

[H30-4]

高速クラスターイオンの生成と照射に関わる電子励起の理論的研究 Theoretical Study on electron excitation in production and penetration of swift cluster ions

金子敏明 ^{#)}

Toshiaki Kaneko

Department of Applied Physics, Okayama University of Science

Abstract

We have performed theoretical research both on electron excitation in production of a singly charged cluster ions composed of a few atoms in tandem accelerator by means of the independent-atom and -electron models, and on energy-loss via electron excitation of a solid induced by penetrating C₆₀ cluster ions with energy of a few MeV by means of dielectric-function method.

Keyword: cluster ion, stopping power, independent-electron model

1. はじめに

MeV 領域の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、平均電荷の減少^[1]、エネルギー付与の非線形性^[1]、二次電子収率の抑制効果とコンボイ電子収量の増強効果などが報告されている。この研究では、高速クラスターイオンと希ガスとの衝突過程に関与する「断面積のクラスター効果」、および、数 MeV のエネルギーをもつ C₆₀ クラスターイオンのエネルギー付与に関する研究を行った。

2. 理論モデルと計算結果

タンデム加速器で正のクラスターイオン C_n⁺ (n=2-4) を高い効率で生成できる条件を検討するために、荷電変換領域における気体との衝突で起こる電荷変換過程とクラスターの分解過程に対する断面積を電子損失の立場から理論的に評価した。MeV 領域のクラスターイオンの生成に関しては、6つの断面積で決定される。ここでは、原子数が2~4の比較的小さい線状クラスターを想定して、3つの電子損失断面積 σ_{-10} , σ_{-11} , σ_{01} と3つの分解断面積 σ_{id} (i=-1,0,1) を衝突径数法と独立電子モデルに基づいて理論的に評価した^[2]。ここで、 σ_{ij} は荷電変換ガスとの衝突によってクラスターの電荷が i から j に変わる断面積である。入射炭素クラスターイオンは、弧立した原子またはイオン C^k (k=-1,0,+1) が等間隔 $d=1.27 \times 10^{-8} \text{ cm}$ で連なっていると仮定した。それらの束縛電子の波動関数は知られている。数値計算例として、1.2 MeV/atom C_n⁺ (n=2-4) と He の衝突における断面積 σ_{-10} , σ_{01} , σ_{-11} の値を図1に示した。この図から、C_n に対する断面積 σ_n を $\sigma_n = \sigma_2[1 + \alpha(n-2)]$ と近似的に表すことができ、各断面積に対していずれも $\alpha < 0.5$ であり、粒子数に対する弱線形性すなわち「負のクラスター効果」を示した。また、これらの断面積を用いて計算した1価のクラスターイオン生成率は、高崎グループの実験データと非常に一致を示した^[2]。

また、C₃⁺ クラスターイオンに対しては、線状構造とリング構造で、荷電変換ガス He, Ne の圧力依存

性が少し異なることが分かった^[3]。

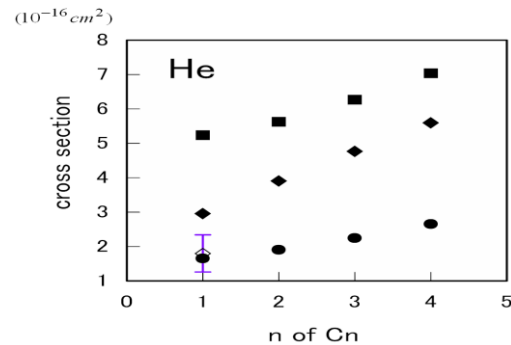


Figure 1. The size dependence of the cross sections σ_{-10} (■), σ_{01} (◆), σ_{-11} (●).

次に、C₆₀ クラスターイオンの電子的阻止能について理論研究を行った。フラーレン構造をもつ C₆₀ クラスターイオンの原子の空間位置を決定し、その速さに応じた平均電荷と束縛電子の空間分布を考慮した。固体炭素薄膜の電子的阻止能を誘電関数法で評価した。その結果、2-10 MeV の C₆₀ クラスターに対する阻止能は、単一の C に対する阻止能の 60 倍ではなく 48 倍程度（すなわち 80% 程度）であることが判明した。このとき、各粒子がもつ平均電荷は同速の単一イオンの 0.8 倍程度である。さらに、励起された電子の拡散係数を評価して、イオンから付与されたエネルギーが電子によって拡散していく影響も調べた。この知見は、今後イオントラックの評価に利用できると考えている。

参考文献

- [1] T. Kaneko, Phys. Rev. A 66, 052901 (2002).
- [2] T. Kaneko *et al.*, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B478, 218 (2020).
- [3] T. Kaneko, Bull. Okayama Univ. of Sci., No.56 A, 21 (2020).