



ムーンショット目標 6

2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

終了報告書

大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・

誤り耐性量子コンピュータ

大森 賢治

自然科学研究機構 分子科学研究所



1. 研究開発プロジェクトの実施期間

令和4年11月1日～令和7年11月30日

2. 研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本プロジェクトでは、光ピンセットを用いて大規模に配列させた冷却原子量子ビットの各々を、自在かつ高速に移動させつつゲート操作、誤り検出・訂正を行う「動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ」を開発する。さらに、緊密な産学連携の下で全ての構成要素を統合・パッケージ化し、従来に無い高い安定性とユーザビリティを達成する。これらのイノベーションにより、2050 年までに経済、産業、安全保障に革新をもたらす誤り耐性量子コンピュータの実現を目指す。冷却原子を光ピンセットで 2 次元的に配列させ、レーザー光で状態準備・ゲート操作・検出を行う冷却原子型量子コンピュータは近年著しい成果を上げつつ急速に発展が進むハードウェアである。特に、現時点で開発が先行している超伝導型やイオントラップ型と比べて容易に大規模化が可能な点、および高コヒーレンスな点において際立った特徴を有している。

上記の「動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ」の性能を向上させることで、実社会で幅広く使うことが可能な量子アルゴリズムの理論的発展を促進させる。並行して、すべての機能が統合されパッケージ化された量子コンピュータを製造・販売し、社会一般に革新的な計算能力をサービスとして提供することで社会の実問題の解決につなげるために、アカデミア発の開発技術の全てを積極的に産業界へと移行させる。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

研究開発項目1:大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ

プロジェクト全体を通して、当初計画を大きく上回る研究進展が得られた。以下、研究開発課題ごとに概要を説明する。

研究開発課題1:「スケーラブルな量子コンピュータプラットフォームの開発」については、分子科学研究所(以下、分子研)において Rb 原子を用いた量子コンピュータ基盤技術開発をフルスタック量子コンピュータシステムへと拡張し、2 次元 300 個原子配列および自律的操作系制御システムを開発した(トラップレーザー高出力化で最大 500 量子ビット系に拡張可)。本システムは日本初かつ世界でも数少ない中性原子(冷却原子)フルスタックシステムとして、国内外から高い注目を集めている。加えて、京都大学(以下、京大)の Yb 原子系、理化学研究所(以下、理研)の Sr 原子系においても、それぞれ特性を活かした高度な技術開発が進展した。

研究開発課題2:「高コヒーレンス・高忠実度量子ゲートの開発」については、状態準備・検出忠実度 99%以上および長コヒーレンス時間を達成し、高忠実度量子ゲート実現に向けた基盤技術が確立された。

研究開発課題3:「冷却原子系に特化した量子誤り検出・訂正アーキテクチャの開発」では、非破壊測定の実証実験に成功し、誤り訂正に不可欠な古典制御系・読み出し系の整備も進展した。これにより、将来の誤り耐性型汎用量子コンピュータ実現に向けた道筋が具体化した。

研究開発課題4:「高安定・高強度小型集積レーザーシステム」においては、課題1～3の研究開発全体を支える高安定・高強度小型レーザー光源の開発が着実に進行した。パルス励起レーザーの出力変動低減や連続波レーザーの位相ノイズ抑制に成功し、2量子ビットゲートのためのリードベリ励起の高忠実度化に大きく寄与している。

本プロジェクトは各課題が有機的に連携しながら、当初のシナリオを大きく超える成果を挙げている。設定した全マイルストーンはほぼ達成されており、これらの成果に基づき、国内特許 9 件、海外特許 3 件を出願した。さらに、本プロジェクト発のスタートアップ企業(株)Yaqumo を分子研と京大が共同で創業し、将来の産業化に向けた体制を整えた。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

各項目の詳細は「5.プロジェクトマネジメントの実施内容」を参照

- 1 研究資金の効果的・効率的な活用(官民の役割分担及びステージゲートを含む)
予算計画を見直し、資金の効果的かつ効率的な活用を図った。具体的には、QPU のハードウェアおよび稼働用ソフトウェアの外注化、ならびにレーザー関連の研究開発に必要な設備を、優先度を踏まえて 2025 年度前半に導入した。また、QPU の維持・整備に必要な消耗品についても、運用状況に応じて適切なタイミングで 2025 年度に購入した。
- 2 国際連携による効果的かつ効率的な推進
冷却原子型量子コンピュータで実績のある米国の ColdQuanta, Inc.d.b.a.Infleqion (以下 Infleqion) 社を PI として研究開発に参画させたことで、QPU ハードウェア製造が大幅に加速し、分子科学研究所にフルスタック量子コンピュータを設置することができた。さらに、QPU と外部モジュールとのインターフェース情報を有する同社から、QPU の管制(ソフトウェア)に関連する知見や情報提供を受けて、効率的かつ短期間で制御装置を開発した。
- 3 広報・アウトリーチ活動(国民との科学・技術対話に関する取り組み)
本プロジェクトでは、プレスリリースの発出や取材依頼への対応を積極的に行い、新聞、テレビ、雑誌など 100 件を超える報道実績を得た(日本経済新聞・朝刊1面トップ記事2件、米国サイエンス誌・中性原子量子コンピュータ特集記事、NHK ニュースおはよう日本・全国版などを含む)。また、アウトリーチ活動として、一般向けの講演、対談、出張授業等も行い、小・中学生を含む幅広い世代の市民に対して、科学技術の理解促進と啓発に努めた。さらに、2025 年 8 月には、大阪・関西万博の WASSE 会場において、大森 PM による講演に続き、映画『攻殻機動隊』の押井守監督と大森 PM による対談を実施し、将来の超高速量子コンピュータについて広く発信した。
- 4 データマネジメントに関する取り組み(研究データの保存、共有、公開の状況)
研究データについては、各機関において適切に保存・管理・運用を行っている。なお、当該研究データは現時点では公開せず、非公開として取り扱っている。
- 5 その他(ELSI/数理科学等の取り組み含む)
ELSI/数理科学等への取り組みは各機関の計画により実施した。

3. 研究開発プロジェクトの顕著な成果

(1) 目標達成に最も寄与する成果

- Rb 原子系において、ユーザー入力した量子回路から原子制御までを接続する日本初、世界でも数少ない中性原子型フルスタック量子コンピュータシステムを構築(初期化・入力・計算・出力に必要な全ての光学モジュールを 1m×1.6m のブレッドボードに集積化した従来比 1/8 サイズのコンパクト QPU)
- 動的原子アレー型量子コンピュータ向け量子 OS の開発と上記 Rb フルスタック量子コンピュータシステムへの実装
- Rb 原子系において、光ピンセット配列平面の両面蛍光取得を可能とする 2 対物レンズ型イメージング光学系の構築と、625 サイト単一原子配列に対する両面蛍光イメージングの実現(原子有無判定忠実度 99.989%およびイメージング中原子ロス 0.09%)状態準備および検出忠実度 99%以上達成
- Rb 原子系において、多数の原子量子ビットを一括して冷却・最適化する全自動初期化システムの完成
- Rb 原子系において、光ピンセットアレーにおける世界最短レベル原子間距離(〜1ミクロン)の実現 → 独自の超高速2量子ビットゲートに必要なリソース
- ゲート時間比 10 万倍以上のコヒーレンス時間:Rb 原子系 10 万倍以上(ダイナミカルデカッ

プリング)達成。Yb 原子系、ゲート時間比 100 万倍以上のコヒーレンス時間達成

- Rb 原子系において、連続波レーザーからサブナノ秒レーザーパルスを切り出し、Rb 第一励起状態への高速・状態選択的励起を実現する超高速 2 量子ビットゲート関連技術を開発
- Rb 原子系において、運動状態スクイーミングによる原子空間波動関数圧搾および位置不確定性低減を実現
- Rb 原子フルスタック量子コンピュータシステムおよび Yb 原子系における 2 原子エンタングルメント生成
- Rb 原子系において、測定後原子残存型非破壊測定の実現および検出忠実度 94%を達成
- Yb 原子系における準安定 3P_2 状態を用いたスピン選択的コヒーレント励起の実現および忠実度 $F=80\%$ の達成
- Yb 原子系における非破壊測定への応用可能な 60 秒以上の寿命を有する準安定状態への超狭線幅 431 nm 内殻遷移の発見

(2) 代表的な論文

1. 論文タイトル: Observation of an Inner-Shell Orbital Clock Transition in Neutral Ytterbium Atoms

著者名: T. Ishiyama, K. Ono, T. Takano, A. Sunaga, and Y. Takahashi

掲載誌名: Physical Review Letters

発行年月: 2023/4/14

課題推進者: 高橋義朗

概要:

イッテルビウム原子の内殻電子が励起される時計遷移(波長 431 nm)に注目し、世界初となる直接観測に成功した。さらに、将来の光格子時計構築の鍵となる魔法波長の探索や励起状態の寿命測定も行った。この遷移は、内殻軌道の電子が励起するという特長により、超軽量暗黒物質などいくつかの新物理現象に高い感度を持つことが理論的に予測されており、光格子時計として活用することで超高感度な新物理探索実験が可能になると期待される。

2. 論文タイトル: Picosecond-Scale Ultrafast Many-Body Dynamics in an Ultracold Rydberg-Excited Atomic Mott Insulator

著者名: V. Bharti, S. Sugawa, M. Mizoguchi, M. Kunimi, Y. Zhang, S. de Léséleuc, T. Tomita, T. Franz, M. Weidemüller, and K. Ohmori

掲載誌名: Physical Review Letters

発行年月: 2023/9/22

課題推進者: 大森賢治

概要:

超高速レーザー技術と冷却原子アレーを組み合わせた独自の量子制御技術を活用することによって、リュードベリ状態にある極低温ルビジウム原子間の「量子もつれ」が数百ピコ秒スケールで成長していく様子を実験的に追跡することに成功した。

3. 論文タイトル: Strong Spin-Motion Coupling in the Ultrafast Dynamics of Rydberg Atoms

著者名: V. Bharti, S. Sugawa, M. Kunimi, V. S. Chauhan, T. P. Mahesh, M. Mizoguchi, T. Matsubara, T. Tomita, S. de Léséleuc, and K. Ohmori

掲載誌名: Physical Review Letters

発行年月: 2024/8/30

課題推進者: 大森賢治

概要:

超高速レーザー技術と冷却原子アレーを組み合わせた独自の量子制御技術を活用することによって、リュードベリ状態にある極低温ルビジウム原子間の電子状態どうしの「量子もつれ」に加えて、電子状態と運動状態の間の「量子もつれ」が形成されることを実証した。今回実験的に明らかになった「電子状態」と「運動状態」の間の量子もつれは冷却原子型・超高速量子コンピュータの 2 量子ビットゲートの忠実度を低下させる主要な要因の一つである。

4. 論文タイトル: Ultra-precise holographic optical tweezers array

著者名: Y. T. Chew, M. Poitrinal, T. Tomita, S. Kitade, J. Mauricio, K. Ohmori, S. de Léséleuc

掲載誌名: Physical Review A (APS)

発行年月: 2024/11/20

課題推進者: 大森賢治 / Sylvain de Léséleuc

概要:

空間光変調器を用いて生成されるホログラフィック光ピンセット配列における均一性向上を目的とし、精密な計測に基づく新たなホログラム最適化手法を確立し、強度の相対標準偏差 0.3%、形状ばらつき 0.5% 以下、位置誤差 70nm 以内という極めて高精度な均一性を実現した。本成果は、原子配列を用いた量子計算における高忠実度ゲート操作に求められる超高精度光ピンセット配列の実現を可能にする。

5. 論文タイトル: Development of a high-power ultraviolet laser system and observation of fast coherent Rydberg excitation of ytterbium

著者名: Y. Nakamura, N. Ozawa, T. Kusano, R. Yokoyama, K. Shibata, T. Takano, Y. Takasu, Y. Takahashi

掲載誌名: Journal of the Physical Society of Japan

発行年月: 2024/12/20

課題推進者: 高橋義朗

概要:

イッテルビウム原子 3P_2 状態からのリュードベリ励起のため、波長 325 nm で動作する高出力紫外レーザーシステムを開発した。二段階の周波数倍化方式を用いることで、800 mW を超える出力を達成した。フィルタリングキャビティの導入により、リュードベリ励起の高忠実度化に重要な MHz 帯域の周波数雑音を効果的に抑制した。このシステムを用いて、 $(6s71s)^3S_1$ リュードベリ状態のコヒーレント励起を実証し、ラビ周波数 2.13(3) MHz を得た。 1S_0 - 3P_2 遷移におけるこれまでの精密制御と組み合わせることで、中性原子アレーを用いた量子シミュレーションおよび量子計算の発展に寄与する。

6. 論文タイトル: Generation of 480 nm picosecond pulses for ultrafast excitation of Rydberg atoms

著者名: T. P. Mahesh, T. Matsubara, Y. T. Chew, T. Tomita, S. de Léséleuc, and K. Ohmori

掲載誌名: Optics Letters

発行年月: 2025/1/15

課題推進者: Sylvain de Léséleuc / 大森賢治

概要:

パルス幅 10 ピコ秒の 480 nm 光を生成する専用のパルスレーザーシステムを設計することで、ルビジウム原子の超高速リュードベリ励起を行う。特に、注入シーディングされた光パ

ラメトリック増幅器(OPA)を用いることで従来の設計を改良し、パルスエネルギーの安定性を向上させ、エネルギー揺らぎを 30%から 6%へと低減し、励起確率約 90%での超高速リユードベリ励起に成功した。この際の制限要因はもはやエネルギー揺らぎではなく、原子状態の準備に起因しており、今後の研究で改善可能である。本成果は、リユードベリ原子の応用範囲をさらに拡大するものである。

7. 論文タイトル: Generation of Motional Squeezed States for Neutral Atoms in Optical Tweezers

著者名: V. Lienhard, R. Martin, Y. T. Chew, T. Tomita, K. Ohmori and S. de Léséleuc

掲載誌名: Physical Review Letters

発行年月: 2025/12/17

課題推進者: Sylvain de Léséleuc

概要:

光ピンセットは、単一の中性原子を含む微小物体を高精度に位置決めするための強力な手法である。捕捉された原子は、光ピンセット中で運動の基底状態まで冷却することが可能である。本研究では、原子の空間波動関数をより高度に制御するため、原子運動をスクイーミングする簡便な方法と、運動量分布の広がりを用いたスクイーミング量の測定手法を提案した。さらに、光ピンセットの技術的な不完全性や、トラップの非調和性によって生じる基本的制約について検討し、最終的に 5.4 dB の運動スクイーミングを実証した。本手法により、位置に関する通常の量子不確定性の制限を超え、ナノメートル精度での原子配置を必要とする極限的な原子操作の高精度化が可能となる。

8. 論文タイトル: Orders-of-magnitude improvement in precision spectroscopy of an inner-shell orbital clock transition in neutral ytterbium

著者名: T. Ishiyama, K. Ono, H. Kawase, T. Takano, R. Asano, A. Sunaga, Y. Yamamoto, M. Tanaka, Y. Takahashi

掲載誌名: Nature Photonics

発行年月: 2026/3/20

課題推進者: 高橋義朗

概要:

中性イッテルビウム原子における内殻軌道クロック遷移は、新たな光周波数標準としてだけでなく、超軽量ダークマター、局所ローレンツ不変性の破れ、電子と中性子の間に働く新たなユカワ型ポテンシャルといった、複数の新物理現象を高感度で探るプローブとして大きな注目を集めている。本研究では、原子を三次元マジック波長光格子中に捕捉することで、この遷移に関する従来研究と比較してほぼ 2 桁におよぶ分光精度の向上を実現した。特に、コヒーレントなラビ振動、励起状態の緩和ダイナミクス、および軌道間フェッシュバッハ共鳴の観測に成功した。さらに本分光の高精度性を示すために、5 つの安定なボソン同位体間における同位体シフトを、不確かさ 10 Hz 未満で精密に測定し、電子と中性子の間に働く力を媒介する仮想的なボソンに対して有意な制限を与えることに成功した。これらの成果は、このクロック遷移を用いた新物理探索実験の展開、および量子科学の幅広い応用への道を切り拓くものである。

(3) 代表的な特許(公開済国際特許出願)

1. 発明の名称: レーザー制御装置、光ピンセット生成システム、レーザー制御方法、光ピンセット生成方法及びプログラム

出願番号: PCT/JP2024/031511

出願日:2024/9/2

出願人:自然科学研究機構

発明者:ド レゼルック シルヴァン、大森 賢治、富田 隆文

2. 発明の名称:パルス光出力システム、パルス光出力方法、中性原子励起方法及び量子コンピュータ装置

出願番号:PCT/JP2024/044357

出願日:2024/12/16

出願人:自然科学研究機構

発明者:松原 卓也、ド レゼルック シルヴァン、富田 隆文、素川 靖司、大森 賢治

4. 研究開発プロジェクトの実施内容および成果

- (1) 研究開発項目1:大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ

研究開発課題1:スケーラブルな量子コンピュータプラットフォームの開発

実施内容:

(1-1)分子研 Rb プラットフォーム開発:

本課題について我々は、最終年度マイルストーンとして「QPU の各構成要素をモジュール化・非専門家が使用可能な自律的操作系を構築」および「量子ビットとして運用可能な原子を2次元 500 個配列」を掲げていた。これに対し、分子研(課題推進者:大森)が Infleqtion 社(課題推進者:Noel)と開発を進める Rb 原子フルスタック量子コンピュータシステムでは、2023 年度時点で真空チャンバー・レーザー・イメージングシステムを含む統合的な仕様を確定、各モジュールの構成を同定、設計を開始し、その後着実に各モジュールの構築を進め、2025 年 6 月中に分子研クリーンルーム内に各モジュールを設置し、統合した。

中心部である QPU(Quantum Processing Unit)内には、(i) 2次元磁気光学トラップ冷却原子源と電場制御用電極を備えた超高真空ガラスセル真空チャンバー、(ii) 単一原子制御・観測用対物レンズ対、(iii)原子トラップ・イメージングモジュール、(iv)原子位置を動的に移動する動的な光ピンセット系、(v) 量子ゲート操作のための単一サイトアドレスモジュールのすべてが、1.0 m x 1.6 m のブレッドボード上に集積化されている。Infleqtion 社との精緻な共同設計により、分子研の1世代前のものと比較して 1/8 のサイズに圧縮されている。並行して開発した光ピンセット配列用レーザー光源系、磁気光学トラップ用レーザー光源系、リユードベリ励起用レーザー光源系を光ファイバー経由で QPU に接続した。また、信号制御系およびソフトウェア系も導入し、ユーザーによる抽象的な量子回路の入力から、原子操作までが接続されたフルスタックシステムが構築できている。これは日本初、世界でも米国 Harvard 大/QuEra 社、米国 Infleqtion 社、米国 Atom Computing 社、中国 CAS Cold Atom Technology 社などと共に数少ない中性原子型のフルスタックシステムである。

本システムにおいて、原子のレーザー冷却、光ピンセット配列を導入し、単一ルビジウム原子配列を生成することに成功した。また最大 625 サイト、約 300 原子の配列を安定的に生成した。しかし、光ピンセット配列を生成するレーザー光について、原子位置において予定よりも 30%程度レーザーパワーが足りず、結果的に本システムでの 500 原子の生成には至らなかった。光学パス上での光の損失、および SLM の回折効率の影響が予想以上に累積されたことが原因である。ロス要因の同定および空間光変調器での収差補正による高集光化作業が現在進行している。したがって、マイルストーンの達成は部分的である。一方で「最低限達成すべき目標」として設定していた「200 原子 2 次元配列の蛍光イメージング」という目標は達成した。

(1-2)京大 Yb プラットフォーム開発:

京大(課題推進者:高橋)が開発を進める Yb 原子 QPU システムでは、2次元 196 個配列を実現した。さらに、魔法波長の 759nm のトラップ光を準備し、その空間光変調器を実装し、

光ピンセットアレーの実装に成功した。これらを組み合わせることで、さらに大規模な 2 次元配列を実現する道筋を示すことに成功した。さらに、これらの波長のトラップ光源をもとに 2 次元音響光学偏向器および空間光変調器を用いて原子の空間移動を行うことに成功した。特に、高速の空間光変調器を用いて原子の空間移動を高効率に実施するアルゴリズムを開発し、それを実際の原子実験で確認することに成功したことは、今後のさらなる大規模化において有用である。

(1-3) 理研 Sr プラットフォーム開発:

理研(課題推進者:福原)が開発を進めた Sr 原子 QPU システムでは、実験装置を立ち上げ、原子集団のレーザー冷却に成功した。さらに魔法波長 813nm 光ピンセット系を準備し、冷却パラメータの自動最適化予備実験が完了した。

(1-4) ソフトウェア開発:

上記の分子研 Rb フルスタックシステム用のソフトウェアの開発については、日立(課題推進者:吉村)が推進した。原子を動的に移動させながら利用する動的原子アレー型量子コンピュータにおいて、ユーザーが作成した量子回路を効率よく実行するためのシステムソフトウェア(量子 OS)の開発を行った。その中核となる機能は、量子回路を実行するために必要となる原子の隣接関係を自動的に実現する原子の動的再配置スケジューリング機能と、動的再配置に必要なコストを抑えるための初期配置生成機能であり、その開発と実装を行った。また、システムの利用効率を高めるために、量子回路を実機で実行するための複数段階の変換をトレースできる、連動シミュレータを開発し、ソフトウェアの性能評価を、量子回路のベンチマークスイートを用いて実施した。最後に、開発した量子オペレーティングシステムのプロトタイプと分子研で開発されたハードウェアの接続を実現するために、両者のインターフェース(命令フォーマット、データ形式)を規定し、インターフェースに合致した出力(実行形式)を生成する機能を開発した。これにより、量子オペレーティングシステムが生成した命令列をハードウェアに入力し、命令列の実現に必要な各種信号が生成されることを確認し、実機制御を検証した。したがってハードウェア開発部分と合わせて「QPU の各構成要素をモジュール化・非専門家が使用可能な自律的操作系を構築」を達成したと言える。

(1-5) 当初予想していなかった展開:

分子研 Rb 原子系では、当初の計画であった QPU の開発にとどまらず、フルスタック量子コンピュータシステムの構築およびシステムとしての実用的な実機運用へと開発内容が拡張されている。

京大 Yb 原子系では、532nm(データ量子ビット用)と 759nm(補助量子ビット用)のトラップ光を共存させて原子アレーを生成することが可能であることを着想しその準備を進めており、新しい大規模化の基盤技術ができつつある。

理研においても Sr 原子系の開発と並行して、将来の大規模化に向け光格子を用いた技術の開発を行っている。ハイパワーレーザーをフォトニック結晶ファイバーで輸送した際の光位相の安定化に取り組み、5 桁以上のダイナミックレンジで位相ノイズの除去を達成した。また、光格子中での測定後の冷却を行い、測定の後でも大部分の原子を振動基底状態に残すことに成功した。これらの技術は、移動光格子による大規模原子系の輸送・保持に用いることができるものであり、大規模化に貢献する新しい技術開発である。

成果:

- Rb 原子系において、ユーザー入力した量子回路から原子制御までを接続する日本初、世界でも数少ない中性原子型フルスタック量子コンピュータシステムを構築(初期化・入力・計算・出力に必要な全ての光学モジュールを 1m×1.6m のブレッドボードに集積化した従来比 1/8 サイズのコンパクト QPU)

- 同 Rb フルスタックシステムにおける単一原子光ピンセット配列生成、最大 625 サイト・約 300 原子の 2 次元配列生成(最低限達成マイルストーン「200 原子 2 次元配列の蛍光イメージング」の達成)
- Yb 原子 QPU システムにおける 196 原子 2 次元配列の実現、759 nm 魔法波長光ピンセットアレーの実装、2 次元 AOD および高速 SLM を用いた原子移動技術の実証
- Yb 原子系における高速 SLM を用いた高効率原子再配置アルゴリズムの開発および実験実証
- Sr 原子系におけるレーザー冷却実験装置の立ち上げおよび原子集団冷却
- Sr 原子系における 813 nm 魔法波長光ピンセット系の構築および自動最適化予備実験の完了
- Sr 原子系における大規模化に向けた光格子技術の開発: 光格子中での測定後冷却技術の開発、測定後における大部分原子の振動基底状態保持の実現
- Rb フルスタックシステムへの統合を目指した、動的原子アレー型量子コンピュータ向け量子 OS の開発: 量子回路実行に必要な原子動的再配置スケジューリング機能の実装、動的再配置コスト低減のための初期配置生成機能の開発
- Rb フルスタックシステムにおける量子回路変換過程を追跡可能な連動シミュレータの開発およびベンチマーク評価
- 量子 OS と分子研 Rb ハードウェア間インターフェース仕様の策定および実機制御の実証
- フォトニック結晶ファイバー輸送時におけるハイパワーレーザー光位相安定化技術の開発(5 桁以上のダイナミックレンジでの位相ノイズ除去の達成)@理研

課題推進者: 大森賢治(分子科学研究所、以下分子研)・高橋義朗(京都大学、以下京大)・福原武(理化学研究所、早稲田大学、以下理研、早大)・Thomas Noel (Inflection)・吉村地尋(日立製作所、以下日立)

研究開発課題2: 高コヒーレンス・高忠実度量子ゲートの開発

実施内容:

本課題について我々は、最終年度マイルストーンとして「原子量子ビットの状態準備・検出忠実度 99%以上」および「1・2量子ビットゲート操作時間と比べ 1000 倍長いコヒーレンス時間」を掲げていた。これに対しこれまでに、分子研 Rb 系では、イメージングにおけるレーザー光パラメータ(強度・周波数)およびカメラ光学系を最適化し、原子の検出忠実度 99%以上を達成した。原子状態準備については、光ポンピング P とデポンピング D の速度の比較から、状態準備忠実度上限値 99.8%に対応する D/P 比 500 を得た。京大 Yb 系では、検出忠実度について 171Yb 核スピン量子ビットおよび 174Yb 光学量子ビットでそれぞれ 99.95% および 99.92% を達成した。

コヒーレンス時間に関しては、Rb 原子系ではダイナミカルデカップリングにより 1・2量子ビットゲート操作時間と比べ 10 万倍以上のコヒーレンス時間を得ることに成功した。また Yb 原子系では核スピンが持つ優れたコヒーレンス性能により、1・2量子ビットゲート操作時間と比べ 100 万倍以上のコヒーレンス時間を得ることに成功した。したがって、マイルストーンは達成された。

当初計画では予見していなかった展開として、分子研 Rb 原子系では、超高速 2 量子ビットゲート操作技術の開発において、連続波レーザーからサブナノ秒のレーザーパルスを切り出しルビジウムの第一電子励起状態へと高速かつ状態選択的に励起する手法を開発した。同様に、光ピンセットアレーにおける世界最短レベルの原子間距離(〜1 ミクロン)を実現した。またゲート操作忠実度の向上を目的として、原子間の相互作用強度の高精度化に寄与する光ピンセット深さ・形状・原子の均質化技術の開発(論文発表 PRA 110, 053518 (2024))、単一原子をプローブとして光ピンセットの強度/偏光形状を超解像度診断する技術の開発(論文発表

arXiv:2410.03241 (2024), Nature Communications accepted)、運動状態のスケーリングによる原子の空間波動関数の圧搾と位置不確定性の低減(論文発表 PRL **135**, 253404 (2025))に成功した(課題推進者:Sylvain・富田)。さらにエラー率の低いリユードベリ制御が可能な2光子遷移を特定し、この波長に対して位相ノイズが小さい最適な連続波レーザーを特定した(論文発表 PRA **111**, 042614 (2025))。ここで特定したレーザーを用いて、フルスタック量子コンピュータシステムにおいて2原子間のエンタングルメントを生成することに成功した。

京大 Yb 原子系では、2量子ビットゲート操作の実現に向けて、リユードベリ相互作用を高い精度で予測する計算プログラムの実装が完了した。さらに、リユードベリ励起光源である1Wクラスの507nm光源、578nm光源、302nm光源系の周波数安定化、強度安定化、長期周波数ロックなどの整備を完了し、これらの光源を用いてエンタングルメントを生成することに成功した。

成果:

- 状態準備忠実度:Rb 原子系上限 99.8%相当達成
- 検出忠実度:Rb原子系 99%、Yb 原子系 171Yb 核スピン量子ビット 99.95%・174Yb 光学量子ビット 99.92%達成
- ゲート時間比 10 万倍以上のコヒーレンス時間:Rb 原子系 10 万倍以上(ダイナミカルデカップリング)達成。Yb 原子系、ゲート時間比 100 万倍以上のコヒーレンス時間達成
- 連続波レーザーからサブナノ秒レーザーパルスを切り出し、Rb 第一励起状態への高速・状態選択的励起を実現する超高速量子ゲート技術の開発に成功
- Rb 原子系において、光ピンセットアレイにおける世界最短レベル原子間距離(〜1 ミクロン)を実現 → 独自の超高速2量子ビットゲートに必要なリソース
- Rb 原子系において、光ピンセット深さ・形状・原子均質化技術の開発による、原子間相互作用精度向上技術を確立→多数の原子量子ビットを一括して冷却・最適化する全自動初期化システム
- Rb 原子系において、単一原子プローブによる光ピンセット強度・偏光形状の超解像診断技術を開発
- Rb 原子系において、運動状態スケーリングによる原子空間波動関数圧搾および位置不確定性低減を実現
- Rb 原子フルスタック量子コンピュータシステムにおける2原子エンタングルメント生成
- Yb 原子系における高精度リユードベリ相互作用計算プログラムの実装
- Yb 原子系におけるリユードベリ励起光源を用いたエンタングルメント生成の実現

課題推進者:大森賢治(分子研)・Sylvain de Léséleuc(分子研、理研)・富田隆文(分子研)・高橋義朗(京大)・福原武(理研、早大)

研究開発課題3:冷却原子系に特化した量子誤り検出・訂正アーキテクチャの開発

実施内容:

本課題について我々は、最終年度マイルストーンとして「非破壊測定」の実現を掲げていた。分子研 Rb 原子系において、光ピンセットを有するプロトタイプ実験系を用いて、測定後に原子が残存する非破壊測定を実施し検出忠実度 94%の達成に成功した。また、この結果を踏まえ、新規フルスタック量子コンピュータの開発においては、非破壊測定がより安定的に実現可能な光学系を設計し、構築が完了した。また、イメージング用レーザーについても、原子をロスしない非破壊測定において重要となる高速なスイッチングが可能になるスイッチモジュールを導入した。並行して誤り訂正に向けた低ノイズ高速イメージングカメラのソフトウェアおよび光学系を整備し、プロトタイプ実験系において動作可能であることを実証した。さらに、当該カメラをフル

スタック量子コンピュータシステムに実装した。以上から、マイルストーンは達成されたとと言える。

Rb 原子系で当初計画では予見していなかった展開として、分子研(課題推進者:富田)は、高速な誤り訂正処理に必要な原子蛍光画像の高速処理システムを含む中性原子型量子コンピュータに特化した古典制御系について、小林 PJ の三好健文氏(QuEL)と共同で開発を実施した。複数の制御機器を結合させた従来の煩雑な装置群ではなく、信号生成とカメラからの蛍光画像読み出し・処理が協調的に設計された FPGA ベースの拡張可能な制御機器を開発し、プロトタイプ機での制御信号生成に成功している。また、冷却原子系に特化した量子誤り検出・訂正アーキテクチャの理論開発について、小芦 PJ の藤井啓祐氏(阪大)が分子研・客員教授に就任し、連携して誤り訂正符号について検討を進めた。フルスタック量子コンピュータにおいては、光ピンセット配列平面の表面・裏面の両方から蛍光を獲得し、カメラで検出する蛍光量を2倍にする、2個の対物レンズで構成されたイメージング光学系を構築し、625 サイトからなる単一原子配列の両面撮影に成功した。原子蛍光のバックグラウンドに対する識別忠実度(原子有無判定)は99.989%、イメージング中の原子ロス率は0.09%である。

京大 Yb 原子系では、非破壊測定に必要な操作である準安定状態 3P_2 状態を用いたスピン選択的コヒーレント準安定状態励起を実施し、忠実度80%を実現した。さらに、別の準安定状態 3P_0 を用いた非破壊測定のための波長578nmの光源についても、1W以上の高出力を確認し、さらに ULE 安定化された半導体レーザーの安定度転送技術により周波数安定化を実現した。これにより、より高い忠実度での非破壊測定実現が期待できる。また、新たに準安定状態への超狭線幅な内殻遷移(波長431nm)を見出し、60秒以上の長い寿命を有することを明らかにした。将来の非破壊測定に活用可能である。

成果:

- Rb 原子系における、測定後原子残存型非破壊測定の実現および検出忠実度94%の達成
- Rb 原子系における、低ノイズ高速イメージングカメラのプロトタイプ実験系における動作実証およびフルスタック量子コンピュータシステムへの実装
- Rb 原子系における、原子蛍光画像高速処理システムを含む、中性原子量子コンピュータ向け FPGA ベース古典制御系の共同開発
- Rb 原子系における、信号生成および蛍光画像読み出し・処理を統合した拡張可能制御機器アーキテクチャの開発
- Rb 原子系における、FPGA ベース制御機器によるプロトタイプ機での制御信号生成実証
- Rb 原子系における、冷却原子系に特化した量子誤り検出・訂正アーキテクチャに関する理論検討の推進
- Rb 原子系における、光ピンセット配列平面の両面蛍光取得を可能とする2対物レンズ型イメージング光学系の構築と、625 サイト単一原子配列に対する両面蛍光イメージングの実現(原子有無判定忠実度99.989%およびイメージング中原子ロス0.09%)
- Yb 原子系における、準安定 3P_2 状態を用いたスピン選択的コヒーレント励起の実現および忠実度 $F=80\%$ の達成
- Yb 原子系における、非破壊測定向け578 nm 高出力光源(1 W 超)の開発
- Yb 原子系における、ULE 安定化半導体レーザーを用いた578 nm 光源の周波数安定化技術の実現
- Yb 原子系における、非破壊測定への応用可能な60秒以上の寿命を有する準安定状態への超狭線幅431 nm 内殻遷移の発見

課題推進者:富田隆文(分子研)・高橋義朗(京大)・福原武(理研、早大)

研究開発課題4: 高安定・高強度小型集積レーザーシステム

実施内容:

上記の課題1～3を実現するための研究開発を進めた。我々が必要とする中性原子型量子コンピュータ専用レーザー光源について、超高速パルスレーザーおよび連続波レーザーの双方において高忠実度化に必要な技術を開発し、課題1～3に大きく貢献した。なお、課題4「高安定・高強度小型レーザーシステム」は課題1～3を実現するためのレーザー開発であるため、それ自体についてマイルストーンは設定していない。

分子研は(課題推進者:Sylvain)、超高速量子ゲートにおけるリュードベリ励起のためのパルスレーザーの高安定化を行った。連続波レーザーを種光とした光パラメトリック波長変換システムを構築し波長 480 nm パルス光について 6 %の強度不安定性(ショット毎の強度揺らぎ)が得られ、従来の市販レーザー光源が有していた 30 %の強度不安定性から大きく低減させることに成功した。光ピンセット中に捕捉された単一原子に開発したパルスレーザーを照射し、従来の市販レーザー光源により得られていた励起確率 70 %を大きく上回る、最大 90 %の励起確率を得ることに成功した(論文発表:Optics Letters **50**, 403 (2025))。さらに、連続波レーザーを用いたゲート操作の高忠実度化のために、位相ノイズ抑制の技術を開発した。光ファイバー型 Mach-Zehnder 干渉系を用いた、フィードフォワード型の位相ノイズ抑制装置を開発し、1-10 MHz の周波数領域において、位相ノイズを 20 dB 以上低減することに成功した。さらに、⁸⁷Rb 超微細構造の1量子ビット制御における2つの独立したレーザーによるラマン遷移において、位相ノイズ抑制装置によりコヒーレンス時間が大きく増加し、位相ノイズ抑制の有効性が実証された(論文発表:PRA **111**, 042614 (2025))。

同じく分子研は(課題推進者:平等)、レーザー光源の要素として Cr:LiSAF 結晶を用い、1000 量子ビットを超える大規模化や赤外域での高出力連続波波長可変光源を目的としたトラップレーザー、および安定したリュードベリ励起を実現するパルス励起レーザーの研究開発を実施した。Cr:LiSAF の分光特性・熱伝導率を評価し、発振特性に関わる物性データを取得することに成功した。さらに、サファイアとの il-SAB 接合による DFC 構造チップを試作し、AR コーティングを介した接合にも成功、実効熱伝導率は 10W/mK 超を達成し、YAG を上回る性能を確認した。パルス励起レーザー開発では、Nd 濃度分布を最適化し DFC チップ長を短縮、高出力 LD に対応できるようにした。熱複屈折を抑えることで 4-passes アンプ構成が可能となり、出力変動率を 0.89%まで低減して目標を達成した。非線形光学波長変換の安定化に向けては、飽和特性を活用し変動抑制を図るとともに、QPM 素子 PPLT やサファイア冷却による DFC-PPLT 構造を開発。BBO 結晶の面内均一性改善と LIDT 評価系の構築も進め、高出力・高安定動作に向けた基盤整備を行った。

成果(いずれも分子研によるもの):

- 連続波レーザー種光を用いた 480 nm パルス光生成用光パラメトリック波長変換システムの構築および市販レーザー比でのパルス強度不安定性低減(30%→6%)の実現
- 光ピンセット単一原子に対する最大 90%リュードベリ励起確率の達成
- 光ファイバー型 Mach-Zehnder 干渉系を用いたフィードフォワード型位相ノイズ抑制装置の開発および 1-10 MHz 帯域における 20 dB 以上の位相ノイズ低減の実現
- 位相ノイズ抑制装置を用いた ⁸⁷Rb ラマン遷移コヒーレンス時間の向上
- Cr:LiSAF 結晶の分光特性・熱伝導率評価および発振特性関連物性データ取得
- サファイアとの il-SAB 接合による DFC 構造チップの試作
- AR コーティングを介した DFC 構造接合技術の確立
- 実効熱伝導率 10 W/mK 超の達成および YAG 超え性能の確認
- Nd 濃度分布最適化および DFC チップ短尺化による高出力 LD 対応パルス励起レーザ

一開発:熱複屈折抑制による4-passes アンプ構成の実現および出力変動率0.89%の達成

- 非線形光学波長変換安定化に向けた飽和特性利用型変動抑制技術の開発
- QPM 素子 PPLT およびサファイア冷却 DFC-PPLT 構造の開発
- BBO 結晶の面内均一性改善技術の開発
- BBO 結晶 LIDT 評価系の構築

課題推進者:Sylvain de Léséleuc(分子研、理研)・平等拓範(分子研、理研)

5. プロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

代表機関である自然科学研究機構の承認のもと、実質的なヘッドクォーターを担う分子科学研究所より、本プロジェクトに対して研究スペース、オフィススペースおよび光熱費の全面的な支援を受けた。

また、マネジメント面では、分子科学研究所長が PM と緊密に連携し、運営の進捗状況や課題、将来展望をリアルタイムで共有するとともに、実務面での人的支援を行った。具体的には、総合マネジメント経験者をプロジェクト・サブマネージャーとして配置し、PM の業務を補佐したほか、2〜3 名の事務支援員をムーンショット専属としてプロジェクト運営に従事させた。さらに、新規雇用者の着任までの期間については、支援部局による一時的な支援を受けた。加えて、本プロジェクトの完遂まで、PM の定年後雇用および上記の全面的な支援体制が確約されている。

本プロジェクトでは、世界最高レベルにある大規模かつ動的な任意配列の冷却原子量子ビットアレー技術を基盤として、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指している。そのため、国内外から世界トップレベルの研究者を結集させた。これら多様な課題推進者の独創性を最大限に活かしつつ、チームとしての推進力を維持するため、サブテーマミーティングおよび全体ミーティングを定期的に開催し、全メンバーが常にプロジェクト全体の進捗を俯瞰し、検討できる体制を整えた。

研究開発プロジェクトの展開

本研究開発期間において、研究の中止及び体制の再構築などは実施することなく、研究開発を進め、それぞれ課題において成果が得られた。また、研究開発の進捗状況を常に把握し、問題点などの早期把握、対応によって、特に大きな問題なく、プロジェクトを遂行した。世界中から著名な研究者を招き、セミナーの実施及び情報交換をおこなった。とりわけ、2025年のノーベル物理学賞受賞者である John M. Martinis 博士とは親しくご交流頂き、基礎から応用、そして事業化に至るそれぞれの階層において、示唆に富むご指導を賜り、研究開発や事業展開の指針としている。

(2) 研究成果の展開

本プロジェクトでは、積極的な知財戦略を展開するとともに、事前に共同研究計画を締結することで、取得特許の取扱い(バйдール制度への対応や特許権の帰属等)について慎重に対応している。

産学連携においては、課題推進者が所属する米国 Inflection および日立製作所、さらに研究協力者である浜松ホトニクスとの間で、知的財産管理や秘密保持に関する協議を行い、共同研究契約を締結し、研究を推進した。特に、大森PMがこれまでに特別推進研究やQ-LEAP等の事業を通じて培ってきた知財戦略の経験を踏まえ、バйдール制度への対応については

事前に共同研究契約を締結し、関係者間で十分な合意を形成しておくことの重要性が確認された。

事業化については、2023 年に分子研が中心となって、事業化に向けた協議会「事業化検討プラットフォーム」を設立した。ここでは日本政策投資銀行 (DBJ) に主査をお引き受けいただくとともに、日立、富士通、NEC、浜松ホトニクスなど産業界から傑出した企業 13 社にご参画いただき、事業化に向けてのご議論ご指導をいただいた。ここでの議論等を元に、2025 年 4 月に分子科学研究所と京都大学のジョイントベンチャーである株式会社 Yaqumo を設立した。本会社を通じて、大森ムーンショットプロジェクトで得られた研究成果の技術移転を推進するとともに、量子コンピュータの実用化および社会実装への展開を進めている。

上記の事業化活動や先述の Rb フルスタックマシンの開発など、本大森ムーンショットの活動は、2 度の日経新聞・朝刊・1 面トップ記事、米国サイエンス誌の中性原子量子コンピュータ特集記事、NHK ニュースおはよう日本、内閣府・高市大臣 (当時) の公式インタビュー、日米首脳会談の米国ホワイトハウスファクトシートなど国内外の報道等で頻繁にハイライトされ、社会的に大きな注目を集めている。

(3) 広報、アウトリーチ

2022 年の大森ムーンショットプロジェクト開始以降、2 度の日経新聞・1 面トップ記事 (2024 年 2 月 27 日・朝刊、2025 年 3 月 1 日・朝刊) を始め、米国サイエンス誌の中性原子量子コンピュータ特集記事、NHK ニュースおはよう日本、内閣府・高市大臣 (当時) の公式インタビュー、日米首脳会談の米国ホワイトハウスファクトシートなど国内外のさまざまなメディアで大森ムーンショットプロジェクトについて極めて多数の報道が行われており、社会受容面で予想を遥かに超える多大な成果を挙げている。以下に代表的な例を時系列に沿って紹介する。

代表的な広報 (報道) 例:

- 2023 年 4 月に日経サイエンス 6 月号にて「フロントランナー挑む: 第 136 回 冷却原子で 2 量子ビットの高速演算操作を実現: 大森賢治」が掲載された。
- 2023 年 9 月 11~15 日、日本経済新聞の名物コラム「人間発見」において、大森 PM の半生を辿る 5 回連載の特集記事「シン量子計算機に挑む」が掲載された。
- 2023 年 10 月 31 日、新たに始動した「攻殻機動隊」公式グローバルサイトの第 1 回目の NEWS として掲載された原作者・士郎正宗氏・史上初のロングインタビューで、同氏が注目する新しい技術として、分子研の量子コンピュータがハイライトされた。これがきっかけとなって、下記 2025 年 8 月 15 日の大阪・関西万博でのスペシャルイベントが開催された。
- 2024 年 2 月 27 日、大森 PM が立ち上げた事業化検討プラットフォームが社会から大きな注目を集め、日本経済新聞・朝刊 1 面トップ記事として大きく報道され、日本経済新聞アクセスランキングの総合トップにランクされた他、多くの新聞・雑誌・テレビニュース等でハイライトされた。
- 2024 年 3 月 1 日、内閣府・高市大臣 (当時) の公式インタビューにおいて、上記の事業化活動をはじめとする大森ムーンショットプロジェクトが賞賛された。
- 2024 年 4 月 10 日、日米首脳会談に際して米国ホワイトハウスが発表した公式のファクトシートで分子研と Inflection 社が共同開発を進めるパワフルな量子コンピュータとして取り上げられた。
- 2024 年 11 月 12 日、大森 PM が議長を務めた「量子コンピュータ」をテーマにした国際会議 iSAP Hamamatsu 2024 (オークラアクティビティホテル浜松) の模様が、招待講演者である John Martinis 教授と大森 PM の講演映像、および大森 PM のインタビュー動画とともに「NHK NEWS おはよう日本・全国版」などで大きく放映された。
- 2025 年 3 月 1 日、日本経済新聞・朝刊 1 面トップに「量子計算機世界トップ級国内初の方

式、年内に稼働 分子研や日立」と題して、本プロジェクトで分子研が開発しているフルスタック量子コンピュータの記事が掲載された。

- 2025年7月10日、米国 Science 誌の中性原子量子コンピュータ特集記事で、米国 Harvard 大/QuEra 社、米国 Inflection 社、米国 Atom Computing 社をはじめ、数少ない世界のキープレイヤーと共に、大森教授が紹介された。
- 2025年8月15日の大阪・関西万博において大森PMと映画「攻殻機動隊」押井守監督とのスペシャルトークショーが開催された。当日は立ち見溢れる大盛況となった。

代表的なアウトリーチ例:

- 2022年11月18日、大森PMが Virtual Humboldt Colloquium “Top Global Research” and the Humboldt Network : New Frontiers of German-Japanese Scientific Cooperation にて「Ultrafast quantum computer/simulator operating at the single-atom level」と題し、招待講演(オンライン)を行った。
- 2023年1月21日、熊本大学教育学部講堂に於いて、熊本市教育委員会が主催した「Kumamoto Education Week 2023 -みんなの夢が未来を創る-」のオープニングトークにて「ロックミュージシャンだった物理学者」と題して、小中高生を対象に大森PMがトークショーを実施した。対面:約100人(コロナウィルスによる活動自粛下のため人数制限)、オンライン:約550人(配信開始後24時間);約1000人(配信開始後2週間:2/5時点)が参加した。
- 2023年2月2日、7日、大森PMが、米国を代表する量子技術開発コンソーシアムである Chicago Quantum Exchange (CQE)、シカゴ大学、マサチューセッツ工科大学(MIT)及びハーバード大学などの米国の量子技術開発の最重要拠点に講演に招かれ、招待講演を実施した。その際に、先方のアカデミアにおける量子コンピュータ開発の最新状況や今後の展望、並びに現地のスタートアップ企業の組織構成、人材、活動状況などを詳細に視察する機会を得た。
- 2023年3月14日、岡崎カンファレンスセンターに於いて、小・中・高・大学生を対象にした文部科学省主催のアウトリーチイベント「GIGA スクール特別講座～量子力学 100 年の謎と量子コンピュータへの挑戦!～」が開催され、量子についての講義を大森PM、実験デモを富田PIが実施した。対面:約200人、オンライン:約1,200人が参加した。
- 2023年5月11日、大森PMは、東京ビッグサイトにて開催の NexTech Week 2023【春】一人、企業、世界の「未来」へー第3回量子コンピューティング EXPO(春)にて招待講演を行なった。日本最大級の量子技術専門展で、同時開催展を含め約3万5千人が来場する巨大テックイベント。産業界の意思決定者が多数集まる熱量の高い舞台であり、招待講演への登壇は社会実装に向け絶大なインパクトを持つ。
- 2023年7月26日、大森PMは、カナダ・オタワにて開催の光や原子衝突分野で長い歴史と高いステータスを誇る国際会議、ICPEAC(International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions)2023 にて「Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、栄誉あるオープニングセレモニーにおけるプレナリー講演を行なった。
- 2023年8月3日、大森PMがドイツ・ベルリン大学にて開催の The 15th Femtochemistry Conference – Dynamics of Complex Molecular Processes in Chemistry, Biology & Physics (FEMTO15) にて「Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行った。
- 2023年8月6～11日、大森PMは、世界最高峰の学術会議の一つであるゴードン研究会議(Gordon Research Conference : GRC)において、「量子制御と量子技術」をテーマとする2023年会議の議長を務めた。同会議ではディスカッションリーダーや招待講演者で

ある量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子センサーなど量子技術分野の世界のトップランナー、トップベンチャー企業の面々との交流を深めると共に、同分野における世界の最新動向に関する情報収集を進めた。

- 2023 年 10 月 5 日、大森 PM があいちモノづくりエキスポ 2023 にて「量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ」について招待講演を行なった。「あいちモノづくりエキスポ」は地元の主要産業である製造業のリーダーや技術者が一堂に会する一大イベントで、最先端の量子技術を産業界へ直接発信し、社会実装を加速させる重要な強力なアピールとなった。
- 2023 年 10 月 20 日、大森 PM がドイツ・ボン大学にて開催の 11th Bonn Humboldt Award Winners' Forum 2023 „Quantum Science: from Foundations to Instrumentation“にて「Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行なった。Humboldt 賞受賞者らが集う格式高い国際フォーラムで、世界最高速限界での量子シミュレーション技術を世界の第一線へ直接発信し、大森 PM の卓越した研究成果と国際的プレゼンスを強力にアピールした。
- 2023 年 12 月 1 日、大森 PM が東京都・東京ビッグサイト VACUUM2023 真空展にて「量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ」と題し招待講演を行なった。最先端技術の集まる「真空展」での招待講演であり、量子スピード限界で動作する独自の冷却原子型量子コンピュータを産業界へ強力に発信した。
- 2023 年 12 月 7～9 日、「量子芸術祭 Quantum Art Festival 2/4」において、富田 PI がアート作品及びテキストの構成監修、ギャラリートツアーを行った。また、12 月 6 日に開かれた同イベント関連のウェビナー「長谷川愛さんが尋ねる量子コンピュータの面白さ」で対談を行った。
- 2023 年 12 月 12 日、大森 PM が公益財団法人豊田理化学研究所が主催する豊田理研懇話会で、大森 PM が「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」と題して招待講演。量子技術への高い関心と社会の期待を集めた注目の講演として、一般市民のオンライン聴講も含めて同懇話会・過去最高の 350 名を超える聴講があった。
- 2024 年 5 月 25 日、日本表面真空学会特別講演会において、大森 PM が「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」と題して招待講演。オンラインを含め約 180 名が聴講した。
- 2024 年 5 月 28 日、大森 PM がカナダ・バンクーバーにて開催の 26th Photonics North 2024 にて「Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、基調講演を行なった。量子スピード限界で動作する独自の冷却原子型量子コンピュータを国際舞台で強力に発信し、高い関心を集めた。
- 2024 年 5 月 30 日、Sylvain PI が岡崎市が主催する「未来型教育推進事業」の「夢への挑戦～自然科学研究機構の研究者・職員から学ぶ～」をテーマにしたオンラインセミナーを行った。市内の小・中学生約 4200 人が視聴し、子供たちの科学に対する関心を高めた。
- 2024 年 6 月 5 日、大森 PM が東京大学にて開催の Swiss-Japanese Quantum Symposium 2024 にて、「Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行った。量子技術への高い関心と社会の期待を集めた注目の講演として、国内外へ研究成果を広く発信した。
- 2024 年 6 月 7 日、エフエム EGAO(FM 岡崎)「EGAO FRIDAY SCIENCE LAB.」に Sylvain PI が出演し、視聴者最大 10 万世帯に向けて量子コンピュータに関する研究内容をはじめ、日本での暮らしなどを紹介した。
- 2024 年 6 月 18 日、公益社団法人新化学技術推進協会主催の JACI/GCS シンポジウムで大森 PM が「量子力学 100 年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」と題して基調講演を行った。一般、学生を含め現地とオンラインで 280 名を超える聴講があった。産業界

から教育現場に至るまで、多岐にわたる層へ向けて独自技術の有用性と魅力を精力的に発信し、次世代を担う市民の関心と科学技術への期待を大きく喚起した。

- 2024年6月26日、大森PMがフランスアカデミアの最高峰である Collège de France における Laboratoire Kastler Brossel(LKB) Seminar 2024 にて「Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行った。フランスの伝統ある最高峰の学術機関にて独自成果を披露し、最先端量子技術の国際的な存在感を大きく高めた。
- 2024年7月10日、神奈川県立相模原中等教育学校を富田PI及びSylvainPIが訪問し、生徒約120人に対して「原子で作る量子コンピュータ」についての出張授業を行った。このイベントで、子供たちの量子技術への興味を喚起し、新たな学びと視野を提供することができた。
- 2024年7月22日、大森PMが東京都・Deloitte Tohmatsu Innovation Park にて開催の Q2B2024Tokyo サテライトイベント「量子グローバルイノベーション・サミット東京 2024」にて「量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ」と題し唯一の基調講演を行った。国際的な注目イベントにて独自技術の優位性を強くアピールし、産学官の連携強化へ向け存在感を示した。
- 2024年7月26日、大森PMが東京・ベルサール飯田橋駅前にて開催の令和6年度第3回量子技術研究会 JATES 科学技術と経済の会が主催する講演会「量子技術研究会」にて「量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ」と題し、招待講演を行った。国内の産学の主要な有識者層へ向けて独自技術の進捗を報告し、将来的な社会実装への機運を大きく高めた。
- 2024年9月26日、大森PMが米国・Stanford University にて開催の The 14th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy にて「Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行い絶賛された。米国の名門大学で最新成果を披露し、日米の緊密な研究ネットワーク構築と国際連携を強力に推進した。
- 2024年10月13日、新中日ビル落成記念イベントとして中日文化センターが主催する一般向け講演会「名古屋大学総長がナビゲートする科学最前線-知の地平線 未来への挑戦」において、大森PMが「量子力学100年の謎と超高速量子コンピュータへの挑戦」と題する招待講演、及び名古屋大学・杉山総長との対談を行った。聴講者約80名が熱心に聴講し、一般市民の関心と理解を深めることができた。
- 2024年10月20日、自然科学研究機構シンポジウム「量子はめぐる」において、大森PMが「量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ」と題して招待講演、パネルディスカッションを実施した。対面での現地聴講者に加え、福岡市科学館、みなと科学館、多摩六都科学館でパブリックビューイングも行い、YouTube 配信と併せて多くの一般市民の視聴があった。
- 2024年11月12日、大森PMがオークラアクティシティホテル浜松にて開催の iSAP 浜松 2024 先端フォトニクスに関する国際シンポジウムにて議長及び「Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行った。国際シンポジウムの議長を務めつつ独自成果を披露し、最先端フォトニクス分野での強力な統率力を示した。この模様は大森PMのインタビュー/講演映像、および同じく招待講演者である John Martinis 教授(2025年ノーベル物理学賞)の講演映像とともに NHK ニュース・おはよう日本・全国版で大々的に報道された。
- 2024年11月14日、財務省傘下の日本政策銀行(DBJ)が主催するシンポジウム「DBJ iHub 量子コンピュータ実現への道」(東京・大手町)において、大森PMが、超高速量子コンピュータの研究開発状況に関する招待講演を行い、全国の産業界にむけて研究力をア

ピールした。

- 2024 年 11 月 21 日、幕張メッセで開催された RX Japan 主催の量子コンピューティング EXPO において、大森 PM が「量子コンピューティングの最新研究開発の状況と今後の展望」というテーマで、招待講演とパネルディスカッションを実施した。注目度の高い展示会で最新の展望を示し、産業界への技術普及と市場開拓への機運を強力に後押しした。
- 2024 年 11 月 27 日、量子フォーラムシンポジウム「冷却原子が拓く量子技術の最前線」で、大森 PM が、超高速量子コンピュータの研究開発状況に関する招待講演を行うことによって、量子技術関連のアカデミアと産業界におけるプレゼンス向上と研究力を大きくアピールした。
- 2025 年 2 月 5 日、大森 PM がインド・コルカタにて開催の TCG CREST International Year of Quantum Science and Technology (IYQ)-2025 にて「Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、栄誉あるオープニングのプレナリー講演を行った。国連の国際量子科学技術年にあたる重要会議で成果を披露し、グローバルな連携基盤の構築を強力に推進した。大森 PM は量子工学研究教育センター (CQuERE) の科学諮問委員会・議長 (2024 年～現在、2021 年～2024 年は同委員) を務めている。この委員会の他のメンバーは Artur Ekert、Hartmut Häffner、中村泰信と非常に豪華なラインナップである。
- 2025 年 3 月 13 日、アメリカ・テキサス州オースティンで毎年 3 月に開催される世界最大級のビジネスカンファレンス&フェスティバル South by Southwest (SXSW)において、大森 PM が冷却原子型・超高速量子コンピュータについて招待講演を行った。SXSW は、もともとは 1987 年に音楽フェスティバルとして始まったが、現在ではテクノロジー・音楽・映画・アート・ビジネスなど多岐にわたる分野を網羅するイベントとなっている。このイベントでは、これまでにイーロン・マスクやバラク・オバマなど世界のリーダーたちによる講演やパネルディスカッション、スタートアップ企業の展示会、映画祭、音楽ライブなどが行われ、未来のトレンドをいち早くキャッチできる場として世界中から注目されている。今回はミシェル・オバマ氏が講演を行った。
- 2025 年 3 月 25 日、大森 PM がフランス・ストラスブールにて開催の CESQ (Centre Européen de Sciences Quantiques) 欧州量子科学センターコロキウムにて「Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行った。欧州の権威ある量子科学センターで成果を披露し、最先端量子技術の国際的なプレゼンスをさらに高めた。
- 2025 年 4 月 23 日、大森 PM が神奈川県・パシフィコ横浜にて開催の OPIC2025 にて基調講演 (プレナリー講演) を行なった。国内最大級の国際光学会議で最高峰の講演を行い、世界最先端の光・量子技術を強力に印象付けた。
- 2025 年 6 月 24 日、大森 PM が米国ニューヨーク州ロチェスター大学にて開催の CQS-12 Rochester Conference on Coherence and Quantum Science にて招待講演を行なった。光と量子科学の歴史ある国際会議で成果を披露し、最先端分野における世界的な存在感を一段と強めた。
- 2025 年 8 月 6 日、大森 PM が米国ロードアイランド州・Salve Regina 大学にて開催のゴードン研究会議 (Gordon Research Conference : GRC) 「Quantum Control of Light and Matter」にて招待講演を行なった。世界最高峰の学術会議で独自の量子制御技術を披露し、最先端分野における国際的なプレゼンスを強力にアピールした。
- 2025 年 8 月、大阪・関西万博の WASSE 会場にて大森 PM による量子力学 100 年の謎に関するパブリックレクチャーに引き続き、大森 PM と映画・攻殻機動隊・押井守監督との対談が実施され、大森量子コンピュータの注目度が高まった。万博という国際的な大舞台で、映画界の巨匠・押井守監督との異色の対談が実現。SF の世界と最先端のリアルな量

子技術が融合した刺激的な発信は、一般層から専門家まで幅広い層の関心を惹きつけ、認知度を大幅に高めた。

- 2025 年 9 月 3 日、大森 PM が千葉県・幕張メッセにて開催の JASIS 2025 で「量子スピード限界で動作する冷却原子型・超高速量子コンピュータ」についての招待講演を行なった。分析・計測機器の主要展示会で最新動向を解説し、関連産業界への技術浸透と新たな連携を力強く促した。
- 2025 年 10 月 24 日、大森 PM がデンマーク大使館にて開催の 2nd Japan-Denmark Symposium On Practical Quantum Computing にて「Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行った。日本-デンマーク間の重要シンポジウムで成果を披露し、北欧との国際的な量子連携を強力に推進した。
- 2025 年 11 月 13 日、大森 PM がメリーランド大学にて開催のコロキウムにて「Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行った。米国の量子分野の主要研究大学のコロキウム(JQI (Joint Quantum Institute) スペシャルセミナー)にて成果を披露し、最先端分野における国際的な認知度をさらに高めた。
- 2025 年 11 月 14 日、大森 PM が OPTICA 本社にて開催の OPTICA Incubator on Petahertz Electronics にて「Ultrafast quantum computing with ultracold atom arrays at quantum speed limit」と題し、招待講演を行った。光学分野の国際学会本部が主催する重要会議で成果を披露し、超高速エレクトロニクスとの融合を力強く牽引した。

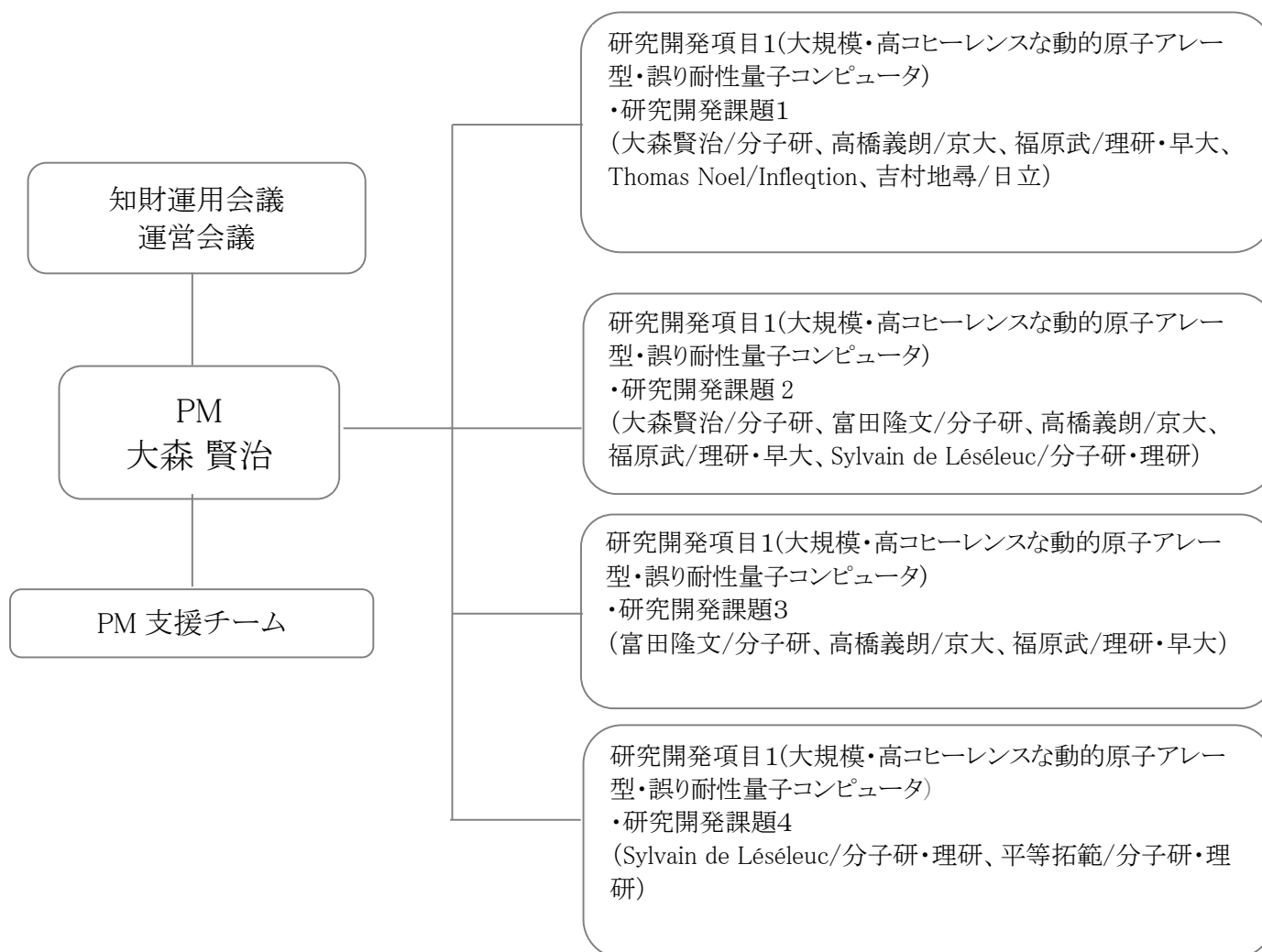
大森プロジェクト全体として、300 件を超える講演などのアウトリーチ活動をしており、特に大森 PM は、GRC などの世界最高峰の学術会議や国際シンポジウムにおいて議長・プレナリー講演・基調講演・招待講演を精力的に数多く実施。保有する最先端のコアコンピタンスを世界へ発信し、国際的な存在感を確立した。さらに万博等の大舞台や異分野対談、国内外の産業界との連携を通じ、専門層から一般市民まで認知度を大幅に向上させ社会に広く貢献した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

各研究機関はメインサーバーにデータを集約し、かつ、バックアップ用 HD にバックアップを作成した。また、取得したデータは非公開とした。なお、取得したデータは、令和8年度から開始される次期ムーンショットプログラムに有効活用する。

6. 研究開発プロジェクト推進体制図

PMを中心とした研究開発推進体制を以下に示す。



知財運用会議 構成機関と実施内容

構成機関:分子研、京大、理研、日立、Inflection

実施内容:想起されたアイデアについて検討し、早期の特許出願につなげた。

運営会議 実施内容

全 PI および関係者を参集し、研究開発方針の共有ならびに研究開発の実施状況に関する報告および調整を行った。

また、実施規約の改定案について審議を行った。