

4P013

時間分解(e,2e)電子運動量分光装置と散乱理論の開発

(東北大・多元研¹, モスクワ大・物理², モスクワ大・核物理研³) 山崎優一¹, Konstantin Kouzakov², Yuri Popov³, 高橋正彦¹

Instrumental and Theoretical Development of Time-Resolved (e,2e) Electron Momentum Spectroscopy

(IMRAM, Tohoku Univ.¹, Faculty of Physics, Moscow State Univ.², Institute of Nuclear Physics, Moscow State Univ.³) M. Yamazaki, K. Kouzakov, Y. Popov, and M. Takahashi

【序】 電子運動量分光 (Electron Momentum Spectroscopy; EMS) [1, 2]は、電子線コンプトン散乱を用いて分子軌道 (MO) ごとの電子運動量分布 (運動量空間波動関数の二乗) を観測する手法である。我々は、EMS とポンプ・プローブ法とを高度に組み合わせた形の新規分光法、すなわち、時間分解(e,2e)電子運動量分光法 (TREMS) の開発を実験及び理論の両面から進めている。これにより、レーザー配向技術を利用した MO の運動量空間における 3 次元観測、レーザー電場下の原子分子の電子波動関数形の観測[3, 4]、さらには化学反応の電子レベルでの可視化[5]を目指す。本講演では、TREMS に関する装置開発および Laser-assisted EMS の散乱理論開発の現状と将来展望を議論する。

【実験装置】 EMS 実験は、大きな移行運動量を伴うコンプトン散乱条件下における高速電子衝撃イオン化 ($e_0^- + M \rightarrow M_i^+ + e_1^- + e_2^-$) の運動学的完全実験であり、生成する非弾性散乱電子と電離電子のエネルギー E_1, E_2 と運動量 p_1, p_2 を同時計測する。これにより、入射電子のエネルギー E_0 と運動量 p_0 は既知であるので、散乱前後のエネルギー保存則と運動量保存則から、イオン化エネルギー E_{bind} とイオン化前の標的電子の運動量 p が分かる。

$$E_{\text{bind}} = E_0 - E_1 - E_2, \quad p = p_1 + p_2 - p_0$$

図 1 は、我々がその完成を目指す TREMS 装置の模式図である。チタンサファイアレーザー (800 nm, 120 fs, 5 kHz, 0.8 mJ/pulse) の出力を二つに分割し、一方を光パラメトリック効果により任意に波長変換してポンプ光として用いる。もう一方は、第三高調波 (267 nm) に変換して photocathode-type 超短パルス電子線源の銀薄膜 (膜厚 40 nm) に照射させ、パルス電子線生成に用いる。本電子銃は、入射エネルギーが 1200 eV の場合、イオン化点でのエネルギー幅が約 5 eV、時間幅が ps オーダーの電子線を、30 pA 程度の強度で生成する。

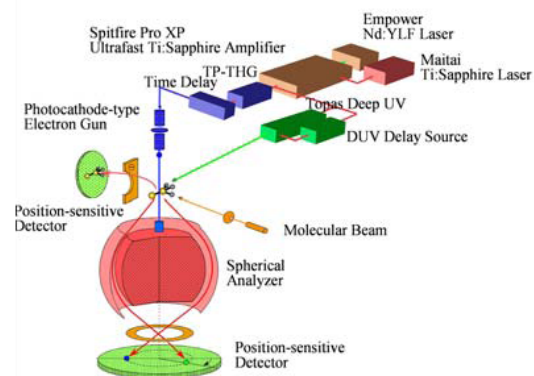


図 1 TREMS 装置の模式図

【理論】 EMS と超短パルス電子線技術を組み合わせた実験研究の理論的基盤の一つとすべく、Laser-assisted EMS 散乱理論を開発した[3, 4]。本理論は、入射および散乱電子の連続状態は Volkov 波動関数で記述し、標的束縛電子の光ドレスト状態は時間依存摂動論によって求め、散乱過程を Born 近似の枠内で取り扱う。レーザー強度が原子のクーロン場と比べて弱い($I = 4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$)条件下で、水素原子の共鳴 ($1s \rightarrow 2p$) および非共鳴 ($\hbar\omega = 1.17 \text{ eV}$) の2つの場合を取り上げ、レーザー電場中の標的原子の電子状態を TREMS 実験で調べることを示した。

【結果と考察】 Laser-assisted EMS 散乱理論[3, 4]による計算結果の一例を図2に示す。これはレーザー場中において、光の吸収・放出を伴わない ($N=0$) 場合の、水素原子に対する EMS 三重微分散乱断面積の計算結果である。比較のためにレーザー場が無い場合の運動量分布を実線で示した。標的電子状態は、光ドレスト状態 (破線および点線) と field-free 状態 (鎖線) について計算した。直線偏光の電気ベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}$ と \boldsymbol{p}_0 が並行な配置の場合 (図2(a)) では、レーザー場中の水素原子の運動量分布は、レーザー場が無い場合のそれと大きく変わらない。しかし、 $\boldsymbol{\varepsilon} \parallel \boldsymbol{\zeta}$ ($\boldsymbol{\zeta} = \boldsymbol{p}_0 \times \boldsymbol{p}_1$) の場合 (図2(b)) になると、レーザー場中の運動量分布は、ベッセル関数に起因した振動構造を示し、レーザー場が無い場合の運動量分布とは著しく異なった形状を示すことが分かる。これは、EMS では主として、標的電子の運動量 \boldsymbol{p} の \boldsymbol{p}_0 と垂直な成分を検出することによる。講演では、光の吸収・放出を伴う場合や、円偏光の場合の結果を含め、光ドレスト状態の波動関数形状の研究に対する EMS の有効性を議論する。

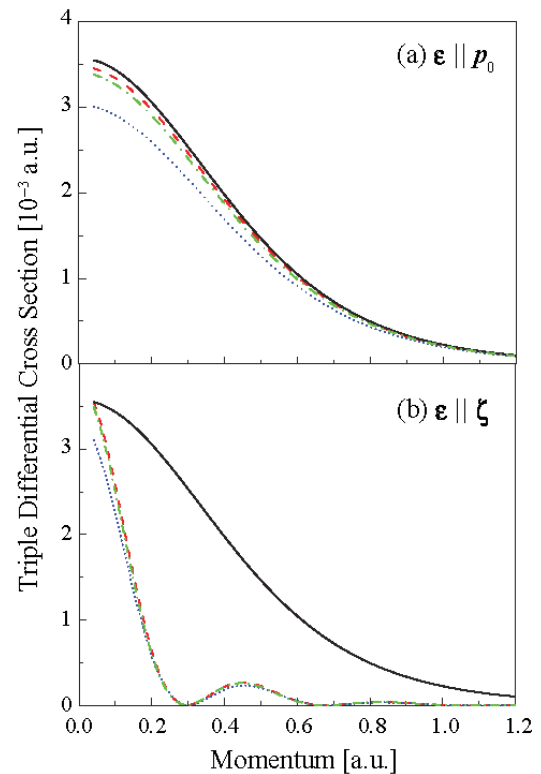


図2 水素原子の電子運動量分布

【参考文献】

[1] M. Takahashi, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **82** (2009) 751.
 [2] E. Weigold and I. E. McCarthy, *Electron Momentum Spectroscopy* (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999).
 [3] K. A. Kouzakov, Yu. V. Popov, and M. Takahashi, *Phys. Rev. A* **82** (2010) 023410.
 [4] K. A. Kouzakov, Yu. V. Popov, and M. Takahashi, *J. Phys. Conf. Ser.* **288** (2011) 012009.
 [5] 山崎優一, 大石慶也, 葛西裕治, 川瀬裕也, 高橋正彦, 第6回分子科学討論会 2012 東京, 1A09.