

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00887

研究課題名(和文) レーザートンネル電子運動量計測に基づく電子ダイナミクス可視化法の開拓

研究課題名(英文) Developing electron-dynamics imaging methods by laser-tunneling electron momentum measurements

研究代表者

菱川 明栄 (Hishikawa, Akiyoshi)

名古屋大学・物質科学国際研究センター・教授

研究者番号：50262100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 42,800,000円

研究成果の概要(和文)：分子トンネルイオン化過程の理解を目指して、高繰返しレーザーを用いた新しい電子イオンコインシデンス計測系を構築した。円偏光レーザー場における水素分子のトンネル電子運動量はトーラス形状を示し、分子座標系3次元分布から最外殻占有分子軌道の特徴を読み出せることが明らかになった。一方、四フッ化炭素においては反跳座標系トンネル角度分布が明瞭な円偏光ヘリシティ依存性を示すことが見出された。イオン化と解離過程の相関に由来するこの依存性を取り除くために、補助解離パルスを用いた計測手法の開発を行い、酸素分子についてその有用性を示した。また核振動の効果を取り入れた2原子分子についての断熱理論の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、強レーザー場トンネルイオン化によって生成した電子の分子座標系分布の迅速計測を実現し、2原子分子や多原子分子についてトンネル電子運動量から、最外殻電子の情報がどのように読み取れるかを明らかにした。またそこで見出されたイオン化と解離の相関に由来する問題を解決するための、新たな手法の開拓を行った。分子の性質を司る重要な役割を担う、弱く束縛された電子を可視化することは分子の反応や機能を理解する上で重要である。本研究での結果は、電子のダイナミクスを複雑な解析を経ることなく可視化するための手法としてのトンネルイオン化イメージングの基盤を構築する上で重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：To understand tunneling ionization of molecules, an electron-ion coincidence measurement system using a high-repetition rate laser was constructed. It was shown that the characteristics of the highest-occupied molecular orbital (HOMO) of hydrogen molecule can be read out from the three-dimensional torus-like structure of tunneling electrons in the molecular frame. On the other hand, the application to tetrafluoromethane revealed that the recoil-frame angular distribution has a dependence of the helicity of the circularly polarized laser fields, due to the correlation between ionization and dissociation. A new method utilizing an auxiliary dissociation pulse was developed to disentangle the correlation, and applied successfully to oxygen molecule. In addition, adiabatic theory for diatomic molecules incorporating the molecular vibration was developed.

研究分野：レーザー物理化学

キーワード：トンネルイオン化 強レーザー場 分子座標系電子運動量分布 電子-イオンコインシデンス計測 電子ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

分子の構造や機能, 反応性を決定づけているのは電子である。特に, 最外殻占有分子軌道 (HOMO) など分子に弱く束縛された状態にある電子は特徴的な分布形状をもち, 化学反応や光応答, 電子移動など分子の性質を司る重要な役割を担っている。このため, 最外殻電子の様子を可視化し, それがどのように変化しているかを捉えることは, 分子の反応や機能を理解する上で基本的かつ重要な課題の一つである。

これを踏まえて近年, 電子ダイナミクスの直接観測を目的とした研究が精力的に進められ, 分子座標系光電子角度分布 (MFPAD) 計測や高次高調波発生に基づく手法など, 様々な分光法が提案されている。一方, 実験によって得られた物理量から電子分布を捉えるには, 波動関数の対称性など標的分子についての多くの情報を既知のものとして仮定する必要がある, また, 精度の保証が難しい逆問題を解くことが求められる場合もある。

2. 研究の目的

上記を踏まえて, 本研究では強レーザー場によるトンネルイオン化過程に着目した新しい電子ダイナミクス計測法の開拓を目指した。これによって, 刻一刻と変化する電子の様子をフェムト秒領域の高い時間分解能で, 標的分子についての先験的な情報を用いることなく定量的に直接可視化する, 新しい分光法の基盤を確立する。フェムト秒領域の強レーザーパルスで分子に集光照射すると, レーザー電場によって束縛ポテンシャルが歪み, 生じた障壁を電子がトンネル透過することでイオン化が起こる。この「トンネルイオン化」のレートはレーザー電場方向と分子内の電子分布によって変化するため, イオン化収量を計測することで弱く束縛された最外殻電子の分布を調べることができる。本研究ではこれに加えて, トンネル電子運動量がもつレーザー電場と直交した運動量成分, すなわち電子垂直運動量分布 (TMD) に着目し, 電子ダイナミクスを実時間で捉える反応イメージング法の開拓の基盤の確立を目的として分子トンネルイオン化の理解を進めた。

3. 研究の方法

3次元電子-イオンコインシデンス計測のためには, 1レーザーパルスあたりの生成電子数を十分小さく (0.1個以下) に抑え, 同時に生成したフラグメントイオンとのコインシデンス計測が求められるため, 十分なデータを収集するのに数日程度の積算を要している。レーザー場強度などを系統的に変化させた計測を行い, 分子トンネルイオン化についてより綿密な理解を得ることを目的として, (1)高繰返し周波数をもつ Yb:KGW フェムト秒レーザーシステムの導入とフェムト秒パルス圧縮器の構築を行った。これを用いて(2)トンネル電子分子座標系角度分布 (MFPAD) および垂直運動量分布 (TMD) 計測, (3)反跳座標系における多原子分子トンネル電子角度分布計測を進めた。また, 既存の Ti:Sapphire フェムト秒レーザーシステムを用いて, (4)補助解離パルスを用いた分子座標系トンネル電子角度分布計測, および(5) ω -2 ω 波形整形強レーザー場におけるイオン運動量画像計測を行い, 分子種の拡大に向けた新たな計測手法の開拓とその制御に向けた研究を進めた。また, (6)原子・分子内電子の運動に比してレーザー場の変動の時間スケールが十分に長いという事実に基づいた断熱理論によって, 高強度レーザー場中の原子・分子ダイナミクスに関する理論的研究を行った。得られた結果を国際共著論文として発表した。

4. 研究成果

(1) 超短パルス高繰返しレーザーシステムの構築

高繰返し Yb:KGW 超短パルスレーザー (>25 kHz) を用いたトンネル電子-イオンコインシデンス運動量計測システムを構築した。特に, 多重経路セル (MPC) とチャープミラー対からなるパルス圧縮光学系を新たに構築 (図 1) することで, パルス幅 35 fs の高繰返しによって分子座標系光電子運動量分布の迅速計測を実現し, 従来に比べて 25 倍程度高速なデータ取得が行えることを確認した。これを利用して分子座標系における水素分子の光電子運動量分布の計測を行い, 光電子角度分布に加えて垂直運動量分布の計測を高い S/N 比で実現した。

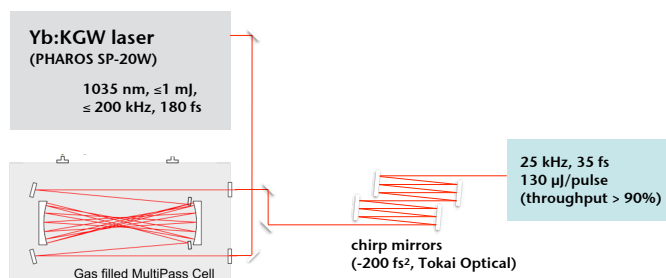


図 1: 構築した超短パルス高繰返しレーザーシステム

- (2) トンネル電子分子座標系角度分布 (MFPAD) および垂直運動量分布 (TMD) 計測
 水素分子の解離性イオン化過程, $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + \text{e}^-$ によって生成した電子とフラグメントイオン H^+ のコインシデンス運動量計測を行い, 分子座標系トンネル電子角度分布 (MFPAD) を得た。MFPAD は楕円状の形状を示し, $1\sigma_g$ 最外殻占有分子軌道 (HOMO) からのトンネルイオン化についての理論予想を良い一致を示した。トンネルイオン化した電子の垂直運動量分布の特徴を明らかにするため, 新たに構築した電子-イオンコインシデンス 3 次元運動量画像計測装置を用いて TMD の観測を行った。Ar および H_2 の混合ガスに 1035nm 円偏光強レーザーパルス照射し, トンネルイオン化を誘起後, 生じた電子とイオンのコインシデンス計測を行った。電子の運動量は, 円偏光電場から予想されるトーラス状分布を示した。Ar と H_2 はイオン化ポテンシャルがほぼ等しいにもかかわらず, トーラス半径およびトーラスの断面に対応する TMD の幅に有意な差が見出された。これらは Ar の価電子 ($3p$) がもつ軌道角運動量による効果を示唆している。
- (3) 補助解離パルスを用いた分子座標系トンネル電子角度分布計測
 レーザートンネルイオン化を利用した分子軌道イメージング法の開拓を目的として, プローブパルスを用いた O_2 分子の分子座標系光電子角度分布 (MFPAD) の観測を行った。800 nm 円偏光レーザーパルスで O_2 分子をトンネルイオン化後, 400 nm プローブパルスを照射し, 生じた電子と解離イオンの 3 次元運動量をコインシデンス計測した。総解離運動エネルギー (KER) スペクトルには 800 nm レーザーパルスのみを照射した場合とは異なるピークが現れた。先行研究からこのピークは HOMO-1 (π_u) からトンネルイオン化後, 400 nm の 1 光子遷移によって解離した経路と帰属される。観測された MFPAD は分子軸に対して垂直方向に強い分布を示したことから, HOMO-1 の形状を反映したことが示唆された。
- (4) 反跳座標系における多原子分子トンネル電子角度分布計測
 解離性トンネルイオン化過程の理解に向けて, 多原子分子を対象とした電子-イオンコインシデンス計測を行った。ここでは特にイオン化基底電子状態において解離性ポテンシャルをもつ四フッ化メタン (CF_4) に着目し, 解離性イオン化 $\text{CF}_4 \rightarrow \text{CF}_3^+ + \text{F} + \text{e}^-$ における反跳座標系光電子角度分布が円偏光回転方向 (ヘリシティ) に依存することを見出し, 解離性トンネルイオン化において円 2 色性を示すことを明らかにした (図 2) [1]。

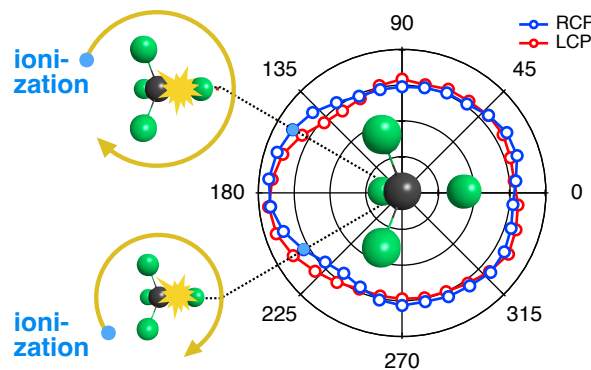


図 2: 円偏光強レーザー場 ($0.8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) における CF_4 解離性トンネルイオン化 ($\text{CF}_4 \rightarrow \text{CF}_3^+ + \text{F} + \text{e}^-$) のレーザー電場方向依存性 (反跳座標系角度分布) [1]。

- (5) ω - 2ω 波形整形強レーザー場におけるイオン運動量画像計測
 下記の電場波形をもつ ω - 2ω 強レーザー場 ($1.4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) における CF_4 の解離性イオン化 $\text{CF}_4 \rightarrow \text{CF}_3^+ + \text{F} + \text{e}^-$ についてイオン運動量画像計測を行った (図 3(a))。

$$F(t) = F_\omega(t) \cos(\omega t) + F_{2\omega}(t) \cos(2\omega t + \varphi)$$

ここで, $F_\omega(t)$, $F_{2\omega}(t)$ はフェムト秒チタンサファイアレーザー基本波 (ω , 波長: 800 nm) および第 2 次高調波 (2ω , 波長: 400 nm) のパルス包絡線, φ は相対位相である。フラグメントイオン CF_3^+ はレーザー偏光方向に対して明瞭な非対称性を示した。非対称性度は相対位相 φ に対して変化し, (i) レーザー波形によって 4 つの等価な C-F 結合のうち, 一つが選択的に切断されること, (ii) 電場振幅が大きい方向に向いた C-F 結合が優先して切断されることを見出された。これに対して, 弱電場漸近理論 (WFAT) は電場が F 原子から C 原子に向いた場合にトンネルイオン化が起こりやすいことを示しており, イオン化後のレーザー場との

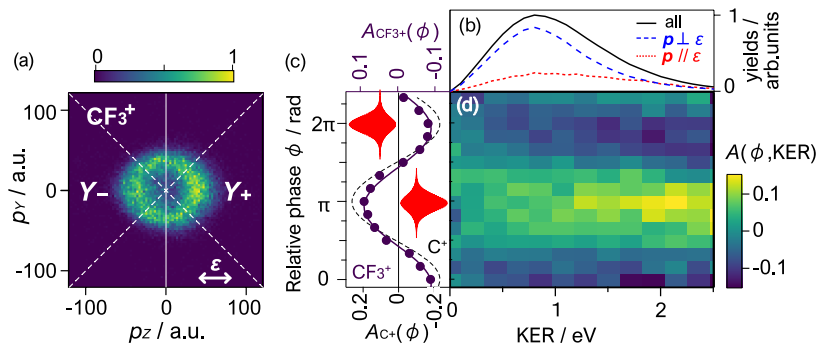


図 3: (a) CF_4 の解離性トンネルイオン化によって生成した CF_3^+ のイオン画像。(b) 全解離エネルギースペクトル E_{KER} 。(c) イオン空間非対称性パラメータ $A(\phi)$ の相対位相依存性。(d) 非対称性パラメータ 2次元マップ $A(\phi, E_{\text{KER}})$ [2]。

相互作用の寄与が示唆された。

(6) 断熱理論の進化と展開

核振動の効果を取り入れた 2 原子分子についての断熱理論を開発し、分子のトンネルイオン化及び再衝突過程に伴う核振動励起についての分析を行った。また、水素分子のトンネルイオン化についての精密計算を行い、実験と比較した。さらに関連する高強度レーザー照射による原子・分子ダイナミクスについての理論的研究を行った。分子トンネルイオン化について、実験結果の分析を行った。

- [1] Helicity-dependent dissociative tunneling ionization of CF_4 in multicycle circularly polarized intense laser fields, H. Fujise, M. Uemura, H. Hasegawa, D. Ikeya, A. Matsuda, T. Morishita, L. B. Madsen, F. Jensen, O. I. Tolstikhin, A. Hishikawa, Phys. Chem. Chem. Phys. 24 (2022) 8962-8969.
- [2] Asymmetric dissociative tunneling ionization of tetrafluoromethane in ω - 2ω intense laser fields, H. Hasegawa, T. Walmsley, A. Matsuda, T. Morishita, L. B. Madsen, F. Jensen, O. I. Tolstikhin, A. Hishikawa, Front. Chem. 10 (2022) 857863.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Hishikawa Akiyoshi, Matsuda Akitaka, Fushitani Mizuho	4. 巻 93
2. 論文標題 Ultrafast Reaction Imaging and Control by Ultrashort Intense Laser Pulses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1293 ~ 1304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20200158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Endo Tomoyuki, Fujise Hikaru, Hasegawa Hiroka, Matsuda Akitaka, Fushitani Mizuho, Tolstikhin Oleg I., Morishita Toru, Hishikawa Akiyoshi	4. 巻 100
2. 論文標題 Angle dependence of dissociative tunneling ionization of NO in asymmetric two-color intense laser fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 053422-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.053422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Fujise H., Uemura M., Hasegawa H., Ikeya D., Matsuda A., Morishita T., Madsen L. B., Jensen F., Tolstikhin O. I., Hishikawa A.	4. 巻 24
2. 論文標題 Helicity-dependent dissociative tunneling ionization of CF ₄ in multicycle circularly polarized intense laser fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 8962 ~ 8969
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CP05858D	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chen Zhangjin, Zhang Lina, Wang Yali, Zatsarinny Oleg, Bartschat Klaus, Morishita Toru, Lin C. D.	4. 巻 99
2. 論文標題 Pulse-duration dependence of the double-to-single ionization ratio of Ne by intense 780-nm and 800-nm laser fields: Comparison of simulations with experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 43408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.043408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tolstikhin Oleg I., Morishita Toru	4. 巻 99
2. 論文標題 Strong-field ionization, rescattering, and target structure imaging with vortex electrons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.063415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Zhangjin, Wang Yali, Morishita Toru, Hao Xiaolei, Chen Jing, Zatsarinny Oleg, Bartschat Klaus	4. 巻 100
2. 論文標題 Revisiting the recollisional excitation-tunneling process in strong-field nonsequential double ionization of helium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 23405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.023405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Zhangjin, Wen Hua, Liu Fang, Morishita Toru, Zatsarinny Oleg, Bartschat Klaus	4. 巻 28
2. 論文標題 Intensity dependence in nonsequential double ionization of helium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 6490 ~ 6490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.386971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Svensmark Jens, Tolstikhin Oleg I., Morishita Toru	4. 巻 101
2. 論文標題 Adiabatic theory of strong-field ionization of molecules including nuclear motion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 53422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.053422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Zhangjin, Liu Fang, Wen Hua, Morishita Toru, Zatsarinny Oleg, Bartschat Klaus	4. 巻 28
2. 論文標題 Nonsequential double ionization of Ar in near-single-cycle laser pulses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22231 ~ 22231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.398035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsui Hirokazu, Tolstikhin Oleg I., Morishita Toru	4. 巻 103
2. 論文標題 Weak-field asymptotic theory of tunneling ionization of the hydrogen molecule including core polarization, spectator nucleus, and internuclear motion effects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 33102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.033102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Zhangjin, Zhou Anran, Morishita Toru, Bai Yuxing, Hao Xiaolei, Zatsarinny Oleg, Bartschat Klaus	4. 巻 103
2. 論文標題 Anticorrelation in nonsequential double ionization of helium	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 53102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.053102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Liu Fang, Chen Zhangjin, Morishita Toru, Bartschat Klaus, B?ning Birger, Fritzsche Stephan	4. 巻 104
2. 論文標題 Single-cycle versus multicycle nonsequential double ionization of argon	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 13105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.013105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kjellsson Lindblom Tor, Tolstikhin Oleg I., Morishita Toru	4. 巻 104
2. 論文標題 Atomic Siegert states in a rotating electric field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 23110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.023110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Svensmark Jens, Tolstikhin Oleg I., Morishita Toru	4. 巻 104
2. 論文標題 Adiabatic theory of strong-field ionization of molecules including nuclear motion: Rescattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.063115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hasegawa Hiroka, Walmsley Tiffany, Matsuda Akitaka, Morishita Toru, Madsen Lars Bojer, Jensen Frank, Tolstikhin Oleg I., Hishikawa Akiyoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Asymmetric Dissociative Tunneling Ionization of Tetrafluoromethane in ? 2 Intense Laser Fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Chemistry	6. 最初と最後の頁 857863
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fchem.2022.857863	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 H. Fujise
2. 発表標題 Molecular-frame momentum imaging of tunneling electrons from molecular hydrogen in circularly polarized intense laser fields
3. 学会等名 The 3rd Workshop of the Reaction Infography (R-ing) Unit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池谷大夢, 藤瀬光香, 松田晃孝, 伏谷瑞穂, 菱川明栄
2. 発表標題 円偏光強レーザー場におけるO ₂ 分子の分子座標系光電子3次元運動量分布
3. 学会等名 第101回日本化学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川景郁, 松田晃孝, 菱川明栄
2. 発表標題 -2 強レーザー場中 CH ₄ 解離過程における非対称性と解離経路依存性
3. 学会等名 分子科学オンライン討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Inaba, D. Ikeya, H. Fujise, A. Hishikawa
2. 発表標題 Tunneling ionization of molecular hydrogen by using a high-repetition-rate pulse laser
3. 学会等名 The 4th IRCCS International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Yamada, H. Hasegawa, A. Matsuda, M. Fushitani and A. Hishikawa
2. 発表標題 Development of a molecular dynamics measurement method in strong laser fields using a pulsed ion source
3. 学会等名 The 4th IRCCS International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池谷 大夢, 藤瀬 光香, 松田 晃孝, 伏谷 瑞穂, 菱川 明栄
2. 発表標題 円偏光強レーザー場におけるO ₂ 分子の電子-イオンコインシデンス 3次元運動量計測
3. 学会等名 原子衝突学会第45回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川 景郁, 松田 晃孝, 菱川 明栄
2. 発表標題 -2 強レーザー場におけるTd対称性分子CH ₄ の非対称クーロン爆発過程
3. 学会等名 原子衝突学会第45回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Hishikawa
2. 発表標題 Dissociative tunneling-ionization of H ₂ and D ₂ in circularly polarized intense laser fields
3. 学会等名 International workshop on theory for attosecond quantum dynamics (IWTAQD) 22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Hishikawa
2. 発表標題 Dissociative tunneling-ionization imaging of diatomic molecules in intense laser fields
3. 学会等名 International symposium on ultrafast intense laser science (ISUILS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Hishikawa
2. 発表標題 Coherent reaction control of symmetric molecules using two-color intense laser fields
3. 学会等名 International symposium on ultrafast molecular dynamics (UMD2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Hishikawa
2. 発表標題 Laser tunneling imaging of molecular photoexcitation
3. 学会等名 International symposium on ultrafast electronic and structural dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菱川明栄
2. 発表標題 位相制御2色強レーザー場による反応の可視化と制御
3. 学会等名 統合物質創製化学研究推進機構 第5回国内シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fujise, M. Takahashi, D. Ikeya, T. Nakamura, A. Matsuda, M. Fushitani, A. Hishikawa
2. 発表標題 Molecular-frame momentum imaging of tunneling electrons from molecular deuterium in circularly polarized intense laser fields
3. 学会等名 The 13th Annual Meeting of Japan Society of Molecular Science 2019 Nagoya
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Matsuda
2. 発表標題 Recollision-induced multiple ionization process: Coulomb explosion imaging of CS ₂ in ultrashort intense laser fields
3. 学会等名 International workshop on theory for attosecond quantum dynamics (IWTAQD) 21
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Hishikawa
2. 発表標題 Helicity-dependent dissociative tunneling ionization of CF ₄ in multicycle circularly polarized intense laser fields
3. 学会等名 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	森下 亨 (Morishita Toru) (20313405)	電気通信大学・量子科学研究センター・教授 (12612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	モスクワ物理工科大学			
デンマーク	オーフス大学			
中国	汕頭大学			