

**К. А. Шаульський\*, С. П. Майданюк**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: shaulskyi\_kostiantyn@outlook.com

### **КВАНТОВІ ЕФЕКТИ ПІКНОЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ У КОМПАКТНИХ ЗОРЯХ: НОВІ КВАЗІЗВ'ЯЗАНІ СТАНИ ТА СПЕКТРОСКОПІЯ<sup>1</sup>**

Досліджено квантові ефекти у пікноядерних реакціях у компактних зорях при нульових температурах з високою точністю. За допомогою методу багаторазових внутрішніх відбиттів проаналізовано реакцію  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ . Дослідження таких реакцій вимагає повного врахування квантових потоків у внутрішній області ядер. Це зменшує частоту та кількість пікноядерних реакцій до 1,8 раза. Це призводить до появи нових станів (названих нами як квазізв'язані стани), коли складене ядро утворюється максимально ймовірно. Як показано, мінімальна енергія подібного стану трішки вища за енергію нульових коливань у вузлах ґратки у пікноядерній реакції, однак імовірність утворення складеної системи у квазізв'язаному стані істотно більша, ніж відповідна імовірність у стані нульових коливань. Доцільно стверджувати, що частота реакцій у квазізв'язаних станах більш імовірна, ніж у станах нульових коливань. Це може призвести до значних змін в оцінках швидкостей реакцій у зорях.

*Ключові слова:* пікноядерні реакції, компактна зоря, нейтронна зоря, метод багаторазових внутрішніх відбиттів, коефіцієнти проникності та відбиття, злиття, квазізв'язані стани, складене ядро, щільна ядерна матерія, нульові коливання, тунелювання.

**К. А. Shaulskyi\*, S. P. Maydanyuk**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: shaulskyi\_kostiantyn@outlook.com

### **QUANTUM DESIGN IN THE STUDY OF PYCNONUCLEAR REACTIONS IN COMPACT STARS AND NEW QUASIBOUND STATES**

Quantum effects in pycnonuclear reactions in compact stars at zero temperatures are studied with high precision. The reaction  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  was analyzed using the method of multiple internal reflections. The study of such reactions requires full consideration of quantum fluxes in the internal nuclear region. This reduces the rate and number of pycnonuclear reactions up to 1.8 times. This leads to the appearance of new states (which we call quasibound states) where the compound nuclear system is formed with maximal probability. As shown, the minimal energy of such a state is slightly higher than the energy of zero-mode oscillations in the lattice nodes in the pycnonuclear reaction, however, the probability of the formation of a compound system in a quasibound state is significantly greater than the corresponding probability in a state of zero-mode oscillations. It is reasonable to say that the frequency of reactions in quasi-bound states is more likely than in states of zero-mode oscillations. This can lead to significant changes in estimates of reaction rates in stars.

*Keywords:* pycnonuclear reactions, compact star, neutron star, multiple internal reflections, coefficients of penetrability and reflection, fusion, quasibound state, compound nucleus, dense nuclear matter, zero mode oscillations, tunneling.

#### REFERENCES

1. A.G.W. Cameron. Pycnonuclear reactions and nova explosions. *Astrophys. J.* 130 (1959) 916.
2. Ya.B. Zeldovich, O.H. Guseynov. Collapsed stars in binaries. *Astrophys. J.* 144 (1966) 840.
3. S.L. Shapiro, S.A. Teukolsky. *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects* (New York: Wiley, 1983) 663 p.
4. E.E. Salpeter, H.M. Van Horn. Nuclear reaction rates at high densities. *Astrophys. J.* 155 (1969) 183.
5. P. Haensel, J.L. Zdunik. Equation of state and structure of the crust of an accreting neutron star. *Astron. Astrophys.* 229 (1990) 117; P. Haensel, J.L. Zdunik. Nuclear composition and heating in accreting neutron-star crusts. *Astron. Astrophys.* 404 (2003) L33.
6. D.G. Yakovlev et al. Fusion reactions in multicomponent dense matter. *Phys. Rev. C* 74 (2006) 035803.
7. M. Beard et al. Astrophysical S-factors for fusion reactions involving C, O, Ne, and Mg isotopes. *At. Data Nucl. Data Tables* 96 (2010) 541.
8. V. Singh, J. Lahiri, D.N. Basu. Theoretical exploration of S-factors for nuclear reactions of astrophysical importance. *Nucl. Phys. A* 987 (2019) 260.

9. A.V. Afanasjev et al. Large collection of astrophysical S-factors and their compact representation. [Phys. Rev. C 85 \(2012\) 054615](#).
10. S.P. Maydanyuk, P.-M. Zhang, S.V. Belchikov. Quantum design using a multiple internal reflections method in a study of fusion processes in the capture of alpha-particles by nuclei. [Nucl. Phys. A 940 \(2015\) 89](#).
11. S.P. Maydanyuk, P.-M. Zhang, L.-P. Zou. New quasibound states of the compound nucleus in  $\alpha$ -particle capture by the nucleus. [Phys. Rev. C 96 \(2017\) 014602](#).
12. L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Quantum Mechanics*. Vol. 3. Course of Theoretical Physics. 3<sup>rd</sup> ed. (Pergamon Press, 1977) 691 p.
13. K.A. Eberhard et al. Fusion cross sections for  $\alpha + {}^{40,44}\text{Ca}$  and the problem of anomalous large-angle scattering. [Phys. Rev. Lett. 43 \(1979\) 107](#).
14. S.P. Maydanyuk, K.A. Shaulskiy. Quantum design in study of pycnonuclear reactions in compact stars: Nuclear fusion, new quasibound states and spectroscopy. [Eur. Phys. J. A 58 \(2022\) 220](#).
15. S.P. Maydanyuk, V.S. Olkhovsky, A.K. Zaichenko. The method of multiple internal reflections in description of tunneling evolution of nonrelativistic particles and photons. [J. Phys. Studies 6\(1\) \(2002\) 24](#).
16. T. Hamada, E.E. Salpeter. Models for zero-temperature stars. [Astrophys. J. 134 \(1961\) 683](#).
17. S.P. Maydanyuk et al. Bremsstrahlung emission of high energy accompanying spontaneous fission of  ${}^{252}\text{Cf}$ . [Phys. Rev. C 82 \(2010\) 014602](#).
18. S.P. Maydanyuk et al. Bremsstrahlung emission accompanying decays and spontaneous fission of heavy nuclei. [Int. J. Mod. Phys. E 19 \(2010\) 1189](#).
19. S.P. Maydanyuk et al. Bremsstrahlung emission of photons accompanying ternary fission of  ${}^{252}\text{Cf}$ . [J. Phys.: Conf. Ser. 282 \(2011\) 012016](#).
20. L.R. Gasques et al. Nuclear fusion in dense matter: Reaction rate and carbon burning. [Phys. Rev. C 72 \(2005\) 025806](#).
21. L.R. Gasques et al. Sao Paulo potential as a tool for calculating S factors of fusion reactions in dense stellar matter. [Phys. Rev. C 76 \(2007\) 045802](#).
22. V.Yu. Denisov. Nucleus-nucleus potential with shell-correction contribution. [Phys. Rev. C 91 \(2015\) 024603](#).
23. S.P. Maydanyuk. Resonant structure of the early-universe space-time. [Eur. Phys. J. Plus 126 \(2011\) 76](#).
24. X. Fang et al. Experimental measurement of  ${}^{12}\text{C} + {}^{16}\text{O}$  fusion at stellar energies. [Phys. Rev. C 96 \(2017\) 045804](#).

Надійшла/Received 27.01.2023