

先端国際共同研究推進事業  
2023 年度採択

Top チームのための ASPIRE  
量子分野

2023 年度～2024 年度  
年次報告書（公開版）

|          |                                                                                                                   |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 研究課題名    | 先端量子技術プラットフォームと国際頭脳循環による<br>量子ネイティブ人材育成拠点                                                                         |
| 日本側研究代表者 | 浅井 祥仁 高エネルギー加速器研究機構 機構長<br>東京大学 素粒子物理国際研究センター 客員教授                                                                |
| 相手側研究代表者 | David Awschalom, Liew Family Professor, Pritzker<br>School of Molecular Engineering, The University of<br>Chicago |
| 研究期間     | 2024 年 2 月 1 日～2029 年 3 月 31 日                                                                                    |

## 1. 研究成果の概要

### ① 研究構想にかかる成果

#### <実施したこと>

- 細胞外小胞を介した細胞間の同型ターゲティング特性の検証と増強手法の開発
- 極低温環境でマイクロ波を発生するスピントルク発振器の作成・測定
- 磁場耐性のある超伝導量子ビットの開発・暗黒物質探索への応用に関する理論研究
- ランダム量子回路におけるランダムネス生成の効率及び限界に解する研究
- 量子回路シミュレーション手法の開発
- 量子回路最適化手法の研究
- テンソルネットワークを活用した量子誤り訂正の高度化
- フォトンとフォノンを用いた量子メディア変換を可能とするオプトメカニカル共振器系の設計

#### <得られた成果>

細胞外小胞を介した細胞間の同型ターゲティング特性の検証と増強手法の開発:

蛍光標識した細胞外小胞を使って同型ターゲティング特性を定量的に測定し、その細胞種間の特性を見出した。また、細胞外小胞に現れるシアル酸を改質・修飾することで同型ターゲティング特性を飛躍的に高めるアプローチを開発し、特定のがん種の細胞との相互作用を 25 倍以上に増幅することに成功した [bioRxiv:2024.05.01.592036] (代表的な業績【原著論文】(1))。

極低温環境でマイクロ波を発生するスピントルク発振器の作成・測定:

磁性体-金属二層膜の積層順とデバイス構造を適切に選ぶことにより、高い性能を持つデバイス設計の指針を得た。また、スパッタリングで成膜した NbTi を使った LC 共振器の設計では、シミュレーション結果と実験との比較から今後の開発にとって重要な知見を得た。共振器効果の実証に向けたマグノンの量子物性に関する研究において、マグノン状態の確率的制御を可能にする技術[Physical Review Applied 22, L031002 (2024)]を見出した。

磁場耐性のある超伝導量子ビットの開発・暗黒物質探索への応用に関する理論研究:

超伝導量子ビットの開発では、所望の臨界電流を持つジョセフソン接合の製作技術と 3 テスラまでの磁場環境下での超伝導量子ビットの測定技術を確立した。これらの技術は次のステップに向けて有用な知見となる。暗黒物質探索への応用では、理論的に有望なパラメータ空間の暗黒物質探索が可能であることを見出した [Physical Review Letters 133, 021801 (2024)] (代表的な業績【原著論文】(2)) , Physical Review D 110, 115021(2024)]。

ランダム量子回路におけるランダムネス生成の効率及び限界に解する研究:

ユニタリ演算全体に関する一様な測度 (Haar 測度) に属するクラスのランダムネスに対して、従来は局所的な Haar ユニタリを用いることが最善であると考えられてきたが、全て同一のエンタングル操作を使い 1 量子ビットゲートのみをランダム化することで加速が得られることを示した [arXiv:2410.24127, QIP2025 での口頭発表] (代表的な業績【原著論文】(3))。

量子回路シミュレーション手法の開発:

テンソルネットワークの厳密な縮約には、一般に指数関数的な計算コストが伴う。そのため、通常は特異値分解に基づく低ランク近似などの手法が導入される。我々は、モンテカルロサンプリングに基づく新しいテンソル縮約手法を提案した。この手法では、テンソルの繰り込みに用いるプロジェクトを、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて確率的にサンプルする。この方法により、テンソルネットワーク法の高い精度を維持しつつ、有限次元による系統的誤差を完全に取り除くことが可能である。また、量子実時間発展のような、標準的なマルコフ連鎖モンテカルロ法で深刻な符号問題が生じる系に対しても、提案手法が有効であることを示した [arXiv:2412.02974]。

量子回路最適化手法の研究:

量子シミュレーションや量子機械学習アルゴリズムを量子回路上で効率的に実装するためには、効率的な量子回路への変換や量子ゲート配置の最適化が必要となる。我々は、さまざまな量子ビットの結合ネットワーク上における、多重制パウリゲートの効率的な分解を見出した[Physical Review A 110, 012604 (2024)]。さらに、多制御パウリゲートの分解を構築するための系統的な手順を提案し、総 T ゲート数を維持しながら、CNOT カウントまたは T-depth がより小さい多制御パウリゲートの分解を示した。

テンソルネットワークを活用した量子誤り訂正の高度化:

表面符号の復号中に得られるシンドローム測定の結果に基づいてノイズモデルを推定することで、追加の量子計算なしに量子誤り訂正の性能の向上することができる。我々は、表面符号のテンソルネットワークミュー

ータとモンテカルロの手法を組み合わせたパウリノイズを超えるノイズモデルのパラメータが推定可能な手法を開発した。時間変化する振幅減衰ノイズモデル等、様々なノイズモデルの推定に成功し、また推定結果を使用することで復号アルゴリズムの性能向上も確認された[arXiv:2406.08981]（代表的な業績【原著論文】(4)）。

フォトンとフォノンを用いた量子メディア変換を可能とするオプトメカニカル共振器系の設計：  
フォノン Q 値と極小モード体積を優先したオプトメカニカル共振器系の設計において、多くの構造パラメータが作る広大なパラメータ空間を高速で自動探索可能な遺伝的アルゴリズムを用いた自動設計プログラムを開発した。遺伝的アルゴリズムを用いた自動設計をフォノン系に適用した例はなく、本研究が世界初である[ACS Nano **18**, 18307 (2024)]（代表的な業績【原著論文】(5)）。また AlN とダイヤモンドフォノンニック結晶が接続した共振器を自動設計することで、単純構造の  $10^4$  倍の高効率フォノン結合を実現した[Phys. Rev. Applied **21**, 064064 (2024)]。

② 国際ネットワーク構築・拡大に関する成果

＜実施したこと＞  
量子コンピュータの応用に向け、欧州原子核研究機構（CERN）との量子アルゴリズムの共同研究を開始した。特に、CERN が注力する量子計算の素粒子物理への応用について共同研究を進めている。

東京大学・シカゴ大学・ソウル国立大学（韓国）での量子技術に関する国際ワークショップの開催や、東京大学・シカゴ大学・IBM の量子研究での連携強化、イリノイ州シカゴにある量子ハブとの研究連携・人材交流など、国際ネットワークの拡張に向けた取り組みを行った。

- ＜得られた成果＞
- 東京大学・シカゴ大学・IBM/Google に CERN を加えたネットワークで国際共同研究を推進する基礎体制を確立した。
  - 国際ワークショップの開催や、他大学・政府系機関・民間企業との関係構築によって、国際ネットワークを広げていくための基盤を形成した。

③ 国際頭脳循環の促進に資する若手研究者の人材育成に関する成果

＜実施したこと＞  
シカゴ大学へ若手研究者が渡航し、量子センサーと量子ハードウェア、量子ソフトウェア分野に関する共同研究を推進した。量子コネクト分野では研究課題の議論を進め、共同研究を開始するための組織の構築を行った。

- ＜得られた成果＞
- 研究構想に関連する渡航を含め、今年度は全体でのべ 245 人・日（うち若手研究者が 203 人・日）の渡航を行った。

2. 研究実施体制

| 研究テーマ    | 中心となる研究者氏名                       | 所属機関・部署・役職名                                                       |
|----------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 量子センサー   | 合田圭介<br>P. Maurer<br>A. Squires  | 東京大学・大学院理学系研究科・教授<br>シカゴ大学プリツカー分子工学研究所・助教<br>シカゴ大学プリツカー分子工学研究所・助教 |
| 量子ハードウェア | 齊藤英治<br>S. Guha<br>D. Awschalom  | 東京大学・大学院工学系研究科・教授<br>シカゴ大学プリツカー分子工学研究所・教授<br>シカゴ大学プリツカー分子工学研究所・教授 |
| 量子ハードウェア | 寺師弘二<br>D. Awschalom             | 東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授<br>シカゴ大学プリツカー分子工学研究所・教授                     |
| 量子ソフトウェア | 藤堂眞治<br>L. Jiang<br>B. Fefferman | 東京大学・大学院理学系研究科・教授<br>シカゴ大学プリツカー分子工学研究所・教授<br>シカゴ大学プリツカー分子工学研究所・助教 |

|       |                    |                                         |
|-------|--------------------|-----------------------------------------|
| 量子コネク | 野村政宏<br>A. Cleland | 東京大学・生産技術研究所・教授<br>シカゴ大学ブルツカー分子工学研究所・教授 |
|-------|--------------------|-----------------------------------------|

### 3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

下線は参加研究者、太字は若手または学生

#### 【原著論文】

- (1). H. Wang, **T. Ding**, **Y. Liu**, Y. Zhou, **Y. Zhao**, M. Hayashi, X. Hu, Z. Yang, N. **T. Ishii**, H. Matsumura, A. Umirbaeva, H. Guo, J. Su, Y. Yan, F. Gao, J. Li, N. Nitta, M. Nishikawa, Y. Yatomi, Y. Ding, M. Sonoshita, D. Di Carlo, S. Suetsugu, **K. Goda**, "Super homotypic targeting by exosome surface engineering," bioRxiv: 2024.05.01.592036
- (2). **Shion Chen**, Hajime Fukuda, **Toshiaki Inada**, Takeo Moroi, **Tatsumi Nitta**, and Thanaporn Sichanugrist, "Quantum Enhancement in Dark Matter Detection with Quantum Computation", Phys. Rev. Lett. 133, 021801 (2024).
- (3). Ryotaro Suzuki, Hosho Katsura, Yosuke Mitsuhashi, Tomohiro Soejima, Jens Eisert, and **Nobuyuki Yoshioka**, "More global randomness from less local random gates," arXiv:2410.24127
- (4). **Takumi Kobori** and Synge Todo, "Bayesian Inference of General Noise Model Parameters from Surface Code's Syndrome Statistics," arXiv:2406.08981.
- (5). **M. Diego**, M. Pirro, **B. Kim**, R. Anufriev and **M. Nomura**, "Tailoring Phonon Dispersion of Genetically Designed Nanophononic Metasurface," ACS Nano 18, 18307 (2024).

#### 【新聞報道】

- MIT テクノロジーレビュー「「量子優位性」の実用性を明らかにし、「現代の魔法」の社会実装に挑む挑戦者。」 2024/11/1 **吉岡信行**
- 日経新聞、「東大、量子計算資源を高速に定量評価する手法を提案」 2024/9/5 **吉岡信行**
- 日経新聞、「阪大・NTT・中央大・東大、量子コンピュータにおけるシミュレーション性能を劇的に向上させるアプローチを開発」 2024/8/23 **吉岡信行**

#### 【受賞】

- **M. Diego**, "Tailoring phonon dispersion in inversely designed phononic crystal," 第8回フォノンエンジニアリング研究会 講演奨励賞 (2024).
- 第57回応用物理学会 講演奨励賞 2025/3/14 **Michele Diego**
- Innovators Under 35 Japan 2024, MIT テクノロジーレビュー 2024/11/1 **吉岡信行**