

# Double electron transfer processes of He<sup>2+</sup> ions

## in collision with alkaline earth atoms

(He<sup>2+</sup>とアルカリ土類原子の衝突における2電子移行過程)

### 大谷研究室

### 家村 一 彰

イオンが中性原子から電子を捕獲する電荷移行過程は実験室や宇宙のプラズマおよび上層大気で頻繁に起こっている重要な原子過程である。本研究では中性原子から2つの電子がヘリウム2価イオン(He<sup>2+</sup>)に移行する過程に着目し次の2つについて詳しく調べた。

1. ヘリウムの2電子励起状態の分光学的研究
2. 中性原子からHe<sup>2+</sup>イオンへの2電子移行メカニズムの研究

1の研究の歴史は極めて古く、中性ヘリウム原子の光吸収あるいは電子・イオン衝撃により生成される2電子励起状態に関してはすでに数多くの知見が得られている。これらはエネルギーをもった光子・粒子が中性原子を励起する過程であるのに対し、本研究における2電子励起状態は電子を持たないヘリウムが標的原子から2つの電子を捕獲して生成される。この方法では励起に伴う選択則にとらわれることがないため、これまで観測されることのなかった特徴的なヘリウム2電子励起状態が生成される。

2に関して、多価イオン(例えばC<sup>6+</sup>, O<sup>8+</sup>など)と中性原子衝突における2電子移行過程の研究例は数多くあるがHe<sup>2+</sup>-中性原子衝突での研究例はほとんどない。多価イオンと中性原子衝突では2電子捕獲メカニズムを解釈するモデルがいくつかあり実験結果の傾向をよく説明している。一方、He<sup>2+</sup>とアルカリ土類原子の衝突系での2電子移行過程は多価イオンの場合と同じ解釈では予想される傾向と実験結果が大きく違っている。本研究では標的種と衝突エネルギーを変えて系統的に観測した放出電子スペクトルから2電子移行のメカニズムを定性的に考察した。

実験は東京大学原子核科学研究センターのECR(Electron Cyclotron Resonance)イオン源を用いて行った。ECRイオン源で生成されたHe<sup>2+</sup>イオンは衝突セルの中で標的原子と衝突し2電子励起状態を生成する。標的原子ガスは衝突セル中で固体アルカリ土類試料を加熱、蒸発させて得た。生成された2電子励起状態にあるヘリウムは自動イオン化によって電子を放出する。イオンビームに対して0度方向に電子分光器を置き放出電子スペクトルを高分解能で観測した。

はじめに、 $\text{He}^{2+}$ イオンと Ba 原子の電荷移行衝突において生成される 2 電子励起状態  $\text{He}^{**}(Nlnl' \ 2s+1L)$  ( $N=2,3,4, n \leq N$ ) から放出される電子のスペクトル分布を観測した。そして、 $\text{He}^{**}(2s^2 \ 1S^e)$  から  $\text{He}^{**}(2f6l)$  まで、 $\text{He}^{**}(3s^2 \ 1S^e)$  から  $\text{He}^{**}(3f7l')$  までの状態についてスペクトル線の同定を行い、報告されている理論計算とよく一致していることを確かめた。同定された 2 電子励起状態を全体的に見ると、角運動量  $L$  の大きな状態が支配的に生成され、角運動量  $L$  の小さな状態からの放出電子のスペクトル線強度は相対的に小さい。このようなスペクトル分布は光吸収や電子・イオン衝撃では観測されないので非常に興味深い。観測した 2 電子励起状態からの放出電子スペクトル系列は、それぞれの  $N$  のシリーズリミットまでほぼ等しい強度を保ちシリーズリミットで急激に減少する構造が見られた。これは  $n$  が極めて大きな Rydberg 状態まで生成された 2 電子励起状態が分布していることを表している。高  $n$  Rydberg 状態への電子捕獲断面積は多価イオンの場合  $n^{-3}$  に比例して減少することが知られているが、本研究での観測は  $n^{-3}$  則を示さない。

この他、特徴的なスペクトルとして  $\text{He}^{2+}$ イオンと Ba 原子の電荷移行衝突では 3 重項状態の 2 電子励起状態を観測した。シングレット状態にある Ba 原子の 2 個の 6s 電子が、 $\text{He}^{2+}$ イオンに移行する場合、通常 3 重項状態は生成されないと考えられる。LS 結合のくずれやスピントリップなどによる生成の可能性が考えられるが、理論的な見積りの結果これらの効果は小さく、最外殻の s 電子と内殻の p 電子の捕獲による生成が有力であるとの結論を得た。

高 Rydberg 状態への 2 電子移行過程を議論するために Ba 標的に加えて Mg, Ca, Sr を標的とし衝突エネルギーを 20 ~ 40keV の範囲で変化させて、放出電子の系統的な観測を行った。この結果、高 Rydberg 状態は標的原子の原子番号および衝突エネルギーが大きくなるにつれて、多く生成される傾向があることを確かめた。

$\text{He}^{2+}$ とアルカリ土類原子の衝突におけるポテンシャルダイアグラムを見積もると高 Rydberg 状態は比較的大きな吸熱反応によりおこるが、一方でその状態は大きな分極ポテンシャルを持つため 2 電子移行が可能となり、大きな核間距離で電子移行が起こることが予想される。さらに、原子番号の大きな標的原子になると 2 電子移行のおこる核間距離が大きくなることから、大きな幾何学的な捕獲断面積を持つであろうと推論される。

本研究では 0 度方向に放出した電子を観測しているが、高 Rydberg 状態のもつ大きな分極ポテンシャルの影響を受けると散乱軌道が変化し 0 度方向以外へ散乱が起こることに注目し、散乱軌道の古典的考察から、高い衝突エネルギーで高 Rydberg 状態への 2 電子移行の幾何学的断面積が大きくなることを定性的に論じた。