

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

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。
- 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。

B-1) 学術論文

H. GOTO, H. KATSUKI, H. IBRAHIM, H. CHIBA and K. OHMORI, “Strong-Laser-Induced Quantum Interference,” *Nat. Phys.* **7**, 383–385 (2011).

Y. OKANO, H. KATSUKI, Y. NAKAGAWA, H. TAKAHASHI, K. G. NAKAMURA and K. OHMORI, “Optical Manipulation of Coherent Phonons in Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Thin Films,” *Faraday Discuss.* **153**, 361–373 (2011). (invited paper)

B-4) 招待講演

大森賢治, 「Single molecule can calculate 1000 times faster than supercomputers」東京大学グローバルCOE プログラム「未来を拓く物理学結集教育研究拠点」セミナー, 東京大学本郷キャンパス, 2011年12月.

K. OHMORI, “Single Molecule can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers,” International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2011, Tainan (Taiwan), December 2011.

K. OHMORI, “Optically Engineered Quantum States in Ultrafast and Ultracold Systems,” Meet APS Fellow Forum, National Tsing Hua University, Hsinchu (Taiwan), December 2011.

K. OHMORI, “Attosecond Quantum Engineering,” Germany-Japan Colloquium “From the Early Universe to the Evolution of Life,” Heidelberg (Germany), December 2011.

大森賢治, 「世界最速スパコンより1000倍速くナノより小さい1分子コンピューター」東北大学グローバルCOE プログラム「分子系高次構造体化学国際教育研究拠点」シンポジウム 2011, 東北大学片平キャンパス, 2011年11月.

K. OHMORI, “Single Molecule can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers,” Frontier in Molecular Science based on Photo and Material, Paris (France), November 2011.

大森賢治, 「原子のさざ波と不思議な量子の世界」第104回国研セミナー, 分子科学研究所, 2011年11月.

K. OHMORI, “Ultrafast Computing with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule,” International Workshop on Simulation and Manipulation of Quantum Systems for Information Processing (SMQS-IP), Juelich (Germany), October 2011.

K. OHMORI, “Ultrafast Computing with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule,” International Workshop “Engineering and Control of Quantum Systems,” Dresden (Germany), October 2011.

K. OHMORI, “Ultrafast Computing with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule,” International Workshop on Coherence and Decoherence at Ultracold Temperatures, Institute for Advanced Study of Technische Universitat Munchen, Garching/Munich (Germany), September 2011.

K. OHMORI, “Coherent Control; Present and Future,” Gordon Research Conference on “Quantum Control of Light and Matter,” Mount Holyoke College, South Hadley (U.S.A.), July–August 2011.

K. OHMORI, “Single Molecule Can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers,” Special Seminar at Physics Department of Oxford University, Oxford (U.K.), July 2011.

K. OHMORI, “Optical Manipulation of Coherent Phonons in Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Thin Films,” Faraday Discussion 153: Coherence and Control in Chemistry, Leeds (U.K.), July 2011.

K. OHMORI, “Single Molecule can Calculate 1000 Times Faster than Supercomputers,” 14th Korea-Japan Joint Symposium on Frontiers of Molecular Science “New Visions for Spectroscopy and Computation: Temporal and Spatial Adventures of Molecular Sciences,” Busan (Korea), July 2011.

大森賢治,「量子シミュレーター」第8回AMO 討論会, 東京大学本郷キャンパス, 2011年 6月.

K. OHMORI, “Molecular Eigenstate-Based Information Processing,” Lorentz Center Workshop on “Molecular Logic,” Lorentz Center, Leiden (Netherlands), May–June 2011.

大森賢治,「アト秒ピコメートル精度の時空間量子エンジニアリング～極低温分子からバルク固体まで～分子コンピューターの実現に向けて」, Chemistry and Fundamental Science, 東京大学駒場キャンパス, 2011年 5月.

大森賢治,「量子さざ波... 量子の波を光で制御する～極低温原子からバルク固体まで」, 京都大学G-COE セミナー「光・電子理工学コロキウム」, 京都大学桂キャンパス, 2011年 3月.

K. OHMORI, “Ultrafast Fourier Transform with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule,” Séminaire SYRTE, l’Observatoire de Paris, Paris (France), March 2011.

K. OHMORI, “Ultrafast Fourier Transform with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule,” Séminaire IPCMS, Université de Strasbourg, Strasbourg (France), March 2011.

K. OHMORI, “Ultrafast Fourier Transform with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule,” Dynamics and Manipulation of Quantum Systems 2011, Tokyo (Japan), February 2011.

K. OHMORI, “Ultrafast Fourier Transform with a Femtosecond-Laser-Driven Molecule,” ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules, Tokyo (Japan), January 2011.

H. KATSUKI, “Optically engineered quantum interference of delocalized excitons in solid parahydrogen,” 11th Tamura Symposium, Osaka Prefecture University, Sakai (Japan), December 2011.

H. KATSUKI, “Optically engineered quantum interference of delocalized excitons in solid parahydrogen,” IMS Symposium on “Recent Developments of Spectroscopy and Spatial and Temporal Hierarchical Structures in Molecular Science,” IMS, Okazaki, October 2011.

香月浩之,「アト秒精度で分子の波を制御する」, 第一回光科学異分野横断萌芽研究会, かんぼの宿, 奈良, 2011年 8月.

H. KATSUKI, “Ultrafast quantum interference in solid para-hydrogen,” MATRIX2011, University of British Columbia, Vancouver (Canada), July 2011.

香月浩之,「凝縮系量子状態のコヒーレント制御と読み出し」, 第12回エクストリームフォトリクス, 理研, 2011年 6月.

H. KATSUKI, “WAVE PACKET INTERFEROMETRY IN SOLID PARA-HYDROGEN,” 15th East Asian Workshop on Chemical Dynamics, POSCO international center, POSTECH, Pohang (Korea), May 2011.

H. KATSUKI, “Wave Packet Interferometry in Solid Para-hydrogen,” JSPS Asian CORE Workshop on Next Generation Ultra-Short Pulse Lasers for High Field and Ultrafast Science, RIKEN, Japan, March 2011.

B-6) 受賞, 表彰

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, 分子科学研究奨励森野基金 (2011).

香月浩之, 文部科学大臣表彰・若手科学者賞 (2011).

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).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

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

東京大学大学院理学系研究科, 流動講座教授, 2009年4月–2011年3月.

B-10) 競争的資金

科学技術振興機構CREST事業, 「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).

科研費基盤研究(B),「アト秒波束干渉制御法の開発と量子コンピューティングへの応用」大森賢治 (2001年-2002年).

科研費特定領域研究(A)「物質設計と反応制御の分子物理化学」,「ファンデルワールス半衝突反応のフェムト秒ダイナミクスと超高速光量子制御」大森賢治 (1999年-2001年).

科研費基盤研究(C),「強レーザー場中の金属クラスターのクーロン爆発および高調波発生の実時間観測と制御」大森賢治 (1999年-2000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。