

А. А. Алзубаді\*, А. Г. Хамаде

*Фізичний факультет, Науковий коледж, Багдадський університет, Багдад, Ірак*\*Відповідальний автор: [ali.abdullatif@sc.uobaghdad.edu.iq](mailto:ali.abdullatif@sc.uobaghdad.edu.iq)**ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО ЗАХОПЛЕННЯ ПРОТОНІВ  
У ЛЕГКИХ ЯДРАХ ЦИКЛУ ВУГЛЕЦЬ - АЗОТ – КИСЕНЬ  
З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ ПРЯМОГО ЗАХОПЛЕННЯ**

Реакції радіаційного захоплення протонів  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  та  $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$  було досліджено в рамках моделі прямого захоплення з використанням потенціалів Вудса - Саксона. Ці реакції відіграють фундаментальну роль у горінні водню через цикли вуглець - азот - кисень (CNO) у надрах зірок. Вхідні дані про структуру ядра, з урахуванням експериментальної інформації, було використано для розрахунку астрофізичних  $S$ -факторів та фазових зсувів розсіювання. Розраховані результати демонструють добру відповідність з доступними експериментальними даними, точно відтворюючи як нерезонансні внески, так і вузькорезонансні особливості в реакціях  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$  та  $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$ . Поведінку реакції  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  в циклі CNO-I також було описано із задовільною точністю. Результати дослідження забезпечують покращення даних для моделювання зоряного нуклеосинтезу та сприяють розумінню низькоенергетичних процесів захоплення в ядрах, що стосуються астрофізики.

*Ключові слова:* радіаційне захоплення протонів, ядерний цикл CNO, астрофізичний  $S$ -фактор, модель прямого захоплення, зоряний нуклеосинтез.

А. А. Alzubadi\*, A. H. Hamade

*Department of Physics, College of Science, University of Baghdad, Baghdad, Iraq*\*Corresponding author: [ali.abdullatif@sc.uobaghdad.edu.iq](mailto:ali.abdullatif@sc.uobaghdad.edu.iq)**THEORETICAL MODELING OF RADIATIVE PROTON CAPTURE  
IN LIGHT NUCLEI OF THE CARBON - NITROGEN - OXYGEN CYCLE  
USING A DIRECT CAPTURE APPROACH**

The radiative proton capture reactions  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ , and  $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$  have been investigated within the framework of a direct capture model employing Woods - Saxon potentials. These reactions play a fundamental role in hydrogen burning through the carbon - nitrogen - oxygen (CNO) cycles in stellar interiors. Nuclear structure inputs constrained by experimental data have been used to calculate astrophysical  $S$ -factors and scattering phase shifts. The calculated results show good agreement with available measurements, accurately reproducing both non-resonant contributions and narrow resonance features in the  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$  and  $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$  reactions. The rate-limiting behavior of the  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  reaction in the CNO-I cycle has also been described with satisfactory precision. The findings provide improved inputs for stellar nucleosynthesis modeling and contribute to the understanding of low-energy nuclear capture processes relevant to astrophysics.

*Keywords:* radiative proton capture, CNO nuclear cycle, astrophysical  $S$ -factor, direct capture model, stellar nucleosynthesis.

## REFERENCES

1. G.R. Satchler. *Direct Nuclear Reactions* (Oxford, Oxford University Press, 1983) 833 p.
2. K.S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*. 3rd ed. (New York, John Wiley & Sons, 1991) 864 p.
3. C. Iliadis. *Nuclear Physics of Stars*. 2nd ed. (Weinheim-Berlin, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015) 654 p.
4. D.D. Clayton. *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis* (Chicago, University of Chicago Press, 1983) 634 p.
5. H.A. Bethe. Energy production in stars. *Phys. Rev.* 55 (1939) 434.
6. F.-K. Thielemann, M. Arnould, J.W. Truran. In: *Advances in Nuclear Astrophysics*. E. Vangioni-Flam et al. (Eds.) (Gif-sur-Yvette, Editions Frontières, 1987) p. 525.
7. C.E. Rolfs, W.S. Rodney. *Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics* (Chicago, University of Chicago Press 1988) 561 p.
8. J.N. Bahcall, R.K. Ulrich. Solar models, neutrino experiments, and helioseismology. *Rev. Mod. Phys.* 60 (1988) 297.
9. R.E. Azuma et al. AZURE: An R-matrix code for nuclear astrophysics. *Phys. Rev. C* 81 (2010) 045805.

10. A. Koning, S. Hilaire, S. Goriely. *TALYS-1.95: A Nuclear Reaction Program. User Manual* (The Netherlands, Petten, NRG, 2023) 562 p.
11. H. Schatz et al. rp-process nucleosynthesis at extreme temperature and density conditions. *Phys. Rep.* **294** (1998) 167.
12. C. Iliadis et al. Charged-particle thermonuclear reaction rates: II. Tables and graphs of reaction rates and probability density functions. *Nucl. Phys. A* **841** (2010) 31.
13. R. Longland et al. Charged-particle thermonuclear reaction rates: I. Monte Carlo method and statistical distributions. *Nucl. Phys. A* **841** (2010) 1.
14. G. Gangopadhyay, C. Lahiri. Recent advances in some nuclear properties relevant to the astrophysical r-process. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **233** (2024) 2885.
15. T. Rauscher, F.-K. Thielemann. Astrophysical reaction rates from statistical model calculations. *At. Data Nucl. Data Tables* **75** (2000) 1.
16. M. Dalvand, H. Khalili. Electromagnetic transition strengths on the S-factor for radiative capture proton by  $^{17}\text{O}$ . *Preprint Platform* (2023) 1.
17. R.A. Radhi, A.A. Alzubadi. Study the nuclear form factors of low-lying excited states in  $^7\text{Li}$  nucleus using the shell model with Skyrme effective interaction. *Few-Body Syst.* **60** (2019) 57.
18. A.A. Alzubadi, N.F. Latooffi, R.A. Radhi. Shell model and Hartree-Fock calculations for some exotic nuclei. *Int. J. Mod. Phys. E* **24** (2015) 1550099.
19. C.D. Nesaraja et al. Ratio of S factors for (p,  $\gamma$ ) reactions on  $^{12}\text{C}$  and  $^{13}\text{C}$  at astrophysically relevant energies. *Phys. Rev. C* **64** (2001) 065804.
20. U. Schröder et al. Stellar reaction rate of  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  and hydrogen burning in massive stars. *Nucl. Phys. A* **467** (1987) 240.
21. J.R. Newton et al. Measurement of  $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$  between the narrow resonances at  $E_r^{lab} = 193$  and 519 keV. *Phys. Rev. C* **81** (2010) 045801.
22. A. Formicola et al. Astrophysical S-factor of  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ . *Phys. Lett. B* **591** (2004) 61.
23. R.E. Pixley. *The Reaction Cross Section of Nitrogen-14 for Protons Between 220 and 600 keV*. Ph.D. thesis. (California Institute of Technology, Pasadena, 1957).

Надійшла / Received 30.07.2025