

2025

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

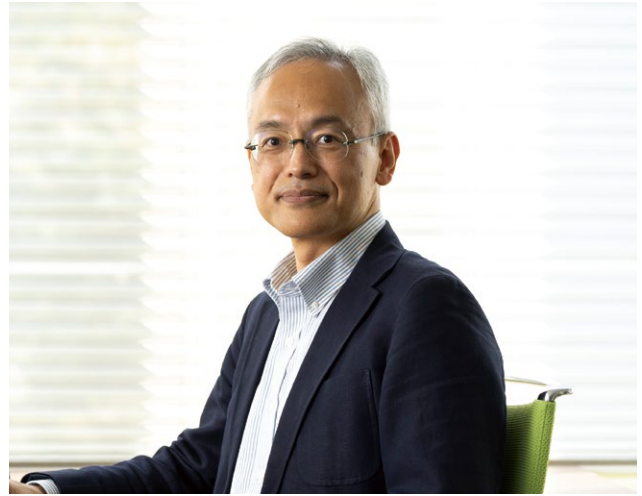
年間活動報告



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	15
量子技術イノベーション拠点概要	16
RQC 2025年度トピックス	19
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	20
• 超伝導量子シミュレーション研究チーム	22
• 超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット	24
• 超伝導量子計算システム研究ユニット	26
• ハイブリッド量子回路研究チーム	28
• 光量子計算研究チーム	30
• 光量子制御研究チーム	32
• ナノフォトニック共振器量子電気力学研究チーム	34
• 量子多体ダイナミクス研究チーム	36
• 冷却原子量子システム研究チーム	38
• 浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム	40
• 半導体量子情報デバイス研究チーム	42
• 半導体量子情報デバイス理論研究チーム	44
• 量子計算理論研究チーム	46
• 量子情報物理理論研究チーム	48
• 量子計算科学研究チーム	50
• 量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム	52
• 量子計算機システムデザイン研究チーム	54
• 量子複雑性解析理研白眉研究チーム	56
• 数理量子情報理研白眉研究チーム	58
• 理研 RQC- 富士通連携センター	60
• センター長室	62
発表論文リスト	72

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。

昨年度は、誕生100周年を迎えた量子力学理論に関する様々なイベントやシンポジウムが開催されました。特に大阪・関西万博では、量子コンピュータのVR体験展示を行い、約1,750人が参加しました。終日、順番待ちのため長蛇の列ができるほどの人気で、参加者からは「万博で一番楽しい展示だった」との声も聞かれました。

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、冷却原子方式の研究に挑んできました。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。また、2025年度には新たに1チームを設置し、計算機エンジニアリングを量子計算の分野で創出する研究開発に着手しました。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。

2025年4月には、理研 RQC- 富士通連携センターにおいて、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ました。そして、2026年3月には、144量子ビットチップを搭載した新型量子コンピュータ「叡-II（エイツー）」の量子計算クラウドサービスを開始しました。「叡-II」システムの開発と公開は、量子コンピュータの実用化に向けた重要な一歩であり、本システムでは量子ビットの長寿命化や量子演算の忠実度向上を実現することで、144量子ビットチップの演算能力を向上させることに成功しました。今後は、将来の誤り耐性量子コンピュータ（FTQC）の実現に向けた研究開発を進めていきます。

また当センターは、政府が推進する量子技術イノベーション戦略に基づき設置された「量子技術イノベーション拠点」全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。

2026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2025年度に新たに1つの研究チームを設置し、合計21の研究チームからなります。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

量子計算機システムデザイン研究チーム：鈴木 泰成

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

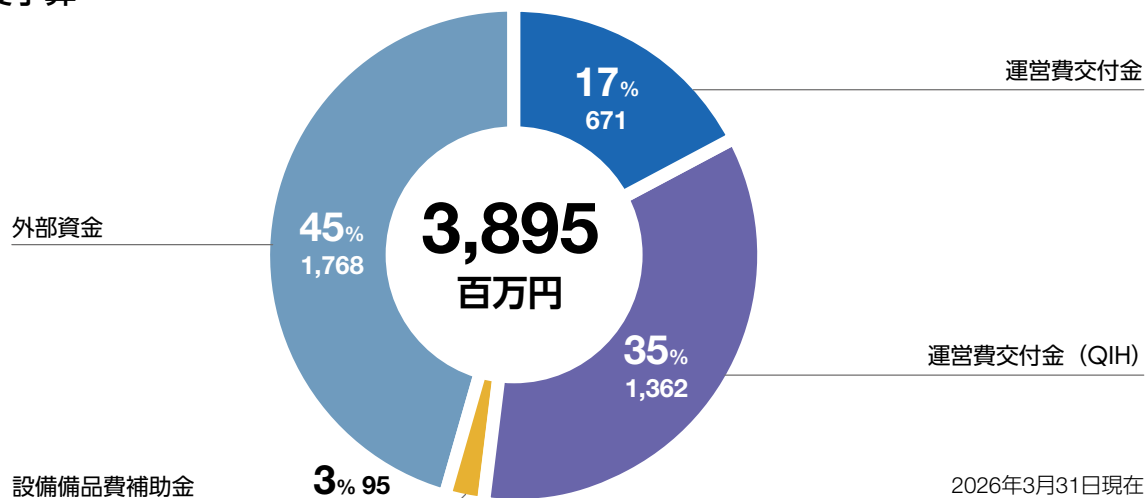
理研RQC-富士通連携センター：中村 泰信

センター長室：萬 伸一

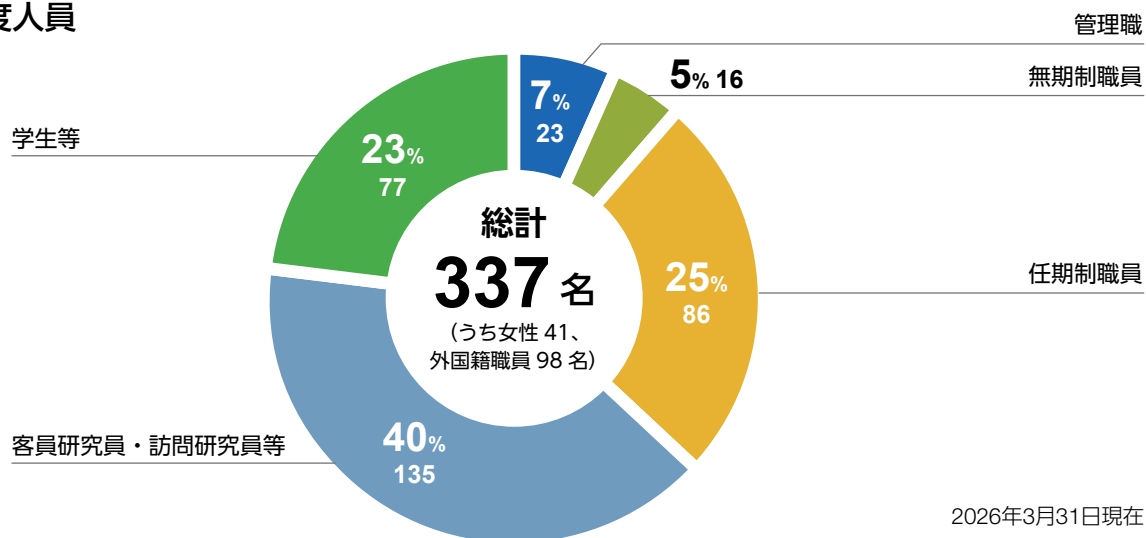
■ 超伝導 ■ 光 ■ 原子 ■ 電子 ■ 半導体 ■ 理論 ■ マネジメント

量子コンピュータ研究センター概要 (つづき)

2025年度予算



2025年度人員



RQC Colloquiums and RQC Seminars

FY2025 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。2025年度は12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
33	April 4, 2025	Prof. Dong Daoyi	Australian AI Institute, University of Technology Sydney (Australia)	Optimization and error analysis in quantum tomography, and quantum autoencoders
34	May 12, 2025	Prof. Sabrina Maniscalco	Algorithmiq Ltd. the University of Helsinki (Finland)	Making Quantum Matter: A Case Study in Application-Driven Quantum Computing for Chemistry and Life Sciences
35	May 29, 2025	Prof. Kim Yoon-Ho	Department of Physics, Pohang University of Science and Technology (Korea)	Learning more about Quantum Systems via Weak Interactions and Measurements
36	July 23, 2025	Dr. Thomas Noel	Infleqtion, Inc. (USA)	Benchmarking and Fault-Tolerant Operation of a Neutral Atom Quantum Processor
37	September 10, 2025	Prof. Radim Filip	Palacky University Olomouc (Czech Republic)	Quantum Non-Gaussianity
38	October 21, 2025	Prof. Naoki Yamamoto	Keio University (Japan)	Quantum Algorithmic Primitive for Quantum Machine Learning
39	November 7, 2025	Prof. Kae Nemoto	Okinawa Institute of Science and Technology (Japan)	Quantum Computer Architecture from FTQC to Near-Future Quantum Processors
40	December 25, 2025	Prof. Leonid Glazman	Yale University (USA)	Non-Equilibrium Quasiparticles in Superconducting Qubits
41	January 9, 2026	Dr. Matthias Troyer	Microsoft Inc. (USA)	Quantum, AI and the Path to Commercial Advantage
42	February 5, 2026	Prof. Barry C. Sanders	University of Calgary (Canada)	Superposing Coherent States for Fun & Profit
Special	February 19, 2026 (onsite)	Dr. John Martinis	Qolab inc. (USA)	Do Macroscopic Variables Obey Quantum Mechanics?
43	March 11, 2026	Dr. Jaw-Shen Tsai	RIKEN (Japan)	Science and Technology of Superconducting Macroscopic Quantum States - A Journey around Josephson Qubits

FY2025 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。2025年度は69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
189	April 16, 2025	Prof. Xiao Zheng	Fudan University (China)
190	April 17, 2025	Dr. Sorawis Sangtawesin	School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology (Thailand)
191	April 10, 2025	Mr. Lee Yun-Yan	Australian National University (Australia)
192	April 10, 2025	Dr. Xiao Shuixin	Australian National University (Australia)
193	April 23, 2025	Dr. Daniel Herr	d-fine (Switzerland)
194	May 8, 2025	Dr. Thomas Isaac Layton	JSPS, RIKEN (Japan)
195	May 15, 2025	Prof. Sandro Wimberger	University of Parma, and INFN (Italy)
196	May 16, 2025	Mr. Daniele Lamberto	University of Messina (Italy)
197	May 19, 2025	Mr. Gabriele Orlando	University of Messina (Italy)
198	May 23, 2025	Mr. Andrea Zappalà	University of Messina (Italy)
199	May 26, 2025	Mr. Samuel Napoli	University of Messina (Italy)
200	May 21, 2025	Mr. Michael Tschaffon	Institut für Quantenphysik, Universität Ulm (Germany)
201	May 22, 2025	Dr. Roberto Stassi	University of Messina (Italy)
202	May 28, 2025	Prof. Salvatore Savasta	University of Messina (Italy)
203	May 30, 2025	Prof. Yuto Ashida	The University of Tokyo (Japan)
204	July 28, 2025	Dr. Alex W. Chin	Sorbonne University & CNRS (France)
205	June 26, 2025	Prof. Gokul Subramanian Ravi	University of Michigan, Computer Science and Engineering (USA)
206	July 23, 2025	Dr. Yasunari Suzuki	RIKEN (Japan)
207	August 6, 2025	Prof. Hossein Sadeghpour	Harvard University, Institute for Theoretical Atomic, Molecular and Optical Physics (USA)
208	July 30, 2025	Mr. Thomas Lagoutte - Ferre	ENS Paris-Saclay (France)
209	August 18, 2025	Dr. Haruna Katayama	Hiroshima University (Japan)
210	July 25, 2025 (onsite)	Prof. Matthias Christandl	University of Copenhagen (Denmark)
211	July 25, 2025 (onsite)	Prof. Wang Xin	Hong Kong University of Science and Technology (China)
212	July 25, 2025 (onsite)	Prof. Li Yinan	School of Artificial Intelligence, Wuhan University (China)
214	August 12, 2025	Mr. Zheng Ri-Hua	Fuzhou University (China)
215	August 8, 2025	Prof. Chen Ye-Hong	Fuzhou University (China)
216	August 14, 2025	Mr. Yan Ke-Xiong	Fuzhou University (China)
217	August 13, 2025	Prof. Liu Tao	South China University of Technology (China)
218	August 15, 2025	Prof. Yang Chuiping	Hangzhou Normal University (China)
219	August 20, 2025 (onsite)	Prof. Xiang Zeliang	Sun Yat-Sen University (China)
220	August 21, 2025 (onsite)	Mr. Gong RuiYang	Sun Yat-Sen University (China)
221	August 25, 2025	Dr. Chen MingYuan	Nanjing University (China)
222	November 10, 2025	Dr. Alexander Poddubny	Weizmann Institute of Science (Israel)
223	September 2, 2025	Ms. Zou YuHong	Nanjing University (China) College of Engineering and Applied Sciences (USA)
224	September 3, 2025	Ms. She Min	Nanjing University (China)

No.	Date	Speaker	Affiliation
225	September 22, 2025	Dr. Steven Mark Anlage	Quantum Materials Center, University of Maryland (USA)
226	September 25, 2025	Dr. Cheng-Yun Hsieh	National Taiwan University (Taiwan)
227	October 1, 2025	Dr. Mustafa Bakr	University of Oxford (UK)
228	September 25, 2025	Dr. Nikita Astrakhantsev	Google Quantum AI (USA)
229	November 4, 2025	Prof. Li FuLi	Xi'an Jiaotong University (China)
230	September 19, 2025	Dr. Zhou ZhengYang	Zhejiang Sci-Tech University School of Science (China)
231	September 17, 2025	Mr. Utkarsh Azad	Xanadu Quantum Technologies Inc. (Canada)
232	October 2, 2025	Dr. Korenobu Matsuzaki	RIKEN (Japan)
233	September 29, 2025	Dr. Mostafizur Rahaman Laskar	IBM Quantum, IRL Bangalore (India)
234	November 11, 2025	Prof. Li FuLi	School of Physics, Xi'an Jiaotong University (China)
235	September 25, 2025	Prof. Stefan Ulmer	Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (Germany) RIKEN (Japan)
236	October 17, 2025	Dr. Tyler A. Cochran	QuEra Computing Inc. (USA)
237	October 20, 2025	Dr. Chu Kai-I	National Central University (Taiwan)
238	October 21, 2025	Dr. David Herrera-Martí	CEA-List, Grenoble (France)
239	October 22, 2025	Prof. Ku Huan-Yu	National Taiwan Normal University (Taiwan)
240	October 24, 2025 (onsite)	Mr. Chen Po-Yang	National Taiwan Normal University (Taiwan)
241	October 24, 2025 (onsite)	Mr. Wu Chao-Hsien	National Taiwan Normal University (Taiwan)
242	October 28, 2025	Dr. Svend Krøjer Møller	Niels Bohr Institute (Denmark)
243	December 9, 2025	Mr. Linus Ekstrom	Honda Research Institute Europe (Japan)
244	November 7, 2025	Prof. XueYue (Sherry) Zhang	Columbia University (USA)
245	November 20, 2025	Dr. Pawel Wocjan	IBM Quantum (USA)
246	December 4, 2025	Dr. Chung-Ting Ke	Academia Sinica (Taiwan)
247	November 20, 2025 (onsite)	Dr. Jeroen Verjauw	IQM Quantum Computers (Finland)
248	December 15, 2025	Prof. Kay Brandner	University of Nottingham (UK)
249	December 22, 2025	Prof. Jens Koch	Department of Physics and Astronomy, Northwestern University (USA)
250	December 19, 2025	Prof. Hoi IoChun	City University of Hong Kong (China)
251	January 8, 2026	Dr. Maxwell Drimmer	Department of Physics, ETH Zürich (Switzerland)
252	February 4, 2026	Prof. William D. Oliver	MIT, EECS and Physics (USA)
253	January 22, 2026	Prof. Jean-Jacques Slotine	MIT (USA)
254	March 13, 2026	Prof. En-Jui Kuo	National Yang Ming Chiao Tung University (Taiwan)
255	February 13, 2026	Dr. Graeme Pleasance	University of Stellenbosch (South Africa)
256	March 3, 2026	Dr. Robert Loew	University of Stuttgart (Germany)
257	February 19, 2026	Prof. Adrian Lupascu	University of Waterloo (Canada)
258	March 3, 2026	Dr. Raymond W. Simmonds	National Institute of Science and technology (USA)

海外

【ヨーロッパ】

- B. ヴェルキン低温物理工学研究所
- フランス国立科学研究センター
- デルフト工科大学
- パリ高等師範学校
- エコール・ポリテクニク
- ベルリン自由大学
- インペリアル・カレッジ・ロンドン
- オーストリア科学技術研究所
- 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
- ランカスター大学
- マリエッタ・ブラウ研究所
- マックス・プランク量子光学研究所
- イギリス国立物理学研究所
- ニールス・ボーア研究所
- パラツキー大学
- アーヘン工科大学
- ピサ高等師範学校
- スイス連邦工科大学ローザンヌ校
- アウグスブルク大学
- バーゼル大学
- グラスゴー大学
- ハンブルク大学
- シュトゥットガルト大学
- バスク大学
- テュービンゲン大学
- ウィーン大学
ほか

【北米】

- コーネル大学
- フロリダ州立大学
- ハーバード大学
- IBM
- Intel Corporation
- マギル大学
- マサチューセッツ工科大学
- プリンストン大学
- ノートルダム大学
- カリフォルニア大学バークレー校
- シャーブルック大学
ほか

【アジア・オセアニア】

- オーストラリア国立大学
- 基礎科学研究所 (IBS) アクシオン・精密物理研究センター (CAPP)
- グリフィス大学
- キング・ファハド石油鉱物大学
- 清華大学
- シンガポール国立大学
- ニューサウスウェールズ大学
ほか

国内

【研究機関】

- 分子科学研究所
- 高エネルギー加速器研究機構（KEK）
- 産業技術総合研究所
- 情報通信研究機構
ほか

【大学】

- | | |
|---------------|-------------|
| ■ 北海道大学 | ■ 静岡大学 |
| ■ 東京科学大学 | ■ 総合研究大学院大学 |
| ■ 国際基督教大学 | ■ 東京大学 |
| ■ 近畿大学 | ■ 東北大学 |
| ■ 京都大学 | ■ 東京理科大学 |
| ■ 日本大学 | ■ 早稲田大学 |
| ■ 沖縄科学技術大学院大学 | ■ 横浜国立大学 |
| ■ 大阪大学 | ほか |

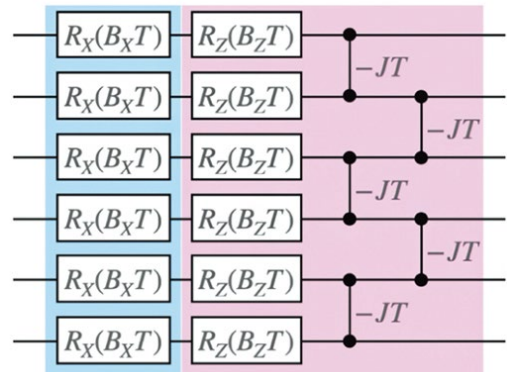
【民間企業】

- 株式会社 Fixstars Amplify
- 富士通株式会社
- 株式会社日立製作所
- 日本電信電話株式会社
- NTT 物性科学基礎研究所
- OptQC 株式会社
- キュエル株式会社
- 株式会社東芝
- 株式会社 Yaqumo
ほか

プレスリリース

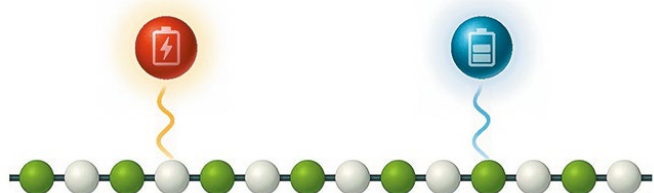
2025/4/11

周期駆動系で量子情報の非局在化を実証
ー学術研究のための量子コンピュータの本格利用が開始ー
量子計算科学研究チーム



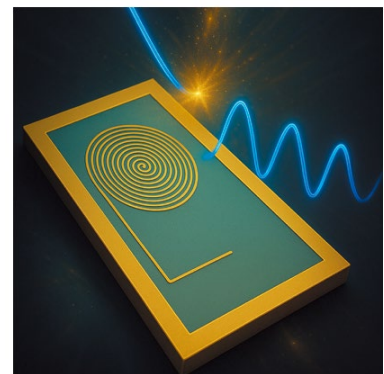
2025/5/13

トポロジカル量子電池の理論的構築
ー量子とトポロジーによる蓄給電理論の新提案ー
量子複雑性解析理研白眉研究チーム



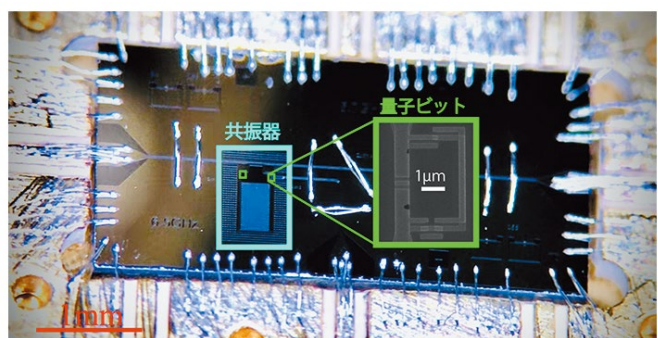
2025/6/13

世界最高水準の長寿命超伝導共振器を開発
ー量子メモリや誤り訂正の基盤技術として期待ー
ハイブリッド量子回路研究チーム



2025/6/17

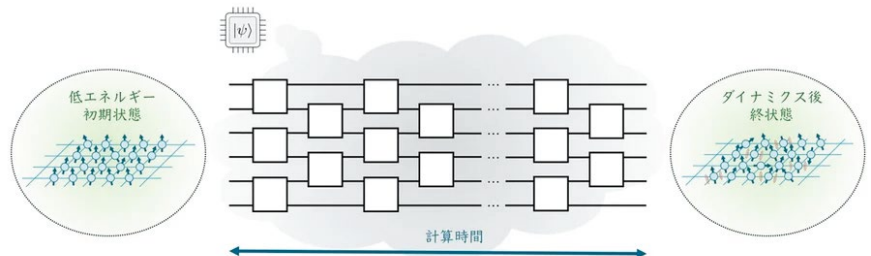
1光子で2原子を同時励起する現象を観測
ー超伝導量子回路が見せる新しい量子力学現象ー
超伝導量子シミュレーション研究チーム



2025/9/25

量子計算による低エネルギー状態シミュレーションの大幅な効率化を達成
—低温物質など物理・化学の中心問題への量子コンピュータの応用に道筋—

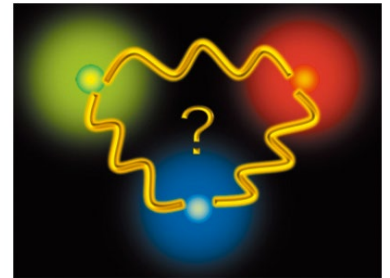
量子複雑性解析理研白眉研究チーム



2025/10/17

三者間量子もつれの根本的な限界を解明
—自然界における有限温度の量子もつれの長年の謎に決着—

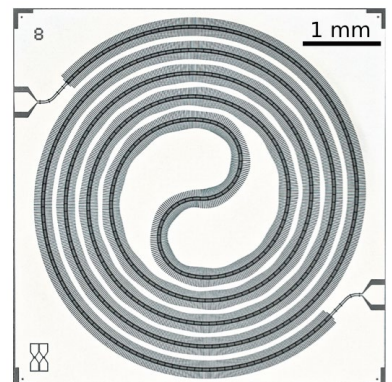
量子複雑性解析理研白眉研究チーム



2025/10/30

量子限界に迫る超低雑音・広帯域マイクロ波増幅器を開発
—超伝導量子コンピュータの読み出し効率の大幅向上へ—

超伝導量子エレクトロニクス研究チーム

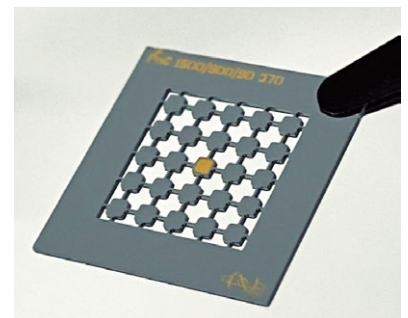


2025/12/9

800万回以上振動が続く超伝導の「太鼓」の作製に成功
—量子センシングや量子メモリへの応用に期待—

超伝導量子エレクトロニクス研究チーム

ハイブリッド量子回路研究チーム

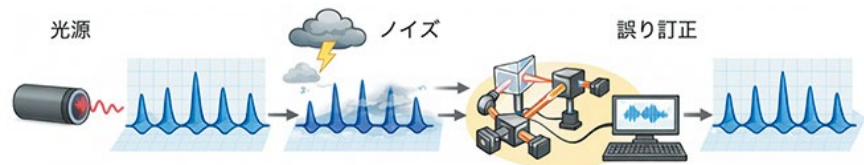


プレスリリース (つづき)

2026/2/26

光量子コンピュータの誤り耐性を理論的に証明
 —一般的な環境ノイズを踏まえた新たな開発指針を提案—

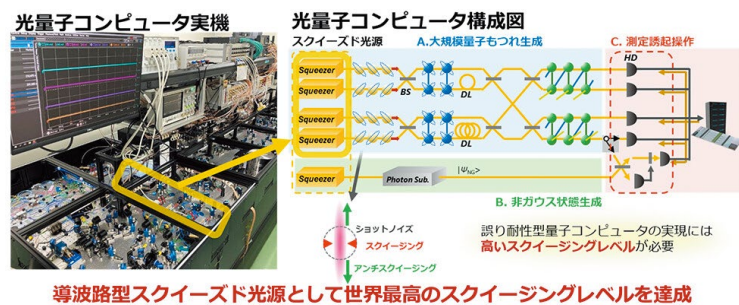
量子計算理論研究チーム



2026/3/5

導波路型光デバイスによる世界最高品質のスクイズド光生成に成功
 —信頼性の高い実用的な光量子コンピュータの実現に大きく前進—

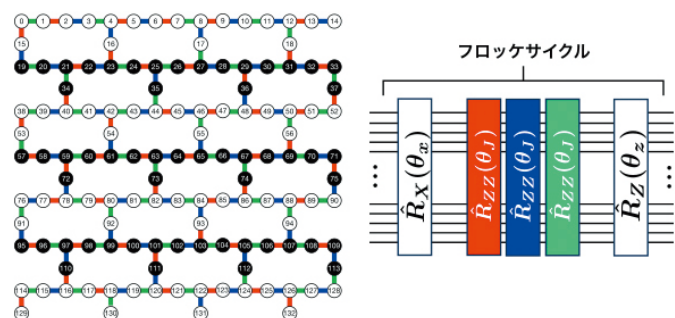
光量子計算研究チーム



2026/3/12

量子コンピュータで磁化の規則的振動を観測
 —133量子ビットの2次元系で実証した量子有用性—

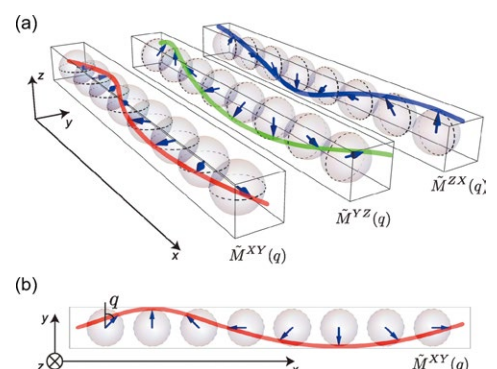
量子計算科学研究チーム



2026/3/23

量子のもつれを“螺旋 (らせん)”で読む
 —個別制御に頼らない量子状態解析法を開発—

量子多体ダイナミクス研究チーム



受賞報告

2025/8/12

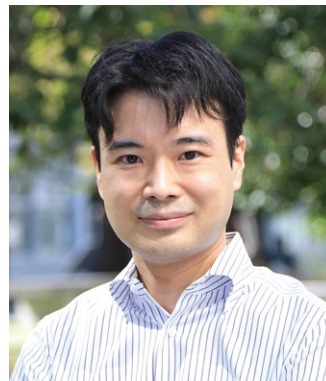
Jennings Asher Curtis 特別研究員、並びに他5名が「Best Poster Award」を受賞

浮揚電子量子情報理研白眉研究チームのJennings Asher Curtis特別研究員、並びに他5名が低温物理分野で最大規模かつ最も伝統ある国際会議である Low Temperature Physics Conferenceにおいて「Best Poster Award」を受賞されました。本賞は、研究の独創性・明瞭さ・将来性を評価し、若手研究者を含む発表者の学術的活動を奨励するものです。Jennings先生らは、「ヘリウム表面上の電子に対するRF反射率測定」に関する研究で受賞されました。

2025/11/12

青木 隆朗 チームディレクターが「第29回（令和7年度）松尾財団宅間宏記念学術賞」を受賞

ナノフォトニック共振器量子電気力学研究チームの青木 隆朗 チームディレクターが「第29回（令和7年度）松尾財団宅間宏記念学術賞」を受賞されました。本賞は、原子分子物理学と量子エレクトロニクスの研究で、特に顕著な研究者を対象に、毎年1件を選出します。青木先生は、「物理学分野における顕著かつ広範な影響力を示した、卓越した研究業績」を称えて受賞されました。



2026/1/9

Chung Hochan 研修生が「Best Student Poster Presentation Award」を受賞

浮揚電子量子情報理研白眉研究チームのChung Hochan研修生が、「Best Student Poster Presentation Award」を受賞されました。本賞は、第二回量子技術異分野交流会（IQuRa）において、参加者の投票により最も優秀であると選出された学生ポスターに授与される賞です。Chungさんは、「極低温浮揚電子による量子メモリ創生への礎」に関するポスター発表で受賞されました。

2026/3/23

川上 恵里加 理研白眉研究チームリーダーが「第4回（2025年度）応用物理学会ダイバーシティ&インクルージョン賞女性研究者研究奨励賞」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、「第4回（2025年度）応用物理学会ダイバーシティ&インクルージョン賞女性研究者研究奨励賞」を受賞されました。本賞は、応用物理分野で顕著な研究開発の成果をあげた女性研究者・技術者、および応用物理分野におけるダイバーシティ&インクルージョンに大きく貢献する研究または活動を行なった研究者・技術者または組織・グループの功績を讃える賞です。川上先生は、「浮揚電子を用いた量子情報処理基盤の研究」で受賞されました。



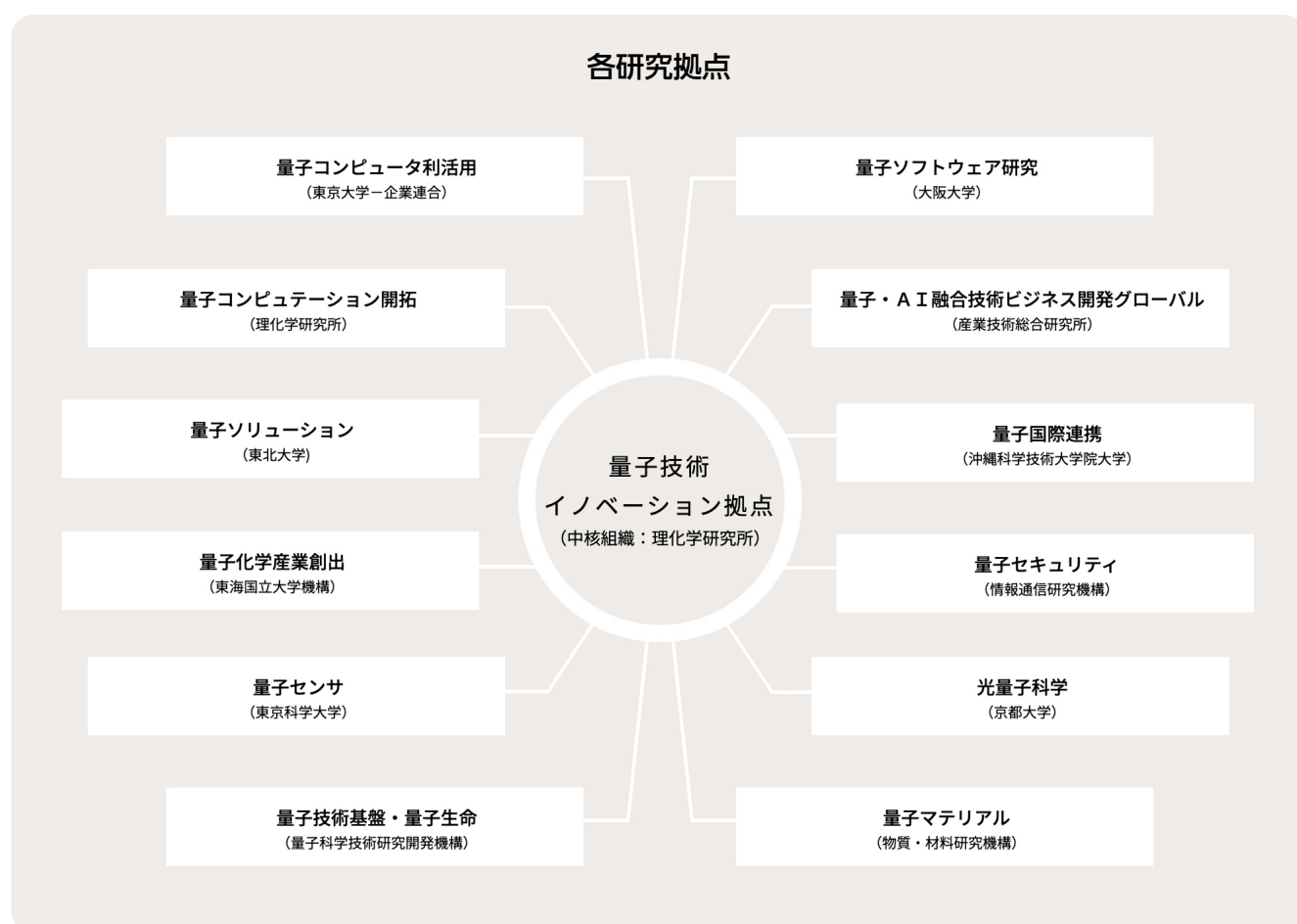
量子技術イノベーション拠点概要

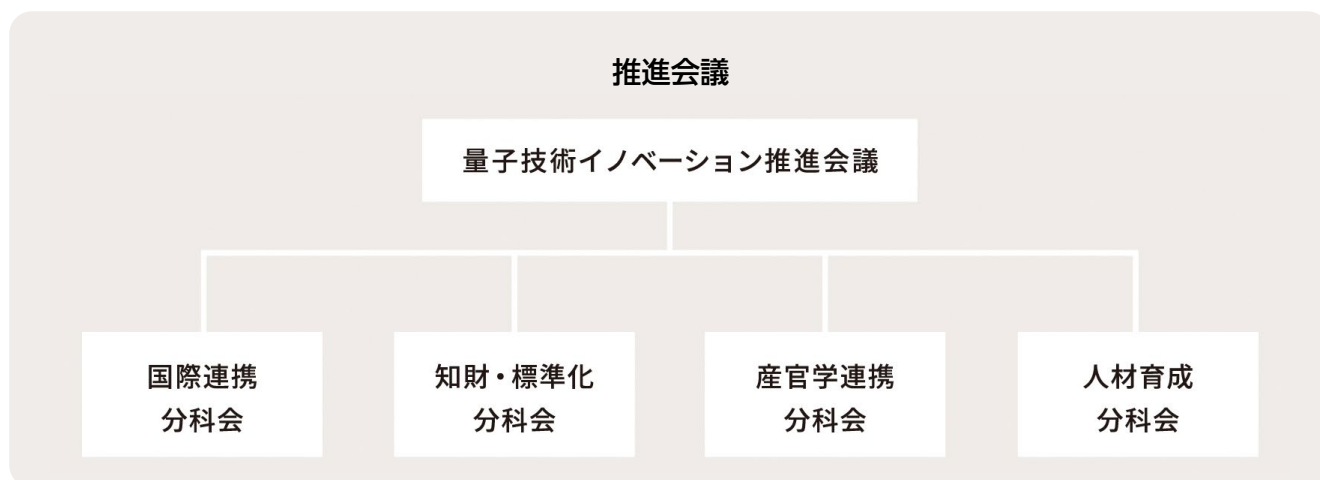


量子技術イノベーション12拠点全拠点一体で、量子技術の社会実装を加速

政府策定の「量子技術イノベーション戦略」（2020年1月）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）が整備されました。QIHは、当初 8拠点で始まりましたが、12拠点到拡大いたしました。

理化学研究所はQIHの中核組織として、12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、12拠点の一つでもあり、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

2025年度活動事例

QIHの活動として、2025年7月29日～8月2日に、量子科学・技術・イノベーション国際シンポジウム「Quantum Innovation 2025」が、大阪・関西万博にあわせて、コンgresスクエア グラングリーン大阪で開催されました。第5回となる今回、従来の3日間のプログラム構成に加え、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指すMoonshot Goal 6 Session、未来の量子社会の構築に向けたSIP Sessionを新たに追加し、計5日間の開催となりました。国内外から約1,000人が参加し、Quantum Innovation 2025は国内最大級の量子分野の国際イベントとなりました。



スポンサー展示



SIP session

その他にも、QIHは、量子技術の将来を担う人材の育成を担う文部科学省 量子サイエンススクールプログラム事業を実施、2025年度はサマースクール2025をOIST等で開催しました。それとともに、人材の流動化のため、量子人材と量子関連企業のマッチングの場としてジョブフェスタを開催しました。

また、アウトリーチ活動にも注力しております。関西万博をはじめ各種イベントに、量子コンピュータ「観」のVirtual Reality等を出展しており、好評をいただいております。

そのほかにも量子関連の情報流通の活性化のため、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。2026年4月で開設より3年となり、Q-PortalのX²のフォロワーが3,100名を超えました。

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）

2025年度実施のアウトリーチ活動より



大阪・関西万博 展覧会「エンタングル・モーメントー [量子・海・宇宙] × 芸術」にて、量子コンピュータのVR体験を出展（8月14日 - 20日）



サイエンスアゴラに量子コンピュータのVR体験を出展（10月25日 - 26日 テレコムセンタービルにて）



ジョブフェスタ2027（2026年3月2日お茶の水ソラシティ）を開催



サマースクール2025～第一線の講師陣と量子技術を学ぶ～を開催（2025年8月31日 - 9月6日 沖縄）



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

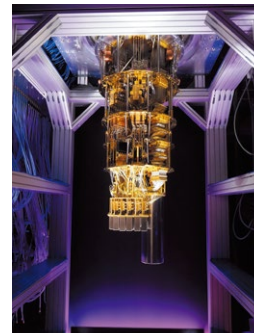
- 1990 東京大学 理学部 情報科学科卒業
- 1992 東京大学 理学系大学院 情報科学専攻 修士
- 1992 日本電気株式会社 入社 C&Cシステム研究所配属
- 1999 英国 Imperial College 客員研究員
- 2004 インターネットシステム研究所 主任研究員
- 2008 大阪大学 博士(情報科学)
- 2011 サービスプラットフォーム研究所 主幹研究員
- 2018 内閣府 政策統括官(科学技術・イノベーション担当)付 政策企画調査官
- 2020 理研 量子コンピュータ研究センター準備室 副主幹
- 2021 理研 量子コンピュータ研究センター センター長室 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どめを行う中核組織に関わる業務に従事しております。

世界最大級の256量子ビットの超伝導量子コンピュータを開発 —ハイブリッド量子コンピューティングプラットフォームの量子ビット数を4倍に増強し、 計算能力を拡大—

2021年4月に、富士通株式会社と共同で「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。当連携センターにて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、2025年4月に世界最大級^{注)}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ました。

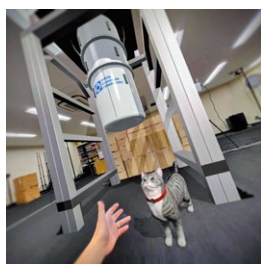
注) 世界最大級：外部ユーザーに提供されている超伝導量子コンピュータとしては世界最大級（2025年4月現在、富士通調べ）



開発した256量子ビットの超伝導量子コンピュータ

大阪・関西万博で量子コンピュータXR 体験を展示

2025年8月14日～20日、「EXPO 2025 大阪・関西万博」のEXPOメッセ「WASSE」にて、展覧会「エンタングル・モーメント — [量子・海・宇宙] × 芸術」（主催：内閣府、文部科学省）が開催され、7日間で62,360人の来場者がありました。当センターのブースでは、仮想空間と現実世界を融合させるXR（クロスリアリティ）技術で精密に再現した量子コンピュータを、バーチャル空間で学ぶことができる体験展示を行い、約1,750人が参加しました。終日、順番待ちのため長蛇の列ができるほどの人気で、参加者からは「万博で一番楽しい展示だった」との声も聞かれました。



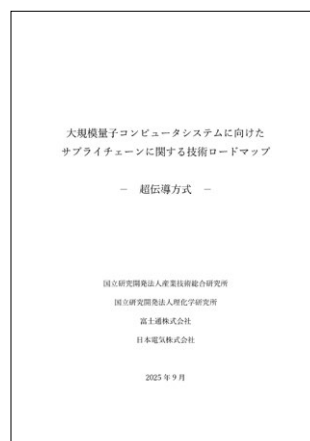
XRで再現した叡



VR体験をする参加者

大規模量子コンピューターシステムに向けた サプライチェーンに関する技術報告書を公開 —（第一報）超伝導方式のサプライチェーン—

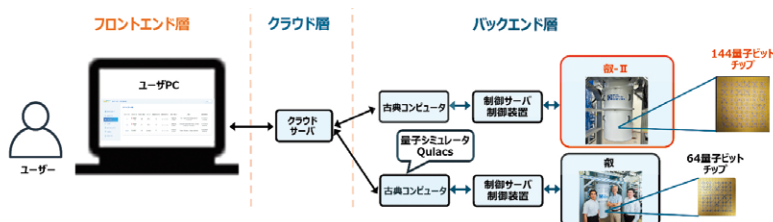
当センターは、国立研究開発法人産業技術総合研究所、日本電気株式会社、及び富士通株式会社と共同で、大規模量子コンピューターシステムに向けた俯瞰図・ロードマップの策定を進めており、その第一報として2025年9月9日、超伝導方式のサプライチェーンに関わる技術報告書を公開しました。



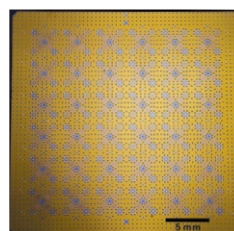
技術報告書 [PDF]
https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/press_release/pr2025/pr20250909/pr20250909.pdf

量子コンピュータ「叡-II」の運用開始 —144量子ビットチップによる量子コンピュータの実用化加速—

2026年3月26日、当センターと大阪大学との共同研究グループにおいて、144量子ビットチップを搭載した新型量子コンピュータ「叡-II（エイツー）」の量子計算クラウドサービスを開始しました。2023年3月に公開した64量子ビットチップを搭載した国産量子コンピュータ「叡」と比べて量子ビット数を2倍以上に増加させ、古典コンピュータでは実現しえない規模の量子計算を可能にします。さらに、量子ビットの寿命も大幅に増加させ、かつ、機器を冷やす冷凍機も含めた「叡-II」のシステム全体を、「叡」のシステム全体と同程度の大きさ収めることに成功しました。



「叡-II」と「叡」、「Qulacs」のシステム構成図



144量子ビットチップ (写真)



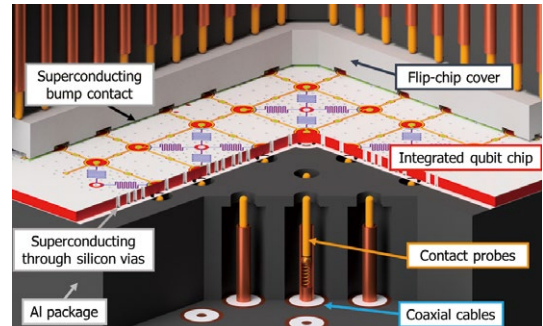
量子コンピュータ「叡-II」

超伝導量子エレクトロニクス研究チーム

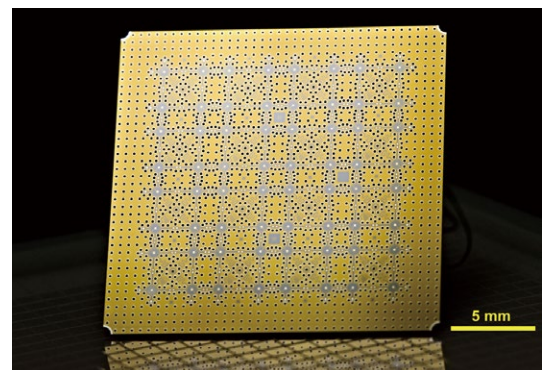
キーワード: 量子コンピュータ、超伝導回路、ジョセフソン接合、マイクロ波量子光学、回路量子電磁力学

研究室概要

当チームは、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。特に、超伝導量子回路を用いた大規模量子コンピュータの実現を目指し、拡張性の高い量子ビットチップの設計・製造および配線・パッケージング技術の研究開発を行っている。シリコン貫通ビアを備えた超伝導量子ビットチップとコンタクトプローブを用いること垂直配線が可能な独自の超伝導量子ビット集積回路方式を提案し、この構造を用いることで、64量子ビット超伝導量子コンピュータ「叡」、および144量子ビット超伝導量子コンピュータ「叡-II」の開発を行ってきた。更なる量子コンピュータの性能向上を目指した研究を進めており、ゲート性能向上のための全マイクロ波駆動による高忠実度な2量子ビットゲートの実現や、読み出し性能向上のための高速多重読み出し用フィルタ回路の実現などを行ってきた。超伝導量子コンピュータ周辺技術の研究も行っており、高性能な進行波型ジョセフソンパラメトリック増幅器やカインティックインダクタンスパラメトリック増幅器の開発など、量子コンピュータシステム全体の性能向上に向けた取り組みを行っている。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, S. Inoue, Y. Nakamura, and H. Goto, "Capacitively shunted double-transmon coupler realizing bias-free idling and a high-fidelity CZ gate", *Phys. Rev. Appl.* 23, 064069 (2025).
- 2 P.A. Spring, L. Milanovic, Y. Sunada, S. Wang, A.F. van Loo, S. Tamate, and Y. Nakamura, "Fast multiplexed superconducting-qubit readout with intrinsic Purcell filtering using a multiconductor transmission line", *PRX Quantum* 6, 020345 (2025).
- 3 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).
- 4 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).
- 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)

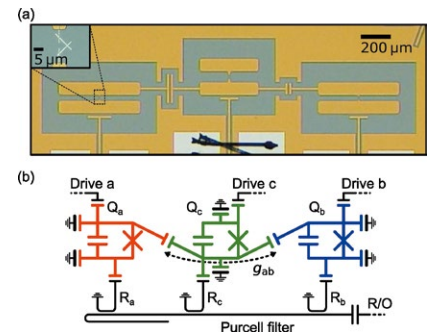
研究紹介

全マイクロ波制御による高忠実度な2量子ビットゲートの実現

当チームでは、ハイブリッド量子回路研究チームとの共同研究により、固定周波数量子ビットの大規模集積化のために必要な全マイクロ波制御による高忠実度な量子ビットゲートを実現した。固定周波数・全マイクロ波制御による集積化は、配線数の削減や量子ビットのコヒーレンス時間の確保の観点から優れた方式であるが、比較的遅いゲート速度と残留相互作用による忠実度の劣化が原因で、高忠実度な2量子ビットゲートの実現に困難があった。

我々は、固定周波数のカプラ量子ビットを導入することで、残留相互作用を従来よりも1桁程度抑制した上で、カプラ量子ビットとデータ量子ビット間の強い分散相互作用を利用することで、マイクロ波制御でも比較的高速に動作するゲート方式を提案した。この結果、ゲート時間140nsで忠実度99.7%の高忠実度な2量子ビットゲートを実現した。この手法で実現できるゲートはCZゲートと呼ばれる制御マイクロ波の位相に不敏感なゲートであるため、従来の2量子ビットゲートと比べてゲートの校正も容易であり、大規模な量子コンピュータの実装においても非常に有力なゲート方式である。

S. Shirai *et al.*, “High-fidelity all-microwave CZ gate with partial erasure-error detection via a transmon coupler”, arXiv:2511.01260 (2025).

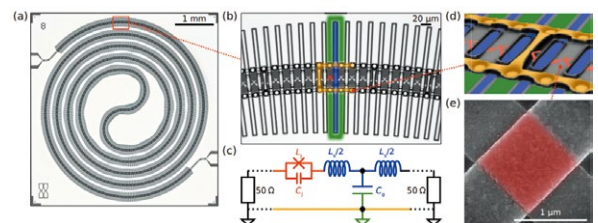


(a) 全マイクロ波制御2量子ビットゲートに用いた超伝導量子ビット回路。左右の2つのデータ量子ビットおよび中央のカプラ量子ビットから構成される。(b) 超伝導量子ビット回路の等価回路図。カプラ量子ビットを介した結合と直接的な結合の割合を調整することで、データ量子ビット間の残留相互作用を抑制している。

広帯域・低雑音ジョセフソンパラメトリック増幅器の開発

当チームでは、量子限界に迫る低付加雑音性能を実現する新しい方式の進行波型ジョセフソンパラメトリック増幅器を開発した。従来のジョセフソンパラメトリック増幅器は、製造プロセスに起因する内部損失や位相整合の不完全性によるゲインリップルが原因で、量子限界よりも大きな付加雑音をもつという課題があった。これに対して、我々は低損失なジョセフソン接合列コプレーナ線路にスタブ型の容量素子を加えた伝送線路からなるジョセフソンパラメトリック増幅器を構成した。また、位相整合回路としては、周期的インピーダンス変調方式を採用し、さらに窓関数変調を用いて滑らかなインピーダンス変化を実現することで、従来よりも大幅にゲインリップルの小さな増幅を実現した。これにより、帯域幅5GHzにわたり、増幅率が20dB以上の安定した増幅を実現し、付加雑音0.18量子、飽和電力-99dBmという高性能なジョセフソンパラメトリック増幅器を実現した。本研究により、量子ビット状態読み出しの性能を大幅に改善することが可能である。

C.W. Sandbo Chang *et al.*, “Josephson traveling-wave parametric amplifier based on a low-intrinsic-loss lumped-element coplanar waveguide”, Phys. Rev. Applied 24, 044081 (2025).



(a) ジョセフソンパラメトリック増幅器の全体像。回路面積の最小化のために伝送線路はらせん状の形状をもつ。(b) 単位セルの拡大図。LC伝送線路はジョセフソン接合とスタブ状の容量素子から構成される。(c) 単位セルの等価回路。(d) 単位セルの3次元画像。エアブリッジ構造によりグラウンドが接続される。(e) ジョセフソン接合の拡大図。

主要メンバー

(研究員) 玉手 修平
(研究員) BADRUTDINOV Alexander
(研究員) CHANG Chung Wai Sandbo
(研究員) 白井 昌太郎
(特別研究員) YAN Zhiguang
(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
(特別研究員) GUNYHO Andras Marton
(特別研究員) BAE SeongJae
(訪問研究員) HSIEH Yu-Chiang
(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、量子トモグラフィーの手法で忠実度の評価を行い、1ビットゲートと2ビットのゲート操作が可能な、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。第二の方式では、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、新たなスケーラブルな量子情報処理のプラットフォームになる可能性を示している。

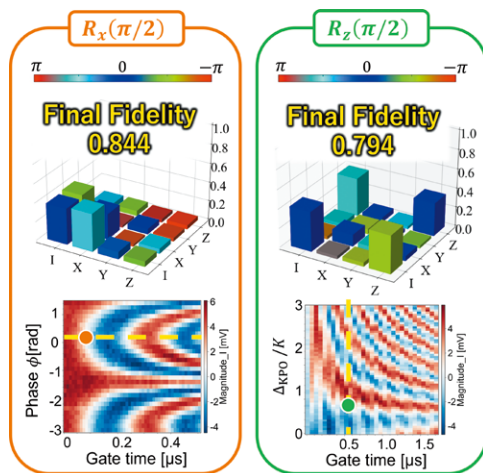


図1: KPO1ビット動作

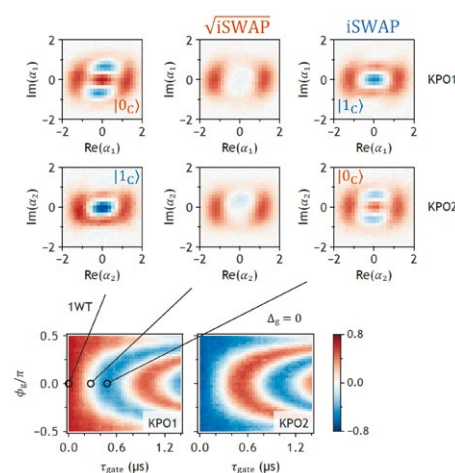


図2: KPO2ビット動作



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, and J. S. Tsai, "Coherent Control of Macroscopic Quantum States in a Single-Cooper-pair Box", *Nature*, 398, 786 (1999).

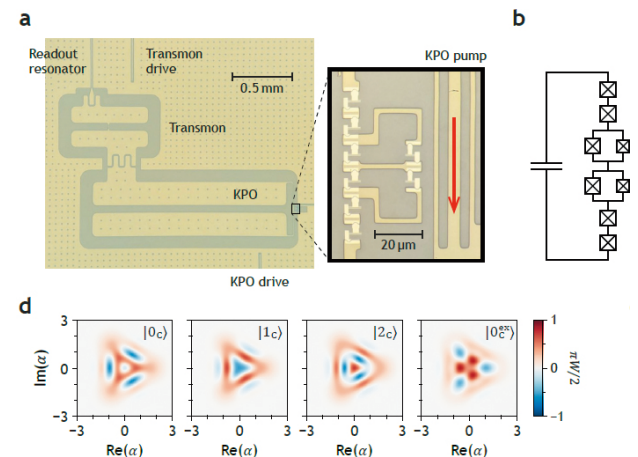
略歴

- 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

保護された猫キュートリット

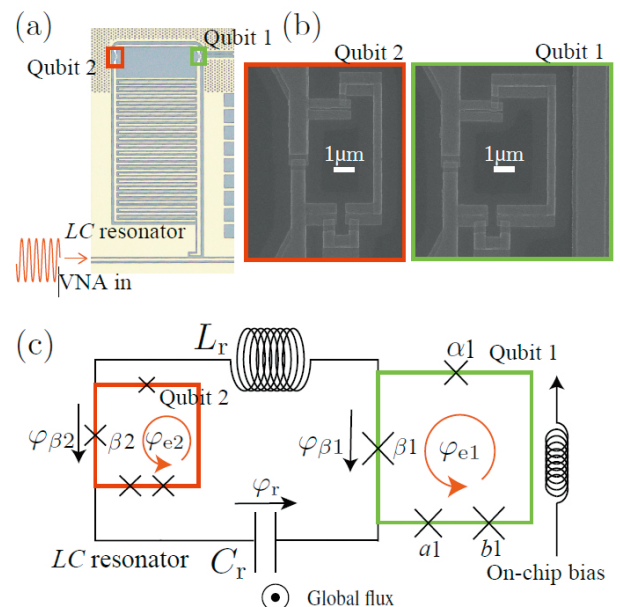
3光子KPOを実装し、保護されたボソンのキュートリット（3つの直交する量子状態の重ね合わせとして存在する量子情報の単位、qutrit）としての可能性を探った。三光子ラビ振動の実証と直接的なウィグナー関数測定により、三成分の猫状態の形成を明らかにすることで量子コヒーレンスを確認した。重要なのは、位相空間における呼吸のようなダイナミクスが観察されることであり、これは駆動量子系の特徴的な特徴である。このダイナミクスは、cat-qutrit多様体と励起状態の間の巨視的な時間的干渉から生じたものである。平均光子数における振動の周波数は、キュートリットと励起状態を隔てるエネルギーギャップを直接時間領域で測定し、キュートリット多様体保護の実験的特徴を確立した。さらに、平均光子数を制約する主要なメカニズムとして寄生的な高次ポンプ項を特定し、その緩和が保護最大化の必要条件であることを強調した。我々の発見は、三光子KPOの基本的な量子特性を明らかにし、キュートリットのプラットフォームとしての利用に向けた第一歩を確立した。



ボソンキュートリット写真と状態

1光子による2原子の同時励起

私たちは、共通のLC共振器に超強結合された2つの磁束量子ビットからなる超伝導回路を実験的に調べた。磁束量子ビットの大きな非調和性により、この系はスピン-スピン相互作用項を含む一般化ディッケハミルトニアンによって正しく記述できる。実験的に測定されたスペクトルにおいて、擬交差は、共振器から1つの光子を吸収することで2つの人工原子を同時に励起させるという特殊な相互作用の証拠を提供する。この多原子超強結合系は、励起数が保存されない非線形光学の研究への扉を開く。これにより、チップ上の量子情報処理タスクに新しいプロセスが可能になった。



超強結合磁束量子ビット写真と回路図

主要メンバー

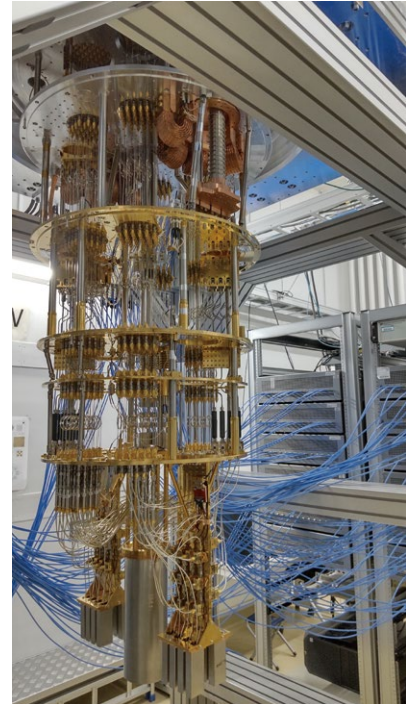
(特別研究員) XUE Hang

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、量子技術、マイクロ波工学、量子計算、量子誤り訂正

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「叡」と144量子ビットからなる「叡-II」が稼働し、クラウド公開されている。量子ビットチップの歩留まり・均一性向上とコヒーレンス時間の改善を進め、1量子ビットおよび2量子ビットゲート、初期化、読み出しの忠実度の向上を図る。古典コンピュータとのハイブリッドによるNISQ(ノイズな中規模量子コンピュータ)アプリケーションの探索や、小規模の量子エラー訂正符号の実装、多体量子系のシミュレーションなどの実験を進める。今後、さらなる量子ビット数の拡大に向けた要素技術—マイクロ波配線の高密度化やマイクロ波素子の小型化、複数のチップにまたがる量子制御など—の研究を行い、大規模量子エラー訂正可能なシステム実現への方向性を示し、古典コンピュータでは実行困難な計算を実行可能な量子コンピュータを、より現実のものに近づけることを目指す。



64量子ビット超伝導量子コンピュータ「叡」



阿部 英介 (D.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", *Phys. Rev. Lett.* 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", *Appl. Phys. Lett.* 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", *J. Appl. Phys.* 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 慶應義塾大学先端研究センター 特任准教授
- 2019 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「叡-II」のクラウド公開とテストベッド機開発

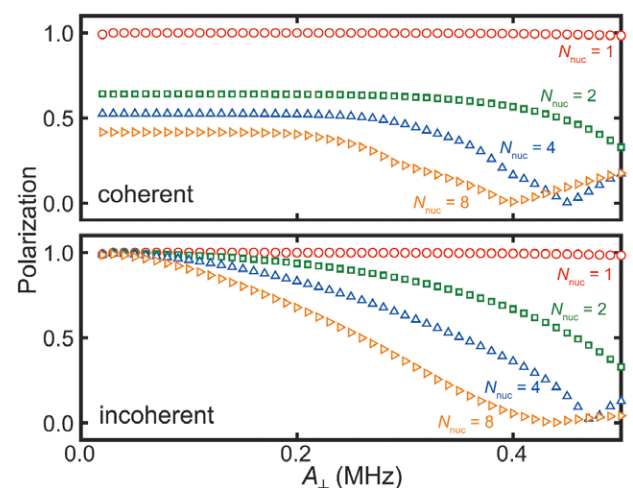
64量子ビット超伝導量子コンピュータ「叡」では、量子ビット制御・読み出しのための同軸ケーブルを量子ビットチップ背面へ垂直配線したタイラブルな正方格子配置の量子ビットデザインが採用されている。この方式の著しい特徴は、より大きな系への自然な拡張性であり、我々は 12×12 の正方格子配置144量子ビットからなるシステムを構築した。開発にあたって量子ビットコピーレンス時間を長寿化するとともに、64量子ビットシステムと同一の希釈冷凍機サイズのなかに、倍以上に増加したマイクロ波素子を収めることに成功している。144量子ビットシステムは「叡-II」として2026年3月にクラウド公開された。並行して、64量子ビットチップを2枚並べて同一のサンプルパッケージ内に格納・測定可能なテストベッド機を開発し、量子ビットチップの性能評価を進めている。テストベッド機は、新規にデザインされた量子ビットチップ評価の効率化、チップ間接続実験などの新技術開発への利用が見込まれる。



144量子ビット超伝導量子コンピュータ「叡-II」(右手前)とテストベッドシステム(左奥)

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 ($A_{\perp}$) と核スピ人数 (N_{nuc}) を変化させたときの核スピ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人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>

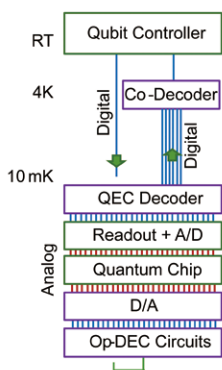
超伝導量子計算システム研究ユニット

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

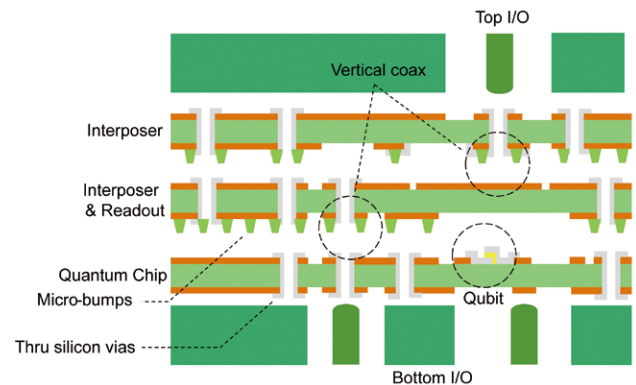
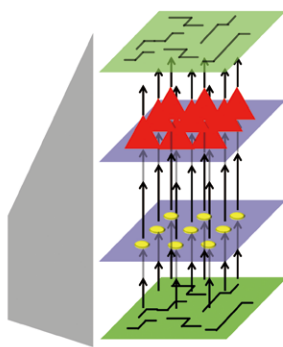
研究室概要

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。



超伝導量子コンピュータの積層型モジュールシステム



積層型モジュールシステムの実装例



田渕 豊 (D.Eng.) ユニットリーダー

主要論文

- 1 Y. Sunada, S. Kono, J. Ilves, T. Sugiyama, Y. Suzuki, T. Okubo, S. Tamate, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, "Efficient Tomography of Microwave Photonic Cluster States," *PRX Quantum* 7, 010323 (2026).
- 2 Y. Ueno, S. Imamura, Y. Tomida, T. Tanimoto, M. Tanaka, Y. Tabuchi, K. Inoue, and H. Nakamura, C3-VQA: Cryogenic counter-based co-processor for variational quantum algorithms, *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 6, 1-17 (2025).
- 3 D. Lachance-Quirion, S. Wolski, Y. Tabuchi, S. Kono, K. Usami, and 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, and 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, and Y. Nakamura. "Hybridizing ferromagnetic magnons and microwave photons in the quantum limit," *Physical Review Letters*, 113, p.083603 (2014).

略歴

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

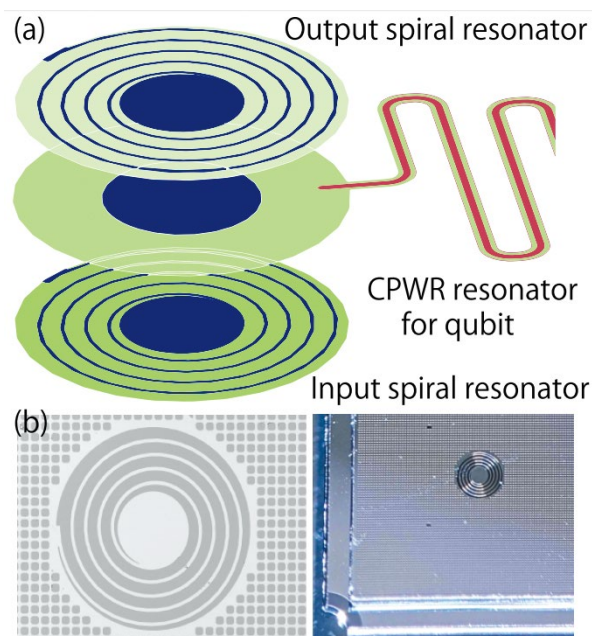
研究紹介

超伝導量子回路集積化に向けた基板間ワイヤレス信号伝送技術

超伝導量子コンピュータの大規模化に向けて、量子ビットおよび周辺回路の三次元集積化が重要な課題となっている。従来の多層実装では、基板間を直接電氣的に接続する配線コンタクトが必要であり、高い位置合わせ精度や接触信頼性がハードウェア設計上の大きな制約となっていた。

本研究では、基板貫通電極や完全な電氣的コンタクトを必要としない基板間信号伝送技術として、マイクロ波帯における変位電流を利用したワイヤレス信号伝送路を提案した。貼り合わせたケイ素基板の各面にスパイラル共振器を形成し、電磁結合を介して信号を伝達することで、配線コンタクトが不完全な場合でも基板間の信号伝送を可能とした。

特性評価により、共振周波数近傍において良好な伝搬特性と内層に配置した量子ビット読み出し回路との結合動作を確認した。本手法は、三次元集積化における配線・接続に関するハードウェア要求を大幅に緩和し、実装自由度の高い量子回路構成を可能にする技術として有用である。本成果は、2026年第73回応用物理学会春季学術講演会において報告した。



垂直ワイヤレス伝送を実現するスパイラル共振器と結合抑制電極
©CC-BY-SA4.0 Yutaka Tabuchi

固定周波数トランズモン型超伝導量子コンピュータのシステム改善

超伝導量子コンピュータの実用化に向けたシステム改善において、量子ゲートに伴う雑音が課題となっている。量子誤り訂正に必要な 10^{-3} 以下のエラー率を達成し、かつ拡張性を維持するためには、さらなる研究開発が不可欠である。2量子ビットゲートの駆動方式には、電流パルス駆動方式とパラメトリック誘起方式が存在するが、後者における課題は、マイクロ波駆動によって生じる不要なフロクサイドバンドが他の量子ビットに悪影響を及ぼし、エラー増大の原因となる点である。特に周波数が固定された量子ビットでは、製造時の周波数ばらつきも無視できない問題となっている。

本研究では、パラメトリック誘起量子ゲートに特有の不要なサイドバンドに着目し、その周波数を精密にシミュレーションした。そして、量子ビットの周波数ばらつきに対して最適な周波数構成を検討した。マイクロ波誘起ZZ相互作用が持つ駆動周波数の任意性を活かし、最適な周波数を選択することで、インコヒーレントリーケージなど非断熱遷移を抑制できることを示した。さらに、100量子ビット規模の量子コンピュータにおいて高い収率も得られた。この研究成果は、2025年米国物理学会3月会議にて報告した。

[1] Kazuhisa Ogawa, Yutaka Tabuchi, Makoto Negoro, High-yield integration design of fixed-frequency superconducting qubit systems using siZZle-CZ gates, arXiv:2603.21537 (2026)

主要メンバー

(基礎科学特別研究員) 上野 洋典
(テクニカルスタッフ) 政岡 文平

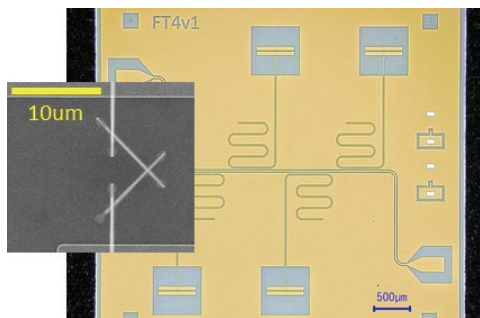
(テクニカルスタッフ) 小沢 みゆき
(テクニカルスタッフ) 川上 茂

ハイブリッド量子回路研究チーム

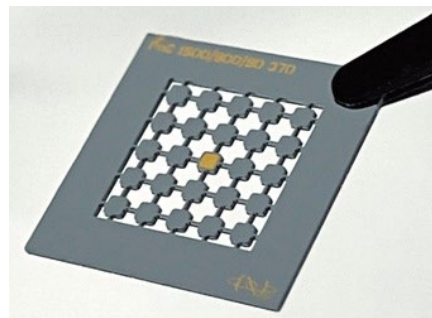
キーワード: ハイブリッド量子系、マイクロ波量子光学、電子トラップ、量子制御

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。特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、トラップ電子や機械振動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立しようとしている。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。



超高応力の窒化チタン薄膜を用いた機械振動子



野口 篤史 (Ph.D.) チームディレクター

主要論文

- 1 Y. Matsuyama, S. Shirai, I. Nakamura, M. Tokunari, H. Terai, Y. Hishida, R. Sasaki, Y. Tominaga, and A. Noguchi, "High-Q membrane resonators using ultra-high-stress crystalline TiN films", *Appl. Phys. Lett.* 127, 222202 (2025).
- 2 Y. Tominaga, S. Shirai, Y. Hishida, H. Terai, and A. Noguchi, "Enhancing Intrinsic Quality Factors Approaching 10 Million in Superconducting Planar Resonators via Spiral Geometry", *EPJ Quantum Technology* 12, 60 (2025).
- 3 Y. Tsuchimoto, I. Nakamura, S. Shirai, and A. Noguchi, "Superconducting surface trap chips for microwave-driven trapped ions", *EPJ Quantum Technology* 11, 56 (2024).
- 4 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).
- 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

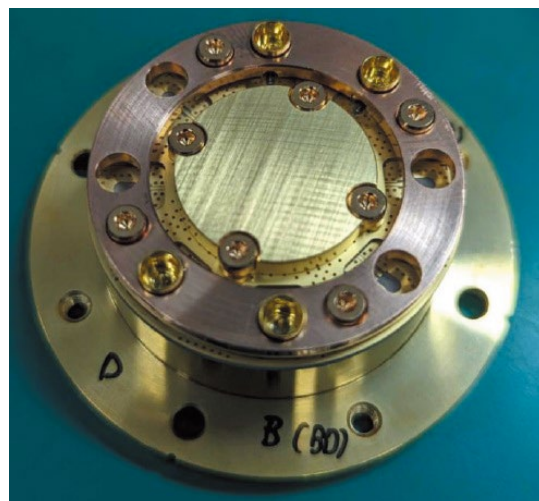
- 2013 大阪大学基礎工学研究科 学振特別研究員(PD)
- 2014 東京大学先端科学技術研究センター 特任研究員
- 2015 東京大学先端科学技術研究センター 学振特別研究員(PD)
- 2015 東京大学先端科学技術研究センター 特任助教 (-2018年)
- 2016 JST さきがけ研究員(兼任) (-2019年)
- 2019 東京大学総合文化研究科 准教授(現職)
- 2020 稲盛科学研究機構 InaRISフェロー(現職)
- 2020 理化学研究所 創発物性科学研究センター チームリーダー(-2021年)
- 2021 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター チーム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

研究紹介

高性能マイクロ波素子パッケージング技術

超伝導量子回路向けの高性能パッケージ技術について、設計データ、実装ノウハウ、評価情報を含む形でオープンソース公開を行った[1]。本技術は、超伝導量子ビットや高Qマイクロ波共振器の性能を劣化させる不要モードやパッケージ損失を抑制しつつ、高密度実装や高周波配線を可能にする実践的な実装基盤である。超伝導マイクロ波共振器を用いた評価では、輻射損失などのパッケージ起因損失の指標として、内部Q値 10^6 級まで到達している。公開データには、実際の量子デバイス実装に利用可能なCAD設計や加工・組立に関する情報も含まれており、研究機関間で再現性高く利用可能な形となっている。従来、研究室ごとに独自開発されることが多かった超伝導量子回路の実装技術を広く共有可能にしたことで、量子回路研究の高速化、標準化、人材育成に貢献した。また、コミュニティ主導での改良や派生設計の展開を可能にし、超伝導量子コンピューティング研究基盤の強化に寄与している。

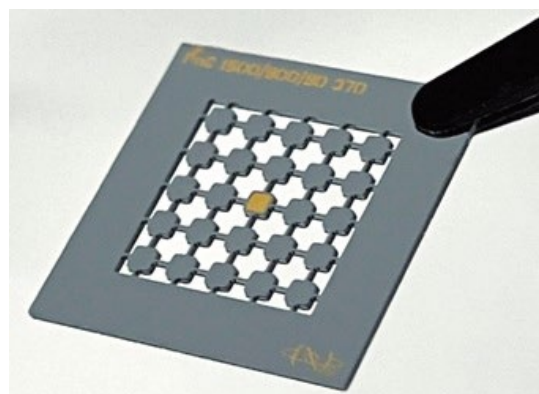
[1] S. Shirai. (2026). OS-PAQAGE (v1.0.1). Zenodo.



高性能超伝導回路用パッケージ

超伝導体で作られた高Q値薄膜機械振動子

超高応力の結晶性TiN薄膜を用いた高Q膜型機械共振子を開発し、その機械特性を評価した。結晶性TiNは高い内部応力と低損失を両立できる材料であり、本研究では数MHz帯の膜型共振子において極めて高い機械Q値を実現した。さらに、超伝導マイクロ波回路や量子デバイスとのハイブリッド化に適した材料・構造であることを示し、量子センシングや量子情報処理への応用可能性を明らかにした。また、磁場印加時の機械共振特性の変化など、超伝導状態と機械振動の相互作用に関する興味深い現象も観測された。本研究で得られた結果は、結晶性TiN薄膜が低損失な機械量子デバイス材料として有望であることを示している。さらに、今後より低温、特に極低温領域にまで冷却することで、熱励起や内部損失のさらなる低減により、機械共振子のQ値が一層向上する可能性が期待される。



超伝導窒化チタンで形成された薄膜機械振動子がシールド用のフォノンニック結晶の中に配置されている。

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 葛太郎
(特別研究員) FLECK Markus

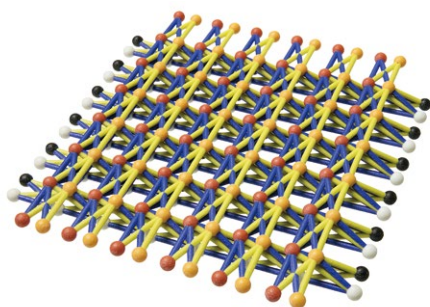
(基礎特別研究員) 六本木 雅生
(特別研究員) TIAN Yue
(特別研究員) 朴 渠培

光量子計算研究チーム

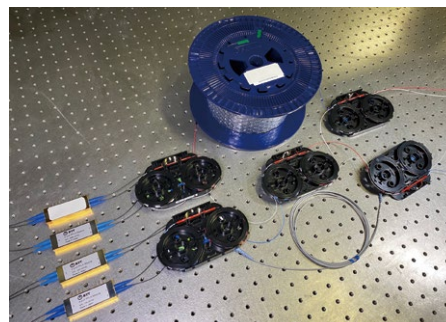
キーワード: 量子情報科学、量子光学

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事ができる。我々の方式の大きな強みは、原理的に高速な計算が可能であることである。量子的な光を生成する光パラメトリック増幅器の帯域は、10テラヘルツ程度もある。テレポーテーションが速度のネックになるが、5Gのテクノロジーと組み合わせることで、数十ギガヘルツの非常に速いクロックを持つ量子コンピュータの実現が可能である。更には、将来的に全光テレポーテーションと組み合わせることにより、10テラヘルツの帯域を有効利用する超高速の量子コンピュータも期待できる。



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 K. Hirota, T. Kashiwazaki, G. Ha, T. Yamashima, P. Jaturaphagorn, T. Suzuki, K. Takahashi, A. Kawasaki, A. Inoue, W. Asavanant, M. Endo, T. Umeki, and A. Furusawa, "Generation of 10-dB squeezed light from a broadband waveguide optical parametric amplifier with improved phase locking method", *Opt. Express* 34, 7958 (2026).
- 2 S. Yokoyama, A. Sakaguchi, W. Asavanant, K. Takase, Y. Chen, H. Nagayoshi, J. Yoshikawa, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, T. Hashimoto, T. Hiraoka, A. Furusawa, and H. Yonezawa, "Full-stack analog optical quantum computer with a hundred inputs", arXiv:2506.16147 [quant-ph] (2025).
- 3 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).
- 4 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).
- 5 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).

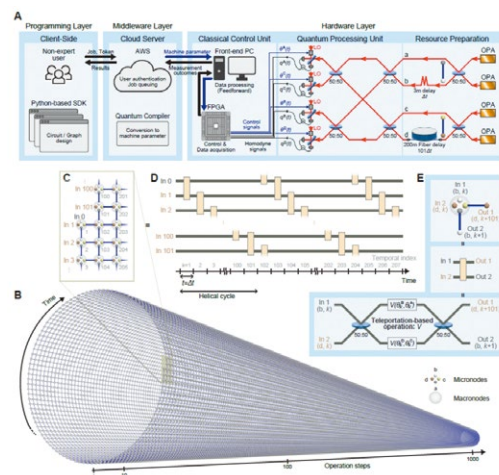
略歴

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

光量子コンピュータの性能評価

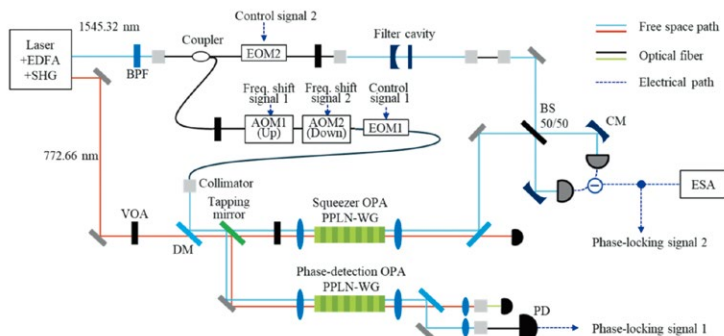
当チームは、光量子制御研究チームと共同で光量子コンピュータの開発を推進し、その詳細な性能評価を実施した。この光量子コンピュータは、時間分割多重化手法を用いた、測定誘起型のアナログタイプの光量子コンピュータである。具体的には、時間領域で大規模な量子エンタングルメントを生成し、同時刻に存在する4つの光モードに対して逐次的な測定を行う（図A）。この際、測定基底（測定位相）を制御することで、多様な線形変換操作を実現している。操作の基本単位は、一般化テレポーテーションによる2入力2出力の線形変換であり、これは同時刻にある4モードのうち2モードを入力とし、後続の2モードへと出力するプロセスである（図E）。この2入力2出力操作の検証のため、参照光モードと出力光モード間の量子相関を用いて量子操作の評価を行った。スクイーミング、回転、ビームスプリッター、CNOTなど、多様な変換行列を求め理論と比較し、その正当性を実証した。さらに、多ステップ操作として、マルチステップ量子テレポーテーションや、量子状態のルーティング実験を行い、実機が設計通りに動作することを確認した。



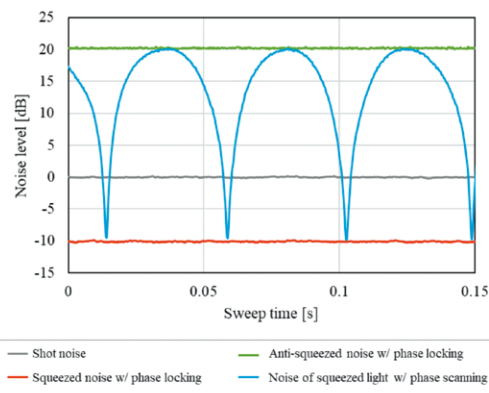
光量子コンピュータ実機

広帯域導波路光パラメトリック増幅器からの10 dB スクワイズド光生成

我々の光量子コンピュータではスクワイズド光から大規模量子エンタングルメントを生成して測定誘起のアナログ計算を行う。時間分割多重化手法により時間領域で大規模エンタングルメントを生成するため、広帯域のスクワイズド光が求められる。しかし、従来の共振器型のスクワイズド光生成器では共振器がスクワイズド光の帯域を制限してしまう。我々はNTT先端集積デバイス研究所との共同研究により高効率の導波路型スクワイズド光生成器を開発し、テラヘルツもの広帯域を持つスクワイズド光生成に成功した。次に求められるのは、スクワイズド光のスクワイズレベルを上げていくことで、光量子コンピュータの計算精度を良くすることである。我々はスクワイズド光の位相ロックに新たな手法を導入して、初めて導波路型広帯域スクワイズド光生成器から10 dBのスクワイズド光測定に成功した。



新たな光位相ロックシステムを導入した実験セットアップ
©Opt. Express 34, 7958 (2026).



生成されたスクワイズド光の測定結果
©Opt. Express 34, 7958 (2026).

主要メンバー

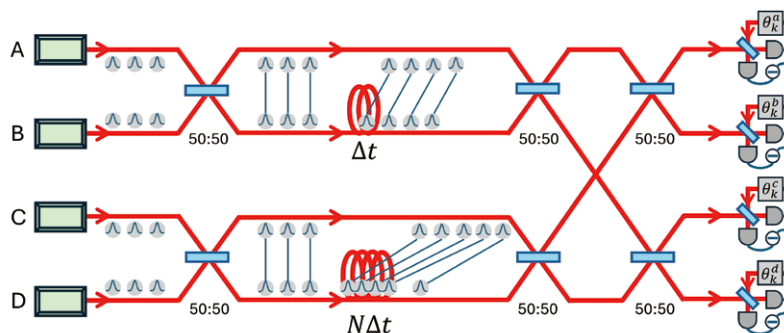
(研究員) 吉川 純一

光量子制御研究チーム

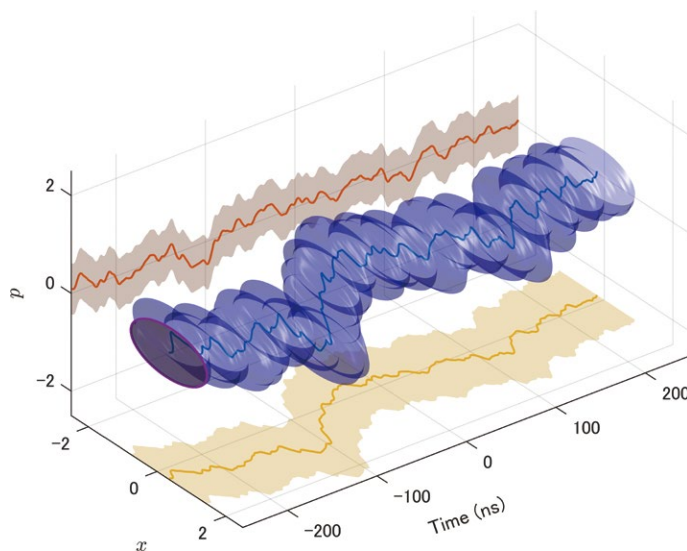
キーワード: 量子コンピュータ、量子光学、量子制御、光量子コンピュータ、量子推定

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。特に光量子制御推定技術および測定誘起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).

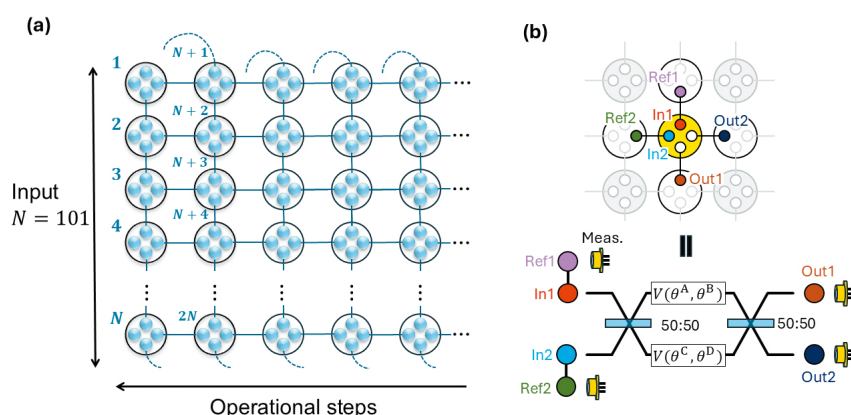
略歴

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の性能評価

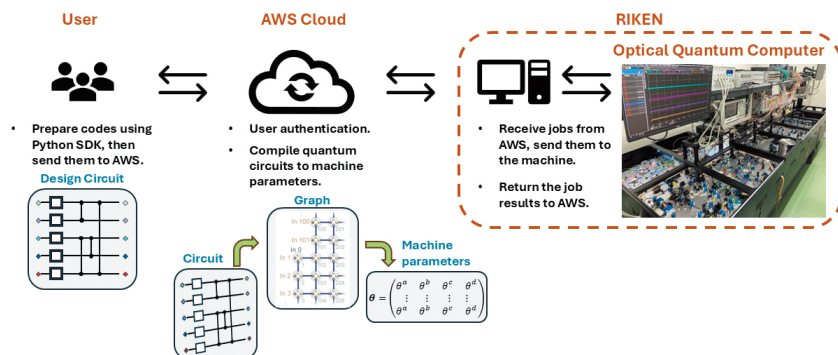
当チームは、光量子計算研究チームと共同で光量子コンピュータの開発を推進し、その詳細な性能評価を実施した。この光量子コンピュータは、時間分割多重化手法を用いた、測定誘起型のアナログタイプの光量子コンピュータである。具体的には、時間領域で大規模な量子エンタングルメントを生成し（図a）、同時刻に存在する4つの光モードに対して逐次的な測定を行う。この際、測定基底（測定位相）を制御することで、多様な線形変換操作を実現している。操作の基本単位は、一般化テレポーテーションによる2入力2出力の線形変換であり、これは同時刻にある4モードのうち2モードを入力とし、後続の2モードへと出力するプロセスである（図b）。この2入力2出力操作の検証のため、参照光モードと出力光モード間の量子相関を用いて量子操作の評価を行った。スウィーピング、回転、ビームスプリッター、CNOTなど、多様な変換行列を求め理論と比較し、その正当性を実証した。さらに、多ステップ操作として、マルチステップ・量子テレポーテーションや、量子状態のルーティング実験を行い、実機が設計通りに動作することを確認した。



光量子コンピュータの特性評価。(a)生成された大規模量子エンタングルメント。(b)基本操作とその評価手法。

光量子コンピュータのクラウド公開と運用

当チームでは、光量子コンピュータの実機の開発に加え、Amazon Web Services (AWS) を介したクラウドシステム、およびユーザーの計算実行を支援するPython用ソフトウェア開発キット (SDK) の開発を推進した。2025年度は、本システムを共同研究者へ向けて公開し、2025年度末時点で登録ユーザー数は40名弱に達している。共同研究者へ安定した計算資源を提供すべく、メンテナンス等の期間を除き、年間を通した実機の連続稼働体制を構築した。この長期運用を通じて、本システムが極めて高い安定性を有し、年数回程度の調整で運用可能であることを実証した。共同研究による成果創出は緒に就いたばかりであるが、最適化問題やニューラルネットワークをはじめとする多様な量子アプリケーション研究を推進するための強固な基盤が確立された。



光量子コンピュータクラウドシステム

主要メンバー

(上級研究員) 横山 翔竜
(上級テクニカルスタッフ) 鈴木 重成

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

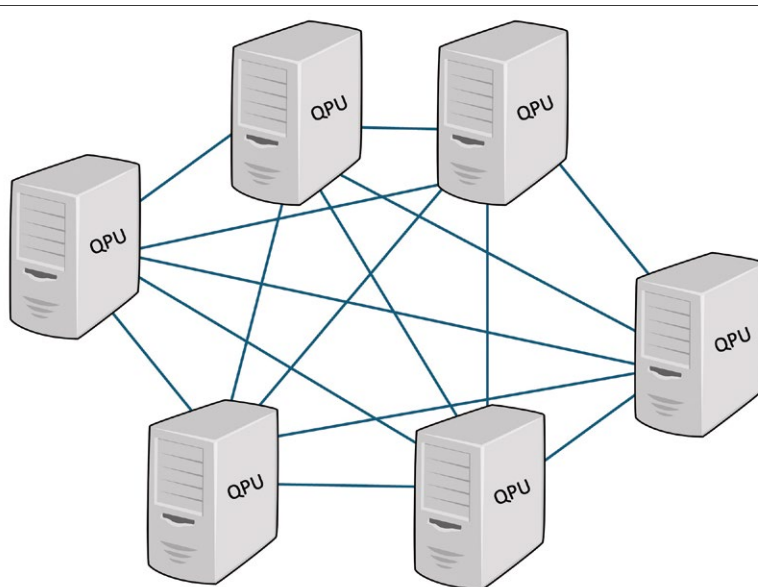
当チームでは、ナノフォトニックデバイスを用いた共振器量子電気力学 (QED) の実験的研究を推進している。共振器 QED 系は、光共振器に閉じ込められた光子と原子からなるハイブリッド系であり、原子量子ビットと光子量子ビットを接続する理想的な量子インターフェースである。

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
 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
 2025 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 (役職名称変更)

研究紹介

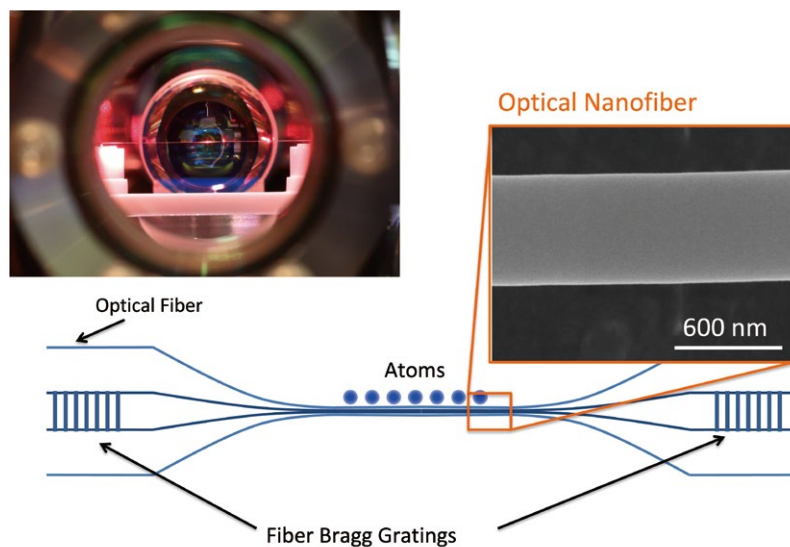
ナノファイバー共振器QED系の実現

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。

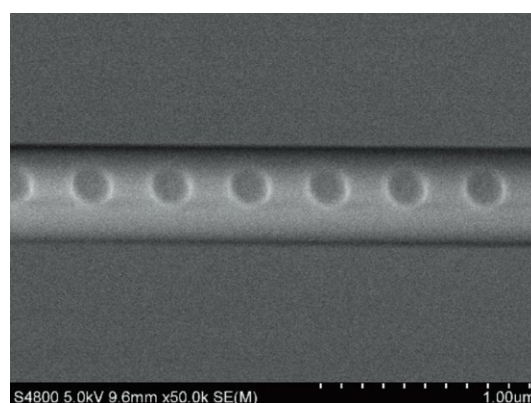
さらに我々は、新たなトラップ手法として、光ピンセットアレーを用いた単一原子トラップの一次元アレーをナノファイバー表面上に形成し、光学的に個別アドレス可能な単一原子列をナノファイバーと結合させる技術を開発した。



ナノファイバー共振器QED系の概念図

ナノファイバーフォトニック結晶共振器の開発

シングルショットのフェムト秒レーザーアブレーションを用いることで、Q値が1,000万を超える、欠陥のない光ナノファイバーフォトニック結晶ファブリ・ペロー共振器を開発した。非線形光学特性の測定により、6.6マイクロ秒の熱的カットオフ時間より1桁短い入力パルスに対しても、共振器帯域全体にわたって熱光学効果が支配的であることを明らかにした。これらの共振器は、高いQ値と小さなモード体積を兼ね備えているため、共振器QEDに基づく量子計算および量子ネットワークにおける高速量子ノードや、低消費電力のインライン光ファイバースイッチの実現につながる。



フェムト秒レーザーアブレーションによってナノファイバー上に作製したフォトニック結晶共振器

主要メンバー

(上級研究員) 加藤 真也

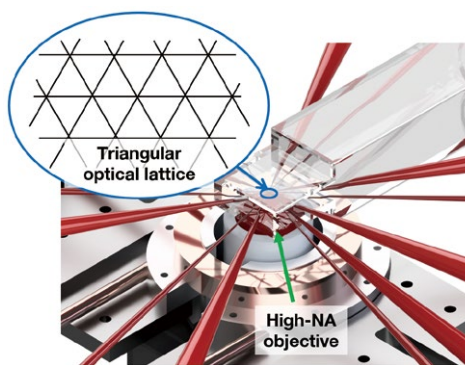
量子多体ダイナミクス研究チーム

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

量子多体系の研究は、多様な物理現象の発見と理解に加え、新たな量子技術の基盤構築にもつながる。制御性の高い量子系を用い、複雑な量子多体系を実験的に再現・解明する「量子シミュレーション」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指して研究を進めている。光格子系は、高温超伝導や量子フラストレーションといった物性科学の重要課題を探究するための優れた実験プラットフォームである。また、散逸やデコヒーレンスの影響が小さいことから、量子多体系の非平衡ダイナミクス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当てている。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などの新たな量子状態が発現することは知られているが、その統一的理解は未だ十分でない。さらに、実験において未発見の量子相の存在も理論的に予測されている。これらの課題に取り組むため、我々は幾何学的フラストレーションを有する三角光格子を構築し、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で観測可能な量子気体顕微鏡を構築しており、量子相関やダイナミクスをミクロな視点から直接調べることが可能となっている。これらの技術を基盤として、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 G. Marmorini, T. Fukuhara, and D. Yamamoto, "Measuring Entanglement Without Local Addressing in Quantum Many-Body Simulators via Spiral Quantum State Tomography", *PRX Quantum* 7, 010355 (2026).
- 2 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).
- 3 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).
- 4 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).
- 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).

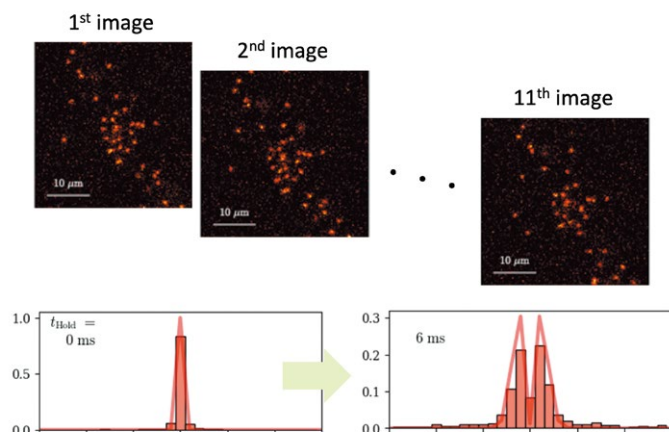
略歴

- 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)
2025/4/1よりチームディレクターに職名変更
- 2024 早稲田大学理工学術院 教授(任期付)(現職)

研究紹介

繰り返し測定技術による単一原子量子ウォークの観測

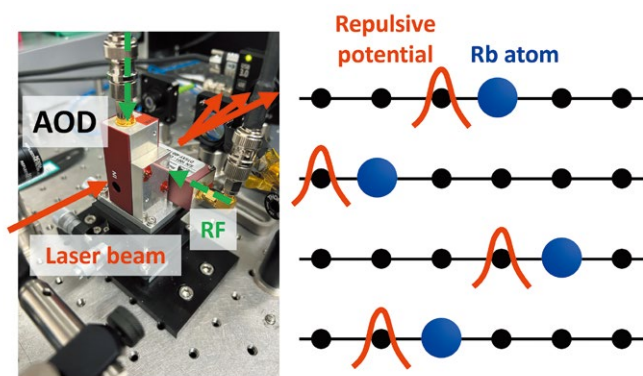
量子気体顕微鏡を用いることで、光格子中の原子集団を単一原子・単一格子レベルで観測することができる。一方で、通常の測定では原子が加熱され振動励起を受けるため、測定後のサンプルを再利用することが困難であった。そのため、量子状態を評価するには同一条件のサンプルを繰り返し作製し、大量の測定を行う必要があった。本研究では、測定後にラマンサイドバンド冷却を適用することで、原子を再び振動基底状態へ冷却し、サンプルを繰り返し利用可能とする技術を開発した。複数の冷却光源のパラメータを最適化することで、測定後の原子の約80%を振動基底状態へ戻すことに成功した。さらに、1回の実験で11枚の連続画像を取得し、その差分解析から時間発展後の原子分布を再構成した。この手法により、光格子中を運動する単一原子の量子ウォーク観測を実現した。本成果は、量子ダイナミクス測定的高速化や、測定に基づく量子系制御への応用が期待される。



1回の実験で取得した11枚の連続画像（上）。連続する画像の差分から、ダイナミクス時間後の原子分布を再構成できる（左下：0 ms、右下：6 ms）。

光格子中の極低温原子に対するフィードバック操作の開発

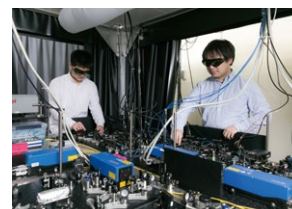
測定結果に基づいて系を制御するフィードバック（フィードフォワード）操作は、量子情報処理における重要な技術である。例えば、光ピンセットアレー中の原子の再配列や、量子計算途中での測定結果に応じた誤り訂正などに利用されている。本研究では、光格子中の極低温原子に対して測定フィードバック操作を実装し、量子多体系のダイナミクス制御を目指している。その実現に向けて、二軸音響光学偏向器（AOD）を用い、二次元平面内の任意位置へ高速に光を照射できるシステムを構築した。測定したルビジウム原子の位置に応じて760 nm光による斥力ポテンシャルを生成でき、原子輸送への応用が可能である。これにより、測定フィードバックに基づく新たな量子輸送現象の探究を進めている。



音響光学偏向器（AOD）を用いた光学系（左）と、光格子中の極低温原子に対するフィードバック操作の概念図（右）。

主要メンバー

(研究員) 山本 隆太
(特別研究員) MCGHEE Keegan
(特別研究員) CHALIMAH Siti
(テクニカルスタッフI) 大塚 陽一郎
(テクニカルスタッフI) 外山 滋



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明している。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。

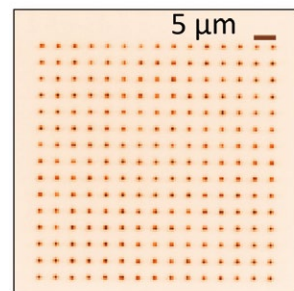
このような実用的かつ長期的な成果に向けて、当チームは中性原子に基づく誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指すムーンショット型研究開発事業の目標6「中性原子量子コンピュータ」プログラムの一翼を担っており、とりわけ分子科学研究所（愛知県岡崎市）に設置される最初のマシンの開発に参加している。また、中性原子量子コンピュータとシミュレーターを研究する日本とドイツのコミュニティを結ぶASPIREプログラムにも参加している。

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。

光ピンセットに閉じ込められた単一ビジウム原子の配列。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。



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。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。



DE LESELEUC Sylvain (Ph.D.) チームディレクター

主要論文

- 1 V. Lienhard, R. Martin, Y. T. Chew, T. Tomita, K. Ohmori and S. de Léséleuc, "Generation of Motional Squeezed States for Neutral Atoms in Optical Tweezers", *Phys. Rev. Lett.* 135, 253404 (2025).
- 2 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).
- 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・ポリテクニック(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)
- 2025 Yaqumoの共同創業者兼科学顧問

研究紹介

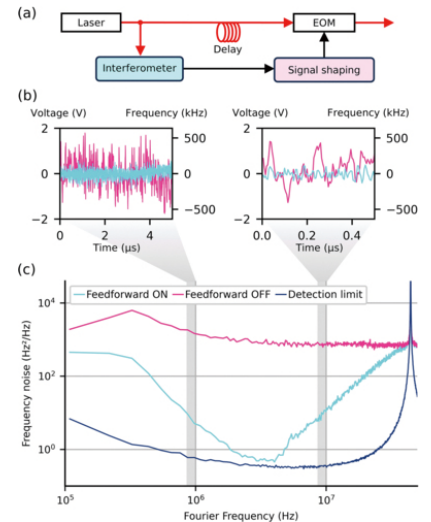
レーザーの高速位相ノイズの測定とフィードフォワード補正

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、 $1\sim 10 \text{ MHz}$ 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>



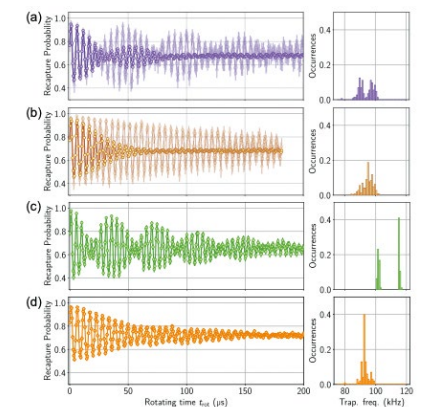
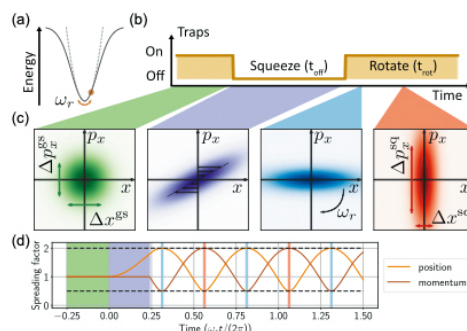
光ピンセット内の中性原子の運動的スウィーズ状態の生成

光ピンセットは、単一の中性原子を含む様々な微小物体を精密に位置決めするための強力なツールである。一度捕捉された原子は、光ピンセットの運動基底状態まで冷却することができる。原子の空間波動関数をより高度に制御するため、本稿では原子の運動をスウィーズする簡便な手法と、運動量拡散の推定に基づくスウィーズ因子の測定プロトコルを報告する。我々は、ピンセットの技術的欠陥による限界と、その非調和性によるより根本的な限界を調査し、最終的に 5.4 dB の運動スウィーズを実現した。運動スウィーズの実現により、位置量子ノイズによる限界を押し上げることが可能となり、原子をナノメートル精度で位置決めする必要がある、より極端な状況の探求が可能となる。

Phys. Rev. Lett. 135, 253404 (2025)として発表。

スウィーズド状態の生成。(a) 光ピンセットポテンシャル（実線）とその調和近似（破線）。(b) 実験シーケンス、および(c) シーケンスにおける x - p_x 相空間上の原子状態のウィグナー準確率分布のスケッチ。(d) 運動の基底状態の揺らぎに対して正規化された x および p_x の理論的標準偏差の時間依存性。

©<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/3kwz-ny2h>



一連の光ピンセットにわたって平均化されたスウィーズド状態の振動。表示されているデータは、回転時間 t_{rot} を変化させながら、実験パラメータ $t_{\text{off}} = 2.0 \mu\text{s}$ および $t_{\text{rel}} = 20 \mu\text{s}$ に対応するものである。各サブ図は、異なる補正を施した場合の再捕捉確率を示している：(a) 補正なし、(b) 異方性補正、(c) 不均一性補正、および (d) 両方の補正。個々の原子信号のフーリエ変換から抽出されたトラッピング周波数 ((a) および (b) の薄い曲線で示されている) は、右側のパネルにプロットされている。

©<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/3kwz-ny2h>

主要メンバー

(特別研究員) **LORANCA CRUZ Luisa**
(研究生) **KOCIK Robin**

(研究生) **DENECKER Tom**
(テクニカルスタッフ) **ANTHOINE Valentin**

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、二次元電子系、マイクロ波

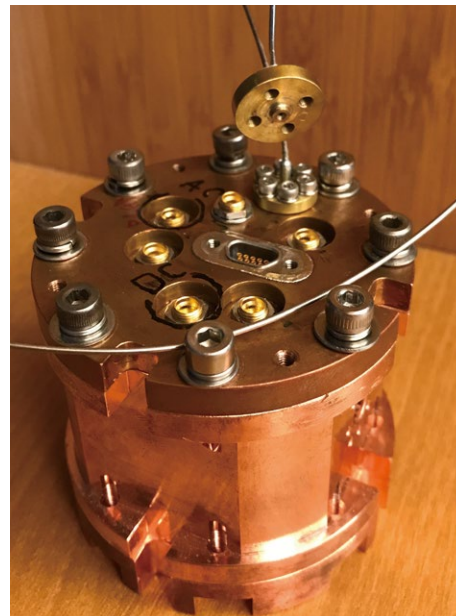
研究室概要

私たちの研究は、液体ヘリウムおよび固体ネオンの表面上に浮揚する電子を、量子情報処理の有望なプラットフォームとして探求することを目的としています。表面直上の真空中に捕捉されたこれらの電子は、極めてクリーンかつ欠陥のほぼ存在しない環境に置かれており、量子コンピューティング応用に魅力的な長いコヒーレンス時間を実現します。

液体ヘリウム上の電子系では、高度に均一な電子系を準備することができます。その清浄さは、あらゆる二次元電子系の中で最大の移動度を示すことから象徴されています。この均一性を活かし、プラズモン励起や量子シミュレーションといった豊かな多体電子物理の探求や、スピン自由度を用いた単一電子量子ビットの実現を目指しています。

固体ネオンは固体であるため表面が振動せず、液体ヘリウムよりもさらに長いコヒーレンス時間が期待されます。電荷・スピンいずれの量子状態においても同程度に長いコヒーレンス時間が見込まれることから、固体ネオンは量子メモリとしての応用に向けた研究をしています。

これらの研究と並行して、大規模量子システムに向けた低温エレクトロニクスの開発にも取り組んでいます。ミリケルビン温度域で動作する低温マイクロ波源および関連回路の実現を通じて、量子システムのスケーラビリティ向上と将来の量子計算への貢献を目指しています。



細い金属管からヘリウムまたはネオンガスを送り込み、内部で液体ヘリウムや固体ネオンを生成して量子実験を行う密閉容器



川上 恵里加 (Ph.D.) 理研白眉研究チームリーダー

主要論文

- 1 A. Jennings, I. Grytsenko, T. Giovansili, I. J. Barabash, O. Rybalko, Y. Tian, J. Wang, H. Ikegami, and E. Kawakami, "Strong Coupling Between RF Photons and Plasmons of Electrons on Liquid Helium", arXiv:2601.22552 (2026).
- 2 Y. Tian, I. Grytsenko, A. Jennings, J. Wang, H. Ikegami, X. Zhou, S. Tamate, H. Terai, H. Kutsuma, D. Jin, M. Benito, and E. Kawakami, "Nb-Ti-N nanowire resonators and prospects for spin-photon coupling with electrons on solid neon", *Phys. Rev. Applied* 25, 024011 (2026).
- 3 A. Jennings, I. Grytsenko, Y. Tian, O. Rybalko, J. Wang, I. J. Barabash, and E. Kawakami, "Probing the Quantum Capacitance of Rydberg Transitions of Surface Electrons on Liquid Helium via Microwave Frequency Modulation", *Phys. Rev. Lett.* 135, 087001 (2025).
- 4 I. Grytsenko, S. van Haagen, O. Rybalko, A. Jennings, R. Mohan, Y. Tian, and E. Kawakami, "Characterization of Tunnel Diode Oscillator for Qubit Readout Applications", *J. Low Temp. Phys.* 219, 282 (2025).
- 5 A. Jennings, X. Zhou, I. Grytsenko, and E. Kawakami, "Quantum computing using floating electrons on cryogenic substrates: Potential And Challenges", *Appl. Phys. Lett.* 124, 120501 (2024).

略歴

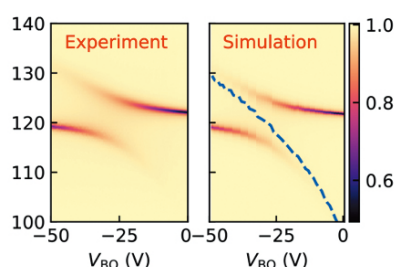
2016 デルフト工科大学(オランダ)博士号取得
 2016 沖縄科学技術大学院大学 博士研究員
 2017 科学技術振興機構 さきがけ研究員
 2020 理化学研究所 浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム 理研白眉研究チームリーダー(現職)

研究紹介

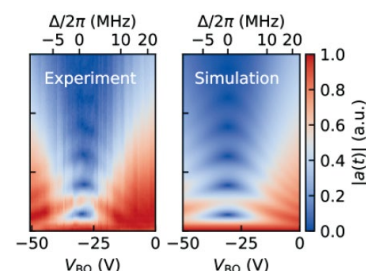
クリーンな二次元電子系を用いたプラズモン-光子コヒーレント結合の実証

プラズモンとは、多数の電子が集団として振動する現象のことです。この振動は電磁波と強く相互作用するため、これまで化学センサーやバイオセンサーなど、さまざまな分野で利用されてきました。近年では、量子コンピュータなどの量子情報技術への応用にも注目が集まっています。

液体ヘリウム表面に浮かぶ電子は、不純物や結晶欠陥のほとんどないクリーンな環境に存在します。このクリーンさゆえにプラズモン振動が高品質に保たれ、LC共振器のRF光子との強いコヒーレント結合を実現することができました。時間分解測定では、プラズモンと光子の間でエネルギーが周期的にやり取りされる様子を直接観測しました。



電子の集団振動（プラズモン）の周波数を電極電圧で調整し、電気回路（LC共振器）の共鳴周波数に近づけていくと、二つのモードが交差せずに反発し合う「avoided crossing」と呼ばれる現象が現れる。これは、プラズモンとLC回路が量子力学的にコヒーレントに結合していることを示す重要な証拠である。二つの系が強く結合しているとき、それぞれ独立していたモードが混ざり合い、新しい二つのモードとして振る舞うようになる。左図に示す実験データはシミュレーション結果（右図）とよく一致しており、このモデルの妥当性を裏付けている。重ねて示した青破線はプラズモン周波数の理論曲線を表しており、観測されたモードを良く再現している。



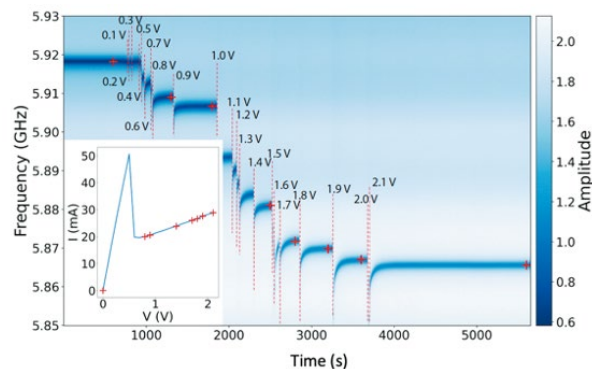
20 nsのRFパルスを印加した後の反射信号強度の時間発展を示しています。実験結果（左）では、プラズモンと光子モード間のエネルギーが周期的にやり取りされる様子が明確に観測され、二つの系の強いコヒーレント結合が実証されています。右図は理論シミュレーション結果で、色はLC共振器内に蓄えられたRF電場強度を示しています。シミュレートされたエネルギー交換は実験観測をよく再現しています。

固体ネオン上の電子：高精度量子ビットへの道

固体ネオンの表面に浮かぶ電子は、量子状態を長く保つことができるため、量子ビットの候補として注目されています。

本研究では、まず超伝導共振器に固体ネオンを堆積させ、その上に電子を浮揚させても、超伝導共振器の性能がほとんど損なわれないことを実証しました。これは、固体ネオン上の電子を使った量子デバイスが現実的に作製できることを示す重要な結果です。

さらに、微小な磁石の配置を工夫することで、電子のspin状態とマイクロ波光子を強く結合させる設計を理論的に分析しました。その結果、自然界に存在するネオンを用いた場合でも、1量子ビット操作で99.99%以上、2量子ビット操作で99.9%以上という非常に高い演算精度が達成できることが示されました。これは、実用的な量子コンピュータの実現に向けて十分な精度です。



固体ネオン表面への電子の堆積過程を、超伝導共振器の共鳴ピーク（赤十字）の時間変化として示しています。フィラメント（電熱線）に電圧を印加するたびに電子が放出され（赤い破線）、共鳴周波数が段階的にシフトしていく様子が観測されました。十分な時間が経過すると周波数は安定し、電子が固体ネオン表面に定着したことが確認されました。左下の挿入図はフィラメントの電流-電圧特性を示しています。

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 Oleksiy

半導体量子情報デバイス研究チーム

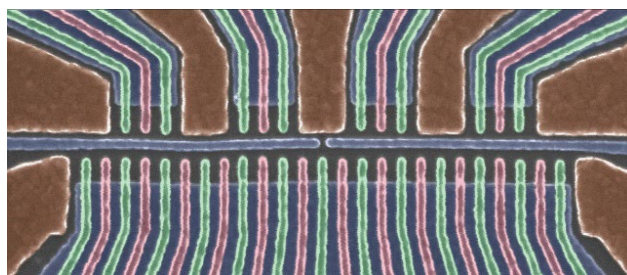
キーワード: 量子コンピュータ、半導体、量子ビット、量子ドット、電子スピン

研究室概要

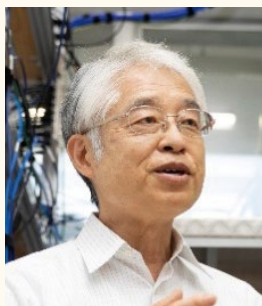
我々は半導体量子ドット中の電子（あるいは正孔）のスピンを量子情報の単位（量子ビット）として量子コンピュータへ応用するための技術開発を行っている。半導体量子コンピュータは、コヒーレンス時間が長いこと、半導体集積化技術と互換性があること、1ケルビンを超える温度で動作が可能であることから、その将来性が期待されている。我々は、これまでに、シリコン量子ドット中の電子スピンを量子ビットとする主要な量子操作（単一量子ビット、2量子ビットゲート、初期化、読み出し）において、誤り耐性の閾値を超える操作忠実度を達成した。これらの知見と技術を基盤として中〜大規模量子コンピュータを構築することを目指して、量子論理演算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



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 J.S. Rojas-Arias, Y. Kojima, K. Takeda, P. Stano, T. Nakajima, J. Yoneda, A. Noiri, T. Kobayashi, D. Loss, and S. Tarucha, "The origins of noise in the Zeeman splitting of spin qubits in natural-silicon devices", *npj Quantum Info.* 12, 9 (2025).
- 2 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).
- 3 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).
- 4 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 $^{28}\text{Si}/\text{Si-Ge}$ spin qubits", *Phys. Rev. Appl.* 20, 5 (2023).
- 5 K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, T. Kobayashi, and S. Tarucha, "Quantum error correction with silicon spin qubits", *Nature*, 608, 682-686 (2022).

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 工学系研究科物理工学専攻 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ンの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。

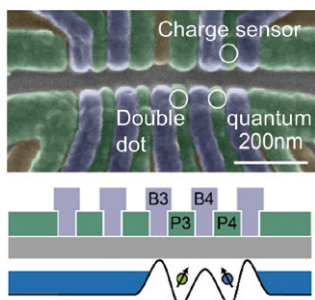


図1: 2量子ビットデバイス

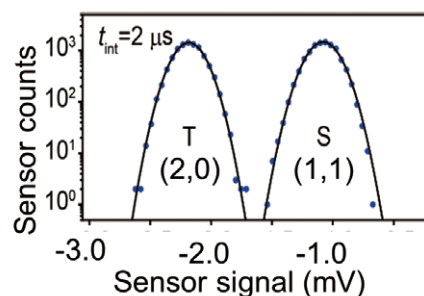


図2: スピン読み出し

多重量子ドット中の電子の動きがシリコン量子ビットに及ぼす位相エラーの測定

シリコン量子ビットは既存の半導体微細加工技術との親和性から、大規模な量子コンピュータの構成要素として最適である。シリコン量子ビットでは、電子のスピンの向きと位相で量子情報を表現するが、量子コンピュータの動作には測定や長距離結合を実現するために電子の移動を伴う操作も必要である。本研究では電子の位置の変化がシリコン量子ビットに及ぼす位相エラーを測定し、その影響や抑制方法を議論した。

3重量子ドット中の電子配置を変えながら量子ビット位相の時間発展を比較し測定した。測定され位相変化は他の位相エラー源と比較しても大きく、電子の移動が重大なエラー源となり得ることが分かった。

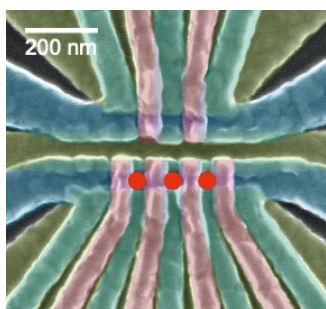


図1: 電荷配置によるスピン量子ビットへの影響を調べるために用いた3重量子ドットデバイス

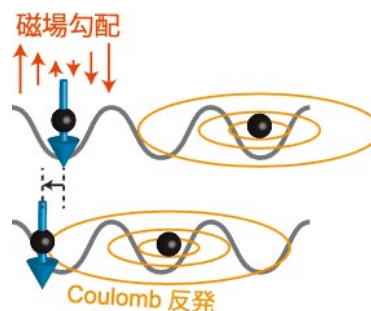


図2: 周囲の電荷状態がスピン量子ビットへ影響を及ぼす機構

主要メンバー

（上級研究員） 小林 嵩

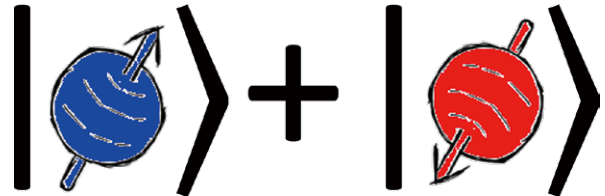
（テクニカルスタッフI） 黒田 玲子

半導体量子情報デバイス理論研究チーム

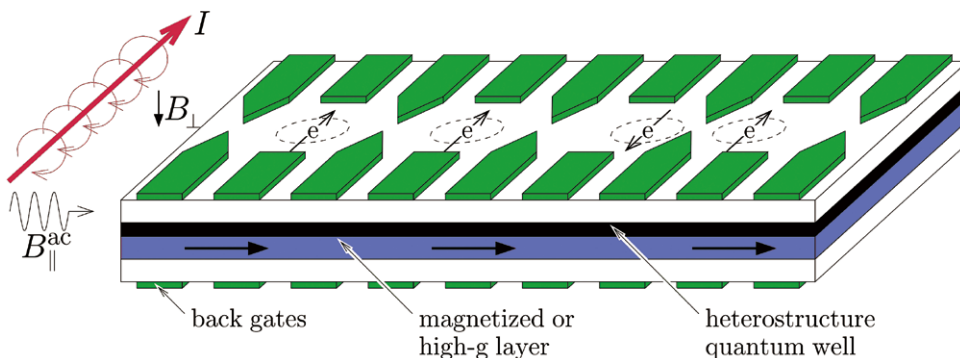
キーワード: 量子ドット、スピンを用いた量子情報処理、量子ビット、スピン-軌道相互作用、量子情報処理

研究室概要

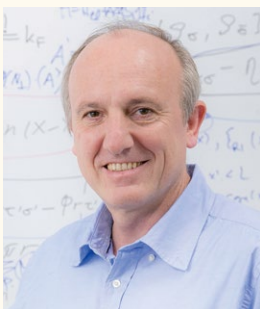
当チームではスピンを用いた量子コンピュータの理論に取り組み、SiとGeを用いたゲート制御量子ドットを用いてCMOS技術との整合性が高い量子コンピュータをデザインすることを目指している。我々は、スピン軌道相互作用を用いて電場によって制御できるスピン量子ビットに着目しており、適切なバンド構造モデルを用いて、低次元に閉じ込めた正孔と電子の性質を調べ、量子ビットをノイズから守るための最適なセットアップやその方法について研究している。また、量子ビット間結合の解析も行っており、これにより多数の量子ビットを用いたネットワークを実現できる可能性がある。我々の究極の目的は、高速で微小かつ拡張可能な未来の量子コン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, J. Yoneda, P. Stano, T. Nakajima, K. Takeda, T. Kobayashi, G. Scappucci, S. Tarucha, and D. Loss, "Inferring charge-noise source locations from correlations in spin qubits", *Phys. Rev. Lett.* 136, 027001 (2026).
- 2 J. S. Rojas-Arias, Y. Kojima, K. Takeda, P. Stano, T. Nakajima, J. Yoneda, A. Noiri, T. Kobayashi, D. Loss, and S. Tarucha, "The origins of noise in the Zeeman splitting of spin qubits in natural-silicon devices", *npj Quantum Information* 12, 9 (2026).
- 3 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).
- 4 P. Stano and D. Loss, "Review of performance metrics of spin qubits in gated semiconducting nanostructures", *Nat. Rev. Phys.* 4, 672 (2022).
- 5 D. Loss, D. DiVincenzo, "Quantum computation with quantum dots", *Phys. Rev. A* 57, 120 (1998).

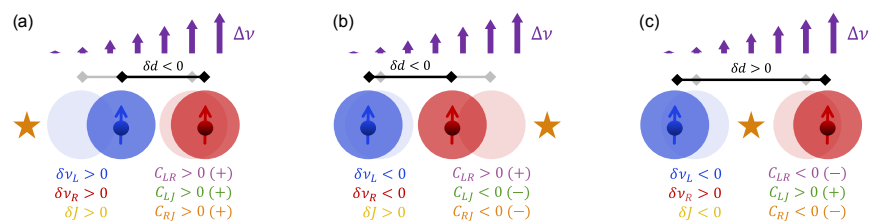
略歴

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

研究紹介

■ スピン量子ビットにおける相関測定を用いた電荷雑音源の位置推定

半導体スピン量子ビットデバイスにおける電荷雑音源の空間的位置を推定する新しい手法を開発した。この手法は、量子ビットのゼーマンエネルギー揺らぎと交換相互作用揺らぎの相関を利用するものであり、測定された相互相関の符号と大きさを解析することで、電荷雑音源として作用する個々の二準位揺動子（two-level fluctuators; TLFs）の量子ビット配列に対する位置を三角測量的に特定することができる。さらに、実験グループとの共同研究により、この手法を実際のシリコンスピン量子ビットデバイスに適用し、量子ビットの両側に存在する主要なTLFを同定するとともに、それらの特徴的なスイッチング時間を抽出した。また、この手法がより大規模な量子ビット配列にも自然に拡張可能であり、半導体量子プロセッサにおける微視的な電荷雑音源を空間的に特徴づけるためのスケーラブルな枠組みを提供することを示した。

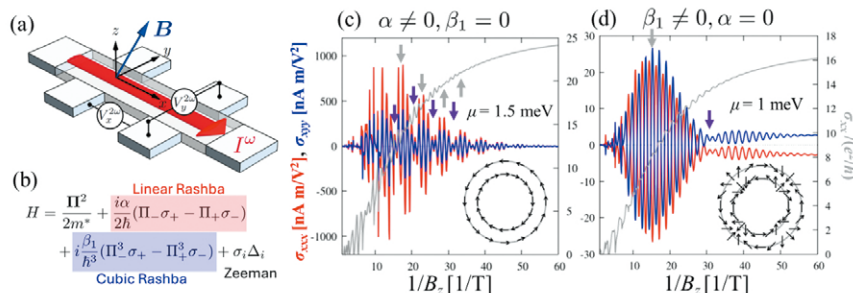


相関ノイズ測定による電荷揺らぎ源の位置推定。二つのスピン量子ビットに対して、TLFが (a) 左側、(b) 右側、(c) 量子ビット間に存在する場合を模式的に示す。青色および赤色の矢印はそれぞれ左・右の量子ビットを表し、オレンジ色の星印はTLFを表す。紫色の矢印は量子ビットのゼーマンエネルギー勾配を示し、黒線は量子ビット間距離を表している。半透明の図形は、TLFが状態遷移する前の量子ビット位置を示す。下段には、TLFによって誘起される量子ビットエネルギーおよび交換相互作用の変化と、それに対応するノイズ相関の符号を示している。

©Phys. Rev. Lett. 136, 027001 (2026)

■ 非線形シュブニコフ・ドハース効果によるフェルミ面スピン構造の探査

我々は、電場に対する二次応答に現れる量子振動である非線形シュブニコフ・ドハース (NSdH) 効果の微視的理論を展開した。NSdH効果は、スピン軌道相互作用 (SOI) による運動量空間のスピン構造に対して非常に高い感度を示すことを明らかにした。特に、NSdH振動のうなりは、従来の線形SdH振動のうなりに対して位相シフトを示し、SOIの直接的な指標となることを示した。さらに具体例として、Geなどの平面ヘテロ構造における半導体2次元ホールガスで期待される線形および3次のラシュバSOIを、非線形伝導度の縦成分とホール成分の位相差を比較することで識別できることを明らかにした。これらの結果は、NSdH効果がSOIの高感度プローブとして機能することを示すとともに、スピントロニクスおよび量子情報技術に関連する材料を特徴づけるための新たな枠組みを提供するものである。



非線形シュブニコフ・ドハース効果。(a) 測定セットアップの模式図。(b) 解析に用いたハミルトニアン。(c, d) (c) 線形Rashbaスピン軌道相互作用および (d) 三次Rashbaスピン軌道相互作用によって生じる、線形および非線形 Shubnikov-de Haas 振動。灰色および紫色の矢印はうなりの節の位置をあらわす。挿入図は、それぞれの場合におけるフェルミ面上のスピン構造をあらわす。

主要メンバー

(特別研究員) ROJAS ARIAS Juan

(研究員) 仲澤 一輝

(上級研究員) STANO Peter



量子計算理論研究チーム

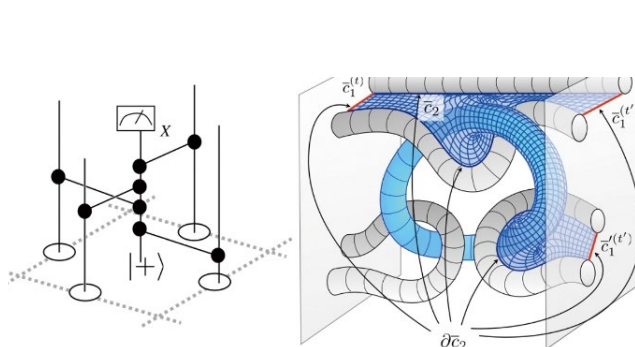
キーワード: 量子コンピューティング、量子情報科学、量子機械学習、量子誤り訂正

研究室概要

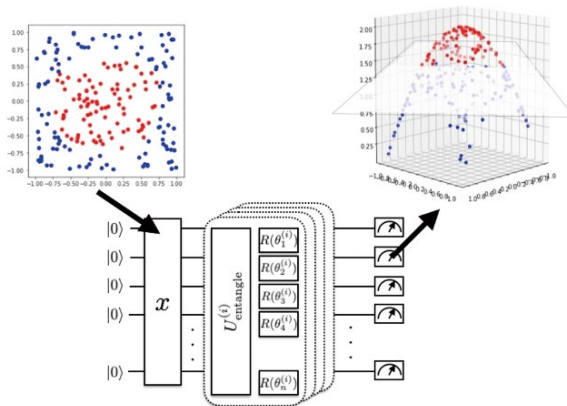
量子コンピューティングは革新的な計算技術であり、量子計算理論研究チームはこの変革の最前線にいる。量子コンピュータの実現に不可欠な量子計算理論やソフトウェアの開発、新しい量子アルゴリズムの設計、性能の解析に重点を置いている。

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。

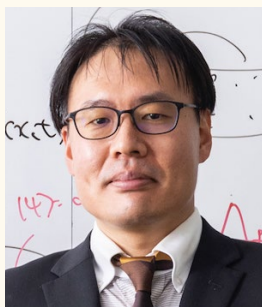
量子情報科学は、基礎物理学、量子化学、機械学習、高性能計算機などの分野と、学際的な研究を推進している。我々は、量子コンピュータや量子情報科学を通して、新たな科学的フロンティアを切り開くことを目指している。このような協同的なアプローチにより、量子コンピュータとその実社会への応用の進歩を推進し、RQCを量子テクノロジーの未来を形作る重要なプレーヤーとして位置づけている。



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 R. Toshio, Y. Akahoshi, J. Fujisaki, H. Oshima, S. Sato, and 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, 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).
- 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 (2022).
- 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, 024030 (2017).

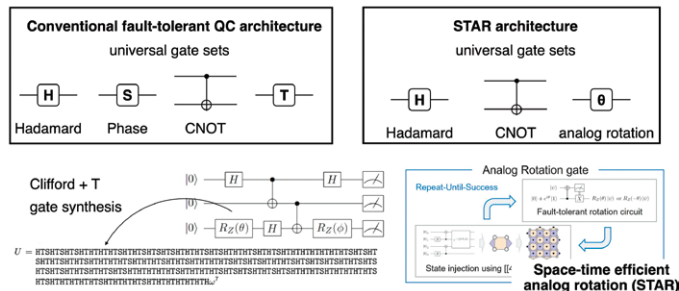
略歴

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

連続回転ゲートを基本ゲートとする部分的誤り耐性量子計算アーキテクチャ

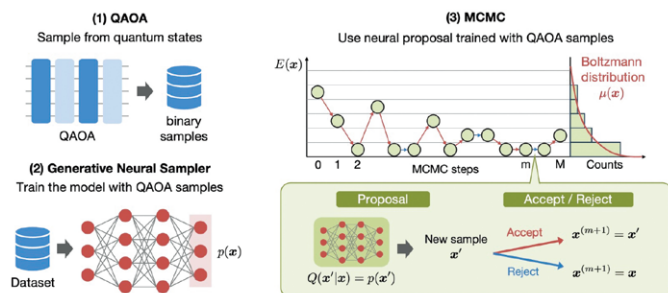
本研究では、将来の本格的な誤り耐性量子コンピュータの実現に向けて、STARアーキテクチャと呼ばれる新しい量子計算方式を提案しました。従来方式では、任意角度の量子回転を実行するためには多くのT演算やそれをエラーから守るための魔法状態蒸留という操作が必要となり、実用化の大きな課題となっていました。本研究では、連続回転ゲートを基本的な演算として直接扱うことで、この負担を大幅に軽減します。さらに、重要な演算は誤り訂正で保護しつつ、一部の誤りは制御可能な範囲で許容する「部分的誤り耐性」という考え方を導入しました。これにより、限られた量子ビット数でも、量子化学計算や量子シミュレーションなど高度な応用に必要な計算を早期に実行できる可能性を示しました。NISQ時代から本格的FTQCへの橋渡しとなる、実用的な量子計算アーキテクチャの構築を目指した研究に位置付けられます。



既存の誤り耐性量子計算とSTARアーキテクチャの基本ゲート。連続回転ゲートの実行には多数のTゲートが必要となるが、STARアーキテクチャでは、これらを回避し、回転角が微小である場合はエラーも抑制することができる。

量子コンピュータからのサンプリングを利用した量子強化型MCMC

NISQ型量子コンピュータの活用においては、変分量子アルゴリズムにより量子状態の期待値を推定する手法が広く研究されています。しかし、期待値推定には大量の測定が必要であり、ノイズの影響も受けやすいことから、量子コンピュータの本来の強みである「サンプリング」を直接活用するアルゴリズムが注目されています。本研究では、量子コンピュータから得られるサンプルをマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC）の提案分布として利用する量子強化型MCMCを発展させ、量子回路と生成ニューラルネットワークを組み合わせた新しいハイブリッド手法を提案しました。従来の量子強化型MCMCでは、収束性を保証するために量子回路へ強い制約を課す必要がありましたが、本研究ではニューラルネットワークが量子サンプルを学習することでその制約を緩和し、量子コンピュータの表現能力をより有効に活用します。スピングラスモデルのボルツマン分布生成に適用した結果、従来法に比べて大幅な高速化を示し、NISQデバイスに適した実用的なサンプリング型量子アルゴリズムとしての可能性を示しました。



量子コンピュータからのサンプリングを用いて、ニューラルネットワークで確率分布を学習。構築された代理モデルを提案分布として用いてマルコフ連鎖モンテカルロを高速化。

主要メンバー

(基礎科学特別研究員) 米田 靖史
(特別研究員) 松浦 孝弥
(特別研究員) 瀬戸山 亘
(客員研究員) 池田 達彦
(客員研究員) 水田 郁



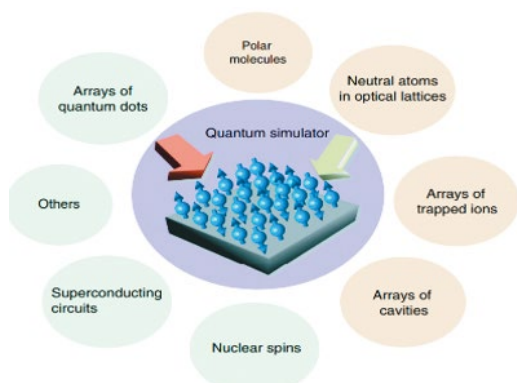
量子情報物理理論研究チーム

キーワード: Quantum physics, Quantum optics, Quantum information processing and quantum computing, Artificial intelligence, Machine learning, Software for quantum physics, Superconducting qubits

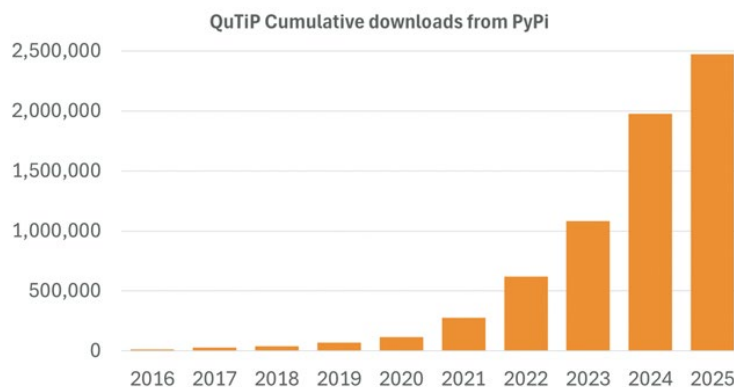
研究室概要

Our group is doing research on various quantum simulators and on machine learning and AI applied to quantum physics and quantum information. These are attracting growing interest in the research community.

Our quantum software (QuTiP: Quantum Toolbox in Python = quantum simulator) is having a large impact in this field. QuTiP is a free and open-source library for efficient simulation of a wide variety of quantum systems. QuTiP has been downloaded more than four million times, and it is used all over the world. We plan to make this indispensable software tool much stronger and more powerful.



Quantum analog simulations



QuTiP has been downloaded more than four million times, and it is used all over the world.



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).

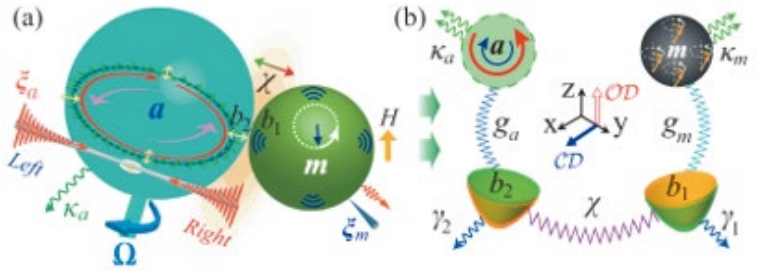
略歴

- 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

Nonreciprocal quantum synchronization

Nonreciprocal physics is garnering enormous attention in both classical and quantum resource fields. Surprisingly, previous demonstrations have not explored nonreciprocal quantum synchronization of phonons, one of the most obvious examples of nonreciprocal quantum resources. Here we fill this gap to demonstrate the possibility of nonreciprocal quantum synchronization, revealing its counterintuitive robustness against random fabrication imperfections and thermal noise of practical devices. Specifically, phonons are synchronized in a chosen direction of light (magnetic field) but unsynchronized in the other, yielding a unique nonreciprocity of quantum synchronization. This happens by harnessing the synergy of the Sagnac and magnon Kerr effects, leading to an opposite Sagnac-Fizeau shift and an exceptional magnon Kerr-induced transition.



Nonreciprocal quantum synchronization

©D.-G. Lai, A. Miranowicz, F. Nori

Nonreciprocal quantum synchronization

Nature Communications. 16, 8491 (2025). [PDF]

Quantum information bound in sensors

Non-Hermitian systems give rise to nontrivial phenomena due to their ability to exhibit peculiar spectral singularities known as exceptional points. Especially, the dynamical encirclement of exceptional points in a system parameter space enables chiral state switching. Although this chiral behavior can be effectively controlled in two-mode structures, extending such control to higher-dimensional systems with multiple exceptional points presents significant challenges, particularly when aiming to steer the system toward a specific target state, a capability crucial for advancing such fields as optical communication and quantum information processing. In this work, we overcome this challenge by experimentally demonstrating a genuine programmable symmetric-asymmetric multistate switching in a four-mode optical system. This is achieved through the controlled dynamic interplay between exceptional and diabolic points in the Hamiltonian spectrum. Our results lay the groundwork for the development of light manipulation protocols in multimode photonic setups.

Figure 1. Types of Quantum Sensors



Quantum information bound in sensors

©I. Arkhipov, F. Nori, S. K Özdemir

Achieving the quantum Fisher information bound in pseudo-Hermitian sensors

Phys. Rev. Lett. 136, 080802 (2026). [PDF]

主要メンバー

(研究員) **GNEITING Clemens**
(研究員) **QUIJANDRIA Fernando**
(特別研究員) **LAI Deng-Gao**
(基礎科学特別研究員) **HUANG Ran**
(特別研究員) **IVAKHNENKO Oleh**
(JSPS外国人特別研究員) **MENCZEL Paul**
(JSPS外国人特別研究員) **KARMSTRAND Therese**
(JSPS外国人特別研究員) **SEPULCRE Théo**
(テクニカルパートタイマー) **KURTH Veronika**

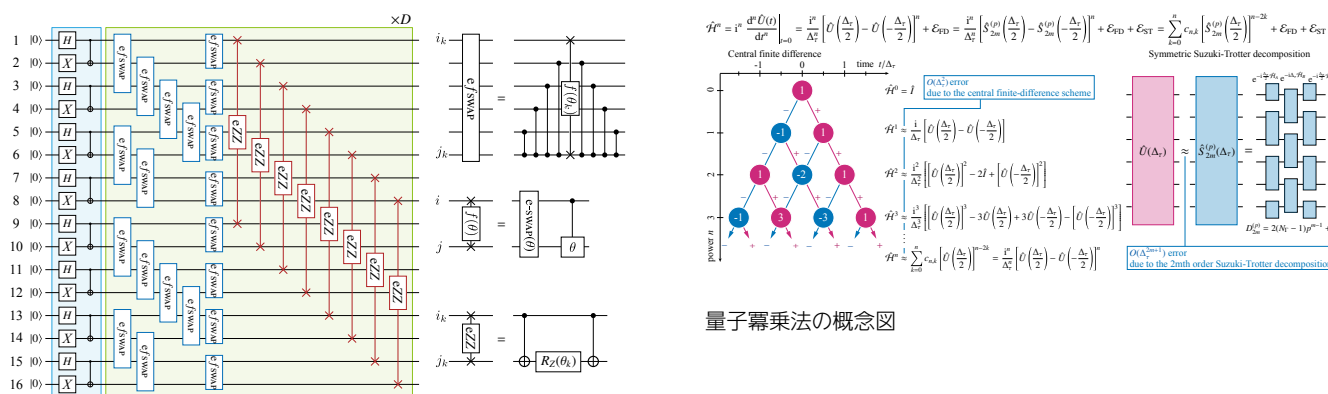


量子計算科学研究チーム

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する量子アルゴリズムの研究開発を推進している。その実証に向けて、古典コンピュータによる量子計算シミュレーション手法の開発にも取り組んでいる。また、量子回路内で実行される量子計算を量子多体系のダイナミクスとして捉え、量子情報理論の観点からその性質を解析している。さらに、将来の高性能計算基盤を見据え、「富岳」などのスーパーコンピュータと量子コンピュータを連携させた量子・HPCハイブリッドシステムの構築にも関心を持っている。



Hubbard 模型に対する VQE 計算のための量子回路



榎木 清司 (Ph.D.) チームディレクター

主要論文

- 1 K. Seki, Y. Kikuchi, T. Hayata, and S. Yunoki, "Simulating Floquet scrambling circuits on trapped-ion quantum computers", *Phys. Rev. Research* 7, 023032 (2025).
- 2 Y. Otsuka, K. Seki, and S. Yunoki, "Quantum conditional mutual information as a probe of measurement-induced entanglement phase transitions", *Phys. Rev. B* 112, 054301 (2025).
- 3 S. Ejima, K. Seki, B. Fauseweh, and S. Yunoki, "Probabilistic imaginary-time evolution in state-vector-based and shot-based simulations and on quantum devices", *Phys. Rev. Research* 7, 043182 (2025).
- 4 K. Seki and S. Yunoki, "Energy-filtered random-phase states as microcanonical thermal pure quantum states", *Phys. Rev. B* 106, 155111 (2022).
- 5 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).

略歴

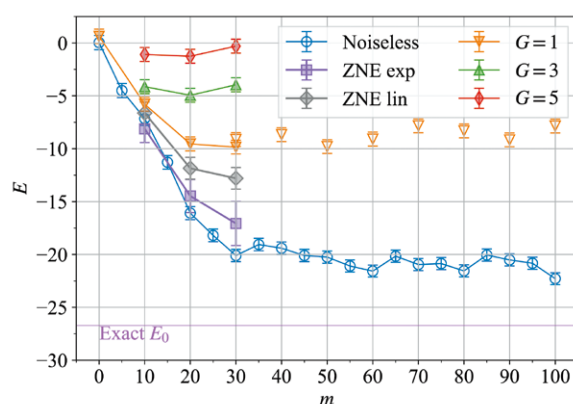
- 1996 名古屋大学 博士(工学)
- 1996 国立強磁場研究所(アメリカ) ポスドク研究員
- 1999 グローニンゲン大学(オランダ) ポスドク研究員
- 2001 国際高等研究所(イタリア) ポスドク研究員
- 2006 オークリッジ国立研究所及びテネシー大学(アメリカ) Long-Term Visiting Scientist / Research Assistant Professor
- 2008 理化学研究所 榎木計算物性物理研究室 准主任研究員
- 2010 理化学研究所 計算科学研究機構 量子系物質科学研究チーム チームリーダー
- 2012 理化学研究所 創発物性科学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

イオントラップ量子コンピュータを用いた量子スピン鎖の基底状態準備

量子多体系の基底状態を量子コンピュータ上で作る手法として、近年量子コンピュータ実機上で中間回路測定とリセットの活用により実装可能になってきた、散逸エンジニアリングに着目し研究した。この手法は、パラメータを最適化する従来の変分法とは異なり、不要な励起を環境へ逃がす「散逸」を利用して、状態を基底状態へ近づける方法である。我々は、このような散逸過程を任意の時間刻みに対して正しく記述するクラウド表現を導き、条件が満たされれば基底状態との忠実度が単調非減少であることを示した。さらに、イオントラップ量子コンピュータ Reimei 上で最大19スピンの横磁場イジング鎖に実装した。最大4110個の2量子ビットゲートを含む回路でも低エネルギー状態へ収束し、さらにゼロノイズ外挿を行うことでノイズなしシミュレーションと統計誤差内で一致するエネルギーを得た。

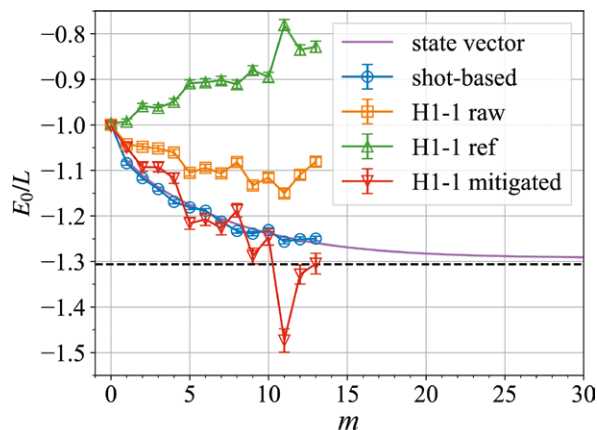
19スピンの横磁場イジング鎖のエネルギー（縦軸）の散逸過程時間ステップ（横軸）依存性の図。青丸はノイズなしシミュレーションであり、厳密な基底状態エネルギーはマゼンタの水平線で示している。オレンジ逆三角、緑三角、赤菱形はそれぞれ、Reimei 実機を用いてノイズ増幅度 $G=1, 3, 5$ として得られた結果であり、それらを指数関数または一次関数でゼロノイズ外挿した結果が紫四角と灰色四角である。



確率的虚時間発展法の状態ベクトルシミュレーションと量子デバイス上での実装

量子コンピュータで量子多体系の基底状態を求めるための確率的虚時間発展を研究した。従来よく用いられてきた変分量子アルゴリズムでは、系が大きくなると最適化が難しくなる。本研究では、古典計算で有効な虚時間発展を、測定で成功した場合だけ更新された状態を採用する確率的な量子アルゴリズムとして扱った。まず、状態ベクトルシミュレーションにより、成功確率を高める初期パラメータの選び方を調べた。ハイゼンベルグ鎖と横磁場イジング模型で、エネルギーが基底状態に向かって収束することを確認した。さらに、イオントラップ量子コンピュータ H1-1 上で最大17量子ビットを用いて実装した。ノイズの影響はあるものの、参照回路を用いた誤り緩和を考案し実装することで、ノイズなしシミュレーションに近い結果を得た。

4スピン横磁場イジング模型のエネルギー（縦軸）の虚時間ステップ（横軸）依存性の図。青丸はノイズなし有限ショット数シミュレーション、マゼンタの線はノイズなし状態ベクトル（無限ショット数）シミュレーションの結果であり、厳密な基底状態エネルギーは破線の水平線で示している。オレンジ四角は H1-1 実機を用いた結果であり、緑三角はエラー緩和のための参照量子回路を H1-1 実機で実行した結果である。脱分極ノイズモデルを仮定して参照量子回路から脱分極ノイズをみつかり、エラー緩和を行った結果が赤逆三角である。



主要メンバー

(研究員) 関 和弘

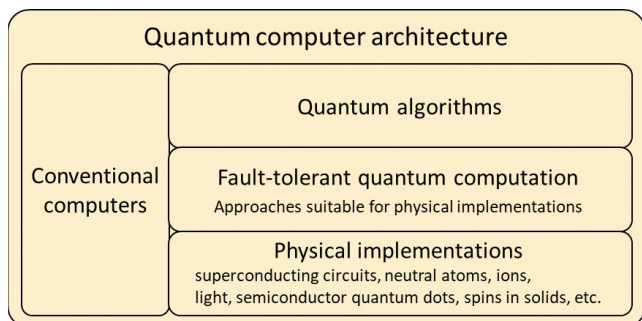
量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム

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

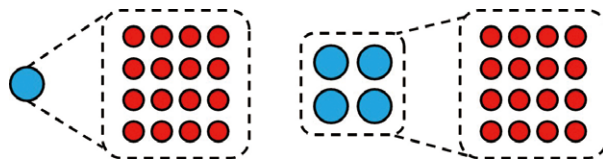
研究室概要

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 R. Nakai and H. Goto, "Subsystem many-hypercube codes: High-rate concatenated codes with low-weight syndrome measurements", *Phys. Rev. Applied* 25, 014032 (2026).
- 2 H. Goto, "High-performance fault-tolerant quantum computing with many-hypercube codes", *Sci. Adv.* 10, eadp6388 (2024).
- 3 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).
- 4 H. Goto, "Minimizing resource overheads for fault-tolerant preparation of encoded states of the Steane code", *Sci. Rep.*, 6, 19578 (2016).
- 5 H. Goto, "Step-by-step magic state encoding for efficient fault-tolerant quantum computation", *Sci. Rep.*, 4, 7501 (2014).

略歴

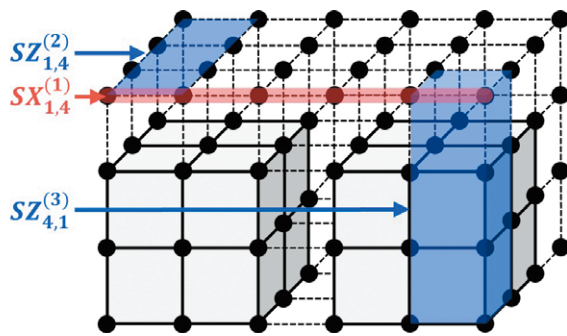
- 2003 株式会社東芝入社
- 2007 博士(理学)取得(東京大学)
- 2016 株式会社東芝 主任研究員
- 2020 株式会社東芝 フェロー
- 2023 株式会社東芝 シニアフェロー(現職)
- 2023 理化学研究所量子コンピュータ研究センター 量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム チームリーダー
- 2025 理化学研究所量子コンピュータ研究センター 量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム チームディレクター(現職)

研究紹介

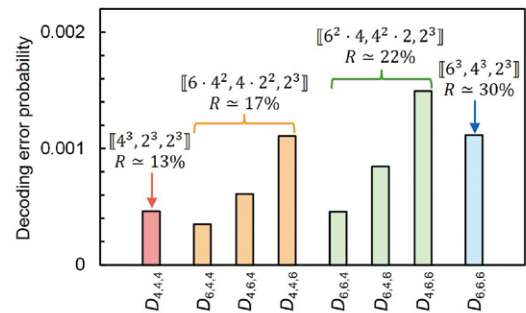
多超立方体符号の性能と符号化器の改善

誤り耐性量子計算に適した高レート符号として、我々は高レート量子誤り検出符号を接続した多超立方体符号を提案している。最初の提案では $[[6,4,2]]$ 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（ L は接続レベル）を研究したが、 $[[4,2,2]]$ 符号も含めたあらゆる組み合わせの多超立方体符号の性能を評価し、レベル3では $D_{6,4,4}$ （レベル1に $[[6,4,2]]$ を、レベル2と3に $[[4,2,2]]$ を用いる多超立方体符号）が、レベル4では $D_{6,6,4,4}$ が、最も高い誤り訂正性能を示すことを発見した。また、レベル3の $D_{4,4,4}$ 、 $D_{6,4,4}$ 、 $D_{6,6,4}$ 、 $D_{6,6,6}$ に対して、量子ビットリソースを60%削減できる効率的な符号化器も新たに開発した。

H. Goto, “Optimized Many-Hypercube Codes toward Lower Logical Error Rates and Earlier Realization”, arXiv:2512.00561 (2025).



レベル3の超立方体符号で最も性能が高い多 $D_{6,4,4}$

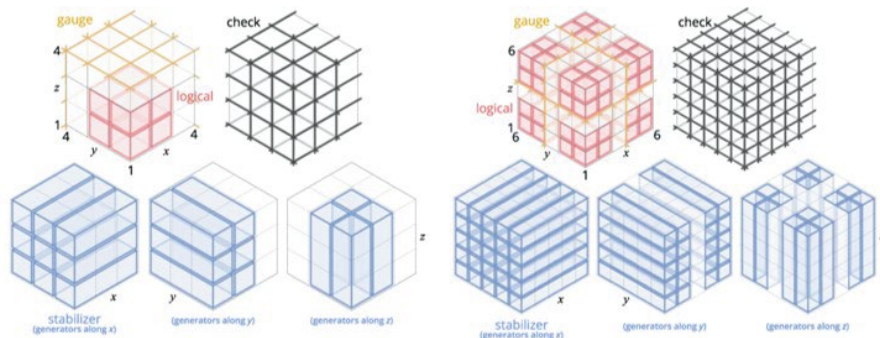


レベル3の多超立方体符号の性能比較

多超立方体符号の部分系符号への拡張

多超立方体符号はスタビライザー重みが大きく、その測定に必要な補助量子ビットが多いことが課題である。そこで、ゲージ自由度を導入して部分系符号へ拡張した部分系多超立方体符号を提案した。これにより、誤り訂正に必要な測定重みをすべてゲージ演算子の重み4または6に抑えられ、その測定結果からスタビライザーの測定結果が計算される。しかし、ゲージ自由度のために復号はオリジナルよりも難しくなる。そこで、複数の復号法について調べ、比較的高速で性能も高いニューラルネットワークベースの復号器を新たに開発した。

R. Nakai and H. Goto, “Subsystem many-hypercube codes: High-rate concatenated codes with low-weight syndrome measurements”, *Phys. Rev. Applied* 25, 014032 (2026).



レベル3の部分系多超立方体符号（左： $D_{4,4,4}$ 、右： $D_{6,6,6}$ ）

主要メンバー

（研究員） 仲井 良太

（特別研究員） 鹿俣 尚志

量子計算機システムデザイン研究チーム

キーワード: 誤り耐性量子計算機、計算機アーキテクチャ、システムソフトウェア

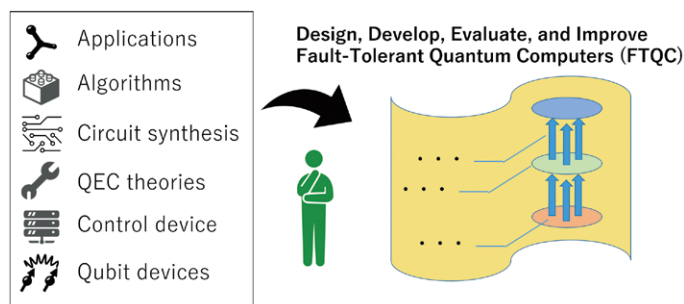
研究室概要

当チームでは高性能かつ拡張性に優れた量子計算機の実現に向けて、計算機システムの研究開発に取り組んでいます。特に、現代の計算機科学やソフトウェア開発の考え方を取り入れることで、複雑で抽象度の高い理論やタスクを具体的な設計・実装へと落とし込むための方法論を探究しています。また、量子計算機を開発する国内外のプロジェクトとも連携し、実用規模の誤り耐性量子計算機の実現を目指したシステムおよびソフトウェアの開発を進めています。

当チームの研究は、主に計算機アーキテクチャ、システムソフトウェア、デバイス制御の三つに大別されます。計算機アーキテクチャの研究では、現代の計算機設計の考え方を量子計算機に応用し、高性能な誤り耐性量子計算機を構成する方法を探究しています。単に計算速度や量子ビット数を改善するだけでなく、信頼性、汎用性、デバッグ性といった「計算機」として不可欠な性質を備えた見通しの良いシステム設計を目指しています。

システムソフトウェアの研究では誤り耐性量子計算機のためのコンパイラ、プロファイラ、設計支援ツールなどの研究開発に取り組んでいます。こうした基盤を通じて、アプリケーションが量子計算機に要求する性能や特性を明らかにし、実効性能に優れた量子計算機的设计指針を示します。また、量子計算機の性能を最大限に引き出すための課題を数理的な問題として定式化し、アルゴリズムやデータ構造を活用したプログラムの最適化・検証にも取り組んでいます。

デバイス制御の研究では、量子デバイス固有の機能を活用する計算機設計や、デバイス特有の制約、エラー特性の時間変動といった現実的な不確実性に対処できる実装方式を探究しています。また、実験チームとの連携を通じて、体系的な量子ビット計測システムの開発や現実的なノイズのモデリングを行うことで、理論モデルと実装のギャップを埋め、上位レイヤの設計の実現可能性を高めることにも取り組んでいます。



研究室的取り組み



鈴木 泰成 (Ph.D.) チームディレクター

主要論文

- 1 K. Hamada, Y. Suzuki, and Y. Tokunaga, "Efficient and high-performance routing of lattice-surgery paths on three-dimensional lattice", *Quantum* 10, 2061 (2026).
- 2 T. Kobori, Y. Suzuki, Y. Ueno, T. Tanimoto, S. Todo, and Y. Tokunaga, "LSQCA: Resource-Efficient Load/Store Architecture for Limited-Scale Fault-Tolerant Quantum Computing", *HPCA2025*, pp. 304 (2025).
- 3 N. Yoshioka, T. Okubo, Y. Suzuki, Y. Koizumi, and W. Mizukami, "Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems", *npj QI* 4, 45 (2024).
- 4 Y. Suzuki, T. Sugiyama, T. Arai, W. Liao, K. Inoue, and T. Tanimoto, "Q3DE: A fault-tolerant quantum computer architecture for multi-bit burst errors by cosmic rays", *MICRO2022*, pp. 1110 (2022).
- 5 Y. Suzuki, Y. Kawase, Y. Masumura, Y. Hiraga, M. Nakadai, J. Chen, K. M. Nakanishi, K. Mitarai, R. Imai, S. Tamiya, T. Yamamoto, T. Yan, T. Kawakubo, Y. O. Nakagawa, Y. Ibe, Y. Zhang, H. Yamashita, H. Yoshimura, A. Hayashi, and K. Fujii, "Qulacs: a fast and versatile quantum circuit simulator for research purpose", *Quantum* 5, 559 (2021).

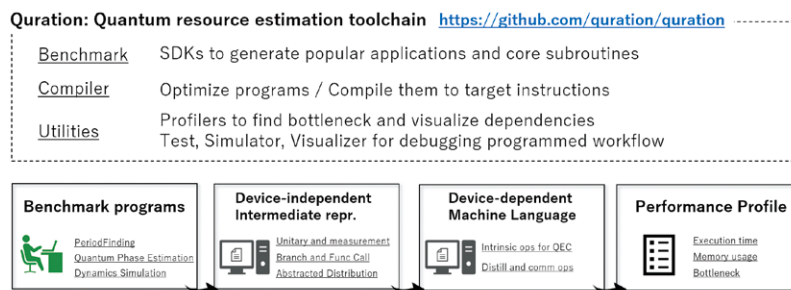
略歴

- 2018 東京大学 博士(工学)
- 2018 日本電信電話株式会社 セキュアプラットフォーム研究所 研究員
- 2019 科学技術振興機構 さきがけ研究員
- 2021 日本電信電話株式会社 コンピュータ&データサイエンス研究所 研究員
- 2023 日本電信電話株式会社 コンピュータ&データサイエンス研究所 准特別研究員
- 2025 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター 量子計算機システムデザイン研究チーム チームディレクター (現職)
- 2026 九州大学 量子コンピューティングシステム研究センター客員准教授 (現職)
- 2026 大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 特任准教授 (現職)
- 2026 分子科学研究所 光分子科学研究領域 客員教授 (現職)
- 2026 東京大学 工学系研究科 物理工学専攻 委嘱准教授 (現職)

研究紹介

誤り耐性量子コンピュータのツールチェーン「Quration」の開発

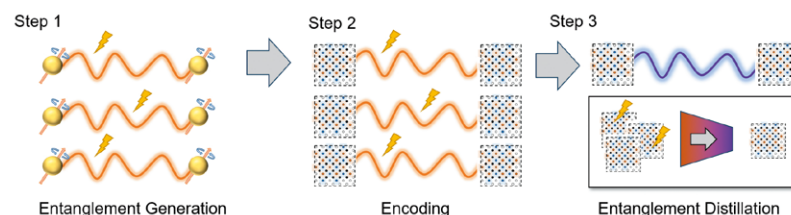
高性能な量子計算機を構築するには、基礎研究で培われた様々な技術を組み合わせることで計算機のパフォーマンスを改善していくことが求められる。ところが、様々な技術を導入していくと計算機の構成は複雑になり、ある変更が計算機全体の性能にどのように影響を与えるかを評価することが難しくなる。本研究ではこうした状況を解決するため、量子計算機の与えられた設計に対してその性能を評価し、ある改善がどのように影響を及ぼすかを評価するソフトウェア Quration を構築した。本ソフトウェアは位相推定や位数発見といった代表的なベンチマークプログラムの生成、代表的な量子誤り訂正方式やデバイスの制約に基づくアーキテクチャの命令セットへのコンパイル、与えられたデバイス特性に基づき性能を評価し可視化するためのプロファイラやアナライザなどを備えている。本成果はオープンソースソフトウェアとして <https://github.com/quration/quration> で公開されている。



Quration の構成と計算フロー

二次元量子ビットアレイ間での論理量子もつれ配送

大規模な誤り耐性量子計算機を実現するには、複数の計算ノードが通信しながら計算を行う分散誤り耐性量子計算の実現が重要となる。本研究では、分散誤り耐性量子計算のノード間通信を効率的に行うための通信プロトコルを提案した。分散誤り耐性量子計算の典型的なノード間通信は、1) 物理的な量子もつれを配送する、2) 量子もつれを符号化して寿命を延ばす、3) 量子もつれを蒸留してエラーを低減する、4) 量子もつれを消費して量子ビットをテレポートする、という4つのステップで行われる。本研究では、2番目のステップの成功度に関する確信度に応じて事後選択を行うことで、目標品質を満たす論理量子もつれを高速に生成するよう、プロセス全体を最適化する枠組みを提案した。また、二次元量子ビットアレイ上でこの枠組みを実行する具体的なプロセスを提示し、その性能を評価した。



論理量子もつれ配送のプロトコル

©<https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/m9gc-n3dl>

主要メンバー

(特別研究員) 井元 隆史

(研究員) 上野 洋典

(訪問研究員) HSIEH Cheng-Yun

(大学院生リサーチ・アソシエイト) 高良 明日香



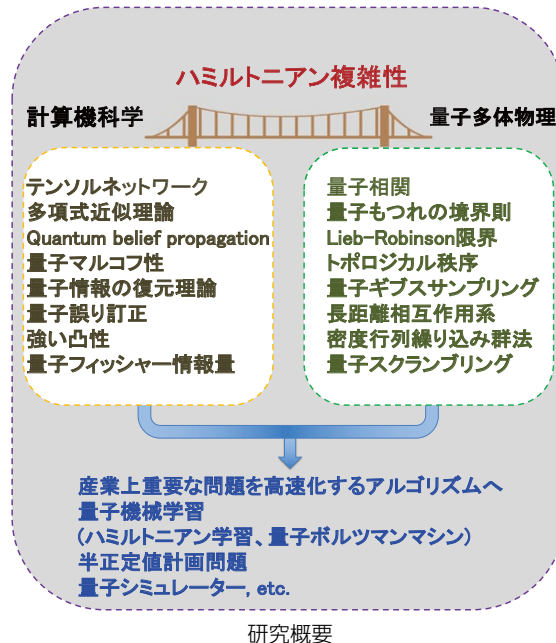
量子複雑性解析理研白眉研究チーム

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 H. Li, C. Shang, T. Kuwahara, and T. V. Vu, "Macroscopic particle transport in dissipative long-range bosonic systems", *Nature Communications*, 17, 4289 (2026).
- 2 K. Mizuta and T. Kuwahara, "Trotterization is Substantially Efficient for Low-Energy States", *Physical Review Letters*, 135, 130602 (2025).
- 3 T. Kuwahara, "Clustering of Conditional Mutual Information and Quantum Markov Structure at Arbitrary Temperatures", *Physical Review X* 15, 041010 (2025).
- 4 R. Achutha, D. Kim, Y. Kimura, and T. Kuwahara, "Efficient Simulation of 1D Long-Range Interacting Systems at Any Temperature", *Physical Review Letters*, 134, 190404 (2025).
- 5 D. Kim, T. Kuwahara, and K. Saito, "Thermal Area Law in Long-Range Interacting Systems", *Physical Review Letters* 134 (2), 020402 (2025).

略歴

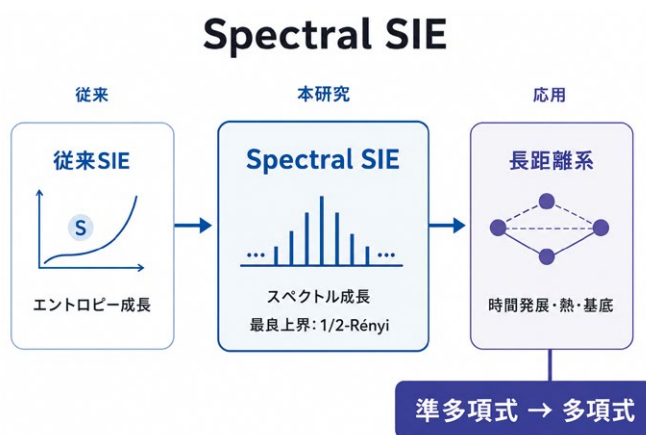
- 2015 東京大学 日本学術振興会特別研究員(学振PD)
- 2016 東北大学 材料科学高等研究所 (AIMR) 助教
- 2017 理化学研究所 革新知能統合研究センター 研究員
- 2021 科学技術振興機構さきがけ研究員(兼任) (現職)
- 2022 理化学研究所 開拓研究本部/量子コンピュータ研究センター 理研白眉チームリーダー(現職)

研究紹介

Spectral Small-Incremental-Entangling 定理の確立

当研究はKitaevとBravyiによるSmall-Incremental-Entangling (SIE) 予想が背景にある。これはEntanglement entropyが時間と共にどう変化するかを特徴づける普遍的な上界に関するものであり、2013年にAcoleyenらとAudenaertによって独立に解決された。従来のSIE定理は情報量がどのように時間と共に変化するかを解析しており、その詳細な構造(Entanglement Spectrum)については未解決であった。本研究では新たにSpectral Entangling Strengthと呼ばれる量を定義して、この量を用いてEntanglement Spectrumが従う最良の上界が(1/2)-Rényi entanglementで特徴づけられることを明らかにし、かつ定性的かつ定量的にタイトな不等式の形で定理を完成させた。

この応用として、長距離相互作用系のシミュレーション複雑性を時間発展／熱平衡状態／基底状態で議論した。これまで擬多項式時間のアルゴリズムが最良であり多項式時間への改善が大きな未解決問題であったが、Spectral SIEの定理を用いて多項式時間の複雑性を厳密に証明することに成功した。

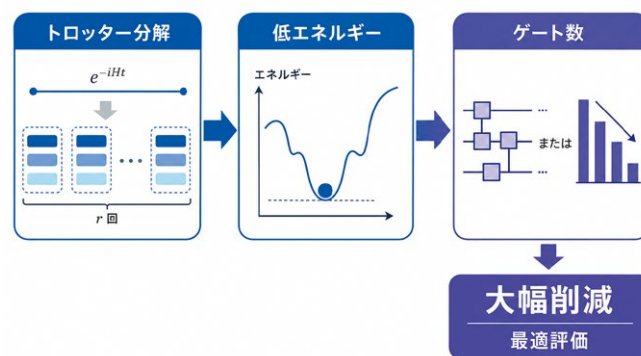


研究の概要図 (Spectral SIE)

Trotter分解を用いた手法による低エネルギー状態のシミュレーション

Trotter分解は量子ダイナミクスを記述する方法としては最も直接的であると同時に、最も実装が容易な方法であるとして注目されている。現状、Trotter分解を用いた最適な量子ゲート数を見積もることは重要な未解決問題である。近年、低エネルギー状態は従来知られていたよりも、圧倒的に少ないゲート数で実装できる可能性があることが明らかになっており、本研究ではこの問題を解決、すなわち最適なゲート数を見積もることに成功した。この成果は東京大学小芦研究室助教の水田郁氏との共同である。論文は国際会議QSim 2025のTalkに採用され (acceptance rate ~20%)、またPhysical Review Lettersに掲載された。

低エネルギー状態とTrotter



研究概要 (低エネルギーTrotter分解)

主要メンバー

(研究員) 木村 裕介
(基礎科学特別研究員) KIM Donghoon
(基礎科学特別研究員) 三橋 洋亮
(特別研究員) 尚 程

(日本学術振興会特別研究員) 矢田 季寛
(大学院生リサーチ・アソシエイト, JRA) 鶴飼 歩美
(大学院生リサーチ・アソシエイト, JRA) 中林 拓紀
(パートタイマー) 西川 秀明

数理量子情報理研白眉研究チーム

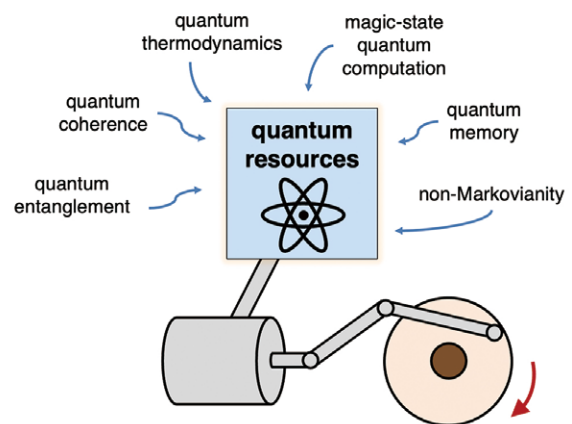
キーワード: Quantum information, Quantum resource theories, Quantum Shannon theory, Mathematical physics

研究室概要

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

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

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



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 L. Lami, M. Berta, and B. Regula, "Asymptotic quantification of entanglement with a single copy", *Nat. Phys.* 22, 439–445 (2026).
- 2 B. Regula and L. Lami, "Reversibility of quantum resources through probabilistic protocols", *Nat. Commun.* 15, 3096 (2024).
- 3 L. Lami and B. Regula, "No second law of entanglement manipulation after all", *Nat. Phys.* 19, 184–189 (2023).
- 4 B. Regula, "Probabilistic transformations of quantum resources", *Phys. Rev. Lett.* 128, 110505 (2022).
- 5 B. Regula and R. Takagi, "Fundamental limitations on distillation of quantum channel resources", *Nat. Commun.* 12, 4411 (2021).

略歴

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

研究紹介

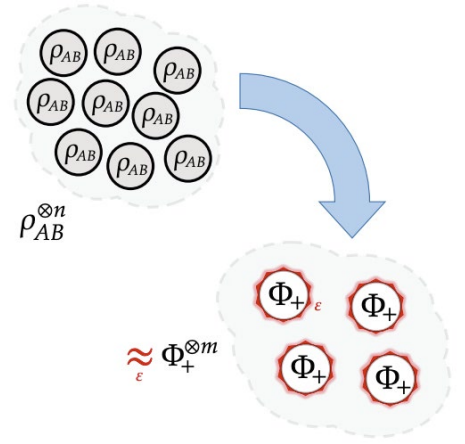
Simplifying the quantification of entanglement through hypothesis testing

The advantages provided by quantum entanglement rely on the fact that correlations between parts of a large quantum system make it more useful than the sum of its parts. However, this means that to optimally use entanglement, we need to understand the behavior of large systems, which leads to intractable asymptotic formulas involving many copies of quantum states.

Here we show that just a single copy of a state can tell us how to optimally detect and extract entanglement. Our approach relies on suitably adjusting the figures of merit in the fundamental task of entanglement distillation (purification) to connect it with entanglement testing (detecting entangled states). By developing novel mathematical techniques in quantum state discrimination, we show that the optimal solution is given by a measure of entanglement that involves no asymptotic limits and is easily computable.

L. Lami, M. Berta, and B. Regula, “Asymptotic quantification of entanglement with a single copy”, *Nature Physics* 22, 439–445 (2026).

Our approach shifts the focus of entanglement purification from the rate (yield) of distillation to the error of the process, which corresponds to the best achievable fidelity with the maximally entangled states ϕ_+ . By focusing on this error as the figure of merit, we are able to relate it with a quantum hypothesis testing problem which we then solve using a new approach that extends state-of-the-art techniques.



Refining the mathematical tools of quantum information theory

The precise understanding of the performance of quantum information processing tasks is often based on connecting them with various entropic measures of quantum information. An improved understanding of these entropies can thus have meaningful consequences for how accurately we can benchmark and compare the performance of practical tasks. Here we introduce new mathematical techniques that provide major improvements over previously known bounds and relations between various quantities used in the practically meaningful one-shot quantum information theory. This leads to new insights into the structure of these information measures and has the potential to improve known constraints on problems such as rates of quantum communication, performance of quantum state discrimination, or the extraction of randomness in quantum cryptography.

B. Regula, L. Lami, and N. Datta, “Tight relations and equivalences between smooth relative entropies”, *IEEE Transactions on Information Theory* 72, 3051–3073 (2026).

$$D_{\max}^{\sqrt{\epsilon}, T, =}(\rho \| \sigma) + \log \frac{1}{\epsilon} \leq D_H^{1-\epsilon}(\rho \| \sigma) \leq D_{\max}^{\epsilon-\mu, T, =}(\rho \| \sigma) + \log \frac{1}{\mu},$$
$$D_{\max}^{\sqrt{\epsilon}, P, =}(\rho \| \sigma) + \log \frac{1}{\epsilon} \leq D_H^{1-\epsilon}(\rho \| \sigma) \leq D_{\max}^{\sqrt{\epsilon-\mu}, P, =}(\rho \| \sigma) + \log \frac{1}{\mu^2}.$$

One of the consequences of our approach is an improved understanding of duality relations between the smooth max-relative entropy (which finds use in problems such as quantum randomness extraction or quantum channel simulation) and the hypothesis testing relative entropy (which governs state discrimination, communication through quantum channels, and quantum source compression).

主要メンバー

(特別研究員) SINGH Vishal

(研究パートタイマー) 渡邊 開人

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、理化学研究所（理研）が取り組む超伝導回路を用いた量子コンピュータの先端技術と、富士通が培ってきたコンピューティング技術や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推進する。

具体的には、1万量子ビット級への大規模化を可能とする、ハードウェアおよび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。ハードウェア面では量子ビットの製造ばらつき改善、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進める。さらに、これらのハードウェアに関する要素技術の研究成果を統合し、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。一方、ソフトウェア面では、量子コンピュータを動作させるために必要な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。これらの研究を通じて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, and K. Fujii, "Practical quantum advantage on partially fault-tolerant quantum computer", *Phys. Rev. X*, 15, 021057 (2025).
- 2 M. Ohfuchi and S. Sato, "Remote cross-resonance gate between superconducting fixed-frequency qubits," *Quantum Sci. Technol.* 9, 035014 (2024).
- 3 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).
- 4 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).
- 5 T. Kurita, M. Morita, H. Ohshima, and S. Sato "Pauli String Partitioning Algorithm with the Ising Model for Simultaneous Measurements", *J. Phys. Chem. A*, 127, 4, 1068–1080 (2023).

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)

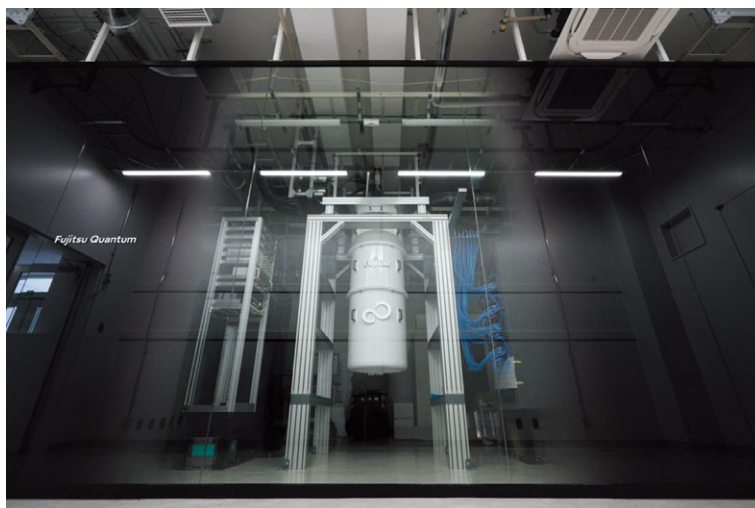
*連携センター長は中村泰信センター長が兼務

研究紹介

当連携センターの技術を元に、富士通が国内ベンダー初となる商用超伝導量子コンピュータを開発

当連携センターでは、2023年10月に国産2号機となる64量子ビット、2025年4月に世界最大級となる256量子ビットの超伝導量子コンピュータを開発してきた。これらの開発で培った技術を活用し、日本企業初となる商用の超伝導量子コンピュータシステムを富士通が産業技術総合研究所へ導入した。

本超伝導量子コンピュータシステムは、当連携センターで開発した冷凍機内部の高密度配線実装技術や大型量子ビットチップ実装技術を適用することで、超伝導量子コンピュータを構成する希釈冷凍機をアップグレードすることなく、世界最大級となる数百量子ビットまで拡張可能な設計を採用している。本量子コンピュータは、先端量子技術の研究開発基盤の強化や実用的な量子アプリケーションの開拓を推進することが期待される。

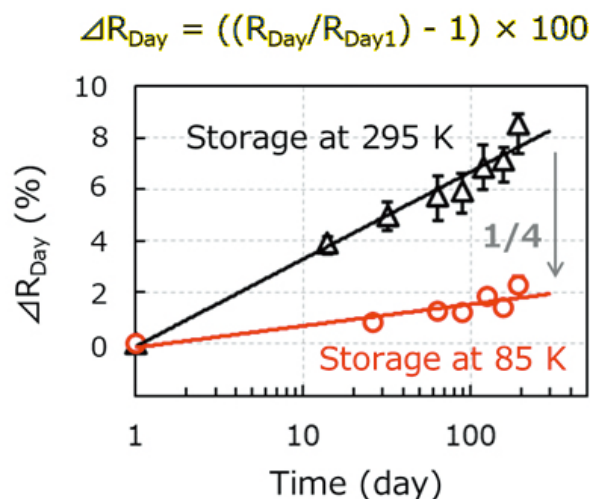


国内ベンダー初の超伝導量子コンピュータシステム

時間経過に伴うジョセフソン接合抵抗の増加を抑制するための技術を開発

代表的な超伝導量子ビットであるトランズモンは、キャパシタとジョセフソン接合を並列接続した非線形の共振回路である。ここでジョセフソン接合とは、二つの超伝導体の間に薄い絶縁層を挟んだデバイスであり、我々は現在の標準プロセスであるシャドウ蒸着を用いて作製したAl/AIOx/Al構造を採用している。室温で測定したジョセフソン接合の電気抵抗値は、量子ビットの特性を試算する重要なパラメータであるが、室温等での保管によって徐々に変化する（エージング）ことが知られている。これは、高精度に量子ビットを作製しても、希釈冷凍機の内部へ設置するまでの保管期間にその特性が劣化することを意味する。

この課題に対し、我々はデバイスを低温保管することで、エージングの進行を抑制する技術を開発した。具体的には、液体窒素を用いて生成される -185°C の気相環境で保持することにより、150 nmサイズのJJにおいて、6ヶ月間の低温保管で抵抗増加を2%に抑制した。これは、室温保管における抵抗変化率の4分の1に相当する。



低温保管によるエージングの抑制効果

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

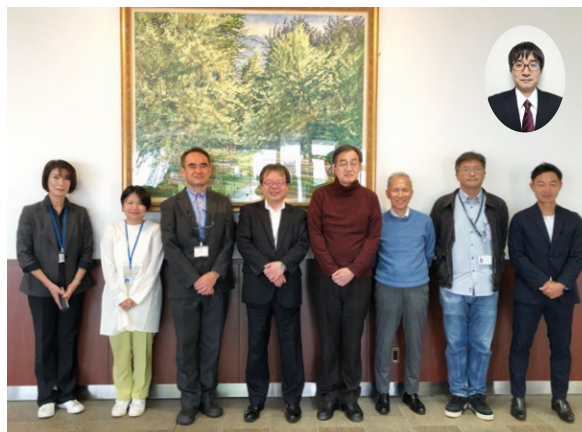
概要

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12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。
- ・文部科学省Q-LEAP事業「量子サイエンススクールプログラムの運営体制の構築」活動に代表者として取り組んでいる。



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) 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)

Boosting quantum error correction using AI

A method for fixing errors that occur in quantum computers is made massively more efficient through deep learning

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

A way to greatly enhance the efficiency of a method for correcting errors in quantum computers has been realized by theoretical physicists at RIKEN¹. This advance could help to develop larger, more reliable quantum computers based on light.

Quantum computers are looming large on the horizon, promising to revolutionize computing within the next decade or so.

“Quantum computers have the potential to solve problems beyond the capabilities of today’s most powerful supercomputers,” notes Franco Nori of the RIKEN Center for Quantum Computing (RQC).

But some major hurdles need to be overcome before quantum computers can be used to tackle practical problems. In particular, ensuring that they perform calculations reliably is a critical issue.

“The reliability of quantum computers is constrained by their extreme sensitivity to the environment,” explains Nori. “Even minor environmental disturbances can corrupt quantum information.”

To unleash the potential of quantum computers, it is thus vital to develop techniques that can fix quantum errors.

One attractive method is the Gottesman–Kitaev–Preskill (GKP) code. Named after its inventors, the GKP code was proposed in 2001 as a way to encode a qubit, the quantum equivalent of a bit, in a harmonic oscillator—a system that resembles a pendulum.

“It’s a promising candidate to realize quantum error correction without requiring a lot of hardware,” says Nori.

However, GKP codes rely on squeezed states—quantum states that are difficult to generate and control. Consequently, GKP codes have been challenging to implement in practical experiments, particularly in light-based systems.

To overcome this problem, a team including Nori, Clemens Gneiting and Yexiong Zeng, both also at RQC, has developed a method that uses deep learning to optimize GKP states.

This optimization reduces the need to use large-amplitude squeezed states while preserving the code’s powerful error-correction capabilities.

“By leveraging AI, our method fine-tunes the structure of GKP states, striking an optimal balance between resource efficiency and error resilience,” says Zeng. “Our optimized GKP codes outperform conventional ones, requiring only a fraction of the squeezed states while achieving superior error correction.”

The method turned out to be remarkably efficient, exceeding the team’s expectations. “We were pleasantly surprised,” says

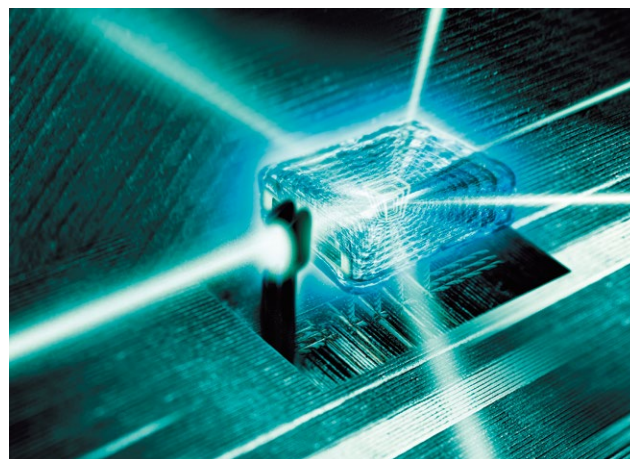


Figure: Quantum computers based on light stand to benefit from a technique that uses machine learning to enhance a method for fixing quantum errors.

© 2025 RICHARD KAIL/SCIENCE PHOTO LIBRARY

[<https://www.sciencephoto.com/media/393429/view>]

Zeng. “The neural network achieved a much more efficient encoding than we had initially expected.”

“By reducing resource demands and improving error resilience, our work accelerates the path toward scalable, fault-tolerant quantum computing, paving the way for significant advancements in science and technology,” says Gneiting.

The team is now planning to extend the code to a multi-logical system, says Zeng.

Related content:

Machine learning contributes to better quantum error correction (https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2023/20230908_2/index.html)

Powerful quantum error correction with a beautiful geometry (https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2024/20240905_1/index.html)

Reference

1. Zeng, Y., Qin, W., Chen, Y.-H., Gneiting, C. & Nori, F. Neural-network-based design of approximate Gottesman–Kitaev–Preskill code. *Physical Review Letters* **134**, 060601 (2025). doi: 10.1103/PhysRevLett.134.060601

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Extending the applicability of a key quantum law

Even quantum systems with long-range interactions between particles can be analyzed using a key principle

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

By extending a key law in quantum information to systems with long-range interactions, RIKEN physicists have enhanced its usefulness¹. This advance could help to design better quantum computers.

Compared with their classical counterparts, systems made up of many quantum particles—such as quantum computers—are horrendously complex to analyze and simulate. This complexity is due in part to the strong correlations between particles, which can act over long distances.

One helpful principle for understanding systems in which the quantum particles are split into two groups is the area law. It states that the amount of information shared between the two parts of a quantum system depends on the boundary between them rather than the total size of the two parts.

“This idea provides profound insights into how information is structured in nature and has far-reaching implications across physics, helping researchers explore phenomena ranging from exotic phases of matter to black holes,” says Donghoon Kim of the RIKEN Center for Quantum Computing (RQC).

The area law simplifies the analysis of large quantum systems because it means it is not necessary to know all the details about the entire system, but just how the two parts are connected across their boundaries.

However, the area law has only been shown to apply to systems that have short-range interactions between their particles. That excludes many systems of great interest.

“In many important physical systems, particles interact with others far away—not just their neighbors,” explains Kim. “These long-range interacting systems are essential for understanding both the large-scale structure of the Universe and the behavior of complex quantum materials.”

Now, Kim, Tomotaka Kuwahara, also of RQC, and Keiji Saito of Kyoto University have shown that the area law at finite temperatures also applies to long-range interacting systems under certain conditions.

“Our result suggests that, by carefully choosing meaningful and realistic assumptions, we can extend the reach of mathematical analysis into areas that were once thought to be out of bounds,” says Kim.

The trio’s achievement has important implications for practical applications of quantum systems such as quantum computers.

“We now have a much clearer understanding of when and how quantum systems can be simulated efficiently at finite temperatures,” says Kim. “This is especially relevant for quantum computing and quantum simulation, where managing entanglement and thermal correlations is a major challenge.”

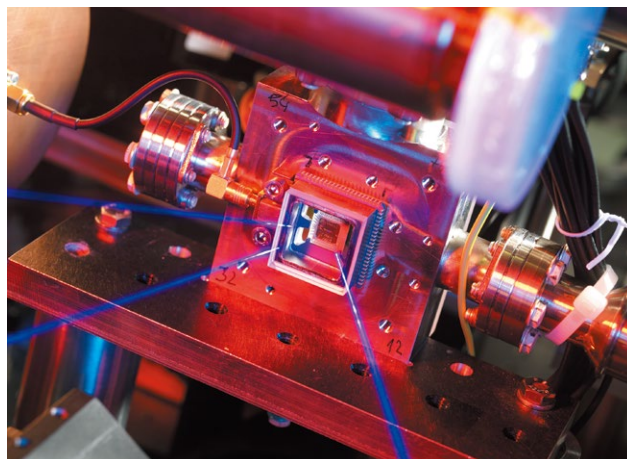


Figure: Ion traps such as the one shown here are one promising technology for developing quantum computers. Trapped ions are also an example of a long-range interacting system that the area law can be applied to.

© ANDREW BROOKES, NATIONAL PHYSICAL LABORATORY/ SCIENCE PHOTO LIBRARY

[<https://www.sciencephoto.com/media/457620/view>]

The result can help guide the design of algorithms and hardware by identifying the regimes where quantum information remains localized and tractable—even when long-range interactions are present, Kim notes.

Related content:

Simplifying long-range quantum interactions in many-body systems [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20201204_1/index.html]

Boson systems break the finite speed limit [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20240725_1/index.html]

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

Reference

1. Kim, D., Kuwahara, T. & Saito, K. Thermal area law in long-range interacting systems. *Physical Review Letters* **134**, 020402 (2025). doi: 10.1103/PhysRevLett.134.020402

RIKEN Research Fall 2025

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Using a quantum computer to simulate a quantum process

The gap between conventional and quantum computers is closing when it comes to simulating scrambling of quantum information

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

Four RIKEN researchers have used two small quantum computers to simulate quantum information scrambling, an important quantum-information process¹. This achievement illustrates a potential application of future quantum computers.

Still in their infancy, quantum computers are only just beginning to be used for applications. But they promise to revolutionize computing when they become a mature technology.

One possible application for quantum computers is simulating the scrambling of quantum information—a key phenomenon that involves the spread of information in quantum systems ranging from strange metals to black holes.

After encoding information in one part of a quantum system, it becomes diluted over time through various processes. Eventually, it spreads out across the whole system.

The original information is not lost, but it is much harder to reconstruct since you need access to the entire system. The quantum-information scrambler par excellence is the black hole, which is the ultimate shredder when it comes to quantum information.

Understanding how information scrambling occurs is critical for addressing fundamental problems in quantum physics.

“Quantum-information scrambling is of interest to us because we can use it to do some additional calculations, such as statistical physics calculations,” says Kazuhiro Seki of the RIKEN Center for Quantum Computing (RQC).

One way to study quantum-information scrambling is to perform simulations, which is where quantum computers can help since they are better suited for such simulations than conventional computers.

Now, Seki and Seiji Yunoki, also of RQC, and two co-workers have used two quantum computers with 20 qubits—the quantum equivalent of bits—to simulate quantum-information scrambling circuits (Figure).

For the simulation, the researchers used state-of-the-art quantum computers via the cloud, which are based on qubits formed from trapped ions. They used the quantum computers to perform three simulations, which included creating a scrambled state and using it to perform quantum statistical mechanical calculations.

While a powerful conventional computer could have been used to perform the simulation, the complexity of simulations is approaching the realm where quantum computers will be indispensable for such calculations.

“We only used 20 qubits to conduct the simulations in this study,” says Yunoki. “If we can use more than 50 qubits

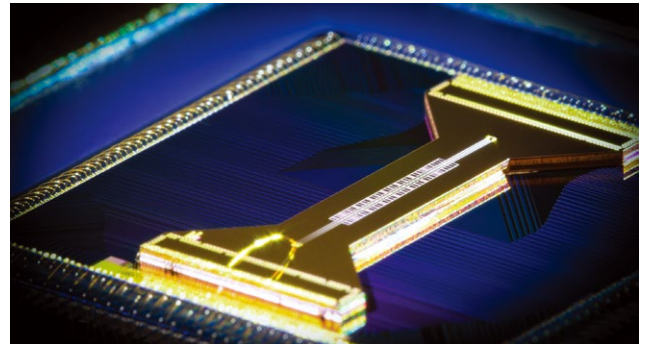


Figure: A close up of the trapped-ion quantum computer used to simulate quantum-information scrambling circuits.

© 2025 Quantinuum

[Quantinuum (via researcher)]

to perform similar calculations, it may be too difficult for a classical computer to handle.”

A 20-qubit, trapped-ion quantum computer was installed at RIKEN in February 2025. “We’re hoping to upgrade it in the next couple of years, so that it will have around 50 qubits,” Yunoki notes.

Related content:

Extending the applicability of a key quantum law [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20250515_1/index.html]

New quantum computer on the Wako campus [https://www.riken.jp/en/news_pubs/news/2025/20250212_1/index.html]

Realizing clean qubits for quantum computers using electrons on helium [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20240328_2/index.html]

Reference

1. Seki, K., Kikuchi, Y. Hayata, T. & Yunoki, S. Simulating Floquet scrambling circuits on trapped-ion quantum computers. *Physical Review Research* **7**, 023032 (2025). doi: 10.1103/PhysRevResearch.7.023032

RIKEN Research Winter 2025

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Reading multiple superconducting qubits in record time

Qubits in superconducting quantum computers can now be read faster than ever thanks to a new measurement scheme

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

RIKEN physicists have found a way to speed up the readout of qubits in superconducting quantum computers, which should help to make them faster and more reliable¹.

After decades of being theoretical propositions, working quantum computers are just starting to emerge. For experimentalists such as Peter Spring of the RIKEN Center for Quantum Computing (RQC), it's an auspicious time to be working in the field.

"It's very exciting. It feels like this is a very fast-moving field that has a lot of momentum," says Spring. "And it really feels like experiments are catching up with theory."

When they come online, mature quantum computers promise to revolutionize computing, being able to perform calculations that are well beyond the capabilities of today's supercomputers. And it feels like that prospect is not so far off.

Currently, half a dozen technologies are jockeying to become the preferred platform for tomorrow's quantum computers. A leading contender is a technology based on superconducting electrical circuits. One of its advantages is the ability to perform calculations faster than other technologies.

Because of the very sensitive nature of quantum states, it is vital to regularly correct any errors that may have crept in. This necessitates repeatedly measuring a selection of qubits, the building blocks of quantum computers. But this operation is slower than quantum gate operations, making it a bit of a bottleneck.

"If qubit measurement is much slower than the other things you're doing, then basically it becomes a bottleneck on the clock speed," explains Spring. "So we wanted to see how fast we could perform qubit measurements in a superconducting circuit."

Now, Spring, Yasunobu Nakamura, also of RQC, and their co-workers have found a way to simultaneously measure four qubits in superconducting quantum computers in a little over 50 nanoseconds, which is about twice as fast as the previous record.

A special filter ensures that the measurement line used to send the measurement signals doesn't interfere with the qubit itself. Spring and colleagues realized the filter by 'coupling' a readout resonator with a filter resonator in such a way that energy from the qubits wasn't able to escape through the measurement line.

They were able to measure the qubits at very high

accuracies, or 'fidelities'. "We were surprised at how high fidelity the readout turned out to be," says Spring. "On the best qubit, we achieved a fidelity of more than 99.9%. We hadn't expected that in such a short measurement time."

The team aims to achieve even faster qubit measurements by optimizing the shape of the microwave pulse used for the measurement.

Related content:

Boosting quantum error correction using AI [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20250509_2/index.html]

Scientists develop novel high-fidelity quantum computing gate [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2024/20241122_2/index.html]

Faster technique for resetting quantum circuits proposed [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20220121_1/index.html]

Reference

1. Spring, P. A., Milanovic, L., Sunada, Y., Wang, S. van Loo, A. F., Tamate, S. & Nakamura, Y. Fast multiplexed superconducting-qubit readout with intrinsic Purcell filtering using a multiconductor transmission line. *PRX Quantum* **6**, 020345 (2025). doi: 10.1103/PRXQuantum.6.020345

RIKEN Research Winter 2025

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

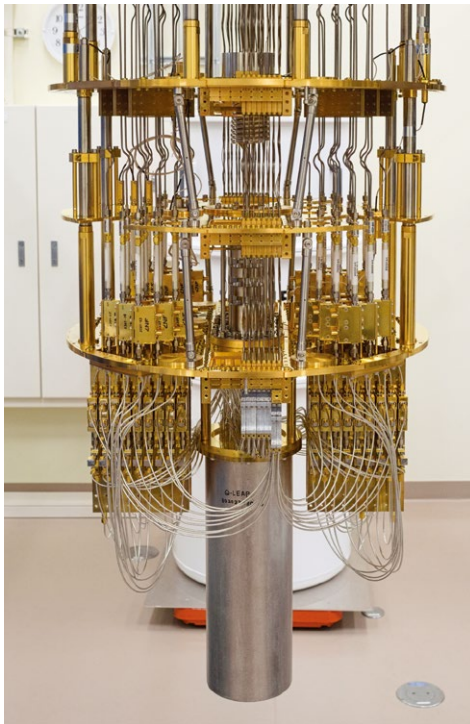


Figure 1: A photograph of a dilution refrigerator used to cool a superconducting quantum computer. The quantum circuit is inside the cylindrical metal shield at the bottom of the photo.
© 2025 RIKEN Center for Quantum Computing
[Researcher (unpublished)]



Peter Spring (top row, fourth from the right), Yasunobu Nakamura (bottom row, second from the right) and their team at the RIKEN Center for Quantum Computing, located in the city of Wako in Japan.
© 2025 RIKEN
[Researcher]

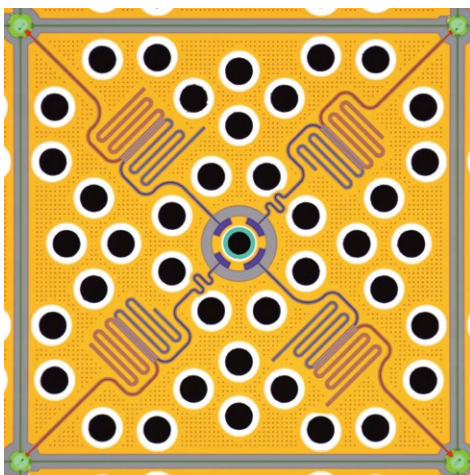


Figure 2: An image of the circuit used for the rapid readout of four qubits (green circles at each corner).
© 2025 APS
[Fig. 4a in Ref. 1]

Reading qubits in an ultraclean environment

Microwaves should be able to probe qubits made from single electrons floating above liquid helium

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

One intriguing method that could be used to form the qubits needed for quantum computers involves electrons hovering above liquid helium. But it wasn't clear how data in this form can be read easily—now RIKEN researchers may have found a solution¹.

Conventional computers work by performing operations on bits encoded in silicon. But no one is really sure how qubits will be encoded in the quantum computers of the future. Half a dozen or so platforms are currently being pursued, including superconductors, silicon, light and trapped ions.

One of the most intriguing ideas for qubits is electrons that float above the surface of liquid helium at a temperature of about four degrees Celsius above absolute zero.

The great advantage of such a system is that it provides a very clean environment, with minimum interference from spins of nearby particles. This will allow qubits to maintain their quantum state for much longer than in noisier environments.

“For an electron floating in a vacuum above helium, the only thing close to it is helium atoms, which are highly inert,” explains Asher Jennings of the RIKEN Center for Quantum Computation (RQC) and RIKEN Center for Advanced Photonics. “That means the electron is very well protected, making it an excellent system for storing quantum information.”

But for such qubits to be used in quantum computers, the data they store needs to be readable. The small magnetic moment of an electron above helium makes direct readout of its spin infeasible. And so, scientists are exploring indirect schemes for reading out the electron spin.

A promising way to do that is to detect the transition of the electron from its lowest energy state to a higher one, known as the Rydberg state.

Now, scientists including Jennings and Erika Kawakami, also of RQC, have demonstrated it should be possible to detect the Rydberg transition of a single electron by measuring the change in capacitance.

They did this by using 10 million electrons floating above liquid helium, thereby creating a system that acts as a capacitor. The team were able to detect the change in the quantum capacitance that occurred when the electrons were promoted to the Rydberg state through changes in the microwave frequency.

While the system needs to be scaled down by a factor of 10,000 times, it demonstrates that such a scaled-down device should be able to detect the signal from a single qubit.

“Our measurements of the capacitance change in a large system indicate that it should be easily measurable for a single electron in a single-electron device,” says Jennings.

The team is now working on performing the same measurement in a one-electron system.

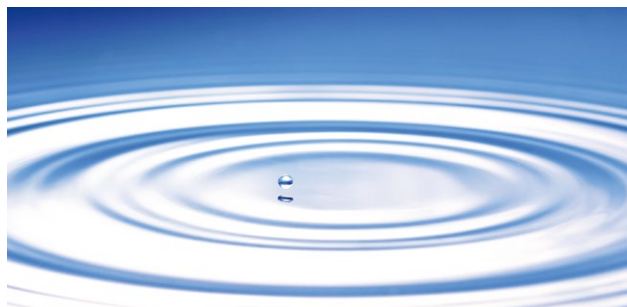


Figure: An electron hovering over a surface of liquid helium could be used as a qubit in future quantum computers.

© imageBROKER/Andreas Mallinckrodt/Getty
[<https://www.gettyimages.co.uk/detail/photo/drop-causes-circular-waves-on-the-water-surface-royalty-free-image/2216548413>]



Asher Jennings (second from the left in the right row), Erika Kawakami (second from the left in the left row), and co-workers have used frequency modulation of microwaves to probe the quantum capacitance of Rydberg transitions of electrons on the surface of liquid helium.

© 2026 RIKEN
[Researcher]

Related content:

Realizing clean qubits for quantum computers using electrons on helium [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20240328_2/index.html]

Floating quantum ideas [<https://www.riken.jp/en/about/people/2021fall-2/index.html>]

Reference

- Jennings, A., Grytsenko, I., Tian, Y., Rybalko, O., Wang, J., Barabash, I. J. & Kawakami, E. Probing the quantum capacitance of Rydberg transitions of surface electrons on liquid helium via microwave frequency modulation. *Physical Review Letters* **135**, 087001 (2025). doi: 10.1103/5y8p-qhb4

RIKEN Research Spring 2026

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Quantum connections keep it local

Quantum correlations between more than two particles that give some quantum materials their exotic behavior can only exist over short distances

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

The properties of a quantum material are driven by links between its electrons known as quantum correlations. A RIKEN researcher has shown mathematically that, at non-zero temperatures, these connections can only exist over very short distances when more than two particles are involved¹.

This finding sets a fundamental limit on just how ‘exotic’ a quantum material can be under realistic, finite-temperature conditions.

A fascinating aspect of quantum physics is the concept that two particles that are spatially separated can communicate with each other. This so-called ‘spooky action at a distance’, as Einstein referred to it, is crucial for understanding the origin of the exotic properties that arise in some materials, particularly at low temperatures.

These unusual material properties are determined by the exact nature of the quantum correlation, and the material is said to be in a specific quantum phase. This is analogous to the traditional phases of matter—solid, liquid and gas—being defined by the chemical interactions between the atoms.

Many quantum phases can be explained by considering correlations between just two particles.

Recently, however, even more strange phases have been identified which can only be described by evoking connections between more than two particles. These correlations are less well understood than those between two particles. For example, it was unclear how far a correlation between more than two particles can exist.

Previous studies had only analyzed three-party correlations in special models and parameter regimes; for example, at high temperature or with strong simplifying assumptions.

Now, Tomotaka Kuwahara of the RIKEN Center for Quantum Computing has rigorously proved that genuinely three-way quantum correlations cannot stretch over long distances in any thermal equilibrium state at any temperature.

The first step was to define a measure of correlation strength. Kuwahara used a metric called conditional mutual information.

“I showed mathematically that the conditional mutual information between distant regions always decays exponentially with the distance between them,” explains Kuwahara.

Kuwahara proved that thermal quantum systems must obey a quantum analog of the Hammersley–Clifford rule, which states that if we know everything about a middle region, then the distant two regions are essentially independent, and genuinely three-way correlations cannot extend far.

Kuwahara next hopes to go beyond the thermal equilibrium case considered in this work.

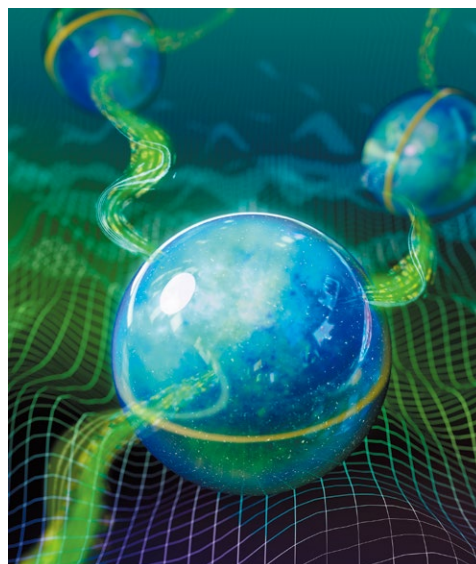


Figure: Multipartite quantum correlations give quantum materials their exotic properties.

© Nanoclustering/Science Photo Library/Getty
[<https://www.gettyimages.co.uk/detail/illustration/quantum-entanglement-conceptual-illustration-royalty-free-illustration/2156469308>]

“A natural step is to build a similar universal theory of quantum entanglement for more general steady states, including systems that are driven or carry currents and are not exactly in equilibrium, and to tackle the much harder zero-temperature regime,” he says.

Related content:

It takes three to tangle: long-range quantum entanglement needs three-way interaction [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2022/20220426_3/index.html]

Extending the applicability of a key quantum law [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20250515_1/index.html]

Tightening the math behind a key quantum process [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20250423_1/index.html]

Reference

1. Kuwahara, T. Clustering of conditional mutual information and quantum Markov structure at arbitrary temperatures. *Physical Review X* **15**, 041010 (2025). <https://doi.org/10.1103/9hx7-pzxw>

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Cutting down on quantum crosstalk

Precise measurements show that future quantum computers may need to correct for errors caused by interference between neighboring quantum dots

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

Developments that can confine individual electrons are potential building blocks for quantum information systems. But the electrons must be protected from external disturbances.

RIKEN researchers have now shown how quantum information encoded into a so-called quantum dot can be negatively affected by nearby quantum dots¹. This has implications for developing quantum information devices based on quantum dots.

Quantum computers process information using so-called qubits: physical systems whose behavior is governed by the laws of quantum mechanics. An electron, if it can be isolated and controlled, is one example of a qubit platform with great potential.

One way of controlling an electron is to use a quantum dot. These tiny structures trap charged particles using electric fields at the tips of metal electrodes separated by just a few tens of nanometers.

To be useful, quantum dots have to be able to store quantum information for a long time. But quantum states are very fragile and can be easily destroyed by interference from the outside world.

As Takashi Kobayashi of the RIKEN Center for Quantum Computing and co-workers have now shown, this problem is exacerbated when many quantum dots are placed close together, which will necessarily be the case in a fully functioning quantum computer.

“Our experimental results let the silicon quantum computing community recognize the impact of electron rearrangements in quantum circuits,” says Kobayashi. “This insight paves the way toward realizing a large-scale silicon quantum computer with an appropriate quantum error correcting code.”

The qubits constructed by the RIKEN team incorporated a micromagnet that made the electrons highly sensitive to electric fields. This meant the electron could be controlled by making only small changes to the voltage applied across the quantum-dot electrodes (Figure).

But this sensitivity had a downside: as the electrons in neighboring quantum dots move through the micromagnet's magnetic field, they generate an electric field that alters the energy of the qubit and disturbs the quantum information.

Kobayashi and co-workers have now directly measured this shift for the first time. They found that it is large enough to cause a considerable qubit error rate unless it is properly dealt with.

“Our next step is to develop methods to cancel or avoid the impact of this charge-induced energy shift,” says Kobayashi. “We are also seeking to harness the energy shift as a resource for a new class of qubit operations, which might give silicon spin qubits a distinctive advantage against other qubit platforms.”

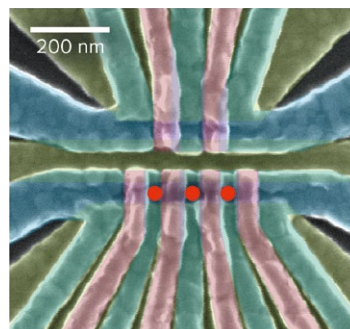
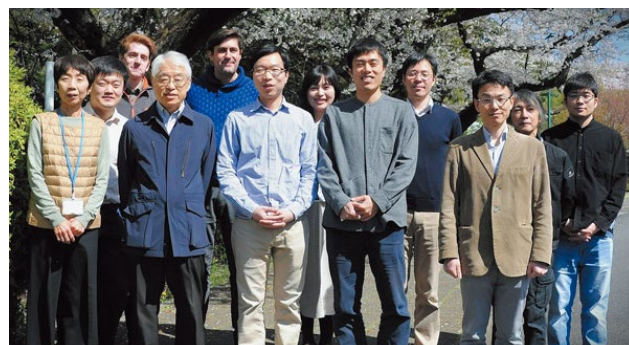


Figure: False-colored scanning electron microscope image of the quantum dot device. The red dots indicate the locations of the quantum dots.

© 2026 RIKEN Center for Quantum Computing
[Researcher (unpublished)]



Takashi Kobayashi (third from the right) and co-workers have measured the energy shift of an electron-spin qubit induced by neighboring quantum dots.

© 2026 RIKEN
[Researcher]

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]

Boosting quantum error correction using AI

[https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20250509_2/index.html]

Fast and faithful quantum measurements of electron spin qubits

[https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20240606_1/index.html]

Reference

1. Kobayashi, T., Noiri, A., Nakajima, T., Takeda, K., Camenzind, L. C., Jin, I. K., Scappucci, G. & Tarucha, S. Charge-induced energy shift of a single-spin qubit under a magnetic field gradient. *Physical Review Applied* **23**, 054078 (2025). doi:10.1103/PhysRevApplied.23.054078

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Less noise, more gain for quantum computers

A low-noise readout amplifier promises to accelerate progress on large-scale quantum computers

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

The low-noise, high-gain properties needed for high-performance quantum computing can be realized in a microwave photonic circuit device called a Josephson traveling-wave parametric amplifier (JTWPA), RIKEN researchers have shown experimentally¹. This advance stands to speed up development of superconducting quantum computer systems at the 100-qubit scale.

Quantum computers are extraordinary feats of research and engineering, combining highly advanced quantum physics with state-of-the-art fabrication techniques designed to physically manipulate light near the limits of quantum dynamics.

While the elemental quantum bits—qubits—are where the magic of quantum computing happens, they need to be ‘read’ in order for their computations to be useful. Unfortunately, the very act of reading the state of a qubit can introduce noise and interference that obscures the data.

The readout operation needs to meet several criteria: it needs to be fast enough with very high signal-to-noise ratio to be able to measure the qubit in a single shot, while operating with just a few quanta in energy (where a quantum is the energy of one microwave photon). Ideally, it should also comb multiple frequencies so it can read multiple qubits at once using the same circuit.

“So far, amplifiers based on an array of Josephson junctions fulfill all of these qualities except for noise, which is what we focused on in this study,” says Sandbo Chang of the RIKEN Center for Quantum Computing (RQC).

Chang, Yasunobu Nakamura, also of RQC, and co-workers have resolved a long-standing noise issue with JTWPAs. This advance promises to strengthen this highly accessible scheme for qubit signal processing.

Noise is inevitably added to a readout signal when it is amplified. Quantum mechanics requires any phase-preserving amplifier with high gain to add at least half a quantum of noise. The best previous noise level achieved by a Josephson traveling-wave parametric amplifier is often one photon or more, which has limited the usefulness of this technology.

“This is mostly because previous approaches use lossy dielectric material in their design,” says Chang.

By dropping the use of lossy dielectric material and instead creating a spiraled fishbone-like tapered waveguide structure (Figure), the team was able to reduce the noise to 0.68 quanta, only 0.18 quanta above the quantum limit. They demonstrated this through performing simulations and creating an experimental device.

“Our goal was also to keep the fabrication recipe as

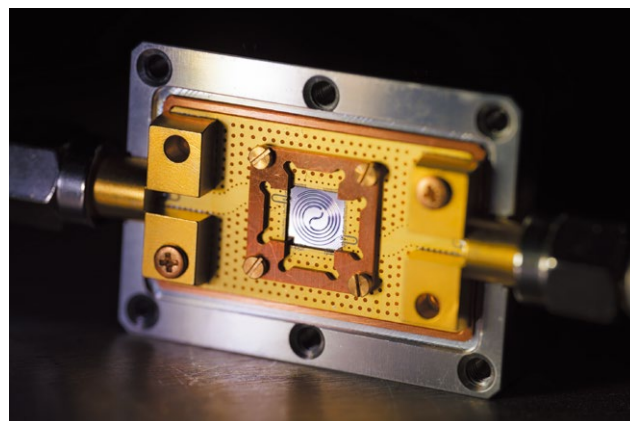


Figure: A long, spiral-wound waveguide with a fine-tapered, fishbone-like structure can amplify photon signals from quantum computing qubits with very low noise.

© 2026 RIKEN Center for Quantum Computing [Researcher]

accessible as possible,” says Nakamura. “The hope is that most labs that can already fabricate superconducting qubits will already have the techniques and equipment they need to reproduce our results.”

Related content:

Reading multiple superconducting qubits in record time [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20250924_1/index.html]

Scientists develop novel high-fidelity quantum computing gate [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/pr/2024/20241122_2/index.html]

Boosting quantum error correction using AI [https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20250509_2/index.html]

Reference

1. Chang, C. W. S., van Loo, A. F., Hung, C.-C., Zhou, Y., Gndt, C., Tamate, S. & Nakamura, Y. Josephson traveling-wave parametric amplifier based on a low-intrinsic-loss lumped-element coplanar waveguide. *Physical Review Applied* **24**, 044081 (2025). doi: 10.1103/physrevapplied.24.044081

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

発表論文リスト

2025年度データ

Title	Authors	Article
Room-temperature perpendicular-anisotropic ferrimagnet Co3Mo mediated by cobalt-kagome flat band	K. Ishida, K. Fujiwara, K. Nakazawa, T. Yamazaki, S. Souma, T. Seki, D. Shiga, H. Kumigashira, T. Sato, Y. Motome, A. Tsukazaki	Communications Materials 7 (2026).
Logical entanglement distribution between distant two-dimensional array qubits	Y. Maeda, Y. Suzuki, T. Kobayashi, T. Yamamoto, Y. Tokunaga, K. Fujii	Physical Review Research 8.013282 (2026).
Continuous-variable fault-tolerant quantum computation under general noise	T. Matsuura, N. C. Menicucci, H. Yamasaki	Nature Communications 17.1709 (2026).
Observation of the nonlinear chiral thermoelectric Hall effect in tellurium	T. Nomoto, A. Kikkawa, K. Nakazawa, T. Yamaguchi, F. Kagawa	Nature Physics 21.1920 (2025).
Fast State Stabilization Using Deep Reinforcement Learning for Measurement-Based Quantum Feedback Control	C. Song, Y. Liu, D. Dong, H. Yonezawa	IEEE Transactions on Quantum Engineering 6.1 (2025).
Generation of 10-dB squeezed light from a broadband waveguide optical parametric amplifier with improved phase locking method	K. Hirota, T. Kashiwazaki, G. Ha, T. Yamashima, P. Jaturaphagorn, T. Suzuki, K. Takahashi, A. Kawasaki, A. Inoue, W. Asavanant, M. Endo, T. Umeki, A. Furusawa	Optics Express 34.7958 (2026).
Scalable Optical Quantum State Synthesizer with Dual-Mode Resonator Memory	F. Hanamura, K. Takase, K. Hirota, R. Nehra, F. Lang, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, W. Asavanant, M. Endo, J. Yoshikawa, A. Furusawa	PRX Quantum 6.040336 (2025).
ZX graphical calculus for continuous-variable quantum processes	H. Nagayoshi, W. Asavanant, R. Ide, K. Fukui, A. Sakaguchi, J. Yoshikawa, N. C. Menicucci, A. Furusawa	Physical Review Research 7 (2025).
Optically sampled superconducting-nanostrip photon-number resolving detector for non-classical quantum state generation	M. Endo, K. Takahashi, T. Nomura, T. Sonoyama, S. Miki, M. Yabuno, H. Terai, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, R. Nehra, K. Takase, W. Asavanant, A. Furusawa	Optics Express 33.32545 (2025).
Robust photon blockade with hybrid molecular optomechanics	J. Tang, B. Li, B. Yin, TX. Lu, R. Huang, F. Nori, H. Jing	npj Quantum Information 12 (2026).
Asymptotic quantification of entanglement with a single copy	L. Lami, M. Berta, B. Regula	Nature Physics 22.1 (2026).
Tight relations and equivalences between smooth relative entropies	B. Regula, L. Lami, N. Datta	IEEE Transactions on Information Theory 72.1 (2026).
Toward Ultra-High-Speed, Ultra-Low-Power Cryogenic Superconductor Computing	K. Inoue, I. Byun, M. Tanaka, Y. Ueno, N. Takeuchi, S. Kawakami, O. Chen, D. Min, T. Tanimoto, T. Ono, H. Nakamura, J. Kim	Computer 59.149 (2026).
Characterizing many-body dynamics with projected ensembles on a superconducting quantum processor	Z. Yan, ZY. Ge, R. Li, YR. Zhang, F. Nori, Y. Nakamura	Science Advances 12.eaeb8213 (2026).
Selective excitation of superconducting qubits with a shared control line through pulse shaping	R. Matsuda, R. Ohira, T. Sumida, H. Shiomi, A. Machino, S. Morisaka, K. Koike, T. Miyoshi, Y. Kurimoto, Y. Sugita, Y. Ito, Y. Suzuki, P. A. Spring, S. Wang, S. Tamate, Y. Tabuchi, Y. Nakamura, K. Ogawa, M. Negoro	Physical Review Research 8.L012003 (2026).
Hierarchical Quantum Error Correction with Hypergraph Product Code and Rotated Surface Code	J. Haruna, K. Fujii	Progress of Theoretical and Experimental Physics 2025.103a03 (2025).
Exact description of fermionic reservoirs via purified damped ancillary fermions	P. Liang, N. Lambert, M. Cirio	Physical Review B 113.085131 (2026).
Neural-network-assisted Monte Carlo sampling trained by Quantum Approximate Optimization Algorithm	Y. Nakano, KN. Okada, K. Fujii	PRX Quantum 7.010338-1 (2026).
Quantum computing for radiation therapy optimization	R. Rahimi, A. SaiToh, A. Modiri, Y. Nakano, KN.Okada, S. Tsukano, B. Zhang, K. Fujii, M. Kitagawa, A. Sawant	Medical Physics 53.1 (2026).
Large-scale quantum device benchmarking via LXEB with particle-number-conserving random quantum circuits	T. Kaneda, K. Fujii, H. Ueda	Physical Review Research 8.013082-1 (2026).
Practical Quantum Advantage on Partially Fault-Tolerant Quantum Computer	R. Toshio, Y. Akahoshi, J. Fujisaki, H. Oshima, S. Sato, K. Fujii	Physical Review X 15.012057:1 (2025).
Variational quantum Hamiltonian engineering	B. Zhao, K. Fujii	Physical Review Research 7.023123:1 (2025).
Efficient Magic State Distillation by Zero-Level Distillation	T. Itogawa, Y. Takada, Y. Hirano, K. Fujii	PRX Quantum 6.020356:1 (2025).
Quantum circuit unoptimization	Y. Mori, H. Hakoshima, K. Sudo, T. Mori, K. Mitarai, K. Fujii	Physical Review Research 7.023139:1 (2025).
VQE-generated quantum circuit dataset for machine learning	A. Nakayama, K. Mitarai, L. Placidi, T. Sugimoto, K. Fujii	Physical Review Research 7.033048 (2025).
Spectral properties of two superconducting artificial atoms coupled to a resonator in the ultrastrong coupling regime	A. Tomonaga, R. Stassi, H. Mukai, F. Nori, F. Yoshihara, JS. Tsai	Nature communications 16.5294 (2025).

Title	Authors	Article
Measuring Entanglement Without Local Addressing in Quantum Many-Body Simulators via Spiral Quantum State Tomography	G. Marmorini, T. Fukuhara, D. Yamamoto	PRX Quantum 7 (2026).
Macroscopic particle transport in dissipative long-range bosonic systems	H. Li, C. Shang, T. Kuwahara, TV. Vu	Nature Communications 17.4289 (2026).
Dissipative engineering with strong light–matter coupling for optimized photo-oxidation suppression in organic chromophores	PC. Kuo, SL. Yang, N. Lambert, JD. Lin, YT. Huang, YN. Chen	The Journal of Chemical Physics 162.244120 (2025).
Revealing non-Markovian Kondo transport with waiting time distributions	FJ. Chan, PC. Kuo, N. Lambert, M. Cirio, YN. Chen	Physical Review Research 7.033270 (2025).
Purified pseudomode model for nonlinear system-bath interactions	C. Zhang, N. Lambert, XQ. Li, M. Cirio, P. Liang	Physical Review B 112.115131 (2025).
Input-output hierarchical equations of motion	M. Cirio, P. Liang, N. Lambert	Physical Review A 112.012211 (2025).
Selective Chiral Multistate Switching via the Dynamic Interplay of Diabolic and Exceptional Points	D. Qu, II. Arkhipov, H. Gao, K. Wang, L. Xiao, F. Nori, P. Xue	Physical Review Letters 136.086603 (2026).
Achieving the Quantum Fisher Information Bound in Pseudo-Hermitian Sensors	II. Arkhipov, F. Nori, ŞK. Özdemir	Physical Review Letters 136.080802 (2026).
Ultrabroadband phonon laser frequency comb	G. Xiao, Z. Feng, T. Kuang, R. Huang, Y. He, X. Chen, Y. Zuo, X. Han, W. Xiong, Z. Tan, A. Ganesan, F. Nori, CW. Qiu, X. Zhang, H. Luo, H. Jing	Advanced Photonics 8 (2026).
A universal framework for the quantum simulation of Yang–Mills theory	JC. Halimeh, M. Hanada, S. Matsuura, F. Nori, E. Rinaldi, A. Schäfer	Communications Physics 9.67 (2026).
Magnon squeezing in the quantum regime	YC. Weng, D. Xu, Z. Chen, LZ. Tan, XK. Gu, J. Li, HF. Yu, SY. Zhu, X. Hu, F. Nori, JQ. You	Nature Communications 17 (2026).
Exceptional Point Superradiant Lasing with Ultranarrow Linewidth	M. Du, Q. Bin, QY. Qiu, F. Nori, XY. Lü	Physical Review Letters 136.063602 (2026).
Experimental Certification of Ensembles of High-Dimensional Quantum States with Independent Quantum Devices	YN. Sun, MY. Ma, QP. Su, Z. Sun, CP. Yang, F. Nori	Physical Review Letters 136.060804 (2026).
Spin-Selective Topological Effects without Encircling Exceptional Points	S. Wan, Y. Hu, R. Huang, S. Song, H. Yang, W. He, S. Hu, Z. Ren, Z. Yu, Y. Zuo, Y. Zhang, D. Yang, X. Cheng, F. Nori, H. Jing, T. Jiang	Physical Review Letters 136.053801 (2026).
Dissipation and interaction-controlled non-Hermitian skin effects	Y. Li, ZF. Cai, T. Liu, F. Nori	Physical Review B 113.035444 (2026).
Phase-Controlled Quantum Sensing of Weak Forces	Q. Zhang, J. Wang, YF. Jiao, H. Cheng, R. Huang, HZ. Lin, F. Nori, H. Jing	Laser & Photonics Reviews 20.e01000 (2025).
Theory of multiqubit superradiance in a waveguide in the presence of finite delay times and two quantum excitations	S. A. Regidor, F. Nori, S. Hughes	Physical Review A 112.063702 (2025).
Non-Hermitian sensing from the perspective of postselected measurements	N. Zeng, T. Liu, K. Xia, YR. Zhang, F. Nori	Physical Review Research 7.043219 (2025).
Resource-efficient quantum correlation measurements via multicopy neural network methods	P. Tulewicz, K. Bartkiewicz, A. Miranowicz, F. Nori	Scientific Reports 15.40868 (2025).
Scattering states in one-dimensional non-Hermitian baths	J. Li, YE. Zhang, F. Nori, Z. Gong	Physical Review A 112.053707 (2025).
QuTiP 5: The Quantum Toolbox in Python	N. Lambert, E. Giguère, P. Menczel, B. Li, P. Hopf, G. Suárez, M. Gali, J. Lishman, R. Gadhi, R. Agarwal, A. Galicia, N. Shammah, P. Nation, J.R. Johansson, S. Ahmed, S. Cross, A. Pitchford, F. Nori	Physics Reports 1153.1 (2026).
Reconciling quantum and classical spectral theories of ultrastrong coupling: role of cavity bath coupling and gauge corrections: erratum	S. Hughes, C. Gustin, F. Nori	Optica Quantum 3.459 (2025).
Disorder-Induced Strongly Correlated Photons in Waveguide QED	G. Tian, LL. Zheng, ZM. Zhan, F. Nori, XY. Lü	Physical Review Letters 135.153604 (2025).
Efficient implementation of quantum signal processing via the adiabatic-impulse model	DO. Shendryk, OV. Ivakhnenko, SN. Shevchenko, F. Nori	Physical Review A 112.042437 (2025).
Identifying entanglement phases with bipartite projected ensembles	ZY. Ge, F. Nori	Physical Review Research 7.043022 (2025).
QuantumToolbox.jl: An efficient Julia framework for simulating open quantum systems	A. Mercurio, YT. Huang, LX Cai, YN. Chen, V. Savona, F. Nori	Quantum 9.1866 (2025).
Nonreciprocal quantum synchronization	DG. Lai, A. Miranowicz, F. Nori	Nature Communications 16.8491 (2025).

発表論文リスト(つづき)

Title	Authors	Article
Strong coupling between a single-photon and a two-photon Fock state	SP. Wang, A. Mercurio, A. Ridolfo, Y. Wang, M. Chen, W. Wang, Y. Liu, H. Sun, T. Li, F. Nori, S. Savasta, J. Q. You	Nature Communications 16.8730 (2025).
Cavity QED Based on Strongly Localized Modes: Exponentially Enhancing Single-Atom Cooperativity	Q. Bin, Y. Wu, JH. Gao, A. Chen, F. Nori, XY. Lü	Physical Review Letters 135.103602 (2025).
Topological state permutations in time-modulated non-Hermitian multiqubit systems with suppressed nonadiabatic transitions	Il. Arkhipov, P. Lewalle, F. Nori, ŞK. Özdemir, KB. Whaley	Physical Review Research 7.033242 (2025).
Versatile control of nonlinear topological states in non-Hermitian systems	ZF. Cai, YC. Wang, YR. Zhang, T. Liu, F. Nori	Communications Physics 8.360 (2025).
Topological phonon blockade and its transfer via dark-mode engineering	DG. Lai, A. Miranowicz, F. Nori	Nature Communications 16.8094 (2025).
Anderson Delocalization in Strongly Coupled Disordered Non-Hermitian Chains	WW. Jin, J. Liu, X. Wang, YR. Zhang, X. Huang, X. Wei, W. Ju, Z. Yang, T. Liu, F. Nori	Physical Review Letters 135.076602 (2025).
Dynamically encircling an exceptional point through phase-tracked closed-loop control	S. Zhang, Y. Huang, L. Yu, K. He, N. Zhou, D. Xiao, X. Wu, F. Nori, H. Jing, X. Zhou	Communications Physics 8.344 (2025).
Simulating monitoring-induced topological phase transitions with small systems	R. Xie, C. Gneiting, ZY. Zhou, AX. Chen	Physical Review A 112.022213 (2025).
Imaginary-Stark skin effect	H. Lin, J. Pi, Y. Qi, W. Qin, F. Nori, GL. Long	Physical Review Research 7.033150 (2025).
How to realize compact and noncompact localized states in disorder-free hypercube networks	Il. Arkhipov, F. Minganti, F. Nori	Physical Review Research 7.033002 (2025).
Manipulating Topological Polaritons in Optomechanical Ladders	JK. Wu, XW. Xu, H. Jing, LM. Kuang, F. Nori, JQ. Liao	Laser & Photonics Reviews 19.e00278 (2025).
Chiral-extended photon-emitter dressed states in non-Hermitian topological baths	ZF. Cai, X. Wang, ZX. Liang, T. Liu, F. Nori	Physical Review A 111.1061701 (2025).
Motility-dependent selective transport of active matter in trap arrays: separation methods based on trapping-detraping and deterministic lateral displacement	VR. Misko, F. Nori, W. D. Malsche	Nanoscale 17.13434 (2025).
Data-driven model reconstruction for nonlinear wave dynamics	E. Smolina, L. Smirnov, D. Leykam, F. Nori, D. Smirnova	Physical Review Research 7.023314 (2025).
Chirality-induced quantum non-reciprocity	Z. Zhang, Z. Xu, R. Huang, X. Lu, F. Zhang, D. Li, Ş. K. Özdemir, F. Nori, H. Bao, Y. Xiao, B. Chen, H. Jing, H. Shen	Nature Photonics 19.840 (2025).
Unveiling quantum steering by quantum-classical uncertainty complementarity	KY. Lee, JD. Lin, K. Lemr, A. Černoč, A. Miranowicz, F. Nori, HY. Ku, YN. Chen	npj Quantum Information 11.72 (2025).
Heisenberg and Heisenberg-like representations via Hilbert-space-bundle geometry in the non-Hermitian regime	CY. Ju, A. Miranowicz, J. Barnett, GY. Chen, F. Nori	Physical Review A 111.052213 (2025).
Landau-Zener without a qubit: multiphoton sidebands interaction and signatures of dissipative quantum chaos	L. Peyruchat, F. Minganti, M. Scigliuzzo, F. Ferrari, V. Jouanny, F. Nori, V. Savona, P. Scarlino	npj Quantum Information 11.62 (2025).
Efficient charging of multiple open quantum batteries through dissipation and pumping	J. Dias, H. Wang, K. Nemoto, F. Nori, WJ. Munro	Physical Review A 113.012617 (2026).
Two-Polariton Blockade via Ultrastrong Light-Matter Coupling	TT. Ma, J. Tang, YL. Zuo, R. Huang, A. Miranowicz, F. Nori, H. Jing	Physical Review Letters 136.033601 (2026).
Full Counting Statistics and First-Passage Times in Quantum Markovian Processes: Ensemble Relations, Metastability, and Fluctuation Theorems	P. Menczel, C. Flindt, F. Brange, F. Nori, C. Gneiting	PRX Quantum 7.010304 (2026).
Topological sensing in the dynamics of quantum walks with defects	X. Tong, X. Qiu, X. Zhan, Q. Lin, K. Wang, F. Nori, P. Xue	Physical Review B 112.1241116 (2025).
Coupling Enhancement and Symmetrization in Dissipative Optomechanical Systems	C. Shang, HZ. Shen	Annalen der Physik 538.e00606 (2026).
Manipulating spectral transitions and photonic transmission in a non-Hermitian optical system through nanoparticle perturbations	BW. Zhang, C. Shang, JY. Sun, ZC. Gu, XX. Yi	Physical Review A 111.063702 (2025).
Topological Quantum Batteries	ZG. Lu, G. Tian, XY. Lü, C. Shang	Physical Review Letters 134.180401 (2025).
Multi-JPA configuration to broaden amplification bandwidth for axion haloscope experiments	B. I. Ivanov, S. V. Uchaikin, J. Kim, MS. Ko, A. F. Loo, Y. Nakamura, S. Ahn, S. Oh, Y. K. Semertzidis, SW. Youn	Superconductor Science and Technology 39.025011 (2026).

Title	Authors	Article
Generation of frequency-bin-encoded dual-rail cluster states via time-frequency multiplexing of microwave photonic qubits	Z. Wang, T. Miyamura, Y. Sunada, K. Sunada, J. Ilves, K. Matsuura, Y. Nakamura	PRX Quantum 7.010330 (2026).
Efficient tomography of microwave photonic cluster states	Y. Sunada, S. Kono, J. Ilves, T. Sugiyama, Y. Suzuki, T. Okubo, S. Tamate, Y. Tabuchi, Y. Nakamura	PRX Quantum 7.010323 (2026).
Spin systems as quantum field theories in inflationary universe: A study with Unruh-DeWitt detectors	S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, R. Yoshii	Physical Review Research 7.043135 (2025).
Logical channel for heralded and pure loss with the Gottesman-Kitaev-Preskill code	TB. Harris, T. Matsuura, BQ. Baragiola, NC. Menicucci	Physical Review A 112.042417 (2025).
Operator dependence and robustness of spacetime-localized response in a quantum critical spin chain	D. Imagawa, K. Murata, D. Yamamoto	Physical Review B 113.014311 (2026).
Approaching the Quantum Limit in Axion Detection at IBS-CAPP and IBS-DMAG	S. V. Uchaikin, B. I. Ivanov, A. F. van Loo, Y. Nakamura, MS. Ko, J. Kim, S. Ahn, S. Oh, Y. K. Semertzidis, SW. Youn	Physical Sciences Forum 11.5 (2025).
Flux-trapping fluxonium qubit	K. Hida, K. Matsuura, S. Watanabe, Y. Nakamura	Physical Review Applied 24.064069 (2025).
Compromise-free scaling of qubit speed and coherence	M. J. Carballido, S. Svab, R. S. Eggli, T. Patlatiuk, P. C. Kwon, J. Schuff, R. M. Kaiser, L. C. Camenzind, A. Li, N. Ares, E. P. A. M. Bakkers, S. Bosco, J. C. Egues, D. Loss, D. M. Zumbühl	Nature Communications 16.7616 (2025).
The origins of noise in the Zeeman splitting of spin qubits in natural-silicon devices	J. S. Rojas-Arias, Y. Kojima, K. Takeda, P. Stano, T. Nakajima, J. Yoneda, A. Noiri, T. Kobayashi, D. Loss, S. Tarucha	npj Quantum Information 12.9 (2026).
Inferring Charge-Noise Source Locations from Correlations in Spin Qubits	J. S. Rojas-Arias, A. Noiri, J. Yoneda, P. Stano, T. Nakajima, K. Takeda, T. Kobayashi, G. Scappucci, S. Tarucha, D. Loss	Physical review letters 136.027001 (2026).
Discrete time crystals detected by time-translation twist	R. Nakai, T. Guo, S. Ryu	Physical Review B 112.165138 (2025).
Chirality-selective proximity effect between chiral p-wave superconductors and quantum Hall insulators	R. Nakai, K. Kudo, H. Isobe, K. Nomura	Physical Review B 112.094520-1 (2025).
Subsystem many-hypercube codes: High-rate concatenated codes with low-weight syndrome measurements	R. Nakai, H. Goto	Physical Review Applied 25.014032-1 (2026).
Quantum-logic spectroscopy of an electron or positron for precise tests of the standard model	X. Fan, A. Noguchi, K. Taniguchi	Physical Review A 111.042806 (2025).
Image current detection of electrons in a room-temperature Paul trap	K. Taniguchi, A. Noguchi	Physical Review A 112.022420 (2025).
Axion Dark Matter Search with Sensitivity near the Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov Benchmark Using the TM020 Mode	S. Bae, J. Jeong, Y. Kim, SW. Youn, J. Kim, A. F. van Loo, Y. Nakamura, S. Oh, T. Seong, S. Uchaikin	Physical Review Letters 135.091804 (2025).
Probing the Quantum Capacitance of Rydberg Transitions of Surface Electrons on Liquid Helium via Microwave Frequency Modulation	A. Jennings, I. Grytsenko, Y. Tian, O. Rybalko, J. Wang, IJ. Barabash, E. Kawakami	Physical Review Letters 135.087001 (2025).
Provably Efficient Simulation of 1D Long-Range Interacting Systems at Any Temperature	R. Achutha, D. Kim, Y. Kimura, T. Kuwahara	Physical Review Letters 134.190404 (2025).
Nondemolition fluorescence readout and high-fidelity unconditional reset of a fluxonium qubit via dissipation engineering	S. Watanabe, K. Hida, K. Matsuura, Y. Nakamura	Physical Review A 112.012624 (2025).
Capacitively shunted double-transmon coupler realizing bias-free idling and a high-fidelity CZ gate	R. Li, K. Kubo, Y. Ho, Z. Yan, S. Inoue, Y. Nakamura, H. Goto	Physical Review Applied 23.064069 (2025).
Generation of frequency-tunable shaped single microwave photons using a fixed-frequency superconducting qubit	T. Miyamura, Y. Sunada, Z. Wang, J. Ilves, K. Matsuura, Y. Nakamura	PRX Quantum 6.020347 (2025).
Fast multiplexed superconducting-qubit readout with intrinsic Purcell filtering using a multiconductor transmission line	P. A. Spring, L. Milanovic, Y. Sunada, S. Wang, A. F. van Loo, S. Tamate, Y. Nakamura	PRX Quantum 6.020345 (2025).
Chemistry beyond the scale of exact diagonalization on a quantum-centric supercomputer	J. Robledo-Moreno, M. Motta, H. Haas, A. Javadi-Abhari, P. Jurcevic, W. Kirby, S. Martiel, K. Sharma, S. Sharma, T. Shirakawa, I. Sitdikov, RY Sun, K. J. Sung, M. Takita, M. C. Tran, S. Yunoki, A. Mezzacapo	Science Advances 11.eadu9991 (2025).
Charge-induced energy shift of a single-spin qubit under a magnetic field gradient	T. Kobayashi, A. Noiri, T. Nakajima, K. Takeda, L. C. Camenzind, I. K. Jin, G. Scappucci, S. Tarucha	Physical Review Applied 23.054078 (2025).



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>