

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25247069

研究課題名(和文)電子波束を生成する複数準位からのアト秒トンネルイオン化過程の新規物理モデル構築

研究課題名(英文) Study on the attosecond multi-level tunnel ionization processes that form an electron wavepacket.

研究代表者

新倉 弘倫 (Hiromichi, Niikura)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10500598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000円

研究成果の概要(和文)：赤外の高強度レーザーパルスによる複数準位の関与するイオン化過程の機構解明と制御のために、新たなアト秒光学系および測定法と理論的な構築を行った。初めに配向した気相分子に対して2波長高強度レーザーによる二次元高次高調波分光法を適用し、配向の制御によって複数準位のイオン化過程の測定とその制御を行った。またアト秒高次高調波と同期した高強度レーザーパルスによるイオン化過程に関して、特異的な量子状態制御が行われることを明らかにし、さらに位相を区別した波動関数イメージングを行った。同時にレーザー電場中の複数準位が関与するトンネルイオン化過程について多電子の効果を取り入れた理論的な定式化を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed the experimental and theoretical approaches to study the multi-level tunnel ionization process induced by intense, laser pulses. First, we have measured the two-dimensional high-harmonic spectra emitted from aligned molecules using two-color intense laser pulses. By controlling the alignment angle, we control the contribution of the levels that are related to the tunnel ionization and high-harmonic generation. Next, using the attosecond high-harmonics combined with the intense laser pulse, we have explored that a particular ionization channel is predominantly selected, that allows us to observe an phase-resolved electron wavefunction image with attosecond time-resolution. We have also developed the theoretical treatments regarding to the multi-level tunnel ionization process that includes the multi-electron effect.

研究分野：アト秒レーザー物理

キーワード：トンネルイオン化 アト秒科学 高次高調波 再衝突電子

1. 研究開始当初の背景

超短レーザーパルスによる原子や分子のトンネルイオン化は、アト秒パルス発生など超高速物理の基礎となる過程である。分子の場合、最高占有軌道だけではなく、よりイオン化エネルギーの大きな軌道からもトンネルイオン化が同程度の確率で起こりうる。このとき分子内にアト秒で時間発展する電子波束(分子軌道のコヒーレントな重ね合わせ)が生成し軌道間に位相差が生じることがある。これは近年研究代表者等が測定した過程であるが、その物理機構は明らかではなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究課題では、アト秒高次高調波および再衝突電子による新たな測定方法を開発し、理論モデルの構築により複数準位が関与するイオン化過程の解明やその制御方法を構築することを目的とする。具体的には、配向した分子を用いた二次元高次高調波分光法により複数準位のトンネルイオン化過程の検出と制御を行い、またアト秒高次高調波と組み合わせた高強度レーザー電場によるイオン化過程および電子波束の測定・制御を行う。また高強度レーザーパルスに分子を照射することによって誘起されるトンネルイオン化過程についての理論モデルを構築する。特に、分子の最高占有軌道(HOMO)とそれより内側の軌道のトンネルイオン化過程に対する影響を適切に取り扱うため、複数の分子軌道による電子相関の寄与を考慮した新規モデルを構築する。

3. 研究の方法

(1) 複数準位からのトンネルイオン化過程の同定とその制御方法:

トンネルイオン化過程にどの軌道が関与するかを調べるために、研究代表者らが開発した2波長高強度レーザーパルスによる二次元高次高調波分光法(Niikura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105, 053003, 2010 & 107, 093004, 2011)を用いる。この方法ではトンネルイオン化過程によって生成した、再衝突する電子の分子への衝突角度の関数として、分子から発生する高次高調波の偏光方向を測定することで、トンネルイオン化に関与する軌道を同定する。本研究課題では、この方法と分子配向制御方法とを組み合わせ、分子の配向方向とトンネルイオン化によって電子が放出される角度を制御することにより、複数準位からのトンネルイオン化過程を制御する。

(2) 高次高調波の位相測定法: 複数の準位が高次高調波発生に寄与する場合、高次高調波の位相はそれぞれの準位に依存しうる。そこで測定対象となる分子から発生した高次高調波と基本波の相対時間差を制御して別な原子をイオン化し、その光電子運動量分布を時間差の関数として測定することで、高次高調波の位相を決定する。この方法では高安定

かつ再現性の高い、アト秒パルスと基本波との光学干渉パスが必要であるが、従来のアクティブフィードバックを用いた方法では長時間の安定が困難である。そこで本研究課題では、研究成果3に示すような独自開発の高安定の光学パスを新たに構築して用いる。

(3) 位相を分けたアト秒時間分解・電子波動関数イメージング法: 電子波動関数のイメージを直接測定し、それを制御するための方法を新たに開発した(詳細は研究成果(4)(5)参照)。この方法では発生させたアト秒高次高調波と同期させた高強度の赤外レーザーパルス(基本波)を用いて、励起波長と赤外パルスの強度を調整して試料ガスから発生した二次元光電子運動量分布を測定することにより、電子波動関数の二次元分布を得る。また偶数次の高次高調波を重ねることで電子波動関数の位相を分解したイメージを測定する。

4. 研究成果

(1) CEP とレーザーパルス幅の制御による電子再衝突回数の制御:

高強度レーザーパルス(基本波)によるトンネルイオン化過程と電子の再衝突過程が1パルスの中で多数回生じる場合、発生する高次高調波のスペクトルは奇数次のみになる。しかし基本波のパルス幅が短くなり(5fs ~ 8fs)、一回または数回しかトンネルイオン化過程・電子再衝突過程が生じなくなると、スペクトル位相が電場強度に依存するため、奇数次だけではなく偶数次や、また基本波の整数倍以外のエネルギーにピークを持つようになる。高次高調波分光ではスペクトル強度や位相から原子分子の電子状態についての情報を得るため、このような数サイクルパルスにおいて、トンネルイオン化・電子再衝突の回数にどのようにスペクトルが変わるのかを調べることは重要である。そこで、ネオン原子や二酸化炭素分子を用いて、CEP 制御された高強度の数サイクルレーザーパルスによって発生された高次高調波のスペクトルの CEP 依存性から、「どのエネルギーで何回再衝突が生じるか」「高次高調波の位相差がどのようにスペクトルのピークに影響するか」についての情報を得るための解析方法を確立した。この方法は、イオン化エネルギーが原子に比べて低い、様々な分子において数サイクルパルスを用いて高次高調波を発生させるときに見られるスペクトルの解析に適用できる一般性のあるものである。本研究結果は Phys. Rev. A 91, 063421 (2015) に発表した。

(2) 分子配向による複数準位が関与するトンネルイオン化過程の制御:

初めに、配向していない二酸化炭素分子から発生した高次高調波スペクトルを2波長レーザーの位相差の関数として測定したところ、異なる対象性を持つ二つの準位が関与しているという測定結果を得た。これは先行研

究の実験結果では測定されていなかった現象である。次に二酸化炭素分子を配向させた状態から同様の方法で測定した。その結果、トンネルイオン化による電子の放出方向と分子軸とが垂直な場合には、 π_0 対称性を持つと同定される準位の関与が大きくなるが、水平の場合には再衝突時に衝突方向と平行方向に電子密度分布を持つ準位からの高次高調波の寄与が大きくなることが実験的に示された。この方法は、2波長レーザーパルスを用いた方法により高次高調波発生（トンネルイオン化）に寄与する準位を同定し、分子配向でそれを制御するという独立した二つの過程を用いているため、配向制御または二波長レーザーパルス単独の先行研究に比べ、複数準位の寄与を明確に測定・制御できるという特徴を有している。次にエタン分子を配向させ、同様に2波長レーザーによる高次高調波分光法を用いて二次元高次高調波スペクトルを測定した。エタン分子の場合には、トンネルイオン化に際して、最高占有軌道 (E_g 軌道) とその下の軌道 (A_g 軌道) との重ね合わせ状態に電子空孔が出来うる。エタン分子の C-C 軸を 2 波長の 800nm の偏光軸と平行に配向させた場合、 A_g 軌道の成分が E_g 軌道に比べて増えるということが確認された。これは、 E_g 軌道が C-C 軸方向に電子密度を持っているということから、トンネルイオン化がこの方向により多く生じたと解釈できる。

これらの結果は Ultra-fast phenomena, 2014 や Ultrafast Dynamic Imaging of Matter, Swiss, 2015 等の国際会議で発表し、論文を改稿・作成中である(2016年6月現在)。また多原子分子における時間分解測定のための予備的実験を行った。

(3) 高安定アト秒時間分解光学系の構築:

アト秒高次高調波を用いた時間分解イオン化過程の測定や、高次高調波の位相測定などのためには、高次高調波とプローブ用の基本波（赤外光）などを数十アト秒の精度で同期させ、それを制御する必要がある。さらに、高次高調波発生用の高強度レーザーパルスとプローブ用のパルスは、高次高調波を発生させる地点では時間的または空間的に離れている必要がある。そのため、従来では高次高調波発生前にパルスを二つに分け、それを発生後に重ね合わせてその間の時間差をアクティブフィードバックを用いて制御するという方法が使われてきたが、この方法は長時間の安定や再現性に難がある。そこで本研究課題では、シングルパスで原理的に高安定度・高再現性であり、かつ高次高調波発生過程にプローブパルスが影響しない新たな光学系を作成した。また、発生した高次高調波と高強度レーザーパルス（基本波）によるイオン化・励起によって生成する光電子の二次元運動量分布を、Velocity Map Imaging 法によって測定する測定装置系を作成した。またイオン化領域を透過した高次高調波のスペクトルは、極端紫外光用のグレーティン

グにより分散される。これにより、高次高調波の位相と振幅を同時に測定が可能である。

開発した装置系を用いて、気相アルゴンから発生した高次高調波と基本波を（別な）アルゴンガスジェットに集光し、発生した光電子の二次元運動量分布を、高次高調波と基本波の時間差の関数として測定した。その結果からイオン化時間差の高次高調波による励起エネルギー依存性を測定することで、作成した光学系の安定度を見積もったところ、50アト秒以下の精度があることを確認した。また長時間の測定かつ再現性があることを確認した。前述のようにこの光学系は複雑な機構を必要とせず、異なる波長の高次高調波や単一アト秒パルスにも原理的に対応できるため、今後のアト秒時間分解光学系のスタンダードになると考えられる。この結果は論文を作成中である(2016年6月現在)。

(4) アト秒高次高調波励起によって選択された状態からの高強度イオン化過程による電子波束イメージと位相の測定:

作成したアト秒光学系を用いて、高次高調波励起と高強度レーザー電場（基本波）とを組み合わせたイオン化過程によって発生した光電子の時間分解光電子二次元運動量分布を測定した。この方法をネオンガスに適用したところ、低い光電子エネルギー領域で節がはっきり分かれた二次元光電子運動量分布を得た。観測した分布は、（連続状態の）電子波動関数の角運動量の方位量子数と磁気量子数がそれぞれ $l=3$, $m=0$ に対応する状態 (f_0 軌道) が選択された電子波動関数イメージ（運動量空間での振幅の自乗の分布）に相当する。また基本波の強度が 10^{12}W/cm^2 程度のときに測定されることがわかった。観測された過程が、高次高調波と基本波の組み合わせによる2光子励起によるイオン化過程であると仮定すると、生成する光電子は複数の軌道角運動量（方位・磁気）量子数を含み、光電子角度分布はブロードなものになるので、電子波動関数そのものを表さない。したがって観測された光電子運動量分布は、このような2光子励起過程の選択律によってではなく、複数の準位の中から（高次高調波による励起後に）ある特定の量子状態だけを選択するような高強度レーザー電場によるイオン化過程が関与していると考えられる。この実験結果は、これまでの（角度分解）光電子分光の常識を打ち破るものであり、高強度レーザー電場と電子の相互作用（イオン化過程）に関して重要な発見であると共に、波動関数イメージング法に新たな展開をもたらす結果であるといえる。

(5) 位相を分けた波動関数の直接イメージング:

高次高調波は通常、基本波の奇数次から成り立っているが、高次高調波発生の機構を制御することで、奇数次と偶数次の両方を発生させることが可能である。ここでは二

波長の高強度レーザーパルス (800 nm と 400nm) を用いて気相原子から偶数次・奇数次を含む高次高調波を発生させた。この過程を(4)の電子波動関数イメージングに適用したところ、 f_0 軌道の位相を区別した電子波動関数に相当する光電子運動量分布を得た。このように位相を区別して波動関数を直接イメージした結果は、原子分子光学分野だけではなく、他の分野においても極めてインパクトがある結果であるといえる。(4)の結果は 5th international conference on Attosecond Physics で発表し、(5)の結果(とあわせて現在、解析結果と共に論文を作成中である。(2016年6月現在)

(6) 高強度レーザー電場中の分子のトンネルイオン化過程の理論的構築:

(A) 強静電場中の分子のトンネルイオン化についての理論的研究を行った。分子内電子の運動の時間スケールと比べてレーザー電場が十分にゆっくりと振動する長波長領域では、電子状態がレーザー電場の時間変化に追従するという準静的な描像がよく成り立つ。そして、分子のイオン化は、静電場によって歪められた分子ポテンシャル障壁をトンネル効果に基づくトンネルイオン化によって理解される。静電場中の分子のトンネルイオン化の理論的研究の多くは、MO-ADK模型と呼ばれる弱電場における原子に対応する理論からの類推に基づく模型を用いたものである。MO-ADK模型は基礎方程式から導かれたものではなく、どのような状況下で成立するか全く不明であり、特に、双極分子については指針すら与えられていない。そこで、我々は、基礎方程式のシュレーディンガー方程式に対して電場の大きさをパラメータとした漸近展開によって解を構築する、「弱電場漸近理論」を開発した。この理論では、任意の分子に対して弱電場の極限で厳密解と一致し、かつ、電場の大きさに関する適用範囲を明確に与えることが可能である。本研究では、漸近展開の主要項および1次の補正項についての定式化を行った。そして、簡単な2原子分子に適用し、イオン化フラックスよりトンネルイオン化レートを求め、その配向依存性における電場強度依存性について議論した。Phys. Rev. A 91, 063410 (2015)で発表している。

(B) レーザー場中の分子のトンネルイオン化最近の実験および理論研究において、分子内の多電子の効果の重要性が指摘されている。そこで、本研究の目的のひとつである、複数準位からのトンネルイオン化過程の理論モデルの構築を進めた。上述の弱電場漸近理論を発展させ、多電子系のシュレーディンガー方程式から出発し、多電子系についてのイオン化レートの漸近展開の主要項および1時の補正項についての定式化を行った。そして、最も基礎的なHeおよびH⁻の2電子系についてシュレーディンガー方程式の高精度数値計算結果と比較し、弱電場漸近理論の妥

当性を吟味した。J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 48, 061003 (2015) で発表している。

(C) レーザーによる強電場中でトンネルイオン化した電子は、レーザーの時間変化に追従して加速および減速され、最終的には測定装置によって光電子スペクトルとして観測される。我々は、こうした電子の運動の時間発展を扱う理論である「断熱理論」を構築し、その応用研究を進めている。本研究では、時間に依存するレーザー場によるトンネルイオン化のダイナミクスを直接的に調べるため、いわゆる再衝突過程の影響がない、円偏光パルスによる原子のイオン化スペクトルについての理論的研究を行った。そして、スペクトルの特徴を現すピーク位置および幅についての詳細な議論を行った。Phys. Rev. A 92, 043402 (2015)で発表している。

(D) トンネルイオン化電子が関与するダイナミクスのひとつとして、ヘリウム原子の非逐次2電子イオン化過程について調べた。トンネルイオン化、レーザーによる加速、再衝突イオン化という3つの過程を独立に扱う3段階模型によって非逐次2電子イオン化確率を評価した。Phys. Rev. A 92, 063427 (2015) で発表している。

(E) トンネルイオン化の研究において、これまで、原子核の運動を固定した近似を用いている。実際の実験の状況においては、核の運動を無視できない場合も多くあり、核と電子の双方の運動を正しく考慮する理論の構築は重要である。そこで、我々は、分子内のレーザー場中の分子内の核と電子双方の相関を持った運動を記述するため、超精密な波動関数の理論的記述についての研究も行った。Phys. Rev. A 92, 032713 (2015)で発表している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計19件)

全て査読有り。

1. "Contribution of multiple electron trajectories to high-harmonic generation in the few-cycle regime",

A. Naumov, D. Villeneuve, and H. Niikura,

Phys. Rev. A 91, 063421 (2015) [8pages]

10.1103/PhysRevA.91.063421

2. "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) [9pages]

10.1103/PhysRevA.92.063427

3. "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)[15 pages]

10.1103/PhysRevA.91.043402

4. "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)[18 pages] 10.1103/PhysRevA.91.063410

5. "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)[10 pages] 10.1103/PhysRevA.92.032713

6. "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. DOI:10.1016/j.adt.2015.02.001 (2015)

7. "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) [5 pages]

8. "Probing dipole-forbidden autoionizing state by isolated attosecond pulses"

W.-C. Chu, T. Morishita, and C. D. Lin Phys. Rev. A 89, 033427 (2014) [9 pages] 10.1103/PhysRevA.89.033427

9. "Molecular Siegert states in an electric field. II. Transverse momentum distribution of the ionized electrons"

V. N. T. Pham, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, Phys. Rev. A 89, 033426 (2014) [12 pages] 10.1103/PhysRevA.89.033426

10. "Application of the weak-field asymptotic theory to tunneling ionization of H₂O"

L. B. Madsen, Frank Jensen, O. I. Tolstikhin, and T. Morishita, Phys. Rev. A 89, 033412 (2014) [6 pages] 10.1103/PhysRevA.89.033412

11. "Fine structures in the intensity dependence of excitation and ionization probabilities of hydrogen atoms in intense 800-nm laser pulses",

Q. Li, X.-M. Tong, T. Morishita, H. Wei, and C. D. Lin, Phys. Rev. A 89, 023421 (2014) [9 pages] 10.1103/PhysRevA.89.023421

12. "Weak-field asymptotic theory of tunneling ionization in many-electron atomic and molecular systems"

O. I. Tolstikhin, L. B. Madsen, and T. Morishita, Phys. Rev. A 89, 013421 (2014) [15 pages]

10.1103/PhysRevA.89.013421

13. "Molecular tunneling ionization of the carbonyl sulfide molecule by double-frequency phase-controlled laser fields" H. Ohmura, N. Sato, and T. Morishita, Phys. Rev. A 89, 013405 (2014) [7 pages] 10.1103/PhysRevA.89.013405

14. "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)[9 pages] 10.1103/PhysRevA.90.053413

15. "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) [7 pages].

16. "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)[5pages] 10.1103/PhysRevLett.113.033001

17. "Photoelectron spectra and high Rydberg states of lithium generated by intense lasers in the over-the-barrier ionization regime",

T. Morishita and C. D. Lin, Phys. Rev. A 87, 063405 (2013) [11 pages] 10.1103/PhysRevA.87.063405

18. "First-order correction terms in the weak-field asymptotic theory of tunneling ionization",

V. H. Trinh, O. I. Tolstikhin, L. B. Madsen, and T. Morishita, Phys. Rev. A 87, 043426 (2013) [15 pages] 10.1103/PhysRevA.87.043426

19. "Effect of nuclear motion on tunneling ionization rates of molecules",

O. I. Tolstikhin, H. J. Wörner, and T. Morishita, Phys. Rev. A 87, 041401(R) (2013) [4 pages] 10.1103/PhysRevA.87.041401

[学会発表](計13件)

1. "Phase-resolved electron wavepacket imaging using attosecond pulse", P. Hockett, D. Villeneuve, and H. Niikura, Gordon Research Conference (multiphoton process), June 19-24, 2016, Proctor Academy, NH, USA.

2. "Time-dependent photoelectron momentum structures with attosecond time-resolution" H. Niikura and T. Morishita, 5th international

conference on Attosecond Physics, July 6~10, 2015, St-Sauveur, Canada.

3. "Transition state spectroscopy of the reactions induced by coherent molecular vibration in the electronic ground state", Izumi Iwakura, EMN Ultrafast Meeting, Nov. 16-19, 2015, Las Vegas, USA.

4. "A simple approach to time-dependent photoelectron momentum spectroscopy combined with attosecond laser pulses", H. Niikura, Ultrafast Dynamic Imaging of Matter, Swiss. , March 7 ~ March 14, 2015.

5. Controlling attosecond electron wave packet in a molecule, H. Niikura, Ultra-fast Phenomena, July 7 ~11, 2014 Okinawa, Japan.

6. "Adiabatic Theory of ionization of atoms by intense laser pulses", T. Morishita, Peking University, 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, July 21st to July 23rd, 2014 – "Abbaye des Vaux de Cernay" - Cernay la Ville - France

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 July 14-18, 2014, Sofia, Bulgaria

10. "Atomic and Molecular Ionization by Intense Laser Fields: From Tunneling to Over-the-Barrier Regimes", T. Morishita, Gordon Research Conference, Photoionization & Photodetachment, Probing Electronic and Nuclear Dynamics February 23-28, 2014, Hotel Galvez, Galveston, TX

11. "Control of attosecond electron wave packet in polyatomic molecule", H. Niikura, 4th International Conference on Attosecond Physics, July 7~14, 2013, Paris, France.

12. "Atomic and molecular ionization in a static electric field: From tunneling to over-the-barrier regimes", T. Morishita, The workshop on Strong

Laser Physics, Shang-tou university
May 5, 2013, Shang-tou, China.

13. "Two-electron dynamics in nonlinear double excitation of helium by intense ultrashort extreme-ultraviolet pulses" T. Morishita, International Symposium on (e,2e), Double Photoionization and Related Topics & 17th International Symposium on Polarization and Correlation in Electronic and Atomic Collisions Aug 1-3, 2013, He Fei, China.

〔図書〕(計 0件)
該当無し

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)
該当無し

取得状況(計 0件)
該当無し

〔その他〕
ホームページ等:無し

6. 研究組織
(1)研究代表者
早稲田大学 理工学術院 教授
新倉弘倫 (Niikura Hiromichi)
研究者番号: 10500598

(2)研究分担者
電気通信大学・情報理工学(系)研究科
准教授 森下亨 (Morishita Toru)
研究者番号: 20313405

神奈川大学 工学部 准教授
岩倉いずみ (Iwakura Izumi)
研究者番号: 41517083

(3)連携研究者
L.B.Madsen, Aarhus University
研究者番号: 無し

O.I.Tolstikhin, Moscow institute of physics and technology
研究者番号: 無し