

博士論文審査要旨

論文審査担当者

主査	明星大学	教授	合田 一夫
副査	明星大学	准教授	石田 宗之
副査	明星大学	准教授	鈴木 陽子
副査	東京大学	准教授	長谷川 秀一

申請者氏名 池上誠治

論文題目 薄膜を通過するイオンビームの小角多重散乱の研究

(論文審査の結果の内容)

本論文は、薄膜を通過するイオンビームの小角多重散乱についての研究で、分野としては、放射線物性になる。主として、学術論文誌 Nucl. Instr. and Meth. B 316, 222-231 (2013). Nucl. Instr. and Meth. B 311, 14-19 (2013) に単著で掲載された論文を基としている。

1章は緒言、2章は理論的背景、3章では本研究で提案された理論について述べられている。第4章は結果と考察、第5章は結論である。

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体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、Wentzelまでさかのぼる。多くの理論と実験がなされている。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。

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(ポテンシャルから受ける散乱が非常に小さいという近似)を用いて微分散乱断面積を求めた。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本研究の結論である。

第1 に本研究では遮蔽定数に関する報告を行っている。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。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 の孤立原子の遮蔽定数を用いることで実現できた。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。しかし著者らは、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。

第2 に、本研究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Valdelzz-Arista (VA) の理論がある。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。著者は、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、およびLindhard らの核的エネルギー損失理論である。電子的エネルギー損失は、正確に膜厚の関数として求めた。さらに、核的エネルギー損失に関しては、入射エネルギーと出射エネルギーとがほとんど差がないという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、著者らの提案した手法は、VA 理論の改良になっているといえる。

第3 に、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。膜厚が薄いところでの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。

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。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。

以上のように、本研究は放射線物性における散乱理論に新しい知見を提唱したものである。また、査読付きの学術誌にも掲載され、査読者との検討も十分に行

われている。博士（理学）の学位を授与するに十分価値あるものと認める。

（試験および試問の結果の要旨）

2014年6月20日（金）に物理学専攻による予備的な審査が行われ、50分の研究報告、40分の質疑応答が行われた。専門誌に掲載された論文も提示され、その後の物理学専攻会議で学位申請資格があるとされた。

試験および試問は、2015年1月21日（水）の審査委員会の中で行われた。はじめに、放射線物性の分野について質疑応答があった。つぎに、あらかじめ委員に提出された主論文をもとに、学位申請者が審査委員の前で60分口頭発表し、逐次審査委員の質問に回答しながら、進められた。研究内容は水準の高いものと評価された。また、研究内容の紹介は論旨明解で、質問に対する回答は適切であった。また、審査会后、申請者と委員とで意見を交わし、主論文について、一部表現、説明についての加筆修正の要請があった。

また、2015年2月4日（水）に公聴会が行われた。修正された主論文を回覧し、40分の口頭発表で研究内容が紹介され、質疑応答があった。ここでも論文内容の説明、質問に対する回答は適切であった。

外国語については、原著論文が英語で書かれていること、提出された要旨が英語で的確に書かれていることから十分な英語力があることが認定された。なお、申請者は学部卒業後半年間、アメリカの大学に在籍した経験がある。

公聴会直後の審査委員会において、委員全員により博士学位に十分な水準に達しているとして合格とされた。

2015年2月6日（金）の物理学専攻会議において、審査委員会の結論通りで良いとされた。

以上のように慎重に審査した結果、学位論文（論文博士）の総合評価は合格と判定された。