

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月23日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20540386

研究課題名（和文）強レーザー場中における原子・分子再散乱電子の運動量分布及び応用の理論研究

研究課題名（英文）Theoretical studies on the momentum distribution of rescattering electron of atoms and molecules in intense laser field and its applications

研究代表者

トン ショウミン (Tong Xiao-Min)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：80422210

研究成果の概要（和文）：第一原理の理論計算によって、（1）強レーザー場における原子・分子再散乱電子の運動量分布を得た。その得られた運動量分布を利用して、ヘリウム原子の非逐次2重電離の過程を解明した。（2）強レーザー場における原子・分子の光吸収過程のメカニズムを解明した。赤外線による、原子の光透過率をアト秒の範囲での制御方法を提案した。この方法は実験で使われている。

研究成果の概要（英文）：Based on our first principle simulation, (1) we have obtained the rescattering electron momentum distribution in the intense laser field, and illustrated the physical origination of the non-sequential double ionization of He using the obtained rescattering electron momentum; (2) we have discovered the mechanism of the laser assisted photoionization of atoms and molecules, and proposed a way to control the transparent of materials by the intense laser in atto-second time domain and the proposal method has been used in experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子・分子・強レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

当時、レーザー技術の進展に伴う、レーザーと原子・分子の相互作用の研究が注目されていた。研究の焦点は物理過程のメカニズム解明とこの物理過程の応用であった。様々な実験観測現象は再散乱過程の提案で定性的な説明ができたが、再散乱電子の運動量分布

は中間状態として、実験で測定できない。直接量子理論計算は非常に難しかったので、古典力学の計算しか使えなかった。

しかしながら、多くの現象がこれらの計算方法では解明できないままになっていた。例えば、短パルス強レーザーにおける原子からの電離電子が、レーザー位相によって右左非

対称性に分布するという実験結果は、量子力学の計算が不可避であった。また、強レーザー場と原子・分子の相互作用のメカニズムを解明すれば、これを基に効率のよいアト秒X線レーザーが可能になり、さらにこれを用いて、分子の高励起状態からの解離過程を数十フェト秒の分解能で観測できることになる。電子顕微鏡の原理を利用して、再散乱電子を用いて分子構造解析の可能性を示す実験が行われた。これによると、再散乱電子の運動量の分布分かれば、精密な分子構造の解明が可能になることが分かった。

## 2. 研究の目的

(1) 量子力学の計算で、強レーザー場と原子・分子相互作用の重要な過程：再散乱過程を解明し、定量的な再散乱電子の運動量を得て、その得られた運動量を利用して、強レーザー場におけるヘリウム原子の非逐次2重電離の過程を解明することが一つの研究の目的であった。

(2) 強レーザー場における原子・分子の光吸収過程のメカニズムを解明し、強い短パルスレーザーを利用して、短時間での(アト秒  $10^{-18}$  秒)、物質の光透過率制御方法を探索することがもう一つの研究の目的であった。

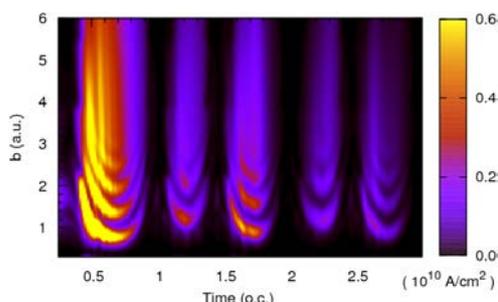
## 3. 研究の方法

(1) 我々が開発した唯一の計算手法：時間依存Schrodinger方程式の積分解法により、大規模計算を行い、再散乱電子の運動量分布・空間分布のレーザー場のパルス幅・位相に対する依存性を解明し、再散乱電子と原子・分子イオンの衝突による、原子の非逐次電離の研究を行う。

(2) 開発した計算コードを並列化して、赤外線とアト秒パルスの到着時間遅延によって、原子電離過程を研究する。

## 4. 研究成果

(1) 量子力学的な計算で、再散乱過程を解



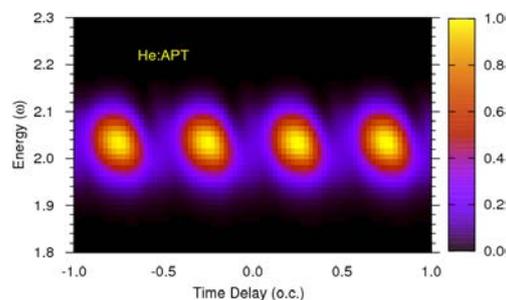
再散乱電子密度と入射距離の関係

明し、定量的な再散乱電子の運動量や入射距離などを初めとしたすべて情報を図のように得た。

得られた運動量によって、古典力学の計算の適用範囲を認定し、ヘリウム原子の非逐次2重電離過程を解明した。研究結果はこの分野で有名な雑誌 *Journal of Physics B* と *Physical Review A* に掲載された。JPBの論文は2009年JPBの highlights に引用された。

(2) 再散乱電子と原子・分子イオンの衝突過程は普通の電子ビームと原子・分子の衝突と似ているので、散乱された電子は電子と原子・分子イオン相互作用の情報を持っている。我々の理論計算で再散乱電子と原子イオンの衝突過程を解明した。研究結果はこの分野で有名な雑誌、*Physical Review Letters* に発表された。

(3) 我々の研究で、赤外線による原子光吸収過程を Floquet 理論で解明した。その理論で、アト秒パルスの中には、幅広い周波数の光が含まれているが、ある Floquet 状態の共鳴成分だけ吸収された。Floquet 成分間の干渉で、アト秒パルスの到着時間によって、吸収率が強くなるか、弱くなるか、赤外線の1周期で図のように2回振動する。赤外線の周期は3フェト秒であるので、アト秒



光透過率とアト秒パルスの到着時間関係

或いはフェト秒の範囲で光吸収過程の制御が可能になる。我々が提案したメカニズムで様々な実験観測現象を解釈することができた。その上で、赤外線の強度や到着時刻によって、短時間での(フェト秒、 $10^{-15}$ 、或いはアト秒  $10^{-18}$ )物質の光透過率の制御方法を提案した。その提案はアメリカの共同研究者が実験で実現した。研究結果は *Physical Review Letters*, や *Physical Review A* の *Rapid Communication* や *Physical Review A* に発表された。

(4) 最近赤外線と軟X線を同時に Ar 原子に照射すると、沢山二重電離イオンを観測した。その現象は従来の理論で解釈できなかった。我々の理論研究によって、赤外線ですべて

ない Auger 崩壊過程ができる現象を発見した。この過程はかなり重要な過程であるので、もっと詳しい分析を行っているところである。最初の研究結果は Physical Review Letters に発表された。

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 15 件)

- (1) X. H. Xu, L. Y. Peng, Z. Zhang, Q. H. Gong, X. M. Tong, E. A. Pronin, and A. F. Starace, *Attosecond streaking in the low-energy region as a probe of rescattering*, Physical Review Letters 査読有 **107** (2011) 183001:1-5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.183001
- (2) T. Tabe, N. Ono, X. M. Tong, and N. Toshima, *Laser information encoded in atomic asymmetrical ionization in few-cycle laser fields*, Physical Review A 査読有 **84** (2011) 023409:1-6. DOI: 10.1103/PhysRevA.84.023409
- (3) X. M. Tong, P. Ranitovic, C. W. Hogle, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, and N. Toshima, *Theory and experiment on laser enabled inner-valence Auger decay of rare gas atoms*, Physical Review A 査読有 **84** (2011) 013405:1-8. DOI: 10.1103/PhysRevA.84.013405
- (4) Y. J. Jin, X. M. Tong, and N. Toshima, *Alignment dependent ionization of hydrogen molecules in intense laser fields*, Physical Review A 査読有 **83** (2011) 063409:1-5. DOI: 10.1103/PhysRevA.83.063409
- (5) R. Ranitovic, X. M. Tong, C. W. Hogle, X. Zhou, Y. Liu, N. Toshima, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, *Controlling the xuv transparency of helium using two-pathway quantum interference*, Physical Review Letters 査読有 **106** (2011) 193008:1-4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.193008
- (6) R. Ranitovic, X. M. Tong, C. W. Hogle, X. Zhou, Y. Liu, N. Toshima, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, *Laser enabled Auger decay in rare-gas atoms*, Physical Review Letters 査読有 **106** (2011) 053002:1-4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.053002
- (7) T. Ishikawa, X. M. Tong, and N. Toshima, *Double ionization of He in an intense laser field via rescattering process*, Physical Review A 査読有 **82** (2010) 033411:1-5. DOI: 10.1103/PhysRevA.82.033411
- (8) X. M. Tong and N. Toshima, *Controlling atomic structures and photo-absorption processes by an infrared laser*, Physical Review A 査読有 **81** (2010) 063403:1-4. DOI: 10.1103/PhysRevA.81.063403
- (9) X. M. Tong and N. Toshima, *Infrared-laser-assisted photoionization of helium by coherent extreme ultraviolet light*, Physical Review A 査読有 **81** (2010) 043429:1-6. DOI: 10.1103/PhysRevA.81.043429
- (10) X. M. Tong, P. Ranitovic, C. L. Cocke, and N. Toshima, *Mechanisms of infrared-laser-assisted atomic ionization by attosecond pulses*, Physical Review A 査読有 **81** (2010) 021404(R):1-4. DOI: 10.1103/PhysRevA.81.021404
- (11) P. Ranitovic, X. M. Tong, 等 1 5 名, *IR-assisted ionization of helium by attosecond extreme ultraviolet radiation*, New Journal of Physics 査読有 **12** (2010) 013008:1-12. DOI:10.1088/1367-2630/12/1/013008
- (12) Y. J. Jin, X. M. Tong, and N. Toshima, *Enhanced ionization of hydrogen molecular ions in an intense laser field via a multiphoton resonance*, Physical Review A 査読有 **81** (2010) 013408:1-6. DOI: 10.1103/PhysRevA.81.013408
- (13) T. Shirahama, X. M. Tong, K. Hino,

and N. Toshima,  
*Atomic photoabsorption process controlled  
by static and oscillating magnetic fields,*  
Physical Review A 査読有  
**80** (2009) 043414:1-4.  
DOI: 10.1103/PhysRevA.80.043414

- (14) T. Watanabe, A. T. Domondon,  
and X. M. Tong ,  
*Theoretical study on the dynamical  
correlation in Ar focusing on 3s excitation  
with outer-shell ionization due to electron  
impacts,*  
Physical Review A 査読有  
**80** (2009) 042709:1-6.  
DOI: 10.1103/PhysRevA.80.042709

- (15) K. Sasaki, X. M. Tong, and N. Toshima,  
*Coulomb focusing effect on the space  
distribution of the rescattering electron  
wavepacket in the laser-atom interaction,*  
Journal of Physics B 査読有  
**42** (2009) 165603:1-4.  
doi:10.1088/0953-4075/42/16/165603

[学会発表] (計 7 件)

\* 招待講演

- (1) Y. J. Jin, X. M. Tong and N. Toshima  
*Alignment dependent ionization of  
hydrogen molecules in intense laser field*  
The 27th International Conference on  
Photonic, Electronic and Atomic Collisions,  
July 25 - Aug. 1, 2011, Belfast, UK

- (2) X. M. Tong, P. Ranitovic, C. W. Hogle,  
M. M. Murnane, H. C. Kapteyn,  
and N. Toshima,  
*Infrared Laser Enabled Sub-shell Auger  
Decay of Ar atoms,*  
The 3rd International Conference on  
Attosecond Physics  
July 6-8, 2011, Sapporo, Japan

- \*(3) X. M. Tong and N. Toshima,  
*IR Laser Assisted Photoionization of Atoms,*  
International Conference on Many  
Particle Spectroscopy of Atoms,  
Molecules, Clusters and Surface,  
2010, Sept. 4-7, Sendai, Japan

- (4) X. M. Tong and N. Toshima,  
*IR Laser Assisted Photo-absorption of Atoms,*  
The 10th European Conference on Atoms,

Molecules and Photons,  
July 4-10, 2010, Salamanca, Spain

- \*(5) X. M. Tong,  
*Time-dependent Method in the  
Laser-Atom Interactions,*  
Conference on Computational Physics ,  
2009, Dec. 15-19, Kaohsiung, Taiwan

- (6) 佐々木 康祐, 仝 曉民, 戸嶋 信行,  
*強レーザー場における再散乱電子  
の空間分布*  
秋日本物理学会、2009年9月25-28  
熊本大学

- (7) X. M. Tong, K. Sasaki, K. Hino  
and N. Toshima,  
*Space distribution of the rescattering electron  
wavepacket in the intense laser-atom  
interactions,*  
The 8th Asian International Seminar on  
Atomic and Molecular Physics,  
November 24-28, 2008, Perth, Australia.

[その他]

ホームページ等

ResearcherID: A-2748-2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

トシ ショウミン (Tong Xiao-Min)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：80422210