

## МЕХАНІЗМ РОЗСІЯННЯ НЕЙТРОНІВ ЯДРАМИ БАРІЮ В ОБЛАСТІ ЕНЕРГІЙ 0,5 – 15 MeV

І. О. Корж, М. Т. Скляр, Т. І. Яковенко

Наші дані та дані інших авторів по повних перерізах, інтегральних і диференціальних перерізах пружного й непружного розсіяння нейтронів в області енергій 0,5 - 15 MeV, що є в літературі для ядер барію природного ізотопного складу та ядер ізотопів  $^{136,138}\text{Ba}$ , проаналізовано в рамках оптико-статистичного підходу, основу якого становить оптична модель, метод зв'язаних каналів і сучасні варіанти статистичної моделі. Показано можливість адекватного опису всієї сукупності експериментальних даних у рамках цього підходу навіть при використанні усереднених значень параметрів оптичного потенціалу, що й дозволило оцінити вклади прямого та компаундного механізмів розсіяння швидких нейтронів досліджуваними ядрами.

### Вступ

Ізотопи барію розташовані в області масових чисел  $A \approx 140$ , яка відповідає другому максимуму виходу осколків поділу, і належать до ядер, що знаходяться в області магічних та навколомагічних по нейтронам ядер (найбільш розповсюджений ізотоп барію -  $^{138}\text{Ba}$  - має у своєму складі число нейтронів  $N = 82$ ). Ця група ядер розташована в кінці великої області сферичних ядер, до яких належить більшість ядер конструкційних елементів, перерізи взаємодії яких зі швидкими нейтронами уже добре визначені.

У майбутньому досить точні дані щодо перерізів взаємодії швидких нейтронів будуть потрібні й для ядер, що знаходяться в області другого максимуму виходу осколків поділу. Це зумовлено тим, що вдосконалення ядерних реакторів значною мірою пов'язано зі збільшенням коефіцієнта вигорання ядерного палива, а це, в свою чергу, веде до підвищення накопичення продуктів поділу. Але при вивченні процесів взаємодії швидких нейтронів з такими ядрами зустрічаються значні експериментальні труднощі, оскільки більшість цих елементів хімічно активні й тому зразки можуть бути використані лише у вигляді хімічних сполук. З цієї ж причини в літературі є мало даних про повні перерізи та перерізи розсіяння швидких нейтронів ядрами з цієї області. У цьому випадку доповнити експериментальну базу даних перерізами, яких не вистачає, можна шляхом використання теоретичних моделей для опису механізму взаємодії швидких нейтронів з цими ядрами.

Один з варіантів традиційного оптико-статистичного підходу для інтерпретації цих процесів було розроблено нами, і він успішно використовувався для ядер з меншими масовими числами [1]. Тому становить інтерес його застосування для всієї сукупності даних, що є в літературі для барію. У випадку позитивного результату теоретичний підхід можна буде використовувати для передбачення перерізів у тих областях енергій, де необхідні експериментальні дані відсутні.

У цій роботі зроблено компіляцію наших даних та даних інших авторів, що є в літературі по повних перерізах та інтегральних і диференціальних перерізах пружного й непружного розсіяння нейтронів з енергіями реакторного спектра ядрами барію природного ізотопного складу та ядрами  $^{136,138}\text{Ba}$ , а також наведено результати їх теоретичного аналізу в рамках розробленого нами раніш і успішно застосованого для ядер середньої атомної ваги оптико-статистичного підходу, основу якого становлять сферична оптична модель (ОМ), узагальнена оптична модель (УОМ) (метод зв'язаних каналів) та сучасні варіанти статистичної моделі.

## Повні перерізи та перерізи розсіяння швидких нейтронів ядрами барію

Найбільш поширеними стабільними ізотопами барію є  $^{138}\text{Ba}$  та  $^{136}\text{Ba}$ , вміст яких у природній суміші ізотопів складає 71,9 та 7,8 % відповідно. Систематичні виміри повних перерізів і перерізів пружного та непружного розсіяння швидких нейтронів цими ядрами не проводились. В області енергій нейтронів 0,5 - 15 MeV найбільш систематизованими є дані про повні перерізи для ядер барію природного ізотопного складу [2 - 4]. В області енергій 0,5 - 14 MeV у літературі є розрізнені дані про диференціальні перерізи пружного розсіяння нейтронів кількох енергій на ядрах барію природного ізотопного складу [5 - 12]. У літературі є також розрізнені дані про інтегральні перерізи збудження першого  $2^+$ -рівня ядер  $^{136}\text{Ba}$  і  $^{138}\text{Ba}$  поблизу порога збудження [13 - 15]. У цих роботах дані про перерізи непружного розсіяння нейтронів зі збудженням найнижчих  $2^+$ - і  $4^+$ -рівнів цих ядер одержано з малим енергетичним розкидом.

Компіляція даних, що є в літературі щодо повних перерізів і перерізів розсіяння для зразків природної суміші ізотопів барію ( $A = 137,34$ ) та ізотопів  $^{136,138}\text{Ba}$ , наведено на рис. 1 - 4. Перерізи розсіяння, виміряні з високою роздільною здатністю по енергії, наведено усередненими в інтервалі приблизно 100 кеВ. Повні перерізи робіт [2 - 4] представлено не всіма точками, а в основному з кроком 250 кеВ. У досліджуваній області енергій повні перерізи виміряно з похибкою біля 5 %. Похибки диференціальних перерізів пружного розсіяння в мінімумах перерізів досягають 20 %. Похибки у визначенні перерізів непружного розсіяння досягають 10 - 15 %. З рисунків видно, що дані, які є в літературі стосовно повних перерізів і перерізів непружного розсіяння різних лабораторій, досить добре узгоджуються між собою, а кутові розподіли пружно розсіяних нейтронів у досліджуваній області енергій, виміряні різними авторами, виявляють плавну зміну анізотропії зі зміною енергії нейтронів, що й дозволило нам використати їх при вивченні застосовності розробленого нами варіанта оптико-статистичного підходу для області ядер середньої ваги й у даному випадку.

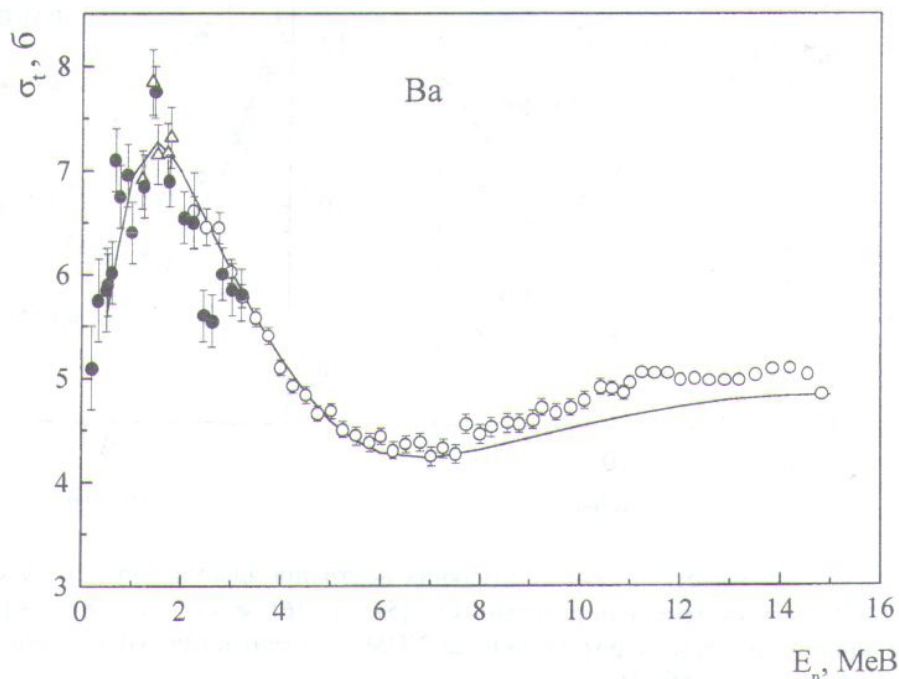


Рис. 1. Енергетична залежність повних перерізів взаємодії швидких нейтронів з ядрами природної суміші ізотопів. Експериментальні дані:  $\circ$  - [2],  $\Delta$  - [3],  $\bullet$  - [4]. Крива - результати розрахунків за УОМ.

**Феноменологічний опис експериментальних перерізів у рамках оптико-статистичної моделі**

На сучасному етапі розвитку теоретичної ядерної фізики немає можливості в єдиному підході описати всі процеси, що відбуваються під дією швидких нейтронів. Для теоретичного опису окремих процесів або механізмів взаємодії швидких нейтронів з ядрами нині використовуються феноменологічні моделі, що мають досить ясну фізичну інтерпретацію й розвинутий математичний апарат і тому придатні для кількісного опису процесу взаємодії швидких нейтронів з ядрами.

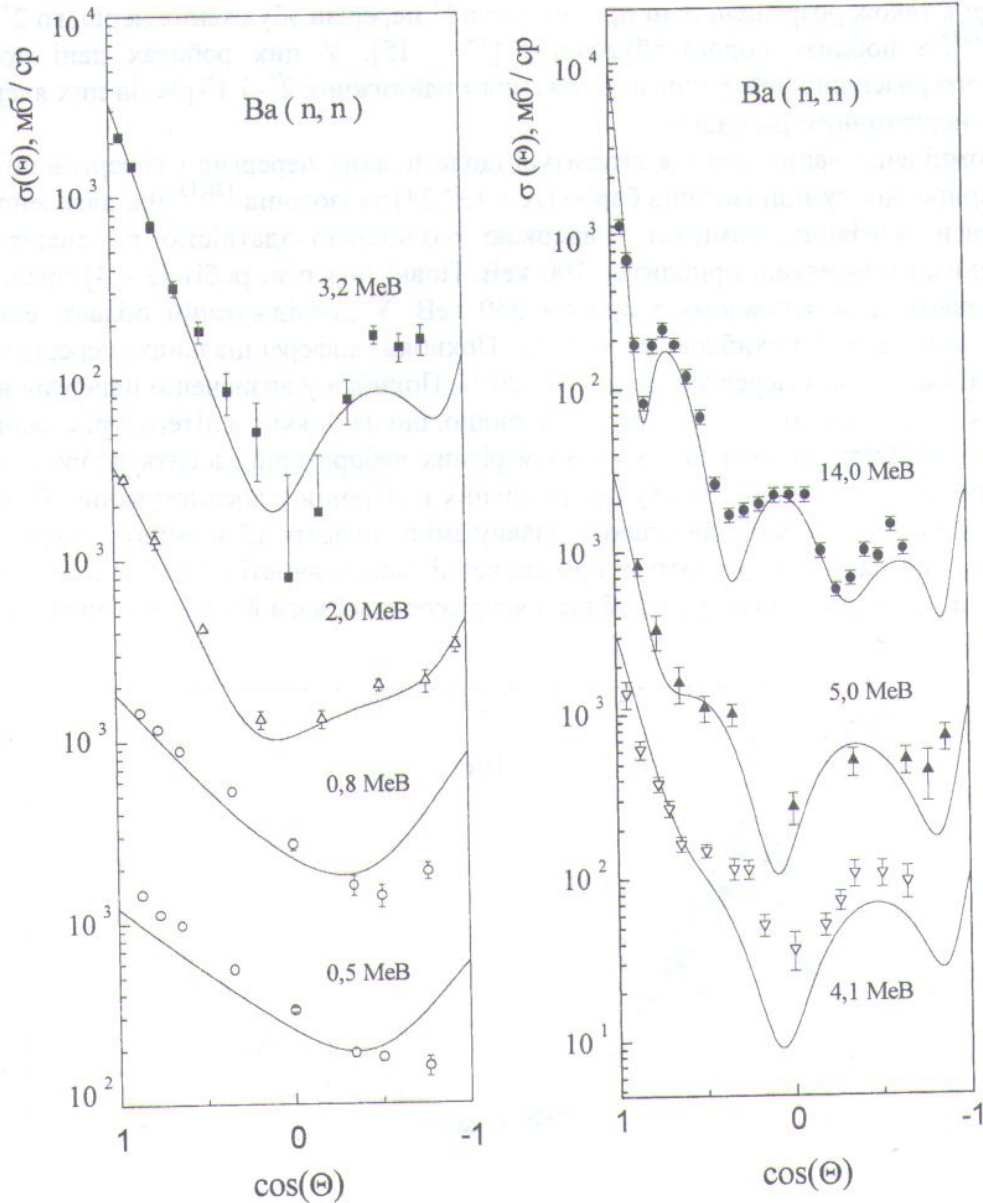


Рис. 2. Кутові залежності пружного розсіяння нейтронів ядрами барію в області енергій 0,5 - 14 MeV. Експериментальні перерізи:  $\circ$  - [5],  $\Delta$  - [6],  $\blacksquare$  - [7],  $\nabla$  - [8],  $\sigma$  - [9],  $\bullet$  - [10]. Суцільні криві - результати розрахунків за УОМ і за статистичною моделлю Хаузера – Фешбаха – Молдауера (ХФМ).

Нині експериментальні дані по повних перерізах і перерізах розсіяння швидких нейтронів атомними ядрами інтерпретуються в рамках оптико-статистичної моделі. Якість опису в рамках цього підходу значною мірою визначається правильністю вибору варіанта

колективної моделі, яку використовуємо для опису структури колективних станів досліджуваних ядер, та надійністю методу розрахунку компаундних перерізів.

Проведений аналіз енергетичної структури ядер парних ізотопів барію дає достатньо аргументів на користь використання вібраційних підходів щодо розрахунків перерізів розсіяння нейтронів ядрами барію. Тому розрахунки повних перерізів і прямих компонент пружного та непружного розсіяння швидких нейтронів ізотопами барію проведено за УОМ у припущенні вібраційної природи найнижчих збуджених станів. Схема зв'язку, що включає двофононні стани, відповідає моделі гармонічного вібратора.

Слід зауважити, що всі раніші розрахунки повних перерізів і перерізів розсіяння швидких нейтронів ядрами барію [5 - 11, 16] було проведено в рамках сферичної оптичної моделі й тому не враховували структуру збуджених станів ядер і не дозволяли враховувати прямий механізм непружного розсіяння. Тільки в роботі [13] феноменологічний опис даних по непружному розсіянню нейтронів поблизу порогів збудження колективних рівнів ядер  $^{136,138}\text{Ba}$  було проведено в рамках УОМ.

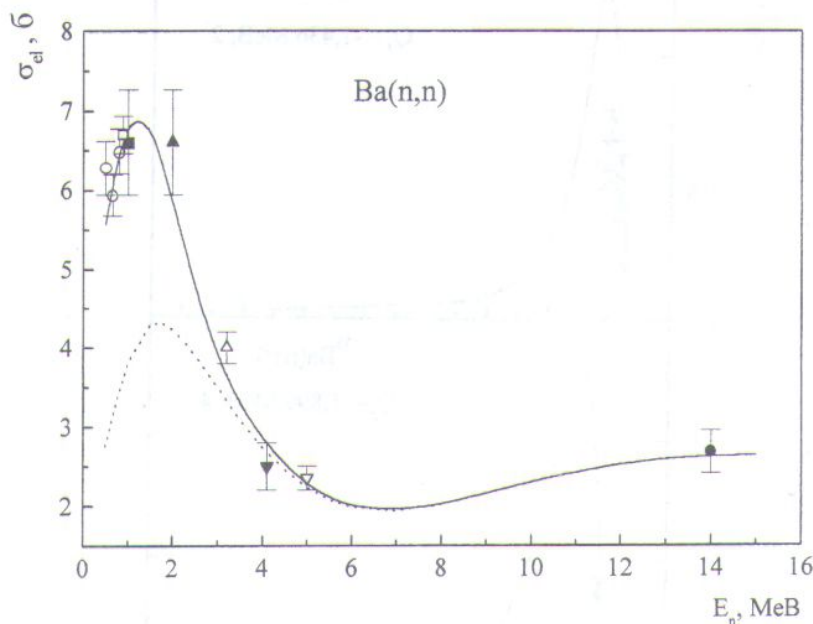


Рис. 3. Енергетична залежність перерізів пружного розсіяння нейтронів ядрами барію. Експериментальні дані:  $\circ$  - [5],  $\sigma$  - [6],  $\Delta$  - [7],  $\tau$  - [8],  $\nabla$  - [9],  $\bullet$  - [10],  $\blacksquare$  - [11],  $\square$  - [12]. Криві: суцільна - результати розрахунків за УОМ і статистичною моделлю (ХФМ або Хаузера – Фешбаха (ХФ)), пунктирна - розрахунки за УОМ.

У розрахунках перерізів за УОМ за програмою ECIS94 [17] використано усереднені значення параметрів сферичного оптичного потенціалу (за винятком потенціалу поглинання, який зменшено на 30 % при врахуванні зв'язку п'яти каналів), які одержані нами раніше в результаті теоретичного аналізу даних про повні перерізи та перерізи пружного розсіяння поляризованих і неполяризованих нейтронів на сферичних ядрах і які довели свою ефективність в описі перерізів пружного та непружного розсіяння швидких нейтронів парними ізотопами ядер середньої атомної ваги [1]:

$$V_c = (48,7 - 0,33 \cdot E) \text{ MeV}, \quad W_c = (7,2 + 0,66 \cdot E) \text{ MeV}, \quad V_{s0} = 7,5 \text{ MeV},$$

$$a_v = a_{vs} = 0,65 \text{ Фм}, \quad a_w = 0,47 \text{ Фм}, \quad r_v = r_{s0} = r_w = 1,25 \text{ Фм}. \quad (1)$$

Зменшення потенціалу поглинання забезпечує інваріантність повних перерізів та перерізів пружного розсіяння, розрахованих за сферичною оптичною моделлю та УОМ.

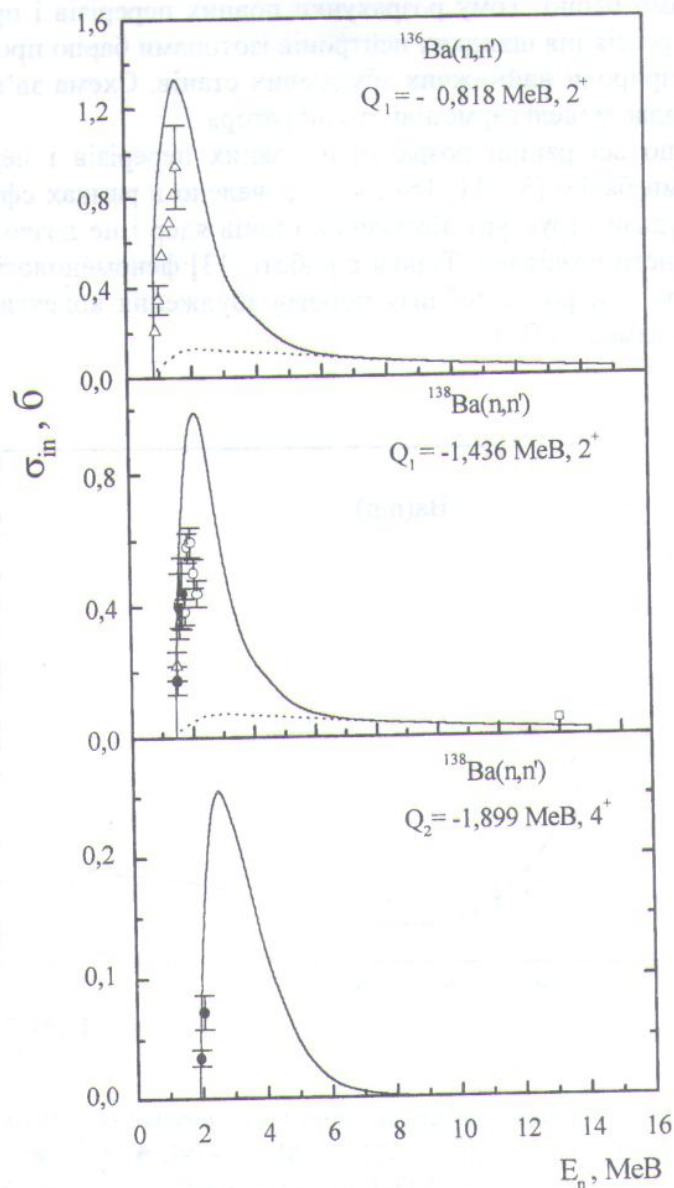


Рис. 4. Енергетична залежність перерізів непружного розсіяння нейтронів зі збудженням нижніх рівнів ядер  $^{136}\text{Ba}$  і  $^{138}\text{Ba}$ . Експериментальні перерізи:  $\square$  - [10],  $\Delta$  - [13],  $\circ$  - [14],  $\bullet$  - [15]. Криві: суцільна - розрахунки за УОМ і статистичною моделлю (ХФМ або ХФ), пунктирна - розрахунки за УОМ.

У несферичному потенціалі УОМ радіус деформованих компонент потенціалу було взято у вигляді

$$R(\vartheta, \phi) = R_0 \left[ 1 + \sum_{\mu} \alpha_{\lambda\mu} Y_{\lambda\mu}(\vartheta, \phi) \right], \quad (2)$$

де  $R_0 = r_0 \cdot A^{1/3}$  - рівноважний радіус ядра;  $\vartheta$  і  $\phi$  - полярні кути;  $Y_{\lambda\mu}(\vartheta, \phi)$  - сферичні функції;  $\alpha_{\lambda\mu}$  - сферичний тензорний оператор рангу  $\lambda$  ( $\lambda \geq 2, \mu = \lambda, \lambda-1, \dots, -\lambda$ ). Сферичний

тензор  $\alpha_{\lambda\mu}$  зв'язаний зі спостережуваною величиною динамічної деформації  $\beta_\lambda$  співвідношенням

$$\beta_\lambda^2 = \langle 0 \left| \sum_{\mu} |\alpha_{\lambda\mu}|^2 \right| 0 \rangle. \quad (3)$$

У розрахунках перерізів ядер  $^{136}\text{Ba}$  і  $^{138}\text{Ba}$  використано параметри квадрупольної деформації, що одержані з експериментів по кулонівському збудженню ядер:  $\beta_2 = 0,124$  для  $^{136}\text{Ba}$  [18] і  $\beta_2 = 0,095$  для  $^{138}\text{Ba}$  [19].

Компаундні компоненти перерізів досліджуваних процесів в області енергій збуджень, де добре відомі характеристики рівнів (до  $\sim 4,5$  MeV), розраховувалися за моделлю ХФМ [20] за програмою ECIS94, яка придатна для розрахунку перерізів у випадку, коли між каналами реакцій є динамічний зв'язок. При більш високих енергіях збудження розрахунки перерізів розсіяння через складене ядро проведено за моделлю ХФ [21] за програмою STATIS [22], в якій як конкурентні вихідні канали непружного розсіяння враховано канали зі збудженням як дискретного, так і безперервного спектра рівнів досліджуваних ядер. Характеристики рівнів дискретного спектра взято з робіт [18, 19], а для розрахунку густини рівнів безперервного спектра в рамках моделі фермі-газу із "зворотним зміщенням" використано параметри густини рівнів із роботи [23] ( $a = 14,83 \text{ MeV}^{-1}$  і  $\Delta = 1,45 \text{ MeV}$  для  $^{136}\text{Ba}$ ;  $a = 13,02 \text{ MeV}^{-1}$  і  $\Delta = 1,33 \text{ MeV}$  для  $^{138}\text{Ba}$ ).

У розрахунках перерізів розсіяння за УОМ і за статистичною моделлю ХФМ повні перерізи збудження дискретних рівнів одержано як сума перерізів прямого збудження й перерізів компаундного розсіяння. У розрахунках компаундних компонент розсіяння за статистичною моделлю ХФ використано коефіцієнти проникнення, які обраховано за ОМ, тому при складанні прямих перерізів з компаундними перерізами останні нормувались множителем  $\sigma_c^{\text{УОМ}}/\sigma_c^{\text{ОМ}}$ , де  $\sigma_c^{\text{УОМ}}$  і  $\sigma_c^{\text{ОМ}}$  - перерізи утворення компаунд-ядра, розраховані за УОМ і ОМ.

Для порівняння з існуючими експериментальними даними на рис. 1 - 4 наведено результати розрахунків повних перерізів, диференціальних та інтегральних перерізів пружного розсіяння й інтегральних перерізів непружного розсіяння швидких нейтронів ядрами природної суміші ізотопів Ва та ядрами  $^{136,138}\text{Ba}$  в рамках описаного вище варіанта оптико-статистичної моделі. Як видно з рис. 1 - 3, розраховані повні перерізи та перерізи пружного розсіяння правильно відображають енергетичну й кутову залежність перерізів, що свідчить про застосовність цього підходу для опису перерізів розсіяння швидких нейтронів також і ядрами барію, який знаходиться в кінці великої області сферичних ядер. Але все-таки спостерігається помітне (але таке, що не перевищує 10 %) розходження між розрахованими та експериментальними повними перерізами при  $E_n > 6 \text{ MeV}$  та між розрахованими й експериментальними перерізами пружного розсіяння нейтронів при низьких енергіях під задніми кутами. Можливо, ці розходження можна усунути, якщо розрахунки перерізів провести в рамках описаного підходу, використовуючи індивідуальний набір параметрів оптичного потенціалу. Із рис. 3 видно, що компаундний механізм дає суттєвий вклад у переріз пружного розсіяння в області енергій тільки до 5 MeV. Обчислені інтегральні перерізи збудження найнижчих рівнів ядер  $^{136}\text{Ba}$  ( $Q_1 = -0,819 \text{ MeV}$ ,  $2^+$ ) і  $^{138}\text{Ba}$  ( $Q_1 = -1,435 \text{ MeV}$ ,  $2^+$ ;  $Q_2 = -1,889 \text{ MeV}$ ,  $4^+$ ) наведено кривими на рис. 4. Результати розрахунків загалом задовільно відтворюють енергетичну залежність перерізів поблизу порога збудження рівнів. Оскільки систематичні експериментальні дані в досліджуваній області енергій відсутні, то результати розрахунків можна розглядати як рекомендовані перерізи непружного розсіяння зі збудженням найнижчих рівнів досліджуваних ядер. Із

рисунок також видно, що при енергіях нейтронів вище 6 МеВ переважним є пряме збудження найнижчих рівнів ядер  $^{136}\text{Ba}$  і  $^{138}\text{Ba}$ .

На закінчення відмітимо, що наявну сукупність експериментальних даних по повних перерізах і перерізах розсіяння швидких нейтронів ядрами барію вдалося адекватно описати в рамках оптико-статистичного підходу з використанням навіть набору усереднених параметрів оптичного потенціалу. Результати теоретичного аналізу експериментальних даних дозволили не тільки дослідити механізм розсіяння швидких нейтронів досліджуваними ядрами, але їх можна використати й при проведенні оцінок перерізів взаємодії швидких нейтронів з ядрами досліджуваної масової області.

Автори висловлюють вдячність І. Є. Кашубі за допомогу в проведенні аналізу енергетичної структури парних ізотопів барію.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Корж І.А. // Нейтронная физика. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. - Т. 3. - С. 136.
2. Foster D.G., Glasgow D.W. // Phys. Rev. - 1971. - Vol. 3, No. 2. - P. 576.
3. Wells J.T., Tucker A.B., Meyerhof W.E. // Phys.Rev. - 1963. - Vol. 131. - P. 1644.
4. Miller D.W., Adair R.K., Bockelman C.K., Darden S.E. // Phys. Rev. - 1952. - Vol. 88. - P. 83.
5. Корж І.А., Пасечник М.В., Тоцький І.А. // Атомная энергия. - 1966. - Т. 20, вып.1. - С. 8.
6. Kasakova L.Ya. et. al. // Conf. on Study of Nuclear Structure with Neutrons (Antwerp., 1965). - Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1966. - P. 576.
7. Becker R.L., Guindon W.G., Smith G.J. // Nucl. Phys. - 1966. - Vol. 89. - P. 154.
8. Vincent L.D., Morgan I.W., Prod'homme // WADD-TR-60-217, 1960.
9. Hill R.W. // Phys. Rev. - 1958. - Vol. 109. - P. 2105.
10. Winkler G., Hansjakob K., Stafel G. // Nuclear Cross Sections for Technology: Proceedings of the International Conference (Knoxville, 1979). - NBS Spec. Publ. 594. - 1980. - P. 150.
11. Walt M., Barschall H.H. // Phys. Rev. - 1954. - Vol. 93. - P. 1062.
12. Cox S.A., Dowling Cox E.E. // R. ANL - 7935, 1972.
13. Конобеевский Е.С., Мусаелян Р. М., Попов В.И., Суркова И.В. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. - 1982. - Т. 13, вып. 2. - С. 300.
14. Победоносцев Л.А., Крамаровский Я.М. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1994. - Вып. 2. - С. 14.
15. Tucker A.B., Wells J.T., Meyerhof W.E. // Phys. Rev. - 1965. - Vol. B137. - P. 1181.
16. Strohmaier B., Uhl M. // Nucl. Science and Engineering. - 1978. - Vol. 65. - P. 368.
17. Raynal J. // Notes on ECIS94. - Centre d'Etudes de Saclay Service de Physique Théorique Laboratoire de la Direction des Sciences de la Matière. Septembre 1994. ISSN 0429-3460. CEA-N-2772.
18. Tuli J.K. // Nucl. Data Sheets. - 1994. - Vol. 71, No.1. - P. 1.
19. Tuli J.K. // Nucl. Data Sheets. - 1993. - Vol. 69, No.1. - P. 69.
20. Moldauer P.A. // Phys.Rev. - 1975. - Vol. C12, No.3. - P. 744; Nucl. Phys. - 1980. - Vol. A344, No. 2. - P. 185.
21. Hauser W., Feshbach H. // Phys.Rev. - 1952. - Vol. 87. - P. 366.
22. Stokstad R. // STATIS. - A Hauser-Feshbach computer code: Yale university. - 1972. - Report No. 52. - P. 35.
23. Dilg W., Schantl W., Vonach H., Uhl M. // Nucl. Phys. - 1973. - Vol. A127, No. 2. - P. 269.

#### МЕХАНІЗМ РАССЕЙАННЯ НЕЙТРОНОВ ЯДРАМИ БАРИЯ В ОБЛАСТИ ЕНЕРГІЙ 0,5 – 15 МэВ

І. А. Корж, Н. Т. Скляр, Т. І. Яковенко

Наши данные и данные других авторов по полным сечениям, интегральным и дифференциальным сечениям упругого и неупругого рассеяния нейтронов в области энергий 0,5 - 15 МэВ, имеющихся в литературе для ядер бария естественного изотопного состава и ядер изотопов  $^{136,138}\text{Ba}$ , проанализированы в рамках оптико-статистического подхода, основу которого составляет опти-

ческая модель, метод связанных каналов и современные варианты статистической модели. Показана возможность адекватного описания всей совокупности экспериментальных данных в рамках этого подхода даже при использовании усредненных значений параметров оптического потенциала, что и позволило оценить вклады прямого и компаундного механизмов рассеяния быстрых нейтронов исследуемыми ядрами.

## MECHANISM OF NEUTRON SCATTERING ON BARIUM NUCLEI. IN 0,5 – 15 MeV ENERGY RANGE

I. A. Korzh, N. T. Sklyar, T. I. Yakowenko

Our data and data of other authors on total, integral and differential elastic and inelastic cross sections of neutron scattering in 0,5 - 15 MeV energy range for barium nuclei of natural isotope composition, as well as for  $^{136}, ^{138}\text{Ba}$  isotopes are analyzed. Optical statistical approach based on optical model, coupled channel method and modern versions of statistical model is used. Possibility of an adequate description of all experimental data in frames of this approach, even using averaged values of optical parameters is shown, and this permitted to evaluate the contribution of direct and compound mechanisms of fast neutron scattering by researched nuclei.

Надійшла до редакції 07.02.01