

厚い標的での透過法を用いた相互作用断面積励起関数測定

Excitation functions of interaction cross sections derived from thick-target transmission method

北海道大学大学院理学研究院
合川 正幸、江幡 修一郎
北海道大学高等教育推進機構
今井 匠太郎

AIKAWA Masayuki, EBATA Shuichiro
Faculty of Science, Hokkaido University
IMAI Shotaro
Institute for the Advancement of Higher Education, Hokkaido University

Abstract

We propose a method, called as thick-target transmission (T3) method, to obtain the excitation function of interaction cross sections. In an ordinal experiment to measure the excitation function of interaction cross sections by the transmission method, we need to change the beam energy for each cross section. In the T3 method, the excitation function is derived from the beam attenuations measured at the targets of different thicknesses without changing the beam energy. Its availability is discussed in this article.

1 はじめに

相互作用断面積は、半径など、原子核ごとの特徴を反映する物理量を決定する際に重要な役割を果たしている [1]。しかし、入射ビームのエネルギー調整等、実験的困難さにより、特に放射性核種については測定値が非常に少ない [2]。放射性核種の相互作用断面積の系統的な測定は、原子核物理学において非常に重要であり、同分野のさらなる発展につながることを期待できる。

我々はこれまで、厚い標的核における核反応生成量について、逆運動学を用いて導出する手法を開発した [3]。さらに、相互作用断面積の励起関数を導出する新たな手法の研究を進めている。具体的には、透過法を拡張し、標的の厚さを変えつつ入射ビームの減衰量を繰り返し測定するという手法 (Thick-target transmission method (T3 法)) を提案している [4, 5]。この手法を、Al 標的に対する ^{12}C 入射核反応についてモンテカルロシミュレーションコード PHITS [7] を用いたシミュレーション計算で検証する。

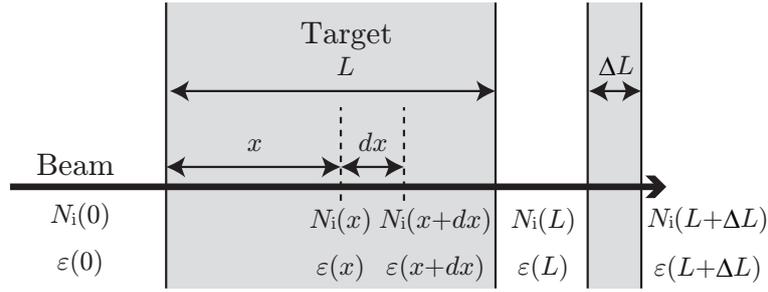


図 1: 標的中の位置 x における入射粒子数 $N_i(x)$ と核子当りのエネルギー $\varepsilon(x)$ 。

2 方法

複数の異なる入射エネルギーで相互作用断面積を測定するために提案した T3 法は、透過法を拡張し、標的の厚さを変えつつ入射ビームの減衰量を繰り返し測定するというものである。T3 法では、入射粒子数 $N_i(0)$ が厚さ L の標的を通して減衰した粒子数 $N_i(L)$ の測定が重要となる (図 1)。図 1 で示すように、標的中の位置 x で、核反応や電磁相互作用により、入射粒子数 $N_i(x)$ と核子当りのエネルギー $\varepsilon(x)$ は減衰する。この標的を透過した粒子 (粒子数 $N_i(L)$) を次の標的 (厚さ ΔL) の入射粒子と考え、厚さ $L + \Delta L$ の標的を通して減衰した粒子数 $N_i(L + \Delta L)$ を測定する。標的の数密度 n_T や厚さが既知だとすると、次の式により相互作用断面積 σ_I が求まる。

$$\sigma_I = \frac{-1}{n_T \Delta L} \ln \left(\frac{N_i(L + \Delta L) N_i'(0)}{N_i(0) N_i'(L)} \right) \quad (1)$$

さらに、エネルギーについては、厚さ L の標的通過時点で測定するか、あるいは阻止能計算コード SRIM [6] を用いて次のように計算できる。

$$\begin{aligned} \varepsilon(x) &= \varepsilon(0) + \int_0^x \frac{d\varepsilon}{dx'} dx' \\ &= \varepsilon(0) - \frac{\rho}{A_P} \int_0^x S(x') dx' \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 ρ は標的の密度、 A_P は入射粒子の核子数、 $S(x)$ は阻止能である。

これらの式により、標的の厚さを変えつつ繰り返し測定することで、標的の厚さごと、つまり異なるエネルギーごとに相互作用断面積 σ_I を得ることが可能となる。

3 結果

Al 標的に対する ^{12}C 入射のシミュレーション計算では、1 秒間当たり 1,000 個の入射粒子を 100 秒間照射する実験を模擬した。その結果、実験値のあるエネルギー領域では実験値 [8] を再現することがわかった (図 2)。さらに、実験値のないエネルギー領域での値も得ることができることを示した。今回のシミュレーションで設定したビーム強度や照射時間は、放射性核種など二次粒子ビームを用いた実験にも適応可能である。但し、入射粒子数が少ない場合は特に統計誤差が大きくなるため、標的の厚さや入射粒子数などを最適化するための条件等を今後検討する必要がある。

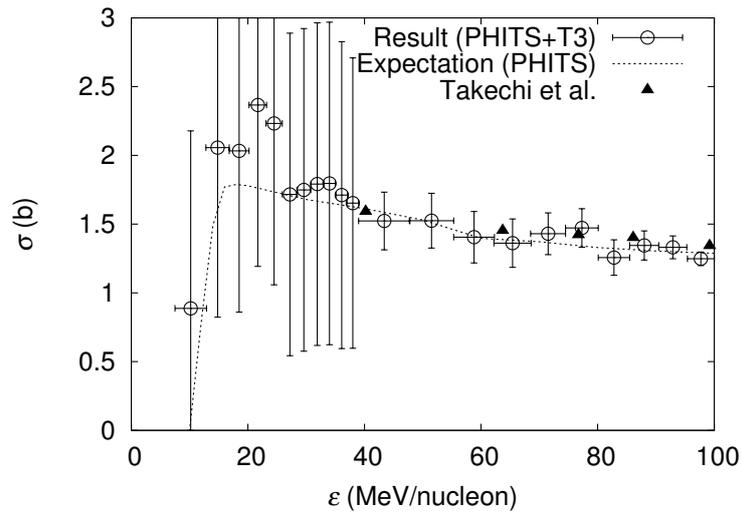


図 2: Al 標的に対する ^{12}C 入射の相互作用断面積。試行回数が少ないため統計誤差が大きいものの、PHITS によるシミュレーション結果が実験値 [8] を良く再現している。

4 まとめ

相互作用断面積は、原子核物理学において重要な役割を果たしている。さらに、この断面積は、入射粒子が違う核種に変化する確率であり、いわゆる核変換の確率である。そのため、放射性核廃棄物の核変換処理において重要な物理量といえる。そこで、今後この手法を用い、放射性核廃棄物、特に長寿命核分裂生成物の相互作用断面積に関する実験を提案することを検討している。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参考文献

- [1] I. Tanihata, et al., “Measurements of Interaction Cross Sections and Nuclear Radii in the Light p-Shell Region”, Phys. Rev. Lett. 55 (1985) 2676
- [2] A. Ozawa, T. Suzuki, I. Tanihata, “Nuclear Size and Related Topics”, Nucl. Phys. A693 (2001) 32.
- [3] M. Aikawa, S. Ebata, S. Imai, “Thick-target yields of radioactive targets deduced from inverse kinematics”, Nucl. Instr. Meth. B353 (2015) 1
- [4] M. Aikawa, S. Ebata, S. Imai, “Thick-target transmission method for excitation functions of interaction cross sections”, Nucl. Instr. Meth. B, submitted

- [5] M. Aikawa, S. Ebata, S. Imai, “Interaction cross sections using thick-target transmission method”, Proceedings of the 2016 Symposium on Nuclear Data, in press
- [6] J. Ziegler, J. P. Biersack, M. Ziegler, “SRIM: the Stopping and Range of Ions in Matter”, <http://www.srim.org>.
- [7] T. Sato, et al., “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52”, J. Nucl. Sci. Technol. 50 (2013) 913
- [8] M. Takechi, et al., “Reaction cross sections at intermediate energies and Fermi-motion effect”, Phys. Rev. C 79 (2009) 061601