

氏 名	押 山 孝 おし やま たかし
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	論 理 博 第 708 号
学位授与の日付	昭 和 56 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Dechannelling of Fast Charged Particle from Planar Channel Based on the Stochastic Theory (確率理論に基づく高速荷電粒子の面チャネルからのディチャネ リング)

論文調査委員 (主 査) 教 授 浅井健次郎 教 授 端 恒 夫 教 授 遠藤裕久

論 文 内 容 の 要 旨

単結晶における高速イオンのチャネリング現象は、イオンの多重小角散乱が関与した複雑な現象であり、特にイオンが結晶内に深く入るにつれてチャネリングの減衰する過程は、理論的には十分明らかにされていない。一方、チャネリングを利用して結晶欠陥、原子核反応時間等を研究するためには、チャネリングの減衰過程の解析が重要である。これまでの理論的研究では、チャネリングの減衰（ディチャネリング）の結晶中の深さ依存を定量的に説明することができなかった。本論文では、面チャネリングしている MeV 領域の陽子の多重散乱過程に対し、確率過程の理論を適用し、ディチャネリングが Fokker-Planck 方程式を用いて精度よく記述されることを示した。

即ち、チャネリングしているイオンの運動量の原子面に垂直な成分の二乗に比例する横エネルギーを確率変数とし、結晶内電子による散乱、および格子振動による散乱に伴う横エネルギーの遷移確率を求めた。その結果、

- (i) イオンの横エネルギーが増すにつれ遷移確率の分布は広がり、またその形は非対称であること
 - (ii) 遷移確率はイオンおよび結晶原子の原子番号に大体比例し、イオンのエネルギーに反比例すること
 - (iii) 電子散乱による遷移確率の寄与は、全確率の90%程度で、格子振動による散乱の寄与は少ないこと
 - (iv) 遷移確率の1次より4次までのモーメントの横エネルギー依存を計算し、横エネルギーが増加するにつれて特に高次のモーメントが急激に増加すること
- 等を示した。

次に、電子散乱、格子振動による散乱が無秩序に起こることから、ある横エネルギーを持つイオンの割合の時間変化（この場合は結晶表面からの深さによる変化）は、この遷移確率を用いて確率論的積分方程式で記述されることを導いた。ディチャネリングの深さ依存はこの方程式の解を横エネルギーについて積分することによって求められる。確率の1次から4次のモーメントの計算値をもとに、結晶表面での散乱による横エネルギー分布を初期値として積分方程式の近似解を求め、解の収斂状態を検討した。遷移確率の

高次のモーメントの値は小さく、かつ積分方程式への寄与も小さいことが明らかとなった。従って2次のモーメントまでを用いて書ける Fokker-Planck 方程式が、積分方程式の良い近似値であることを示した。また、このようにして求めた Fokker-Planck 方程式の解から計算したディチャネリングは実験結果とよく一致する。なお、実験は 0.5~2.5 MeV の陽子ビームを用い、Si, Al, Ge 等の主要な原子面についてディチャネリングを測定している。一般的傾向としては、結晶原子の原子番号が大きくなるにつれ、又イオンのエネルギーが小さくなるにつれて理論と実験の一致が悪くなる。その原因は Fokker-Planck 方程式の導出にあたり無視した3次以上のモーメントが大きくなるためとも考えられる。しかしその場合でも MeV 領域の陽子チャネリングにおいては、理論と実験のずれは数%以下である。

実際には、低エネルギー粒子の場合の理論と実験のずれは、結晶表面に付着した数 nm の厚さの汚れによるものとして、Fokker-Planck 方程式の初期値を非晶質内での多重散乱を考慮した場合の値にとれば、実験値と良く一致するディチャネリングの値を得ることができる。

なお、これまでディチャネリングの理論では、通常の拡散方程式が用いられていたが、申請者は本論文においてその導出の基礎となる仮定について検討を加え、その仮定は不正確であること、従って Fokker-Planck 方程式が論理的により良い近似式である事を主張している。

論文審査の結果の要旨

単結晶における高速イオンのチャネリング現象の特徴を利用して結晶格子欠陥の構造やその分布、或いは原子核反応時間の研究などが行なわれている。しかしこれらの研究のためには、イオンが結晶内を進行するにつれて起るチャネリングの減衰（ディチャネリング）の深さ依存を正確に知ることは不可欠の要件となる。従来このディチャネリングの理論的取扱いは、実験の結果との定量的一致が良くないため、チャネリングを利用した研究を進める上で大きな障害となっていた。申請者は面チャネリングしている MeV 領域の陽子について、結晶内での小角多重散乱の記述に確率過程の理論を応用し、ディチャネリングが Fokker-Planck 方程式により精度よく表現されることを示し、さらにその結果を実験データと詳細に比較検討し、結論の妥当性を立証している。

申請者はまずイオンの運動量の原子面垂直方向の成分に基づく横エネルギーを確率変数として選び、電子による散乱および格子振動により変位した原子による散乱に基づく横エネルギーの遷移確率の表式を新たに導びき、数値計算によりその値およびそのモーメントの性質を調べた。遷移確率は本論文で始めて求められたもので、これまでは Bohr の多重散乱の理論を応用して遷移確率の2次のモーメントに相当する量が求められていただけである。これによってチャネリング・イオンの小角多重散乱の様子が明らかとなったが、特に確率の1次のモーメントを正確に求めたことは、以下の確率論的積分方程式の近似式を導く上で有効であった。

次に、この遷移確率をもとにし特定の横エネルギーを持つイオンの割合の時間変化を記述する積分方程式を導びき、これが Fokker-Planck 方程式で近似できることを、数値計算に基づいて示した。この数値計算においては初期値として、平行なイオンビームが結晶表面で散乱されたときの横エネルギー分布を用いている。遷移確率の3次以上のモーメントの積分方程式における寄与は、結晶を構成する原子の原子番

号が小さく、かつイオンエネルギーが大きい時に非常に小さい。

Fokker-Planck 方程式の解を横エネルギーについて積分した量の深さ依存（時間変化）が、実験で求められたディチャネリングと比較できる。申請者は 0.5~2.5 MeV の陽子を用いて、Si, Al, Ge, 等の結晶の主要な面チャネリングを測定し、その結果を理論値と比較した。低エネルギー陽子を除き、実験値と理論値は良い一致を示している。低エネルギーの場合の実験と理論のずれについては、申請者は結晶表面に付着した数 nm の厚さの汚れ、または、表面処理の過程で表面に残った多結晶性薄層による散乱の可能性があるとし、Fokker-Planck 方程式の初期値として 薄膜透過後の横エネルギー分布を用いてディチャネリングを計算した。この場合、0.5~2.5 MeV の範囲で理論と実験の間に良い一致を見ている。

更に、これまで多くの人々によって用いられていたディチャネリングの理論で通常の拡散方程式が用いられてきた事を取り上げ、申請者はその導出の基礎となる遷移確率の 1 次と 2 次のモーメントの間の関係式が正しくないことを示し、これが従来 of 理論的予測と実験との不一致の大きな原因であることを明らかにした。

以上の如く、本論文は高速陽子のディチャネリングの機構を明らかにし、その理論的表現を可能にしたもので、チャネリング現象の基礎および応用研究の発展に寄与する所少なくない。参考論文はすべてイオン・チャネリングの基礎と応用に関するものでこの方面の研究における申請者の学識を示している。

よって本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認める。