

# NRDF/A 核反応データ評価

## Evaluation of nuclear reaction data for Nuclear Reaction Data File for Astrophysics (NRDF/A)

北海道大学知識メディア・ラボラトリー

山本 一幸

九州大学大学院理学研究院

松本 琢磨

北海道大学大学院理学院

ICHINKHORLOO Dagvadorj

北海道大学大学院理学研究院

合川 正幸、加藤 幾芳

YAMAMOTO Kazuyuki

Meme Media Laboratory, Hokkaido University

MATSUMOTO Takuma

Department of Physics, Kyushu University

ICHINKHORLOO Dagvadorj

Graduate School of Science, Hokkaido University

AIKAWA Masayuki, KATŌ Kiyoshi

Faculty of Science, Hokkaido University

### Abstract

We compile experimental and theoretical nuclear reaction data for Nuclear Reaction Data File for Astrophysics (NRDF/A). The Continuum Discretized Coupled Channels (CDCC) method is indispensable for evaluation and also a new theoretical method in the astrophysical energy region between about several keV and few hundreds MeV was constructed. In this paper, we report the two methods and application results.

## 1 はじめに

原子核反応データベース研究開発センター (JCPRG) では、天体核反応に関するデータベース (Nuclear Reaction Data File for Astrophysics: NRDF/A) を構築している。NRDF/A の構築は、

2006年、前身である日本荷電粒子核反応データグループによる文献データ収集活動から始まった。採録対象としている原子核反応の範囲は、標的核が水素 (H) からケイ素 (Si) であり、かつ入射粒子が荷電粒子、中性子、ガンマ線の反応である。ここで、JCPRG 独自の原子核反応データベース (Nuclear Reaction Data File: NRDF) とは異なり、国内での実験に限定していない [1, 2, 3]。

また、JCPRG では、このようなデータベースの作成や収集活動の蓄積のもとで、理論的な計算による実験データの評価活動を開始した。北海道大学原子核理論研究室が世界に先駆けて始め、これまで多くの蓄積を持っている軽い核のクラスター構造研究に基づき、原子核反応を記述する新しい試みとして、軽い核の低エネルギー反応データの評価研究を行うことにした。我々のグループが行っている理論的評価の枠組みとしては、連続状態離散化チャネル結合 (Continuum Discretized Coupled Channels: CDCC) 法 [4] と殻模型に基づいてクラスター描象を考慮できる模型 (Cluster Orbital Shell Model: COSM) [5] である。これらの手法を用いた原子核反応断面積の解析と応用例について報告する。

## 2 CDCC 法による解析

天体核反応においては、 ${}^4\text{He}$  以上の重さの原子核を作る反応として、 $d + \alpha \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ 、及び、 $t + \alpha \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$  が重要な役割を果たす。これらの反応に寄与する  ${}^6,7\text{Li}$  の励起状態を研究する意義は大きい。また、Li 核による中性子反応データは原子力・核融合分野でも重要で、実験データが十分ではない所もあり、信頼性の高い理論的解析とそのデータ評価が求められている。そこで、 ${}^6,7\text{Li}$  の中性子入射反応を CDCC 法を用いて解析した。ここで、 ${}^6,7\text{Li}$  の内部構造については、 $d + \alpha$  及び  $t + \alpha$  のクラスター構造を仮定した。 $n + d$  と  $n + \alpha$  間のポテンシャルとしては、現象論に基づいた光学ポテンシャル及び微視的核子間力 (Jeukenne-Lejeune-Mahaux (JLM) effective nucleon-nucleon interaction) [6] を用いた。

実験データがある約 7~24MeV のエネルギー領域について、弾性散乱、非弾性散乱の角度微分断面積を計算値と比較した。また、各々の入射エネルギーにおける中性子スペクトルを計算し、実験データと比較した [7, 8]。入射エネルギーが 14.1 MeV、散乱角度 105 度での  ${}^6\text{Li} + n$  中性子スペクトル、及び入射エネルギーが 16 MeV、散乱角度 60 度での  ${}^7\text{Li} + n$  中性子スペクトルを図 1, 2 に示す。どちらの場合でも、エネルギーの高い領域では理論計算と実験値が良く一致する一方、エネルギーが低い領域ではずれが大きいことが分かった。これは今回用いたクラスター模型による制限、例えば  ${}^6\text{Li}$  の場合の  $p + n + \alpha$  からの寄与が原因であると考えられる。

## 3 構造模型を用いた解析

一般的な天体核反応は、keV~MeV 領域というエネルギー領域で起こる。NRDF/A が対象とする軽い核種では、閾値近傍のこれらのエネルギー領域では励起状態が多様な構造を持ち、重い核種とは大きく異なる性質を持つことが知られている。このような多様な構造を考慮し、かつ、実験データが少ない核種をも解析するため、系統的な手法が必要である。我々のグループでは、このような条件を満たす手法として、殻模型に基づいてクラスター描象を考慮できる Cluster Orbital Shell Model (COSM) を構築した。また、散乱波動関数は複素座標スケージング法 (Complex Scaling Method: CSM) と Lippmann-Schwinger 方程式により記述した [5]。 ${}^{16}\text{O}(n,\gamma){}^{17}\text{O}$  反応に適用した結果を図 3 に示す。この系では、低エネルギー領域で実験データ [11] をよく再現している。

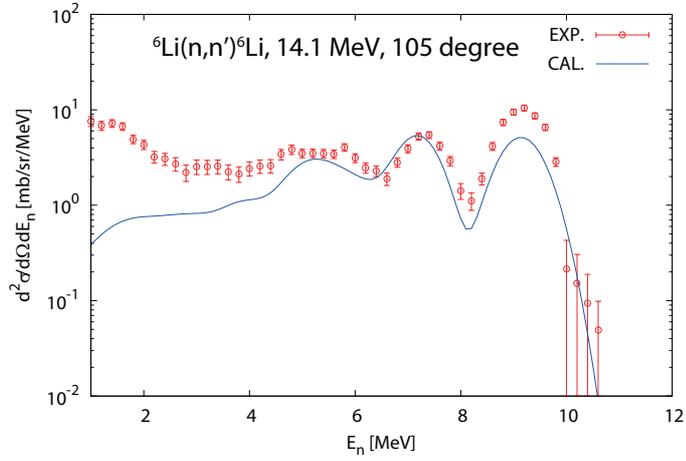


図 1:  ${}^6\text{Li} + n$  中性子スペクトルの実験データ [9] と計算結果

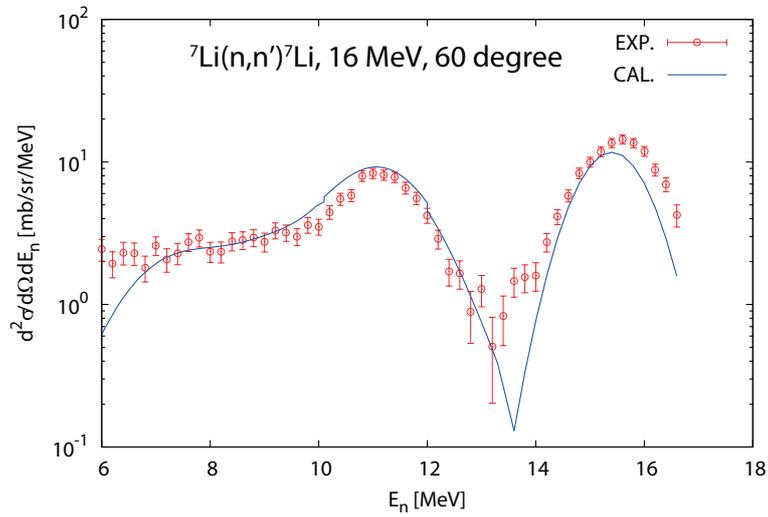


図 2:  ${}^7\text{Li} + n$  中性子スペクトルの実験データ [10] と計算結果

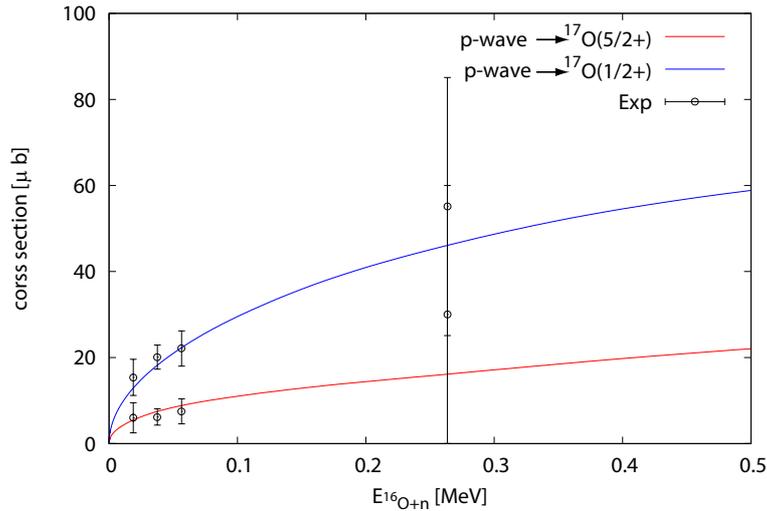


図 3:  $^{16}\text{O}(n,\gamma)^{17}\text{O}$  反応断面積の実験データ [11] と計算結果

## 4 まとめと課題

我々のグループでは、天体核反応の実験データを評価する方法として、CDCC 法、及び、COSM を用いた。CDCC 法を用いて  $n + {}^6,7\text{Li}$  反応を、COSM を用いて  $^{16}\text{O}(n,\gamma)^{17}\text{O}$  反応を解析した。どちらも良く実験値を再現することが分かった。

これらの方法は、適用可能エネルギー領域が異なる。CDCC 法による Li への中性子入射反応は、散乱中性子の運動エネルギー  $E_n$  が小さい領域では実験データを再現できなかった。このずれを解消するには、模型空間の拡張が必要になる。また、COSM を用いた解析は、0.1 MeV 以下のエネルギー領域では実験データをよく再現しているものの、エネルギーが高くなるにつれてずれが大きくなる傾向がある。このずれを解消するためにはコア核の模型空間を拡張する必要がある。この枠組みを利用して、酸素同位体の反応断面積を系統的に評価することが今後の課題である。

## 謝辞

日本学術振興会アジア・アフリカ学術基盤形成事業「アジア地域における原子核反応データ研究開発の学術基盤形成」及び北海道大学大学院理学研究院と独立行政法人理化学研究所の共同研究「RIBF 核反応データの高度利用研究」による補助に深く感謝致します。また、平林氏（北海道大学情報基盤センター）、千葉氏（日本原子力研究開発機構）には CDCC 法による解析における有益な議論や助言、升井氏（北見工業大学）には COSM を用いた原子核反応断面積の評価に関する議論や助言、その他の多くの方々の助言に、それぞれ感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 古立直也、加藤幾芳、「2008 年度に作成された NRDF/A ファイル」, 荷電粒子核反応データファイル年次報告 No.22, 25, (2009)

- [2] 牧永あや乃, 「2009 年度に作成された NRDF/A ファイル」, 荷電粒子核反応データファイル年次報告 No.23, 11, (2010)
- [3] 牧永あや乃, 「2010 年度に作成された NRDF/A ファイル」, 荷電粒子核反応データファイル年次報告 No.24, 11, (2011)
- [4] M. Kamimura, M. Yahiro, Y. Iseri, Y. Sakuragi, H. Kameyama, M. Kawai, Theor. Phys. Suppl. **89**, 1 (1986); M. Yahiro, N. Nakano, Y. Iseri, M. Kamimura, Prog. Theor. Phys. **67**, 1467 (1986)
- [5] K. YAMAMOTO, H. MASUI, T. WADA, K. KATŌ and M. OHTA, Prog. Theor. Phys. **121**, 375 (2009)
- [6] J.-P. Jeukenne, A. Lejeune, and C. Mahaux, Phys. Rev. C **16** 80 (1977)
- [7] D. ICHINKOHORLOO, T. MATSUMOTO, Y. HIRABAYASHI, K. KATŌ and S. CHIBA, Nucl. Sci.Tech. **48**, 1357, (2011); D. ICHINKOHORLOO, Doctor's thesis, (2011)
- [8] T. MATSUMOTO, D. ICHINKOHORLOO, Y. HIRABAYASHI, K. KATŌ and S. CHIBA, Phys. Rev. C **83**, 064611 (2011)
- [9] S. Chiba et al., Phys. Rev. C **58**, 2205 (1998)
- [10] S. Chiba, T. Fukahori, K. Shibata, B. Yu, K. Kosako, Fusion Eng. Des. **37**, 175 (1997)
- [11] M. Igashira et al., Astro. Phys. J. Lett. **441**, L89 (1995)