

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

アニュアルレポート

■ 2022年度

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	8
プレスリリース	9
受賞	10
量子技術イノベーション拠点概要	12
RQC 2022年度トピックス	15
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	16
• 超伝導量子シミュレーション研究チーム	18
• 超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット	20
• 超伝導量子計算システム研究ユニット	22
• ハイブリッド量子回路研究チーム	24
• 光量子計算研究チーム	26
• 量子多体ダイナミクス研究チーム	28
• 浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム	30
• 半導体量子情報デバイス研究チーム	32
• 半導体量子情報デバイス理論研究チーム	34
• 量子計算理論研究チーム	36
• 量子情報物理理論研究チーム	38
• 量子計算科学研究チーム	40
• 量子複雑性解析理研白眉研究チーム	42
• 理研 RQC- 富士通連携センター	44
• センター長室	46
研究紹介記事	47

センター長ご挨拶



量子情報科学という新しい分野の 最先端を切り拓く

量子コンピュータの実現を目標として、
量子コンピュータ研究センターは2021年
4月に発足しました。

20世紀初頭に誕生した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。しかし20世紀の終わりから急速に注目を集めている量子情報科学の観点では、人類はまだ量子力学を完全には使いこなしていないということが明らかになってきました。すなわち、量子力学や量子技術は、これまで接点が限られていた情報科学技術の分野にその対象を拡げ、未だ底知れない可能性を見出そうとしているのです。

量子コンピュータの研究開発においても、本命の方式がどのようなものになるのか、世界的に未だに絞り込まれていません。当センターでは、量子コンピュータの実現を目指して、比較的研究が進んでいる超伝導方式、光方式、半導体方式、それぞれの研究開発の第一人者をリーダーに迎え、並行して研究開発に取り組んでいます。異なる物理系を対象とする研究開発を同時に遂行することにより、互いに気付きあい学びあう機会を得て、シナジー効果により新たな知恵を生み出すことに期待しています。当センターでは他にも、原子や電子を用いた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。

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10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タ開発拠点として、日本の量子技術研究開発の発展・連携促進に向けた活動を行っています。産学官に跨る拠点活動を通して、各分野の専門家が垣根を超えて互いの知見を共有し横の連携を深めることにより、イノベーションのサイクルを加速し科学技術の発展に寄与するとともに、社会へ貢献することを目指しています。

2023年度にはセンター内に新たに3つのチームを設置しました。

今後一層、理研内外との連携を深め、多様な考え方や専門性を持った研究者が集うことで学際的な議論を活性化して、次世代の量子技術を担う人材を育成するとともに、量子コンピュータ実現に向けてセンター一丸となって研究開発に邁進します。

量子コンピュータ研究センター

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

量子コンピュータ研究センターは15の研究チームからなり、超伝導方式、光方式、半導体方式などさまざまな物理系での量子コンピュータ開発、さらには、量子アルゴリズム、量子計算理論など理論系の研究開発を推進しています。

量子コンピュータ研究センター

センター長： 中村 泰信

副センター長： 古澤 明・萬 伸一

RQCアドバイザリー・カウンシル

超伝導量子エレクトロニクス研究チーム：中村 泰信

超伝導量子シミュレーション研究チーム：蔡 兆申

超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット：阿部 英介

超伝導量子計算システム研究ユニット：田淵 豊

ハイブリッド量子回路研究チーム：野口 篤史

光量子計算研究チーム：古澤 明

量子多体ダイナミクス研究チーム：福原 武

浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム：川上 恵里加

半導体量子情報デバイス研究チーム：樽茶 清悟

半導体量子情報デバイス理論研究チーム：LOSS Daniel

量子計算理論研究チーム：藤井 啓祐

量子情報物理理論研究チーム：NORI Franco

量子計算科学研究チーム：柚木 清司

量子複雑性解析理研白眉研究チーム：桑原 知剛

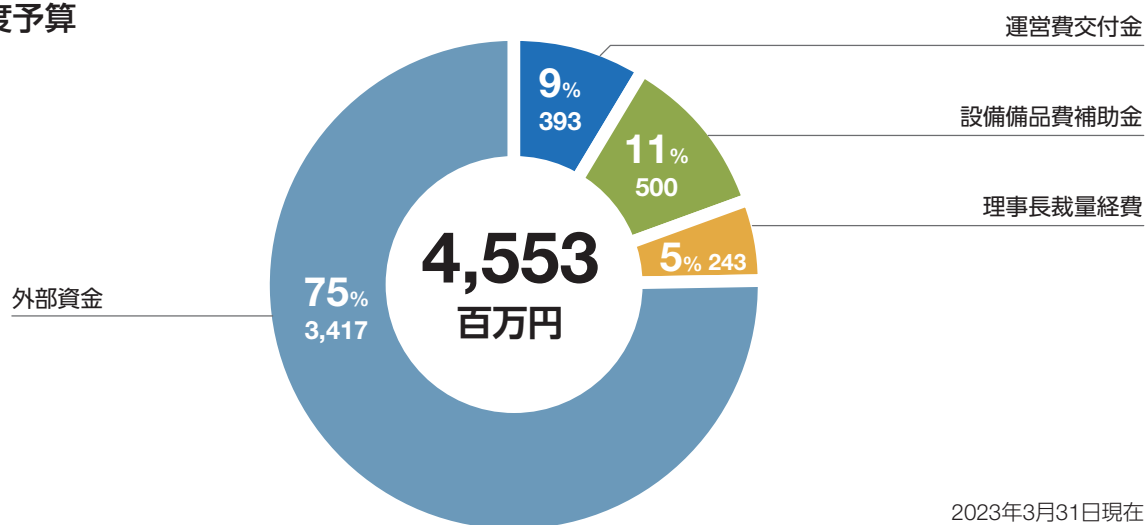
理研RQC-富士通連携センター：中村 泰信

センター長室：萬 伸一

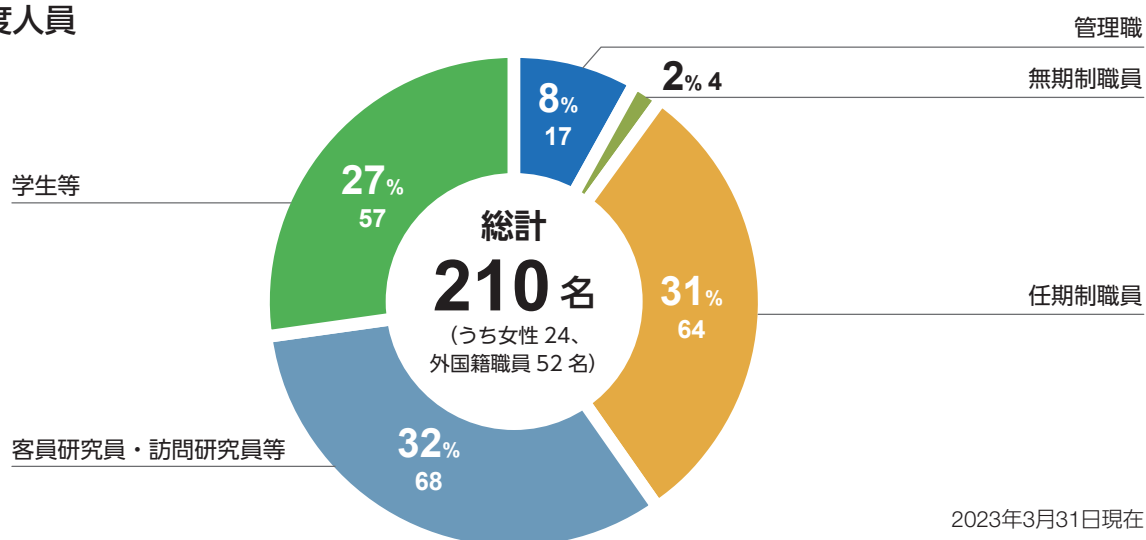
■ 超伝導 ■ 光 ■ 原子 ■ 電子 ■ 半導体 ■ 理論 ■ マネジメント

量子コンピュータ研究センター（つづき）

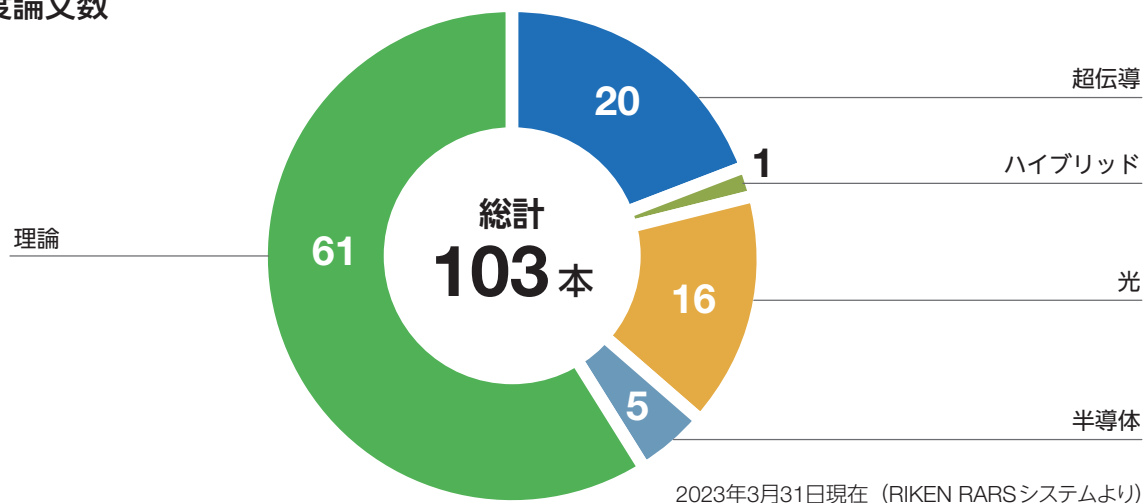
2022年度予算



2022年度人員



2022年度論文数



RQC Colloquiums and RQC Seminars

FY2022 RQC Colloquium

量子コンピュータセンターでは、著名な研究者を定期的に招聘しRQC Colloquiumを開催しています。2022年度は10回実施し、RQCだけでなく他センターにも周知し、活発な議論を行いました。

No.	Date	Speaker	Affiliation	Title
1st	Apr. 20, 2022	Prof. John Martinis	UC Santa Barbara	Building a Quantum Computer
2nd	May 18, 2022	Prof. Andrew Dzurak	UNSW Sydney	Silicon-based quantum computing: The path from the laboratory to industrial manufacture
3rd	Jun. 15, 2022	Prof. Adam Kaufman	JILA	Quantum science with microscopically controlled arrays of two-electron atoms
4th	Jul. 13, 2022	Prof. Isaac Chuang	MIT	From spin physics to quantum algorithms
5th	Sep. 7, 2022	Dr. Zachary Vernon	Xanadu	Fault-tolerant photonic quantum computing
6th	Oct. 5, 2022	Prof. Alexandre Blais	Institut Quantique, Université de Sherbrooke	Measuring the quantum state of superconducting qubits
7th	Nov. 2, 2022	Prof. Jonathan Home	ETH Zürich	Scaling quantum computing with trapped ions
8th	Dec. 7, 2022	Dr. James Clarke	Intel	From a Grain of Sand to a Quantum> Bit of Information
9th	Jan. 11, 2023	Prof. Antoine Browaeys	Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, CNRS	Exploring the many-body problem with assembled atoms
10th	Mar. 15, 2023	Prof. Peter van Loock	University of Mainz	Optical quantum information processing

FY2022 RQC Seminar

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。2022年度は28回実施し、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	No.	Date	Speaker	Affiliation
9th	Jun. 8, 2022	Dr. Tomotaka Kuwahara	RIKEN RQC	23rd	Dec. 20, 2022	Prof. Christian Flindt	Aalto University
10th	Jul. 29, 2022	Prof. Junichiro Kono	Rice University	24th	Jan. 20, 2023	Dr. Vittorio Vitale	ICTP Trieste
11th	Aug. 16, 2022	Prof. Anton Frisk Kockum	Chalmers University of Technology	25th	Jan. 31, 2023	Dr. Xianjing Zhou	RIKEN RQC
12th	Aug. 26, 2022	Prof. levgen Arkhipov	Palacky University	26th	Feb. 13, 2023	Ms. Polina Kofman	V. N. Karazin Kharkiv National University
13th	Sep. 1, 2022	Prof. Henning Schomerus	Lancaster University	27th	Feb. 21, 2023	Dr. Enrico Russo	University of Messina
14th	Sep. 12, 2022	Dr. Dan Gunlycke	U.S. Naval Research Laboratory	28th	Feb. 22, 2023	Prof. Kay Brandner	University of Nottingham
15th	Oct. 28, 2022	Dr. Dany Lachance-Quirion	Nord Quantique	29th	Mar. 8, 2023	Dr. Marcello Dalmonte	ICTP Trieste
16th	Nov. 1, 2022	Prof. Yueh-Nan Chen	National Cheng Kung University	30th	Mar. 14, 2023	Prof. Fabio Marchesoni	INFN Perugia
17th	Nov. 4, 2022	Dr. Po-Chen Kuo	National Cheng Kung University	31st	Mar. 16, 2023	Prof. Pulak Kumar Ghosh	Presidency University
18th	Nov. 10, 2022	Prof. Stephen Hughes	Queen's University	32nd	Mar. 17, 2023	Dr. Kaoru Mizuta	RIKEN RQC
19th	Nov. 14, 2022	Prof. Yosuke Nakata	Osaka University	33rd	Mar. 22, 2023	Mr. Alberto Mercurio	University of Messina
20th	Nov. 18, 2022	Dr. Alessandro Ferreri	Forschungszentrum Jülich	34th	Mar. 24, 2023	Mr. Fabio Mauceri	University of Messina
21st	Nov. 22, 2022	Mr. Zane Marius Rossi	MIT	35th	Mar. 30, 2023	Dr. Vyacheslav Misko	Vrije Universiteit Brussel
22nd	Nov. 25, 2022	Prof. Valerio Scarani	National University of Singapore	36th	Mar. 31, 2023	Dr. Masanori Hanada	University of Surrey

海外

【ヨーロッパ】

- アールト大学
- チャルマース工科大学
- コペンハーゲン大学
- デルフト工科大学 (TU Delft)
- アイメック (imec)
- ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ
- パラソキー大学
- キューテック
- バーゼル大学
- ヴァルター・マイスナー研究所 (WMI)
- モスクワ物理技術研究所 (MIPT)
- ほか

【北米】

- アルゴンヌ国立研究所
- Intel Corporation
- マサチューセッツ工科大学 (MIT)
- Nord Quantique
- ノートルダム大学
- ほか

【アジア・オセアニア】

- 基礎科学研究所 (IBS) アクシオン・精密物理研究センター (CAPP)
- 韓国電子通信研究院 (ETRI)
- 湖南師範大学
- 清華大学 (NTHU)
- 台湾半導体研究所 (TSRI)
- ニューサウスウェールズ大学 (UNSW)
- シドニー工科大学 (UTS)
- ほか

国内

【研究機関】

- 国立天文台
- 産業技術総合研究所
- 情報通信研究機構
- ほか

【大学】

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

【民間企業】

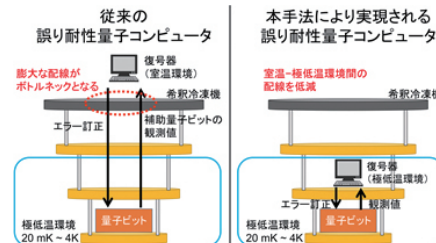
- 富士通株式会社
- 日立中央研究所
- 三菱電機株式会社
- 株式会社ニコン
- 日本電気株式会社
- 日本電信電話株式会社 (NTT)
- 株式会社東芝
- ほか

プレスリリース

2022/4/1

論理量子ビット間での演算を可能にする極低温環境での
量子誤り訂正手法を世界で初めて開発
ー大規模量子コンピュータの実用化に向け大きく前進ー

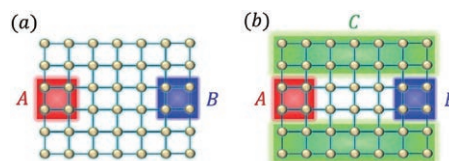
超伝導量子計算システム研究ユニット



2022/4/26

有限温度状態での量子もつれに関する普遍的性質の発見
ー有限温度では標準的な長距離量子もつれは存在しない

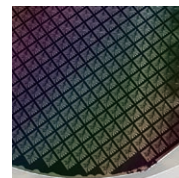
量子複雑性解析理研白眉研究チーム



2022/8/25

シリコン量子ビットで量子誤り訂正を実現
ー誤り耐性半導体量子コンピュータ開発に指針ー

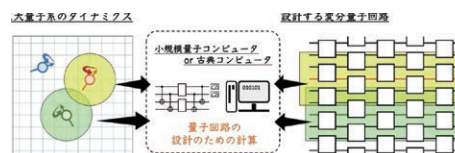
半導体量子情報デバイス研究チーム



2022/10/6

巨大量子系シミュレーション用の量子回路設計法を構築
ー物性・材料・化学計算への効率的・高精度な大規模量子計算を
加速ー

量子計算理論研究チーム



2022/10/31

量子光のパルス波形を自在に制御する手法を開発
ー光量子コンピュータの基幹となる「究極の量子光源」実現へー

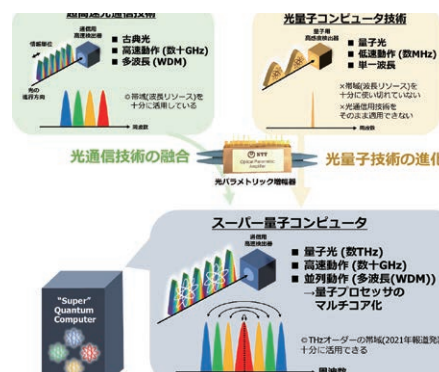
光量子計算研究チーム



2023/3/16

超高速量子計算のための世界最速43GHzリアルタイム量子信号測定
に成功
ー5G時代の超高速光通信テクノロジーと光量子テクノロジーの融合による
スーパー量子コンピュータ実現へー

光量子計算研究チーム



受賞報告

2022/4/20

■ 樽茶清悟チームリーダーが文部科学大臣表彰を受賞

半導体量子情報デバイス研究チームの樽茶清悟チームリーダーが令和4年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)を受賞致しました。この賞は科学技術に関する研究開発、理解増進等において顕著な成果を収めた者を表彰する賞で、樽茶清悟チームリーダーは業績名「半導体量子情報の物理と量子コンピュータへの応用の研究」で受賞致しました。



2022/8/28

■ GRYTSENKO Ivan 技師がULT2022 Best Poster Awardを受賞

浮揚電子量子情報理研白眉研究チームのGRYTSENKO Ivan 技師がULT2022 Best Poster Award (International Conference on Ultra Low Temperature Physics 2022)を受賞致しました。この賞はIUPAP (国際純粋応用物理学連合), The Japan World Exposition 1970 Commemorative Fund (日本万国博覧会記念基金事業), Inoue Foundation for Science (井上科学振興財団)が運営している賞で、「Using a cryogenic tunable resonance circuit to image-charge detection of surface electrons on He II」というタイトルで受賞致しました。

2022/11/21

■ NORI Francoチームリーダーが「Clarivate Highly Cited Researcher 2022」に選出

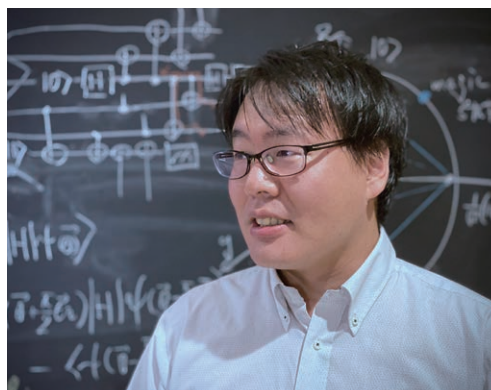
量子情報物理理論研究チームのNORI Franco チームリーダーがクラリベイト・アナリティクスが発表したClarivate Highly Cited Researcher 2022に選出されました。Highly Cited Researcherとはクラリベイト・アナリティクス社のEssential Science Indicatorsデータベースで、被引用数の多さが上位1%に入る論文の著者を研究分野毎に選定したものです。



2022/12/15

■ 藤井啓祐チームリーダーが日本学術振興会賞を受賞

量子計算理論研究チームの藤井啓祐チームリーダーが令和4年度 日本学術振興会賞を受賞致しました。この賞は、人文学、社会科学及び自然科学にわたる全分野において、国内外の学術誌等に公表された論文・著書・その他研究業績により学術上特に優れた成果をあげたと認められた45歳未満の若手研究者に贈られる賞で、受賞業績は「量子コンピュータ実現のための量子計算理論および量子ソフトウェアの先駆的研究」です。



2023/1/1

NORI Francoチームリーダーが「PQE-2023 Lamb Award」を受賞

量子情報物理理論研究チームのNORI FrancoチームリーダーがPhysics of Quantum Electronics (PQE) 会議が主催するPQE-2023においてLamb Awardを受賞致しました。Lamb Awardは、レーザー科学と量子光学の分野での顕著な貢献に対して毎年贈られる賞です。Nori TLは業績名「Pioneering contributions to quantum optics, quantum electronics, and quantum information.」で受賞致しました。



2023/3/3

古澤副センター長が第38回電気通信普及財団賞（テレコムシステム技術賞）の奨励賞を受賞

古澤明副センター長が第38回電気通信普及財団賞（テレコムシステム技術賞）の奨励賞を受賞しました。この賞は電気通信普及財団から送られ、情報通信の進展、発展、標準化に対して技術的、工学的観点から著しく貢献・功績がある情報通信関連の研究論文・著作等に対して授与される賞です。受賞論文名は「Fabrication of low-loss quasi-single-mode PPLN waveguide and its application to a modularized broadband high-level squeezer」です。



2023/3/13

中村センター長、蔡チームリーダーが日本学士院賞を受賞

中村センター長と超伝導量子シミュレーション研究チームの蔡チームリーダーが日本学士院賞を受賞しました。日本学士院賞は、学術上特にすぐれた論文、著書その他の研究業績に対して毎年9件以内で贈呈されるものです。業績名は「超伝導量子ビットとその量子制御に関する先駆的研究」です。



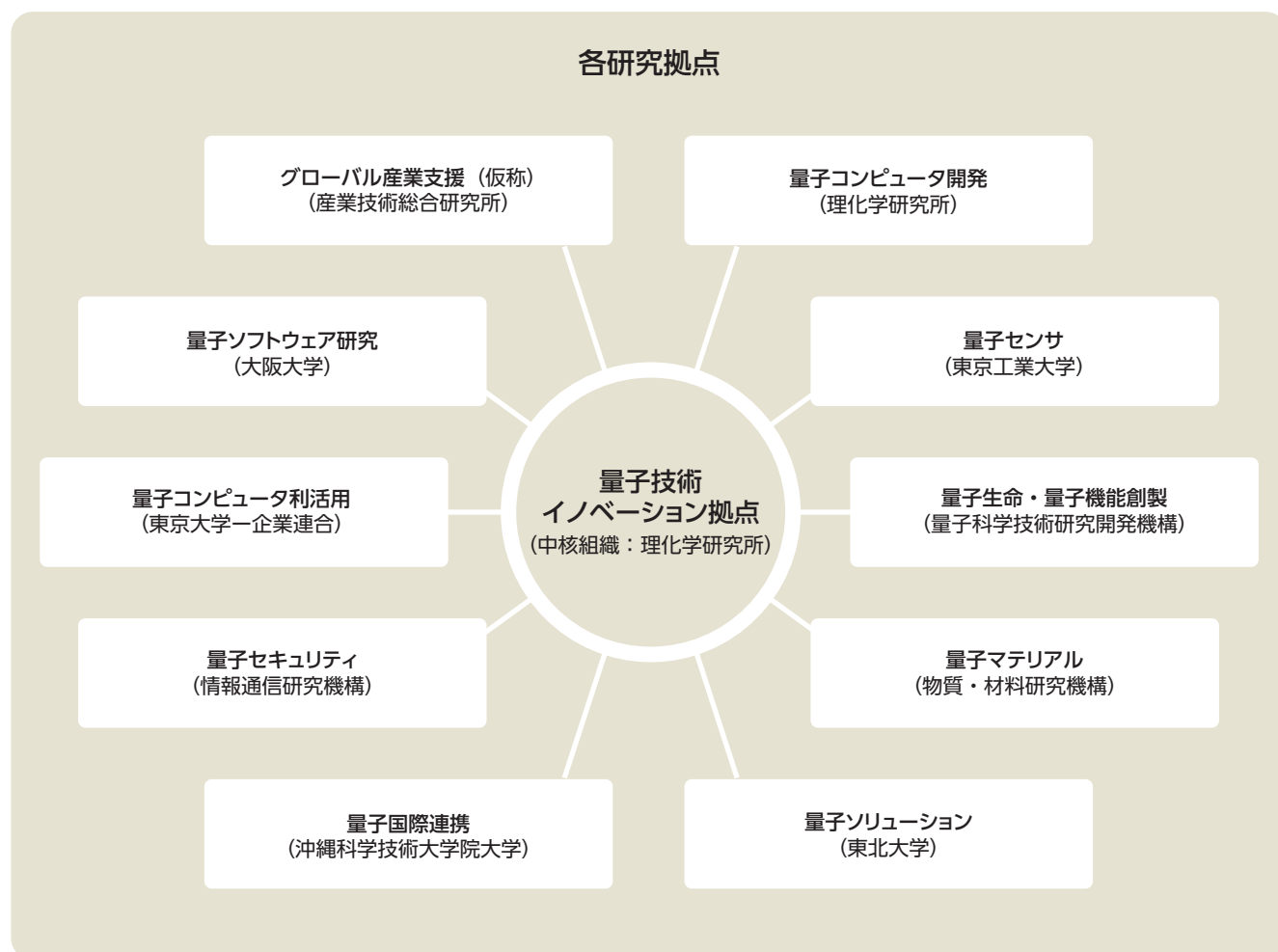
量子技術イノベーション拠点

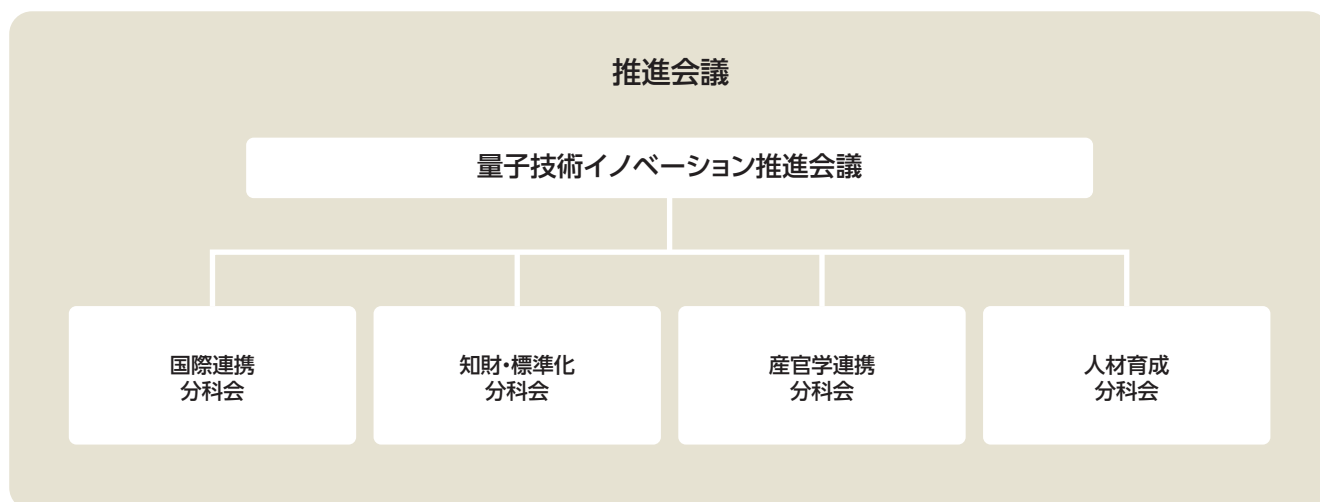


量子技術イノベーション10拠点の中核組織として、 全拠点一体で、量子技術の社会実装を加速

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

理化学研究所は、QIHの中核組織として、10拠点間の協調を図るヘッドクォーター機能を担っております。また、理化学研究所は、国内10拠点の内、量子コンピュータシステムの実現・確立を目指す量子コンピュータ開発拠点として活動しています。





各分科会の位置づけ

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

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

2022年度活動事例

QIHの活動の一環として、2022年11月28-30日に量子科学技術イノベーションに関する国際シンポジウム「Quantum Innovation 2022」を開催しました。

本シンポジウムは主にオンラインで開催され、3日間の講演数は約91、パネルセッション2、若手向けセッションの若手講演は64となり、リモート参加国数約50カ国、リモート参加延べ人数は約1100名と、貴重な情報発信の場となりました。



2022.11.28-30 Quantum Innovation 2022 (配信会場にて)

量子技術イノベーション拠点 (つづき)

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



2022.8.11-13 夏休み科学イベント ようこそふしぎな「量子」の世界へ@科学技術館の様子

2023.2.1-3 Nano tech 2023に出展
@東京ビッグサイト



登内 敏夫 (Ph.D.) コーディネーター

主要論文

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

略歴

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

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

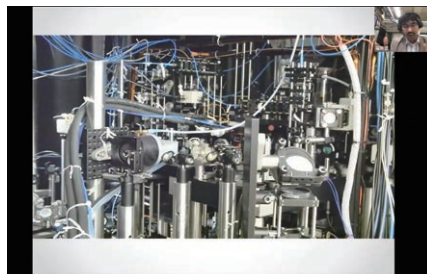
RQC FY2022 Pick-up Topics

一般公開

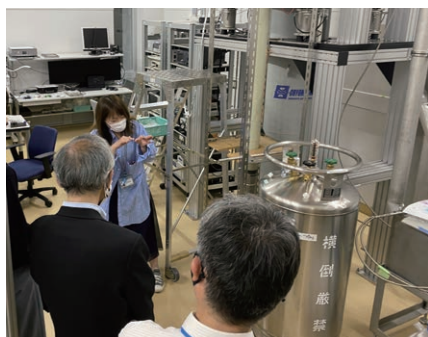
2022年4月23日に理研和光地区で実施された一般公開においてRQCでは様々なコンテンツを実施し、量子コンピュータ研究開発について一般の方に広く周知しました。



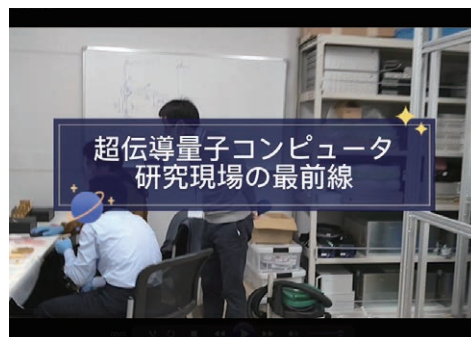
萬副センター長によるサイエンスレクチャー



阿部UL、福原TLによるバーチャルラボツアー



川上TLによるラボツアー



田淵ULによる動画配信

国産実機クラウド公開・お披露目会開催

2023年3月27日、国内の多くの大学・研究機関・企業からなる共同研究グループと連携し国産の超伝導方式の量子コンピュータを整備・クラウド公開および外部からの利用を開始しました。また、同日に産官学の関係者を招待してお披露目会を開催し、研究紹介および量子コンピュータの実機見学を行いました。本件は新聞・テレビなど多くのメディアに取り上げられました。



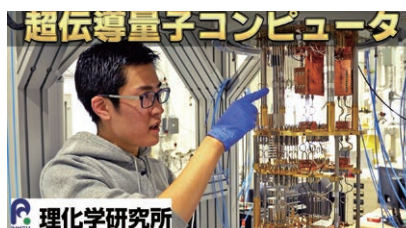
お披露目会 出席者による記念写真撮影



量子コンピュータ実機見学

Youtube 動画公開

量子コンピュータについての理解促進を図るため、超伝導量子シミュレーション研究チーム協力のもと、超伝導方式の量子コンピュータ研究開発についてのYoutube動画をものづくり系の動画で人気のyoutuberイチケンさんとのコラボレーションにて作成し、発信しました。



超伝導量子エレクトロニクス研究チーム

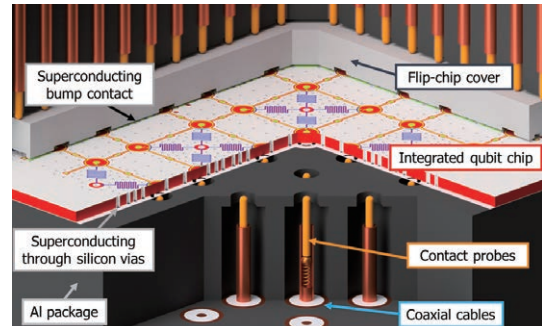
キーワード: 量子計算、超伝導回路、ジョセフソン接合、マイクロ波量子光学、回路量子電磁力学

研究室概要

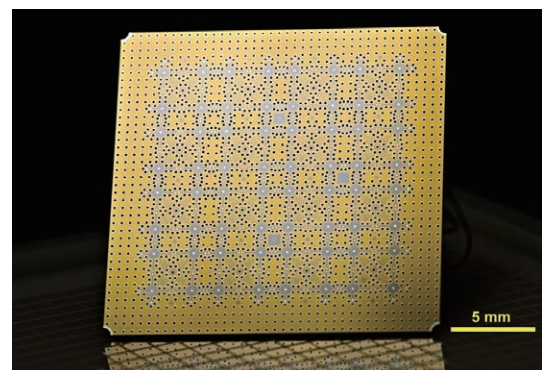
RQC内の他のチームや外部の機関と共同で、量子計算やその他の量子技術への応用に向けた超伝導量子回路の研究開発に取り組んでいる。現在、集積化された超伝導量子ビットを用いた量子コンピューティングプラットフォームの構築に注力している。拡張性の高い量子ビットチップとして、超伝導シリコン貫通ビアを有するチップの上に周波数固定のトランズモン型量子ビットが2次元格子状に配列されている。マイクロ波入出力ポートは基板裏面から垂直に導入された同軸ケーブルからなり、ばねピンで接続されている。我々は並行して、希釈冷凍機の立ち上げや、制御用のエレクトロニクスやソフトウェアの整備をしている。

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

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



超伝導量子ビット集積回路パッケージの模式図



64量子ビットチップの写真



中村 泰信 (Ph.D.) センター長、チームリーダー

主要論文

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

略歴

- 1992 日本電気株式会社基礎研究所 研究員
- 1997 日本電気株式会社基礎研究所 主任
- 2001 日本電気株式会社基礎研究所 主任研究員(-2005年)
- 2001 デルフト工科大学応用物理学科 客員研究員(-2002年)
- 2002 理化学研究所フロンティア研究システム 研究員(-2013年)
- 2005 日本電気株式会社基礎・環境研究所 主席研究員(-2012年)
- 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)

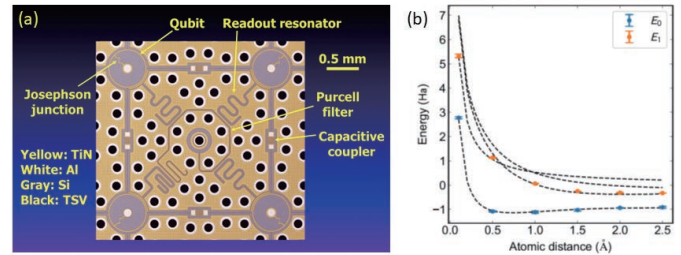
研究紹介

超伝導量子コンピュータチップ上でのNISQアルゴリズム実装

16量子ビットチップや64量子ビットチップを開発し、評価を行っている。制御や読み出しに関して、最高値として、1量子ビット・2量子ビットゲートの忠実度各99.96%と99.1%、読み出しの忠実度99.0%を実現している。周波数固定量子ビットを用いた全マイクロ波制御方式を採用しており、近接する量子ビットや共振器の間の周波数混雑と周波数衝突が解決すべき課題である。現在、局所レーザーアニーリングを用いた個々の量子ビットの周波数調整により、設計値からのばらつきを抑制することを試みている。

16量子ビットチップの一部を用いたNISQアルゴリズムの実証にも取り組んだ。例えば副空間探索変分型量子固有値ソルバ(SSVQE)や副空間変分型量子シミュレータ(SVQS)などを実装した。

K. Heya *et al.*, “Subspace variational quantum simulator”, Phys. Rev. Research 5, 023078 (2023).

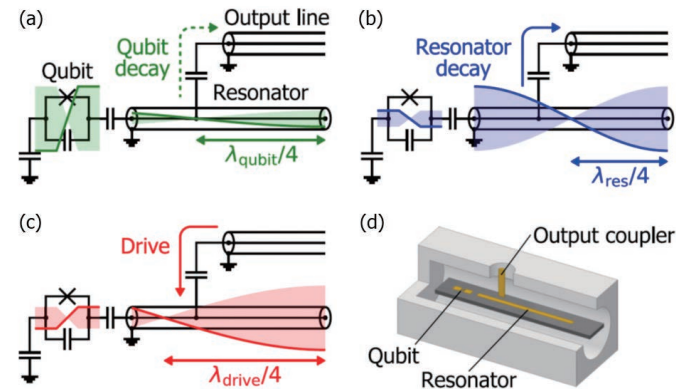


(a) 量子ビットチップのユニットセル構造。これを繰り返し敷き詰めることでより大きいチップを構成する。(b) SSVQE法により求めた、水素分子の基底状態と第一励起状態のエネルギー準位の原子間距離依存性。

超伝導量子ビット読み出しおよび初期化の高速化と高忠実度化

超伝導量子ビット読み出しおよび初期化の高速化と高忠実度化は誤り耐性量子計算の実現に向けた超伝導量子コンピュータの性能向上において重要な要素技術のひとつである。我々は、内蔵型パーセルフィルタを発明し、トランズモン型量子ビットの分散読み出しに適用した。このノッチ型フィルタは読み出し共振器に内在する周波数モード構造を利用するものであり、コンパクトに実装でき、量子ビットの緩和を抑制しつつ高速な読み出しを可能にする。我々は3次元実装方式で、40 nsの読み出しパルスを用いて99.1%の読み出し忠実度を実現した。さらに平面型の回路でそれぞれ36 ns、99.6%へと改善した。この回路は同時にマイクロ波制御による量子ビットの高速かつ無条件の初期化を可能にする。

Y. Sunada *et al.*, “Fast readout and reset of a superconducting qubit coupled to a resonator with an intrinsic Purcell filter”, Phys. Rev. Appl. 17, 044016 (2022).
Editors' Suggestion



(a)-(c) 関与する周波数におけるモード構造。量子ビット周波数モードは外部結合ポートの位置に節を持つ。(d) 3次元構造を用いた実装方法の模式図。

主要メンバー

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

(特別研究員) WANG Shiyu
(訪問研究員) 佐々木 遼
(訪問研究員) SPRING Peter Anthony
(上級テクニカルスタッフ) 楠山 幸一
(テクニカルスタッフI) 日塔 光一
(テクニカルスタッフI) SZIKSZAI Laszlo
(テクニカルスタッフI) 早川 晴美

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。

従来の平面型配線により容易にパッケージできる超伝導量子ビット回路の集積化方式を提案し[イメージ1]、そのような量子チップの試作に取り組んでいる。これは疑似2次元ネットワークと呼ぶ、超伝導エブリッジ[イメージ2]を使った局所立体交差配線を使った量子ビットの接続方法である。この回路方式で、100ビットの超伝導コンピュータを試作し、それが20mm角のチップにおさまることを確認した。

超伝導コンピュータによる演算では、定期的に量子ビットを初期化することが必要である。本研究チームでは、高速に超伝導量子ビットを初期化する新規な回路方式を提案し、その試作に成功している。この回路方式は

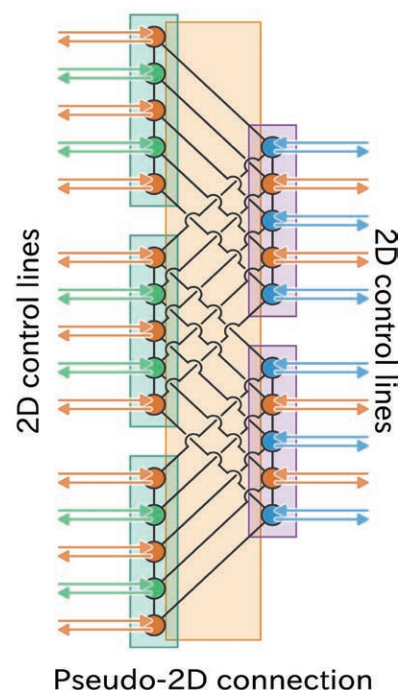
可変な減衰率を持つ超伝導共振器を量子ビットに接続することにより実現する。

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。

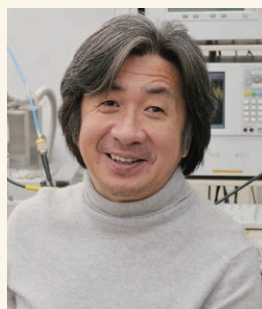
Crossed resonators with airbridge



[イメージ2] 擬2Dネットワークのエブリッジを使った交差部の写真



[イメージ1] 擬2Dネットワークで結合された量子ビット



蔡 兆申 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

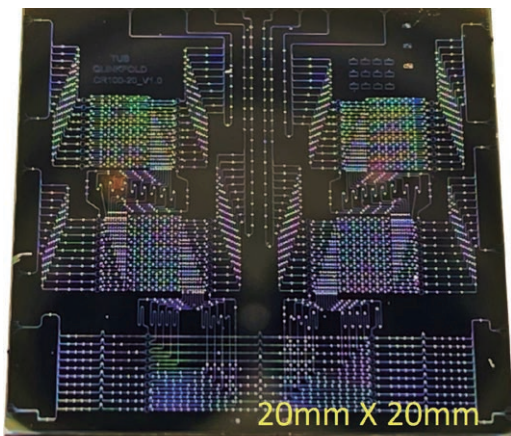
- 1 H. Mukai, K. Sakata, S.J. Devitt, R. Wang, Y. Zhou, Y. Nakajima, and J.S. Tsai, "Pseudo-2D superconducting quantum coupling circuit for the surface code: proposal and preliminary tests", *New Journal of Physics*, 22, 043013 (2020)
- 2 A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura, S. Lloyd and J. S. Tsai, "Quantum Coherent Tunable Coupling of Superconducting Qubits", *Science*, 316, 723 (2007)
- 3 T. Yamamoto, Yu. Y. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, "Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubits", *Nature*, 425, 941 (2003)
- 4 Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D. V. Averin and J. S. Tsai, "Quantum oscillations in two coupled charge qubits", *Nature*, 421, 823 (2003)
- 5 Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J. S. Tsai, "Coherent Control of Macroscopic Quantum States in a Single-Cooper-pair Box", *Nature*, 398, 786 (1999)

略歴

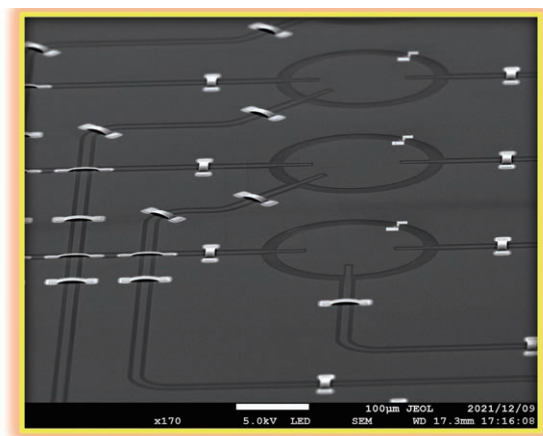
- 1975 米国 カルフォルニア大学バークレー校 文理学部 物理学科卒業
- 1983 米国 ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校 物理学部 理学博士 (Ph.D.)
- 1983 日本電気株式会社 マイクロエレクトロニクス研究所
- 2001 日本電気株式会社 基礎研究所 主席研究員
- 2001 理化学研究所 巨視的量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー
- 2012 理化学研究所 単量子操作グループ グループディレクター
- 2012 理化学研究所 巨視的量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー
- 2014 理化学研究所 超伝導量子シミュレーション研究チーム チームリーダー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

100ビット超伝導量子コンピュータ



100ビットの超伝導量子コンピュータ写真。各量子ビットへの配線は、従来型の平面配線が使用可能。



100ビットチップの部分拡大図。量子ビットをエアブリッジが見える。

従来の平面型配線により容易にパッケージできる超伝導量子ビット回路の集積化方式を提案し、そのような量子チップの試作に取り組んでいる。これは疑似2次元ネットワークと呼ぶ、超伝導エアブリッジを使った局所立体交差配線を使った量子ビットの接続方法である。この回路方式で、100ビットの超伝導コンピュータを試作し、それが20mm角のチップにおさまることを確認した。

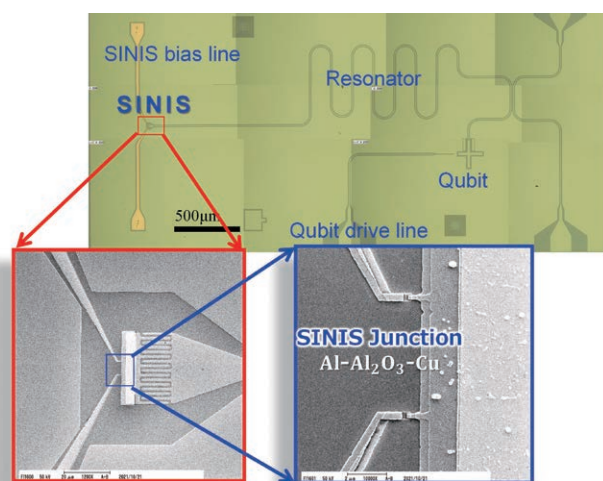
この回路では、全ての量子ビットはチップの周辺部に配置されているため、従来の平面型マイクロ波配線技術が適用できることを特徴とし、高度な3D配線技術が必要としない。量子ビットは交互に交差した共振器のネットワークにより結合されていて、最近接合は実現されている。

超伝導量子ビットの高速初期化

超伝導コンピュータによる演算では、定期的に量子ビットを初期化することが必要である。本研究チームでは、高速に超伝導量子ビットを初期化する新規な回路方式を提案し、その試作に成功している。この回路方式は可変な減衰率を持つ超伝導共振器を量子ビットに接続することにより実現する。

量子ビットの平常動作時は共振器のQファクターは高い値に設定されるため、量子ビットの寿命は共振器には影響されない。そして量子ビットの初期化時には、共振器のQファクターは低い値に設定されるので、高速な初期化が可能となる。これは共振器にSINIS接合を接続することにより実現する。このような回路では、SINIS接合にバイアス電圧を印加することで光子介在のトンネルが誘起され、共振器のQ値の低下が起こる。

我々の実験では、99.5%の精度をもって、180nsでの高速初期化が実現した。



高速初期化回路写真。超伝導量子ビットはSINIS接合を含む超伝導共振器に接続されている。

主要メンバー

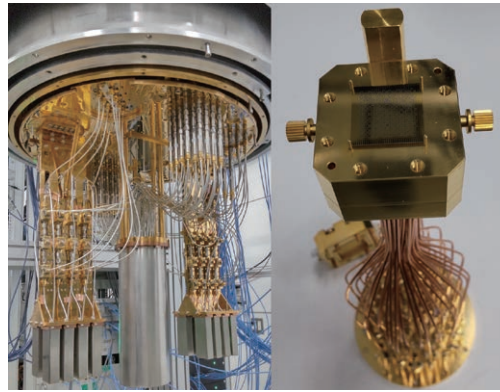
(基礎科学特別研究員) 向井 寛人

超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット

キーワード: 超伝導量子回路、量子計算、量子技術、マイクロ波工学、量子もつれ

研究室概要

当ユニットでは、超伝導量子エレクトロニクス研究チームと連携し、拡張可能なデザインに基づく多量子ビットの超伝導量子コンピュータの開発を行っている。ジョセフソン接合、マイクロ波共振器、伝送路、フィルタ回路などからなる超伝導量子回路を設計し、量子ビットと、量子状態のコヒーレント制御・非破壊測定を行うための機能を同一チップ上に実装する。さらに、チップとマイクロ波同軸配線を繋ぐパッケージ、ジョセフソンパラメトリック増幅器をはじめとする低温マイクロ波素子、極低温環境実現のための希釈冷凍機、室温の制御エレクトロニクスから構成されるハードウェアを50～150量子ビットの中規模量子コンピュータとして動作させる。構築したシステムにおける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とともに、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を進める。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、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。



左：希釈冷凍機内部の配線作業

右：希釈冷凍機内部（左）とサンプルパッケージに設置された64量子ビットチップ（右）



阿部 英介 (D.Sc.) ユニットリーダー

主要論文

- 1 K. Sasaki, H. Watanabe, H. Sumiya, K. M. Itoh, and E. Abe, "Detection and control of single proton spins in a thin layer of diamond grown by chemical vapor deposition", *Applied Physics Letters* 117, 114002 (2020).
- 2 S. Ishizu, K. Sasaki, D. Misonou, T. Teraji, K. M. Itoh, and E. Abe, "Spin coherence and depths of single nitrogen-vacancy centers created by ion implantation into diamond via screening masks", *Journal of Applied Physics* 127, 244502 (2020).
- 3 D. Misonou, K. Sasaki, S. Ishizu, Y. Monnai, K. M. Itoh, and E. Abe, "Construction and operation of a tabletop system for nanoscale magnetometry with single nitrogen-vacancy centers in diamond", *AIP Advances* 10, 025206 (2020).
- 4 R. Sakano, A. Oguri, Y. Nishikawa, and E. Abe, "Bell-state correlations of quasiparticle pairs in the nonlinear current of a local Fermi liquid", *Physical Review B* 99, 155106 (2019).
- 5 E. Abe and K. Sasaki, "Tutorial: Magnetic resonance with nitrogen-vacancy centers in diamond—microwave engineering, materials science, and magnetometry", *Journal of Applied Physics* 123, 161101 (2018).

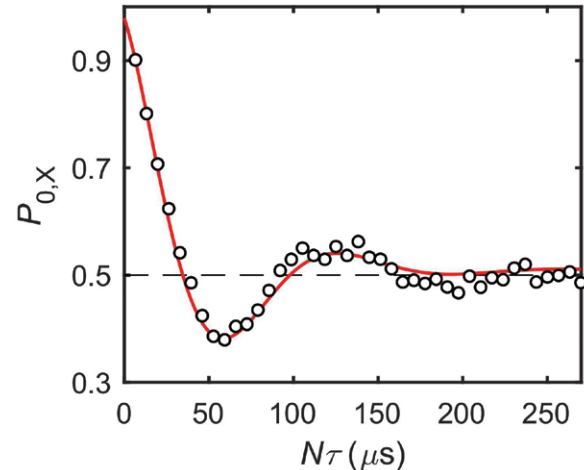
略歴

- 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 理化学研究所創発物性科学研究センター ユニットリーダー
- 2021 理化学研究所量子コンピュータ研究センター ユニットリーダー(現職)

研究紹介

■ 固体量子センサによる単一プロトン核スピンの検出と制御

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

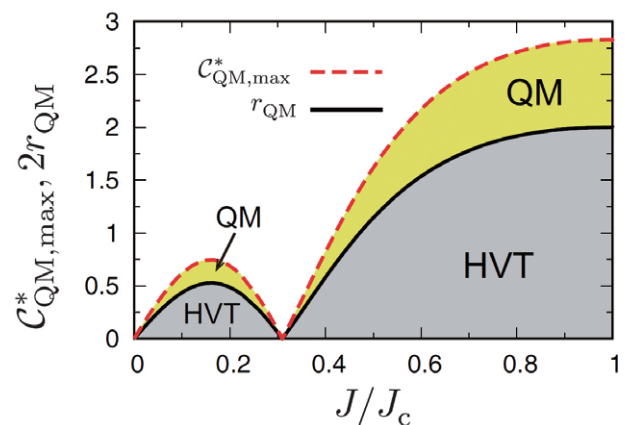


量子センサによる単一プロトン核スピン制御。横軸は操作時間、縦軸はセンサ・スピンの状態に対応。データは核スピンのコヒーレント回転を捉えたもの。

©American Institute of Physics
<https://doi.org/10.1063/5.0016196>

■ 固体量子デバイス中に励起される準粒子間のベル相関

量子力学が古典力学と決定的に異なる点として、量子もつれ、物理量の非局所的な相関の存在が挙げられる。量子もつれは、量子コンピュータの計算能力の起源を理解する上でも重要な役割を果たすと考えられ、超伝導量子ビット、スピン量子ビットなどの固体量子ビットにおいて、複数の量子ビット間に量子もつれを生成することは現在進行形の研究テーマとなっている。固体デバイス中では、量子ビット以外でも、準粒子間に非自明な相関を生じることがある。その最たる例は、超伝導体におけるクーパー対であり、スピン三重項を形成する。本研究では、近藤領域にある量子ドットに励起される準粒子間に生じる量子相関を、電流交差相関に対するベルの不等式を理論的に導出することで考察した。特定の相互作用パラメータ領域において、いわゆる隠れた変数理論の限界を超えた相関、量子もつれを生成しうることを見出した。近藤効果という固体物理の主要テーマを、量子情報科学的な視点から見直す興味深い結果である。



反強磁性相互作用強度と電流相関の関係。隠れた変数理論(HVT)で記述できる領域と、量子力学(QM)でしか記述できない領域を示す。

©American Physical Society
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.155106>

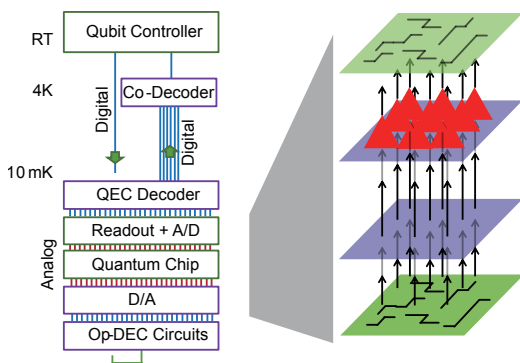
超伝導量子計算システム研究ユニット

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

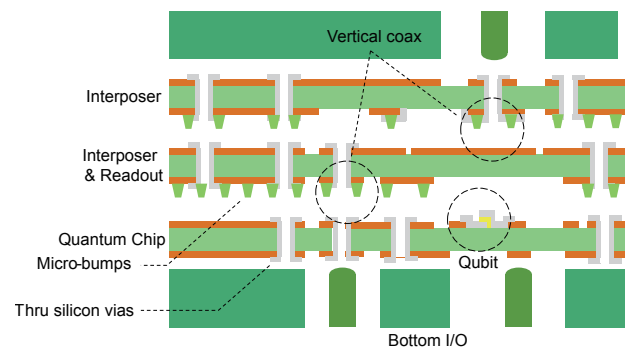
研究室概要

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

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



積層型モジュールシステム概念



積層型モジュールシステムの実装例



田淵 豊 (Ph.D.) ユニットリーダー

主要論文

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

略歴

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

研究紹介

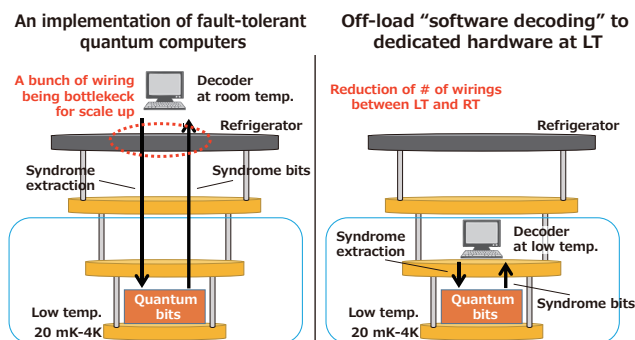
スケーラブルな量子コンピュータ：制御エレクトロニクスから誤り訂正符号復号回路まで：制御装置編

超伝導量子コンピュータは、量子ビット、物理ゲート、デバイス、デバイス構造（パッケージングを含む）、冷凍機、アナログ・マイクロ波フロントエンド、信号処理・制御装置、量子誤り訂正符号、復号器、論理演算など多くの要素から構成される。それぞれの要素はスケーラブルかつ集積性を備えている必要があり、誤り耐性を備えた量子コンピュータによりアプリ開発を十分に楽しむためには数百万個の物理量子ビットを用意する必要がある。

我々はアナログのフロントエンド回路と量子コンピュータの制御回路について大阪大学と共同研究している。システムを拡張するために制御回路にはさまざまな課題が残されている。例えばマイクロ波信号位相の安定性が2量子ビットゲートの実装には必ず要求されるため、制御装置のチャンネル間の正確な位相同期が必要である。我々は制御電子機器のスケーラブルな実装を考案・実装し、模擬実験を行った [Takefumi Miyoshi *et al.*, “FPL Demo: A Flexible and Scalable Quantum-Classical Interface based on FPGAs,” 22nd International Conference on Field Programmable Logic & Applications (31, Aug, 2022)]。例えば、IEEE1588に類似したクロック同期機構により、複数の制御装置を用いた動作において正確な時刻同期がなされることを示した。本手法は50量子ビット程度のシステムで検証したとはいえ、本質的にスケーラブルであり、最終目標に向けた具体的な道筋となり得るものである。

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

先の成果に関連し、極低温での超高速動作に特化した復号化回路を研究している。復号化回路は、誤り耐性量子計算の量子ビット測定結果の信号処理回路である。我々の論文 [Y. Ueno *et al.* Ueno *et al.*, “QECool: On-Line Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder for Surface Code,” DAC2021] では、オンライン復号回路を構成し、単一磁束量子デジタル論理回路上面にて評価した。オンラインとは、測定結果の出力スループットより十分高速な信号処理を意味し、測定結果は利用後に破棄できるため低温から室温までの大幅な省線化につながる。我々、この復号器をさらに拡張し論理境界の特殊な配慮により、格子手術法におけるマージ&スプリット演算が可能なものへ拡張した [Y. Ueno *et al.*, “QULATIS: A Quantum Error Correction Methodology towards Lattice Surgery,” HPCA2022]。この成果は原理検証段階の研究ですが、バックエンド信号回路の具体的な実装と評価により、スケーラビリティを有する量子コンピュータの新たな可能性が考えられる可能性がある。



超伝導誤り耐性量子コンピュータの構成（左：従来、右：提案手法）

主要メンバー

(テクニカルスタッフ) 政岡 文平
(テクニカルスタッフ) 小沢 みゆき

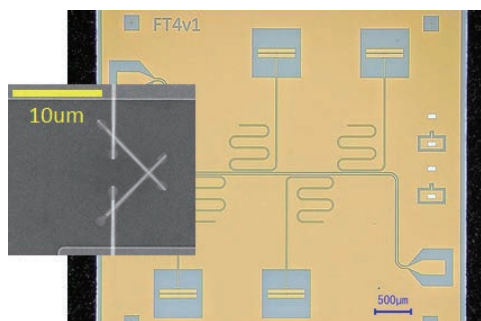


ハイブリッド量子回路研究チーム

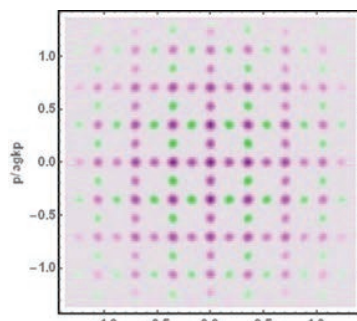
キーワード：ハイブリッド量子系、マイクロ波量子光学、電子トラップ、量子制御

研究室概要

超伝導回路は単に電気抵抗がない回路ではなく、ジョセフソン接合におけるトンネル効果を利用することで、量子ビットやパラメトリック回路などの様々な量子的な機能を発現させることができる。とくに近年私たちのチームでは、世界最先端に匹敵する非常に長い寿命を持った超伝導量子ビットの作製に成功している。また、設計自由度の高い超伝導回路の性質を活かし、様々な量子ゲート手法やその忠実度向上を目指した研究を行っている。さらに、このような高性能な超伝導回路と他の量子系を組み合わせたハイブリッド量子系に関する研究開発に興味を持ち、特にマイクロ波共振器やトラップ電子という高寿命量子系を構築し、それらを超伝導回路で観測・制御することで既存の性能を大きく凌駕する量子制御技術を確認しようとしている。誤り耐性量子コンピュータを初めとした究極の量子技術の実現は、現在の最先端を優に超えた高精度量子制御の可否にかかっていると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す。



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



調和振動子に埋め込まれたGKP量子ビットの波動関数のシミュレーション。真空に対してスタビライズ操作を行うことでマジック状態を生成している。



野口 篤史 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

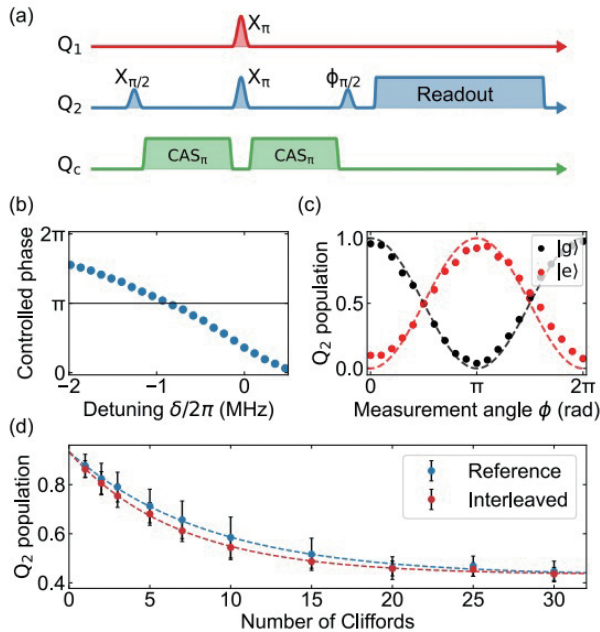
- 1 S. Shirai, Y. Okubo, K. Matsuura, A. Osada, Y. Nakamura, and A. Noguchi, "All-microwave manipulation of superconducting qubits with a fixed-frequency transmon coupler", arXiv:2302.06930.
- 2 M. Shigefuji, A. Osada, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, and A. Noguchi, "Efficient low-energy single-electron detection using a large-area superconducting microstrip", arXiv:2301.11212.
- 3 A. Osada, K. Taniguchi, M. Shigefuji, and A. Noguchi, "Feasibility study on ground-state cooling and single-phonon readout of trapped electrons using hybrid quantum systems", Phys. Rev. Research 4, 033245 (2022).
- 4 A. Noguchi, A. Osada, S. Masuda, S. Kono, K. Heya, S. Piotr Wolski, H. Takahashi, T. Sugiyama, D. Lachance-Quirion, and Y. Nakamura, "Fast parametric two-qubit gates with suppressed residual interaction using a parity-violated superconducting qubit". Phys. Rev. A 102, 062408 (2020).
- 5 A. Noguchi, R. Yamazaki, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, "Single-photon quantum regime of artificial radiation pressure on a surface acoustic wave resonator", Nat. Commun. 11, 1183 (2020).

略歴

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

研究紹介

周波数固定型超伝導量子ビットによるマイクロ波だけからなる高性能ゲートの実現



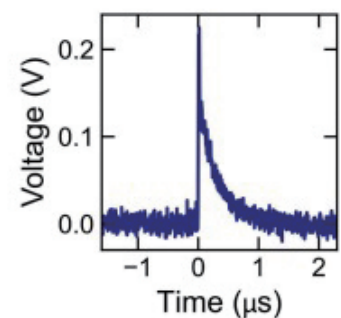
(a) 校正実験のためのパルスシーケンス (b) 校正実験結果 (c) 制御Zゲート.
(d) インターリーブドベンチマーク.

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

S. Shirai, Y. Okubo, K. Matsuura, A. Osada, Y. Nakamura, and A. Noguchi, arXiv:2302.06930.

超伝導マイクロストリップを用いた低エネルギー電子検出

極低温でPaulトラップによって捕獲された電子は非常に高精度に制御できる量子系となることが期待されている。しかしながら、浮いた電子の冷却が難しいことや、その捕獲にマイクロ波周波数帯の高電圧が必要であることから、これまであまり研究がされてこなかった。近年、ようやく室温で電子を捕獲した報告がなされているが、その際には捕獲した電子をトラップから放出して加速しながら電極に当てることで、増幅された電気信号として観測されている。しかしながら、低温環境下ではこうした電子検出器は加熱の問題から使用が難しかった。そこで本研究では、超伝導光子検出器に用いられている、超伝導ワイヤーからなる検出器に着目し、捕獲された電子を加速することなく、低エネルギーのまま検出することができる粒子検出器の開発をした。作製した超伝導電子検出器では、約15 eVの電子の検出に成功した。また、その検出効率の電子エネルギー依存性から、電子の検出においては、電子の散乱によって超伝導内に発生した渦が関連していることが示唆された。この機構をより深く解明することで、より低エネルギーの電子を検出できる装置の開発につながる。



観測された単一電子による信号

主要メンバー

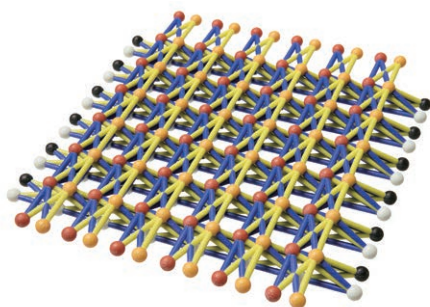
(特別研究員) 富永 雄介

光量子計算研究チーム

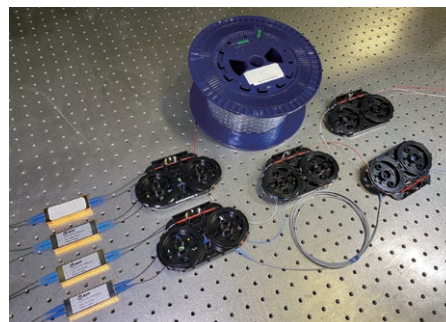
キーワード：量子情報科学、量子光学

研究室概要

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



光の量子状態で作ることができる二次元クラスター状態の構造を表す模型。



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



古澤 明 (Ph.D.) 副センター長、チームリーダー

主要論文

- 1 K. Takase, A. Kawasaki, B. K. Jeong, T. Kashiwazaki, T. Kazama, K. Enbutsu, K. Watanabe, T. Umeki, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, F. China, W. Asavanant, M. Endo, J. Yoshikawa, and A. Furusawa "Quantum arbitrary waveform generator", *Science Advances*, 8, eadd4019 (2022).
- 2 K. Fukui, S. Takeda, M. Endo, W. Asavanant, J. Yoshikawa, P. van Loock, and A. Furusawa "Efficient backcasting search for optical quantum state synthesis", *Phys. Rev. Lett.*, 128, 240503 (2022).
- 3 K. Takase, A. Kawasaki, B. K. Jeong, M. Endo, T. Kashiwazaki, T. Kazama, K. Enbutsu, K. Watanabe, T. Umeki, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, F. China, W. Asavanant, J. Yoshikawa, and A. Furusawa "Generation of Schrödinger cat states with Wigner negativity using continuous-wave low-loss waveguide optical parametric amplifier", *Optics Express*, 30, 14161-14171 (2022).
- 4 T. Sonoyama, W. Asavanant, K. Fukui, M. Endo, J. Yoshikawa, and A. Furusawa "Analysis of optical quantum state preparation using photon detectors in the finite-temporal-resolution regime", *Phys. Rev. A*, 105, 043714 (2022).
- 5 W. Asavanant, Y. Shiozawa, S. Yokoyama, B. Charoensombutamon, H. Emura, R. N. Alexander, S. Takeda, N. C. Menicucci, H. Yonezawa, and A. Furusawa "Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state", *Science*, 366, 373 (2019).

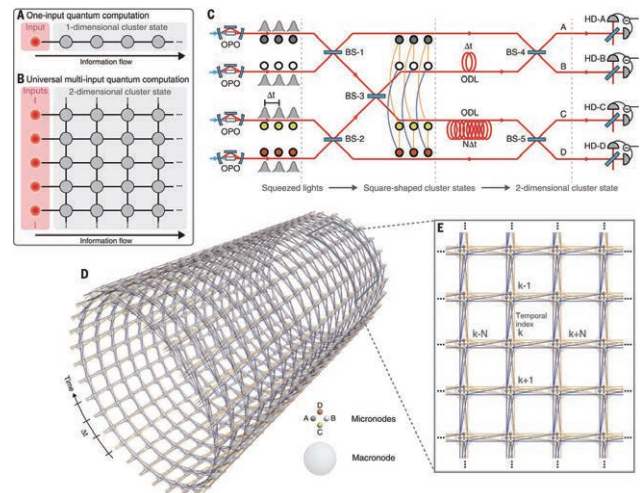
略歴

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

研究紹介

時間領域多重による二次元クラスター状態生成

クラスター状態は、量子テレポーテーションをベースとする我々の方式の量子コンピュータにおいて、ユニバーサルな計算リソースとなる重要なエンタングルド状態である。あらゆる入出力関係を重ね合わせとして持っており、行いたい計算に応じて測定により特定の入出力関係に収縮させて使用することができる。我々の先行研究において、一次元クラスター状態は時間領域多重の手法により大規模に生成されていたが、これは一つの入力に対して計算を行えるものであった。時間領域での多重化を二重に行うことにより、我々はクラスター状態を二次元に拡張することに成功した。これにより、多入力を扱うユニバーサルな量子コンピュータが可能になった。



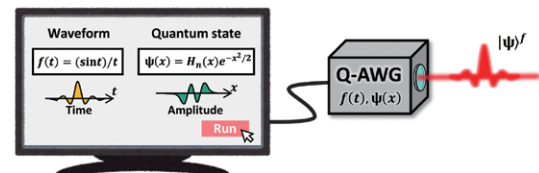
時間領域多重による二次元クラスター状態。A,B: 一次元から二次元への拡張による多入力への対応の様子。C: 二次元クラスター状態生成光学系。D,E: 生成される二次元クラスター状態の構造。

©W. Asavanant et al., Science 366, 373 (2019). DOI: 10.1126/science.aay2645.

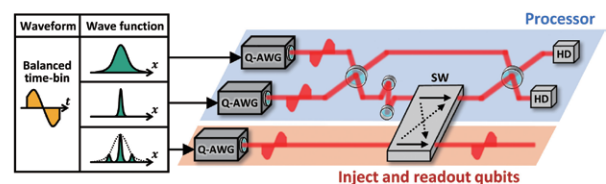
量子任意波形発生器

任意波形の光パルスを生成する arbitrary waveform generator (AWG) は、これまで古典光の範囲で研究されてきた。量子技術に応用するためには、任意の量子状態を任意波形の光パルスで生成する新しい光源、quantum arbitrary waveform generator (Q-AWG) が今後必要になると考えられる。我々は、量子エンタングルメントを用いてこれを実現する方法を提案した。また、実際にこれまで実現が難しかった特殊な波束形状の量子光を実験的に生成することに成功した。汎用性の高い「究極の量子光源」につながる成果であり、光量子コンピュータに限らず様々な量子技術の実現に貢献すると考えられる。

A Q-AWG



B Quantum computing



量子任意波形発生器の概念。A: 量子任意波形発生器における、波束形状と量子状態という二つの設定項目。B: 量子任意波形発生器の出力を量子コンピュータの入力とする構成。

©K. Takase et al., Science Advances 8, eadd4019 (2022). DOI: 10.1126/sciadv.add4019.

主要メンバー

(研究員) 吉川 純一
(特別研究員) 阪口 淳史

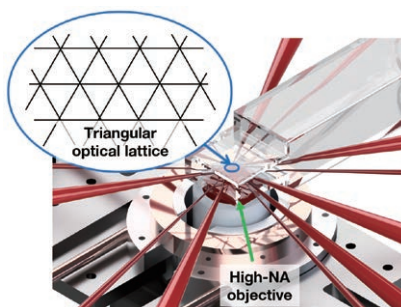
量子多体ダイナミクス研究チーム

キーワード: 量子シミュレーション、量子ダイナミクス、冷却原子、光格子

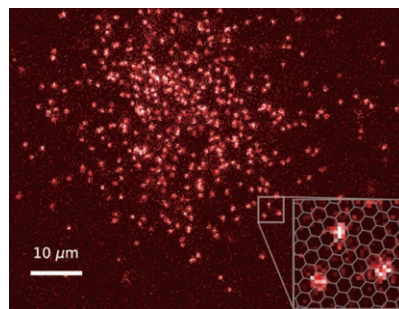
研究室概要

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

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



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



三角光格子中の極低温気体に対する単一原子観測



福原 武 (D. Sci.) チームリーダー

主要論文

- 1 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).
- 2 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).
- 3 D. Yamamoto, T. Fukuhara, and I. Danshita, "Frustrated quantum magnetism with Bose gases in triangular optical lattices at negative absolute temperatures", *Commun. Phys.*, 3, 56 (2020).
- 4 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).
- 5 T. Fukuhara, S. Hild, J. Zeiher, P. Schauß, I. Bloch, M. Endres, and C. Gross, "Spatially Resolved Detection of a Spin-Entanglement Wave in a Bose-Hubbard Chain", *Phys. Rev. Lett.* 115, 035302 (2015).

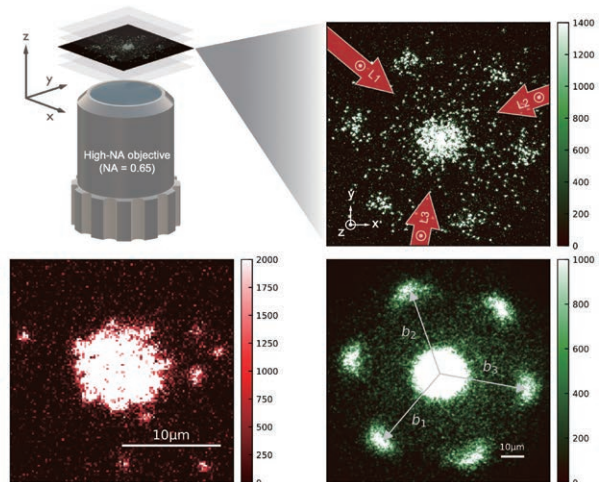
略歴

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

研究紹介

量子気体顕微鏡を用いた三角光格子におけるモット絶縁体転移の観測

三角光格子に量子気体を導入し、光格子の深さを深くしていくと、超流動-モット絶縁体間の量子相転移が起こる。量子気体顕微鏡では、光格子内の原子気体の分布を単一原子レベルで測定できる。モット絶縁体状態に移行するにしたがって、各格子点の充填率が上がっている様子が観測された。また、我々は飛行時間測定法を量子気体顕微鏡で実現することで、位相コヒーレンスに関する情報も得ることができる。光格子を深くしていくと、位相コヒーレンスの消失からもモット絶縁状態への転移が確認できた。超流動-モット絶縁体相転移は、光格子系の最も基本的な物理であり、その観測は強相関・量子多体系の量子シミュレーションに向けた重要な一歩である。

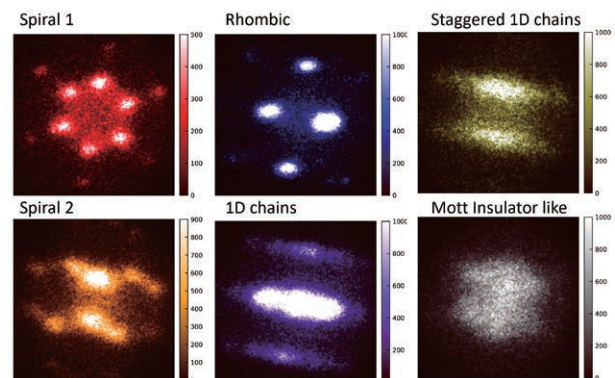


量子気体顕微鏡による測定。飛行時間測定法によるコヒーレンス測定 (右上) と光格子内での実空間測定 (左下) の両方を行うことができる。右下はコヒーレンス測定の実験結果を平均化したもの。

フラストレート三角光格子中の量子気体の実現

光格子中のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の位相をスピンとみなすことでXYスピンモデルが実現される。この時、スピン間の結合は格子間のトンネリングに対応するため、通常は強磁性的な結合が実現される。光格子の位相を変調することで、格子間トンネリングの大きさや符号を変えることができ、スピン結合のパラメータを自在に変化させることができる。我々は三角光格子に BEC を導入し XY スピンモデルを実現し、このモデルで現れる様々な相を飛行時間測定による干渉パターンにより確認した。格子間トンネリングの符号を負にすることで幾何学的フラストレーションが生じ、その際に2つのカイラルモードが生じる。自発的対称性の破れにより、実験ごとにランダムに片方のカイラルモードが現れることも観測した。

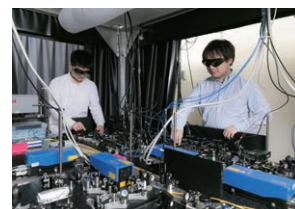
H. Ozawa *et al.*, in preparation.



三角格子XYスピンモデルにおける様々な相に対応した干渉パターン

主要メンバー

(研究員) 山本 隆太
(特別研究員) 小沢 秀樹



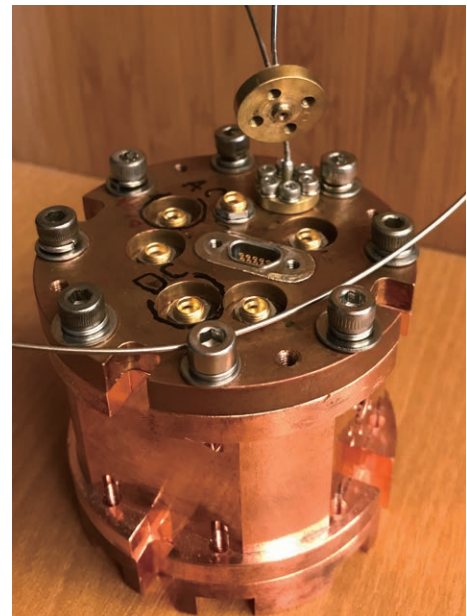
浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム

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

研究室概要

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

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



液体ヘリウムを貯めるセルと呼ばれる実験器具



川上 恵里加 (Ph. D.) 理研白眉研究チームリーダー

主要論文

- 1 E. Kawakami, A. Elarabi, and D. Konstantinov "Relaxation of the excited Rydberg States of Surface Electrons on Liquid Helium", *Phys. Rev. Lett.*, 126, 106802 (2021).
- 2 A. Elarabi, E. Kawakami, and D. Konstantinov "Cryogenic amplification of image-charge detection for readout of quantum states of electrons on liquid helium", *J. of Low Temp. Phys.* 202, 456 (2021).
- 3 E. Kawakami, A. Elarabi, and D. Konstantinov "Image-Charge Detection of the Rydberg States of Surface Electrons on Liquid Helium", *Phys. Rev. Lett.*, 123 086801 (2019).
- 4 E. Kawakami, T. Jullien, P. Scarlino, D. R. Ward, D. E. Savage, M. G. Lagally, Viatcheslav Dobrovitski, Mark Friesen, S. N. Coppersmith, M. A. Eriksson, and L. M. K. Vandersypen, "Gate fidelity and coherence of an electron spin in a Si/SiGe quantum dot with micromagnet", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113, 42, 11738 (2016).
- 5 E. Kawakami, P. Scarlino, D. R. Ward, F. R. Braakman, D. E. Savage, M. G. Lagally, Mark Friesen, S. N. Coppersmith, M. A. Eriksson, and L. M. K. Vandersypen, "Electrical control of a long-lived spin qubit in a Si/SiGe quantum dot", *Nat. Nanotechnol.*, 9, 666-670 (2014).

略歴

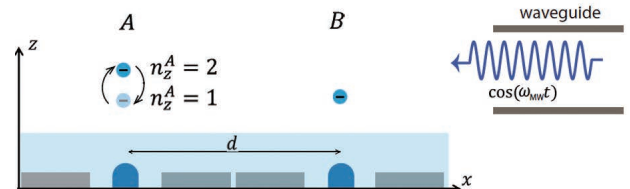
2016 デルフト工科大学(オランダ)博士学位取得
 2016 沖縄科学技術大学院大学 博士研究員
 2017 科学技術振興機構 さきがけ研究員
 2020 理化学研究所 浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム チームリーダー(現職)

研究紹介

ヘリウム表面上の電子を用いたリュードベリ・スピンハイブリッド量子ビット

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

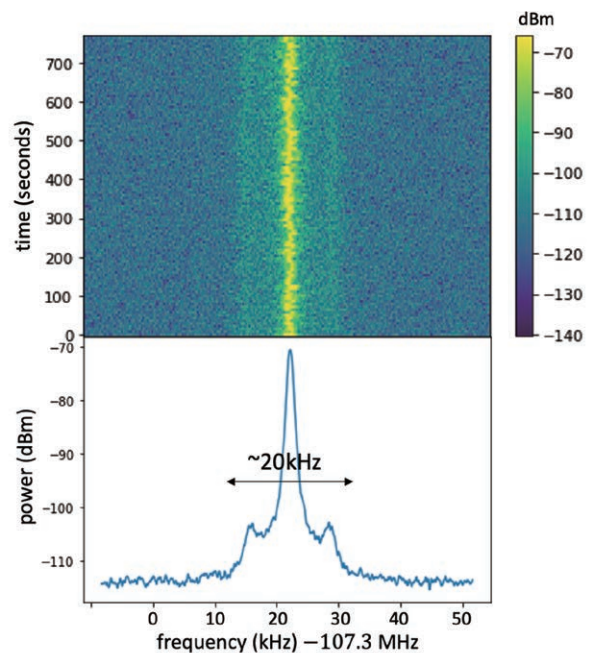
微小磁石を電子近傍に置くことによって、リュードベリ状態とスピン状態の間に人工的な相互作用を作り出す。この相互作用によってスピン状態の緩和時間は50 ms程と短くなってしまうが、量子操作の信頼度には影響しないことが理論的に計算された。1量子ビットゲートの信頼度は>99.9999%、2量子ビットゲートの信頼度は~99%と理論的に見積もられた。



強磁性体で出来た先端が丸まっている直径100 nm程の円柱は青色、外側の電極は灰色で表されている。円柱の上に電子1つが捕捉されている。薄い水色で表される液体ヘリウム4の厚さは140 nmほどである。隣り合う電子A,Bは $d = 0.88 \mu\text{m}$ の距離があり、量子ビットA,Bとして使われる。この図には電子Aのリュードベリ遷移が導波管を通して与えられたマイクロ波と共鳴しており、電子Aがリュードベリ基底状態とリュードベリ第一励起状態の間を行ったり来たりしている。

極低温で動作するマイクロ波発振器

誤り耐性のある拡張可能な量子コンピュータ実現のために必要な機能の一つに、信頼性が高くエネルギー効率性の高い量子ビットの操作と読み出しがある。近年では、量子ビットの操作のための機能が極低温で動作するCMOS技術や超伝導 Josephson junctionを用いて実現された。これに対し、我々は、トンネルダイオード発振器を用いた量子ビット読み出しのための極低温で動作するマイクロ波発振器を開発している。トンネルダイオード発振器はCMOSデバイスや超伝導 Josephson junctionと比べて、発熱量が少ない($\sim 1 \mu\text{W}$)という利点がある。さらに、我々は量子ビット読み出しの信頼度を高めるために、2つの発振器の同期を利用することを提案する。



極低温に置かれたマイクロ波発振器から発振された107.3MHz付近の周波数を持つマイクロ波信号のスペクトラム

主要メンバー

(技師) GRYTSENKO Ivan
(特別研究員) JENNINGS Asher
(テクニカル・スタッフI) 伊藤 裕美

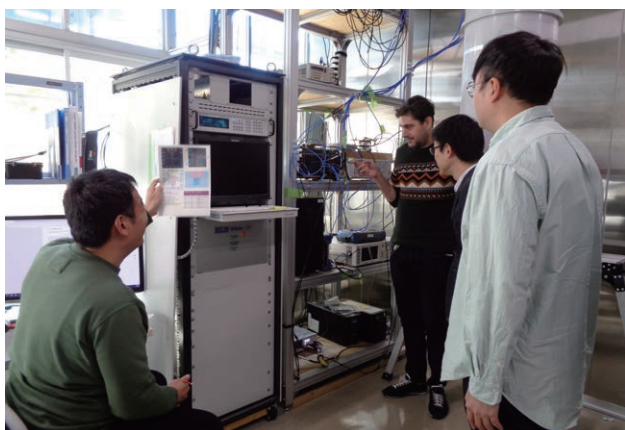
(基礎科学特別研究員) ZHOU Xianjing
(研究パートタイマーI) MOHAN Rajesh
(研究パートタイマーI) RYBALKO Oleksi

半導体量子情報デバイス研究チーム

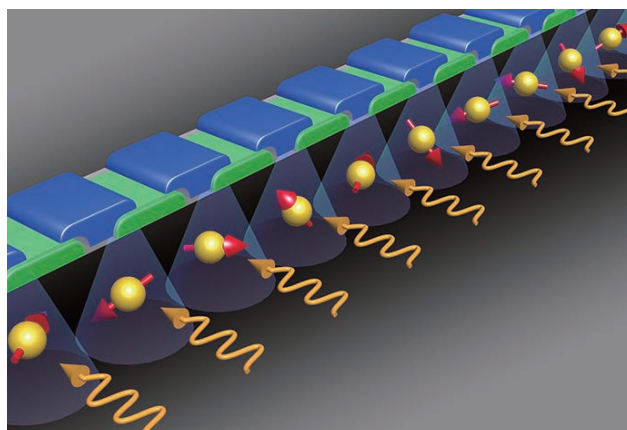
キーワード：量子コンピュータ、半導体、量子ビット、量子ドット、電子スピン

研究室概要

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



実験室の様子



一次元スピン量子ビットデバイスのイメージ



樽茶 清悟 (D.Eng.) チームリーダー

主要論文

- 1 K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, T. Kobayashi, and S. Tarucha, "Quantum error correction with silicon spin qubits", *Nature*, 608, 682-686 (2022).
- 2 M. Tadokoro, T. Nakajima, T. Kobayashi, K. Takeda, A. Noiri, K. Tomari, J. Yoneda, S. Tarucha, and T. Kodera, "Designs for a two-dimensional Si quantum dot array with spin qubit addressability", *Sci. Rep.*, 11, 19406 (2021).
- 3 T. Nakajima, Y. Kojima, Y. Uehara, A. Noiri, K. Takeda, T. Kobayashi, and S. Tarucha, "Real-time feedback control of charge sensing for quantum dot qubits", *Phys. Rev. Applied*, 15, L031003 (2021).
- 4 K. Takeda, A. Noiri, J. Yoneda, T. Nakajima, and S. Tarucha, "Resonantly driven singlet-triplet spin qubit in silicon", *Phys. Rev. Lett.*, 124, 117701-1-5 (2020).
- 5 A. Noiri, K. Takeda, J. Yoneda, T. Nakajima, T. Kodera, and S. Tarucha, "Radio-frequency detected fast charge sensing in undoped silicon quantum dots", *Nano Lett.*, 20, 947 (2020).

略歴

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

研究紹介

シリコンスピン量子ビットにおける高忠実ユニバーサル量子操作の実証

誤り耐性量子計算には、ユニバーサル量子操作の構成要素である1、2量子ビット操作において99%以上の忠実度が必要である。しかし、Siスピン量子ビットでは、この条件は達成されていなかった。我々はスピン回転操作を10倍高速化することにより初めて高忠実度化に成功した。

試料には同位体制御したSi/SiGe量子井戸中に作製した二重量子ドットを用いた。(図1) 直上には微小磁石が配置しており、マイクロ波照射と組み合わせることでスピン回転を高速化できる。今回量子ビット間の大きな交換相互作用と高速スピン回転操作を用いることで最も重要な2量子ビット操作、制御 NOT 操作を高速化した。これにより1ビットで99.8%、2ビットで99.5%の、誤り耐性条件を満たす忠実度を達成した。(図2)

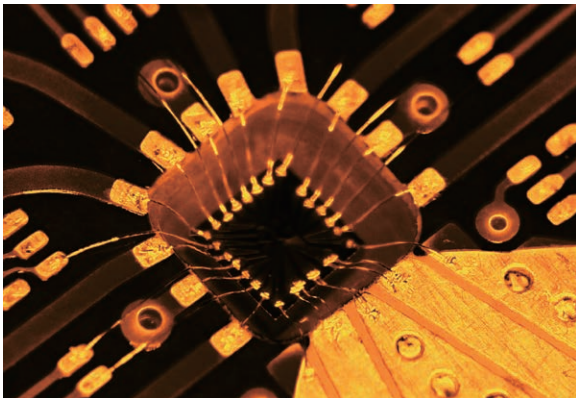


図1：実験で用いたシリコン量子コンピュータチップ（中央の四角い部分）。

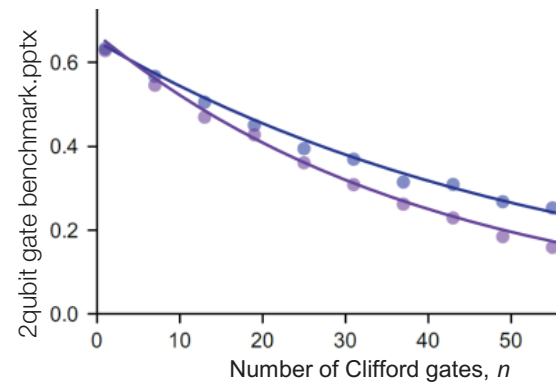


図2：ランダム化ベンチマーク法を用いた操作忠実度評価。操作回数に対する減衰から操作忠実度を評価できる。

半導体量子ドット電荷センサーの実時間フィードバック制御

半導体量子ビットの実装では、高感度な量子ドット電荷系を用いた単一電子レベルの高速電荷検出が必要とされる。しかし電荷計は雑音に敏感で感度を維持するには高度な調整が必要であった。本研究では電荷計信号をフィードバックして自動的に高速で調整するシステムを構築した。

FPGAに実装したフィードバック制御回路を用いて、二重Si量子ドットに隣接する電荷計の電気伝導度を検出し、それを一定に維持するようにゲート電極電圧を制御した（図1）。フィードバック制御のない場合、電荷計の感度変動のため、電荷遷移線の一部しか観測できない。フィードバックによって感度を安定化することで、全体的に明瞭な電荷遷移線が観測できた。

この手法は量子計算に求められる1マイクロ秒以下の単発スピン測定にも応用可能である。開発した自動制御技術は、より多数の量子ビット系の長時間測定に有用である。

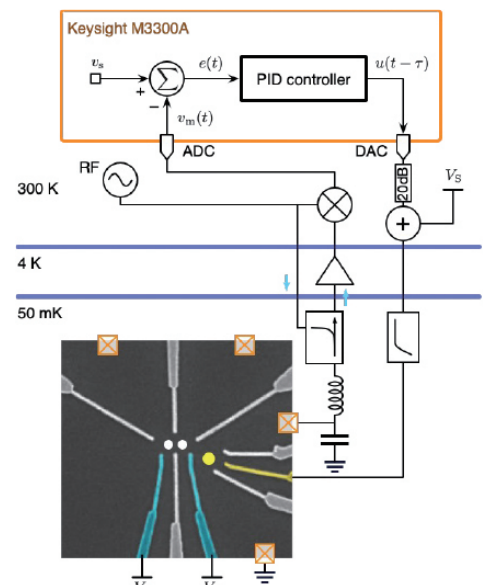


図1：量子ドット電荷センサーフィードバック制御系の概略図。

主要メンバー

(研究員) 小林 高

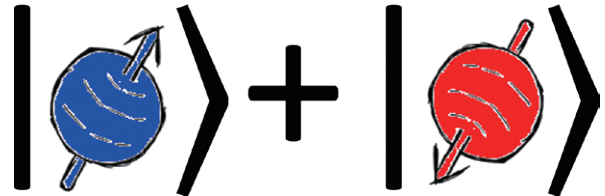
(特別研究員) CHANG CHIEN Yuan

半導体量子情報デバイス理論研究チーム

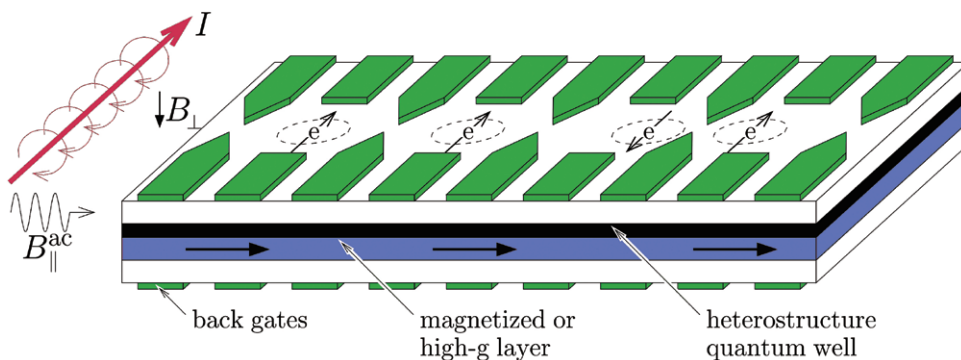
キーワード: 量子ドット、スピンを用いた量子情報処理、量子ビット、スピン-軌道相互作用、量子情報処理

研究室概要

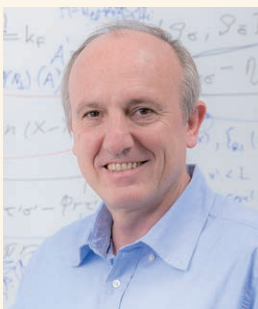
当チームはスピンを用いた量子コンピュータの理論に取り組んでいる。SiとGeを用いたゲート制御量子ドットを用い、量子コンピュータにおけるCMOSの互換物をデザインした。そして、スピン軌道相互作用を用いて電場による制御を実現できるスピン量子ビットに着目している。発展したバンド構造モデルを用いた低次元に閉じ込めた正孔と電子の性質、量子ビットをノイズから守るための適切なセットアップと方法の研究を行っている。量子ビット間結合の解析も行っており、これにより多数の量子ビットを用いたネットワークを実現できる可能性がある。我々の究極の目的は、高速で微小かつ拡張可能な未来の量子コンピュータ素子を特定することだ。



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



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



LOSS Daniel(Ph.D.)チームリーダー

主要論文

- 1 P. Stano and D. Loss, "Review of performance metrics of spin qubits in gated semiconducting nanostructures," *Nat. Rev. Phys.* 4, 672 (2022).
- 2 A. Gutierrez-Rubio, J. S. Rojas-Arias, J. Yoneda, S. Tarucha, D. Loss, and P. Stano, "Bayesian estimation of correlation functions," *Phys. Rev. Research* 4, 043166 (2022).
- 3 O. Malkoc, P. Stano, and D. Loss, "Charge-noise induced dephasing in silicon hole-spin qubits," *Phys. Rev. Lett.* 129, 247701 (2022).
- 4 T. Nakajima, A. Noiri, J. Yoneda, M. R. Delbecq, P. Stano, T. Otsuka, K. Takeda, S. Amaha, G. Allison, K. Kawasaki, A. Ludwig, A. D. Wieck, D. Loss, S. Tarucha, "Quantum non-demolition measurement of an electron spin qubit", *Nature Nanotechnology* 14, 555 (2019).
- 5 D. Loss, D. DiVincenzo, "Quantum computation with quantum dots", *Phys. Rev. A* 57, 120 (1998).

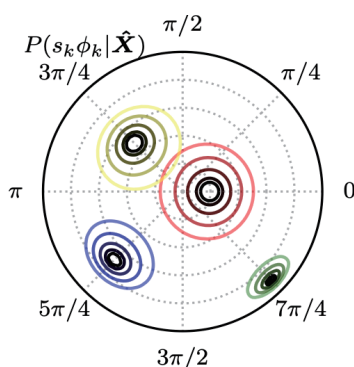
略歴

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

研究紹介

Bayesian estimation of correlation functions

Correlation is intimately related to causality and prediction, and correlation functions are ubiquitous in different theories and formalisms. They also play a major role in the study of noise, which limits current state-of-the-art quantum devices. With the goal of understanding the noise origin and properties, we have constructed a Bayesian theory of estimation of correlations of stochastic variables sampled at regular intervals. Our results allow one to better understand statistical noise fluctuations, assess the correlations between two variables, and postulate parametric models of spectra, which can be further tested. We have also proposed a new method to numerically generate correlated noise with a given spectrum.

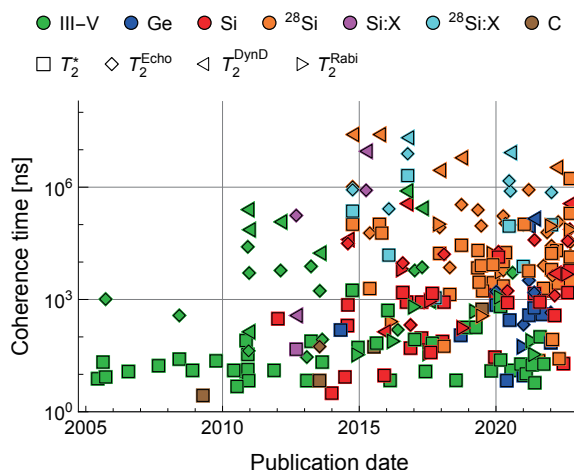


Estimated probability distributions of correlations parameters. The plot is in the complex plane, with correlation strength (s_k) as the radial coordinate and correlation phase (ϕ_k) as the polar angle. The color contours enclose 75, 50, 25, 10, and 5%-probability regions. Different colors correspond to different correlation degree and phase in the signal.

A. Gutierrez-Rubio, J. S. Rojas-Arias, J. Yoneda, S. Tarucha, D. Loss, P. Stano, "Bayesian estimation of correlation functions", Phys. Rev. Research 4, 043166 (2022).

Review of performance metrics of spin qubits in gated semiconducting nanostructures

The field of spin qubits is vast. There is a host of variants on the sample material and structure, device design, or qubit encoding. While this versatility in the qubit types is beneficial for overcoming possible roadblocks, it also makes comparison of different spin qubits difficult. To overcome this difficulty, we have collected values of selected performance characteristics of semiconductor spin qubits defined in electrically controlled nanostructures. The characteristics are envisioned to serve as a community source for the values of figures of merit with agreed-on definitions allowing comparison of different qubit platforms. We include characteristics on the qubit coherence, speed, fidelity, and the qubit-size of multi-qubit devices.



Spin coherence times according to the publication date. The point color shows the device material. The point symbol shows the coherence type as given in the legend.

P. Stano and D. Loss, "Review of performance metrics of spin qubits in gated semiconducting nanostructures", Nature Reviews Physics 4, 672 (2022).

主要メンバー

(特別研究員) ROJAS ARIAS Juan



量子計算理論研究チーム

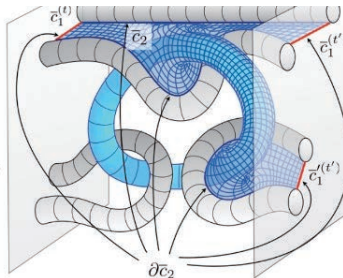
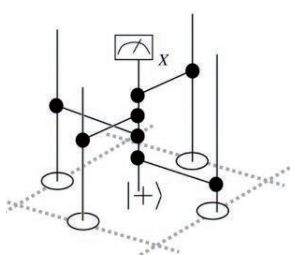
キーワード: 量子コンピューティング、量子情報科学、量子機械学習、量子誤り訂正

研究室概要

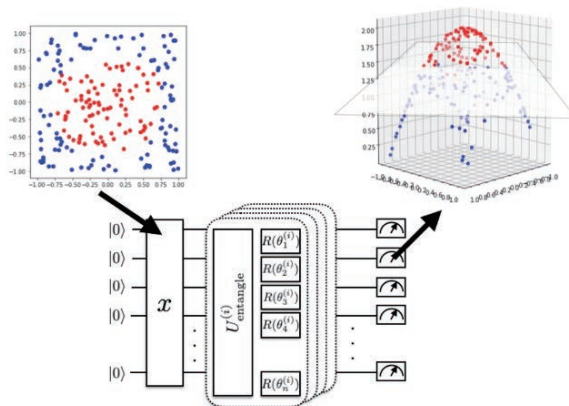
量子コンピューティングは技術革命をもたらしており、量子計算理論研究チームはこの変革の最前線にいる。量子コンピュータの実現に不可欠な量子コンピューティング理論やソフトウェアの開発、新しい量子アルゴリズムの設計、性能の解析に重点を置いている。

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、量子回路の量子コンピューター・アーキテクチャの最適化にも取り組んでいる。また、複雑な計算を高い信頼性で実行できる、量子エラー訂正機能を備えた大規模な耐障害性量子コンピュータの設計も目指している。

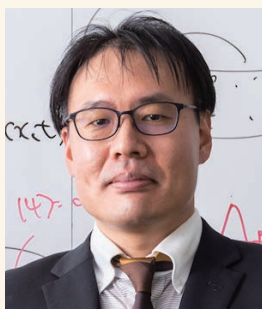
量子情報科学は、基礎物理学、量子化学、機械学習、高性能計算機などの分野と、学際的な研究を推進している。我々は、量子コンピュータや量子情報科学を通して、新たな科学的フロンティアを切り開くことを目指している。このような協同的なアプローチにより、量子コンピュータとその実社会への応用の進歩を推進し、RQCを量子テクノロジーの未来を形作る重要なプレーヤーとして位置づけている。



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



量子回路学習：パラメータ付き量子回路をモデルとする教師あり機械学習。



藤井 啓祐 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

- 1 K. Mizuta, Y. O. Nakagawa, K. Mitarai, and K. Fujii, "Local variational quantum compilation of a large-scale Hamiltonian dynamics" *PRX Quantum* 3, 040302 (2022).
- 2 K. Fujii, K. Mizuta, H. Ueda, K. Mitarai, W. Mizukami, and Y. O. Nakagawa, "Deep Variational Quantum Eigensolver: a divide-and-conquer method for solving a larger problem with smaller size quantum computers" *PRX Quantum* 3, 010346 (2021).
- 3 K. Mitarai, M. Negoro, M. Kitagawa and K. Fujii, "Quantum Circuit Learning", *Phys. Rev. A*, 98, 032309 (2018).
- 4 K. Fujii and K. Nakajima, "Harnessing Disordered-Ensemble Quantum Dynamics for Machine Learning", *Phys. Rev. Applied* 8, 24030 (2017).
- 5 K. Fujii, M. Negoro, N. Imoto, and M. Kitagawa, "Measurement-Free Topological Protection Using Dissipative Feedback", *Phys. Rev. X* 4, 041039 (2014).

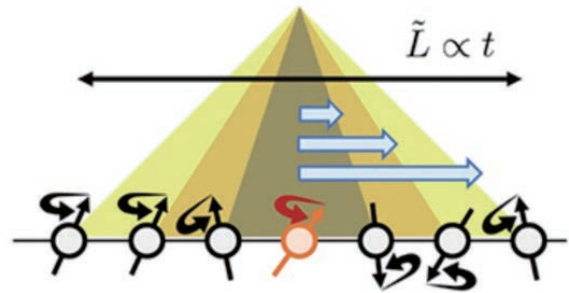
略歴

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

研究紹介

大規模な量子系のダイナミクスのための量子アルゴリズム設計法を構築

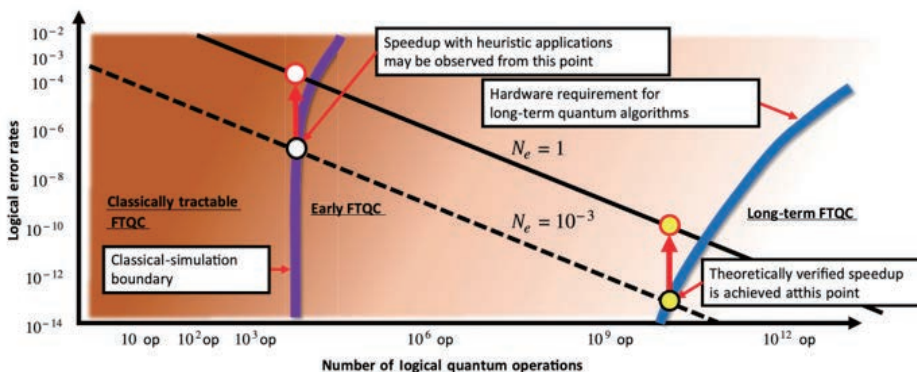
複雑な量子システムを理解するために重要な量子シミュレーションは、量子回路上に時間発展演算子を実装することに依存している。標準的な手法である Trotter 化は、精度を上げるために膨大な数のゲートを必要とする。我々は、局所変分量子コンパイル (LVQC) アルゴリズムを提案し、大規模量子システムにおける時間発展演算子を、より小規模なシステムで最適化することにより、高精度かつ効率的に変換することを可能にした。LVQC は、サブシステムのコスト関数と Lieb-Robinson 境界を利用することで、限られたサイズの量子コンピュータや古典シミュレータで動作することができる。この手法は、有限、短距離、長距離の相互作用があっても、様々な系の時間発展演算子を効率的に構築することができる。LVQC を用いることで、時間発展演算子の深さを 40 量子ビットまで圧縮することに成功し、大規模量子回路の設計や中間スケールの量子デバイスへの応用の可能性を示した。



©K. Mizuta *et al.*, "Local variational quantum compilation of a large-scale Hamiltonian dynamics", PRX Quantum 3, 040302 (2022).

新たな誤り補正法により誤り耐性量子計算のオーバーヘッドを大幅に削減

フォールトトレラント量子コンピューティング (FTQC) の初期段階では、量子デバイスの大規模化に限界があり、古典的な復号ユニットの計算能力が不十分であることが課題となっている。我々は、量子エラー訂正と量子エラー緩和を統合した効率的な FTQC アーキテクチャを開発し、一定のサンプリングオーバーヘッドを犠牲にしながら、符号距離と T ゲート数を効果的に増加させた。これにより、様々な量子コンピューティング領域において、必要な物理量子ビット数を 80% から 45% 削減することができる。達成可能なコード距離が約 11 まで伸びると、この方式により 10^3 倍の論理演算が可能になる。このブレークスルーにより、計算オーバーヘッドが大幅に削減され、FTQC 時代の到来が加速される可能性がある。



© Y. Suzuki *et al.*, "Quantum Error Mitigation as a Universal Error Reduction Technique: Applications from the NISQ to the Fault-Tolerant Quantum Computing Eras", PRX Quantum 3, 010345 (2022).

主要メンバー

(特別研究員) 水田 郁
(特別研究員) 池田 達彦
(特別研究員) 乾 幸地



量子情報物理理論研究チーム

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

研究室概要

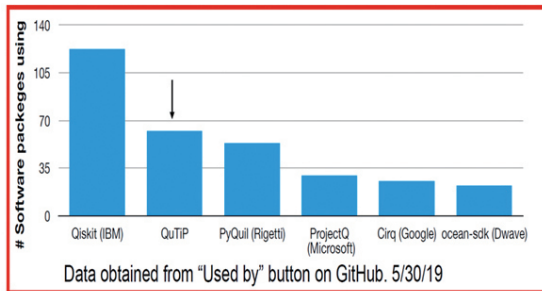
当研究チームは、ナノサイエンス、量子計算、量子情報処理、超伝導量子回路、量子光学、原子物理、ナノメカニクス、メゾスコピック物理、計算物理、そして物性物理といった分野の境界における学際的な研究を行っている。

我々は、量子情報処理、量子光学、量子オープンシステムなどで、世界中で使用されているソフトウェア QuTiP を開発した。また、AI や機械学習の技術を利用し、計算が困難な問題の解決にも取り組んでいる。Web of Science では、過去6年間 (2017~2022年) に渡り、我々の研究成果が高被引用論文として掲載された。このマイルストーンに到達する研究者は0.1% 未満である。

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

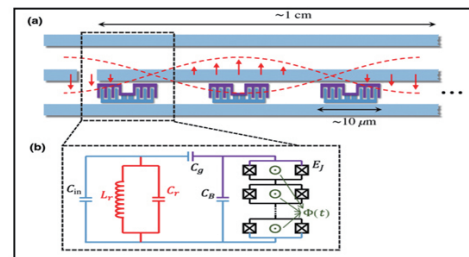
More than one Million downloads!

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



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

Quantum Information with quantum cat states



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

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



NORI Franco (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

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

略歴

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

研究紹介

量子猫状態を持つ量子情報

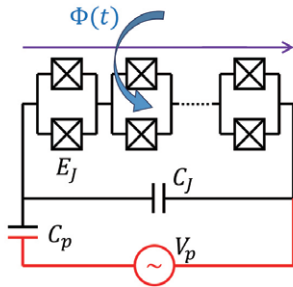
量子猫状態は量子科学技術において非常に重要な役割を担っており、我々はこの分野でいくつかの興味深い結果を得ている。この分野における我々の最近の成果は、次の4つの例を含む出版物に掲載されている。

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

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

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

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



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

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

超強力な光と物質の結合の分野で、いくつかの一般的な結果を得ている

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

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

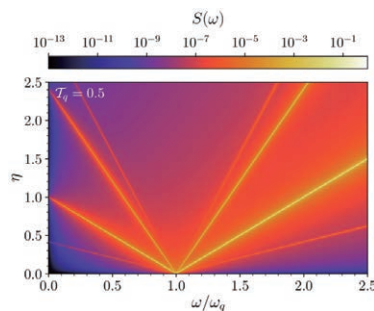
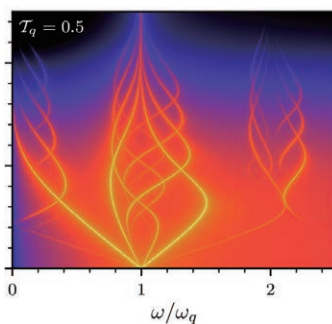
W. Salmon et al., *Gauge-independent emission spectra and quantum correlations in the ultrastrong coupling regime of open system, cavity-QED*, Nanophotonics 11, pp. 1573 (2022).

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

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

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

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



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

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

主要メンバー

(研究員) GNEITING Clemens

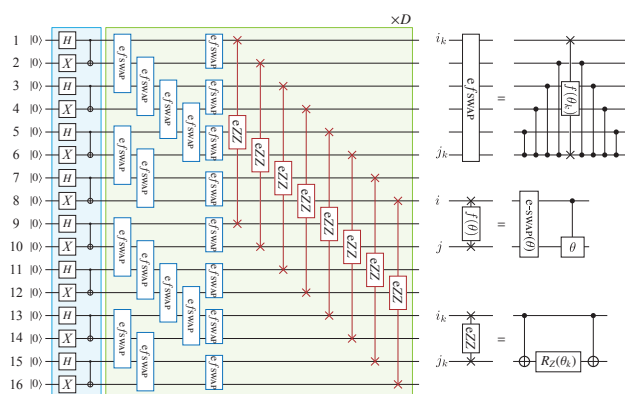
(特別研究員) ZHANG Yuran

量子計算科学研究チーム

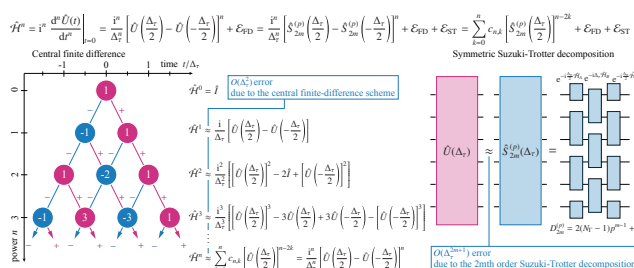
キーワード: 量子多体系、量子ダイナミクス、量子情報物理、テンソルネットワーク、高性能計算

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



Hubbard 模型に対する VQE 計算のための量子回路



量子冪乗法の概念図



柚木 清司 (Ph.D.) チームリーダー

主要論文

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

略歴

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

研究紹介

変分対非断熱駆動による Hubbard 模型の基底状態生成

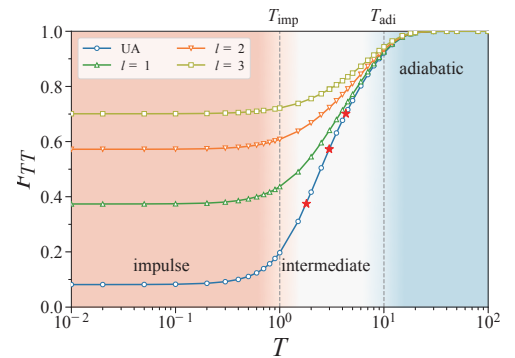
ユニタリ時間発展により量子多体系の基底状態を求めることは、挑戦的かつ量子計算の量子多体系研究への応用として重要な課題である。我々は変分対非断熱駆動(counterdiabatic driving, CD)法を1次元2成分Fermi-Hubbard 模型に適用し、その基底状態を得るための詳細を報告した。ここでCD法とは、励起状態への遷移を抑制する断熱ゲージポテンシャル (AGP) を駆動過程に導入することで、量子状態の高速駆動を可能にするものである。まず我々は、初期ハミルトニアンと終ハミルトニアンのネストした交換子からなる近似的なAGPにおける最適な変分パラメータの組が、これら交換子の二乗フロベニウスノルムによって係数が与えられる一次方程式系の解ベクトルとして与えられることを示した。そして、有限サイズの1次元Fermi-Hubbard 模型に対する変分CD法を駆動次数3次まで検証し、基底状態フィデリティが駆動次数や駆動時間に関して系統的に向上することを確認した。この結果は、変分CD法がFermi-Hubbard 模型に対して有効であることを示しており、量子多体系の基底状態準備に向けた可能性を示している。

Q. Xie, K. Seki, and S. Yunoki, "Variational counterdiabatic driving of the Hubbard model for ground-state preparation", Phys. Rev. B 106, 155153 (2022).

マイクロカノニカル集団のための量子古典ハイブリッド計算

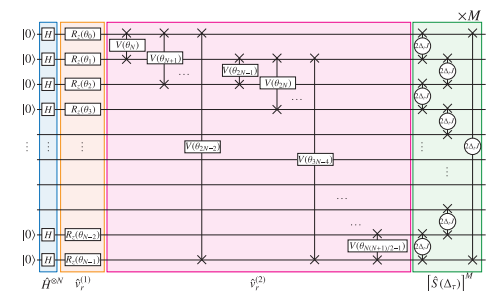
物性物理においては、量子多体系の基底状態等の特定の状態の性質のみでなく、多数の状態の確率的混合の性質も重要であり、後者には量子多体系の統計力学的扱いが不可欠である。本研究ではマイクロカノニカル集団のための量子古典ハイブリッド計算法を提案した。この方法は、与えられたエネルギーを近似的に期待値としてもつ純粋状態を、時間発展させたランダム状態のフーリエ変換により得るという考えに基づいており、このフーリエ変換における時間積分範囲のカットオフに相当する時間パラメータの逆数がマイクロカノニカル集団のエネルギー殻の幅を定めている。本手法は、エントロピーや温度等の熱力学量を、対角ユニタリ・デザインに基づくランダム量子回路とガウシアン・フーリエ表現を用いることで時間発展演算子の対角和から計算するものであり、これを少数サイト1次元スピン1/2ハイゼンベルグモデルの熱力学量を数値計算することで検証した。その結果、対角ユニタリ・デザインの次数により統計誤差に顕著な違いが現れることや、標的エネルギー付近でより多くのエネルギー固有状態が存在するほど手法が有効であることを確認した。

K. Seki and S. Yunoki, "Energy-filtered random-phase states as microcanonical thermal pure quantum states", Phys. Rev. B 106, 155111 (2022).



ハバード模型の基底状態フィデリティ(縦軸)の駆動時間(横軸)依存性。変分AGPによる駆動補助なしの場合(unassisted, UA)と駆動次数 $l=1, 2, 3$ の場合について結果を示している。

©Qing Xie, Kazuhiro Seki, and Seiji Yunoki, Phys. Rev. B 106, 155153 (2022) "Copyright (2022) by the American Physical Society."



時間発展したランダムな状態を準備するための量子回路。ランダムな状態は、最初の3つの部分(青、オレンジ、赤の四角で囲まれた部分)で準備される。時間発展演算子部分(緑の四角で囲まれた部分)では、周期的境界条件下での1次元ハイゼンベルグ模型を想定している。

©Kazuhiro Seki and Seiji Yunoki, Phys. Rev. B 106, 155111 (2022) "Copyright (2022) by the American Physical Society."

主要メンバー

(研究員) 関 和弘

(特別研究員) QING Xie

量子複雑性解析理研白眉研究チーム

キーワード: 量子もつれ、ハミルトニアン複雑性、量子多体系、量子計算、量子シミュレーション

研究室概要

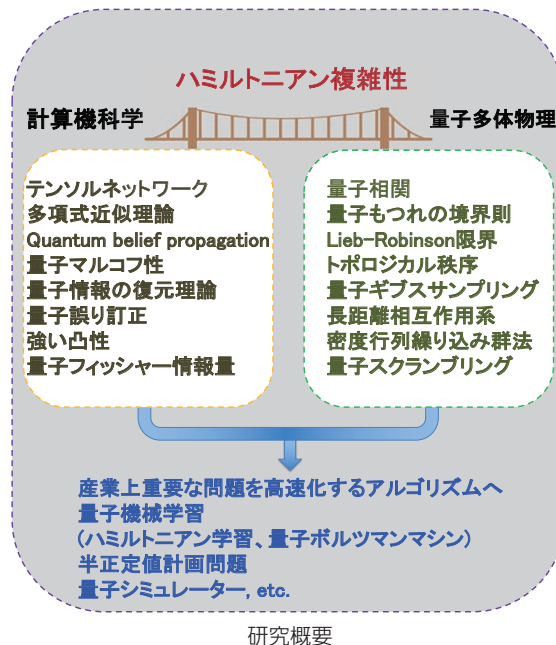
古典コンピュータ(または量子コンピュータ)を用いたときに、量子多体系のシミュレーションの計算複雑性を明らかにする分野はハミルトニアン複雑性 (Hamiltonian Complexity) と呼ばれている。とりわけ、近年の量子コンピュータの量子超越性やNISQ(誤り訂正機能のない小型の量子コンピュータ)を用いた量子アルゴリズムの観点から、ハミルトニアン複雑性は量子情報分野において最も重要な研究対象の一つとなっている。当チームでは、ハミルトニアン複雑性における数学的な未解決問題を解決していくことを目指している。

ハミルトニアン複雑性の学問において最も重要な概念が量子力学の重ね合わせの原理に起因する特殊な現象である量子もつれという性質である。2022年度のノーベル物理学賞は、この量子もつれを初めて実験的に検証したAlain Aspect、John Clauser、Anton Zeilingerの3氏に与えられた。量子もつれの理論的進歩により、量子相の完全な分類、量子物質をシミュレーションする古典・量子アルゴリズムの開発、誤りに強い量子計算、など次々と新しい分野が開拓されている。その中でも、巨視的な長さスケールの量子もつれ(長距離もつれ)は、真に非自明な量子効果を解明する上での重要な鍵となっている。

一般に、量子もつれは一般的に絶対零度に近い超低温下でないと壊れてしまうことが知られている。量子コンピュータを使った量子計算には量子もつれが決定的な役割を果たすため、量子もつれが有限温度の環境でどの程度まで生き残るかを解明することが重要な未解決問題の一つとなっている。ハミルトニアン複雑性では、量子多体系に存在する量子もつれを定量的/定性的に特徴づけることが主要な目的の一つとなっている。

主な研究テーマ

- 量子もつれの境界則の研究
- 相互作用するボソン系におけるLieb-Robinson限界の研究
- 任意の温度における量子マルコフ性の研究



桑原 知剛 (Ph.D.) 理研白眉研究チームリーダー

主要論文

- 1 T. Kuwahara, K. Saito, "Exponential Clustering of Bipartite Quantum Entanglement at Arbitrary Temperatures," *Physical Review X*, 12, 021022 (2022)
- 2 A. Anshu, S. Arunachalam, T. Kuwahara, M. Soreimanifar (alphabet order), "Sample-efficient learning of quantum many-body systems," *Nature Physics*, 17, 931–935 (2021), Featured in News&Views
- 3 T. Kuwahara, A. M. Alhambra, and A. Anshu, "Improved thermal area law and quasi-linear time algorithm for quantum Gibbs states," *Physical Review X*, 11, 11047 (2021)
- 4 T. Kuwahara, K. Saito, "Area law of noncritical ground states in 1D long-range interacting systems," *Nature Communications*, 11 4478 (2020)
- 5 T. Kuwahara, K. Saito, "Strictly Linear Light Cones in Long-Range Interacting Systems of Arbitrary Dimensions," *Physical Review X*, 10, 031010 (2020), Featured in Physics

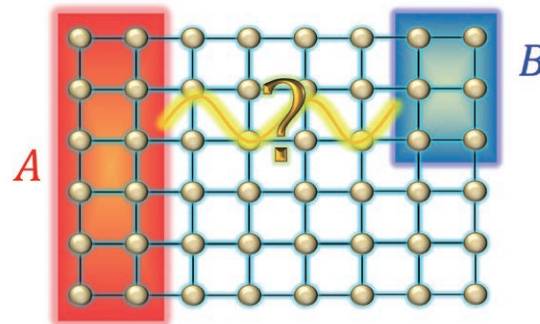
略歴

- 2010 東京大学 工学部 物理工学科卒業
- 2012 東京大学 理学系研究科 物理学 修士課程卒業
- 2015 東京大学 理学系研究科 物理学 博士課程卒業
- 2015 東京大学 日本学術振興会特別研究員(学振PD)
- 2016 東北大学 材料科学高等研究所 (AIMR) 助教
- 2017 理化学研究所 革新知能統合研究センター 研究員
- 2021 科学技術振興機構さきがけ研究員(兼任) (現職)
- 2022 理化学研究所 開拓研究本部/量子コンピュータ研究センター 理研白眉チームリーダー(現職)

研究紹介

量子もつれのクラスタリング定理

量子多体系の熱平衡状態では、一般に長距離に及ぶ「量子もつれ」が存在しないことを示した。本研究では、 $1/T$ (T : 温度)の距離を超えると、標準的な「二者間の」量子もつれが指数関数的に減衰することを証明した。本結果は、任意の次元、任意の温度でありとあらゆる量子多体系に適用される極めて一般的なものとなっている。これにより、長距離の量子もつれが、有限温度では特殊な「三者間以上の」量子もつれの形でしか生き残らないことが示された。これは、これまでに観測された有限温度の長距離量子もつれが、三者間の量子もつれに関連したトポロジカル秩序によって生じているという観測結果をサポートするものになっている。本研究は、量子機械学習を含む量子計算に関する手掛かりを多く与えるとともに、有限温度で観測されるさまざまな量子現象(超伝導、超流動、スピン液体、etc.)に関与する量子もつれの分類研究に寄与すると期待される。



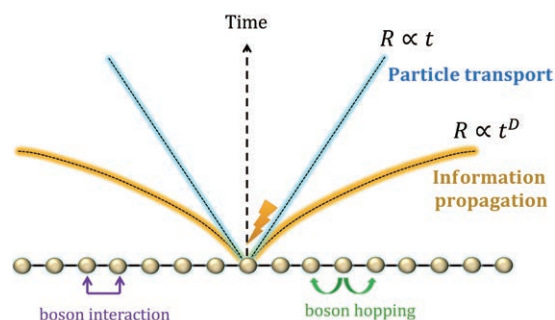
T. Kuwahara and K. Saito, "Exponential clustering of bipartite quantum entanglement at arbitrary temperatures", Physical Review X, 12, 021022 (2022)

ボソン系のリーブ・ロビンソン限界

我々は長年の未解決問題であった、ボーズ粒子系におけるリーブ・ロビンソン限界を解決した。

物理学の基本原則として因果律、すなわち光円錐の外への情報伝播の厳密な禁止が挙げられる。しかし、非相対論的な系では、このような光円錐がうまく定義できるかどうかは自明ではない。LiebとRobinsonによる有名な研究で、情報量を制限する有効光円錐の存在が証明されており、これが"Lieb-Robinson限界"として特徴づけられている。これまで、Lieb-Robinson限界は、量子シミュレーションの精度誤差や、低温（あるいはゼロ）状態での量子もつれの数学的構造を解析する上で重要な概念であった。

我々の発見は2点でまとめられる。第一に、相互作用するボゾンに対する最適な有効光円錐を特定し、精度保証付きでダイナミクスをシミュレートするアルゴリズムを確立した。第二に、従来の予想に反して、情報伝播に関して、ボゾンとフェルミオンは全く異なる性質を示すことが明らかになった。同時に、このような違いを実験的に観測する簡単なプロトコルも提案した。



T. Kuwahara, T. Van Vu and K. Saito, "Optimal light cone and digital quantum simulation of interacting bosons," arXiv:2206.14736

主要メンバー

(研究員) 木村 裕介
(特別研究員) VU Tan Van

(パートタイマー) 西川 秀明

理研RQC-富士通連携センター

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

研究室概要

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

具体的には、1000量子ビット級への大規模化を可能とする、ハードウェア、ソフトウェア技術の開発や、実機を活用したアプリケーションの研究開発を行う。ハードウェアにおいては、量子ビットの製造ばらつきの改善や、周辺部品および配線部の小型化と低ノイズ化、パッケージやチップの低温実装などの基盤技術の研究開発を行う。さらに、これらのハードウェアに関する要素技術の研究開発を統合し、超伝導量子コンピュータ試作機を開発し、要素技術の有用性を検証する。また、ソフトウェアにおいては、量子コンピュータを動作させるために必要となるミドルウェアおよびクラウドコンピューティングシステムの開発、アプリケーションを実行するためのアルゴリズムの研究開発を行う。これらの研究により開発した超伝導量子コンピュータ試作機において、量子化学計算アルゴリズムと量子エラー緩和技術を統合した、量子アルゴリズムを実行することにより、実応用でのエラー緩和技術の有用性を検証する。また、並行して、量子エラー検出、訂正などの基礎的な実証実験も行い、量子エラー訂正機能を実現するための課題の抽出と技術の改善に取り組む。

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



理研RQC-富士通連携センターの開設



佐藤 信太郎 (Ph.D.) 副連携センター長

主要論文

- 1 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)
- 2 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)
- 3 J. Fujisaki, H. Oshima, S. Sato, and K. Fujii "Practical and scalable decoder for topological quantum error correction with an Ising machine", *Physical Review Research* 4, 043086 (2022)
- 4 J. Yamaguchi, H. Hayashi, H. Jippo, A. Shiotari, M. Ohtomo, M. Sakakura, N. Hieda, N. Aratani, M. Ohfuchi, Y. Sugimoto, H. Yamada, and S. Sato "Small bandgap in atomically precise 17-atom-wide armchair-edged graphene nanoribbons." *Commun. Mater.* 1, 36 (2020)
- 5 H. Hayashi, J. Yamaguchi, H. Jippo, R. Hayashi, N. Aratani, M. Ohfuchi, S. Sato, and H. Yamada "Experimental and Theoretical Investigations of Surface-Assisted Graphene Nanoribbon Synthesis Featuring Carbon-Fluorine Bond Cleavage." *ACS Nano* 11, 6204 (2017)

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)

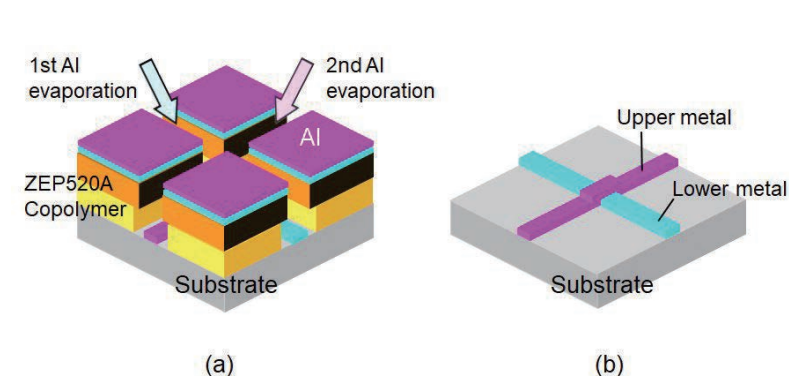
※連携センター長は中村泰信センター長が兼務

研究紹介

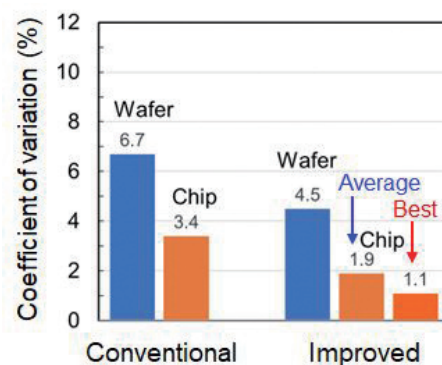
量子ビットの大規模集積化に向けたジョセフソン接合抵抗の均一性改善

超伝導量子ビットの大規模集積化において、ウェハスケールでのジョセフソン接合素子 (JJ) 特性の均一化が重要である。Al/AIOx/Al で構成された JJ において、従来は特性の指標となる室温抵抗に大きな面内ばらつきが生じていた。この原因の一つとして、JJ 素子がシリコン基板を傾けた状態で金属膜の成膜を行う、シャドー蒸着と呼ばれる方法によって作製されることが挙げられる。当グループでは、シャドー蒸着による JJ 素子の基板内での不均一性のメカニズムを解明し、さらに均一性を向上させる2段階蒸着法を新たに提案した。これにより、JJ 素子の抵抗の均一性を3インチシリコン基板内で6.7%から4.5%、10mm角の量子ビットチップ相当で1.1%まで改善可能なことを実証した。

(T. Takahashi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 62 SC1002 (2023))



© Copyright 2023 The Japan Society of Applied Physics

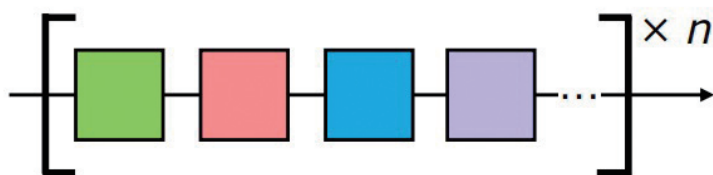


従来手法と提案手法での接合抵抗のばらつきの比較

© Copyright 2023 The Japan Society of Applied Physics

量子演算の実装精度評価手法開発

量子コンピュータの実用化に向けて、計算素子となる量子演算のさらなる高精度化が主要な課題の一つとなっている。量子演算の実装精度を評価することは高精度化において基本となる技術であるが、現在標準的に利用されている評価手法はどれも優れた性質を持つ一方で欠点も抱えており、さらなる改善が必要となっている。当グループでは、評価手法の中でも量子トモグラフィとよばれる手法の効率と信頼性の向上を目的とした理論研究に取り組んでいる。最近の成果としては、Gate-Set Tomographyとよばれる既存手法のデータ処理部分の効率を改善する手法として、エラー増幅機構を利用した量子ゲート用のトモグラフィ手法を開発した。



エラー増幅を行う量子回路の概念図

センター長室

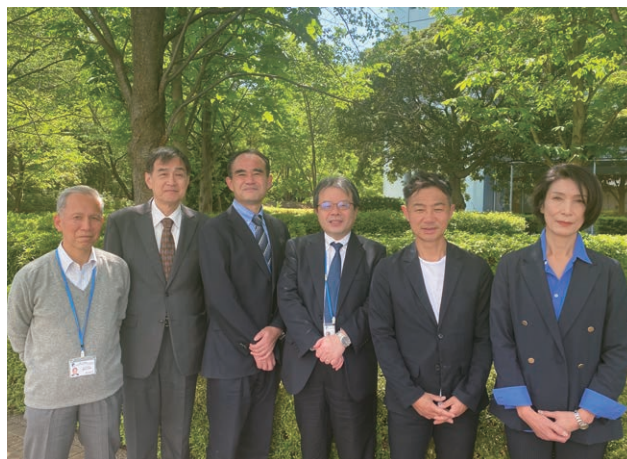
キーワード: 量子コンピュータ研究センターマネジメント、量子技術イノベーションハブ中核組織

概要

当室は、量子コンピュータ研究センターの予算管理や研究スペースの管理、技術動向や知財・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10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ました。センター長室はこの中核組織の運営に取り組んでいます。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、私は 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将来の超伝導集積システムの研究開発に取り組んでいる。



センター長室メンバー

主要メンバー

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

(嘱託職員) **新井 正伸**
(嘱託職員) **岩淵 晴行**



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. Kiriara, 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. Kiriara, 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. Kiriara, 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. Kiriara, 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
2005 日本電気株式会社 基礎・環境研究所 研究部長
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)

Realizing fault-tolerant quantum computers

A proposal to use cat states promises to make more quantum computers less prone to errors

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

Error correction in quantum computers could be simplified by a new protocol proposed by an all-RIKEN team based on ‘cat states’¹. It could cut the computing resources needed to fix errors to the same level as conventional computers, making quantum computers cheaper and more compact.

Quantum computers are looming ever larger on the horizon of computing. They have already demonstrated the ability to outperform traditional computers for certain kinds of calculations. But they are more prone to errors than conventional computers.

Since traditional computers are based on bits that are either 0 or 1, the only error they are susceptible to is when a bit accidentally flips from 0 to 1 or vice versa.

But quantum computers use qubits, which can be in a superposition of two states. When the states are depicted on a sphere, the angle between the two states is known as the qubit’s phase. This phase can also be flipped in quantum computers. They thus need more computing resources to correct for this additional source of error.

An attractive way to sidestep this problem is to use qubits based on so-called cat states. These states are named after Schrödinger’s hypothetical cat, which is simultaneously dead and alive until observed. By analogy, cat states are superpositions of two states with opposite phase.

Unlike other qubits, cat-state qubits cannot undergo phase flips, so that engineers making quantum computers based on them need only worry about bit flips—just like in conventional computers. Researchers are now exploring how to use these cat-state qubits to perform computations.

Now, Ye-Hong Chen and four co-workers, all at the RIKEN Center for Quantum Computing, have theoretically demonstrated a way to use cat states to realize fault-tolerant gates for connecting multiple qubits in a process known as entanglement.

“Conventional computers can only process data one bit at a time, but entanglement allows quantum computers to process a lot of data simultaneously,” explains Chen. “The gates can rapidly generate entangled cat states with high accuracy.”

The team showed that such fault-tolerant quantum gates could be used to implement a quantum search algorithm with a high efficiency. The algorithm will allow databases to be searched faster than is currently possible using conventional computers.

“Let us assume that you are searching for one key that will open a box among 100 keys. On average, you would need to try 50 keys using a conventional search algorithm to identify the one key that opens that box,” says Chen. “But with the



© Rhoeo/iStock/Getty Images

In a thought experiment, Schrödinger conjectured a cat could be both alive and dead until observed if a quantum event such as the decay of a radioactive particle (right) would trigger an event that will kill the cat. Now, by using cat states, RIKEN researchers have proposed a scheme for realizing fault-tolerant gates to entangle multiple qubits.

quantum search algorithm the average is only 10 attempts,” says Chen.

The team is now exploring how to develop other useful quantum algorithms based on fault-tolerant quantum codes.

Reference

1. Chen, Y.-H., Stassi, R., Qin, W., Miranowicz, A. & Nori, F. Fault-tolerant multiqubit geometric entangling gates using photonic cat-state qubits. *Physical Review Applied* 18, 024076 (2022).

RIKEN Research Spring 2023

Nanoscale heat engines

A nanoscale device offers insights into how single electrons interact with vibrations in the presence of a temperature gradient

Category: Applied Physical Sciences **Field:** Quantum heat engines

RIKEN physicists have fabricated a nanoscale ‘heat engine’ that uses a property of electrons known as spin as the effective working medium¹. It is promising for exploring the development of spintronic heat engines capable of harvesting waste heat from devices.

Heat engines convert a heat difference into more useful forms of energy as heat flows from warmer to cooler regions of electronic devices. Reducing them to the nanoscale would enable waste heat generated to be converted back into electrical energy and thus improve efficiency.

One way to create nanoscale heat engines is to use tiny crystals of semiconductors known as quantum dots (Fig. 1). Somewhere in the range of 10 to 100 nanometers in diameter, a quantum dot can trap one or a few electrons.

All heat engines are driven by a difference in temperature—one end of the heat engine needs to be hotter than the other for the heat engine to work. In quantum systems, there are two different temperatures: the temperature of the atoms (or lattice temperature) and that of the electrons.

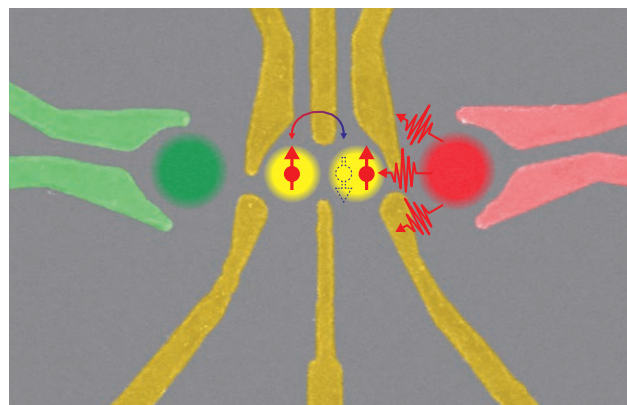
Previous heat engines based on quantum dots have used reservoirs of electrons at different temperatures. However, to gain a better understanding of the underlying thermodynamics it is desirable to create a heat engine that operates on lattice temperature. But generating a lattice temperature gradient across a few hundred nanometers is technically challenging.

Now, Seigo Tarucha at the RIKEN Center for Emergent Materials Science and his colleagues have succeeded in doing this in their quantum-dot heat engine.

In their device, electrons are confined using electric fields generated at surface metal electrodes on a gallium arsenide surface. The device had two interlinked quantum dots and a built-in charge sensor to passively monitor what was going on within the double quantum dot (Fig. 1). A third quantum dot was used to control the double quantum dot’s thermal environment; effectively, it acted as a local heater.

The researchers anticipate the device will greatly contribute to our understanding of the fundamental physics of thermoelectric devices. “The results give valuable insights into developing spintronic heat engines,” says Tarucha. “In particular, this setup will provide an experimental platform for studying the thermodynamics of cooperative spin–charge systems.”

The next challenge will be to introduce on-demand control of heat flow in the spin–charge cooperative system. “We’re now developing a technique to rapidly switch the heat flow,” explains Tarucha. “This will provide a new platform to study the physics and apply for development of spintronic heat engines.”



A double quantum dot device enables the study of how the spin and charge of an electron influences thermodynamic action in the presence of a lattice temperature gradient. Lattice vibrations known as phonons (three red squiggles) come from the red quantum dot on the right, which acts as a local heater. They can cause the spin on of the two electrons (yellow dots) to flip, which is detected by the green quantum dot, which acts as a charge sensor. Reprinted, with permission, from Ref. 1. Copyright 2022 by the American Physical Society.

Reference

1. Kuroyama, K., Matsuo, S., Muramoto, J., Yabunaka, S., Valentin, S. R., Ludwig, A., Wieck, A. D., Tokura, Y. & Tarucha, S. Real-time observation of charge-spin cooperative dynamics driven by a nonequilibrium phonon environment. *Physical Review Letters* 129, 095901 (2022). (doi: 10.1103/PhysRevLett.129.095901)

RIKEN Research Spring 2023

Observing field-theory physics in the bathtub

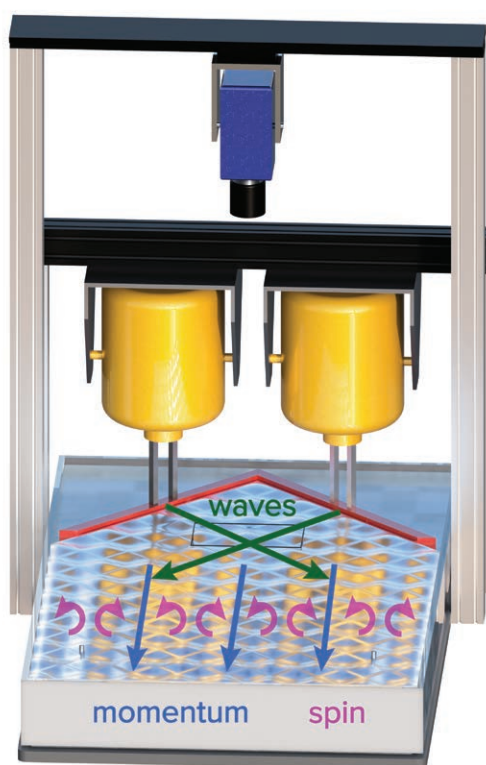
An important concept in quantum physics known as spin can be seen in water waves

Category: Exploratory Physical Sciences **Field:** Wave physics

Water waves can be used to visualize fundamental concepts, such as spin angular momentum, that arise in relativistic field theory, RIKEN physicists have shown¹. This will help to provide new insights into very different wave systems.

First introduced nearly a century ago, the concept of spin angular momentum, or spin, is critically important in quantum physics and underpins the emerging fields of spintronics and quantum computing. In high school physics, the spin of an electron is usually described as the electron spinning on its axis, similar to a spinning top. But a fuller description of spin is more abstract and doesn't yield itself to simple pictures.

Now, Konstantin Bliokh of the RIKEN Theoretical Quantum Physics Laboratory and his co-workers have shown that spin can appear as small circular motions of water particles in water waves (Fig.).



"We were surprised that our collaborators from the Australian National University were able to observe this effect in experiments so readily," says Bliokh. "Similar phenomena in optics and acoustics tend to be too tiny to observe, but with water waves, everything is a few millimeters in size and you can observe it with your eyes. That's the beauty of this experiment."

It was also unexpected because the concept of spin comes from the mathematics that describes relativistic field theory, and does not apply directly to water waves. But the researchers were able to show that there is a mathematical connection between water waves and formal theory for spin angular momentum. As is often the case in physics, diverse phenomena that appear to be totally unrelated can be connected by common mathematics.

"It's nice to gain a unified picture of different wave systems and see the parallels between them," says Bliokh. "This approach illuminates the physics behind different phenomena and could be very fruitful for the future development of different fields." He notes that insights could flow both ways and that we could learn more about fluid dynamics from the connection.

Bliokh also considers that the demonstration could be helpful for teaching quantum field theory. "Quantities like spin density are derived in a very abstract way. It appears in some equations, but you observe totally different things in experiments," says Bliokh. "For the first time, we have directly observed spin density in water waves. So it's really a platform for visualizing properties that are hidden in quantum field theory."

The team is now exploring how field theory can be used to gain new insights into other types of classical waves.

Reference

1. Bliokh, K. Y., Punzmann, H., Xia, H., Nori, F. & Shats, M. Field theory spin and momentum in water waves. *Science Advances* 8, eabm1295 (2022). (doi: 10.1126/sciadv.abm1295)

RIKEN Web Research News Apr.18, 2022

Reprinted with permission of AAAS from Ref. 1.

© K. Y. Bliokh *et al.*, some rights reserved; exclusive licensee AAAS. Distributed under a CC BY-NC 4.0 License [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>]

Researchers at RIKEN have used water waves to generate small circulations of water particles (pink arrows) that generate spin angular momentum of water waves, a classical counterpart of the spin of quantum wave fields.

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Applying the latest computing technologies to quantum gravity

Emerging technologies are promising for helping physicists develop a theory that unites quantum physics and gravity

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

RIKEN physicists have put quantum computing and deep learning through their paces and found that they are powerful tools for gleaning insights into new theories of quantum gravity¹. They could thus help solve one of the most formidable challenges in modern physics—developing a theory of gravity that jives with quantum physics.

When Einstein nipped out his theory of general relativity in 1915, his only tools were pen and paper. The same was true of the pioneers of quantum theory. But the next major breakthrough in theoretical physics could be made with help from emerging technologies such as quantum computers and machine learning, Enrico Rinaldi of RIKEN Theoretical Quantum Physics Laboratory thinks. “I believe these technologies are poised to transform the way we do theoretical physics,” he says.

Both general relativity and quantum physics are incredibly successful at describing different aspects of physical reality. The only snag is that they are incompatible with each other. This keeps theoretical physicists up at night because it means that our understanding of reality is incomplete, and there is a more comprehensive theory waiting to be discovered.

There has been a sustained push to derive a quantum theory of gravity. But while many theories have been proposed, it is notoriously difficult to perform even the simplest calculations based on them.

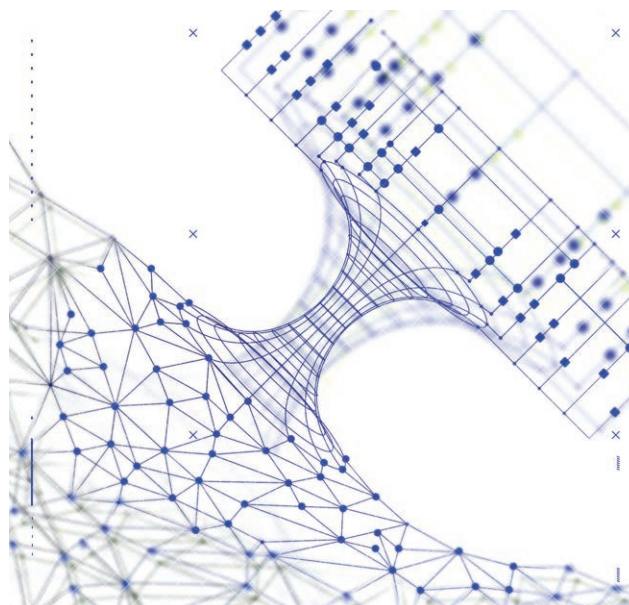
Now, Rinaldi and his co-workers have explored whether quantum computing and deep learning could aid theoretical physicists with these calculations.

They applied the two techniques to problems in holographic duality—theories that relate particles in one system to gravity in a system that has an additional dimension, much like a two-dimensional hologram can create a three-dimensional image. For the purposes of the trial, they picked problems that could be solved by conventional techniques so they could assess the accuracy of the methods.

Both techniques performed well. Of the two, deep learning had the upper hand. “The deep-learning method had the best scaling with resources,” notes Rinaldi.

But quantum computing also showed impressive performance. “The biggest surprise was how well the quantum-computing algorithm performed. We just took what was available—so we didn’t know if it would work,” says Rinaldi. “We were surprised how accurate the answers it gave were.”

The team didn’t use a real quantum computer since the technology is still in its infancy; instead they simulated a



© 2022 Enrico Rinaldi/University of Michigan, RIKEN and A. Silvestri

RIKEN researchers have used quantum computing (represented by lines, squares and circles in the top right of the image) and deep learning (depicted by graph points in the bottom left of the image) to perform calculations using quantum gravity theories.

quantum computer on a conventional computer.

Rinaldi is encouraged by the recent progress being made in developing theories of quantum gravity. “I really think we’re getting closer,” he says. “There has been a lot of progress in the past two years.”

Reference

1. Rinaldi, E., Han, X., Hassan, M., Feng, Y., Nori, F., McGuigan, M. & Hanada, M. Matrix-model simulations using quantum computing, deep learning, and lattice Monte Carlo. *PRX Quantum* 3, 010324 (2022). (doi: 10.1103/PRXQuantum.3.010324)

RIKEN Web Research News Apr.11, 2022

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Protecting quantum matter with light

Quantum light can help create longer lasting quantum states useful for information processing

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

Quantum optics might offer a way to make a class of exotic materials known as topological materials even more robust against defects, theoretical physicists at RIKEN have shown¹. This finding could benefit the development of quantum computers and other emerging quantum technologies.

Topological materials are exciting because local defects and imperfections in them don't affect their properties. But they are not immune to larger-scale, non-local disorder within the material.

Quantum optics is the study of how individual 'particles' of light, or photons, interact with matter. Its theory tells us that this interaction can be altered by controlling the electromagnetic properties of the matter's environment.

Coupling between light and matter has been employed to detect and manipulate topological matter. However, it is an open question how topological matter is modified by quantum light.

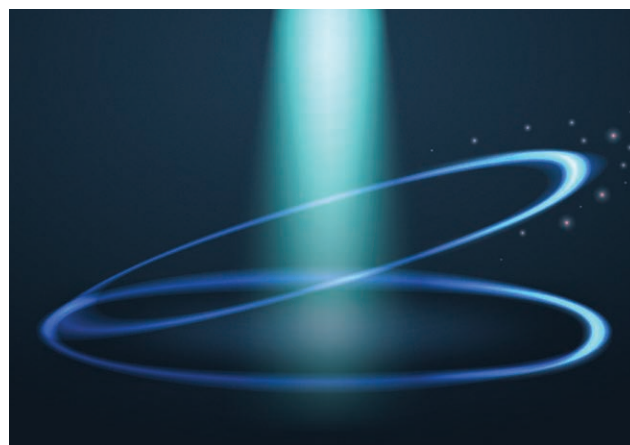
Now, in a theoretical study, Wei Nie and Franco Nori from the RIKEN Theoretical Quantum Physics Laboratory and their colleagues from France and China have discovered that the topology can be protected in vacuum electromagnetic fields.

"Our work pinpoints the novel properties of topological light-matter coupling," says Nori. "This may allow us to manipulate topological matter with quantum light."

By combining ideas from both condensed-matter physics and quantum optics, the researchers found that light emission from the topological electronic states changes with the strength of the light-matter coupling in a counterintuitive way. Light can be emitted in a weak-coupling regime, whereas strong light-matter coupling inhibits emission. It also increases the quantum coherence—the length of time the light can maintain its quantum state.

This is counterintuitive because stronger coupling to the environment usually reduces coherence: the symmetries protecting topological matter are supposed to be broken by the electromagnetic environment. "Instead, our work shows that for a topological emitter array coupling to a one-dimensional electromagnetic environment, the chiral symmetry that protects the system can be preserved," explains Nori.

This suggests an approach to tune quantum coherence without fiddling with the coupling between the system and the environment. Topological matter's robustness to local disorder makes it of great interest for quantum computation. However, non-local disorder remains a problem and limits the quantum coherence that is vital for all quantum technologies. The improved coherence offered by taking advantage of



Background vector created by macrovector - www.freepik.com [<https://www.freepik.com/vectors/background/>].

Chiral-symmetry protected topological states can be preserved through strong coupling to its electromagnetic environment.

strong coupling can therefore be employed for better quantum information storage.

"Our work shows that topological light-matter coupling is an important resource for quantum optics and condensed-matter physics," says Nie. "The topological features of matter give rise to novel quantum optical phenomena, which are useful for quantum computation and quantum technologies."

Reference

1. Nie, W., Antezza, M., Liu, Y.-X. & Nori, F. Dissipative topological phase transition with strong system-environment coupling. *Physical Review Letters* 127, 250402 (2021). (doi: 10.1103/PhysRevLett.127.250402)

RIKEN Research Fall 2022 (p23)

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Quantum reboot gets a speed boost

Simulations suggest a new technique for resetting ‘qubits’ in a quantum computer without harming them

Category: Applied Physical Sciences **Field:** Quantum heat engines

Rebooting a quantum computer is a tricky process that can damage its parts, but now two RIKEN physicists have proposed a fast and controllable way to hit reset¹.

Conventional computers process information stored as bits that take a value of zero or one. The potential power of quantum computers lies in their ability to process ‘qubits’ that can take a value of zero or one—or be some fuzzy mix of both simultaneously.

“However, to reuse the same circuit for multiple operations, you have to force the qubits back to zero fast,” says Jaw Shen Tsai, a quantum physicist at the RIKEN Center for Quantum Computing. But that is easier said than done.

One of the best current ways to hit reset for qubits built from tiny superconductors is to link the qubit to a photon—a particle of light—in a tiny device called a resonator. The qubit transfers its energy to the resonator, after which the photon in the resonator decays, releasing its energy to the environment. This process causes the qubit state to drop back to the ground state (zero). The trouble with this method is that permanent entanglement to a decaying photon rapidly degrades the qubit’s quality, so that it rapidly ceases to be useful for future operations. “It’s bad for the qubit, whose lifetime becomes short,” says Tsai.

Now, Tsai and his RIKEN colleague Teruaki Yoshioka have devised a simulation to help find a better way of resetting the qubit, without harming it.

Based on their calculations, the pair proposed building a resonator that can be controlled using an additional junction made by sandwiching a superconducting material with an insulator, a normal metal, another insulator and another superconductor. This layered junction is controlled by applying a voltage. While the qubit operation is being carried out, the set-up is tuned so that the photon cannot decay. Only when

the operation has been completed do the physicists change the voltage, allowing the photon to release energy. “This adjustable resonator is the key to our proposal,” says Tsai.

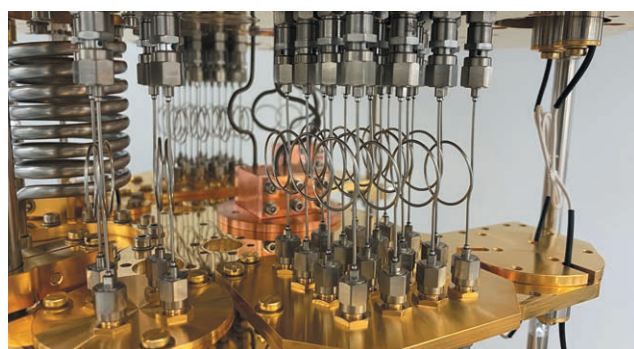
The best current lab record for resetting a qubit is 280 nanoseconds, with 99.0% fidelity. “Our simulations suggest we could reset the qubit in 80 nanoseconds, with 99.0% fidelity,” says Yoshioka.

The team is now testing this set-up, which is held at low temperatures using a dilution refrigerator (Fig.), with promising results. “This device should be very useful if we can implement it in a quantum circuit,” Tsai says.

Reference

1. Yoshioka, T. & Tsai, J. S. Fast unconditional initialization for superconducting qubit and resonator using quantum-circuit refrigerator. *Applied Physics Letters* 119, 124003 (2021). (doi: 10.1063/5.0057894)

RIKEN Research Summer 2022 (p8)



© 2022 RIKEN Center for Quantum Computing

A photograph of a dilution refrigerator that houses qubits.

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Looking for rules within quantum complexity

Tomotaka Kuwahara

Team Leader, Analytical Quantum Complexity RIKEN
Hakubi Research Team, RIKEN Center for Quantum Computing

Please briefly describe your current research.

My team aims to solve the most important unsolved problems in the field of quantum information.

To do this, I look at Hamiltonian complexity. The Hamilton of a system is the sum of its kinetic energy (energy of motion) and its potential energy (energy of position). Hamiltonian complexity is the study of the universal structural constraints of a system of many interacting quantum particles—quantum many-body systems—due to these energies.

Currently, my aim is to characterize via an information-theoretic lens the intrinsic complexity of quantum many-body systems and apply these understandings to the quantification, storage and communication of digital information.

What excites you the most about your current research?

Well, statements on Hamiltonian complexity are universal and can be written in mathematically precise ways. These laws may resolve great mysteries about how the world works.

Physicists are also very keen to figure out how to solve quantum many-body problems using quantum/classical hybrid computers. However, understanding the computational complexity of a quantum many-body system is equivalent to completely clarifying the information-theoretic structure of the quantum many-body system.

How did you become interested in your current field of research?

I was initially puzzled about why our

living world is so complicated despite having such simple fundamental laws. This, I discovered, may boil down to the essential difference between one-body and many-body problems. However, realistic quantum many-body systems are thought to be ‘not too complicated’. That is, realistic many-body systems are much simpler than typical theoretical ones. So I became interested in why our world has a moderate level of complexity in terms of physics.

What do you think has been the most interesting discovery in the last few years?

Recently, the ‘no low energy trivial state conjecture’, a previously unproven idea posed in 2014, has been solved.

It had been a fundamental unresolved obstacle to applying a theorem, called the PCP theorem, to the quantum realm. The PCP theorem is a cornerstone of conventional computing, helping us to understand algorithmic complexity and the conditions of near-optimal solutions for optimization. This finding inspired me to work towards solving famous unsolved conjectures.

What other goals do you have at RIKEN and in your life?

I aim to lead a team that will increase the presence of Japanese researchers at the world’s most prestigious international conferences on quantum physics, such as the Quantum Information Processing conference and the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography conference. Since I am a Christian, my ultimate goal is to follow in the footsteps of great Christian physicist predecessors like Isaac Newton, Michael Faraday, and Blaise Pascal. This always encourages me: “For I can do everything through Christ, who gives me strength” (Philippians 4:13).



These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.

Modeling quantum environments

Neill Lambert

Senior Research Scientist, Theoretical Quantum Physics Laboratory, RIKEN Cluster for Pioneering Research

How and when did you join RIKEN?

I joined RIKEN in 2008 after spending several years at the University of Tokyo as a Japan Society for the Promotion of Science fellow. Initially I came to give a seminar in RIKEN, and then applied for a postdoc position after enjoying the interactions I had with Dr. Franco Nori's group (the Theoretical Quantum Physics Laboratory within the RIKEN Cluster for Pioneering Research).

Please describe your role.

I study open quantum systems, or how a large environment affects the behavior of small quantum systems, particularly in situations where parts of the environment itself must be modelled quantum mechanically. This research could be important to understanding how to control noise within quantum computers or how thermodynamics behave in quantum regimes. Day to day, I mainly work on developing new methodologies for this field, conduct numerical simulations, and assist with developing and administering a popular open-source software package for simulating the dynamics of open quantum systems created by our group – QuTiP (the Quantum Toolbox in Python).

What do you think has been the most interesting recent discovery in your field?

The development of small-scale quantum computers by the likes of IBM and Google has truly changed the field I work in. As a theorist, it is exciting that I can access real devices, through a cloud computing service, and conduct my own experiments.

How did you become interested in your current research field?

As an undergraduate student, I did an exciting quantum physics course taught by Professor Tobias Brandes at UMIST (now The University of Manchester) in the UK. He would eventually become my Ph.D. supervisor.

What are some of the technologies that you use?

Recently, because of several numerically demanding projects, I have been using the excellent computing resources available in RIKEN, in particular the Hokusai BigWaterFall supercomputer.

What excites you the most about your current research?

The question of whether quantum effects can be observed with large objects is fascinating. Some of my recent work helps us to unravel part of this issue, like how large collections of small quantum systems might start to appear classical, which also helps make practical simulation methods and tools more efficient.

What has been your most memorable experience at RIKEN?

I have very much enjoyed the opportunity to supervise and train international students. One student recently contacted me and told me he had found a tenured university position in his home country, which made me very happy.

These articles are edited versions of RIKEN Research Highlights.





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>