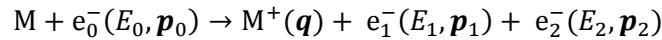


## 超高感度電子運動量分光による He の励起イオン化過程の研究

(東北大多元研) ○川瀬裕也、山崎優一、渡辺昇、高橋正彦

【はじめに】 励起を伴うイオン化過程は、電子相関や反応メカニズムに関する重要性から、光および電子衝撃イオン化などを用いた多種多様の研究がこれまで活発に行われてきている。電子運動量分光 (Electron Momentum Spectroscopy; EMS) [1]は、電子線コンプトン散乱を用いて分子軌道一つ一つの形を運動量空間波動関数の二乗振幅として観測できる手法であり、我々のグループでもこの EMS を用いて希ガス原子や水素分子などの励起イオン化過程の研究を進めてきた。一方で、我々は、運動量分布の観測範囲を約 3 倍に広げ検出効率も大幅に向上した超高感度 EMS 装置[2]の開発にごく最近成功した。これらの経緯を踏まえ、本研究では、開発した超高感度 EMS 装置[2]を用いて、He の励起イオン化過程の EMS 測定を行った結果について報告する。二電子系であるヘリウム (He) の励起イオン化過程は中性状態の波動関数における電子相関を鋭敏に反映するため、その寄与を広い運動量範囲において考察する。

【実験および計算】 EMS 実験は、入射電子  $e_0^-$  の電子衝撃イオン化で生成した非弾性散乱電子  $e_1^-$  と電離電子  $e_2^-$  のエネルギー  $E_1, E_2$  と運動量  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$  を同時計測する手法である。



EMS が対象とする大きな移行運動量を伴うコンプトン散乱では、一般に入射電子と標的電子の二体衝突過程として記述され、標的イオン  $M^+$  は傍観者として振る舞う。従って、既知である入射電子のエネルギー  $E_0$  と運動量  $\mathbf{p}_0$  を用いて、エネルギー保存則と運動量保存則により衝突前にもっていた標的電子の束縛エネルギー  $E_{\text{bind}}$  と運動量  $\mathbf{p}$  を決定することができる。

$$E_{\text{bind}} = E_0 - E_1 - E_2, \quad \mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_0$$

以上の原理より EMS を用いて、標的電子の軌道毎の運動量分布を観測することができる。

本実験は、最近我々が開発したマルチヒットに対応したディレイライン型二次元検出器を用いた超高感度 EMS 装置[2]で行った。本実験で用いた symmetric non-coplanar 配置では、電子衝撃イオン化で生成した非弾性散乱電子と電離電子のうち、エネルギーが相等しくかつ入射電子に対しても 45° 方向に散乱されたもののみを同時計測する。こうすることで標的電子の運動量の大きさ  $|\mathbf{p}|$  は検出二電子間の方位角差  $\Delta\phi$  のみの関数になる。

$$|\mathbf{p}| = [(p_0 - \sqrt{2}p_1)^2 + (\sqrt{2}p_1 \sin(\Delta\phi/2))^2]^{1/2}$$

本装置で検出可能な方位角領域は  $\phi = 10^\circ \sim 170^\circ, 190^\circ \sim 350^\circ$  であり、既存装置の  $\phi = 70^\circ \sim 110^\circ, 250^\circ \sim 290^\circ$  に対して 4 倍に拡がり、その結果運動量領域が従来の約 3 倍の範囲をカバーすることが可能となった。この装置を用いて He の  $n = 1$  と  $n = 2$  の運動量分布を入射エネルギー 1200 eV の条件下で 1 ヶ月間測定した。

実験と比較するため、平面波撃力近似 (PWIA) および歪曲波撃力近似 (DWIA) に基づく理論計算を行った。波動関数には Mitroy らの配置間相互作用 (CI) 計算で得られた自然軌道

[3]を使用した。

【結果と考察】 図1に $\Delta\phi$ に対して積分したHeの束縛エネルギースペクトルを示す。図より励起イオン化過程である $n=2$ の強度は主遷移の $n=1$ の強度に比べ非常に小さいことがわかる。 $n=1$ および $n=2$ へのイオン化遷移に対応するバンド強度を $p$  (すなわち $\Delta\phi$ ) に対してプロットした運動量分布を図2に示す。図2には運動量分布の形状を比較するため、我々の以前のデータ[4]及び理論計算の結果を本実験結果に対して規格化して示してある。図2から定量的な電子運動量分布を高精度に得ることに成功したことが見て取れる。本分光装置により以前では測定が困難であった高い運動量領域での運動量分布の観測が可能となった。運動量と位置のフーリエ変換の性質から、波動関数の高運動量成分は原子核近傍での成分に概ね対応すると考えられるため、この領域では標的の静電ポテンシャルによる歪曲波効果が現れる。実際に図2をみるとPWIAよりもDWIAの方が実験結果を良く再現していることが分かる。しかし、 $n=1$ の場合に比べ $n=2$ では実験結果とDWIAの結果との間に有意な差が見られ、定量的な一致を得るにはCI波動関数の質を検討する必要がある。今後、電子衝撃イオン化における2次の相互作用の寄与[4]などについても考察を行い、標的電子状態および衝突ダイナミクスの両観点から広運動量領域でのEMS断面積の振る舞いを明らかにしていく。

【参考文献】

[1] M. Takahashi, *Bull. Chem. Soc. Jpn* **82**, 751 (2009).  
 [2] M. Yamazaki, H. Satoh, M. Ueda, D. B. Jones, Y. Asano, N. Watanabe, A. Czasch, O. Jagutzki, and M. Takahashi, *Meas. Sci. Technol.* **22**, 075602 (2011).  
 [3] J. Mitroy, I. E. McCarthy, and E. Weigold, *J. Phys. B* **18**, 4149 (1985).  
 [4] N. Watanabe, M. Takahashi, Y. Udagawa, K. A. Kouzakov, and Yu. V. Popov, *Phys. Rev. A* **75**, 052701 (2007).

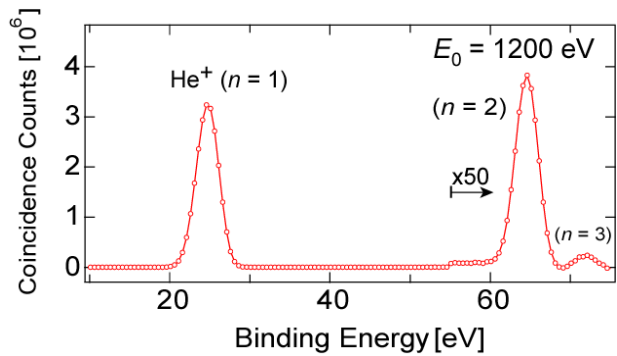


図1: Heの束縛エネルギースペクトル

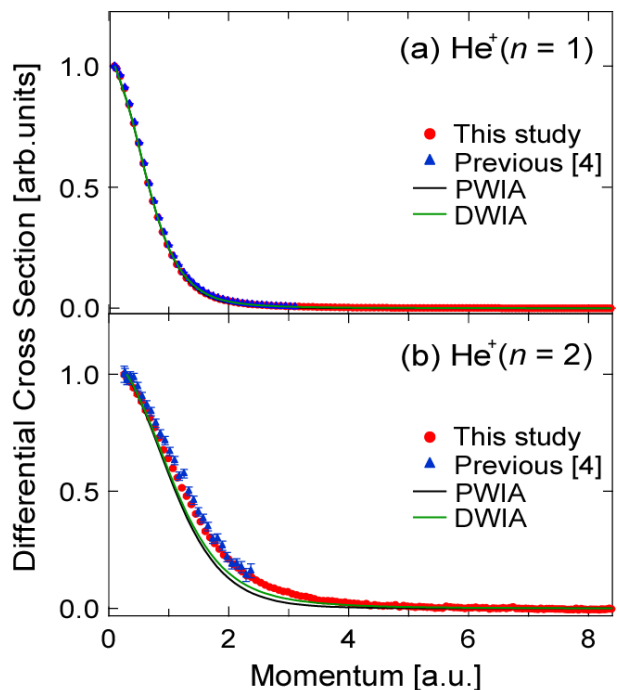


図2: He<sup>+</sup>の(a)  $n=1$  (b)  $n=2$  へのイオン化遷移に対応する実験および理論運動量分布