

[H27-04]

高速クラスターイオン照射で誘起される現象の理論的研究 Theoretical Study of Electron Excitation induced by Swift Cluster Ions

金子 敏明^{#)}

Toshiaki Kaneko

Department of Applied Physics, Okayama University of Science

Abstract

Theoretical research on electron excitation processes of solid and gaseous targets induced by swift carbon cluster ions has performed on secondary electron emission, creation and destruction of a cluster, and electronic stopping power.

Keyword: cluster ion, secondary electron, stopping power, ionization

1. はじめに

高速クラスターイオンが固体薄膜を通過する際には、単一イオンでは見られない「クラスター効果」が報告されている。すなわち、おなじ速度の単一イオンに比べて、薄膜透過後のイオンの平均電荷の減少[1-3]、物質へのエネルギー付与の非線形性[2,4-7]、1 粒子あたりの生成二次電子収率の強い抑制[8-10]、などが知られている。これは、いずれも複数粒子が同時に入射したことによる時空間相関のためである。今年度は、高速クラスターイオン入射による固体薄膜および気体標的を通過する際の電子励起過程に関する以下のような検討をおこなった。

2. 二次電子励起

C₂ クラスターが炭素薄膜を通過した際に前方（イオンの進行方向）に放出される二次電子のエネルギー分布について理論計算を行った。カイネティック放出の過程は、(1) 入射イオンによる物質内での電子励起、(2) 励起された電子の出口表面までの伝播、(3) 表面ポテンシャルからの脱出、の 3 段階過程で研究される。ここでは最初の過程の研究を行った。

衝突径数の関数として標的炭素原子の 1s,2s,2p 状態にある内殻電子がクーロン場の連続状態に電離される確率をボルン近似で評価した。先行イオンと標的原子との衝突径数を b_1 とし、後行イオンのそれを b_2 、2 粒子間の距離を R 、クラスター軸が進行方向となす角を θ とする。このとき b_2 は b_1 、 R 、 θ 、および進行方向である z 軸まわりの角度 ϕ の関数となる。クラスターの配向角 θ を固定したときの二次電子のエネルギー依存性を調べるために、クラスターによる電離確率を ϕ に関して角度平均を行った。その結果、二次電子のエネルギースペクトルに、単一粒子入射では現れない振動構造が見出された。これは 2 粒子による電子励起における時空間相関を反映したためである。衝突径数 b_1 と配向角 θ で積分したものはランダム配向でのエネルギースペクトルに比例する量となる。これは単一粒子入射と同じようにバイナリーピークが確認できる。1 粒子あたりのエ

ネルギースペクトル比には、わずかながら振動構造が見られるが、低エネルギー領域を除いてほぼ 1 に等しい。なお、この計算において、平均電荷のクラスター効果による減少効果を取り入れている。

3. 荷電変換過程

タンデム加速器でのクラスターイオン生成には、荷電変換領域における気体との衝突のためにクラスターの生成のみでなく分解も起こる。このために、クラスターイオンを効率よく生成するには荷電変換気体の種類と圧力を最適化する必要がある。この問題に関する実験データは齋藤・鳴海グループで収集され検討されている。われわれは、この問題を理論面から考えることで協力している。レート方程式から出発していくつかの近似を行うと 1 価の正のクラスターの収率は、生成断面積と分解断面積の 2 つの量で支配される。試みに、ここでは、衝突径数法を用いて C₂ クラスターイオンの分解確率と生成確率を計算し、それらからそれぞれの断面積を計算した。ここでもクラスターの配向依存性が現れた。C₂ クラスターは 2 つの C 原子の集まりであると考え、HF の波動関数で記述される 1s,2s,2p 状態を仮定した。計算値は、齋藤氏らによって測定された希ガス実験データの値に近いものとなった。しかし、分解断面積においては、電離される 2 つ以上の軌道電子の組み合せ方に制限を加えたり、近似で無視した項の見積もりなど課題も見つかったので、今後、検討する。

4. 電子の阻止能

柴田氏らのグループとの関連で、Al₂O₃ の電子的阻止能を評価した。1 原子あたりの入射エネルギーが 0.5~1.5MeV の C_n クラスターイオン ($n=1\sim6$) に対する電子的阻止能 $S(n)$ を誘電関数法と Bragg 則を用いて計算した。Al では素子能比 $S(n)/nS(1)$ が 1 を超えるが、O の電子的阻止能はわずかながら 1 を超えない。にもかかわらず、結果として Al₂O₃ では阻止能比が 1 を超えることがわかった。

[H27-04]

参考文献

- [1] A. Brunelle et al., Phys. Rev. A 59, 4456 (1999).
- [2] T. Kaneko, Phys. Rev. A 66, 052901 (2002).
- [3] A. Chiba et al., Phys. Rev. A 76, 063201(2007).
- [4] K. Baudin et al., Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. B 94, 341 (1994).
- [5] A. Brunelle et al., Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. B 125, 207 (1997).
- [6] S. Tomita et al., Phys. Res. A 82, 044901 (2010).
- [7] T. Kaneko, Phys. Rev. A 86, 012901 (2012).
- [8] H. Kudo et al., Jpn. J. Appl. Phys. 45, L565 (2006).
- [9] S. Tomita et al., Phys. Rev. A 73, 060910(R) (2006).
- [10] T. Kaneko et al., J. Phys. Soc. Jpn. 75, 034717 (2006).