

陽子入射反応における障壁エネルギー領域スペクトルに関する研究

山口, 雄司

<https://doi.org/10.15017/4060157>

出版情報 : Kyushu University, 2019, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 山口 雄司

論 文 名 : 陽子入射反応における障壁エネルギー領域スペクトルに関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

陽子入射陽子放出反応を記述する代表的な核反応模型は、核内カスケード(INC)模型と一般化蒸発模型(GEM)からなる 2 段階模型(INC + GEM)であり、線量計算等に用いられる粒子輸送計算において重要な役割を担う。INC 模型は一般に入射エネルギー $E_{in} > 200$ MeV において有効と考えられていたが、量子効果の導入により $E_{in} \geq 40$ MeV において適用可能となることが近年示された。しかし、放出エネルギー $E_{out} < 30$ MeV では予測と実験データとの間に不一致が残っており、INC 模型と GEM の両方の改良が必要である。不一致の主要因は障壁透過陽子の記述にあると考えられ、INC 模型では遠心力障壁の透過が、GEM ではクーロン障壁の透過が問題となる。クーロン障壁の透過についてはこれまで多くの研究がなされてきた。一方、遠心力障壁の透過では s 波以外を扱うことから理論構築が難しく、遠心力障壁の透過についての研究例がほとんどない。障壁透過の研究を進めるには $E_{out} < 30$ MeV の陽子の実験データを必要とするが、報告されているデータは $E_{out} < 10$ MeV で限定的であり、 $2 < E_{out} < 6$ MeV にデータ間で矛盾があることがわかっている。そこで、本研究では INC + GEM の実験データ再現性を向上させることを目的として、 $E_{out} > 2$ MeV の低エネルギーデータを取得できる検出器を開発し、 $E_{in} = 40, 70$ MeV、測定角度 $15^\circ - 150^\circ$ での(p, p'x)反応二重微分断面積(DDX)の実験データを取得する。実験データと改良した INC + GEM の計算結果とを比較することで改良したモデルを検証する。

第 1 章では本研究の背景と目的を述べた。研究背景として加速器駆動システムと粒子線がん治療について説明し、それらの設計において利用される粒子輸送計算コードを紹介した。粒子輸送計算で利用される核反応模型と核データの重要性を示し、INC、GEM および実験データのいずれも障壁エネルギー領域に問題が存在することを指摘した。これら問題点をふまえて研究の目的を示した。

第 2 章では検出器の開発について説明した。まず開発した検出器の構成を示し、従来の ΔE - E 検出器と比較したブラッグカーブカウンター(BCC)の前段検出器としての利点を説明した。次に粒子識別に BCC 単体での粒子識別法と ΔE - E 法の 2 つの方法を用いることを述べ、BCC の動作原理および ΔE 検出器と E 検出器の組み合わせを説明した。前者の方法をこれまでに前例のない水素同位体識別に適用するために、エネルギー分解能を確保する工夫を説明した。最後に動作試験で得た検出器の特性を説明した。

第 3 章では(p, p'x)反応 DDX 測定実験と測定データの解析について述べた。まず実験施設の概要をまとめた。次に実験体系を示して入射エネルギーや測定角度、使用した標的核について言及するとともに、検出器の動作条件も示した。その後データ収集のための回路系について説明した。データの解析についてはその手順にしたがってエネルギー較正から DDX の算出までの方法を説明した。

第 4 章では本研究で用いた INC 模型と GEM を概観し、それらの改良について述べた。INC 模型と GEM の概観ではこれら核反応模型で用いられる基本的なパラメータと運動学、INC 模型と GEM

の接続について説明するとともに DDX の算出方法を述べた。INC 模型の改良として新しく巨視的な立場から障壁透過係数を決定する方法を提案した。放出反応の逆反応を考えることにより陽子および中性子入射反応断面積の比から透過係数を計算できることを示した。反応断面積の計算にはパラメータを含まない系統式を用いることを述べ、陽子および中性子入射の式としてそれぞれ Shen の式と Pearlstein の式を示した。GEM の改良については逆反応断面積の修正方法を提案した。逆反応断面積のしきい値を下げ、定数で与えられていたパラメータをエネルギーの関数として与えることを述べ、統計模型による計算で得た反応断面積を再現するようにエネルギーの関数として与えたパラメータを示した。

第 5 章ではまず BCC を用いた粒子識別の 2 次元図を示し、BCC で初めて水素同位体を識別できたことを示した。次に $(p, p'x)$ 反応 DDX の取得データと報告されているデータとを比較して取得データの妥当性を示した。また、取得した DDX のエネルギー依存性について議論した。議論ではデータを最小エネルギー 1.3 MeV と十分に低いエネルギーまで取得でき、障壁透過の研究に必要なデータを得られたこと、後方角のデータについて報告されているデータ間の矛盾を解決したことを述べた。また、 $E_{out} < 10$ MeV の陽子について $E_{in} = 40, 70$ MeV とでエネルギー依存性に差異はなく、標的核によって傾向が異なることを述べた。最後に実験データと改良した模型による計算結果とを比較して改良した模型を検証した。検証により改良した INC 模型は実験データをよく再現し、従来の INC 模型による最大 2 倍の過大評価が改善されたこと、GEM が従来記述できていなかった障壁透過陽子を記述できるようになったことを示した。

第 6 章では本研究の結論を述べた。