

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ У СИСТЕМІ D + T

**О. О. Белюскіна, С. В. Бердниченко, В. І. Гранцев, В. О. Грашилін, М. І. Доронін,  
Т. І. Кібкало, К. К. Кісурін, В. О. Кісурін, О. В. Коваленко, М. Ф. Коломієць,  
А. Л. Литвинський, І. О. Мазний, М. В. Маковський, О. М. Мофа, С. Є. Омельчук,  
Г. П. Палкін, Ю. С. Рознюк, Б. А. Руденко, Л. С. Салтиков, В. Г. Савчук, В. С. Семенов,  
Л. І. Слюсаренко, Б. Г. Стружко, В. А. Шитюк, А. М. Щур**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

Отримано інклюзивні спектри протонів, дейтронів та ядер  ${}^3\text{He}$  в кутовому діапазоні  $16^\circ \leq \theta_{\text{л.с.}} \leq 67,4^\circ$ , утворених у процесі взаємодії ядер дейтерію й тритію. Характерні риси інклюзивного спектра протонів описуються завдяки врахуванню процесів послідовного розпаду через резонанс  ${}^4\text{H}^*$  та взаємодії в кінцевому стані синглетної пари „нейтрон - протон”. Форму спектра ядер  ${}^3\text{He}$  вдалося пояснити, враховуючи в реакції  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})n$  процеси взаємодії двох нейтронів у кінцевому стані та послідовний розпад через резонанс  ${}^4\text{He}^*$  ( $E_x = 21,2$ ,  $\Gamma = 0,7$  MeV), а також інтерференцію резонансної амплітуди й амплітуди Ватсона - Мігдала. Отримано диференціальні перерізи пружного розсіювання дейтронів ядрами тритію. Експеримент виконано на ізохронному циклотроні У-240 Інституту ядерних досліджень при енергії пучка дейтронів 36,9 MeV.

### 1. Вступ

Ядерні реакції дейтронів з ядрами тритію ще недостатньо досліджено [1 - 8]. У той же час вони являють значний інтерес, оскільки, з одного боку, є достатньо малочастинкові, щоб застосувати мікроскопічні теорії, а з іншого, досить інформативні завдяки цілому ряду відкритих вихідних каналів. Зокрема, тричастинкові канали дають змогу досліджувати характеристики резонансів ядер  ${}^4\text{H}^*$  [4 - 6] і  ${}^4\text{He}^*$  [7, 8] та моди їх розпаду, процеси взаємодії нуклонів у кінцевому стані, що супроводжуються явищами перезарядки та спин-ізоспін фліпу, і властивості тринейтронної системи.

Дану роботу присвячено вивченню процесів взаємодії дейтронів з ядрами тритію при енергії 36,9 MeV.

### 2. Експеримент

Експериментальні дослідження виконано на пучку дейтронів, прискорених до енергії 36,9 MeV в ізохронному циклотроні ІЯД НАН України (ІЯД).

В експерименті використовувалися Ті-Т- та Ті-мішені. Ті-Т-мішень виготовлено в ІЯД за новою технологією. Ті-Т-мішень являє собою титанову плівку товщиною 4,9 мг/см<sup>2</sup>, яку насичено тритієм до активності 7,57 Ки. Еквівалентна товщина тритію в матриці титану дорівнює  $0,306 \pm 0,76$  мг/см<sup>2</sup>. Для визначення енергії пучка іонів і енергетичної калібровки спектрів додатково проведено вимірювання на плівках з вуглецю та дейтерованого поліетилену.

Реєстрація заряджених частинок здійснювалася трьома телескопами (ΔE-E). Телескопи з напівпровідникових (ΔE) і сцинтиляційних (E) детекторів

використовувалися для реєстрації протонів, дейтронів та тритонів. Геліони та α-частинки реєструвалися телескопом, що складався з напівпровідникових кремнієвих детекторів ΔE та E товщинами 56 мкм та 2,5 мм відповідно. Струм іонів, що пройшов мішень, реєструвався циліндром Фарадея (що з'єднаний з інтегратором струму).

Інклюзивні спектри накопичувалися за допомогою електронної схеми та локального сітьового клієнта [9]. Локальний сітьовий клієнт з крейтом КАМАК виконував попередню обробку експериментальної інформації і записував її на сітьовий диск. Методику експерименту описано в роботах [9, 10].

Для оцінки енергії пучка дейтронів класичним методом перетину кінематичних кривих, що визначають залежність енергії продукту бінарної реакції від кута його емісії, використовувалися реакції  ${}^2\text{H}(d, {}^3\text{He})n$  та  ${}^{12}\text{C}(d, {}^3\text{He}){}^{11}\text{B}$ .

Калібрування напівпровідникового спектрометра виконано на основі співвідношення між відомими енергіями альфа-частинок із бінарної реакції  ${}^3\text{H}(d, {}^4\text{He})n$  ( $Q = 17,59$  MeV) і радіоактивного розпаду джерела  ${}^{226}\text{Ra}$  та положенням відповідних піків у спектрі E-детектора. Енергетичне калібрування сцинтиляційного спектрометра (E – сцинтилятор, ΔE – напівпровідник) проведено з використанням спектрів протонів із реакції  $\text{H}(d, p)\text{H}$  під різними кутами. Водень в якості домішок входить до складу Ті-Т-мішені.

На рис. 1 показано двовимірні спектри p, d та t, що вимірювалися під кутом 31° на Ті-Т- і Ті-мішенях відповідно. У спектрах дейтронів і тритонів із Ті-Т-мішені порівняно зі спектром на Ті-мішені з'являються нові вкраплення, що відповідають процесам взаємодії дейтронів з ядрами тритію. Рис. 2 ілюструє двовимірні спектри

$^3\text{He}$  та  $^4\text{He}$ -частинок під кутом  $7,6^\circ$  на  $\text{Ti-T}$  - і  $\text{Ti}$ -мішенях відповідно. У спектрі з  $\text{Ti-T}$ -мішені з'являється інтенсивний локус, зобов'язаний своїм походженням геліонам з реакції  $^3\text{H}(d, ^3\text{He})n$ .

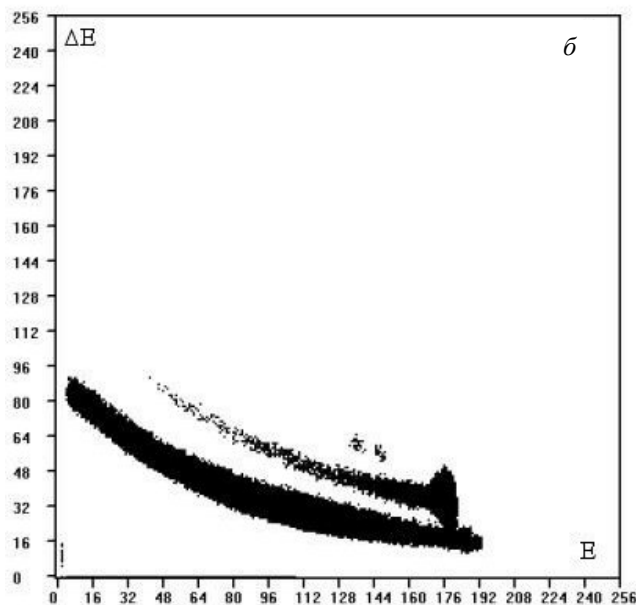
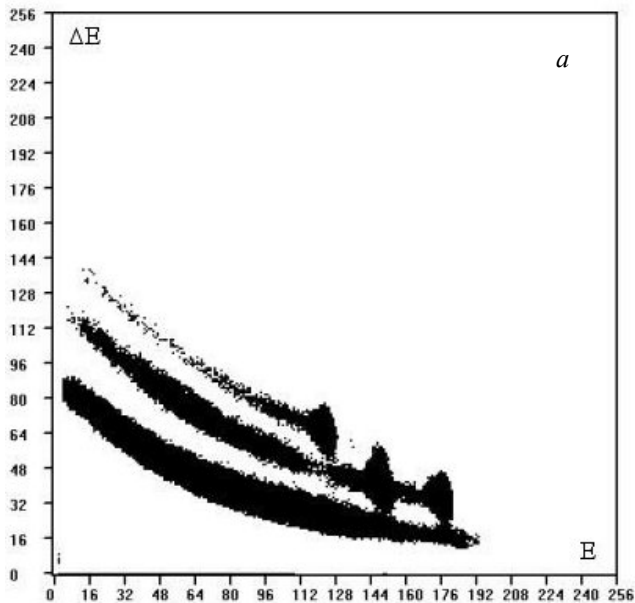


Рис. 1. Двовимірні спектри  $p, d, t$ :  $a$  – двовимірні спектри  $p, d, t$  під кутом  $\theta = 31^\circ$  з  $\text{Ti-T}$ -мішені, що опромінюється  $36,9$  МеВ дейтронами;  $b$  – те ж саме з  $\text{Ti}$ -мішені.

### 3. Експериментальні результати

На рис. 3 показано спектри протонів із  $\text{Ti-T}$  та  $\text{Ti}$ -мішеней під кутами  $21, 31$  та  $39,4^\circ$ .

Спектри протонів із  $\text{Ti}$ -мішені під кутами  $21$  і  $31^\circ$  – це широкі максимуми, характерні для процесів розщеплення дейтронів на ядра середньої атомної ваги. Перерізи в максимумах швидко

Статистична похибка вимірювання інклюзивних спектрів становила  $1 - 3\%$ . Струм пучка іонів вимірювався з точністю  $6 - 8\%$  залежно від його інтенсивності.

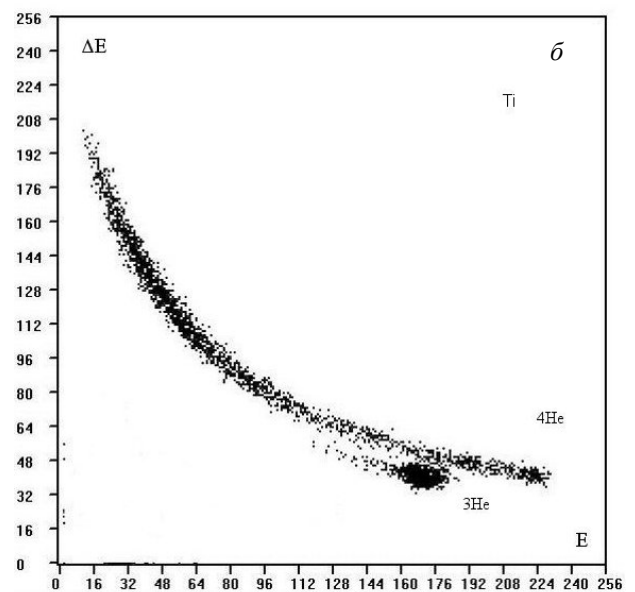
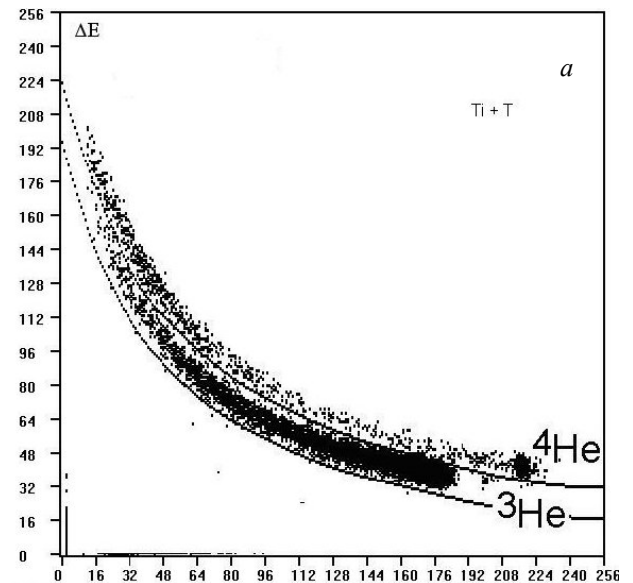


Рис. 2. Двовимірні спектри  $^3\text{He}$  та  $^4\text{He}$ :  $a$  – двовимірні спектри  $^3\text{He}$  та  $^4\text{He}$  під кутом  $\theta = 7,6^\circ$  з  $\text{Ti-T}$ -мішені, що опромінюється  $36,9$  МеВ дейтронами;  $b$  – те ж саме з  $\text{Ti}$ -мішені.

зменшуються зі збільшенням кута розсіювання. Положення максимуму зі зміною кута практично не змінюється. Під кутом  $39,4^\circ$  максимум спектра, що відповідає розщепленню дейтрона, практично відсутній. Внесок протонів, що відповідають процесам випаровування в реакціях з ядрами  $\text{Ti}$ , визначає характер спектра в області низьких енергій.

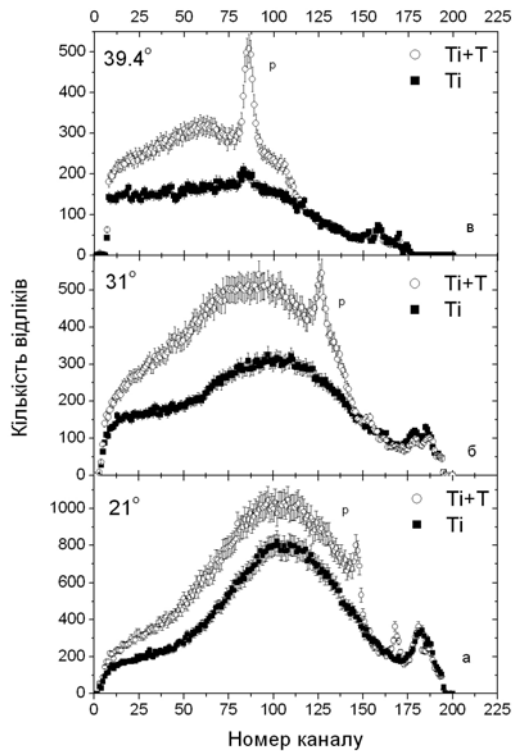


Рис. 3. Одновимірні спектри протонів з Ti-T- та Ti-мішеней, що опромінюються 36,9 MeV дейтронами: а – під кутом  $\theta = 21^\circ$ ; б – під кутом  $\theta = 31^\circ$ ; в – під кутом  $\theta = 39,4^\circ$ .

Характерною особливістю наведених спектрів протонів із Ti-T-мішені є наявність асиметричного максимуму, який має пологий схил у бік низьких енергій та різкий – у бік високих. Положення максимумів із збільшенням кута розсіювання зсувається в бік низьких енергій. У спектрах протонів із Ti-T-мішені широкий максимум спостерігається також під кутом  $39,4^\circ$ .

Високоенергетична частина спектра в даній роботі не розглядається.

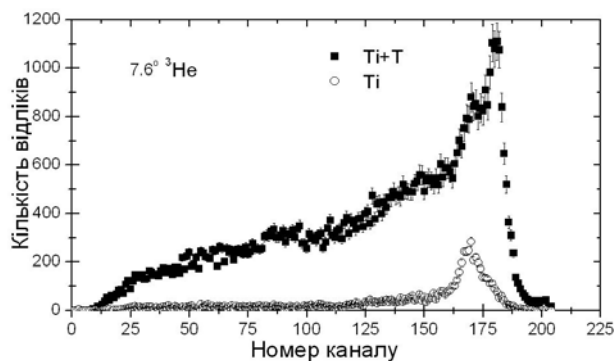


Рис. 4. Спектри ядер  $^3\text{He}$ , отримані при опроміненні Ti-T- та T-мішеней дейтронами. Енергія пучка 36,9 MeV, середній кут емісії частинок  $7,6^\circ$ .

Спектри дейтронів вимірювалися в діапазоні кутів розсіювання  $16^\circ \leq \theta \leq 67,4^\circ$ . Внесок дейт-

ронів, пружно розсіяних на титані, до перерізу пружного розсіювання дейтронів на тритонах був малим (за винятком малих кутів).

На рис. 4 показано проекцію на вісь енергії  $E$  локусів іонів  $^3\text{He}$ , отриманих під кутом  $7,6^\circ$  при опроміненні Ti-T- і Ti-мішеней. Як видно з рисунка, внесок тритонів від титанової мішені до спектра геліонів впливає на структуру спектра, тому слід бути уважним при його врахуванні.

#### 4. Аналіз експериментальних даних

##### 4.1. Пружне розсіювання дейтронів на тритонах

Значення диференціальних перерізів пружного розсіювання дейтронів на тритонах визначено в діапазоні кутів розсіювання  $16^\circ \leq \theta \leq 67,4^\circ$  (у лабораторній системі). Рис. 5 ілюструє отримані кутові розподіли (у системі центра мас). Загальний вигляд кутової залежності є характерним для процесів розсіювання слабкоз'язаних частинок у малонуклонних системах, тобто спостерігається різке падіння перерізу зі збільшенням кута розсіювання до  $\theta_{с.м.} \leq 60^\circ$ .

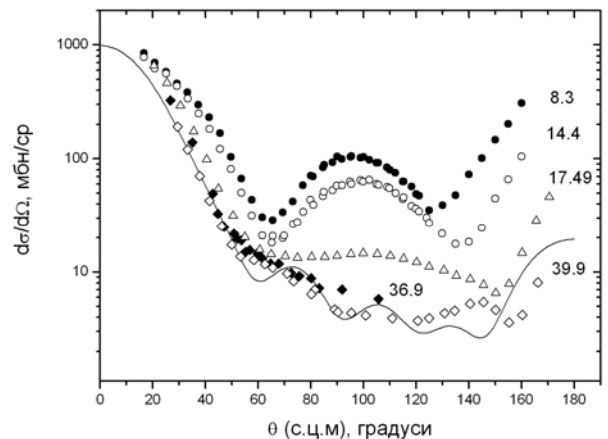


Рис. 5. Кутові розподіли пружного розсіювання  $^3\text{H}(d, d)^3\text{H}$  та  $^3\text{He}(d, d)^3\text{He}$ . Цифрами позначено енергію:  $E_d = 8,3, 14,4$  і  $36,9$  MeV (наші дані) -  $^3\text{H}(d, d)^3\text{H}$ ;  $E_d = 17,49$  та  $39,9$  MeV -  $^3\text{He}(d, d)^3\text{He}$ . Суцільна крива - наближення диференціальних перерізів пружного розсіювання  $^3\text{He}(d, d)^3\text{He}$  при енергії 36,9 MeV лінійною комбінацією поліномів Лежандра.

Експериментально пружне розсіювання дейтронів на тритонах вивчалось тільки при низьких енергіях (до 14,4 MeV) [1,2]. На рис. 5 наведено експериментальні дані пружного розсіювання дейтронів на тритонах при енергіях 8,3 та 14,4 MeV [2]. Починаючи з  $\theta_{с.м.} \geq 60^\circ$ , спостерігається розходження між нашими даними та даними при енергіях 8,3 і 14,4 MeV. Широкий максимум, що спостерігається під кутом  $\theta_{с.м.} \approx 100^\circ$  при енергіях 8,3 та 14,4 MeV [2], зникає в кутових розподілах при енергії 36,9 MeV. Згідно з сучасними уяв-

леннями, пружне розсіювання  ${}^3H(d, d){}^3H$  практично не відрізняється від пружного розсіювання  ${}^3He(d, d){}^3He$ . Наявні дані при низьких енергіях підтверджують цей факт [1, 2]. Подальше порівняння ми проводили з даними з пружного розсіювання дейтронів на геліонах [11]. На рис. 5 наведено кутові розподіли пружного розсіювання дейтронів з енергіями 17,49 і 39,9 МеВ [11] на геліонах. У кутових розподілах при енергіях 17,49 і 39,9 МеВ також спостерігається зникнення максимуму під кутом  $\theta_{с.м.} \approx 100^\circ$ . Наші дані майже не відрізняються від даних, отриманих при енергії 39,9 МеВ. Суцільною лінією на рис. 5 показано наближення диференціальних перерізів пружного розсіювання  ${}^3He(d, d){}^3He$  при енергії 36,9 МеВ лінійною комбінацією поліномів Лежандра за методом найменших квадратів. Коефіцієнти лінійної комбінації при енергії 36,9 МеВ отримано інтерполяцією відповідних значень при енергіях 34,9 і 39,9 МеВ [11].

#### 4.2. Аналіз спектрів геліонів

Експериментальний спектр (див. рис. 4), трансформований до лінійної шкали енергій, показано на рис. 6. У спектрі враховано фон від реакцій з ядрами титанової матриці. Модельні спектри розраховано з урахуванням умов експерименту: немонохроматичності пучка прискорених дейтронів, товщини мішені, неточної геометрії (розмірів пучка на мішені, детектора, відстані від мішені до детектора), роздільної здатності детектора.

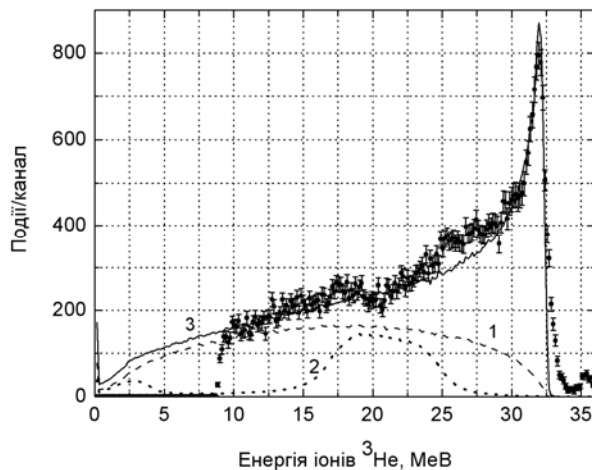


Рис. 6. Інклюзивний спектр ядер  ${}^3He$  з реакції  ${}^3H(d, {}^3He)2n$  при енергії пучка дейтронів 36,9 МеВ, отриманий під кутом  $7,6^\circ$ . 1 - "статистичний" розподіл; 2 - внесок послідовного розпаду через резонанс  ${}^4He^*$  ( $E_x = 21,2$  МеВ); 3 - розподіл Ватсона - Мігдала для ВКС нейтронів.

Оскільки в інклюзивному спектрі продуктів тричастинкової реакції (кінематично неповний

експеримент) визначеними є імпульси частинки, що реєструються,  $p_1$ , сумарний імпульс нерезонованої пари  $p_{23}$  і абсолютна величина імпульсу відносного руху в цій парі  $k_{23}$ , а невизначеною є орієнтація вектора  $k_{23}$ , диференційний переріз обчислюється інтегруванням по його напрямках

$$\frac{d^2\sigma(\vartheta_1, E_1)}{d\Omega dE_1} = \frac{8\pi^2}{\hbar^2 v} \int \rho |F|^2 d\Omega. \quad (1)$$

Тут  $\vartheta_1, E_1$  - полярний кут емісії й енергія частинок, що реєструються, у лабораторній системі;  $v$  - швидкість частинок пучка;  $\rho$  - множник фазового простору [12],

$$|F|^2 = |c_S F_S + c_R F_R|^2, \quad (2)$$

$F_S$  описує взаємодію нейтронів у кінцевому стані,  $F_R$  - послідовний механізм через резонанси  ${}^4He^*$ , а  $c_S$  та  $c_R$  - вільні параметри.

Амплітуда  $F_S$  обчислюється в наближенні Ватсона - Мігдала [13, 14]

$$F_S(k) \propto \frac{r(k^2 + \alpha^2)}{2(rk^2/2 - 1/a - ik)}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 - 2r/a}}{r}$$

з  $k = |k_{23}|$ ,  $a = -18,5$  фм,  $r = 2,80$  Фм [8], а  $F_R$  - у формі резонансу Брейта - Вігнера

$$F_R \propto \frac{\Gamma/2}{E - E_R + i\Gamma/2}, \quad (4)$$

де  $E$  - енергія відносного руху в парі  $n{}^3He$ ;  $E_R$  - положення резонансу  ${}^4He^*$  над порогом розпаду  ${}^4He \rightarrow n + {}^3He$ ;  $\Gamma$  - його ширина. Вираз (2) можна переписати як

$$|F|^2 = |c_S F_S|^2 + |c_R F_R|^2 + 2|c_S F_S| \times$$

$$\times |c_R F_R| \cos(\varphi_S - \varphi_R),$$

$$\cos \varphi_R = (E - E_R) / ((E - E_R)^2 + \Gamma^2/4)^{1/2},$$

$$\sin \varphi_R = (-\Gamma/2) / ((E - E_R)^2 + \Gamma^2/4)^{1/2}. \quad (5)$$

Нехтуючи змінами фази комплексної функції  $F_S$  на проміжку, де доданок  $|F_R|$  має значиму величину, можна покласти  $\varphi_S = const$  і використовувати її як третій вільний параметр.

Розраховані таким чином модельні спектри показано на рис. 6 і 7. Модель Ватсона - Мігдала відтворює загальну форму спектра (за винятком резонансної модуляції) на широкому інтервалі енергій. Лініями 1 і 2 на рис. 6 показано можли-

вий внесок від послідовного розпаду через резонанс  ${}^4\text{He}^*$  ( $E_x = 21,2$ ,  $\Gamma = 0,7$  MeV) і від множника фазового простору  $\rho$  (статистичний розподіл). На перший погляд здається, що вони не зможуть пояснити резонансну структуру спектра, оскільки повинні підняти переріз саме при тих енергіях, де спостерігається мінімум в експериментальному спектрі. Однак у цьому розрахунку не враховано, як це звичайно й робилося, анізотропію кутового розподілу резонансної системи  ${}^4\text{He}^*$  та її розпаду на нейтрон і  ${}^3\text{He}$ .

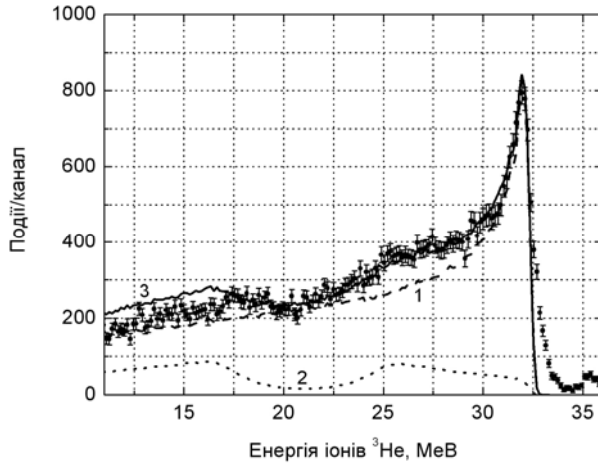


Рис. 7. Експериментальний і модельований інклюзивний спектр ядер  ${}^3\text{He}$  з реакції  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})2n$ . Енергія пучка дейтронів 36,9 MeV, кут емісії частинок –  $7,6^\circ$ . 1 – розподіл Ватсона - Мігдала для ВКС нейтронів; 2 – внесок від інтерференції амплітуд Ватсона - Мігдала та послідовного розпаду через резонанс  ${}^4\text{He}^*$  ( $E_x = 21,2$  MeV); 3 – сумарний розподіл.

На рис. 7 показано ефект інтерференції амплітуд у сумі (2). При цьому враховано тільки рівень 21,2 MeV системи  ${}^4\text{He}^*$  і знехтувано для простоти можливою анізотропією кутових розподілів при утворенні й розпаді резонансної системи.

### 4.3. Аналіз спектрів протонів

Енергетичні спектри протонів із  ${}^3\text{H}(d, p)$  реакції було отримано шляхом вилучення зі спектрів протонів, отриманих із Ті-Т-мішені, спектрів, що відповідають розсіюванню на титані.

Рис. 8 ілюструє енергетичний спектр протонів під кутом  $\theta = 21^\circ$ . Наведений спектр являє собою широкий максимум із досить різкою межею з боку високих енергій та пологим схилом у бік низьких енергій.

Перші дослідження спектрів протонів із  ${}^3\text{H}(d, p)$  реакцій [4] були спрямовані на пошук станів  ${}^4\text{H}^*$  та  ${}^4\text{He}^*$ . Вимірювання проводилися в інтервалі енергій 12 - 22 MeV, діапазон кутів охоплював  $10^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$ . При енергіях 12 - 22 MeV стани  ${}^4\text{H}^*$  та  ${}^4\text{He}^*$  не було знайдено.

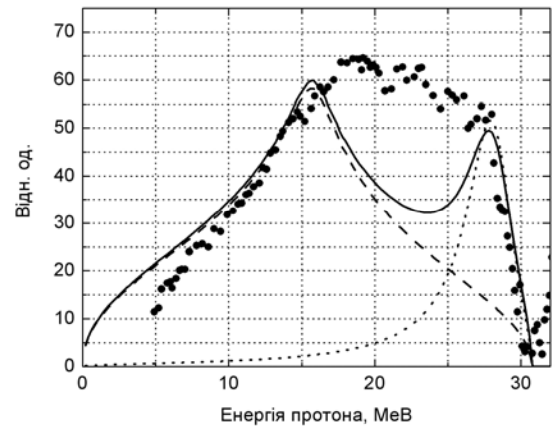


Рис. 8. Експериментальний та модельований спектри протонів з реакції  ${}^3\text{H}(d, p)$  під кутом  $21^\circ$  при  $E_d = 36,9$  MeV. Точки – експериментальні дані; пунктирна крива – послідовний розпад через резонанс  ${}^4\text{H}^*$  ( ${}^3\text{H}(d, p)nt$ ); штрихова крива – розподіл Ватсона - Мігдала для ВКС пари „нейтрон - протон” ( ${}^1S_0$ ); суцільна крива – внесок двох механізмів.

Стан  ${}^4\text{H}^*$  було ідентифіковано в кінематично повному експерименті в реакції  ${}^2\text{H}(t, tp)n$  при енергії 35 MeV (резонансна енергія 3,1 MeV, приведена ширина 2,3 MeV) [6] та  ${}^3\text{H}(d, tp)n$  при енергії дейтронів 47,3 MeV (резонансна енергія 2,2 MeV, ширина 3,4 MeV) [5].

Інклюзивний спектр протонів – це суперпозиція спектрів як двочастинкової реакції  $T(d, p){}^4\text{H}^*$ , так і багаточастинкових реакцій. Тому в інклюзивному спектрі протонів можна спостерігати тільки структурні зміни на фоні неперервного спектра. Такі особливості спостерігаються на верхньому краї неперервного розподілу. З порівняння спектрів протонів із Ті-Т- і Ті-мішеней видно, що структурні особливості в спектрах  $T(d, p)$  не є результатом їх обробки.

Частково характерні особливості експериментального спектра вдається описати, враховуючи процес послідовного розпаду через резонанс  ${}^4\text{H}^*$  за схемою  $T(d, p){}^4\text{H}^* \rightarrow T(d, p)nt$  та взаємодії в кінцевому стані синглетної пари «нейтрон - протон»  $T(d, d^*){}^3\text{H} \rightarrow T(d, pn)T$ .

Внесок від послідовного розпаду моделювався розподілом Брейта - Вігнера (4) з параметрами резонансу  ${}^4\text{H}^*$ :  $E_R = 2,2$  MeV (положення над порогом розпаду на нейтрон і тритон) та  $\Gamma = 3,4$  MeV (ширина). Для обчислення внеску від розпаду синглетного дейтрона використано наближення Мігдала - Ватсона (3) [14, 15] із значеннями параметрів довжини розсіювання та ефективного радіуса, рівними відповідно  $a_{np} = -23,748$  і  $r_{np} = 2,75$  Фм.

Можливо, при подальшому врахуванні інших процесів, зокрема квазівільного розсіювання, квазівільних реакцій та непружного розсіювання

дейтронів з утворенням триплетної  $n$ - $p$  пари, вдасться повніше пояснити експериментальний спектр.

## 5. Висновки

При енергії пучка дейтронів 36,9 MeV проведено вимірювання інклюзивних спектрів протонів, дейтронів і  ${}^3\text{He}$ -частинок із реакцій  $d + {}^3\text{H}$ .

Отримано абсолютні значення диференціальних перерізів пружного розсіювання дейтронів на тритонах. Проведено порівняння з літературними даними з пружного розсіювання дейтронів на тритонах та геліонах. Кутові розподіли дейтронів на тритонах, отримані нами при енергії 36,9 MeV, мають структуру, подібну структурі кутовим розподілам дейтронів на геліонах, отриманих при енергіях 34,9 і 39,9 MeV, і вказують на поступове зникнення широкого максимуму під кутом  $\theta_{\text{с.м.}} \approx 100^\circ$  при енергіях  $E \geq 25$  MeV.

Отримані під малими кутами спектри ядер  ${}^3\text{He}$  мають характерну форму динейтронного квазіпіка на верхньому краї неперервного розподілу, модельованого неглибокими резонансами. Форму спектра ядер  ${}^3\text{He}$  вдалося пояснити, враховуючи в реакції  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})nn$  процеси взаємодії двох нейтронів у кінцевому стані та послідовного розпаду через резонанс  ${}^4\text{He}^*$  ( $E_x = 21,2$ ,  $\Gamma = 0,7$  MeV), а також інтерференцію резонансної амплітуди й амплітуди Ватсона - Мігдала.

Спектри протонів із  ${}^3\text{H}(d, p)$  реакцій мають характерні особливості: наявність асиметричного максимуму, що має покатий схил у бік низьких енергій та різкий – у бік високих. Показано, що частково природу максимуму, що спостерігається, можна пояснити, враховуючи механізм послідовного розпаду через резонанс  ${}^4\text{H}^*$  та взаємодію в кінцевому стані синглетної пари «нейтрон - протон».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ivanovich M, Young P.G., Ohlsen G.G.* Elastic scattering of several hydrogen and helium isotopes from tritium // Nucl. Phys. - 1968. - Vol. A110. - P. 441 - 462.
2. *Brolley J.E., JR., Putman T.M., Rosen L. et al.* Hydrogen-Helium Isotope Elastic Scattering Process at Intermediate Energies // Phys. Rev. - 1960. - Vol. 117. - P. 1307 - 1316.
3. *Лебедев В.М., Неудачин В.Г., Стружко Б.Г.* Реакции с опрокидыванием спин-изоспина дейтрона и супермультиплетная потенциальная модель взаимодействия легчайших кластеров // Ядерная физика. - 2002. - Т. 65. - С. 1 - 14.
4. *Jarmie N., Stokes R.H., Ohlsen G.G., Newsome R.W.* Experimental Study of Excited  ${}^4\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$ , and  ${}^4\text{Li}$  Nuclear Systems // Phys. Rev. - 1967. - Vol. 161. - P. 1050 - 1060.
5. *Конфедератенко В.І., Стружко Б.Г., Поворозник О.М.* Дослідження трьохчастинкових каналів реакції  $d + t$  при 47,3 MeV // УФЖ. - 1994. - Т. 39. - С. 393 - 397.
6. *Calvi G., Lattuada M., Riggi F. et al.*  ${}^4\text{H}$  nucleus and the  ${}^2\text{H}(t, tp)n$  reaction // Phys. Rev. - 1991. - Vol. C44. - P. 325 - 328.
7. *Александров Д.В., Никольский Е.Ю., Новацкий Б.Г. и др.* Существуют ли возбужденные состояния в системе двух нейтронов? // Письма в ЖЭТФ. - 1998. - Т. 67. - С. 860 - 865.
8. *Стружко Б.Г.* Так существуют ли возбужденные состояния в системе двух нейтронов? // Изв. РАН. - 2000. - Т. 64 - С. 890 - 893.
9. *Гранцев В.І., Грашлин В.О., Дей Ю.О. та ін.* Модернізований експериментальний комплекс для дослідження ядерних реакцій на прискорювачі У-240 // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2004. - № 1 (12). - С. 108 - 113.
10. *Альошин В.О., Белоскіна О.О., Бердниченко С.В. та ін.* Дослідження взаємодії дейтронів з ядрами тритію // International Conference "Current problems in nuclear physics and atomic energy", Kyiv 2007, Part 1. - P. 270 - 282.
11. *Roy R., Seiler F., Conzett H.E., Rad F.N.* Cross section and vector analyzing power  $T_{11}$  of the process  ${}^3\text{He}(d, d){}^3\text{He} (d, p){}^4\text{He}$  between 15 and 40 MeV // Phys. Rev. - 1981. - Vol. C24. - P. 2421 - 2433.
12. *Ohlsen G.G.* Kinematic relations in reactions of the form  $A + B \rightarrow C + D + E$  // Nucl. Instr. Meth. - 1965. - Vol. 37. - P. 240 - 248.
13. *Watson K.M.* The effect of final state interactions on reaction cross section // Phys. Rev. - 1952. - Vol. 88. - P. 1163 - 1170.
14. *Мигдал А.Б.* Теория ядерных реакций с образованием медленных частиц // ЖЭТФ. - 1955. - Т. 28. - С. 3 - 10.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В СИСТЕМЕ D + T

**О. О. Белюскина, С. В. Бердниченко, В. И. Гранцев, В. А. Грашилин, М. И. Доронин, Т. И. Кибкало, К. К. Кисурич, В. А. Кисурич, А. В. Коваленко, Н. Ф. Коломиец, А. Л. Литвинский, И. А. Мазный, М. В. Маковский, О. М. Мофа, С. Е. Омельчук, Г. П. Палкин, Ю. С. Рознюк, Б. А. Руденко, Л. С. Салтыков, В. Г. Савчук, В. С. Семенов, Л. И. Слюсаренко, Б. Г. Стружко, В. А. Шитюк, А. М. Щур**

Измерены инклюзивные спектры протонов, дейтронов и ядер  ${}^3\text{He}$  в угловом диапазоне  $16^\circ \leq \theta_{\text{л.с.}} \leq 67,4^\circ$ , образованных в процессе взаимодействия ядер дейтерия и трития. Характерные особенности инклюзивных спектров протонов описываются благодаря учету процессов последовательного распада через резонанс  ${}^4\text{H}^*$  и взаимодействия в конечном состоянии синглетной пары „нейтрон - протон”. Форму спектра ядер  ${}^3\text{He}$  удастся объяснить, если учесть в реакции  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})nn$  процессы взаимодействия двух нейтронов в конечном состоянии и последовательный распад через резонанс  ${}^4\text{He}^*$  ( $E_x = 21,2$ ,  $\Gamma = 0,7$  МэВ), а также интерференцию резонансной амплитуды и амплитуды Ватсона - Мигдала. Получены дифференциальные сечения упругого рассеяния дейтронов ядрами трития. Эксперимент выполнен на ускорителе У-240 Института ядерных исследований НАН Украины при энергии пучка дейтронов 36,9 МэВ.

## INVESTIGATION OF NUCLEAR REACTIONS IN D + T SYSTEM

**O. O. Belyuskina, S. V. Berdnichenko, V. I. Grantsev, V. O. Grashilin, M. I. Doronin, T. I. Kibkalo, K. K. Kisurin, V. O. Kisurin, O. V. Kovalenko, M. F. Kolomiets, A. L. Lytvynsky, I. O. Mazny, M. V. Makovskiy, O. M. Mofa, S. E. Omelchuk, G. P. Palkin, Yu. S. Roznyuk, B. A. Rudenko, L. S. Saltykov, V. G. Savchuk, V. S. Semenov, L. I. Slyusarenko, B. G. Struzhko, V. A. Shityuk, A. M. Schur**

The results of measurement of inclusive of protons, deuterons and  ${}^3\text{He}$  spectra in the range  $16^\circ \leq \theta_{\text{L.C.}} \leq 67,4^\circ$  formed in the process of interaction of nuclei of deuterium and tritium are presented. Characteristic features of proton energy spectrum are described owing to the account of  ${}^4\text{H}$  sequential decay and final state interaction of a singlet neutron-proton pair processes. The account in the  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})nn$  reaction of processes of final state two neutron interaction and successive decay through  ${}^4\text{He}^*$  ( $E_x = 21.2$ ,  $\Gamma = 0.7$  MeV) resonance amplitude and Watson - Migdal amplitude allowed to describe the  ${}^3\text{He}$  nucleus spectrum shape. Experimental differential cross sections of elastic deuteron scattering on Tritium were obtained. The experiment was carried out on U-240 INR cyclotron with deuteron beam energy of 36.9 MeV. Energy spectra of protons and  ${}^3\text{He}$ -particles were studied.

Надійшла до редакції 23.06.06,  
після доопрацювання – 30.10.07.