

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：12612  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26400415  
研究課題名(和文) 高強度レーザーによる多電子系超高速実時間イメージング法  
  
研究課題名(英文) Ultrafast multielectron systems with intense lasers  
  
研究代表者  
森下 亨 (Morishita, Toru)  
  
電気通信大学・量子科学研究センター・教授  
  
研究者番号：20313405  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高強度レーザー照射によって誘起される多電子系原子・分子の再衝突過程を利用した超高速イメージングについて、理論および計算手法を開発した。いくつかの系について高精度数値計算および解析理論により定量的な分析を行った。これにより、実時間原子分子ダイナミクスの研究に新しい道が開け、また高強度レーザーと物質の相互作用に関する深い知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We have developed theoretical and computational methods for ultrafast imaging of multi-electron atomic and molecular systems using rescattering processes induced by intense laser pulses. Quantitative studies for several systems were done. Our results open a new route to the time-resolved study of ultrafast atomic and molecular dynamics, and obtain deeper understanding of the intense laser-matter interaction.

研究分野：原子・分子・光物理学

キーワード：アト秒 強レーザー トンネルイオン化 断熱理論 シーガート法

### 1. 研究開始当初の背景

レーザー技術と関連する測定装置の進歩に伴い、高強度レーザーパルスを利用した、アト秒スケールの超高速原子分子イメージングに関する研究が活発に行われるようになってきている。近年、高強度レーザーパルス照射によって生じるトンネルイオン化再衝突過程が分子の構造に強く依存することが見出され、実験によって観測される高調波スペクトルや光電子スペクトルから分子構造を抽出する試みが行われるようになった。これまでの研究では、有効1電子描像に基づく解析が主として行われていたため、多電子の効果や原子核の運動を取り入れた理論解析手法の発展が望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、高強度レーザー照射によって誘起される分子の再衝突過程を利用した超高速イメージングについて、多電子の効果や核振動の効果を取り入れた理論的手法を構築することである。これまでに蓄積してきた、有効1電子モデルに基づく手法を多電子系に拡張する。そして複数の軌道が関与するといった、多電子電子状態まで含めたより複雑な分子の状態遷移を取り扱う。また、核振動効果を含めた関連する高強度レーザー場中の分子ダイナミクスの研究も行う。

### 3. 研究の方法

再衝突過程についての高精度数値計算、解析的理論を用いて研究を進める。高精度数値計算においては、多電子系の計算コード、および、クーロン3体系の波動関数を生成するコードの開発を行い、それらをもとに分子多体系ダイナミクスの分析を行う。解析的理論研究においては、分子内の電子の運動の時間スケールが、外場であるレーザー電場の時間変化よりもずっと遅いという事実に基づいた断熱理論を基礎にして、理論および計算手法の開発を行う。これらを基に分子イメージング手法を開拓する。

### 4. 研究成果

多電子原子について最も基礎的な2電子系の時間依存性を分析するための計算コードを開発、高速化し、強レーザー場中の多電子ダイナミクスの研究を行った。また、クーロン3体系の散乱状態の計算コードを精密化し、水素分子イオン同位体効果などを調べ、ダイナミクス研究に重要な知見を得た。

解析的理論研究について、静電場中の多電子系のトンネルイオン化の理論を完成させた。そして、ダイソン軌道を用いた定式化を行い、いくつかの原子について分析を行った。さらに、トンネルイオン化の分析において、核振動の効果の理論的取り扱いについて定量的な議論を行った。また、レーザー場中で歪められた複数の分子軌道の寄与を調べるため、実験グループと共同して研究をすすめ、

$\text{CH}_3\text{X}$  分子の高次高調波スペクトルの解析を行った。

光電子スペクトルから標的原子の抽出法の研究については、トンネルイオン化した電子の後方散乱成分から標的物質との散乱断面積を抽出する「分離公式」を断熱理論により導出し、実験結果と比較した。また、前方散乱成分からは散乱振幅の位相が抽出できることを見出し、高精度数値計算によって理論の検証を行った。

これらを含め、得られた結果を学術論文として発表した。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計21件)

1. "Photoionization of hydrogen in a strong static electric field", S. Ohgoda, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, Phys. Rev. A 95, 043417 (2017). 査読有、10.1103/PhysRevA.95.043417
2. "Weak-field versus Born-Oppenheimer asymptotics in the theory of tunneling ionization of molecules", O. I. Tolstikhin and T. Morishita, Phys. Rev. A 95, 033410 (2017). 査読有、10.1103/PhysRevA.95.033410
3. "First-order correction terms in the weak-field asymptotic theory of tunneling ionization in many-electron systems", V. H. Trinh, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 49, 195603 (2016). 査読有、10.1088/0953-4075/49/19/195603
4. "Carrier-envelope phase mapping in laser-induced electron diffraction", H. Geiseler, N. Ishii, K. Kaneshima, F. Geier, T. Kanai, O. I. Tolstikhin, T. Morishita, and J. Itatani, Phys. Rev. A 94, 033417 (2016). 査読有、10.1103/PhysRevA.94.033417
5. "Critical evaluation of attosecond time delays retrieved from photoelectron streaking measurements", H. Wei, T. Morishita, and C. D. Lin, Phys. Rev. A 93, 053412 (2016). 査読有、10.1103/PhysRevA.93.053412
6. "Near-Forward Rescattering Photoelectron Holography in Strong-Field Ionization: Extraction of the Phase of the Scattering Amplitude", Y. Zhou, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, Phys. Rev. Lett. 116, 173001 (2016). 査読有、10.1103/PhysRevLett.116.173001
7. "Imaging electronic excitation of NO by ultrafast laser tunneling ionization", T.

- Endo, A. Matsuda, M. Fushitani, T. Yasuike, O. I. Tolstikhin, T. Morishita, and A. Hishikawa, Phys. Rev. Lett. 116, 163002 (2016). 査読有、10.1103/PhysRevLett.116.163002
8. "Femtosecond two-photon Rabi oscillations in excited He driven by ultrashort intense laser fields", M. Fushitani, C.-N. Liu, A. Matsuda, T. Endo, Y. Toida, M. Nagasono, T. Togashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, Y. Hikosaka, T. Morishita, and A. Hishikawa, Nat. Photon. 10 102-105 (2016). 査読有、10.1038/nphoton.2015.228
  9. "Photoelectron sidebands induced by a chirped laser field for shot-by-shot temporal characterization of FEL pulses", C.-N. Liu, T. Morishita, M. Fushitani and A. Hishikawa J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 49, 034005 (2016). 査読有、10.1088/0953-4075/49/3/034005
  10. "Numerical simulation of the double-to-single ionization ratio for the helium atom in strong laser fields", Z. Chen, Y. Zheng, W. Yang, X. Song, J. Xu, L. F. DiMauro, O. Zatsarinny, K. Bartschat, T. Morishita, S.-F. Zhao, and C. D. Lin, Phys. Rev. A 92, 063427 (2015). 査読有、10.1103/PhysRevA.92.063427
  11. "Analysis of a shift of the maximum of photoelectron momentum distributions generated by intense circularly polarized pulses", M. Ohmi, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, Phys. Rev. A 92, 043402 (2015). 査読有、10.1103/PhysRevA.92.043402
  12. "Hyperspherical calculations of ultralow-energy collisions in Coulomb three-body systems", Y. Zhou, S. Watanabe, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, Phys. Rev. A 92, 032713 (2015). 査読有、10.1103/PhysRevA.92.032713
  13. "Weak-field asymptotic theory of tunneling ionization including the first-order correction terms: Application to molecules", V. H. Trinh, V. N. T. Pham, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, Phys. Rev. A 91, 063410 (2015). 査読有、10.1103/PhysRevA.91.063410
  14. "Observation of laser-induced electronic structure in oriented polyatomic molecules", P. M. Kraus, O. I. Tolstikhin, D. Baykusheva, A. Rupenyan, J. Schneider, C. Z. Bisgaard, T. Morishita, F. Jensen, L. B. Madsen, and H. J. Wörner, Nat. Comm. 6, 7039 (2015). 査読有、10.1038/ncomms8039
  15. "Structure factors for tunneling ionization rates of diatomic molecules", R. Saito, O. I. Tolstikhin, L. B. Madsen, and T. Morishita, At. Data. Nucl. Data Tables, 103–104, 4–49 (2015). 査読有、10.1016/j.adt.2015.02.001
  16. "Weak-field asymptotic theory of tunneling ionization: benchmark analytical results for two-electron atoms", V. H. Trinh, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 48, 061003 (2015). 査読有、10.1088/0953-4075/48/6/061003
  17. "Benchmarking accurate spectral phase retrieval of single attosecond pulses", H. Wei, A.-T. Le, T. Morishita, C. Yu, and C. D. Lin, Phys. Rev. A 91, 023407 (2015). 査読有、10.1103/PhysRevA.91.023407
  18. "Application of the many-electron weak-field asymptotic theory of tunneling ionization to atoms", I. Y. Tolstikhina, T. Morishita, and O. I. Tolstikhin, Phys. Rev. A 90, 053413 (2014). 査読有、10.1103/PhysRevA.90.053413
  19. "Rydberg states in the strong field ionization of hydrogen by 800, 1200 and 1600 nm lasers", Q. Li, X.-M. Tong, T. Morishita, C. Jin, H. Wei and C. D. Lin, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 47, 204019 (2014). 査読有、10.1088/0953-4075/47/20/204019
  20. "Rescattering photoelectron spectroscopy of small molecules", M. Okunishi, R.R. Lucchesse, T. Morishita, K. Ueda, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 195, 313-319 (2014). 査読有、10.1016/j.elspec.2013.12.002
  21. "Universality of Returning Electron Wave Packet in High-Order Harmonic Generation with Midinfrared Laser Pulses", A.-T. Le, H. Wei, C. Jin, V. N. Tuoc, T. Morishita, and C. D. Lin, Phys. Rev. Lett. 113, 033001 (2014). 査読有、10.1103/PhysRevLett.113.033001
- [学会発表](計9件)
1. "Near-Forward Rescattering Photoelectron Holography in Strong-Field Ionization", T. Morishita, Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics 12, Changchung (China), Sep 6-10, 2016
  2. "Atomic and Molecular Siegert States in a strong electric field", T. Morishita, RESONANCE AND NON-HERMITIAN QUANTUM MECHANICS 2016, Osaka Univ. (Osaka), Aug. 3-5, 2016

3. "Near-Forward Rescattering Photoelectron Holography in Strong-Field Ionization: Extraction of the Phase of the Scattering Amplitude", T. Morishita, Ultrafast Dynamics and Time-Resolved Interactions, Szeged (Hungary), June 26-28, 2015
4. "Tunneling ionization of atoms and molecules under intense laser fields", T. Morishita, International Conference on Electron Spectroscopy and Structure, ICESS-2015, Stony Brook Univ. Stony Brook NY. (USA), Sep 28-Oct 2, 2015
5. "Tunneling ionization of atoms and molecules under intense laser field", T. Morishita and O. I. Tolstikhin, International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Toledo (Spain), July 22-28, 2015.
6. "Adiabatic Theory of ionization of atoms by intense laser pulses", T. Morishita, Peking University, Beijing (China), Nov 3, 2014
7. "Atomic and molecular tunneling ionization in a static electric field: From tunneling to over-the-barrier regimes", T. Morishita, International Workshop on Strong Field Physics and Ultrafast Phenomena(SFPUP 2014) Zhangjiajie (China), 31st Oct-4th Nov, 2014
8. "Laser induced rescattering electron spectroscopy for ultrafast atomic and molecular imaging" T. Morishita, Atomic and molecular physics: a joint Japanese and French view over 120 years, "Abbaye des Vaux de Cernay", Cernay la Ville", Paris (France), July 21st to July 23rd, 2014
9. "Atomic and molecular tunneling ionization in a static electric field: From tunneling to over-the-barrier regimes" T. Morishita, LPHYS 14, 23 th International Laser Physics Workshop, Sofia (Burgaria), July 14-18, 2014

〔図書〕(計1件)

“アト秒科学”第2章(pp. 31-76)、森下亨、化学同人 2015

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://power1.pc.uec.ac.jp/~toru>

6. 研究組織

(1)研究代表者

森下 亨 (MORISHITA, Toru)

電気通信大学・量子科学研究センター・教授

研究者番号：20313405

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者 なし