

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：超高速コヒーレント光科学

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ーの開発
- 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。
- d) 分子メモリーを量子コンピューター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ー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) 極低温リュードベリ原子集団の多体相互作用を、超短パルスレーザーで実時間観測し制御するための新しい実験手法を開発した。
- g) パ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。

B-1) 学術論文

H. KATSUKI, Y. KAYANUMA and K. OHMORI, “Optically Engineered Quantum Interference of Delocalized Wavefunctions in a Bulk Solid: The Example of Solid Para-Hydrogen,” *Phys. Rev. B* **88**, 014507 (6 pages) (2013).

T. BREDTMANN, H. KATSUKI, J. MANZ, K. OHMORI and C. STEMMLE, “Wavepacket Interferometry for Nuclear Densities and Flux Densities,” *Mol. Phys.* **111**, 1691–1696 (2013).

H. KATSUKI, J. C. DELAGNES, K. HOSAKA, K. ISHIOKA, H. CHIBA, E. S. ZIJLSTRA, M. E. GARCIA, H. TAKAHASHI, K. WATANABE, M. KITAJIMA, Y. MATSUMOTO, K. G. NAKAMURA and K. OHMORI, “All-Optical Control and Visualization of Ultrafast Two-Dimensional Atomic Motions in a Single Crystal of Bismuth,” *Nat. Commun.* **4**, 2801 (2013).

B-4) 招待講演

K. OHMORI, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Laser Science XXIX, (the 29th Annual Meeting of the American Physical Society), Hilton Bonnet Creek, Orlando (U.S.A.), October 2013.

K. OHMORI, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Conference on Quantum Information and Quantum Control, Fields Institute, Toronto (Canada), August 2013.

K. OHMORI, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Gordon Research Conference on “Quantm Control of Light and Matter,” Mount Holyoke College, South Hadley (U.S.A.), July–August 2013.

K. OHMORI, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” Quantum Dynamics and Spectroscopy in Condensed-Phase Materials and Bio-Systems, TSRC, Telluride (USA), July 2013.

K. OHMORI, “Spatiotemporal Quantum Engineering with Picometer and Attosecond Precision,” Strasbourg Physique Seminaires, Strasbourg University, Strasbourg (France), May 2013.

K. OHMORI, “Spatiotemporal Quantum Engineering with Picometer and Attosecond Precision,” Atomic and laser physics seminar series, Department of Physics, University of Oxford, Oxford (U.K.), May 2013.

K. OHMORI, “Ultrafast Coherent Control of an Ultracold Rydberg Gas,” The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy (The US-Japan QELS-11) “Ultimate Quantum Systems of Light and Matter—Control and Applications,” Nara (Japan), April 2013.

N. TAKEI, “Ultrafast coherent control of an ultracold Rydberg gas,” 15th Japan-Korea Symposium on Molecular Science: Hierarchical Structure from Quantum to Functions of Biological Systems, Hotel Kitano Plaza Rokkoso, Kobe (Japan), July 2013.

B-6) 受賞, 表彰

- 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–).
- 原子衝突研究協会運営委員 (2006–2007).

学会の組織委員等

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

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

- 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–).
- 日本学術振興会日独学術コロキウム 学術幹事 (2014).
- European Research Council (ERC), Invited Panel Evaluator.
- European Research Council (ERC), Invited Expert Referee.

その他

- 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

University of Heidelberg, 客員教授, 2012年-

名古屋大学大学院理学研究科, 特別講義「量子動力学」2013年1月17日-18日.

B-10) 競争的資金

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-2015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).

科研費基盤研究(A), 「サブ10アト秒精度の量子位相操作と単一分子量子コンピューティング」大森賢治 (2003年-2005年).

科研費特定領域研究(2)「強レーザー光子場における分子制御」計画班, 「単一原子分子のアト秒コヒーレント制御」大森賢治 (2003年-2005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。

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。

量子散逸系でのコヒーレント制御の実現: 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。

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。

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, 多体量子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。