、分散型量子コンピューティングや量子ネットワークの要素技術を高効率かつ高フィデリティで実現し、これらを統合した光量子システムを構築することを目指している。



ナノフォトニック共振器 QED に基づく分散型量子コンピュータ・量子ネットワーク系の概念図



青木 隆朗 (Ph.D.) チームディレクター

主要論文

- 1 S. K. Ruddell, K. E. Webb, M. Takahata, S. Kato, and T. Aoki, "Ultra-low-loss nanofiber Fabry-Perot cavities optimized for cavity quantum electrodynamics", *Opt. Lett.* 45, 4875 (2020).
- 2 D. H. White, S. Kato, N. Német, S. Parkins, and T. Aoki, "Cavity Dark Mode of Distant Coupled Atom-Cavity Systems", *Phys. Rev. Lett.* 122, 253603 (2019).
- 3 S. Kato, N. Német, K. Senga, S. Mizukami, X. Huang, S. Parkins, and T. Aoki, "Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics", *Nature Communications* 10, 1160 (2019).
- 4 S. Kato and T. Aoki, "Strong Coupling between a Trapped Single Atom and an All-Fiber Cavity", *Phys. Rev. Lett.* 115, 093603 (2015).
- 5 R. Nagai and T. Aoki, "Ultra-low-loss tapered optical fibers with minimal lengths", *Opt. Express* 23, 28427-28436 (2014)

略歴

2001 東京大学大学院工学系研究科 博士(工学)取得
 2001 東京大学大学院工学系研究科 助手
 2006 JST さきがけ 専任研究員
 2008 京都大学大学院理学研究科 特定准教授
 2011 早稲田大学理工学術院 准教授
 2014 早稲田大学理工学術院 教授(現職)
 2024 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)

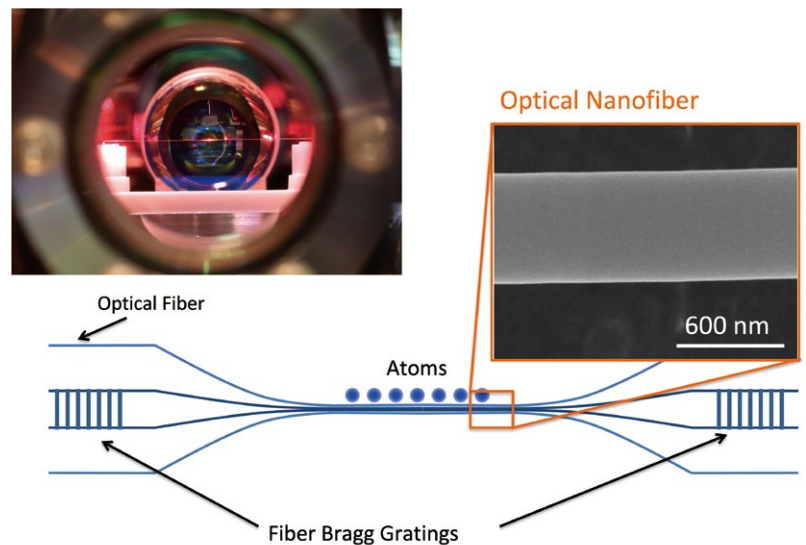
研究紹介

ナノファイバー共振器QED系の実現

我々は、独自のアイデアと技術に基づいて開発したナノファイバー共振器を用い、トラップされた単一原子とナノファイバー共振器が強く結合した共振器QED系を実現した[S. Kato and T. Aoki, Phys. Rev. Lett. 115, 093603 (2015)]。これは、世界で初めての全ファイバー型光共振器による共振器QED系の実現である。

さらに、2つのナノファイバー共振器QED系を全ファイバーでコヒーレントに結合させた「結合共振器QED系」を世界で初めて構築し、この系における5つの固有モードすべてを観測することに成功した[S. Kato *et al.*, Nature Communications 10, 1160 (2019); D. White *et al.*, Phys. Rev. Lett. 122, 253603 (2019)]。

これらの成果は、高効率な分散型量子コンピュータや量子ネットワークの実現に向けた重要なステップである。



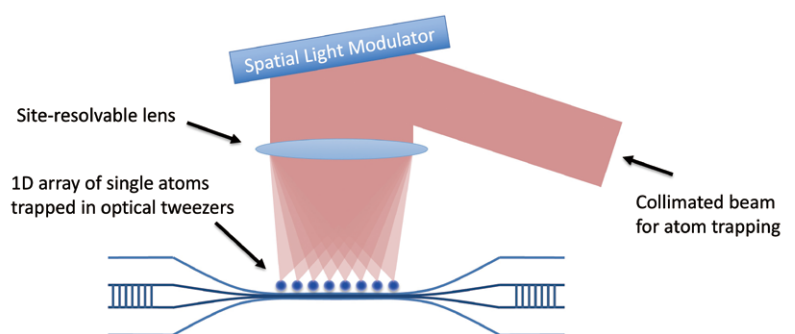
ナノファイバー共振器QED系の概念図

個別アドレス可能な原子列とナノファイバー共振器の結合

上記で実現したナノファイバー共振器QED系では、原子はナノファイバー導波モードのエバネッセント場によってトラップされていた。この手法では、多数の原子を共振器に結合させた場合、個々の原子を個別にアドレスすることができないという課題がある。

そこで我々は、新たなトラップ手法として、光ピンセットアレーを用いた単一原子トラップの一次元アレーをナノファイバー表面上に形成し、光学的に個別アドレス可能な単一原子列をナノファイバーと結合させる技術を開発した。

具体的には、コリメートされた原子トラップビームに空間光変調器（SLM）を用いて空間的な位相変調を施し、高NAかつ長作動距離を持つ対物レンズを通して、単一原子をトラップ可能な光ピンセットの一次元アレーを真空チャンバー内のナノファイバー表面上に形成した。



空間光変調器と単一サイト分解能を有する光学系を用いた、ナノファイバー共振器上への一次元光ピンセットアレーの形成

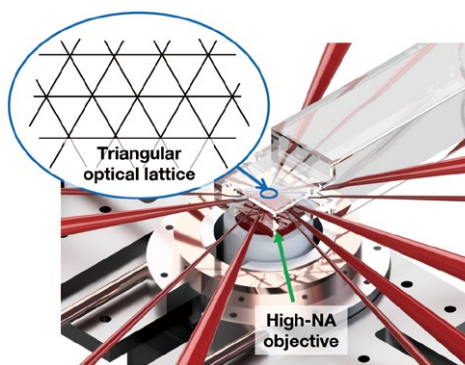
量子多体ダイナミクス研究チーム

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ミ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.) チームディレクター

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).

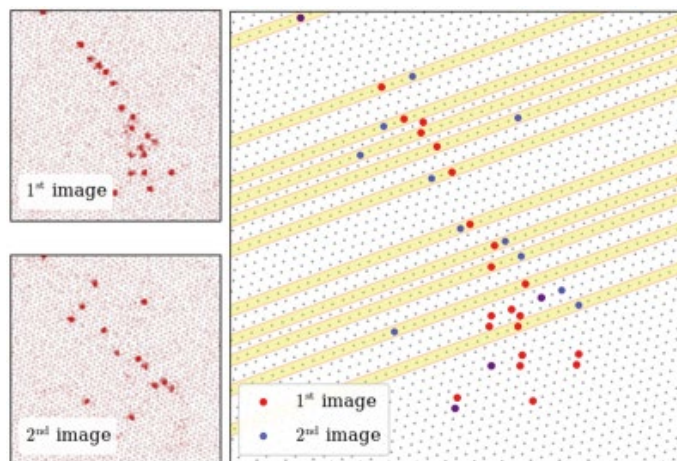
略歴

- 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)
- 2024 早稲田大学理工学術院 教授(任期付)(現職)

研究紹介

■ 単一原子観測後の原子の冷却

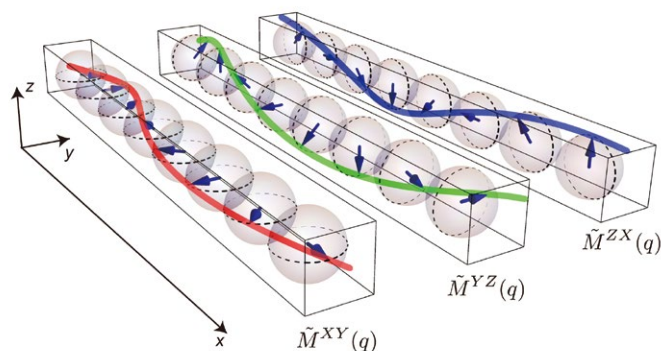
量子気体顕微鏡を用いると、光格子中の原子集団を単一原子・単一格子レベルで測定することができる。しかし、通常その測定の過程において原子が加熱され、振動励起が生じてしまう問題がある。この問題に対して、測定後にラマンサイド冷却を施すことで、原子を振動基底状態に戻すことを目指した。ラマンサイドバンド冷却に使用する複数の光源のパラメータを最適化することにより、測定後の原子の大部分を振動基底状態に冷却することに成功した。さらに、測定後に光格子の深さを浅くすることで、光格子内の原子の量子ウォークを観測し、その結果として大部分の原子が振動基底状態に冷却されていることが確認された。この成果は、量子ダイナミクスのデータ取得の高速化や、測定に基づく量子系の制御に応用できる。



原子の初期分布（左上）と、観測後に冷却し、光格子内で1.75msの量子ウォークを行わせた後の原子分布（左下）。2枚の測定画像を比較することで、各原子の量子ウォークの挙動を観測することができる。

■ 光格子実験でのエンタングルメント測定の提案

量子状態を記述する密度行列は量子状態トモグラフィーにより再構築することができる。通常、量子状態トモグラフィーには、測定基底を準備するための局所的な操作とそれにより得られる多数の測定基底での測定が必要となる。しかしながら、そのどちらも光格子実験では実現が難しく、多大な労力を要する。この課題を解決するために、局所的な操作を必要としないスピンスパイラル構造の測定基底を用いた量子トモグラフィーの手法を提案した。この手法を活用して、部分系の密度行列からエンタングルメントエントロピーを評価することもできることを、簡単なモデルを用いて示した。



測定に用いるスピンスパイラル構造

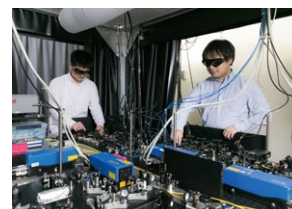
©Giacomo Marmorini, Takeshi Fukuhara, and Daisuke Yamamoto, "Measuring entanglement without local addressing via spiral quantum state tomography", arXiv: 2411.16603

主要メンバー

(研究員) 山本 隆太

(研究員) 小沢 秀樹

(テクニカルスタッフ) 大塚 陽一郎



冷却原子量子システム研究チーム

キーワード: 冷却原子、量子物理、量子光学、量子コンピュータ、光子学

研究室概要

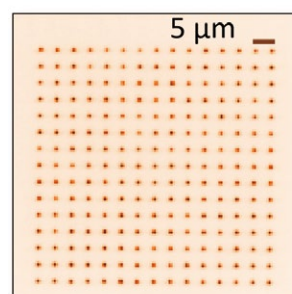
我々は、レーザー光線で操作する個々の原子に基づく量子技術を開発している。例えば、レーザーで原子を絶対零度まで冷却する、光ピンセットで原子を補足し動かす、電子を巨大なリュドベリ軌道に励起する、などである。これによって原子の量子的性質を利用し、基礎研究だけでなく実用的な応用のための量子システムを原子ごとに構築することができる。

このような実用的かつ長期的な成果に向けて、当チームは中性原子に基づく誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指すムーンショット型研究開発事業の目標6「中性原子量子コンピュータ」プログラムの一翼を担っており、とりわけ分子科学研究所（愛知県岡崎市）に設置される最初のマシンの開発に参加している。また、中性原子量子コンピュータとシミュレーターを研究する日本とドイツのコミュニティを結ぶASPIREプログラムにも参加している。

より基礎的な研究の方向性としては、光と物質の協同的な放出現象の研究である。これは、原子が個別にではなく、集団として協力しながら自発的に光子を放出するという現象だ。この興味深い現象を自由空間、すなわち光の閉じ込めが一切ない環境で実現するためには、原子の位置を極めて高精度に制御する必要がある。私たちは、「飛行する原子 (flying atoms)」に基づいた、まったく新しいアプローチを開発している。



ムーンショット目標6プログラムにおいて、初の中性原子型量子コンピュータを開発している共同研究チームが、量子プロセッシング・ユニット (QPU) の前にて。QPUは、精密に配置された無数のレーザービームによって操作される原子の配列で構成され、2025年半ばから稼働開始予定。メンバーは、分子科学研究所（愛知県岡崎市）、Inflection社（米国ボルダー市）、「冷却原子量子システム」チームディレクター。



光ピンセットに閉じ込められた単一リジウム原子の配列。原子は共振レーザービームで蛍光を発し、その光が高感度カメラに集められ、このような画像が得られる。この例では、各光ピンセットの直径は約1マイクロメートル、間隔は5マイクロメートルだが、ホログラフィー技術を使えば、任意の形状や配列にすることができる。このような配列は、我々の中性原子ベースの量子技術の中核を成すものである。



DE LESELEUC Sylvain (Ph.D.) チームディレクター

主要論文

- 1 T. Denecker, Y.T. Chew, O. Guillemant, G. Watanabe, T. Tomita, K. Ohmori, and S. de Léséleuc, "Measurement and feedforward correction of the fast phase noise of lasers", *Phys. Rev. A* 111 (4), 042614 (2025).
- 2 Y.T. Chew, M. Poitrinal, T. Tomita, S. Kitade, J. Mauricio, K. Ohmori, and S. de Léséleuc, "Ultraprecise holographic optical tweezer array", *Phys. Rev. A* 110 (5), 053518 (2024).
- 3 Y.T. Chew, T. Tomita, T.P. Mahesh, S. Sugawa, S. de Léséleuc, K. Ohmori, "Ultrafast energy exchange between two single Rydberg atoms on a nanosecond timescale", *Nat. Photonics* 16 (10), 724 (2022).
- 4 S. de Léséleuc, V. Lienhard, P. Scholl, D. Barredo, S. Weber, N. Lang, H.P. Buchler, T. Lahaye, and A. Browaeys, "Observation of a symmetry protected topological phase of interacting bosons with Rydberg atoms", *Science* 365, 775 (2019).
- 5 D. Barredo, S. de Léséleuc, V. Lienhard, T. Lahaye, and A. Browaeys, "An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary 2d atomic arrays", *Science* 354, 1021 (2016).

略歴

- 2010 エコール・ポリテクニク(フランス、パレゾー) 工学士号取得(-2013年)
- 2013 チューリッヒ工科大学理学修士号取得(修士論文は交換留学生として東京大学在学中に執筆) (-2015年)
- 2015 パリ・サクレ大学光学研究所(フランス、パレゾー) [Quantum simulation of spin models with assembled arrays of Rydberg atoms]に関する博士号取得(-2018年)
- 2018 Institut d'Optique ポスドク研究員(-2019年)
- 2019 自然科学研究機構 分子科学研究所(愛知県岡崎市) 助教(-2023年)
- 2023 自然科学研究機構 分子科学研究所 特任准教授(現職)
- 2024 理化学研究所・量子コンピュータ研究センター・チームディレクター(現職)

研究紹介

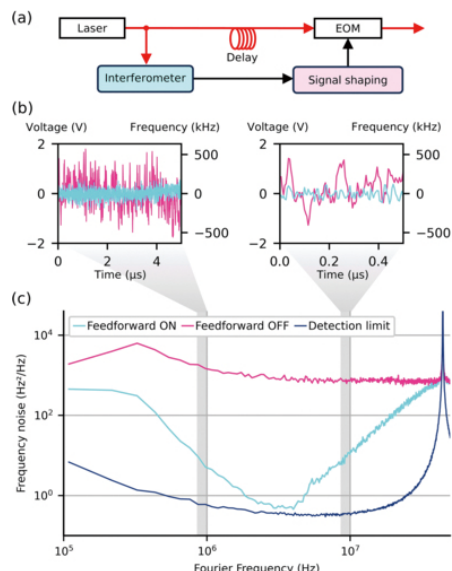
レーザーの高速位相ノイズの測定とフィードフォワード補正

量子コンピューティングの一環として、我々はレーザーの位相ノイズについて研究してきた。マイクロメートルの距離にある2つの原子を絡ませるためには、原子の一番外側の電子を巨大なリュドベリ軌道に励起する必要がある。この操作を量子コンピュータに必要な卓越した精度で実現するためには、マイクロ秒からサブマイクロ秒の時間スケールで位相ノイズが非常に小さいレーザーを使用することが極めて重要である。我々は、このようなレーザーの高速位相ノイズを検出し、さらに補正することができる完全ファイバー化装置を開発した。測定ノイズフロアは $0.1 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ 以下であり、1~10 MHzのフーリエ周波数で20 dB以上のノイズ抑制を実証した（3 MHzでは30 dBに達する）。

Phys. Rev. A 111 (4), 042614 (2025)として発表。

高速位相ノイズの測定と補正。(a) 位相ノイズ除去装置の概略図。(b) フィードフォワード補正を行った場合（青）と行っていない場合（ピンク）の周波数ノイズ測定値の時間トレース。(c) 補正の有無による周波数ノイズのPSD。紺色の曲線はノイズフロア。フーリエ周波数3 MHzで30 dB以上のキャンセルが達成され、ノイズは $0.5 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ まで抑制されている。

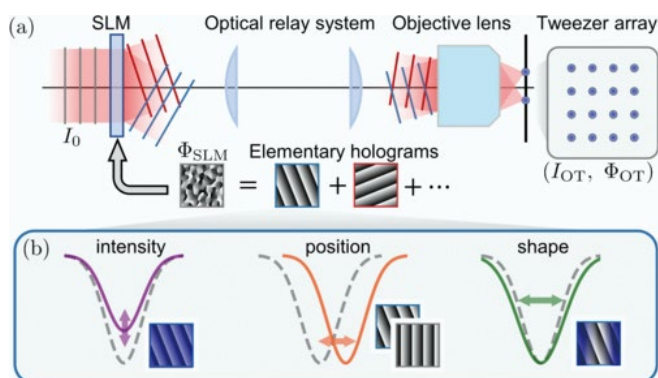
©<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.111.042614>



超精密ホログラフィック光ピンセット

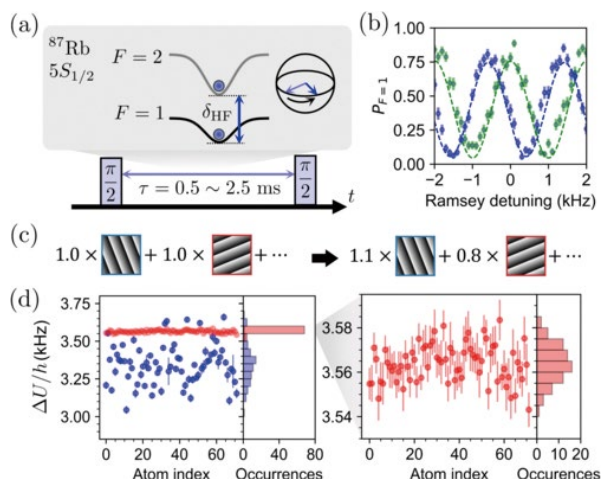
微視的光ピンセットに捕捉された中性原子は、量子科学のプラットフォームとして台頭してきている。ピンセットアレイ上の均一性を達成することは重要な技術的要件であり、我々の研究は、空間光変調器（SLM）を用いて生成されるホログラフィックアレイの改善に焦点を当てている。我々は、正確な測定スキームにより、より優れたホログラムを計算するための一連の最適化手法を提示する。これらの技術革新により、相対標準偏差0.3%の強度の均一性、0.5%以下の形状のばらつき、70nm以内の位置決め誤差を達成することができる。このような超精密ホログラフィック光ピンセットアレイは、原子アレイを用いた量子科学における最も要求の厳しい応用を可能にする。

Phys. Rev. A 110 (5), 053518 (2024)として発表。



SLMを用いた光ピンセットアレイの生成。(a) SLMを用いて入射するレーザービームを空間的に変調し、光ピンセットのアレイを作成。SLMの位相は、特定のアレイの素ホログラムの重ね合わせに還元できる。(b) 不完全性により、ピンセット間の強度、位置、形状の不均一性が生じる。SLMの位相計算における素ホログラムの特定の修正により、これらの不均一性を修正することができる。

©<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.110.053518>



ラムゼイ干渉計による強度の均一化。(a) ある位置におけるピンセットの強度が、捕捉された ^{87}Rb 原子のクロック遷移に差分光シフトを引き起こす。この光シフトはラムゼイ干渉法によって測定される。(b) 2つの異なる原子に対するラムゼイ干渉縞。シフトは、それぞれの光ピンセットの強度の違いによって引き起こされる。(c) 各素ホログラムの振幅調整を示す概略図。(d) 各原子における差分光シフトの均一化前（左）と均一化後（右）の比較と、それに対応するヒストグラム。均一化処理の後、強度の不均一性4%から0.3%へと低減されました。

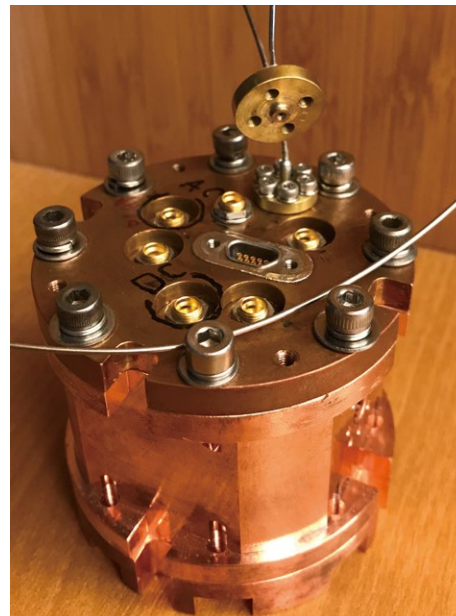
浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム

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み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 I. Grytsenko, S. van Haagen, O. Rybalko, A. Jennings, R. Mohan, Y. Tian, E. Kawakami, "Characterization of Tunnel Diode Oscillator for Qubit Readout Applications", *J. Low Temp. Phys.* (2025). <https://doi.org/10.1007/s10909-025-03293-4>
- 2 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).
- 3 E. Kawakami, J. Chen, M. Benito, D. Konstantinov, "Blueprint for quantum computing using electrons on helium", *Phys. Rev. Appl.* 20, 054022 (2023).
- 4 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).
- 5 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).

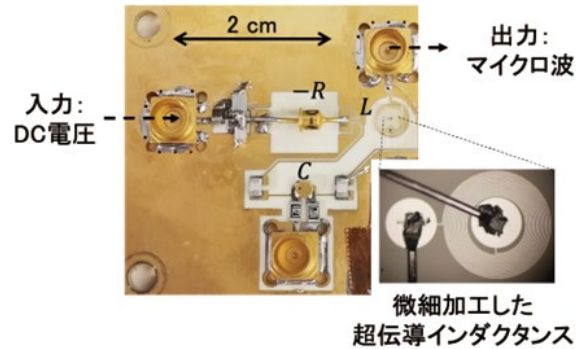
略歴

- 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)

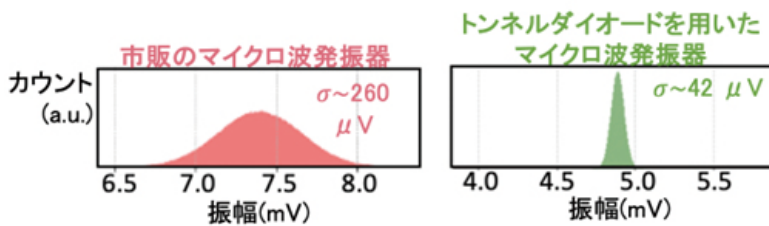
研究紹介

量子コンピュータ大規模化のための低温マイクロ波発振器の開発

大規模量子コンピュータの実現には、極低温の量子ビットと室温の機器を同軸ケーブルで接続する必要があるが、ケーブル数には物理的な限界がある。そのため、低温で動作する測定機器の導入が求められている。量子ビットはマイクロ波で制御されるため、本研究ではトンネルダイオードを用いた極低温動作の小型マイクロ波発振器を開発した。LC共振器に負性抵抗を持つトンネルダイオードを接続し、DC電圧でマイクロ波を生成する。2×2cmと小型で、極低温でも安定に動作し、振幅のばらつきが市販品より小さい。振幅の安定性は量子ビットの読み出し精度を左右するため、本発振器は高精度な読み出しに貢献する。



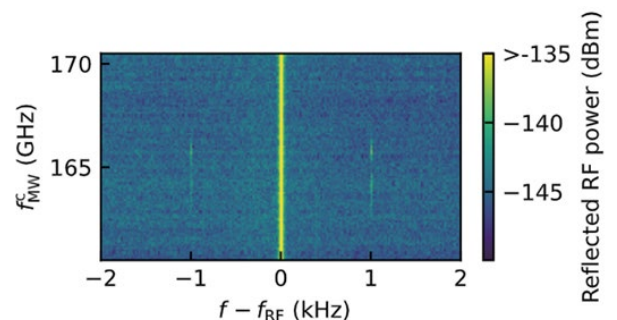
作成したマイクロ波発振器。これを極低温 (10 mK) 下で動作することを確認した。図中の $-R$ はトンネルダイオードを示す。Cは10MHz程の周波数可変のために可変容量ダイオードを、Lは抵抗損失を低減するために微細加工された超伝導インダクタンスを用いている。



市販のマイクロ波発振器と今回開発した低温マイクロ波発振器の振幅安定性の比較。

ヘリウム上の電子のリュードベリ状態のRF反射測定

液体ヘリウム上の電子は、不純物や格子欠陥の影響を受けない、極めてクリーンな量子コンピューティングプラットフォームである。中でもスピン状態は、他の系と比べて非常に長いコヒーレンス時間を持つと理論的に予測されており、量子ビットとしての利用が注目されている。一方で、スピン状態の読み出しは依然として困難である。そこで本研究では、スピン状態をリュードベリ状態にマッピングし、LC回路を用いてその遷移を高感度に検出する手法を提案・実証した。周波数変調を加えたマイクロ波によりリュードベリ準位の遷移を誘起し、量子キャパシタンスの変化として読み出すことで、単一電子のリュードベリ遷移を識別できる感度を実現した。この成果は、スケラブルなスピン読み出しへの道を開くものである。



マイクロ波 (MW) キャリア周波数 f_{MW} に対する反射 RF 電力をスペクトラムアナライザーで測定した結果を示す。周波数変調 (FM) のパラメータは $f_{mf} = 1$ kHz、 $f_{ma} = 768$ MHz である。リュードベリ遷移に対応する信号として、 $f_{MW} = 165$ GHz、付近で $f = f_{RF} \pm f_{mf}$ にサイドバンド信号が現れる。

主要メンバー

(技師) GRYTSENKO Ivan
(特別研究員) JENNINGS Asher

(特別研究員) WANG Jun
(研究パートタイマー I) RYBALKO Oleksi

半導体量子情報デバイス研究チーム

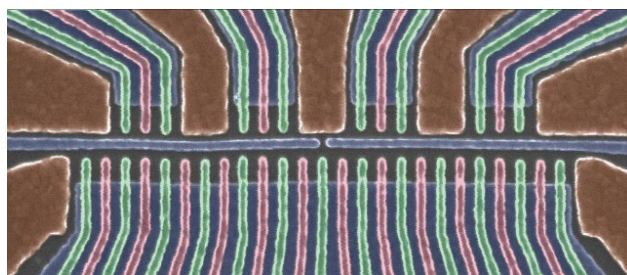
キーワード：量子コンピュータ、半導体、量子ビット、量子ドット、電子スピン

研究室概要

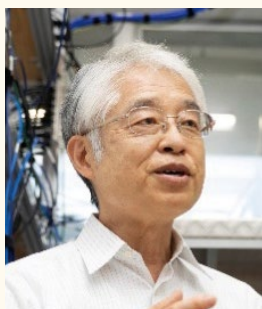
我々は半導体量子ドット中の電子（あるいは正孔）のスピンを量子情報の単位（量子ビット）として量子コンピュータへ応用するための技術開発を行っている。半導体量子コンピュータは、コヒーレンス時間が長いこと、半導体集積化技術と互換性があること、1ケルビンを超える温度で動作が可能であることから、その将来性が期待されている。我々は、これまでに、シリコン量子ドット中の電子スピンを量子ビットとする主要な量子操作（単一量子ビット、2量子ビットゲート、初期化、読み出し）において、誤り耐性の閾値を超える操作忠実度を達成した。これらの知見と技術を基盤として中～大規模量子コンピュータを構築することを目指して、量子論理演算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



研究室の様子



試作中の12量子ビットデバイスの写真



樽茶 清悟 (D.Eng.) チームディレクター

主要論文

- 1 K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, L. C. Camenzind, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, and S. Tarucha, "Rapid single-shot parity spin readout in a silicon double quantum dot with fidelity exceeding 99 %", *npj Quantum Info.* 10, 22 (2024).
- 2 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).
- 3 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).
- 4 K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, T. Kobayashi, and S. Tarucha, "Quantum error correction with silicon spin qubits", *Nature*, 608, 682-686 (2022).
- 5 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).

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系研究科物理学専攻 客員教授 (現職)
 2020 理化学研究所 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研究チーム チーム チームディレクター (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。

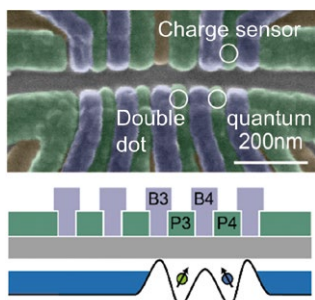


図1: 2量子ビットデバイス

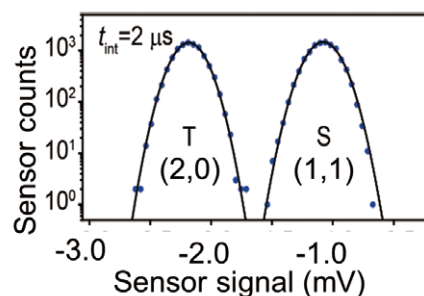


図2: スピン読み出し

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。

複数個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。

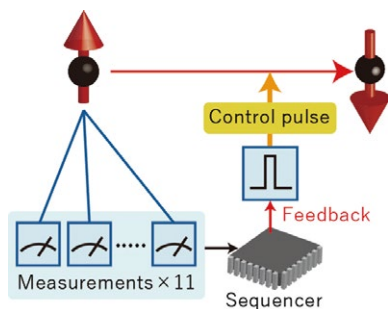


図1: 複数回の測定によるフィードバック量子操作の概略図。

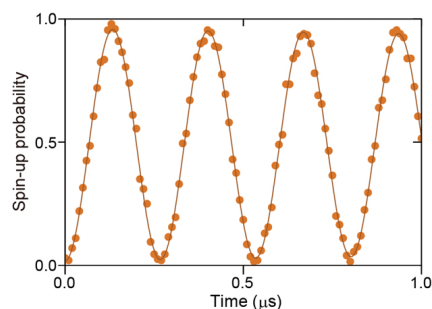


図2: 状態準備された量子ビットに対する量子操作の一例。振幅の大きさから準備忠実度の高さを評価できる。

主要メンバー

(研究員) 小林 嵩

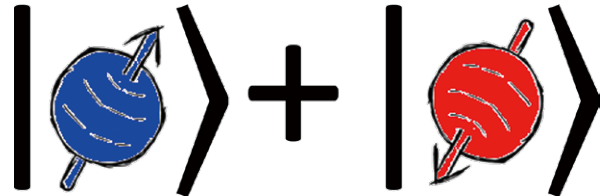
(テクニカルスタッフI) 黒田 玲子

半導体量子情報デバイス理論研究チーム

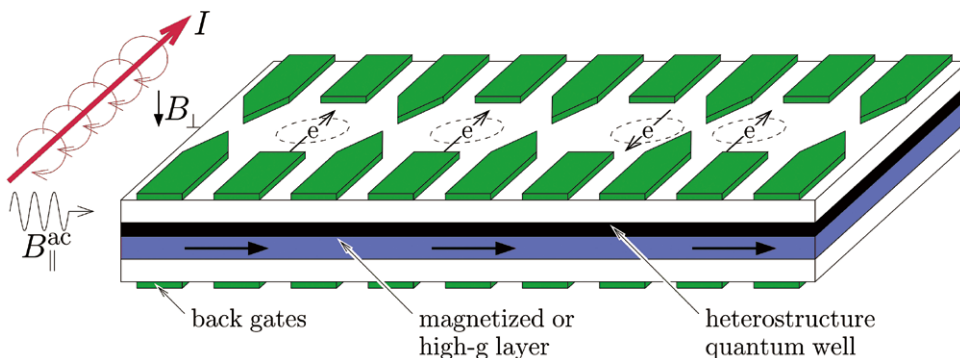
キーワード: 量子ドット、スピンを用いた量子情報処理、量子ビット、スピン-軌道相互作用、量子情報処理

研究室概要

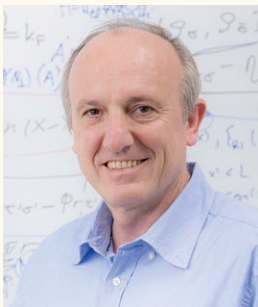
当チームではスピンを用いた量子コンピュータの理論に取り組み、SiとGeを用いたゲート制御量子ドットを用いてCMOS技術との整合性が高い量子コンピュータをデザインすることを目指している。我々は、スピン軌道相互作用を用いて電場によって制御できるスピン量子ビットに着目しており、適切なバンド構造モデルを用いて、低次元に閉じ込めた正孔と電子の性質を調べ、量子ビットをノイズから守るための最適なセットアップやその方法について研究している。また、量子ビット間結合の解析も行っており、これにより多数の量子ビットを用いたネットワークを実現できる可能性がある。我々の究極の目的は、高速で微小かつ拡張可能な未来の量子コン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

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 サイモンフレイザー大学 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

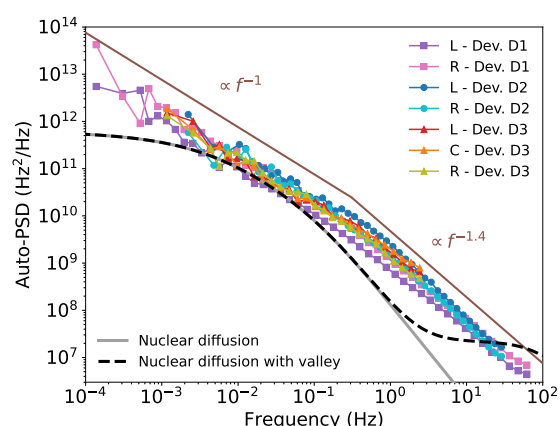
天然シリコン中のスピン量子ビットに影響を与えるノイズの起源

スピン量子ビットの性能向上を妨げる主な要因としてノイズが挙げられ、その起源を特定することは重要である。我々は、理論と実験を有機的に組み合わせることで、天然シリコン量子ドットに閉じ込めたスピン量子ビットのゼーマン分裂の揺らぎを引き起こす物理的メカニズムを調査した。我々は、ラムゼー干渉法およびCPMG動的デカップリングを含む複数の手法を用いて、量子ビットのノイズのパワースペクトル密度を測定した。さらに、単一ショット測定 of 相関に基づく新しい分光法プロトコルを、世界で初めて適用・実装した。これらの手法を効果的に取り合わせることで、周波数の9桁にわたって連続的にノイズスペクトル密度を再構築することが可能となった。

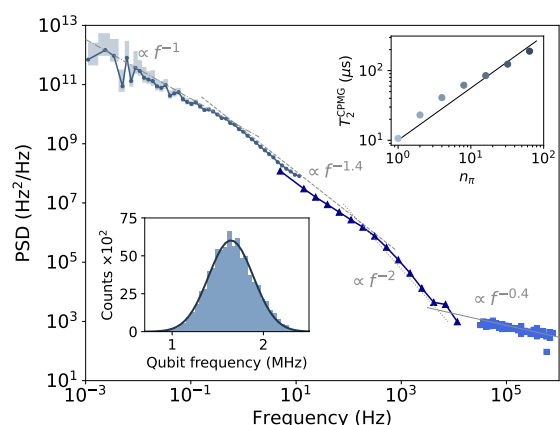
低周波数領域では、3種類のデバイスにおける7つの量子ビットすべてにおいて、普遍的なノイズスペクトルが観測された。このノイズは、材料中に残留する ^{29}Si 原子核との超微細相互作用に起因すると考えられる。実際、外部磁場を強めることで量子ビットのコヒーレンスが向上することが確認された。外部磁場の増加は、マイクロマグネットによる磁場勾配を強化し、それによって原子核スピン間のエネルギー保存的なフリップフロップ過程を抑制し、スピン拡散を抑えたと考えられる。一方で、電荷ノイズはデバイスごとに異なる特徴を示し、原子核スピン起因の揺らぎとは異なり、普遍性を持たなかった。これら2種類の異なるノイズのメカニズムが存在することは、量子ビット間の相互相関測定によりさらに裏付けられた。高周波数領域では、電荷ノイズが支配的となり、そのスペクトルは量子ビットごとに大きく異なることが明らかになった。

本研究は、天然シリコン中のスピン量子ビットにおけるノイズの詳細な特性評価を提供し、量子ビットのエネルギー揺らぎを引き起こす磁気および電氣的ノイズ源の役割を明確にするものである。

9桁の周波数にわたって測定された量子ビットノイズのオートパワースペクトル密度 (PSD)。このスペクトルは、3つの補完的手法を組み合わせることで再構築されている：量子ビットエネルギーの相関に対するベイズ推定（点線で接続された点）、新規な単一ショット時系列相関法（三角で接続）、およびCPMG動的デカップリング分光法（四角）。ベイズ法による90%信頼区間は、網掛け領域で示されている。右上の挿入図：CPMGパルス数に対するコヒーレンス時間の変化を示しており、パルス数の増加とともにコヒーレンスの向上が確認できる。左下の挿入図：量子ビットエネルギーの揺らぎのヒストグラムとガウスフィッティング（実線）を示しており、抽出されたエネルギー値の分布を表現している。



3種類のデバイスにおける7つの量子ビットの、量子ビットエネルギーのノイズ自己相関スペクトル。茶色の線は f^{-1} および $f^{-1.4}$ に比例する基準スロープ、灰色の実線は原子核スピン拡散に基づく理論予測、黒の破線は拡張拡散モデルで記述される電子波動関数内のバレー振動の効果を含んだ結果をそれぞれ示している。



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

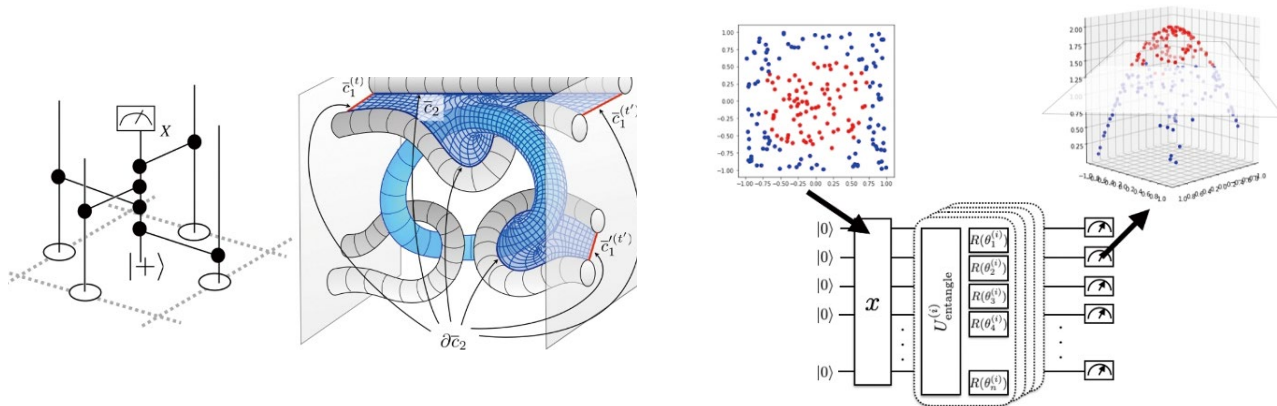
キーワード: 量子コンピューティング、量子情報科学、量子機械学習、量子誤り訂正

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。

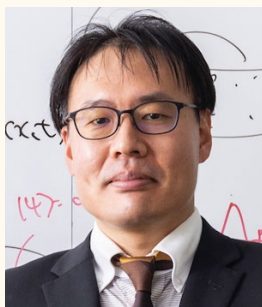
特に、当チームは、現在および近い将来に実現可能な規模で量子コンピュータの性能を活用するための技術に取り組んでいる。基礎物理学、量子化学、量子機械学習における応用を探索する一方で、量子コンピュータアーキテクチャの最適化にも取り組んでいる。また、複雑な計算を高い信頼性で実行できる、量子エラー訂正機能を備えた大規模な耐障害性量子コンピュータの設計も目指している。

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.) チームディレクター

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).

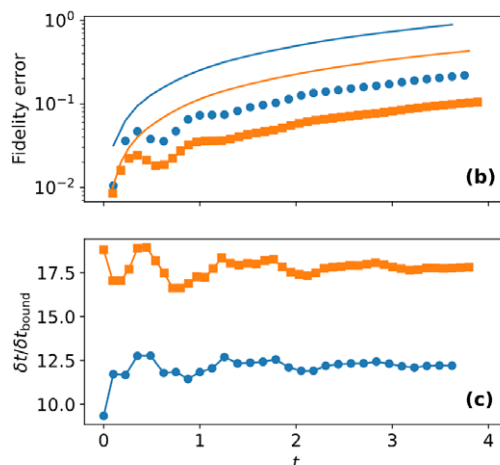
略歴

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
 2024 理化学研究所量子コンピュータ研究センター チームディレクター(現職)

研究紹介

トロッターエラーの計測による精度保証付きのハミルトニアンシミュレーション

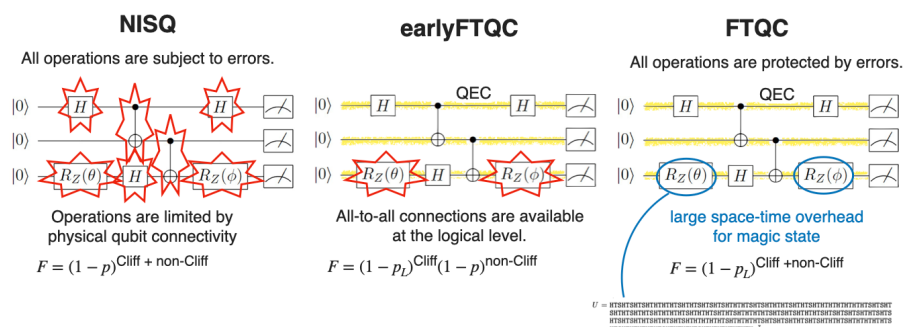
本研究は、デジタル量子シミュレーションで広く用いられるトロッター分解の誤差を量子回路上で直接測定し、所望の精度を保ったまま回路深さを抑える「Trotter24」アルゴリズムを提案する。二次と四次のトロッター化を組み合わせることで誤差を抽出するため補助量子ビットを要さず、各ステップで許容誤差を超えない最大タイムステップを自動決定する。従来は理論上限に基づく保守的な分割幅ゆえに深い回路が課題だったが、本手法は高次公式を「誤差計」として用い適応的にトロッター分解幅を決めるアルゴリズムを提案した。時間依存・非依存ハミルトニアン双方に適用でき、スピン鎖での検証では理論的なエラー上界を用いた場合より約10倍大きなステップサイズにおいても精度が保証されていることを示し、ゲート数を大幅に削減することに成功した。NISQから初期FTQC期における精度保証付きハミルトニアンシミュレーションの実用化と標準化に資する成果である。



(上段) 提案手法によるエラー (青: 要求精度、低、オレンジ: 要求精度、高) と理論上界を与える曲線の比較。(下段) 提案手法によって与えられるトロッター幅と理論上界から決めたトロッター幅の比

部分的な誤り耐性量子計算アーキテクチャによる実用的な量子優位性

NISQと完全FTQCの間を埋める初期のFTQCデバイスで実用量子優位を実現する枠組みを提案する。論理レベルで部分的フォールトレラント操作を採り、Tゲート蒸留を不要にする省空間な非Clifford小角回転用補助状態生成プロトコルを開発。角度 θ に対してそれに比例する論理エラーを達成した。応用例としてトロッターシミュレーションと量子位相推定(QPE)を示し、 8×8 ハバード模型のQPEを物理誤り率 10^{-4} で 4.9×10^4 量子ビット、実行9日(全並列した場合は12分)で実行可能と評価した。これは最新テンソルネットワーク計算を凌ぎ、6万量子ビット級での材料計算に道筋を示す。蒸留の大コストを回避し空間-時間オーバーヘッドを大幅削減する本手法は、早期FTQC世代での実用的量子アルゴリズム実装への指針となる。



初期のFTQCにおける部分的な誤り耐性量子計算のアプローチと、NISQ、FTQCの比較。大きなオーバーヘッドを必要とする非Clifford演算に必要な魔法状態蒸留を回避することで、少ない量子ビット数で量子優位性を得ることができる。

主要メンバー

(基礎科学特別研究員) 米田 靖史
(研究員) 池田 達彦
(特別研究員) 松浦 孝弥



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

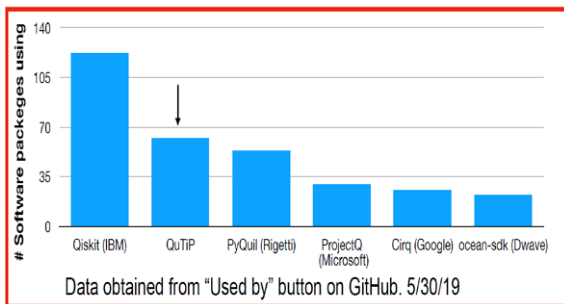
当研究チームは、量子コンピューティング、量子情報処理、量子コンピューティングのための超伝導量子回路、フォトニクス、量子光学、原子物理学、ナノメカニクス、ナノサイエンス、メゾスコピック物理学、計算物理学、そして凝縮系物理学の境界領域において学際的な研究を行っている。

我々は、量子情報処理、量子光学、量子オープンシステムのために世界中で使用されている QuTiP ソフトウェアを開発した。QuTiP は、これまでに200万回以上ダウンロードされている。また、計算が困難な問題の解決に向けて、AI（人工知能）や機械学習の技術も活用している。Web of Science では、我々の研究成果が2017年から2024年までの8年間連続で「高被引用論文」として選出されている。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。

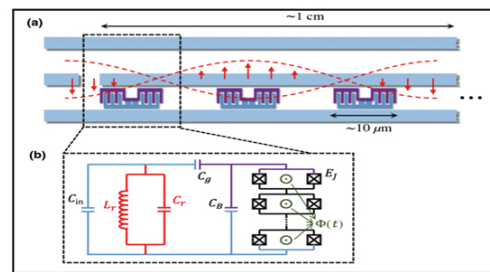
More than 1.5 Million downloads!

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.) チームディレクター

主要論文

- 1 Y. Zeng, W. Qin, Y.H. Chen, C. Gneiting, F. Nori, "Neural-Network-Based Design of Approximate Gottesman-Kitaev-Preskill Code", *Phys. Rev. Lett.* 134, 060601 (2025).
- 2 W. Qin, A. Miranowicz, F. Nori, "Exponentially Improved Dispersive Qubit Readout with Squeezed Light", *Phys. Rev. Lett.* 133, 233605 (2024).
- 3 Y. Zeng, Z.Y. Zhou, E. Rinaldi, C. Gneiting, F. Nori, "Approximate Autonomous Quantum Error Correction with Reinforcement Learning", *Phys. Rev. Lett.* 131, 050601 (2023).
- 4 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).
- 5 W. Qin, A. Miranowicz, H. Jing, F. Nori, "Generating Long-Lived Macroscopically Distinct Superposition States in Atomic Ensembles", *Phys. Rev. Lett.* 127, 093602 (2021).

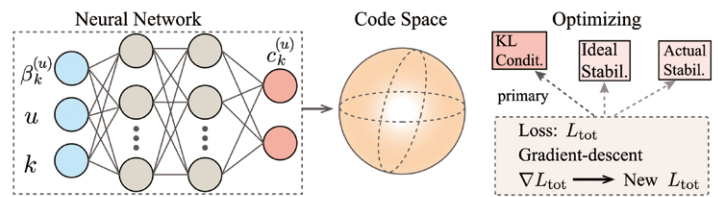
略歴

- 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 and afterwards Team Director for the Quantum Information Physics Theory Research Team, Quantum Computing Center, RIKEN, Japan. (-present)

研究紹介

量子誤り訂正符号のニューラルネットワーク設計

GKP符号化は、連続変数フォールトトレラント量子コンピューティングへの応用が期待されています。理想的なGKP符号化は非物理的な性質のため抽象的で非実用的ですが、近似バージョンは現実的な代替手段となります。従来の近似GKP符号語は、複数の大振幅スクイーズドコヒーレント状態の重ね合わせです。この特徴は、単一光子損失や短時間の位相ずれに対する訂正可能性を保証しますが、符号語の準備の難易度も高めます。このトレードオフを最小限に抑えるため、ニューラルネットワークを用いて最適な近似GKP状態を生成し、わずか数個のスクイーズドコヒーレント状態だけで効果的な誤り訂正を可能にします。このように最適化されたGKP符号は、従来の最良のGKP符号よりも性能が高く、より少ないスクイーズドコヒーレント状態を必要としながら、単純で一般化された安定化演算子を維持することがわかりました。具体的には、スクイーズレベル9.55dBにおいて、前者は後者のわずか3分の1のスクイーズドコヒーレント状態数で性能を上回ります。この最適化により、符号語の複雑さが大幅に低減されると同時に、誤り訂正能力が向上します。



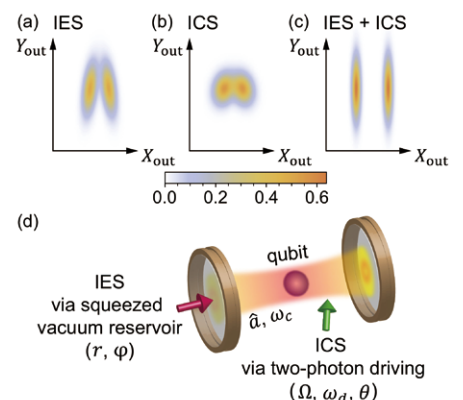
コード最適化プロセスの図。ニューラルネットワークの入力は青で、出力は薄赤で示されています。損失関数 L_{tot} の勾配ベースの最適化によって、ニューラルネットワークの出力の係数が決定される。

©Y. Zeng, W. Qin, Y.H. Chen, C. Gneiting, F. Nori, *Neural-Network-Based Design of Approximate Gottesman-Kitaev-Preskill Code*, Phys. Rev. Lett. 134, 060601 (2025).

スクイーズド光による指数関数的に改善された分散量子ビット読み出し

スクイーズド光を用いた分散量子ビット読み出しの改善は長年の目標であった。しかし、注入外部スクイーズ (IES) では、信号対雑音比 (SNR) の実用上興味深い向上は得られず、同時に、共振器内スクイーズ (ICS) の使用によるSNRの向上はごくわずかである。本研究では、IESとICSを併用することで、測定時間を問わずSNRが指数関数的に向上し、測定誤差が典型的には数桁減少することを直感に反して実証する。さらに注目すべきは、短時間測定において、スクイーズパラメータを2倍にすることでSNRが指数関数的に向上することを発見した。結果として、高速で高忠実度の読み出しが可能になると予測される。本研究は、分散量子ビット読み出しのためのスクイーズド光の探究に向けた有望な道筋を示し、量子誤り訂正やフォールトトレラント量子計算への即時的な応用が期待される。

(a)~(c) 注入内部スクイージング (IES)、共振器内スクイージング (ICS)、およびこれら2つを同時に適用した分散量子ビット読み出し (DQR) の位相空間表現。IESとICSを個別に使用しても、SNRの実用上の関心を大幅に向上させることはできませんが、同時に使用することで実現できます。(d) IESとICSの両方を適用したDQRの概略図。量子ビットは、周波数 ω_c の共振器モード'a'に分散結合されています。スクイージングされた真空リザーバー (スクイージングパラメータ r 、基準位相 ϕ) が共振器にIESを提供し、2光子駆動 (振幅 Ω 、周波数 ω_d 、位相 θ) を使用してICSを生成します。



©W. Qin, A. Miranowicz, F. Nori, *Exponentially Improved Dispersive Qubit Readout with Squeezed Light*, Phys. Rev. Lett. 133, 233605 (2024).

主要メンバー

(研究員) **GNEITING Clemens**
(JSPS外国人特別研究員) **MENCZEL Paul**
(JSPS外国人特別研究員) **KARMSTRAND Therese**
(基礎科学特別研究員) **HUANG Ran**

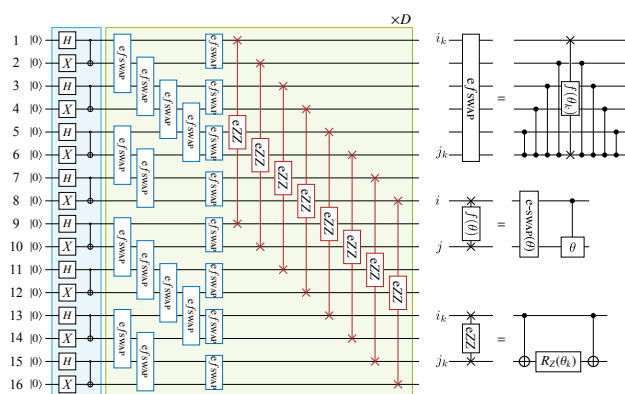


量子計算科学研究チーム

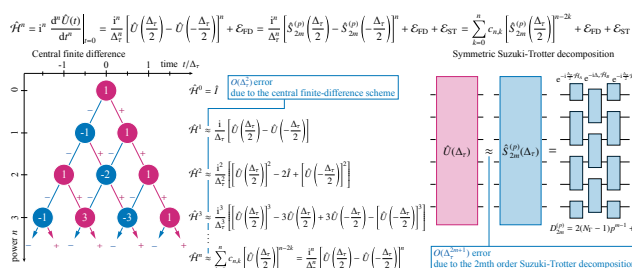
キーワード: 量子多体系、量子ダイナミクス、量子情報物理、テンソルネットワーク、高性能計算

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



量子冪乗法の概念図



柚木 清司 (Ph.D.) チームディレクター

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).

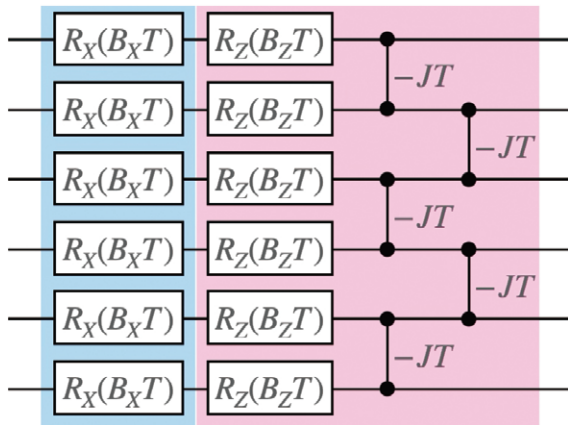
略歴

- 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テネシー大学(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)

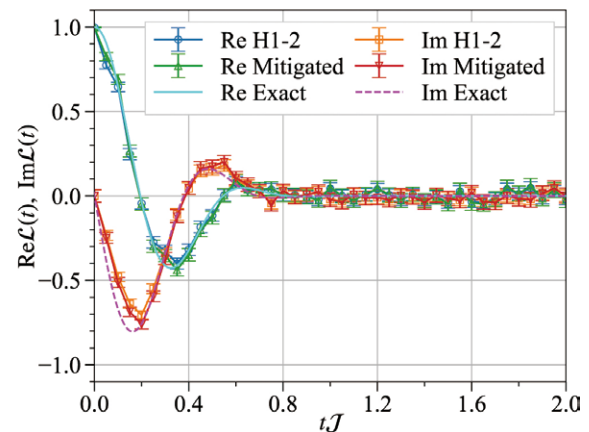
研究紹介

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。さらに、これらのスクランブリング回路を応用し、熱純粋状態 (thermal pure quantum states) の概念を取り入れて局所演算子のミクロカノニカル期待値を計算することも実証した。



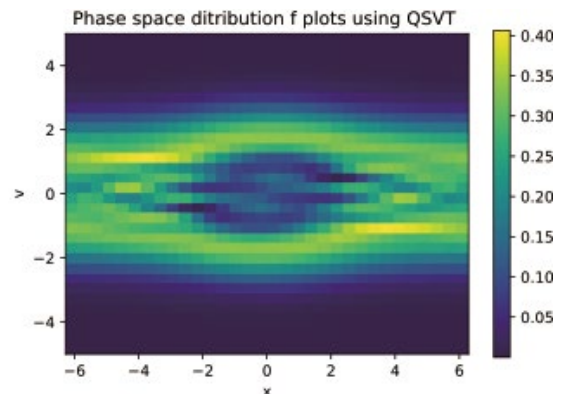
1次元kicked Ising 模型に基づくFloquet 量子回路の模式図。
1周期はX回転ゲート、Z回転ゲート、ZZ回転ゲートからなる。



スクランブリング状態に関して測定した1次元16サイトHeisenberg 模型のLoschmidt 振幅の実部 (寒色系) と虚部 (暖色系) の時間依存性。四角は実機で得られた結果、三角は実機で得られた結果に global depolarizing noise 模型を仮定したエラー緩和を適用した結果、線はノイズが無いと仮定したシミュレーションの結果を示す。

量子特異値変換に基づく非線形微分方程式の効率的ハミルトニアンシミュレーション

Vlasov-Maxwell 方程式は、衝突のないプラズマの運動論的シミュレーションを提供するが、古典的なコンピュータ上で数值的に解くことは実用的でない場合がある。これは、6次元位相空間における時間発展のために空間的・時間的に広いスケールを扱う必要があり、計算資源の制約が厳しいためである。本研究では、量子と古典のハイブリッド型 Vlasov-Maxwell ソルバーを開発した。具体的には、Vlasov 方程式の解法には量子特異値変換 (Quantum Singular Value Transformation, QSVT) に基づくハミルトニアンシミュレーションを用い、Maxwell 方程式の解法には古典的な手法を組み合わせている。Qiskit-Aer-GPU の量子回路エミュレーターとA100 GPUを用いて、1次元移流テストおよび1次元1速度 (1D1V) の二流不安定性テストの数値シミュレーションを行った。また従来の古典的な非線形微分方程式の解法と比べて、量子アルゴリズムに基づく解法は、部分的に計算量の指数関数的な加速があることを確認した。



二流不安定性の条件下における1D1V Vlasov-Maxwell 方程式に対する、QSVTに基づくハミルトニアンシミュレーション手法の量子計算による数値結果。時刻 $T=53$ における位相空間での分布関数を示しており、縦軸が速度空間 (v)、横軸が物理空間 (x) を表す。

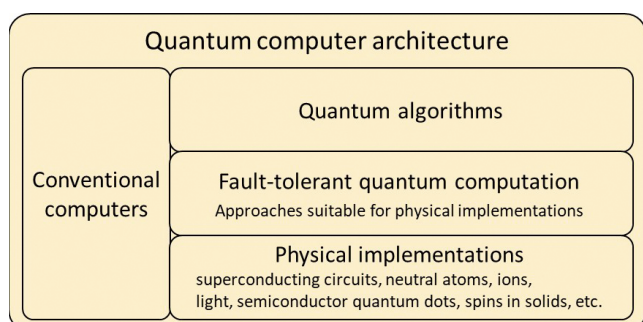
量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム

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

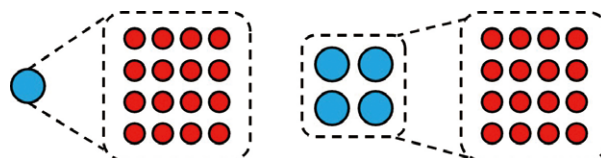
研究室概要

当チームでは、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小規模なため、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）と高レート符号（右）



後藤 隼人 (Ph.D.) チームディレクター

主要論文

- 1 H. Goto, "High-performance fault-tolerant quantum computing with many-hypercube codes", *Sci. Adv.* 10, eadp6388 (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
- 2025 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 チームディレクター (現職)

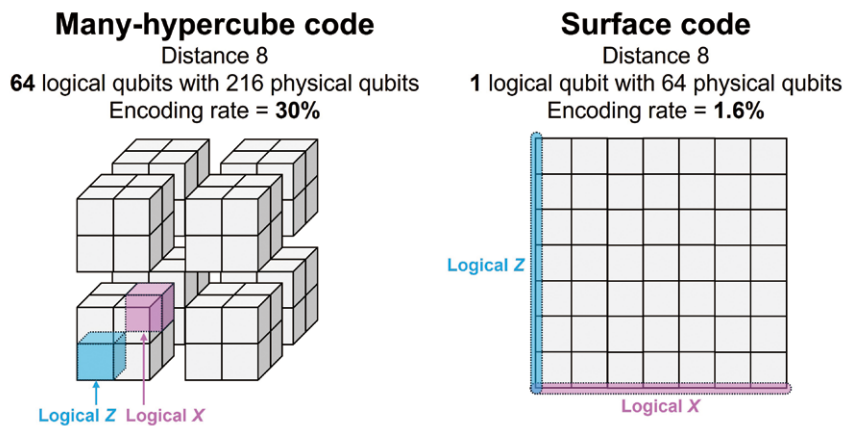
研究紹介

■ 独自の高レート符号“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個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レート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比較的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の量子誤り検出符号）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。我々はこの高レート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, “High-performance fault-tolerant quantum computing with many-hypercube codes”, Sci. Adv. 10, eadp6388 (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

（特別研究員） 鹿俣 尚志

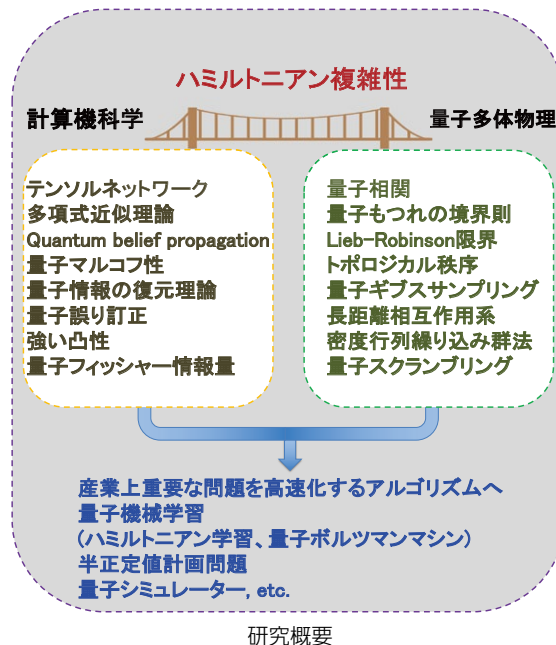
量子複雑性解析理研白眉研究チーム

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索しており、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。



研究概要



桑原 知剛 (Ph.D.) 理研白眉研究チームリーダー

主要論文

- 1 R. Achutha, D. Kim, Y. Kimura, T. Kuwahara, "Efficient Simulation of 1D Long-Range Interacting Systems at Any Temperature," *Physical Review Letters* 134 (19), 190404 (2025).
- 2 Z.-G. Lu, G. Tian, X.-Y. Lü, C. Shang, "Topological quantum batteries," *Physical Review Letters* 134 (18), 180401 (2025).
- 3 D. Kim, T. Kuwahara, K. Saito, "Thermal Area Law in Long-Range Interacting Systems," *Physical Review Letters* 134 (2), 020402 (2025).
- 4 Y. Kimura, T. Kuwahara, "Clustering theorem in 1D long-range interacting systems at arbitrary temperatures," *Communications in Mathematical Physics* 406 (3), 1-43 (2025).
- 5 T. V. Vu, T. Kuwahara, K. Saito, "Optimal light cone for macroscopic particle transport in long-range systems: A quantum speed limit approach," *Quantum* 8 1483 (2024).

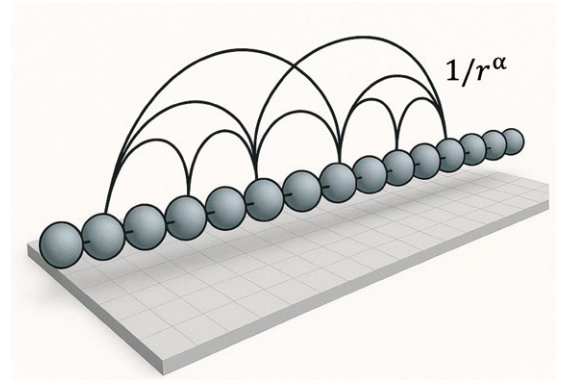
略歴

- 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

ボーズ粒子系の量子もつれ境界則予想の解決

量子もつれの境界則は、全体系を二つに分割したときに、部分系間の量子もつれ量がその境界部分に比例するという性質である。境界則予想は、任意の非臨界の基底状態において、境界則が普遍的に成立することを予想する。この予想は、密度行列繰り込み群法をはじめとしたテンソルネットワーク形式を用いるアルゴリズムの基本的な仮定となっており、予想の破れはこれらのアルゴリズムの破綻を意味する。また、境界則は量子相を適切に分類する上でも基本的な仮定となっており、境界則の厳密な証明は量子情報科学から量子多体理論に至るまで最も重要な未解決問題の一つとなっている。これまで、1次元の証明がよく知られていたが、「相互作用の大きさが有限かつ短距離である」という条件が課せられていた。過去の研究で、長距離系に拡張した場合の境界則は知られていたが、相互作用の大きさが発散しうる場合、つまり相互作用するボゾン系についてはほとんど分かっていなかった。本研究では、ボゾン系と長距離相互作用という二つの制約を取り去った最も一般的な境界則の証明に成功した。この結果によって、1次元における境界則予想は完全な形で証明されたとと言える。

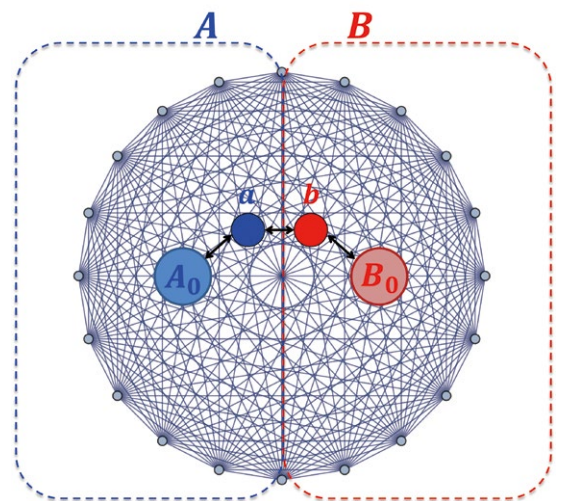


相互作用するボゾン系では、エネルギーが上から有界でないことが知られており、本研究では $1/r^\alpha$ で減衰する長距離相互作用を含む系を考察している。本成果は、短距離相互作用やエネルギーの有界性といった従来の基本的仮定を取り払った上で、一次元におけるエンタングルメント境界則の最も一般的な証明を与えるものである。

全結合グラフ上における一般化境界則の証明

多次元における境界則予想に関しては、これまで無条件で証明した例はなく何かしらの強い条件を追加で課した上での証明のみが存在していた。本研究では、全結合グラフ上での境界則を無条件で証明することに成功した。この場合、境界のサイズは部分系間のシュミットランクの大きさで定量化される。注目すべきポイントは、一般的に全結合グラフのような無限次元グラフでは境界則の反例が知られており、グラフ上で境界則は成り立たないと考えられていた点である。本研究成果は多次元(今回の場合は無限次元極限)において境界則の新たな進展を得ただけでなく、無限次元グラフにおいても従来の予想に反して境界則が成り立つことを新たに実証した。本研究成果を用いて、無限次元グラフ上の基底状態を効率的にシミュレートできることを同時に証明している。この成果は2025年度のQuantum Information Processing (QIP'25)で発表された。

完全グラフ上における一般化された境界則の模式図。系はサブシステムAとBに分割されており、AとBの間の相互作用が小さなシュミットランクを持つ場合、境界をまたぐエンタングルメントは、図中の a および b で示される限られた自由度によって支配される。これは、一般化面積法則を反映しており、AとBの間のエンタングルメントエントロピーが、(対数補正を除いて) 定数で抑えられることを意味する。本研究では、このエンタングルメントの上限が対数的なオーバーヘッドのみで保証されることを証明した。



主要メンバー

(研究員) 木村 裕介
(特別研究員) KIM Donghoon
(特別研究員) 尚 程

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

数理量子情報理研白眉研究チーム

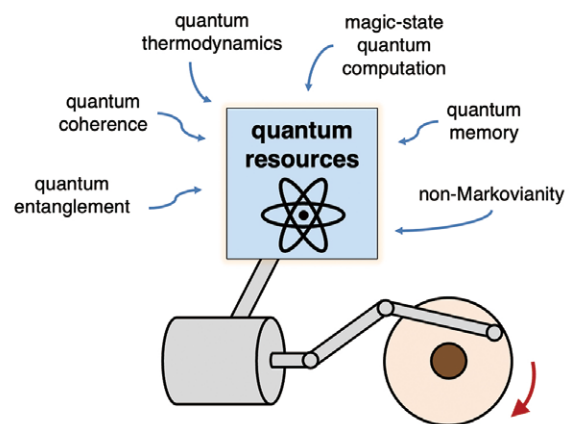
キーワード: Quantum information, Quantum resource theories, Quantum Shannon theory, Mathematical physics

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.



Many different resources underlie the power of quantum information. We aim to develop tools to understand them better through general, mathematical approaches.



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)

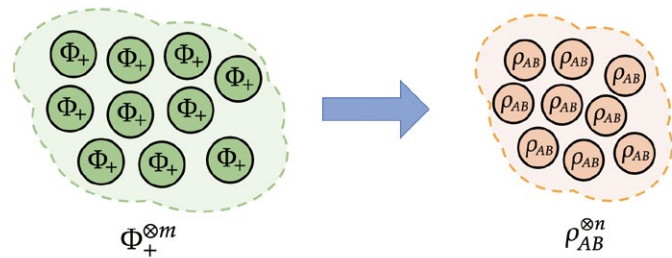
研究紹介

Efficiently computing the cost of entanglement

How “expensive” is a quantum state to prepare? Since quantum entanglement is one of the most precious resources in quantum information, it is natural to ask about the entanglement cost, that is, how costly a given quantum state is in terms of the required entanglement. To realize the best possible protocols for this problem, one needs to manipulate many copies of quantum states, and the lowest entanglement cost is then computed by evaluating the asymptotic limit where the number of copies can be arbitrarily high. However, such asymptotic problems are typically extremely hard to compute exactly.

Here we show that, surprisingly, the exact entanglement cost can be computed efficiently through an accessible optimization method known as semidefinite programming. We define a hierarchy of semidefinite programs and show that it captures exactly the properties of entanglement cost, allowing for the first time for its computation for any quantum state.

L. Lami, F. A. Mele, and B. Regula, “Computable entanglement cost under positive partial transpose operations”, Physical Review Letters 134, 090202 (2025)



$$E_N = E_{\chi,0} \leq E_{\chi,1} \leq E_{\chi,2} \leq \dots \leq E_{c,\text{PPT}}^{\text{exact}} \leq \dots \leq E_{\kappa,3} \leq E_{\kappa,2} \leq E_{\kappa}$$

We establish methods for the efficient computation of the entanglement cost, that is, the amount of entanglement (here visualised as the green maximally entangled states ϕ_+) that is needed to produce a desired many copies of a desired quantum state ρ_{AB} . Our method uses a hierarchy of semidefinite programs, each of which can be computed efficiently, to give an arbitrarily close approximation of the entanglement cost.

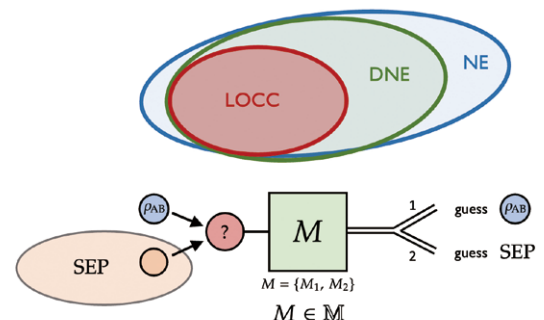
A formula for distillable entanglement

Quantum entanglement is a key resource behind the advantages of quantum technologies. Many applications require pure “entanglement bits” (maximally entangled pure states) but real-world quantum states are often noisy. This makes extracting useful entanglement from noisy states — entanglement distillation — essential. Despite attention since the early days of quantum information, the protocol remains poorly understood, and basic questions, like how many entanglement bits can be distilled, are still open.

Here we give one of the very first exact solutions for the problem of distillation by establishing a precise formula for the number of bits that can be extracted asymptotically, connecting the rate of distillation with the task of quantum state discrimination and with an entropic quantity based on the quantum relative entropy of entanglement.

L. Lami and B. Regula, “Distillable entanglement under dually non-entangling operations”, Nature Communications 15, 10120 (2024)

We compute the rate of entanglement distillation under dually non-entangling (DNE) operation, which provide an approximation to the operations that can be efficiently realised in a laboratory (denoted LOCC). Our technique is to connect the task of distillation with a quantum state discrimination problem where the measurements are suitably constrained (bottom part of the figure). This leads to an exact formula for the rate of distillation, which we expressed using a variant of quantum relative entropy.



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 R. Toshio, Y. Akahoshi, J. Fujisaki, H. Oshima, S. Sato, K. Fujii, "Practical quantum advantage on partially fault-tolerant quantum computer," *Phys. Rev. X* 15, 021057 (2025).
- 2 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).
- 3 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).
- 4 T. Kurita, M. Morita, H. Oshima, and S. Sato, "Pauli String Partitioning Algorithm with the Ising Model for Simultaneous Measurements", *J. Phys. Chem. A*, 127, 4, 1068–1080 (2023).
- 5 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).

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

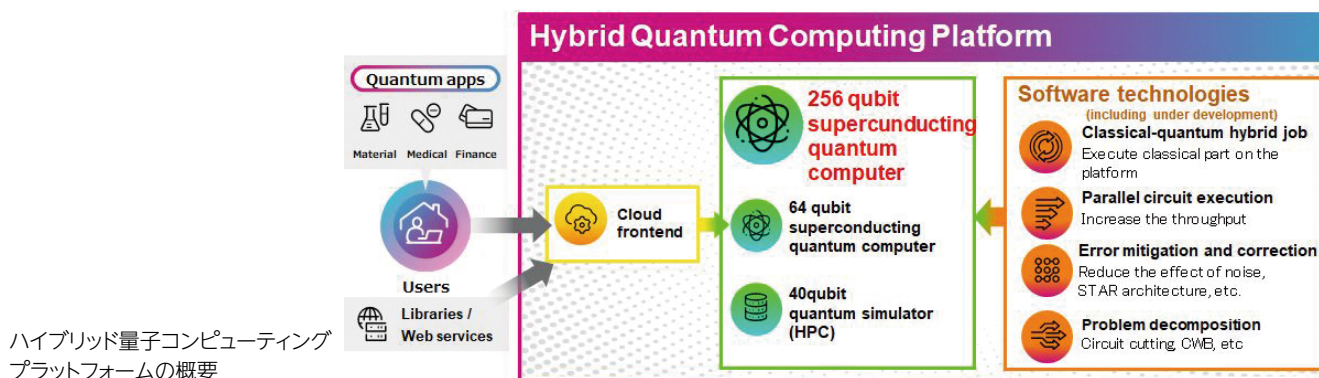
世界最大級の256量子ビット超伝導量子コンピュータを開発

2023年10月に公開した国産二号機となる64量子ビット超伝導量子コンピュータの開発技術をベースに、新たに開発した高密度実装技術により、世界最大級となる256量子ビットの超伝導量子コンピュータを実現した。

今回開発した256量子ビット機では、64量子ビット機で確立した単位セルの設計をベースに、3次元接続構造により量子ビットチップの拡張性が担保できることを実証した。また、冷凍機内部の熱収支をバランスさせることで、64量子ビット機と同じ希釈冷凍機を使用しながら、4倍となる実装密度を実現した。本256量子ビット超伝導量子コンピュータは、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」を通じて、企業や研究機関に向けて提供される予定。



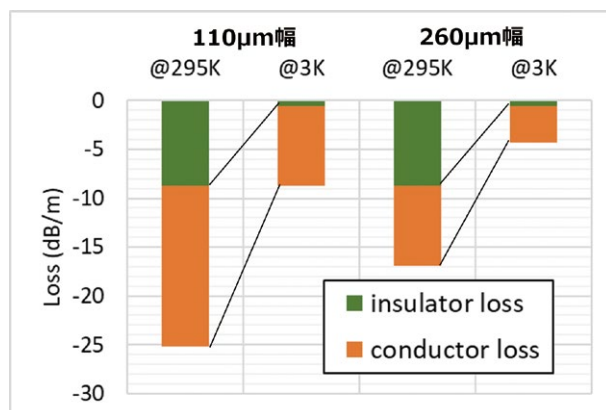
開発した256量子ビット超伝導量子コンピュータ



配線測定と三次元電磁解析を融合した簡易的な材料パラメータの抽出方法を開発

超伝導量子コンピュータの大規模化に向け、低温で使用可能な高密度配線基板の重要性が高まっている。高密度配線の形成に適したプリント回路基板に関しては、室温近傍および高温側での材料パラメータに関する報告はある反面、数ケルビン以下の低温でのパラメータは十分に理解されていない。そこで、当チームでは簡単な配線測定と三次元電磁解析から比較的容易に材料パラメータを抽出する新しい方法を提案した。本方法は、2つ以上の配線断面形状および2つ以上の配線長を用意することで、誘電損失と導体損失およびビア等の形状起因の損失を切り分けることが可能である。

本手法を用いて材料特性を抽出した結果、低温領域において誘電損失と導体損失は室温より小さくなり、導体損失が支配的となることが判明した（例えば配線幅 $100\mu\text{m}$ 配線長5cmで、約0.4dBの損失）。すなわち、導体損失を低減させることで反比例的に配線長の増加、すなわち設計自由度が高く高密度な配線の実装が可能となることを証明した。



低温での10GHzでのプリント基板配線損失の内訳の一例

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
(高度研究支援専門職) 大羽 秀明

(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. Kirihaara, 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. Kirihaara, 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. Kirihaara, 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. Kirihaara, 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)

Tracing the main source of noise in silicon quantum computers

Measurements of the noise experienced by two neighboring quantum dots will aid the design of silicon quantum computers

Category: Applied Physical Sciences **Field:** Physics/Astronomy

The noise in silicon-based quantum computers is mainly electrical in origin, a RIKEN team has found¹. This finding will help to suppress noise in future quantum computers.

Quantum computers are set to revolutionize computing since they harness the quantum properties of tiny objects to perform calculations that are not possible using conventional computers.

Like most people, however, quantum computers struggle to perform calculations in noisy environments. In the case of quantum computers, the noise is not audible, but rather it comes from a variety of sources and can be electrical or magnetic. It has the effect of degrading the ‘quantumness’ of qubits—the quantum equivalent of bits—which can introduce errors in calculations.

One of the most promising platforms being pursued for quantum computers involves tiny silicon structures known as quantum dots. One big advantage they have is that many quantum dots can be squeezed into a small area, which will help to scale up to the larger quantum computers needed to tackle practical problems. However, cramming a lot of qubits close together will increase the likelihood they will be affected by noise.

But little has been known about the main sources of noise for qubits made from silicon quantum dots.

Now, a team led by Seigo Tarucha of the RIKEN Center for Emergent Matter Science has measured the noise between two silicon qubits that were 100 nanometers apart.

To their surprise, they found that the noise the two qubits experienced displayed similar patterns over time. This similarity points to a common source of noise, which the team found is electrical in origin.

This finding was not what the researchers had anticipated. “We initially thought that the metal gates in our device would largely shield the qubits from charge noise,” says Tarucha. “But the screening turned out to be smaller than we had expected.”

This finding has important ramifications for the design of future quantum computers based on silicon qubits. “It will be important to modify device geometry to suppress this noise that affects multiple qubits simultaneously,” says Tarucha. “We believe this can be done.”

In addition, the nanoscopic approach adopted in this study provides a powerful tool for investigating noise correlation between silicon qubits. “Noise correlation significantly influences the fault tolerance of quantum computers, error-correction protocols and the design of multi-qubit devices,” says Tarucha. “However, there has been no accurate way to

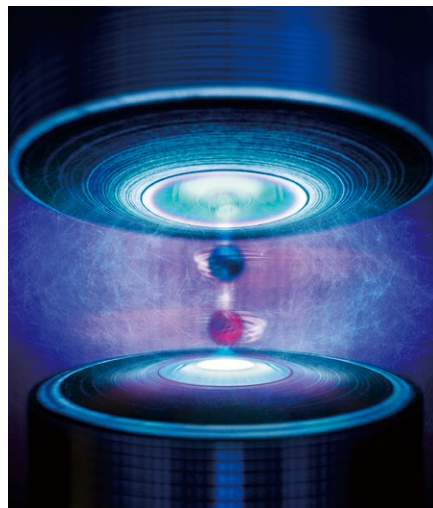


Figure: An artist's impression of the quantum property known as spin. A RIKEN team has measured the noise experienced by two spin qubits in silicon that are 100 nanometers apart and found a high degree of correlation between them.

© RICHARD KAIL/SCIENCE PHOTO LIBRARY

[<https://www.sciencephoto.com/media/393940/view>]

measure it until now.”

“We plan to analyze the correlation-noise characteristics more accurately and to optimize device design so as to minimize noise correlation,” adds Tarucha. “We eventually want to apply the concept to implement devices with large numbers of qubits.”

Related content:

Quantum computers start to measure up [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20231221_1/index.html]

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

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]

Reference

1. Yoneda, J., Rojas-Arias, J. S., Stano, P., Takeda, K., Noiri, A., Nakajima, T., Loss, D. & Tarucha, S. Noise-correlation spectrum for a pair of spin qubits in silicon. *Nature Physics* 19, 1793–1798 (2023). (doi.org/10.1038/s41567-023-02238-6)

RIKEN Research Spring 2024

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Fast and faithful quantum measurements of electron spin qubits

A method for rapidly and precisely measuring the quantum state of electrons in a silicon device could help scale up quantum computers

Category: Applied Physical Sciences **Field:** Physics/Astronomy

Measuring a quantum system quickly and accurately is crucial for realizing reliable quantum computers. Physicists at RIKEN have developed a method that achieves both these requirements in a silicon-based device¹.

Most practical quantum technologies harness the weirdness of quantum mechanics in a basic element known as a qubit—the quantum equivalent of a bit in conventional computers. Qubits hold and maintain a quantum state.

They can be realized in various systems, including superconducting circuits, isolated atoms and laser beams. Another option is silicon devices that use the quantum state of a trapped electron—specifically, an electron property known as spin. These qubits have a real advantage over other qubits in that they are compatible with existing semiconductor-based computer components and fabrication technologies.

Practical applications of qubits, such as in fault-tolerant quantum computers, require a way to measure the quantum state accurately and quickly—before the quantum state degrades or collapses in a process referred to as decoherence.

Now, Kenta Takeda and Seigo Tarucha from the RIKEN Center for Emergent Matter Science and their co-workers have demonstrated a method for measuring spin in a silicon device with an accuracy of more than 99% and in just a few microseconds—hundreds of times faster than typical decoherence times.

Measuring the spin of a single electron directly is massively challenging because it involves detecting tiny magnetic fields. This limits the measurement accuracy, or fidelity.

To overcome this problem, Takeda and his team adopted a different approach—they converted the spin into an electrical charge.

To test this approach, they built a silicon device that trapped two electrons (Fig. 1). Owing to a fundamental principle of quantum physics that states that no two electrons can occupy the same quantum state, the team was able to infer the quantum state by monitoring current flowing through the device. In this so-called Pauli spin blockade effect, the measurement signal results from the difference in the charge states, which is easier to measure than magnetic fields.

“Spin measurement in silicon-based spin qubits has previously been slow, and its fidelity wasn’t high enough,” explains Takeda. “We improved the Pauli spin blockade by optimizing the structure of our device to enhance the sensitivity of the charge sensor. We also improved the spin-to-charge conversion technique so that the spin state was well preserved during the process.”

“This achievement paves the way for realizing fault-tolerant quantum computing in this platform,” he adds.

Related content:

Tracing the main source of noise in silicon quantum computers [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20240404_2/index.html]

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

Connecting distant silicon qubits for scaling up quantum computers [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20230331_1/index.html]

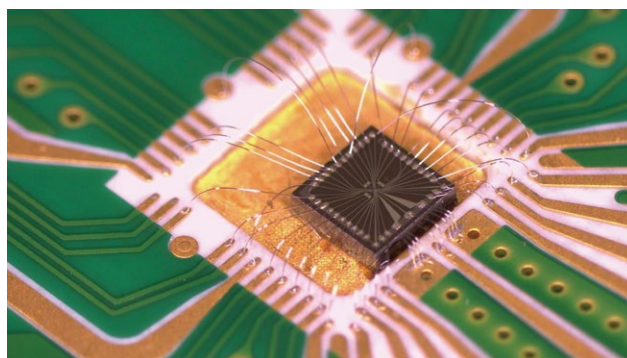


Figure: A silicon-based device that captures two electrons enables quick and accurate quantum-state measurement for quantum information processing.

© 2024 RIKEN Center for Emergent Matter Science
[Researcher (unpublished)]

Reference

1. Takeda, K., Noiri, A., Nakajima, T., Camenzind, L. C., Kobayashi, T., Sammak, A., Scappucci, G. & Tarucha, S. Rapid single-shot parity spin readout in a silicon double quantum dot with fidelity exceeding 99%. *npj Quantum Information* 10, 22 (2024). doi: 10.1038/s41534-024-00813-0

RIKEN Research Spring 2024

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Boson systems break the finite speed limit

Information can travel faster than individual particles in systems made up of interacting bosons

Category: Exploratory Physical Sciences **Field:** Physics/Astronomy

The propagation of information can speed up over time in systems of certain quantum particles, a theoretical analysis by RIKEN physicists has revealed¹.

Having a Zoom call with someone on Mars would be challenging because of the 3-to-20-minute delay involved, but the delay would balloon to nearly 3 hours for Uranus. Switching to a better internet provider wouldn't help—these time lags are unavoidable since, according to Einstein, nothing can outpace light.

The two delays represent two points on a 'light cone' that spreads out from a source of electromagnetic radiation such as light.

But what about systems made up of quantum particles that travel much slower than light? Are there similar limitations on how fast information can propagate in them?

Two physicists explored that question in the early 1970s and came up with the concept of an 'effective light cone' for such systems. They also derived a speed limit for the propagation of information in them, which is known as the Lieb–Robinson velocity.

"Essentially, the Lieb–Robinson bound indicates that the impact of local changes within a quantum system cannot spread instantly everywhere; rather, these effects are limited to an effective light cone determined by this maximum speed," explains Tomotaka Kuwahara of the RIKEN Center for Quantum Computing. "The bound sets a universal speed limit for how quickly information can travel in these systems."

Scientists have measured the shapes of effective light cones in many different systems. But so far no one has determined it for a system made up of 'bosons' that interact with each other. Bosons are quantum particles that have a spin that is a whole number; examples include photons, gluons and the Higgs boson.

Now, Kuwahara and two co-workers have conducted a theoretical analysis for interacting bosons and found a surprise—information can travel much faster than the particles in certain cases.

This contrasts with the other type of quantum particles, fermions, which have half integer values of spin (e.g., $1/2$ and $3/2$) and which include electrons, protons and neutrinos.

"Previous studies had suggested that bosons and fermions behave the same in terms of information propagation," says Kuwahara. "We clarified that this intuition isn't correct and that significant differences exist between bosons and fermions."

The analysis, which involved a 115-page proof, revealed that bosons can send information much faster than fermions can, especially as time goes on. "For fermions, there's a fixed speed limit for how fast information can propagate," says Kuwahara. "But the picture is very different for systems of

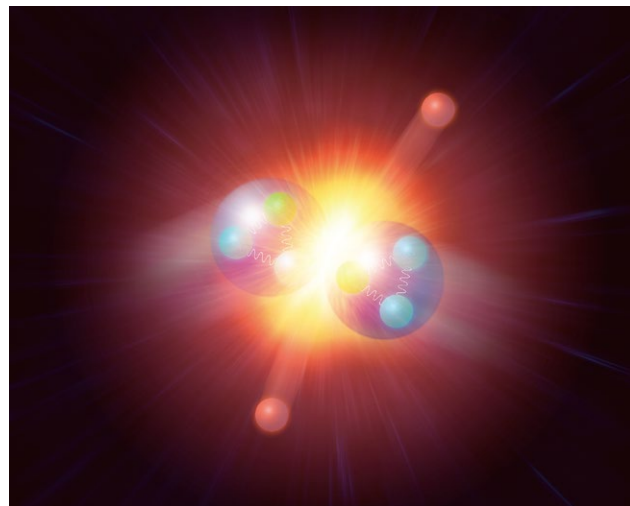


Figure: Conceptual illustration of the Higgs boson (orange, top and bottom) being produced by colliding two protons. RIKEN researchers have found that the propagation of information in systems of interacting bosons can accelerate over time. © MARK GARLICK/SCIENCE PHOTO LIBRARY [https://www.sciencephoto.com/media/1158510/view]

bosons—information can travel faster over time."

This finding could help to discover new quantum phases, Kuwahara says.

Related content:

Long-range quantum interactions limit the speed of information [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20201002_1/index.html]

Determining the Hamiltonian of quantum systems with far fewer measurements [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20220113_1/index.html]

Looking for rules within quantum complexity [https://www.riken.jp/en/about/people/2022winter-1/index.html]

Reference

1. Kuwahara, T., Vu, T. V. & Saito, K. Effective light cone and digital quantum simulation of interacting bosons. *Nature Communications* 15, 2520 (2024). doi: 10.1038/s41467-024-46501-7

RIKEN Research Summer 2024

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Unentangling entropy in the quantum realm

The classical thermodynamic concept of entropy is also applicable to the phenomenon of quantum entanglement

RIKEN researchers have shown that a rule of ‘entropy’, or disorder, applies to the phenomenon of quantum entanglement—a finding that could help to develop future quantum computers¹.

One of the most fundamental laws of nature, the second law of thermodynamics states that the entropy of an isolated system will always increase with time. It creates the so-called ‘arrow of time’.

However, while the principle of entropy is known to apply to all classical systems, researchers are increasingly exploring the quantum world.

Quantum entanglement is a fascinating phenomenon whereby two or more quantum particles become connected in such a way that a change to one particle affects the other particles, even if they are separated by large distances—Einstein’s famous “spooky action at a distance”.

Quantum entanglement is highly useful for communication, computation and cryptography, but is difficult to analyze.

To demonstrate a ‘second law’ for quantum entanglement, physicists have to show that entanglement transformations are reversible, just as work and heat can be interconverted in thermodynamics.

But so far, all attempts to establish a reversible theory of entanglement have failed. Some physicists even suspected that entanglement may be irreversible, making the quest impossible.

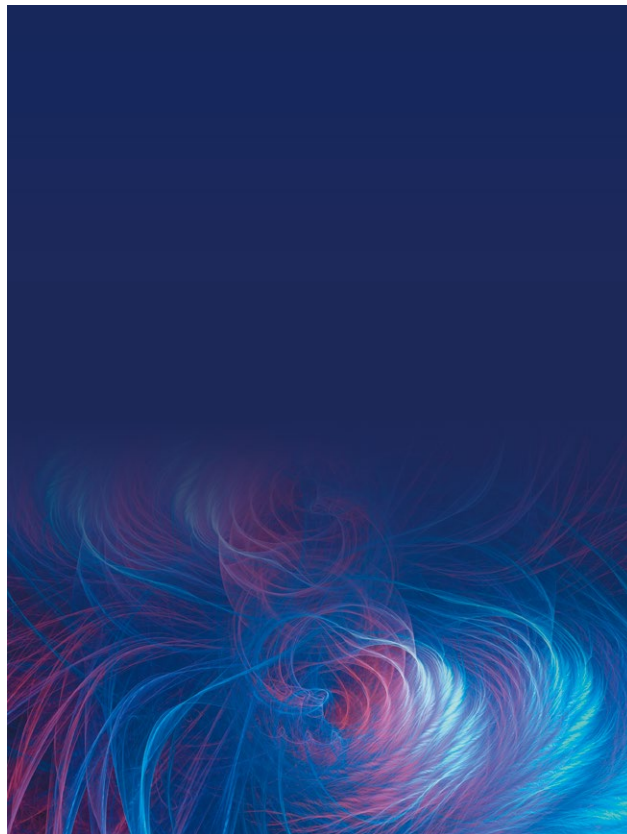
Now, a team led by Bartosz Regula of the RIKEN Center for Quantum Computing has solved this long-standing conjecture by using ‘probabilistic’ entanglement transformations. While these transformations are only guaranteed to be successful some of the time, they are more effective than non-probabilistic ones in converting quantum systems.

Under such transformations, the researchers showed that it is indeed possible to establish a reversible framework for entanglement manipulation. They thus identified a setting in which a unique ‘entropy of entanglement’ emerges.

“Our findings mark significant progress in understanding the basic properties of entanglement,” says Regula. “They reveal fundamental connections between entanglement and thermodynamics, and crucially, provide a major simplification in the understanding of entanglement conversion processes.”

The demonstration has practical implications. “This not only has immediate and direct applications in the foundations of quantum theory, but it will also help with understanding the ultimate limitations on our ability to efficiently manipulate entanglement in practice,” says Regula.

While the finding is major step forward, it raises new questions. “Our work serves as the very first evidence that reversibility is an achievable phenomenon in entanglement



RIKEN researchers have shown that the classical physics concept of entropy also applies to quantum entanglement, depicted artistically here.

theory,” says Regula. “However, even stronger forms of reversibility have been conjectured. Understanding the precise requirements for reversibility to hold thus remains a fascinating open problem.”

Reference

1. Regula, B. & Lami, L. Reversibility of quantum resources through probabilistic protocols. *Nature Communications* 15, 3096 (2024).

RIKEN Research Fall 2024 (p.21)

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

A beautiful approach to correcting quantum errors

A method for correcting errors in quantum computers based on geometric structures shows promise

A new approach for correcting errors in quantum computing has been proposed by a RIKEN researcher¹. It could contribute to highly parallel methods that will allow fault-tolerant quantum computing, the next stage in the evolution of quantum computers.

Quantum computers promise to revolutionize computing in coming decades. In particular, quantum computers that are tolerant to faults because they can correct errors have the potential to surpass the performance of conventional computers on certain calculations.

“Thanks to recent experimental progress, there is now great hope that we will be able to build fault-tolerant quantum computers,” says Hayato Goto of the RIKEN Center for Quantum Computing. “To achieve this, however, it is important to develop efficient quantum error correction.”

Many error-correction methods have been proposed. A conventional one is based on encoding a single logical qubit (a qubit is the equivalent of a bit in a conventional computer) onto many entangled physical ones, and then using a decoder to retrieve the logical qubit from the physical ones.

But this is difficult to scale up since the number of physical qubits required goes up enormously, resulting in huge resource overheads.

To overcome this problem, high-rate quantum codes have been proposed. But they require setting up logic gates mostly sequentially rather than fully parallel, slowing computing down.

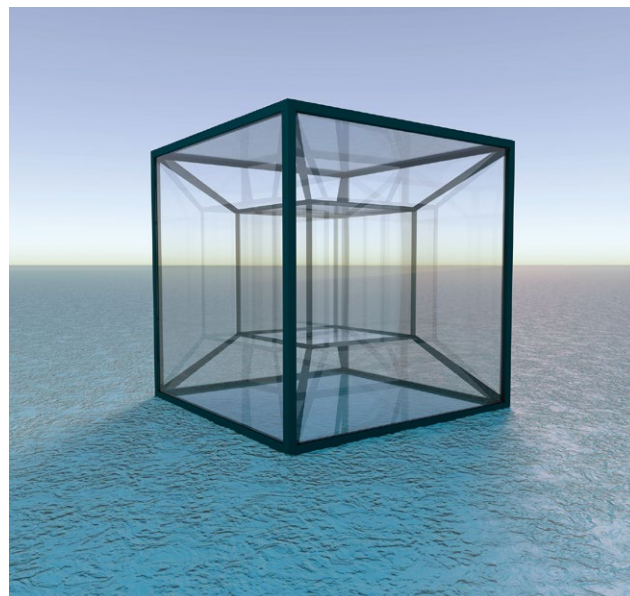
To remedy this, Goto has proposed an approach he calls many-hypercube codes. In this approach, the logical qubits can be visualized mathematically as forming a hypercube—a class of shapes that includes squares and cubes as well as higher-order shapes such as the tesseract. In contrast to other high-rate quantum codes, manyhypercube codes have remarkably beautiful mathematical and geometric structures.

For these new codes to improve performance, Goto needed to develop a novel dedicated decoder that can interpret the result from the physical qubits.

His innovative technique is based on level-by-level minimum distance decoding, which allows for high performance. Unlike similar methods, it also allows for logical gates to be arranged in parallel rather than in series, which makes the system analogous to parallel processing in conventional computers.

The codes developed by Goto realized one of the highest encoding rates—the ratio between logical and physical qubits—among codes used for fault-tolerant quantum computing. Even with this high encoding rate, the codes had performances comparable to those of conventional codes with low encoding rates.

Goto believes that the code could be implemented in



A model of a hypercube known as a tesseract. A RIKEN researcher has developed a method for correcting errors in quantum computers that is based on hypercubes.

practical quantum computing systems that use neutral atoms trapped in laser beams as qubits.

Reference

1. Goto, H. High-performance fault-tolerant quantum computing with many-hypercube codes. *Science Advances* 10, eadp6388 (2024).

RIKEN Research Winter 2024 (p.17)

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

A high-fidelity gate for quantum computers

A new kind of coupler could enable more accurate quantum computation

RIKEN physicists have realized a novel coupling scheme that achieved high-fidelity gate operations between qubits for quantum computers¹. This development promises to both boost the performance of existing superconducting quantum computers and pave the way for realizing future fault-tolerant quantum computing.

Because they are based on qubits rather than bits, quantum computers have the potential to revolutionize computing by being able to solve problems that are extremely difficult or intractable using conventional computers.

Unleashing the full potential of quantum computing requires developing quantum gates—operations on qubits—with much higher fidelities than are currently achievable. This is important because realizing high gate fidelities is essential for minimizing errors and thereby enhancing the reliability of quantum computation and reducing overheads for error correction.

Now, a team led by Yasunobu Nakamura of the RIKEN Center for Quantum Computing and Hayato Goto of Toshiba Corporation have demonstrated high-fidelity gates between two qubits by using a special coupler.

“By reducing the error rates in quantum gates, we have made more reliable and accurate quantum computation possible,” says Nakamura. “This is particularly important for developing fault-tolerant quantum computers, which are the future of quantum computing.”

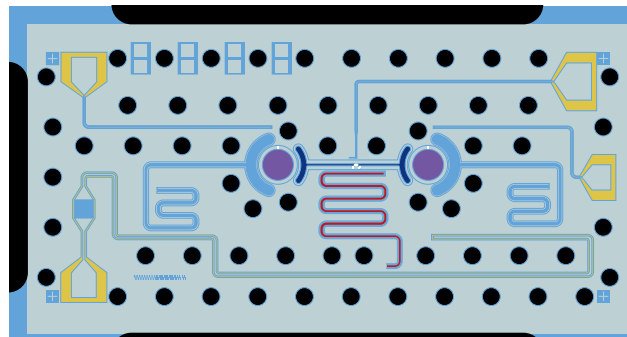
The team used a new kind of tunable coupler composed of two fixed-frequency transmons—a type of qubit that is relatively insensitive to charge noise. This coupler both suppressed residual interaction and realized fast high-fidelity two-qubit gate operations, even for highly detuned qubits.

Using the coupler, the team realized a two-qubit gate with an impressive fidelity of 99.9% within a gate time shorter than 50 nanoseconds. This is a big advance as no two-qubit gate has been demonstrated at the level of the fidelity and speed between two fixed-frequency qubits.

The two keys to this demonstration were constructing precisely designed qubits using state-of-the-art fabrication techniques and optimizing the gate using machine learning. This allowed the researchers to translate the theoretical potential of the double-transmon coupler, proposed by Goto in 2022, into practical application.

The team used these approaches to balance two remaining types of errors—leakage error and decoherence error—that remained within the system. They minimized these two error sources by optimizing the pulse length and shape. Thanks to this, they achieved among the highest fidelities reported in the field.

“This device’s ability to realize quantum gates effectively with



The development of a two-qubit gate (shown here) with a very high fidelity could help improve the performance of superconducting quantum computers.

long-coherence fixed-frequency qubits makes it a versatile and competitive building block for various quantum computing architectures,” says Nakamura. “It can be integrated into existing and future superconducting quantum processors, enhancing their overall performance and scalability.

Reference

1. Li, R., Kubo, K., Ho, Y., Yan, Z., Nakamura, Y. & Goto, H. Realization of high-fidelity CZ gate based on a double-transmon coupler. *Physical Review X* 14, 041050 (2024).

RIKEN Research Spring 2025 (p.14)

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

発表論文リスト

2024年度データ

Title	Authors	Article
Generation of Phonons with Out-of-Plane Angular Momentum by Superposition of Longitudinal Surface Acoustic Phonons	K.Taga, R. Hisatomi, R. Sasaki,H. Komiyama, H. Matsumoto, H. Narita, S. Karube, Y. Shiota, T. Ono	Journal of the Magnetics Society of Japan 49, 17 (2024).
Cat-state-like non-Gaussian entanglement in magnon systems	Z. Zhang, C. Gneiting, Z. Y. Zhou , A. X. Chen	Physical Review A 111, 033717 (2025).
Two-dimensional correlation propagation dynamics with a cluster discrete phase-space method	K. Nagao, S. Yunoki	Physical Review A 111, 023315 (2025).
Discrete-phase-space method for driven-dissipative dynamics of strongly interacting bosons in optical lattices	K. Nagao, I Danshita, S. Yunoki	Physical Review A 110, 063310 (2024).
Probing fast quantum circuit refrigeration in the quantum regime	S. Nakamura, T. Yoshioka, S. Lemziakov, D. Lvov, H. Mukai, A. Tomonaga, S. Takada, Y. Okazaki, N. Kaneko, J. Pekola, J. S. Tsai	Physical Review Applied 23, 011003 (2025).
Visual explanations of machine learning model estimating charge states in quantum dots	Y. Muto, T. Nakaso, M. Shinozaki, T. Aizawa, T.Kitada, T. Nakajima, M. R. Delbecq, J. Yoneda, K. Takeda, A.Noiri, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, A. Kanemura, M. Shiga, T. Otsuka	APL Machine Learning 2, 026110 (2024).
Decoding general error correcting codes and the role of complementarity	Y. Nakata, T. Matsuura, M. Koashi	npj Quantum Information 11, 4 (2025).
Tight concentration inequalities for quantum adversarial setups exploiting permutation symmetry	T. Matsuura, S. Yamano, Y. Kuramochi, T. Sasaki, M. Koashi	Quantum 8, 1540 (2024).
Quantum phase transitions in many-dipole light-matter systems	D. Lamberto, O. Di Stefano, S. Hughes, F. Nori, S. Savasta	Physical Review Research 7, 013271 (2025).
Non-Markovian skin effect	P. C. Kuo, S. L. Yang, N. Lambert, J. D. Lin, Y. T. Huang, F. Nori, Y. N. Chen	Physical Review Research 7, 012068 (2025).
Frustration Elimination and Excited State Search in Coherent Ising Machines	Z. Y. Zhou, C. Gneiting, J. Q. You, F. Nori	Physical Review Letters 134, 090401 (2025).
Achieving Robust Single-Photon Blockade with a Single Nanotip	J. Tang, Y. Zuo, X. W. Xu, R. Huang, A. Miranowicz, F. Nori, H. Jing	Nano Letters 25, 4705 (2025).
Precise quantum control of molecular rotation toward a desired orientation	Q. Q. Hong, D. Dong, N. E. Henriksen, F. Nori, J. He, C. C. Shu	Physical Review Research 7, 012049 (2025).
Bilateral photon emission from a vibrating mirror and multiphoton entanglement generation	A. Mercurio, E. Russo, F. Mauceri, S. Savasta, F. Nori, V. Macrì, R. L. Franco	SciPost Physics 18, 067 (2025).
Waveguide QED with dissipative light-matter couplings	X. L. Dong, P. B .Li, Z. Gong, F. Nori	Physical Review Research 7, 012036 (2025).
Closed and open unbalanced Dicke trimer model: Critical properties and nonlinear semiclassical dynamics	C. Zhang, P. Liang, N. Lambert, M. Cirio	Physical Review Research 6, 023012 (2024).
Nonreciprocal Superradiant Phase Transitions and Multicriticality in a Cavity QED System	G. L. Zhu, C. S. Hu, H. Wang, W. Qin, X. Y. Lu, F. Nori	Physical Review Letters 132, 193602 (2024).
Relational superposition measurements with a material quantum ruler	H. Wang, F. Giacomini, F. Nori, M.P. Blencowe	Quantum 8, 1335 (2024).
Non-Hermitian pseudomodes for strongly coupled open quantum systems: Unravelings, correlations, and thermodynamics	P. Menczel, K. Funo, M. Cirio, N. Lambert, F. Nori	Physical Review Research 6, 033237 (2024).
Reconciling quantum and classical spectral theories of ultrastrong coupling: role of cavity bath coupling and gauge corrections	S. Hughes, C. Gustin, F. Nori	Optica Quantum 2, 133 (2024).
Quantum heat engine based on quantum interferometry: The SU(1,1) Otto cycle	A. Ferreri, H. Wang, F. Nori,F. K. Wilhelm, D. E. Bruschi	Physical Review Research 7, 013284 (2025).
Squeezing-enhanced quantum sensing with quadratic optomechanics	S. D. Zhang, J. Wang, Q. Zhang, Y. F. Jiao, Y. L. Zuo, Ş. K. Özdemir, C. W. Qiu, F. Nori, H. Jing	Optica Quantum 2, 222 (2024).
Generation of true quantum random numbers with on-demand probability distributions via single-photon quantum walks	C. Meng, M. Cai, Y.Yang, H. Wu, Z. Li, Y. Ruan, Y. Zhang, H. Zhang, K. Xia, F. Nori	Optics Express 32, 20207 (2024).
Non-Markovian quantum exceptional points	J. D. Lin, P. C. Kuo, N. Lambert, A.Miranowicz, F. Nori, Y. N. Chen	Nature Communications 16, 1289 (2025).
Diffusion transients in motility-induced phase separation	S. Nayak, P. Bag, P. K. Ghosh, Y. Li, Y. Zhou, Q. Yin, F. Marchesoni, F. Nori	Physical Review Research 7, 013153 (2025).
Floquet Engineering the Quantum Rabi Model in the Ultrastrong Coupling Regime	K. Akbari, F. Nori, S. Hughes	Physical Review Letters 134, 063602 (2025).
Neural-Network-Based Design of Approximate Gottesman-Kitaev-Preskill Code	Y. Zeng, W. Qin, Y. H. Chen, C. Gneiting,F. Nori	Physical Review Letters 134, 060601 (2025).
Dynamics and resonance fluorescence from a superconducting artificial atom doubly driven by quantized and classical fields	X. Ruan, J. H. Wang, D. He, P. Song, S. Li, Q. Zhao, L. M. Kuang, J. S. Tsai, C. L. Zou, J. Zhang, D. Zheng, O. V. Astafiev, Y. Liu, Z. Peng	Physical Review Research 6, 033064 (2024).
Fixing detailed balance in ancilla-based dissipative state engineering	N. Lambert, M. Cirio, J. D. Lin, P. Menczel, P. Liang, F. Nori	Physical Review Research 6, 043229 (2024).

発表論文リスト(つづき)

Title	Authors	Article
Experimental realization of on-chip few-photon control around exceptional points	P. Song, X. Ruan, H. Ding, S. Li, M. Chen, R. Huang, L. M. Kuang, Q. Zhao, J. S. Tsai, H. Jing, L. Yang, F. Nori, D. Zheng, Y. Liu, J. Zhang, Z. Peng	Nature Communications 15, 9848 (2024).
Restoring Adiabatic State Transfer in Time-Modulated Non-Hermitian Systems	I. I. Arkhipov, F. Minganti, A. Miranowicz, Ş. K. Özdemir, F. Nori	Physical Review Letters 133, 113802 (2024).
Alternative fast quantum logic gates using nonadiabatic Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions	A. I. Ryzhov, O. V. Ivakhnenko, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, F. Nori	Physical Review Research 6, 033340 (2024).
Nonreciprocal Bundle Emissions of Quantum Entangled Pairs	Q. Bin, H. Jing, Y. Wu, F. Nori, X. Y. Lü	Physical Review Letters 133, 043601 (2024).
Nonreciprocal Topological Phonon Transfer Independent of Both Device Mass and Exceptional-Point Encircling Direction	D. G. Lai, A. Miranowicz, F. Nori	Physical Review Letters 132, 243602 (2024).
Entangling Schrödinger's cat states by bridging discrete- and continuous-variable encoding	D. Hoshi, T. Nagase, S. Kwon, D. Iyama, T. Kamiya, S. Fujii, H. Mukai, S. Ahmed, A. F. Kockum, S. Watabe, F. Yoshihara, J. S. Tsai,	Nature Communications 16, 1309 (2025).
Nonmesonic Quantum Many-Body Scars in a 1D Lattice Gauge Theory	Z. Y. Ge, Y. R. Zhang, F. Nori	Physical Review Letters 132, 230403 (2024).
Phonon-photon conversion as mechanism for cooling and coherence transfer	A. Ferreri, D. E. Bruschi, F. K. Wilhelm, F. Nori, V. Macri	Physical Review Research 6, 023320 (2024).
Optimal control of linear Gaussian quantum systems via quantum learning control	Y. H. Liu, Y. Zeng, Q. S. Tan, D. Dong, F. Nori, J. Q. Liao	Physical Review A 109, 063508 (2024).
Modeling the unphysical pseudomode model with physical ensembles: Simulation, mitigation, and restructuring of non-Markovian quantum noise	M. Cirio, S. Luo, P. Liang, F. Nori, N. Lambert	Physical Review Research 6, 033083 (2024).
Magnon-Skymion Hybrid Quantum Systems: Tailoring Interactions via Magnons	X. F. Pan, P. B. Li, X. L. Hei, X. Zhang, M. Mochizuki, F. L. Li, F. Nori	Physical Review Letters 132, 193601 (2024).
Effective field theories and finite-temperature properties of zero-dimensional superradiant quantum phase transitions	Z. Y. Ge, H. Fan, F. Nori	Physical Review Research 6, 023123 (2024).
Exponential sensitivity revival of noisy non-Hermitian quantum sensing with two-photon drives	L. Bao, B. Qi, F. Nori, D. Dong	Physical Review Research 6, 023216 (2024).
Exponentially improved efficient machine learning for quantum many-body states with provable guarantees	Y. Che, C. Gneiting, F. Nori	Physical Review Research 6, 033035 (2024).
Parameter estimation from quantum-jump data using neural networks	E. Rinaldi, M. G. Lastre, S. G. Herreros, S. Ahmed, M. Khanahmadi, F. Nori, C. S. Muñoz.	Quantum Science and Technology 9, 035018 (2024).
High-dimensional two-photon quantum controlled phase-flip gate	M. Chen, J. S. Tang, M. Cai, Y. Lu, F. Nori, K. Xia	Physical Review Research 6, 033004 (2024).
Enhanced Interactions Using Quantum Squeezing	W. Qin, F. Nori	Physics 17, 64 (2024).
Exceptional refrigeration of motions beyond their mass and temperature limitations	D. G. Lai, C.-H. Wang, B.-P. Hou, A. Miranowicz, F. Nori	Optica 11, 485 (2024).
Error-Tolerant Amplification and Simulation of the Ultrastrong-Coupling Quantum Rabi Model	Y. H. Chen, Z. C. Shi, F. Nori, Y. Xia	Physical Review Letters 133, 033603 (2024).
Quantum amplification and simulation of strong and ultrastrong coupling of light and matter	W. Qin, A. F. Kockum, C. S. Muñoz, A. Miranowicz, F. Nori	Physics Reports 1078, 1 (2024).
Supervised learning for robust quantum control in composite-pulse systems	Z. C. Shi, J. T. Ding, Y. H. Chen, J. Song, Y. Xia, X. X. Yi, F. Nori	Physical Review Applied 21, 044012 (2024).
Lee-Yang theory of the superradiant phase transition in the open Dicke model	F. Brange, N. Lambert, F. Nori, C. Flindt	Physical Review Research 6, 033181 (2024).
Quantum weak force sensing with squeezed magnomechanics	Q. Zhang, J. Wang, T. X. Lu, R. Huang, F. Nori, H. Jing	Science China Physics, Mechanics & Astronomy 67, 100313 (2024).
Heralded nonlocal quantum gates for distributed quantum computation in a decoherence-free subspace	W. Su, W. Qin, A. Miranowicz, T. Li, F. Nori	Physical Review A 110, 052612 (2024).
Epidemic spreading and herd immunity in a driven non-equilibrium system of strongly-interacting atoms	Z. K. Liu, D. S. Ding, Y. C. Yu, H. Busche, B. S. Shi, G. C. Guo, C. S. Adams, F. Nori	Quantum Frontiers 3, 23 (2024).
Long-range four-body interactions in structured nonlinear photonic waveguides	X. Wang, J. Q. Li, T. Liu, A. Miranowicz, F. Nori	Physical Review Research 6, 043226 (2024).
Exponentially Improved Dispersive Qubit Readout with Squeezed Light	W. Qin, A. Miranowicz, F. Nori	Physical Review Letters 133, 233605 (2024).
Observation of quantum temporal correlations well beyond Lüders bound	C. W. Wu, M. C. Zhang, Y. L. Zhou, T. Chen, R. Huang, Y. Xie, W. Su, B. Q. Ou, W. Wu, A. Miranowicz, F. Nori, J. Zhang, H. Jing, P. X. Chen	Physical Review Research 7, 013058 (2025).
Interplay between disorder and topology in Thouless pumping on a superconducting quantum processor	Y. Liu, Y. R. Zhang, Y. H. Shi, T. Liu, C. Lu, Y. Y. Wang, H. Li, T. M. Li, C. L. Deng, S. Y. Zhou, T. Liu, J. C. Zhang, G. H. Liang, Z. Y. Mei, W. G. Ma, H. T. Liu, Z. H. Liu, C. T. Chen, K. Huang, X. Song, S. P. Zhao, Y. Tian, Z. Xiang, D. Zheng, F. Nori, K. Xu, H. Fan	Nature Communications 16, 108 (2025).
Counting atypical black hole microstates from entanglement wedges	Z. Wei, Y. Yoneta	Journal of High Energy Physics 2024, 251 (2024).

Title	Authors	Article
Efficient simulation of low-temperature physics in one-dimensional gapless systems	Y. Kusuki, K. Tamaoka, Z. Wei, Y. Yoneta	Physical Review B 110, 041122 (2024).
Exact Thermal Eigenstates of Nonintegrable Spin Chains at Infinite Temperature	Y. Chiba, Y. Yoneta	Physical Review Letters 133, 170404 (2024).
Thermal pure states for systems with antiunitary symmetries and their tensor network representations	Y. Yoneta	Physical Review Research 6, 042062 (2024).
Physics-informed Neural Networks for Functional Differential Equations: Cylindrical Approximation and Its Convergence Guarantees	T. Miyagawa, T. Yokota	38th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024), (2024).
Quantification of the heavy-hole–light-hole mixing in two-dimensional hole gases	P. Stano, D. Loss	Physical Review B 111, 115301 (2025).
Experimental computations of atomic properties on a superconducting quantum processor	A. P. Singh, K. Sugisaki, S. Prasanna, B. K. Sahoo, B. P. Das, Y. Nakamura	Physical Review A 110, 062620 (2024).
How we controlled the superconducting qubit	Y. Nakamura	Nature Electronics 8, 92 (2025).
Fabrication of superconducting quantum circuits on 12-inch wafers using an ArF immersion lithography system II	S. Odate, N. Saito, H. Aoyama, K. Kusuyama, Y. Nakamura, H. Tsukamoto	Proc. SPIE UV and Higher Energy Photonics: From Materials to Applications 2024, 13115 (2024).
Realization of high-fidelity CZ gate based on a double-transmon coupler	R. Li, K. Kubo, Y. Ho, Z. Yan, Y. Nakamura, H. Goto	Physical Review X 14, 041050 (2024).
Demonstration of microwave single-shot quantum key distribution	F. Fesquet, F. Kronowetter, M. Renger, W. K. Yam, S. Gandorfer, K. Inomata, Y. Nakamura, A. Marx, R. Gross, K. G. Fedorov	Nature Communications 15, 7544 (2024).
Extensive search for axion dark matter over 1 GHz with CAPP's main axion experiment	S. Ahn, J. M. Kim, B. I. Ivanov, O. Kwon, H. S. Byun, A. F. van Loo, S. T. Park, J. Jeong, S. Lee, J. Kim, Ç. Kutlu, A. K. Yi, Y. Nakamura, S. Oh, D. Ahn, S. Bae, H. Choi, J. Choi, Y. Chong, W. Chung, V. Gkika, J. E. Kim, Y. Kim, B. R. Ko, L. Miceli, D. Lee, J. Lee, K. W. Lee, M. J. Lee, A. Matlashov, P. Parashar, T. Seong, Y. C. Shin, S. Uchaikin, V. Sergey, S. W. Youn, Y. K. Semertzidis,	Physical Review X 14, 031023 (2024).
Experimental Search for Invisible Dark Matter Axions around 22 μ eV	Y. Kim, J. Jeong, S. W. Youn, S. Bae, K. Lee, A. F. van Loo, Y. Nakamura, S. Oh, T. Seong, S. Uchaikin, J. E. Kim, Y. K. Semertzidis	Physical Review Letters 133, 051802 (2024).
Parameter Optimization of Josephson Parametric Amplifiers Using a Heuristic Search Algorithm for Axion Haloscope Search	Y. Kim, J. Jeong, S. Youn, S. Bae, A. F. van Loo, Y. Nakamura, S. Uchaikin, Y. K. Semertzidis	Electronics 13, 2127 (2024).
Comment on "Multivariable quantum signal processing (M-QSP): prophecies of the two-headed oracle"	H. Mori, K. Mizuta, K. Fujii	Quantum 8, 1512 (2024).
Improving Threshold for Fault-Tolerant Color-Code Quantum Computing by Flagged Weight Optimization	Y. Takada, K. Fujii	PRX Quantum 5, 030352 (2024).
Quantum tangent kernel	N. Shirai, K. Kubo, K. Mitarai, K. Fujii	Physical Review Research 6, 033179 (2024).
Measuring Trotter error and its application to precision-guaranteed Hamiltonian simulations	T. N. Ikeda, H. Kono, K. Fujii	Physical Review Research 6, 033285 (2024).
Nonlinear transformation of complex amplitudes via quantum singular value transformation	N. Guo, K. Mitarai, K. Fujii	Physical Review Research 6, 043227 (2024).
Feedback-Driven Quantum Reservoir Computing for Time-Series Analysis	K. Kobayashi, K. Fujii, N. Yamamoto	PRX Quantum 5, 040325 (2024).
Probabilistic channel simulation using coherence	B. Zhao, K. Ito, K. Fujii	Physical Review Research 6, 043316 (2024).
Scalable circuit depth reduction in feedback-based quantum optimization with a quadratic approximation	D. Arai, K. N. Okada, Y. Nakano, K. Mitarai, K. Fujii	Physical Review Research 7, 013035 (2025).
Continuous optimization by quantum adaptive distribution search	K. Morimoto, Y. Takase, K. Mitarai, K. Fujii	Physical Review Research 6, 023191 (2024).
Variational quantum eigensolver with embedded entanglement using a tensor-network ansatz	R. Watanabe, K. Fujii, H. Ueda	Physical Review Research 6, 023009 (2024).
Quantum kernel t-distributed stochastic neighbor embedding	Y. Kawase, K. Mitarai, K. Fujii	Physical Review Research 6, 043234 (2024).
Current numbers of qubits and their uses	T. Ichikawa, H. Hakoshima, K. Inui, K. Ito, R. Matsuda, K. Mitarai, K. Miyamoto, W. Mizukami, K. Mizuta, T. Mori, Y. Nakano, A. Nakayama, K. N. Okada, T. Sugimoto, S. Takahira, N. Takemori, S. Tsukano, H. Ueda, R. Watanabe, Y. Yoshida, K. Fujii	Nature Reviews Physics 6, 345 (2024).
A Two-Stage Solution to Quantum Process Tomography: Error Analysis and Optimal Design	S. Xiao, Y. Wang, J. Zhang, D. Dong, M. J. Gary, I. R. Petersen, H. Yonezawa	IEEE Transactions on Information Theory, 71, 1803 (2024).
Clustering theorem in 1D long-range interacting systems at arbitrary temperatures	Y. Kimura, T. Kuwahara	Communications in Mathematical Physics 406, 65 (2025).

発表論文リスト(つづき)

Title	Authors	Article
Feasibility of loop-gain tuning for general measurement systems inspired by quantum locking for DECIGO	T. Ishikawa, Y. Kawasaki, K. Tsuji, R. Shimizu, K. Umemura, B. Wu, S. Iwaguchi, Y. Michimura, K. Nagano, Y. Enomoto, K. Komori, S. Doki, A. Furusawa, S. Kawamura	Classical and Quantum Gravity 41, 215013 (2024).
All-optical measurement-device-free feedforward enabling ultra-fast quantum information processing	T. Yamashima, T. Kashiwazaki, T. Suzuki, R. Nehra, T. Nakamura, A. Inoue, T. Umeki, K. Takase, W. Asavanant, M. Endo, A. Furusawa	Optics Express 33, 5769 (2025).
Real-time observation of picosecond-timescale optical quantum entanglement towards ultrafast quantum information processing	A. Kawasaki, H. Brunel, R. Ide, T. Suzuki, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, T. Yamashima, A. Sakaguchi, K. Takase, M. Endo, W. Asavanant, A. Furusawa	Nature Photonics 19, 271 (2025).
Quantum anomalous, spin, and valley Hall effects in pentalayer rhombohedral graphene moiré superlattices	K. Kudo, R. Nakai, K. Nomura	Physical Review B 110, 245135 (2024).
Causal Classification of Spatiotemporal Quantum Correlations	M. Song, V. Narasimhachar, B. Regula, T. J. Elliott, M. Gu	Physical Review Letters 133, 110202 (2024).
Distillable entanglement under dually non-entangling operations	L. Lami, B. Regula	Nature Communications 15, 10120 (2024).
Postselected communication over quantum channels	K. Ji, B. Regula, M. M. Wilde	International Journal of Quantum Information 22, 2440012 (2024).
Toward practical generation of non-Gaussian states for time-domain-multiplexed optical quantum computer	W. Asavanant, A. Kawasaki, S. Konno, R. Ide, T. Suzuki, H. Brunel, K. Nakashima, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, F. China, S. Miki, H. Terai, T. Yamashima, A. Sakaguchi, R. Nehra, K. Takase, M. Endo, A. Furusawa	Proc. SPIE 13148 (2024).
Broadband generation and tomography of non-Gaussian states for ultra-fast optical quantum processors	A. Kawasaki, R. Ide, H. Brunel, T. Suzuki, R. Nehra, K. Nakashima, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, F. China, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, Y. Hirotsuka, T. Yamashima, A. Sakaguchi, K. Takase, M. Endo, W. Asavanant, A. Furusawa	Nature Communications 15, 9075 (2024).
Superconducting surface trap chips for microwave-driven trapped ions	Y. Tsuchimoto, I. Nakamura, S. Shirai, A. Noguchi	EPJ Quantum Technology 11, 56 (2024).
Long-term stability of squeezed light in a fiber-based system using automated alignment	T. Nakamura, T. Nomura, M. Endo, A. Sakaguchi, H. Ruofan, T. Kashiwazaki, T. Umeki, K. Takase, W. Asavanant, J. Yoshikawa, A. Furusawa	Review of Scientific Instruments 95, 093004 (2024).
High-performance fault-tolerant quantum computing with many-hypercube codes	H. Goto	Science Advances 10, eadp6388 (2024).
Improved real-space parallelizable matrix-product state compression and its application to unitary quantum dynamics simulation	R. Y. Sun, T. Shirakawa, S. Yunoki	Physical Review B 110, 085149 (2024).
Automatic quantum circuit encoding of a given arbitrary quantum state	T. Shirakawa, H. Ueda, S. Yunoki	Physical Review Research 6, 043008 (2024).
Generation of flying logical qubits using generalized photon subtraction with adaptive Gaussian operations	K. Takase, F. Hanamura, H. Nagayoshi, J. E. Bourassa, R. N. Alexander, A. Kawasaki, W. Asavanant, M. Endo, A. Furusawa	Physical Review A 110, 012436 (2024).
Implementing arbitrary multimode continuous-variable quantum gates with fixed non-Gaussian states and adaptive linear optics	F. Hanamura, W. Asavanant, H. Nagayoshi, A. Sakaguchi, R. Ide, K. Fukui, P. van Loock, A. Furusawa	Physical Review A 110, 022614 (2024).
Hybrid Approach to Mitigate Errors in Linear Photonic Bell-State Measurement for Quantum Interconnects	B. E. Asenbeck, A. Kawasaki, A. Boyer, T. Darras, A. Urvoy, A. Furusawa, J. Laurat	PRX Quantum 5, 030331 (2024).
Generation of multi-photon Fock states at telecommunication wavelength using picosecond pulsed light	T. Sonoyama, K. Takahashi, T. Sano, T. Suzuki, T. Nomura, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, K. Takase, W. Asavanant, M. Endo, A. Furusawa	Optics Express 32, 32387 (2024).
Multipartite continuous-variable optical quantum entanglement: Generation and application	W. Asavanant, A. Furusawa	Physical Review A 109, 040101 (2024).
Reversibility of quantum resources through probabilistic protocols	B. Regula, L. Lami	Nature Communications 15, 3096 (2024).
No-go theorem for entanglement distillation using catalysis	L. Lami, B. Regula, A. Streltsov	Physical Review A 109, 050401 (2024).



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>