

## 6-5 光分子科学研究領域

### 光分子科学第二研究部門

大 森 賢 治 (教授) (2003年9月1日着任)

素川 靖司 (助教)  
DE LÉSÉLEUC, Sylvain (助教)  
富田 隆文 (特任助教 (分子科学研究所特別研究員))  
BHARTI, Vineet (特任研究員)  
CHAUHAN, Vikas Singh (特任研究員)  
周 鳥居 諭来 (特任研究員)  
藤川 武敏 (特命専門員)  
川本 美奈子 (特任専門員)  
鈴木 光一 (特任専門員)  
牧野 茜 (特任専門員)  
松尾 友紀子 (特任専門員)  
MORLA AL YAHYA, Joa (インターンシップ)  
DENECKER, Tom (インターンシップ)  
KOCIK, Robin (インターンシップ)  
BARRE, Maxence (インターンシップ)  
MARTHOURET, Hugo (インターンシップ)  
DELABRE, Antoine (インターンシップ)  
北出 聡太 (インターンシップ)  
梅岡 雅人 (インターンシップ)  
MAURICIO URBINA, Jorge Antonio (インターンシップ)  
TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh (大学院生)  
VILLELA ESCALANTE, Rene Alejandro (大学院生)  
田中 亮 (技術支援員)  
中井 愛里 (技術支援員 (派遣))  
西岡 稚子 (事務支援員)

A-1) 専門領域：量子物理学，原子分子光物理学，量子情報科学，物理化学

A-2) 研究課題：

- a) アト秒精度のコヒーレント制御法の開発
- b) 量子論の検証実験
- c) コヒーレント分子メモリーの開発
- d) 分子ベースの量子情報科学
- e) 強レーザー場非線形過程の制御
- f) バルク固体の極限コヒーレント制御
- g) 超高速量子シミュレータの開発

## h) 超高速量子コンピュータの開発

### A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) コヒーレント制御は、物質の波動関数の位相を操作する技術である。その応用は、量子コンピューティングや結合選択的な化学反応制御といった新たなテクノロジーの開発に密接に結び付いている。コヒーレント制御を実現するための有望な戦略の一つとして、物質の波動関数に波としての光の位相を転写する方法が考えられる。例えば、二原子分子に核の振動周期よりも短い光パルス照射すると、「振動波束」と呼ばれる局在波が結合軸上を行ったり来たりするような状態を造り出す事ができる。波束の発生に際して、数フェムト秒からアト秒のサイクルで振動する光電場の位相は波束を構成する各々の振動固有状態の量子位相として分子内に保存されるので、光学サイクルを凌駕する精度で光の位相を操作すれば波束の量子位相を操作することができる。我々はこの考えに基づき、独自に開発したアト秒位相変調器 (APM) を用いて、二つのフェムト秒レーザーパルス間の相対位相をアト秒精度で操作するとともに、このパルス対によって分子内に発生した二つの波束の相対位相を同様の精度で操作する事に成功した。さらに、これらの高度に制御された波束干渉の様子を、ピコメートルレベルの空間分解能とフェムト秒レベルの時間分解能で観測する事に成功した。
- b) APM を用いて、分子内の 2 個の波束の量子干渉を自在に制御する事に成功した。また、この高精度量子干渉をデコヒーレンス検出器として用いる事によって、熱的な分子集団や固体中の電子的なデコヒーレンスを実験的に検証した。さらに、固体パラ水素中の非局在化した量子状態 (vibron) の干渉を観測し制御する事に成功した。
- c) 光子場の振幅情報を分子の振動固有状態の量子振幅として転写する量子メモリーの開発を行なった。ここでは、フェムト秒光パルス対によって分子内に生成した 2 個の波束間の量子位相差をアト秒精度で操作し、これらの干渉の結果生成した第 3 の波束を構成する各振動固有状態のポピュレーションを観測することによって、光子場の振幅情報が高精度で分子内に転写されていることを証明することができた。また、フェムト秒光パルス対の時間間隔をアト秒精度で変化させることによって波束内の固有状態のポピュレーションの比率を操作できることを実証した。さらに、固体パラ水素中の振動量子状態 (vibron) の位相情報の 2 次元分布を操作し可視化することによって、固体 2 次元位相メモリーの可能性を実証することに成功した。
- d) 分子メモリーを量子コンピュータに発展させるためには、c) で行ったポピュレーション測定だけでなく、位相の測定を行う必要がある。そこで我々は、c) の第 3 の波束の時間発展を別のフェムト秒パルスを用いて実時間観測した。これによって、ポピュレーション情報と位相情報の両方を分子に書き込んで保存し、読み出すことが可能であることを実証した。振動固有状態の組を量子ビットとして用いる量子コンピュータの可能性が示された。さらに、分子波束を用いた量子フーリエ変換を開発した。
- e) 分子の振動波束を構成する振動固有状態の振幅と位相を強レーザー場で制御することに成功した。
- f) バルク固体中の原子の超高速 2 次元運動をフェムト秒単位で制御し画像化する新しい光技術を開発した。
- g) ほぼ絶対零度 (~50 ナノケルビン) まで冷やした極低温のルビジウム原子をミクロンレベルで整列させた人工原子結晶にアト秒精度のコヒーレント制御法を適用することによって、3 万個の粒子の量子多体問題を近似無しに 1 ナノ秒 (ナノ =  $10^{-9}$ ) 以内でシミュレートできる世界唯一・最速の「超高速量子シミュレータ」を開発することに成功した。それぞれ異なる研究分野で発展してきた「超高速化学」と「極低温物理」の手法を融合させた世界初の試みであり、材料科学・固体物理・溶液化学など広範囲の領域に波及効果を及ぼす新しい方法論として期待されている。
- h) 上記の人工原子結晶とアト秒精度のコヒーレント制御法を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子コンピュータ」の開発を進めている。

B-1) 学術論文

**Y. CHEW, T. TOMITA, T. P. MAHESH, S. SUGAWA, S. de LÉSÉLEUC and K. OHMORI**, “Ultrafast Energy Exchange between Two Single Rydberg Atoms on a Nanosecond Timescale,” *Nat. Photonics* **16**, 724–729 (2022). (Front cover page highlight) DOI: 10.1038/s41566-022-01047-2

B-4) 招待講演

大森賢治, 「量子力学に残された 100 年の謎に迫る」, LG Japan Lab (株) 横浜 R&D Center 開所式・記念講演, 横浜, 2022 年 7 月.

大森賢治, 「量子力学に残された 100 年の謎に迫る」, 令和 4 年度 (2022 年度) 第 122 回 熊本県立熊本高等学校 創立記念講演会, 熊本, 2022 年 10 月.

大森賢治, 「ロックミュージシャンだった物理学者」, Kumamoto Education Week 2023——みんなの夢が未来を創る——オープニングトーク, 熊本, 2023 年 1 月.

大森賢治, 「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」, KEK (高エネルギー加速器機構) 素核研・物構研 連携研究会, 高エネルギー加速器機構, 筑波 (オンライン開催), 2023 年 2 月.

大森賢治, 「量子力学 100 年の謎と量子コンピュータへの挑戦」, 文部科学省 GIGA スクール特別講座, 岡崎コンファレンスセンター, 岡崎, 2023 年 3 月.

大森賢治, 「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」, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学, 東京, 2023 年 3 月.

大森賢治, 「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」, 自然科学研究機構 経営協議会・教育研究評議会, 御茶ノ水ソラシティカンファレンスセンター, 東京, 2023 年 3 月.

大森賢治, 「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」, ムーンショット目標 6 公開シンポジウム 2023・プロジェクト紹介講演, ヘルサール秋葉原, 東京, 2023 年 3 月.

**K. OHMORI**, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” The 4th Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (APTQS 2022), 精華大学, Beijing (China) (Online), April 2022.

**K. OHMORI**, “Moonshot proposal: Large-scale and high-coherence fault-tolerant quantum computer with dynamical atom arrays,” ColdQuanta, Inc., Boulder (USA) (Hybrid), July 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” Special Summer 2022 Quantum Seminar Series, CUBit Quantum Initiative, University of Colorado Boulder and JILA/NIST, Boulder (USA) (Hybrid), July 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” ColdQuanta, Inc., Boulder (USA) (Hybrid), July 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum computer/simulator operating at the single-atom level,” Virtual Humboldt Colloquium “Top Global Research” and the Humboldt Network: New Frontiers of German-Japanese Scientific Cooperation, Alexander von Humboldt Foundation, Germany (Online), November 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum computer/simulator with attosecond precision,” The 4th International Symposium on Quantum Physics and Quantum Information Sciences, 北京量子信息科学研究院 (Beijing Academy of Quantum Information Sciences), Beijing (China) (Online), November 2022.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays,” The Chicago Quantum Exchange (CQE) Seminar, The University of Chicago, Chicago (USA) (Hybrid), February 2023.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulation and quantum computing with ultracold atom arrays,” MIT-Harvard Center for Ultracold Atoms (CUA) Seminar, Harvard University, Cambridge (USA), February 2023.

#### B-5) 特許出願

特許登録(米国)US11567450,「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法(Quantum Simulator and Quantum Simulation Method)」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), 武井宣幸(自然科学研究機構), 豊田晴義, 大竹良幸, 兵土知子, 瀧口優(浜松ホトニクス)(登録日 2023年1月31日).

特願 2020-145826,「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), シルヴァンド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司(自然科学研究機構), 大竹良幸, 豊田晴義(浜松ホトニクス), 2020年.

特願 2020-145812,「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), シルヴァンド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司(自然科学研究機構), 大竹良幸, 豊田晴義(浜松ホトニクス), 2020年.

WO2022045146 (PCT),「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), シルヴァンド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司(自然科学研究機構), 大竹良幸, 豊田晴義(浜松ホトニクス), 2020年.

WO2022045147 (A1) (PCT),「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人(浜松ホトニクス), 大森賢治(自然科学研究機構), 安藤太郎(浜松ホトニクス), シルヴァンド レゼルック, 富田隆文, 素川靖司(自然科学研究機構), 大竹良幸, 豊田晴義(浜松ホトニクス), 2020年.

#### B-6) 受賞, 表彰

周 鳥居 諭来, 第9回SOKENDAI賞(2022).

#### B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

European Science Foundation (ESF), ESF College of Expert Reviewers (2018-).

European Commission, HORIZON 2020, EU Future and Emerging Technologies, Scientific and Industrial Advisory Board (SIAB) (2017-).

Center for Quantum Engineering, Research and Education (CQuERE), TCG, CREST (India), Scientific Advisory Board (2021-).

日本分光学会代議員(2022-).

学会の組織委員等

原子・分子・光科学(AMO)討論会プログラム委員(2003-).

iSAP HAMAMATSU (International Symposium on Advanced Photonics) 組織委員(2016-).

米国ゴードン研究会議 (Gordon Research Conference: GRC, USA) “Quantum Control of Light and Matter,” 2023 議長, 2021 議長 (Covid-19 パンデミックのため 2023 年に延期) (2019-).

米国ゴードン研究会議 (Gordon Research Conferences: GRC, USA) 評議会メンバー (2019-).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

文部科学省 科学技術・学術審議会 専門委員 (2015-).

文部科学省 科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会 主査代理 (2015-2023), 主査 (2023-).

文部科学省 研究計画・評価分科会 臨時委員 (2023-).

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」(研究総括: 荒川泰彦) 中間評価委員 (2020-).

学会誌編集委員

*Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, IOP, UK, Section Editor for Quantum Technologies (2019-) and Executive Editorial Board (2021-).

競争的資金等の領域長等

内閣府「ムーンショット型研究開発制度」, 「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・マネージャー (PM) (2022-).

文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」量子情報処理・大規模基礎基盤研究, 「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用」, 研究代表者 (2018-).

その他

冷却原子型・量子コンピュータ開発において従来技術を2桁上回る世界最速の制御量子ゲート(量子コンピューティングに不可欠な条件つき2量子ビットゲート)を達成し, *Nature Photonics* 2022年10月号の表紙を飾るとともに, 日米欧中を中心に世界中の200件以上のニュース報道でハイライトされることによって, 分子研の世界的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献. (<https://www.ims.ac.jp/news/2022/09/0824.html>)

上記の世界最速の制御量子ゲート(量子コンピューティングに不可欠な条件つき2量子ビットゲート)の成果を受けて, 日本の学術会議はもとより, 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), 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の数々や, ドイツのフンボルト財団, 原子物理分野で由緒ある大規模な国際会議 ICPEAC (今年の開催地: オタワ) などから, 次々にコロキウムや全体講演 (Plenary Lecture) 等に招待され, 世界のアカデミアで大反響を呼んでおり, 分子研の世界的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献.

上記の世界最速の制御量子ゲート(量子コンピューティングに不可欠な条件つき2量子ビットゲート)の成果を受けて, 日本光学会誌「光学」において「2022年の日本の光学研究を代表する成果」として解説記事を依頼されている他, 「日本物理学会誌」, 応用物理学会機関誌「応用物理」, 自動車技術会誌「自動車技術」などからも, 次々に解説記事を依頼されるなど, 光学, 物理学, 自動車技術など様々な研究分野に強烈なインパクトを与え, 分子研の全国的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献.

文部科学省の指名を受けて、量子科学技術をテーマにした文部科学省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」の企画と講師を務めることによって、分子研を「日本における量子科学技術の中心拠点」として広く社会に認知させるとともに、わが国の量子科学技術の将来を担う若い世代の人材育成に大きく貢献。

日本の量子技術政策の象徴である「文科省Q-LEAP プロジェクト」の前半(2018–2022年度)のステージゲート審査(2022年5月12日)において最高評価「S:評価項目を満たしており、特に優れたところが認められる」を獲得し(2022年6月24日に結果通知)、分子研の全国的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文部科学省 科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会の主査代理 専門委員(2015–2023)、同委員会の主査(2023–現在)、ならびに文部科学省 研究計画・評価分科会 臨時委員(2023–現在)として、量子テクノロジー開発および分子研 UVSOR を含む量子ビーム(放射光施設・大型レーザー施設)利用推進に関する政策検討に大きく貢献。

世界最高レベルの学術会議である米国ゴードン研究会議(Gordon Research Conferences: GRC, USA)の評議会メンバー(2019–)としてGRCの運営に貢献することによって、科学技術分野全般における分子研の国際的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

量子科学技術分野における世界最高レベルの学術会議である米国ゴードン研究会議(Gordon Research Conference: GRC, USA)“Quantum Control of Light and Matter”の2023年会議議長、2021年会議議長(Covid-19 パンデミックのため2023年に延期)、および2019年会議副議長として2017年から2023年の長期に渡り、GRCの運営に貢献することによって、量子科学技術分野における分子研の国際的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

米国を代表する量子テクノロジー企業からの強い要望で、分子研・大森グループとの今後の協業に向けた協議を継続的に進めることによって(2022年2月18日–)、米国の産業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文部科学省と、わが国の量子科学技術政策に関する意見交換・ブレインストーミングを継続的に行うことによって日本政府の政策立案、および日本政府に対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

科学技術推進機構(JST)に対して国内外の研究動向やJSTが推進すべき研究領域などについてアドバイスを行うことによってわが国の量子技術の発展と分子研のプレゼンス向上に貢献。

文部科学省研究振興局大学研究基盤整備課のメンバーに対して、大森グループの超高速量子シミュレータ・量子コンピュータラボの研究開発状況に関するレクチャーおよびラボツアー(2023年3月30日)を行うことによって、日本政府に対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

#### B-8) 大学等での講義、客員

Heidelberg University(ドイツ), 客員教授(フンボルト賞受賞者), 2012年–.

総合研究大学院大学物理科学研究科, 集中講義「量子動力学」, 2022年12月13日, 15日, 20日, 22日.

#### B-9) 学位授与

周 鳥居 諭来, 「光ピンセット配列中の冷却リユードバリ原子を用いた超高速量子ダイナミクスの研究」, 2022年9月, 博士(理学).

## B-10) 競争的資金

内閣府「ムーンショット型研究開発制度」,「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 (2022年度-2030年度).

文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」量子情報処理・大規模基礎基盤研究,「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用」, 大森賢治 (2018年度-2028年度).

内閣府官民研究開発投資拡大プログラム (PRSIM),「超高速・高機能な冷却原子型量子シミュレータ・コンピュータの高度化」, 大森賢治 (2021年度-2022年度).

科研費基盤研究 (B),「強相関リユードベリ原子を用いた非平衡量子開放系の量子シミュレーション」, 素川靖司 (2021年度-2025年度).

科研費研究活動スタート支援,「Rydberg atoms at sub-micron distance with overlapping electronic clouds」, Sylvain de LÉSÉLEUC (2019年度-2022年度).

科研費研究活動スタート支援,「冷却原子の個別観測と事後選択的統計処理に基づく開放量子多体系の研究」, 富田隆文 (2019年度-2022年度).

## B-11) 産学連携

浜松ホトニクス (株),「超高速量子シミュレータの開発」, 大森賢治 (2016年-).

(株) 日立製作所,「超高速量子コンピュータの開発」, 大森賢治 (2022年-).

ColdQuanta, Inc. (米国),「超高速量子コンピュータの開発」, 大森賢治 (2022年-).

## C) 研究活動の課題と展望

今後我々の研究グループでは, APM を高感度のデコヒーレンス検出器として量子論の基礎的な検証に用いると共に, より自由度の高い量子位相操作技術への発展を試みる。そしてそれらを希薄な原子分子集団や凝縮相に適用することによって, 「アト秒量子エンジニアリング」と呼ばれる新しい領域の開拓を目指している。当面は以下の5テーマの実現に向けて研究を進めている。

- ① デコヒーレンスの検証と抑制: デコヒーレンスは, 物質の波としての性質が失われて行く過程である。量子論における観測問題と関連し得る基礎的に重要なテーマであるとともに, テクノロジーの観点からは, 反応制御や量子情報処理のエラーを引き起こす主要な要因である。その本質に迫り, 制御法を探索する。
- ② 量子散逸系でのコヒーレント制御の実現: ①で得られる知見をもとにデコヒーレンスの激しい凝縮系でのコヒーレント制御法を探索する。
- ③ 原子・分子ベースの量子情報科学の開拓: アト秒精度の超高速コヒーレント制御技術によって, 原子・分子内の電子・振動固有状態を用いるユニタリ変換とそれに基づく量子情報処理の確立を目指す。さらに, 単一原子・分子の操作・読み出し技術の開発を進める。
- ④ 超高速量子シミュレータの開発: ほぼ絶対零度 (~50 ナノケルビン) まで冷やした極低温のルビジウム原子をマイクロレベルで整列させた人工原子結晶とアト秒精度の超高速コヒーレント制御技術を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子シミュレータ」のさらなる高機能化を目指す。

- ⑤ 超高速量子コンピュータの開発：極低温のルビジウム原子をマイクロレベルで整列させた人工原子結晶とアト秒精度の超高速コヒーレント制御技術を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子コンピュータ」の開発を進める。

これらの研究の途上で量子論を深く理解するための何らかのヒントが得られるかもしれない。その理解はテクノロジーの発展を促すだろう。我々が考えている「アト秒量子エンジニアリング」とは、量子論の検証とそのテクノロジー応用の両方を含む概念である。