

# ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ АСТРОФІЗИЧНИХ S-ФАКТОРІВ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ, ІНДУКОВАНИХ ${}^7\text{Li}+p$ , ${}^7\text{Be}+n$ І ${}^6\text{Li}+d$ ВЗАЄМОДІЄЮ

**В. І. Жабя, В. С. Василевський, Ю. А. Лашко**

*Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київ, Україна*

Дослідження структури ядра  ${}^8\text{Be}$  здійснюється в межах мікроскопічної трикластерної моделі [1-3], застосування якої спрямоване на реалізацію двох ключових завдань: 1) врахувати велику кількість бінарних каналів, які відіграють важливу роль у формуванні спектру резонансних станів складної системи та забезпечують можливість вивчати низку реакцій в досить широкому енергетичному діапазоні; 2) запровадити більш розширений і гнучкий опис внутрішньої структури взаємодіючих кластерів.

Сформульовану мікроскопічну модель адаптовано і застосовано для розрахунків астрофізичних S-факторів реакцій, які виникають при взаємодії  ${}^7\text{Li}+p$ ,  ${}^7\text{Be}+n$  і  ${}^6\text{Li}+d$  [4] та які важливі для розуміння будови ядра  ${}^8\text{Be}$ . Теоретичний аналіз багатоканальної структури ядра  ${}^8\text{Be}$  та природа високоенергетичних резонансних станів  ${}^8\text{Be}$ , розташованих біля порога розпаду  $p+{}^7\text{Li}$ , детально досліджено в роботі [5], де основну увагу зосереджено дослідженні домінантних каналів розпаду  $1^+$ ,  $2^+$ ,  $3^+$ ,  $4^+$  резонансів-близнюків. Запропонована багатоканальна мікроскопічна кластерна модель забезпечує реалістичний опис експериментально спостережуваного спектру резонансних рівнів ядра  ${}^8\text{Be}$  поблизу порога розпаду  ${}^7\text{Li}+p$ , включно зі станами з від'ємною парністю  $1^-$  і  $2^-$ .

У межах сформульованої мікроскопічної моделі розраховано астрофізичні S-фактори реакцій  ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}(n,p_0){}^7\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Be}(n,p_1){}^7\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}(d,n_0){}^7\text{Be}$ ,  ${}^6\text{Li}(d,n_1){}^7\text{Be}$ ,  ${}^6\text{Li}(d,p_0){}^7\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}(d,p_1){}^7\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}(d,t_0){}^5\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}(d,t_1){}^5\text{Li}$ ,  ${}^5\text{He}({}^3\text{He},\alpha){}^4\text{He}$  та досліджена їх залежність від форми та інтенсивності нуклон-нуклонної взаємодії. Теоретичні значення розрахованих S-факторів порівняно з даними експериментальних робіт в інтервалі енергій  $E_{\text{cm}}=0-2$  MeV.

Для астрофізичного S-фактору реакції  ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$  парціальна хвиля  $0^+$  явно домінує, тоді як компонента  $2^+$  забезпечує помітну корекцію лише за дуже низьких ( $E_{\text{cm}}\leq 100$  keV) та відносно високих ( $E_{\text{cm}}\geq 500$  keV) енергій.

Для астрофізичного S-фактору реакції  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  хвиля  $2^+$  домінує в усьому діапазоні енергій, а потім її підсилює компонента  $0^+$ . Внесок стану  $4^+$  невеликий у більшій частині діапазону, але при вищих енергіях стає більш помітним, ніж у індукованій протонами реакції. Розраховані S-фактори для  $(n,\alpha)$ - реакції додатково розкладаються на внески від реакцій з  ${}^7\text{Be}$  в його основному ( $3/2^-$ ) та першому збудженому ( $1/2^-$ ) станах. Для стану  ${}^7\text{Be}(1/2^-)$  парціальна хвиля  $2^+$  майже насичує повний S-фактор. Для реакції  ${}^7\text{Be}(3/2^-)(n,\alpha){}^4\text{He}$  компоненти  $0^+$  та  $2^+$  мають порівнянну величину, і для  $2^+$  наявний виражений максимум, який зумовлений резонансом. У нашій мікроскопічній моделі цей  $2^+$  стан з'являється при енергії  $E\approx 1.27$  MeV вище порогу розпаду  ${}^7\text{Be}+n$ , що добре узгоджується з експериментальним значенням в [6], і дещо вище, ніж резонансна енергія  $E\approx 0.99$  MeV в [7]. Енергетична залежність нашої компоненти  $2^+$  якісно узгоджується з поведінкою, виведеною з даних в роботі [7].

Як показує аналіз, для реакції  ${}^7\text{Be}(n,p_0){}^7\text{Li}$  резонанс  $3^+$  домінує в області піку трохи вище 0.5 MeV, тоді як стан  $2^-$ , розташований дуже близько до порогу  ${}^7\text{Be}+n$ , визначає поведінку як при низьких, так і при високих енергіях. В каналі  ${}^7\text{Be}(n,p_1){}^7\text{Li}$  домінує стан  $1^-$  у всьому діапазоні енергій: відповідний резонанс  $1^-$  при енергії  $E_{\text{cm}}\approx 0.45$  MeV фіксує положення піку в астрофізичному S-факторі і разом з станом  $1^+$  забезпечує основний внесок правіше від максимуму.

Парціальні астрофізичні S-фактори для  ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$  мають таку ієрархію: стан  $0^+$  забезпечує домінуючий внесок у загальний S-фактор в інтервалі енергій нижче  $E_{\text{cm}}\approx 1.5$  MeV; вище цієї енергії внесок  $2^+$  стає помітним; компонента  $4^+$  залишається малою у діапазоні 0-2 MeV.

Для реакції  ${}^6\text{Li}(d,p_0){}^7\text{Li}$  стани  $0^+$  та  $1^+$  домінують в інтервалі енергій  $E_{\text{cm}}\leq 0.5$  MeV, тоді як при вищих енергіях стан  $2^-$  забезпечує найбільший внесок. Для реакції  ${}^6\text{Li}(d,p_1){}^7\text{Li}$  компоненти  $1^+$  та  $0^+$  домінують нижче  $E_{\text{cm}}\leq 0.25$  MeV, тоді як при вищих енергіях стани  $1^-$  та  $2^-$  стають домінуючими.

Для реакції  ${}^6\text{Li}(d,n_0){}^7\text{Be}$  стани  $0^+$  та  $1^+$  домінують при низьких енергіях ( $0\leq E_{\text{cm}}\leq 0.4$  MeV), тоді як при вищих енергіях стани з негативною парністю стають більш важливими. Парціальні астрофізичні S-фактори для реакції  ${}^6\text{Li}(d,n_1){}^7\text{Be}$  дуже схожі на такі як для  ${}^6\text{Li}(d,p_1){}^7\text{Li}$ , що вказує на те, що той самий набір  $J^\pi$ -станів визначає заселеність першого збудженого рівня  $1/2^-$  в  ${}^7\text{Li}$  та  ${}^7\text{Be}$ .

Отже, розраховані криві  $S(E)$  для реакцій  ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$  добре узгоджуються

з експериментальними даними. Кластерна поляризація є суттєвою для нормування та енергетичної залежності S-факторів для реакцій  ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$  і  ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$ .

1. Y.A. Lashko, G.F. Filippov, V.S. Vasilevsky. Nucl. Phys. A 958 (2017) 78.
2. V.S. Vasilevsky, F. Arickx, J. Broeckhove, T.P. Kovalenko. Nucl. Phys. A 824 (2009) 37.
3. A.V. Nesterov, V.S. Vasilevsky, T.P. Kovalenko. Phys. At. Nucl. 72 (2009) 1450.
4. V.I. Zhaba, Yu.A. Lashko, V.S. Vasilevsky. Phys. Rev. C 113 (2026) 034324.
5. V.I. Zhaba, Yu.A. Lashko, V.S. Vasilevsky. Phys. Rev. C 112 (2025) 014328.
6. D.R. Tilley, J.H. Kelley, J.L. Godwin et al. Nucl. Phys. A 745 (2004) 155.
7. S. Hayakawa, M. La Cognata, L. Lamia et al. Astrophys. J. Lett. 915 (2021) L13.