

核内カスケードモデルの拡張と弾性外反応への応用

中野, 正博

<https://hdl.handle.net/2324/4060159>

出版情報 : Kyushu University, 2019, 博士 (工学), 課程博士

バージョン :

権利関係 : Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)

氏 名 : 中野 正博

論 文 名 : 核内カスケードモデルの拡張と弾性外反応への応用

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

放射線によるガン治療や宇宙開発、加速器施設の設計など幅広い分野で利用されている粒子輸送計算では、原子核反応が起こる空間座標を決定する目的で弾性外反応断面積が用いられる。陽子や中性子による弾性外反応の断面積は精力的に研究されたが、50 MeV 以下の低エネルギー領域では測定データが不足している。理論的な理解も不十分であり、粒子輸送計算で用いられる系統式の信頼性は低いことが知られている。陽子線癌治療では近年、ブラッグピーク内部での微視的線量付与の分析が注目されているが、低エネルギー反応断面積の精度が大きな障壁となっている。このため、数 MeV から 2000 MeV までの広いエネルギー範囲において弾性外反応断面積を高精度で計算できる反応モデルを構築して物理的過程を解明し、その知見に基づく系統式を導くことが強く求められている。

以上を背景として本研究では、原子核反応を記述する理論的モデルとして核内カスケードモデル (INC) に着目する。確率論と相対論的多体論を基礎とする INC モデルは実験データの再現性に特に優れたモデルであるが、高い入射エネルギーで有効であり 200 MeV 付近に適用下限界があると言われてきた。近年 Uozumi 等は、いくつかの量子効果を取り入れて 50 MeV 程度までの拡張に成功しているが、30 MeV 以下のエネルギー領域については検討されていない。本研究では INC モデルに欠落している量子効果について検討し、従来の INC は原子核の低励起非連続スペクトル構造を無視していたため信頼性が低かったこと、これが低エネルギー領域反応で本質的な役割を果たす量子効果であることを指摘した。この量子効果を discrete level constraint (DLC) と呼び、INC に取り入れて低エネルギー領域へ拡張すると、従来不可能であった中性子弾性外断面積の計算が可能となり、その精度も非常に高いことを示した。次に、低エネルギーの陽子入射では、クーロン斥力の効果によって量子効果の存在が判別しにくくなるが、クーロン散乱断面積におけるスケーリング則を用いると、量子効果の存在が証明できることを示した。こうして、二つの重要な効果 (DLC 量子効果とクーロン斥力の効果) が明らかになったため、これらの効果を実験式構築の際の指針とし、高精度の系統式を提案した。

本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、次の6章から構成される。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成を述べた。本研究の基盤となる INC モデルについては、

その発展の歴史に加えて Liege group および Uozumi group による近年の研究の概要を紹介し、INC 適用限界に関する議論を説明した。

第2章ではまず本論で扱う弾性外反応が原子核反応全体の中で占める位置を示し、次に INC モデルの確率論と相対性理論に基づく計算方法を述べた。確率論を用いた原子核基底状態の作り方、核子2体相互作用の決定方法などを説明した。

第3章では、従来見落とされていた重要な量子効果が DLC であることを指摘した。INC モデルに DLC を取り込むと数 MeV の低エネルギーまで適用可能となるだけでなく、実験データを高精度で再現できることを世界で初めて示した。さらに、DLC の効果は中性子入射反応では極めて大きく、陽子入射反応でも大きなクーロン斥力と共に寄与することをスケールリング則の破れにより証明した。

第4章では、DLC とクーロン斥力のそれぞれが、弾性外反応断面積にどのように寄与するかを示した。 ^{12}C , ^{27}Al , ^{56}Fe , ^{208}Pb の軽い核から重い核までの4つの原子核を取り上げ、これらの効果が核子の入射エネルギーと標的核の電荷によって変化する様子を分析し、系統性を考察して明らかにした。

第5章ではまず弾性外反応断面積に関する既存の系統式のうち代表的な4つを紹介し、これらの問題点を指摘した。次に新たに考案した系統式について説明した。従来の式は原子核の幾何学的断面積を基準として、そこからのずれを物理的考察なしにパラメータ化しているのに対し、提案した式は核力のエネルギー依存性を基礎として DLC とクーロン斥力の二つの効果で補正する形式となっており、従来の系統式と比べて精度が向上し JENDL (汎用標準核データライブラリー) と比肩することを示した。さらにデルタ共鳴を取入れた結果、2000MeV までの高エネルギー領域データの再現性も向上することを示した。

第6章では、本研究のまとめと今後の課題について述べた。