

## 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))

ZHANG, Yichi (特任研究員 (IMS フェロー))

BHARTI, Vineet (特任研究員)

國見 昌哉 (特任研究員)

溝口 道栄 (大学院生)

CHEW, Yeelai (大学院生)

TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh (大学院生)

川本 美奈子 (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を照射すると、「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次元位相メモリの可能性を実証することに成功した。
- d) 量子メモリ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マイクロ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

**M. MIZOGUCHI, Y. ZHANG, M. KUNIMI, A. TANAKA, S. TAKEDA, N. TAKEI, V. BHARTI, K. KOYASU, T. KISHIMOTO, D. JAKSCH, A. GLÄTZLE, M. KIFFNER, G. MASELLA, G. PUPILLO, M. WEIDEMÜLLER and K. OHMORI**, “Ultrafast Creation of Overlapping Rydberg Electrons in an Atomic BEC and Mott-Insulator Lattice,” *Phys. Rev. Lett.* **124**, 253201 (7 pages) (2020).

#### B-4) 招待講演

**K. OHMORI**, “Ultrafast and ultracold quantum simulator with attosecond precision,” EU FET Project COPAC Symposium “Parallel Computing Quantum Devices,” Online, March 2021.

大森賢治, 「アト秒精度の超高速量子シミュレータ開発と量子コンピュータへの応用」, 応用物理学会 春季学術講演会 シンポジウム「量子コンピュータの現状と展望」, オンライン開催, 2021年3月.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulator with attosecond precision at ultracold temperatures,” Optics Seminars OIST, Online, December 2020.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulator with attosecond precision at ultracold temperatures,” Fundamental Sciences and Quantum Technologies using Atomic Systems (FSQT 2020), Online, September 2020.

**K. OHMORI**, “Ultrafast quantum simulator with attosecond precision at ultracold temperatures,” India-Japan Webinar on Quantum Technologies, Organized by the Embassy of India and by the Governments of India and Japan, Online, July 2020.

#### B-5) 特許出願

取得特許 US 10,824,114 B2, 「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 2020年11月3日).

#### B-7) 学会および社会的活動

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–).

European Research Council (ERC), Invited Expert Referee (2007–).

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

QuantERA (<https://www.quantera.eu>), Invited Remote Reviewer (2017–).

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

ゴードン研究会議 (Gordon Research Conference: GRC) “Quantum Control of Light and Matter,” 2021 議長, 2019 副議長 (2017–).

ゴードン会議 (Gordon Research Conference: GRC) 評議会メンバー (2019–).

International Symposium on Advanced Photonics “Next frontiers to be explored by advanced light source facilities” 組織委員 (2020).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

内閣官房イノベーション推進室イノベーション政策強化推進のための有識者会議委員 (2019).

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 専門委員 主査代理 (2015–).

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 (2020–2021).

学会誌編集委員

*Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, IOP, Editorial Board (2018–) and Section Editor for Quantum Technologies (2019–).

## その他

上記「B-1) 学術論文」に記載した大森グループ・超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ・ラボの最新の研究成果(2020年6月22日出版)「金属状の量子気体：全く新しい量子シミュレーション・プラットフォーム」(*Phys. Rev. Lett.* **124**, 253201 (2020))が、UC Boulder (米国コロラド大学ボルダー校)とNIST (米国国立標準技術研究所)の量子技術関連ホームページ「CUBit Quantum Initiative」や中日新聞・朝刊・社会面を始め、国内新聞各紙15件、および日米欧を中心とする世界中のニュースメディア42件の主要記事として大きく報道された。これによって、全世界的な分子研の知名度向上と研究力アピールに貢献。

ノーベル物理学賞発表(2020年10月6日)に先立ち、大森が日本テレビ放送網株式会社・報道局社会部より自然科学研究機構本部を通じ受賞候補者として取材を受け、写真・研究発表資料等を提出。並びに発表当日の大森の動静確認と受賞時の記者会見・映像取材のため記者の分子研待機の申し込み。

ノーベル物理学賞発表(2020年10月6日)に先立ち、大森がNHK本部(東京)や共同通信社よりノーベル物理学賞に関する取材を受ける。

大森賢治インタビュー記事：“今さら聞けない「そもそも量子力学って？」にトップ研究者が答えた！”(2020年8月18日)が「Yahoo! ニュース」「講談社・現代ビジネス」で大きく報道され、大森グループ・超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ・ラボの研究内容が全国の一般市民へ周知されることによって分子研の研究力アピールに貢献。Yahoo! ニュースではアクセスランキングの上位にランクされる。

文部科学省 科学技術学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室からの要請で、大森グループの超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ開発状況を室長始め量子研究推進室メンバーにレクチャー(2020年9月2日)することによって日本政府への分子研の研究力アピールに貢献。

文部科学省 研究振興局 基礎研究振興課長の分子研訪問(2020年9月4日)に際して大森グループ・超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ・ラボの視察に対応することによって日本政府への分子研の研究力アピールに貢献。

文部科学大臣政務官の分子研訪問(2020年7月2日)に際して大森グループ・超高速量子シミュレータ・量子コンピュータ・ラボの視察に対応することによって日本政府への分子研の研究力アピールに貢献。

内閣府 量子技術イノベーション戦略 最終報告(2020年1月)にロードマップ検討グループメンバー等として貢献するとともに、分子研・大森グループの超高速量子シミュレータが主要技術領域・重点課題としてハイライトされることによって分子研の国際的な認知度の向上に貢献。

長い伝統と世界的な権威を誇る米国のゴードン会議(Gordon Research Conference: GRC)の副議長(2019)、議長(2021)、評議会メンバー(2019-)として議長会議(2020年1月9日、シンガポール)に出席し、分子研の国際的な認知度の向上に貢献。

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・専門委員として、量子テクノロジー開発および量子ビーム(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貢献。

## B-8) 大学での講義、客員

Heidelberg University, 客員教授(フンボルト賞受賞者), 2012年-

## B-10) 競争的資金

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–2028年).

科研費 特別推進研究,「アト秒精度の超高速コヒーレント制御を用いた量子多体ダイナミクスの探求」, 大森賢治 (2016年–2021年).

科学技術振興機構さきがけ研究(受託研究),「極低温ドレスト原子集団の超精密制御による非可換トポロジカル量子現象の探索」, 素川靖司 (2016年–2020年).

## 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,「超高速量子シミュレータの開発」, 大森賢治 (2018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4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ミクロン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ミクロン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。