

6-3 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）

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) 超高速量子シミュレータの開発
- g) バルク固体の極限コヒーレント制御

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) ほぼ絶対零度まで冷やした極低温のルビジウム原子集団に APM を適用することによって、60 万個の粒子の量子多体問題を近似無しに1ナノ秒(10^{-9})以内にシミュレートできる世界最速の「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。

B-1) 学術論文

L. CHUNMEI, J. MANZ, K. OHMORI, C. SOMMER, N. TAKEI, J. C. TREMBLAY and Y. ZHANG, “Attosecond Control of Restoration of Electronic Structure Symmetry,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, 173201 (6 pages) (2018).

B-3) 総説, 著書

H. KATSUKI, N. TAKEI, C. SOMMER and K. OHMORI, “Ultrafast Coherent Control of Condensed Matter with Attosecond Precision,” *Acc. Chem. Res.* **51**, 1174–1184 (2018). (*Invited Paper*)

B-4) 招待講演 (* 基調講演)

大森賢治, 「量子力学に残された100年の謎に迫る」, 浜松コンファレンス, 浜松(日本), 2018年11月.*

大森賢治, 「量子力学に残された100年の謎に迫る」, 大阪大学博士課程教育リーディングプログラム「インタラクティブ物質科学・カデットプログラム」第6回インタラクティブ交流会, 関西セミナーハウス, 京都(日本), 2018年8月.*

K. OHMORI, “Ultrafast many-body electron dynamics in a strongly correlated ultracold Rydberg gas,” CQOM Colloquium, Aarhus University, Aarhus (Denmark), May 2018.

K. OHMORI, “Ultrafast many-body electron dynamics in a strongly correlated ultracold Rydberg gas,” Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching (Germany), March 2018.

K. OHMORI, “Ultrafast many-body electron dynamics in a strongly correlated ultracold Rydberg gas,” JQI Special Seminar, Joint Quantum Institute, College Park (U.S.A.), March 2018.

大森賢治, 「原子レベルで動作する世界最速の量子シミュレーター」, 量子物理学・ナノサイエンス第216回セミナー, 東京工業大学, 東京(日本), 2018年2月.

N. TAKEI, “Ultrafast many-body electron dynamics in a strongly correlated ultracold Rydberg gas,” The 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, APA Hotel Kanazawa ekimae, Kanazawa (Japan), September 2018.

武井宣幸, 「強相関リユードベリ原子を用いた超高速量子シミュレーター」, 第14回エクストリームフォトニクス研究会「アト秒から秒にいたるダイナミクス研究の最前線」, 理化学研究所和光キャンパス, 和光(日本), 2018年2月.

N. TAKEI, “Ultrafast many-body electron dynamics in a strongly correlated ultracold Rydberg gas,” Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment (LSC) 2018, Pacifico Yokohama, Yokohama (Japan), April 2018.

S. SUGAWA, “Experimental extraction of Chern numbers from quantum-simulated monopoles,” Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology, Taipei (Taiwan), December 2018.

素川靖司, 「冷却原子を用いたトポロジカル不変量の測定」, 応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会「量子エレクトロニクスによる未来型情報処理」, 軽井沢(日本), 2018年12月.

B-5) 特許出願

特願 2017-077478, 特開 2018-180179, 「量子シミュレータおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人, 大森賢治, 安藤太郎, 武井宣幸, 豊田晴義, 大竹良幸, 兵土知子, 瀧口 優(浜松ホトニクス(株), 自然科学研究機構), 2017年.

Application number: US15/945,016, Publication number: US 2018/0292786 A1, “Quantum simulator and quantum simulation method,” H. SAKAI(Hamamatsu Photonics K.K.), K. OHMORI(NINS), T. ANDO(Hamamatsu Photonics K.K.), N. TAKEI(NINS), H. TOYODA, Y. OHTAKE, T. HYODO and Y. TAKIGUCHI(Hamamatsu Photonics K.K.), Filing date: Apr. 4, 2018, Publication date: Oct. 11, 2018.

B-6) 受賞, 表彰

大森賢治, 文部科学大臣表彰 科学技術賞 (2018).

大森賢治, 松尾財団宅間宏記念学術賞 (2017).

大森賢治, 独フンボルト賞 (2012).

大森賢治, アメリカ物理学会フェロー表彰 (2009).

大森賢治, 日本学士院学術奨励賞 (2007).

大森賢治, 日本学術振興会賞 (2007).

大森賢治, 光科学技術研究振興財団研究表彰 (1998).

大森賢治, 東北大学教育研究総合奨励金 (1995).

香月浩之, 英国王立化学会 PCCP 賞 (2009).

香月浩之, 光科学技術研究振興財団研究表彰 (2008).

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

分子科学研究会委員 (2002–2006).

分子科学会設立検討委員 (2005–2006).

分子科学会運営委員 (2006–2007, 2010–2017).

原子衝突研究協会運営委員 (2006–2007).

学会の組織委員等

14th International Conference on Spectral Line Shapes 国際プログラム委員 (1998–2006).

21st International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions 準備委員, 組織委員 (1999).

The 5th East Asian Workshop on Chemical Reactions 組織委員長 (2001).

分子構造総合討論会実行委員 (1995).

第 19 回化学反応討論会実行委員 (2003).

原子・分子・光科学 (AMO) 討論会プログラム委員 (2003–).

APS March meeting; Focus Topic Symposium “Ultrafast and ultrahighfield chemistry” 組織委員 (2006).

APS March meeting satellite “Ultrafast chemistry and physics 2006” 組織委員 (2006).

第 22 回化学反応討論会実行委員 (2006).

8th Symposium on Extreme Photonics “Ultrafast Meets Ultracold” 組織委員長 (2009).

The 72nd Okazaki Conference on “Ultimate Control of Coherence” 組織委員 (2013).

A Peter Wall Colloquium Abroad and The 73rd Okazaki Conference on “Coherent and Incoherent Wave Packet Dynamics” 組織委員 (2013).

1st International Symposium on Advanced Photonics “Quantum Many-Body Science and Technology” 組織委員 (2016).

Gordon Research Conference on Quantum Control of Light and Matter 2019 副議長, 2021 議長 (2017–).

2nd International Symposium on Advanced Photonics “Attosecond Science” 組織委員 (2018).

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 量子科学技術委員会 専門委員 (主査代理) (2015–).

文部科学省 科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会 量子情報処理 (主に量子シミュレーション) に係るロードマップ検討グループメンバー (2017–).

日本学術振興会 日仏先端科学シンポジウム PGM (2010–2012).

日本学術振興会 HOPE ミーティング 事業委員 (2012–2016).

日本学術振興会 日独学術コロキウム 学術幹事 (2013–2014).

European Research Council (ERC), Invited Panel Evaluator.

European Research Council (ERC), Invited Expert Referee.

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

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

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

学会誌編集委員

Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, IOP, Editorial Board (2018–).

Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, IOP, International Advisory Board (2015–2017).

その他

文部科学省からの依頼で, 林芳正文部科学大臣と欧州連合 (EU) Carlos Moedas 欧州委員 (研究・科学・イノベーション担当) との間の「量子技術分野の今後の協力に関する合意」(2018 年 1 月 8 日, ブリュッセル) に貢献.

文部科学省からの依頼で, 日米間の「量子技術分野の今後の協力」のための米国国立科学財団 (NSF) および米国エネルギー省 (DOE) との日米政府間会議 (2018 年 3 月 9 日, ワシントン DC) に出席し, 林芳正文部科学大臣と NSF の France Córdova 長官との会談 (2018 年 5 月 1 日, ワシントン DC) における量子技術分野での日米協力に関する意見交換の実現に大きく貢献した.

EU の Quantum Technology Flagship の一環として開催された European Quantum Technologies Community Meeting (2018 年 4 月 19 日, ZEISS Forum, Oberkochen, Germany) に日本の量子科学技術コミュニティの代表として招かれ, 日本・EU・米国の各代表・政府関係者とのパネルディスカッションにおいて, 量子科学技術分野における日・米・EU 間の協力について議論。

平成16年度安城市シルバーカレッジ「原子のさざ波と不思議な量子の世界」。

岡崎市立小豆坂小学校 第17回・親子おもしろ科学教室「波と粒の話」。

立花隆+自然科学研究機構シンポジウム 爆発する光科学の世界——量子から生命体まで——「量子のさざ波を光で制御する」。

B-8) 大学での講義, 客員

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」, 2018 年 12 月 17 日–27 日。

University of Heidelberg, 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)。

科学技術振興機構CREST 研究, 「アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御」, 大森賢治 (2010 年–2016 年)。

科研費 基盤研究(A), 「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御法を用いた量子／古典境界の探索」, 大森賢治 (2009 年–2011 年)。

科研費 特別研究員奨励費, 「非線形波束干渉法の開発とデコヒーレンスシミュレーターへの応用」, 大森賢治 (2009 年–2010 年)。

科研費 特別研究員奨励費, 「極低温原子分子の超高速コヒーレント制御」, 大森賢治 (2008 年–2010 年)。

科研費 基盤研究(B), 「遺伝アルゴリズムを用いたデコヒーレンスの検証と制御法の開発」, 大森賢治 (2006 年–2007 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 分子ベースの量子情報科学の開拓：高精度の量子位相操作によって分子内の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実現を目指す。さらに、単一分子の操作を目指して、冷却分子の生成を試みる。
- ④ レーザー冷却された原子集団のコヒーレント制御：レーザー冷却された原子集団への振幅位相情報の書き込みとその時間発展の観測・制御。さらに極低温分子の生成とコヒーレント制御。これらを通じて、量子多体問題のシミュレーション実験、量子情報処理、極低温化学反応の観測と制御を目指す。

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。