

**Халім Бююкуслу<sup>1,\*</sup>, Абдулла Каплан<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Гіресунський університет, Гіресун, Туреччина*

<sup>2</sup> *Університет імені Сулеймана Деміреля, факультет мистецтв і наук, кафедра фізики, Іспарта, Туреччина*

\*Відповідальний автор: halimbuyukuslu@gmail.com

### **ОЦІНЕНА ЕМПІРИЧНА СИСТЕМАТИКА ПЕРЕРІЗІВ РЕАКЦІЇ ( $n, \alpha$ ) ПРИ ЕНЕРГІЯХ 14 - 15 МеВ**

У цьому дослідженні застосоване емпіричне рівняння, запропоноване Тел та ін., що включає параметр асиметрії для реакції ( $n, \alpha$ ) при енергіях 14 - 15 МеВ. Значення вільних параметрів рівняння були визначені при підгонці експериментальних перерізів. Класифікація ядер на парно-парні та непарно-парні була прийнята для врахування ефекту спарювання на перерізи ( $n, \alpha$ ) реакції. Розрахунки функції збудження були проведені для таких ядер мішеней, як <sup>65</sup>Cu, <sup>71</sup>Ga, <sup>31</sup>P і <sup>99</sup>Tc, для ( $n, \alpha$ ) реакції при енергіях нейтронів, що налітають, до 30 МеВ. Проведено порівняння між наявними експериментальними даними, розрахунками перерізів за ядерними моделями та результатами, обчисленими за емпіричними формулами. Визначені співвідношення для перерізів ( $n, \alpha$ ) реакції працюють при вхідних енергіях нейтронів 14 - 15 МеВ. Зроблені розрахунки прийнятно узгоджуються з відомими експериментальними даними.

*Ключові слова:* емпіричні формули, параметр асиметрії, ( $n, \alpha$ ) реакції, систематика перерізів, програми для ядерних реакцій.

**Халим Бююкуслу<sup>1,\*</sup>, Абдулла Каплан<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Гиресунский университет, Гиресун, Турция*

<sup>2</sup> *Университет имени Сулеймана Демиреля, факультет искусств и наук, кафедра физики, Испарта, Турция*

\*Ответственный автор: halimbuyukuslu@gmail.com

### **ОЦЕНЕННАЯ ЭМПИРИЧЕСКАЯ СИСТЕМАТИКА СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИИ ( $n, \alpha$ ) ПРИ ЭНЕРГИЯХ 14 - 15 МэВ**

В этом исследовании применено эмпирическое уравнение, предложенное Тел и др., которое включает параметр асимметрии, для реакции ( $n, \alpha$ ) при энергиях 14 - 15 МэВ. Значения свободных параметров уравнения были определены при подгонке экспериментальных сечений. Классификация ядер на четно-четные и нечетно-четные была принята для учета эффекта спаривания на сечения ( $n, \alpha$ ) реакции. Расчеты функции возбуждения были проведены для таких ядер мишеней, как <sup>65</sup>Cu, <sup>71</sup>Ga, <sup>31</sup>P и <sup>99</sup>Tc, для ( $n, \alpha$ ) реакции при энергиях налетающих нейтронов до 30 МэВ. Проведено сравнение между имеющимися экспериментальными данными, расчетами сечений за ядерными моделями и результатами, вычисленными по эмпирическим формулам. Определенные соотношения для сечений ( $n, \alpha$ ) реакции работают при входных энергиях нейтронов 14 - 15 МэВ. Произведенные расчеты приемлемо согласуются с известными экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* эмпирические формулы, параметр асимметрии, ( $n, \alpha$ ) реакции, систематика сечений, программы для ядерных реакций.

**Halim Büyükuslu<sup>1,\*</sup>, Abdullah Kaplan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Giresun University, Giresun, Turkey*

<sup>2</sup> *Süleyman Demirel University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, Isparta, Turkey*

\*Corresponding author: halimbuyukuslu@gmail.com

### **EVALUATED EMPIRICAL SYSTEMATICS OF ( $n, \alpha$ ) REACTION CROSS-SECTIONS AT 14 - 15 MeV INCIDENT ENERGY**

In this study, the asymmetry parameter-included empirical equation proposed by Tel et al. has been applied for ( $n, \alpha$ ) reaction at 14 - 15 MeV energies. The free parameters of equation have been determined by fitting of experimental cross-section data. Even-even and odd-even nuclei classification have been made in order to taking into account of pairing effect on the ( $n, \alpha$ ) reaction cross-sections. Excitation function calculations have been carried out for target nuclei such as <sup>65</sup>Cu, <sup>71</sup>Ga, <sup>31</sup>P and <sup>99</sup>Tc by ( $n, \alpha$ ) reactions up to 30 MeV neutron induced energy. Comparisons have been made among available experimental data and results of cross-sections calculated by nuclear models with results of values calculated by empirical formulas. Determined relations are functional for the ( $n, \alpha$ ) reaction cross-sections at 14 - 15 MeV incoming neutron energies. Acceptable harmonies have been seen between collected experimental data and modelled calculations.

*Keywords:* empirical formulas, asymmetry term, ( $n, \alpha$ ) reactions, cross-section systematics, nuclear reaction codes.

## REFERENCES

1. Y.L. Han, Z.J. Zhang. Double differential neutron emission cross-sections for  $n_{+}^{(230,231,232,233,234)}\text{Th}$  reactions. [Nucl. Phys. A 753 \(2005\) 53](#).
2. V. Semkova et al. A systematic investigation of reaction cross-sections and isomer ratios for neutrons up to 20 MeV on Ni-isotopes and  $^{59}\text{Co}$  by measurements with the activation technique and new model studies of the underlying reaction mechanisms. [Nucl. Phys. A 730 \(2004\) 255](#).
3. V. Semkova et al. Neutron activation cross-sections for zirconium isotopes. [Nucl. Phys. A 832 \(2010\) 149](#).
4. R. Raut et al. Cross-section measurements of neutron-induced reactions on GaAs using monoenergetic beams from 7.5 to 15 MeV. [Phys. Rev. C 83 \(2011\) 044621](#).
5. F.M.D. Attar et al. Cross-sections for formation of  $^{89}\text{Zr}^m$  through  $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}^m$  reaction over neutron energy range 13.73 MeV to 14.77 MeV. [Nucl. Phys. A 802 \(2008\) 1](#).
6. Y. Iwamoto et al. Measurements and Monte Carlo calculations of neutron production cross-sections at 180 degrees for the 140 MeV proton incident reactions on carbon, iron, and gold. [Nucl. Instrum. Methods A 620 \(2010\) 484](#).
7. E. Milad, S. Mahdi. Nuclear data for the cyclotron production of  $^{117}\text{Sb}$  and  $^{90}\text{Nb}$ . [Chinese Physics C 35 \(2011\) 248](#).
8. A.Y. Konobeyev, Y.A. Korovin, P.E. Pereslavtsev. Systematics of  $(n, t)$  reaction cross-sections at 14.6 MeV. [Nucl. Instrum. Methods B 93 \(1994\) 409](#).
9. A.Y. Konobeyev, Y.A. Korovin. Semi-empirical systematics of  $(n, p)$  reaction cross-sections at the energy of 14.5 MeV. [Nucl. Instrum. Methods B 103 \(1995\) 15](#).
10. M. Belgaid, M. Asghar. Semi-empirical systematics of  $(n, p)$  reaction cross-sections for 14.5 MeV neutrons. [Appl. Radiat. Isot. 49 \(1998\) 1497](#).
11. M. Belgaid, M. Asghar. Semi-empirical systematics of  $(n, \alpha)$  cross-sections for 14.5 MeV neutrons. [Nucl. Instrum. Methods B 149 \(1999\) 383](#).
12. I. Kumabe, K. Fukuda. Empirical formulas for 14 MeV  $(n, p)$  and  $(n, \alpha)$  cross-sections. [J. Nucl. Sci. Technol. 24 \(1987\) 839](#).
13. N.I. Molla, S.M. Qaim. A systematic study of  $(n, p)$  reactions at 14.7 MeV. [Nucl. Phys. A 283 \(1977\) 269](#).
14. V. Levkovskii. Empirical behavior of the  $(n, p)$  cross-section for 14 - 15 MeV neutrons. [Soviet Phys. JETP 18 \(1964\) 213](#).
15. V. Levkovsky. Empirical regularities in the  $(n, p)$  cross-sections at 14 - 15 MeV neutron energies. [Zh. Eksp. Teor. Fiz. 45 \(1963\) 305](#).
16. V. Levkovsky. The  $(n, p)$  and  $(n, \alpha)$  cross-section at 14 - 15 MeV. [Yad. Fiz. 18 \(1973\) 705](#).
17. Y.N. Trofimov. Isotopic dependence of the  $(n, p)$  reaction cross-sections on the nuclear neutron excess parameter. [Atomnaya Energiya 75 \(1993\) 33](#).
18. F.I. Habbani, K.T. Osman. Systematics for the cross-sections of the reactions  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  and  $(n, 2n)$  at 14.5 MeV neutrons. [Appl. Radiat. Isot. 54 \(2001\) 283](#).
19. V.N. Manokhin, N. Odano, A. Hasegawa. Consistent evaluations of  $(n, 2n)$  and  $(n, np)$  reaction excitation functions for some even-even isotopes using empirical systematics (Japan, Japan Atomic Energy Research Institute, 2001) 30 p.
20. S.M. Qaim, G. Stöcklin. Investigation of  $(n, t)$  reactions at 14.6 MeV and an analysis of some systematic trends in the cross-section data. [Nucl. Phys. A 257 \(1976\) 233](#).
21. M. Belgaid, M. Asghar. Semi-empirical systematics of  $(n, p)$  cross-sections for 14.5 MeV neutrons. [Nucl. Instrum. Methods B 142 \(1998\) 463](#).
22. S. Ait-Tahar. The systematics of  $(n, p)$  cross-sections for 14 MeV neutrons. [J. Phys. G 13 \(1987\) L121](#).
23. J.H. Luo et al. Semi-empirical systematics for the cross-sections of the reactions  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$  and  $(n, 2n)$  at 14.5 MeV neutrons on the basis of experimental data measured by Lanzhou University. [Nucl. Instrum. Methods B 266 \(2008\) 4862](#).
24. S.L. Goyal, N. Kishore. The systematics of  $(n, \alpha)$  reaction cross-sections at 14.5 MeV neutron energy. [Indian J. Phys. 84 \(2010\) 553](#).
25. M. Yiğit. Empirical formula on  $(n, ^3\text{He})$  reaction cross-sections at 14.6 MeV neutrons. [Appl. Radiat. Isot. 105 \(2015\) 15](#).
26. M. Yiğit. New empirical formulae for  $(n, t)$  cross-sections at 14.6 MeV. [Appl. Radiat. Isot. 128 \(2017\) 307](#).
27. M. Yiğit. Analysis of  $(n, p)$  cross-sections near 14 MeV. [Appl. Radiat. Isot. 135 \(2018\) 115](#).
28. M. Yiğit, E. Tel. A study on empirical systematic for the  $(d, n)$  reaction cross-sections at 8.6 MeV. [Kerntechnik 79 \(2014\) 488](#).
29. M. Yiğit, E. Tel. Cross-section systematics of  $(d, p)$  reactions at 8.5 MeV. [Nuclear Engineering and Design 280 \(2014\) 37](#).
30. E. Betak et al. Activation cross-sections for reactions induced by 14 MeV neutrons on natural tin and enriched  $^{112}\text{Sn}$  targets with reference to  $^{111}\text{In}$  production via radioisotope generator  $^{112}\text{Sn}(n, 2n)^{111}\text{Sn} \rightarrow ^{111}\text{In}$ . [Radiochim. Acta 93 \(2005\) 311](#).
31. S.M. Qaim. A study of  $(n, n\alpha)$  reaction cross-sections at 14.7 MeV. [Nucl. Phys. A 458 \(1986\) 237](#).
32. E. Tel et al. A new empirical formula for 14 - 15 MeV neutron-induced  $(n, p)$  reaction cross-sections. [J. Phys. G 29 \(2003\) 2169](#).

33. E. Tel, A. Aydin, G. Tanir. Investigation of the pairing effect using newly evaluated empirical studies for 14 - 15 MeV neutron reaction cross-sections. [Phys. Rev. C 75 \(2007\) 034614](#).
34. E. Tel et al. Semi-empirical systematics of  $(n, 2n)$ ,  $(n, \alpha)$  reactions cross-sections at 14 - 15 MeV neutron energy. [Int. J. Mod. Phys. E 17 \(2008\) 567](#).
35. E. Tel et al. The study of the  $(n, 2n)$  reaction cross-sections for neighbor deformed nuclei in the region of rare-earth elements. [Acta Phys. Slov. 54 \(2004\) 191](#).
36. A. Aydin, E. Tel, A. Kaplan. Calculation of 14 - 15 MeV  $(n, d)$  reaction cross-sections using newly evaluated empirical and semi-empirical systematics. [J. Fusion Energ. 27 \(2008\) 308](#).
37. E. Tel et al. Investigation of 14 - 15 MeV  $(n, t)$  reaction cross-sections by using new evaluated empirical and semi-empirical systematic formulas. [J. Fusion Energ. 27 \(2008\) 188](#).
38. E. Tel et al. Application of asymmetry depending empirical formulas for  $(p, n\alpha)$  reaction cross-sections at 24.8 and 28.5 MeV incident energies. [Appl. Radiat. Isot. 67 \(2009\) 272](#).
39. C.H.M. Broeders et al. *ALICE/ASH - Pre-compound and Evaporation Model Code System for Calculation of Excitation Functions, Energy and Angular Distributions of Emitted Particles in Nuclear Reactions at Intermediate Energies* (Germany, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2006) 238 p.
40. M. Herman et al. EMPIRE: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation. [Nuclear Data Sheets 108 \(2007\) 2655](#).
41. A.J. Koning, S. Hilaire, M.J. Duijvestijn. TALYS-1.0. In: [Proc. of the Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Nice, France, Apr. 22 - 27, 2007](#). EDP Sciences (2008) p. 211.
42. V.V. Zerkin, B. Pritychenko. The experimental nuclear reaction data (EXFOR): Extended computer database and Web retrieval system. [Nucl. Instrum. Methods A 888 \(2018\) 31](#).

Надійшла 01.04.2019  
Received 01.04.2019