

Т. Дж. Абд Альхессієн*, Ф. А. Маджід

*Кафедра фізики, Коледж природничих наук, Вавилонський університет, Вавилон, Ірак**Відповідальний автор: thaeir.alkawwaz@gmail.com**АНАЛІЗ ЗЛИТТЯ ЯДЕР $^{4,6,8}\text{He}$ З ^{197}Au ПОБЛИЗУ КУЛОНІВСЬКОГО БАР'ЄРА
МЕТОДОМ ЗВ'ЯЗАНИХ КАНАЛІВ ТА В НАПІВКЛАСИЧНОМУ ПІДХОДІ**

Досліджено процес злиття ядер $^{4,6,8}\text{He}$ з ^{197}Au в діапазоні енергій поблизу кулонівського бар'єра та нижче нього. Застосовано три взаємодоповнювальні підходи: (i) квантовий формалізм зв'язаних каналів (СС) (включно з методом зв'язаних каналів з дискретизацією неперервного спектра для випадків, коли суттєвим був процес розвалу ядра), (ii) напівкласичний опис відносного руху та (iii) формула Вонга для моделі єдиного параболічного бар'єра. Було розраховано переріз злиття σ_{fus} , розподіл бар'єрів $D_{\text{fus}} = d^2(E\sigma_{\text{fus}})/dE^2$ та ймовірність злиття P_{fus} . Взаємозв'язок з колективними збудженнями та каналами передачі нуклонів чи розвалу ядра враховувався через матрицю зв'язку, тоді як проходження крізь бар'єр оцінювалося за допомогою коефіцієнтів проникності, розрахованих у наближенні Вентцеля–Крамерса–Бріллюєна. Показано, що ці взаємозв'язки призводять до розширення ефективного розподілу бар'єрів та підсилення підбар'єрного тунелювання порівняно з моделлю єдиного бар'єра. Встановлено, що для всіх розглянутих систем квантовий опис у рамках методу зв'язаних каналів забезпечує найвищу точність відтворення експериментальних даних; напівкласична модель адекватно описує основні закономірності процесу, а формула Вонга використовується переважно як базовий орієнтир для енергій вище бар'єра. Таким чином, визначено спільний вплив ядерної структури та динаміки реакції на характеристики процесу злиття в системах, що складаються з легкого та важкого ядер.

Ключові слова: реакція злиття, пружне та непружне розсіювання, низькі та проміжні енергії, реакції за участю важких іонів, моделі та методи ядерних реакцій.

Т. J. Abd Alhessien*, F. A. Majeed

*Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, University of Babylon, Babylon, Iraq**Corresponding author: thaeir.alkawwaz@gmail.com**COUPLED-CHANNEL AND SEMICLASSICAL ANALYSIS
OF $^{4,6,8}\text{He} + ^{197}\text{Au}$ FUSION NEAR THE COULOMB BARRIER**

Fusion of $^{4,6,8}\text{He} + ^{197}\text{Au}$ has been investigated near and below the Coulomb barrier. Three complementary approaches were employed: (i) a quantum coupled-channels (CC) framework (with continuum discretized coupled-channels when breakup was relevant), (ii) a semiclassical treatment of the relative motion, and (iii) the Wong single-parabolic-barrier formula. The fusion cross-section σ_{fus} , barrier distribution $D_{\text{fus}} = d^2(E\sigma_{\text{fus}})/dE^2$, and fusion probability P_{fus} were computed. Couplings to collective excitations and transfer/breakup channels were incorporated through the coupling matrix, while barrier transmission was evaluated via Wentzel–Kramers–Brillouin penetrabilities. These couplings were shown to broaden the effective barrier distribution and to enhance sub-barrier tunneling relative to a one-barrier picture. Across all systems, the quantum CC description was found to reproduce the data most accurately, the semiclassical model was observed to capture the main systematics, and the Wong formula was used chiefly above the barrier as a baseline. In this way, the joint roles of nuclear structure and reaction dynamics in shaping fusion observables were delineated for light-on-heavy systems.

Keywords: fusion reaction, elastic and inelastic scattering, low and intermediate energy, heavy-ion reactions, nuclear reaction models and methods.

REFERENCES

1. N. Keeley et al. Elastic scattering and reactions of light exotic beams. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **63** (2009) 396.
2. L.F. Canto et al. Recent developments in fusion and direct reactions with weakly bound nuclei. *Phys. Rep.* **596** (2015) 1.
3. A. Diaz-Torres, I.J. Thompson. Effect of continuum couplings in fusion of halo ^{11}Be on ^{208}Pb around the Coulomb barrier. *Phys. Rev. C* **65** (2002) 024606.
4. J.J. Kolata, V. Guimarães, E.F. Aguilera. Elastic scattering, fusion, and breakup of light exotic nuclei. *Eur. Phys. J. A* **58** (2016) 123.
5. F.A. Majeed. The role of the breakup channel on the fusion reaction of light and weakly bound nuclei. *Int. J. Nucl. Energy Sci. Technol.* **11** (2017) 218.

6. M.H.A. Madhi, F.A. Majeed. Single and coupled channels calculations for fusion reaction of ${}^6\text{Be} + {}^{209}\text{Bi}$, ${}^{11}\text{Be} + {}^{209}\text{Bi}$, and ${}^{15}\text{C} + {}^{232}\text{Th}$ halo nuclei systems. [AIP Conf. Proc. 2398 \(2022\) 020004](#).
7. P.R.S. Gomes et al. Fusion, breakup and scattering of weakly bound nuclei at near barrier energies. [Open Nucl. Part. Phys. J. 6 \(2013\) 10](#).
8. B.B. Back et al. Recent developments in heavy-ion fusion reactions. [Rev. Mod. Phys. 86 \(2014\) 317](#).
9. S.A. Abbas et al. Fusion reaction study of some selected halo systems. [Baghdad Sci. J. 20 \(2023\) 622](#).
10. H.L. Harney, P. Braun-Munzinger, C.K. Gelbke. On the semiclassical interpretation of heavy ion reactions. [Z. Phys. 269 \(1974\) 339](#).
11. C.Y. Wong. Interaction barrier in charged-particle nuclear reactions. [Phys. Rev. Lett. 31 \(1973\) 766](#).
12. F.A. Majeed, Y.A. Abdul-Hussien. Semiclassical treatment of fusion and breakup processes of ${}^{6,8}\text{He}$ halo nuclei. [J. Theor. Appl. Phys. 10 \(2016\) 107](#).
13. F.M. Hussain, F.A. Majeed, M.H. Meteab. Investigation of the calculation of coupled channels for some halo systems. [Ukr. J. Phys. 65 \(2020\) 951](#).
14. F.M. Hussain, F.A. Majeed, Y.A. Abdul-Hussien. Coupling channels mechanism of complete fusion reactions in some light stable nuclei. [AIP Conf. Proc. 2144 \(2019\) 030003](#).
15. A.J. Najim, F.A. Majeed, K.H. Al-Attiyah. Improved calculation of fusion barrier distribution. [IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 571 \(2019\) 012124](#).
16. F.M. Hussain, F.A. Majeed, Y.A. Abdul-Hussien. Description of coupled-channel in semiclassical treatment of heavy ion fusion reactions. [IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 571 \(2019\) 012113](#).
17. R.A. Broglia, A. Winther. Semiclassical theory of heavy ion reactions. [Phys. Rep. 4 \(1972\) 153](#).
18. L.F. Canto et al. Fusion and breakup of weakly bound nuclei. [Phys. Rep. 424 \(2006\) 1](#).
19. F.A. Majeed, R.Sh. Hamodi, F.M. Hussian. Effect of coupled channels on semiclassical and quantum mechanical calculations for heavy ion fusion reactions. [J. Comput. Theor. Nanosci. 14 \(2017\) 2242](#).
20. R.O. Akyüz, A. Winther. Nuclear structure and heavy-ion reactions. In: *Nuclear Structure and Heavy-Ion Reactions*. Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”, Course LXXVII. R.A. Broglia, C.H. Dasso, R. Ricci (Eds.) (North-Holland, Amsterdam, 1981) p. 491.
21. W.J. Jordan, J.V. Maher, J.C. Peng. The fusion of ${}^{12}\text{C}$ and ${}^{16}\text{O}$ with ${}^{28,29,30}\text{Si}$. [Phys. Lett. B 87 \(1979\) 38](#).
22. Yu.E. Penionzhkevich et al. Excitation functions of fusion reactions and neutron transfer in the interaction of ${}^6\text{He}$ with ${}^{197}\text{Au}$ and ${}^{206}\text{Pb}$. [Eur. Phys. J. A 31 \(2007\) 185](#).
23. P. Möller et al. Nuclear ground-state masses and deformations: FRDM (2012). [At. Data Nucl. Data Tables 109–110 \(2016\) 1](#).
24. A. Lemasson et al. Modern Rutherford experiment: Tunneling of the most neutron-rich nucleus. [Phys. Rev. Lett. 103 \(2009\) 232701](#).

Надійшла / Received 21.10.2025