

電子状態動力学研究部門

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) 強光子場非線形過程の制御
- f) 高精度の化学反応制御

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量子論的な重ね合わせ状態の検証に応用した。同様に、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検出する事に成功した。
- 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。

- e) アト秒精度のコヒーレント制御法を，強光子場中の希ガス原子の非線形電離過程に応用した。
- f) アト秒精度のコヒーレント制御法を開発したことによって電子励起状態を介した反応制御が可能になった。今後，多原子分子の光解離過程への応用を計画している。

B-1) 学術論文

H. KATSUKI, H. CHIBA, B. GIRARD, C. MEIER and K. OHMORI, “Visualizing Picometric Quantum Ripples of Ultrafast Wave-Packet Interference,” *Science* **311**, 1589–1592 (2006).

K. OHMORI, H. KATSUKI, H. CHIBA, M. HONDA, Y. HAGIHARA, K. FUJIWARA, Y. SATO and K. UEDA, “Real-Time Observation of Phase-Controlled Molecular Wave-Packet Interference,” *Phys. Rev. Lett.* **96**, 093002 (4 pages) (2006).

Y. TERANISHI, Y. OHTSUKI, K. HOSAKA, H. CHIBA, H. KATSUKI and K. OHMORI, “Implementation of Quantum Gate Operations in Molecules with Weak Laser Fields,” *J. Chem. Phys.* **124**, 114110 (9 pages) (2006).

B-4) 招待講演

大森賢治, 「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御」分子研研究会「凝縮系のコヒーレンス制御と超高速ダイナミクス」岡崎, 2006年3月.

大森賢治, 「アト秒コヒーレント制御法の開発と応用」第13回原子衝突セミナー, 東京, 2006年4月.

K. OHMORI, “Observation and Control of Picometric Quantum Ripples in a Molecule,” 5th International Symposium for Ultrafast Surface Dynamics, Abashiri (Japan), May 2006.

K. OHMORI, “Visualizing and Controlling Picometric Quantum Ripples in Molecules,” The 1st Canada-Japan SRO-COAST Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Tokyo (Japan), July 2006.

大森賢治, 「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御」分子分光学夏期セミナー, 九重, 2006年7月.

K. OHMORI, “Visualizing and Controlling Picometric Quantum Ripples in Molecules,” 66th Okazaki Conference “Soft X-Ray Raman Spectroscopy and Related Phenomena,” Okazaki (Japan), August 2006.

大森賢治, 「量子のさざ波を光で制御する」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——, 東京, 2006年9月.

大森賢治, 「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御」ATI 生命機構プレ研究会, 東京, 2006年11月.

大森賢治, 「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御」第17回光物性研究会, 大阪, 2006年12月.

大森賢治, 「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御」原子衝突研究協会設立30周年記念式典, 東京, 2006年12月.

B-6) 受賞、表彰

大森賢治, 東北大学教育研究総合奨励金 (1995).

大森賢治, 光科学技術研究振興財団研究表彰 (1998).

大森賢治, 日本学術振興会賞 (2006).

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員、委員

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-).

原子衝突研究協会運営委員 (2006-).

学会の組織委員

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 Synposium “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).

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」

B-8) 他大学での講義、客員

東京工業大学応用セラミックス研究所, 「分子の量子コヒーレンス制御」2006年2月16日.

東京大学大学院工学系研究科, 「超高速量子動力学～量子光学の基礎からアト秒コヒーレント制御まで～」2006年7月3日-4日.

B-10) 外部獲得資金

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).

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).

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).

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).

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).

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。

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空間的に隔たった別の原子集団への転送法の実現を目指す。

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。