

要旨

本研究における多重散乱は、入射粒子および標的原子との2対衝突の繰り返しである。散乱ポテンシャルを量子力学的に取り扱い、入射粒子と標的との散乱は古典的に取り扱っている。

小角多重散乱理論の研究は、Bothe [1]、Wentzel [2] までさかのぼる。多くの理論と実験がなされている。理論に関しては、Scott のレビューがある[3]。また、最近のレビューとしては、Sigmund によるものがある[4]。よく使われている多重散乱理論は、Sigmund-Winterbon (SW) の小角多重散乱理論であろう[5]。

SW モデルは、Lindhard らの微分散乱断面積を用いている。Lindhard らは、インパルス近似を用いて微分散乱断面積を求めた[6]。ここで重要なのは、小角近似での上記断面積と、小角近似を使っていない断面積とが、一致することである。それは、べき乗のポテンシャルを用いて、断面積を評価することで一致が得られる。つまり、SW の小角近似の制限は幾分弱いというのが我々の結論である。

多重散乱の研究は今も行われており、比較的最近の論文としては、Arista らのグループによる研究がある[7, 8]。Arista らは、金属に低速の陽子を入射させて、実験と理論との著しい不一致を報告している。および最近の理論研究として、イオンビームを自由電子ガスに入射させたときの微少散乱角に対する研究がある[9, 10]。これは、Arista らによって研究されている。

また、医学・生物分野への多重散乱の応用としては、nuclear microscopy を用いた細胞の構造画像を得る研究がなされている[11, 12]。例えば、がん細胞や繊維細胞などの映像を得ることに成功している。また、重粒子線を用いたがん治療がある[13, 14]。

本研究では遮蔽定数に関する報告を行う。特に表面研究においては、最適な遮蔽定数を得ることが重要である[15]。ただ1つの遮蔽定数で実験を説明することはまだできていない。本研究では、Thomas-Fermi-Moliere ポテンシャルからある1つの遮蔽定数を導出した。この遮蔽定数で、いくつかの実験を説明

することに成功した。そして今回の遮蔽定数の特徴は、入射粒子の荷電状態を含んでいることである。これは、Kaneko の 1 原子の遮蔽定数を用いることで実現できた [16]。小角多重散乱において、軽い入射粒子と、比較的重い標的との組み合わせで、良い一致が得られた。散乱角が小さいということは、比較的に大きい衝突係数を意味する。しかし我々は、遮蔽定数を求めるときに、マクローリン展開を用いている。これは小さな衝突係数に対応している。にもかかわらず、実験と理論と良い一致を示した。この理由は、上にも書いたように、SW 理論の小角近似の制限が弱いためだと考えられる。

さらに、本報告では多重散乱にエネルギー損失を導入した。これは、先駆的研究としては Valdez-Arista (VA) の理論がある [17]。しかしながら、VA モデルでは、電子的阻止能のみを取り扱っている。また、エネルギー損失と膜厚とを独立に取り扱っている。我々は、核的阻止能も考慮し、またエネルギー損失と標的膜厚とを関連づけた。このときに用いたエネルギー損失理論は、Kaneko の電子的エネルギー損失理論 [18]、および Lindhard らの核的エネルギー損失理論 [6] である。電子的エネルギー損失は、正確に膜厚の関数として求まった。しかしながら、核的エネルギー損失に関しては、ある近似の元で膜厚の関数として求めることができた。結論としては、低エネルギーになると、核的阻止能によるエネルギー損失を無視することはできない、ということがわかった。なぜなら、低エネルギーでは、核的阻止能が電子的阻止能よりも優勢であるからである。上記は、入射エネルギーが 27keV での計算結果である。したがって、我々の提案した手法は、VA 理論の改良になっているといえる。

さらに付け加えると、1 つの式で核的エネルギー損失と電子的エネルギー損失を含む Switching モデルを提案した。このモデルは、荒い近似を元になっているが、正確に解くことができる。核的阻止能が優勢である領域と電子的阻止能が優勢な領域との 2 つに分けていることが、このモデルの特徴である。また、同時にこのことが欠点でもある。なぜなら、核的阻止能が優勢である領域は、非常に膜厚が薄いことに対応している。したがって、数値計算に困難さがある。しかしながら、正確に解けるモデルという点においては利点があると思われる。

参考文献

- [1] W. Bothe, Z. Physik 4 (1921) 161;
W. Bothe, Z. Physik 4 (1921) 300;
W. Bothe, Z. Physik 5 (1921) 63.
- [2] G. Wentzel, Ann. Physik 69 (1922) 335.
- [3] W.T. Scott, Rev. Mod. Phys. 35 (1963) 231.
- [4] P. Sigmund, Stopping of Heavy Ions, Springer, Berlin/Heidelberg, 2004 pp.121-124;
P. Sigmund, Particle Penetration and Radiation Effects Vol. 2, Springer Cham
Heidelberg New York Dordrecht London, 2014 pp.281-339.
- [5] P. Sigmund, K. B. Winterbon, Nucl. Instr. Meth. 119 (1974) 541.
- [6] J. Linhard, V. Nielsen, M. Scharff, K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd. 36 (10)
(1968).
- [7] E.D. Cantero, G.H. Lantschner, J.C. Eckardt, F.C. Lovey, N.R. Arista, Phys. Rev.
A81 (2010) 042902.
- [8] M. Fama, G.H. Lantschner, J.C. Eckardt, C.D. Denton, N.R. Arista, Nucl. Instr.
Meth. B 164–165 (2000) 241.
- [9] C. D. Archubi and N. R. Arista, Phys. Rev. A **72**, (2005) 0627121.
- [10] C. D. Archubi and N. R. Arista, Phys. Rev. A **74**, (2006) 052717.
- [11] R. Norarat, H. J. Whitlow, M. Ren, T. Osipowicz, J. A. Kan, J. Timonen, F. Watt,
Microelectronic Engineering 102 (2013) 6.
- [12] R. Minqin, J. A. Kan, A. A. Bettiol, L. Daina, C.Y. Gek, B. B. Huat, H. J. Whitlow,
T. Osipowicz, F. Watt, Nucl. Instr. Meth. B 260 (2007) 124.
- [13] K. Noda, T. Furukawa, T. Fujimoto, Y. Hara, T. Inaniwa, Y. Iwata, K. Katagiri, N
Kanematsu, K. Mizushima, S. Mori, T. Murakami, Y. Sano, S. Sato, T. Shirai, E.
Takada, Y. Takei, Nucl. Instr. Meth. 331 (2014) 6.

- [14] T. Miyamoto, M. Baba, N Yamamoto, M. Koto, T. Sugawara, T. Yashiro, K. Kadono, H. Ezawa, H. Tsujii, J. Mizoe, K. Yoshikawa, S. Kandatsu, T. Fujisawa, *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 64 (2007) 750.
- [15] R.P. Walker, D.J. Martin, *Surf. Sci.* 118 (1982) 659.
- [16] T. Kaneko, *Phys. Rev. A* 66 (2002) 052901.
- [17] J. E. Valdes, N. R. Arista, *Phys. Rev. A* 49 (1994) 2690.
- [18] T. Kaneko, *Phys. Rev. A* 41 (1990) 4889.