

О. О. Белоскіна, В. І. Гранцев, К. К. Кісурін, С. Є. Омельчук, Ю. С. Рознюк,  
Б. А. Руденко, Л. І. Слюсаренко, Б. Г. Стружко

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

### ПЕРЕРІЗИ РЕАКЦІЇ ${}^3\text{H}(d, t)np$ ПРИ ЕНЕРГІЇ ПУЧКА ДЕЙТРОНІВ 37 MeV

В експериментальних дослідженнях, виконаних із дейтронами, прискореними до енергії 36,9 MeV, отримано інклюзивні спектри тритонів і диференціальні перерізи  $\frac{d\sigma(\vartheta, E)}{d\Omega dE}$  реакції  ${}^3\text{H}(d, t)$ . Спектри модельовано, враховуючи прості квазібінарні механізми та характеристики експериментальної методики: немонохроматичність пучка дейтронів, роздільну здатність спектрометра, неточкову геометрію та товщину мішені. Отримано якісне погодження розрахованих та експериментальних енергетичних розподілів. Результати порівняння експериментальних та модельованих спектрів свідчать, що домінуючими процесами в реакції  ${}^3\text{H}(d, t)$  є взаємодія в кінцевому стані нейтрона й протона як у синглетному, так і в триплетному станах, квазівільне розсіювання нейтронів і протонів, що входять до складу дейтрона, на ядрах тритію та послідовний розпад через резонанс  ${}^4\text{H}^*$  ( $E_{\text{нт}} = 2,2$  MeV,  $\Gamma = 3,4$  MeV).

*Ключові слова:* дейтрон, 37 MeV, тритон, диференціальні перерізи, моделювання.

#### Вступ

У роботах [1 - 6] було отримано інклюзивні спектри протонів, дейтронів та іонів  ${}^3\text{He}$  з реакцій  $d + {}^3\text{H}$  при енергії пучка дейтронів 36,9 MeV. Спектри було модельовано, враховуючи квазібінарні моделі: квазівільне розсіювання (КВР) протон-тритон, взаємодію в кінцевому стані (ВКС) нейтрон-протон та послідовний розпад через резонанси  ${}^4\text{H}^*$  і  $\text{He}^*$  у спектрах протонів; КВР дейтрон-дейтрон і КВР дейтрон-протон у спектрах дейтронів та ВКС нейтрон-нейтрон і послідовний розпад через резонанс  ${}^4\text{He}^*$  у спектрах іонів  ${}^3\text{He}$ . Особливості останніх, зокрема неглибоку модуляцію неперервного розподілу, було відтворено, враховуючи інтерференцію амплітуди Ватсона - Мігдала [7, 8] для ВКС нейтронів та амплітуди у формі Брейта - Вігнера для резонансу в підсистемі «нейтрон- ${}^3\text{He}$ ». Априорі слід чекати, що спектри тритонів на їхньому верхньому краї мають бути подібними за формою до спектрів іонів  ${}^3\text{He}$ , зважаючи на можливий внесок процесів ВКС нуклонів. Справді, інклюзивні спектри іонів  ${}^3\text{He}$  та тритонів з реакцій  $d + {}^3\text{H}$ , отримані раніше при енергії пучка дейтронів 13,8 MeV [9], вдалося не тільки відтворити, враховуючи внески ВКС синглетних пар нейтрон-нейтрон та ВКС нейтрон-протон у синглетному й триплетному станах, але й отримати кутові розподіли диференціальних перерізів утворення синглетних пар  $nn$  (динейтронів) і  $np$  (синглетних дейтронів) та порівняти їх з передбаченнями супермультиплетної потенціальної моделі (СПМ) взаємодії легких кластерів [10, 11]. У роботі [12] різномірні експериментальні дані про подвійні та

потрійні диференціальні перерізи для процесів  $d + {}^3\text{H}({}^3\text{He}) \rightarrow np + {}^3\text{H}({}^3\text{He})$  та  $d + {}^3\text{H} \rightarrow nn + {}^3\text{He}$  [10, 13 - 17] зведено на основі наближення Мігдала - Ватсона до кутових залежностей диференціальних перерізів утворення синглетних нуклон-нуклонних пар при енергіях від 8 до 20 MeV у системі центра мас і виконано їхнє порівняння з перерізами, розрахованими в наближенні супермультиплетної потенціальної моделі [11]. У роботах [10, 13] вимірювалися інклюзивні спектри тритонів та ядер  ${}^3\text{He}$  (Ес.ц.м. = 6,55 і 8,31 MeV), а в [14 - 17] (Ес.ц.м. = 10,2, 13,85, 14,36 MeV) у кінематично повних експериментах отримано спектри  $tr$  й  ${}^3\text{He}p$  збігу.

З іншого боку, на відміну від реакцій  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})nn$  у спектрах тритонів із реакції  ${}^3\text{H}(d, t)np$  може бути істотним внесок від КВР протон-тритон і нейтрон-тритон, якого, очевидно, не може бути у спектрах геліонів. Такі процеси було також ідентифіковано в інклюзивних спектрах протонів [6] і спектрах збігу  $p{}^3\text{He}$  з реакції  ${}^3\text{He}(d, p{}^3\text{He})n$  [18]. У спектрах збігу  $pt$  з реакції  ${}^3\text{H}(d, pt)n$  [19 - 21] та в інклюзивних спектрах протонів [9] було ідентифіковано резонанси  ${}^4\text{H}^*$ , які також можуть давати свій внесок в інклюзивні спектри тритонів.

У цій статті обговорюються диференціальні перерізи реакції  ${}^3\text{H}(d, t)np$  та особливості інклюзивних спектрів тритонів.

#### Методика експерименту й отримані результати

Експериментальні дослідження виконано на пучку дейтронів, прискорених до енергії

© О. О. Белоскіна, В. І. Гранцев, К. К. Кісурін, С. Є. Омельчук, Ю. С. Рознюк, Б. А. Руденко, Л. І. Слюсаренко, Б. Г. Стружко, 2014

36,9 MeV в ізохронному циклотроні Інституту ядерних досліджень НАН України. В експерименті використано тритій-титанову ( ${}^3\text{HTi}$ ) і титанову (Ti) мішені товщиною 4,9 і 7,5 мг/см<sup>2</sup> відповідно, а також мішень з дейтерованого поліетилену (CD<sub>2</sub>) щільністю 6 мг/см<sup>2</sup>, яку було використано для вимірювання енергії пучка та інших контрольних процедур [2]. Для спектрометрії протонів, дейтронів і тритонів використано телескоп типу  $\Delta E - E$  у складі поверхнево бар'єрного кремнієвого детектора  $\Delta E$  товщиною 200 мкм і сцинтилятора Na(Tl) товщиною 25 мм. Інші деталі методики досліджень опубліковано в роботах [1, 2].

На рис. 1 показано двовимірний спектр, отриманий під час опромінення тритій-титанової мішені під кутом 19,6° у лабораторній системі координат (л.с.к.) як залежність кількості продуктів реакції, зареєстрованих детекторами телескопа, від їхніх енергій  $\Delta E$  і  $E$ . Характерною рисою спектра є наявність потужного локусу дейтронів поруч з порівняно малоінтенсивним локусом тритонів, а також піка дейтронів з пружного розсіювання  $dp$  на домішках легкого водню в мішені, що слід враховувати в розрахунках диференціальних перерізів реакції  ${}^3\text{H}(d, t)np$ . Під іншими кутами внесок від цього піка до спектра тритонів неістотний. Одновимірний спектр тритонів («ефект + тло»), отриманий проектуванням верхнього локусу рис. 1 на вісь енергії  $E$  після вилучення внеску пружного розсіювання  $dp$ , та відповідно нормований спектр тритонів з титанової мішені («тло») показано на рис. 2. Тло від продуктів реакцій на титані невелике майже при всіх енергіях, окрім верхнього краю спектра, тому похибки, пов'язані з його відніманням, є незначними.

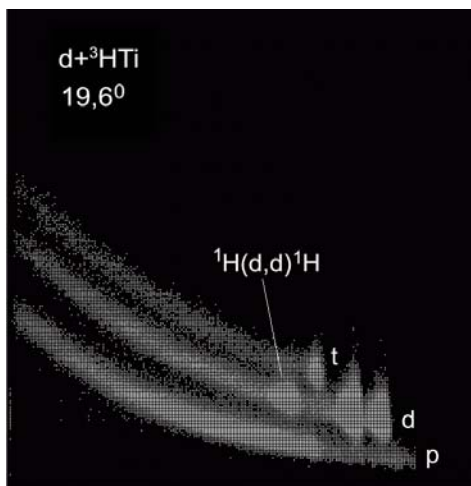


Рис. 1. Двовимірний спектр  $\Delta E - E$ , зареєстрований телескопом заряджених частинок при опроміненні тритій-титанової мішені дейтронами з енергією 36,9 MeV під кутом 19,6°. Символами  $p$ ,  $d$ ,  $t$  помічено локуси протонів, дейтронів та тритонів, а стрілкою – пік дейтронів, пружно розсіяних на домішках легкого водню в мішені.

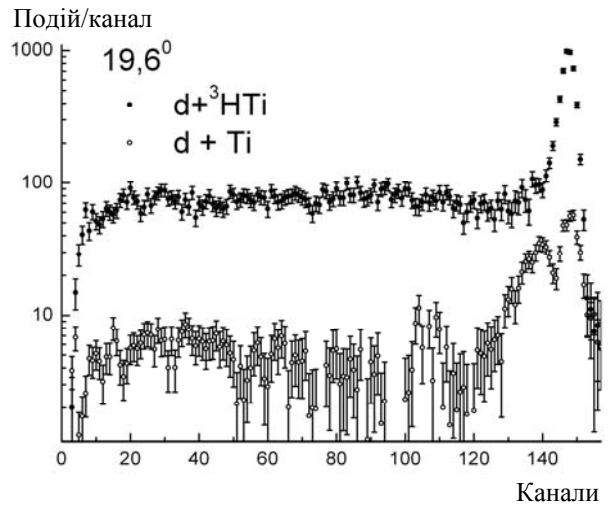


Рис. 2. Проекції локусу тритонів, отримані під кутом 19,6 град з тритій-титанової («ефект + тло») і титанової («тло») мішеней.

Оскільки в досліджуваних спектрах присутні також піки дейтронів, пружно розсіяних ядрами тритію, і відповідно тритонів віддачі, стало можливим одночасно з перерізами реакції  ${}^3\text{H}(d, t)np$  розрахувати й перерізи пружного розсіювання  $dt$  та порівняти їх з опублікованими даними інших авторів. Результати показано на рис. 3 разом із перерізами пружного розсіювання  $d^3\text{He}$  при енергії 34,9 MeV [22] та кутовим розподілом пружного розсіювання  $d^3\text{He}$  при енергії 36,9 MeV, параметризованим поліномами Лежандра

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \frac{\sigma_{tot}}{4\pi} \sum_L d_{00}(L) P_{L,0}(\cos\theta).$$

Значення повного перерізу розсіювання  $\sigma_{tot}$  і коефіцієнти при поліномах обчислювалися інтерполяцією значень, отриманих у роботі [22] при енергіях 34,92 і 39,95 MeV.

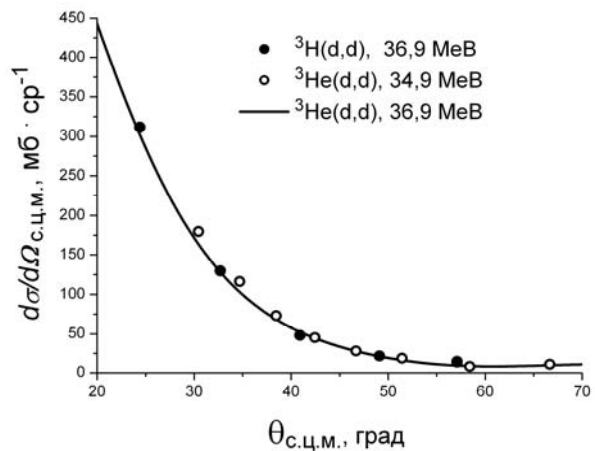


Рис. 3. Кутовий розподіл диференціальних перерізів пружного розсіювання  $dt$  (точки), отриманих при енергії пучка дейтронів 36,9 MeV (лабораторна система),  $d^3\text{He}$  при енергії 34,9 MeV (незаповнені кільця) і  $d^3\text{He}$  при енергії 36,9 MeV (лінія) з роботи [22].

Калібрування спектрів виконано за значеннями енергій  $E$  тритонів віддачі з пружного розсіювання  $dt$ , враховуючи лінійність спектра  $E$  детектора:

$$E - \Delta E_T - \Delta E_{Si} = a_0 + a_1 N, \quad (1)$$

де  $N$  – положення піка у спектрі  $E$  детектора;  $\Delta E_T$  і  $\Delta E_{Si}$  – втрати енергії тритоном відповідно в мішені та  $\Delta E$  детекторі;  $a_0, a_1$  – коефіцієнти, що визначаються наближенням за методом найменших квадратів (детальніше методику описано в роботі [2]).

Експериментальні спектри, трансформовані до лінійної шкали енергій відповідно до співвідношення (1), показано на рис. 4.

### Модельовання інклюзивних спектрів

Модельні спектри (криві 1 - 5 на рис. 4) розраховано методом Монте-Карло з урахуванням умов експерименту: немонохроматичності пучка прискорених дейтронів, товщини мішені, неточної геометрії (розмірів пучка на мішені, розмірів детектора, відстані від мішені до детектора) і роздільної здатності спектрометра.

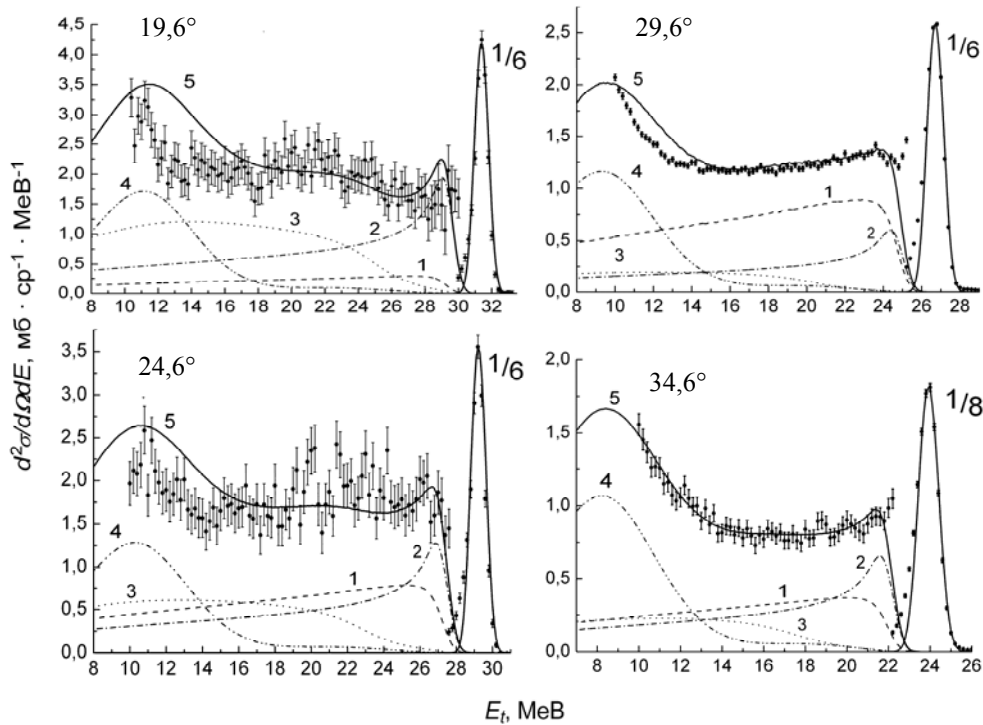


Рис. 4. Інклюзивні спектри тритонів з реакції  ${}^3\text{H}(d, t)$  при енергії пучка дейтронів 36,9 MeV та модельні спектри: 1 - розподіли Ватсона - Мігдала для ВКС триплетних пар  $np$ ; 2 - розподіли Ватсона - Мігдала для ВКС синглетних пар  $np$ ; 3 - внески послідовного розпаду через резонанс  ${}^4\text{H}^*$ ; 4 - внески КВР нуклон-тритон; 5 - сумарні спектри.

У нерелятивістському наближенні переріз тричастинкової реакції  $b + t \rightarrow a_1 + a_2 + a_3$  має вигляд [2]

$$\frac{d\sigma(E_1, \theta_1)}{dE_1 d\Omega_1} = \frac{(2\pi)^4}{v_0} \rho_1(E_1) \iint |T_{fi}(\vec{p}_1, \vec{P}_0 - \vec{p}_1, \epsilon_{2-3}, \theta_{2-3}, \phi_{2-3})|^2 d\Omega_{2-3}, \quad (2)$$

де

$$\rho_1(E_1) = 2 \sqrt{\left(\frac{m_1 m_2 m_3}{m_2 + m_3}\right)^3} E_1 \epsilon_{2-3},$$

$$\epsilon_{2-3} = E_0 + Q - E_1 - \frac{m_0 E_0 + m_1 E_1 - 2 \cos \theta_1 \sqrt{m_0 E_0 m_1 E_1}}{m_2 + m_3},$$

$\rho_1$  – множник фазового простору [23];  $v_0$  – відносна швидкість частинок  $b$  і  $t$ ;  $P_0$  і  $E_0$  – імпульс і

кінетична енергія частинок пучка;  $Q$  – енергія реакції;  $m_0, m_1, m_2, m_3$  – маса частинок пучка й частинок у вихідному каналі;  $\vec{p}_1$  і  $E_1$  – імпульс і енергія частинки 1 у л.с.к.;  $\epsilon_{2-3}$  – імпульс і енергія відносного руху в підсистемі 2 + 3;  $T_{fi}$  – амплітуда реакції.

Для амплітуди реакції  $T_{fi}$  використано наближення

$$|T_{fi}|^2 = c_0 + |c_1 F_S(k_{23})|^2 + c_2 |F_T(k_{23})|^2 + c_3 |F_R(k_{13})|^2 + c_4 |F_{QF}(k_{12})|^2 + c_5 |F_{QF}(k_{13})|^2, \quad (3)$$

де  $F_S(k)$  і  $F_T(k)$  – амплітуди, що описують ВКС нейтрон-протон відповідно в синглетному й триплетному станах;  $F_R(k)$  – амплітуда послідовного розпаду через резонанс  ${}^4\text{H}^*$ ;  $F_{QF}(k)$  – амплітуда КВР нейтронів і протонів на ядрах тритію;  $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  – вільні параметри.

Амплітуди ВКС обчислюємо в наближенні Ватсона - Мігдала [7, 8]

$$T_{S(T)}(k) \propto \frac{r(k^2 + \alpha^2)}{2(rk^2/2 - 1/a - ik)}, \quad (4)$$

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

з параметрами  $a = a_s = -23,748$  Фм,  $r = r_s = 2,75$  Фм для синглетного стану і  $a = a_t = -5,424$  Фм,  $r = r_t = 1,75$  Фм [24] триплетного відповідно,  $F_R$  – у формі резонансу Брейта - Вігнера

$$F_R(E) \propto \frac{\Gamma/2}{E - E_R + i\Gamma/2}, \quad (5)$$

де  $E = k^2/(2\mu)$  – енергія відносного руху в парі нейтрон-тритон;  $E_R = 2,2$  МеВ – резонансне значення цієї енергії (резонанс  ${}^4\text{H}^*$ );  $\Gamma = 3,4$  МеВ – його ширина [21].

На відміну від інклюзивних спектрів геліонів з реакції  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})nn$ , отриманих у роботі [2], у спектрах тритонів спостерігаємо зростання диференціальних перерізів при малих енергіях, яке може бути обумовлене процесами КВР, імовірно, квазівільним розсіюванням протона і нейтрона, що входять до складу налітаючого на мішень дейтрона, на ядрах тритію, як показано на рис. 5.

маємо

$$|\varphi(k)|^2 = \frac{\alpha\beta(\alpha + \beta)}{\pi^2(\beta - \alpha)^2} \left| \frac{e^{-\alpha R} \left( \frac{\alpha}{k} \sin kR + \cos kR \right)}{\alpha^2 + k^2} - \frac{e^{-\beta R} \left( \frac{\beta}{k} \sin kR + \cos kR \right)}{\beta^2 + k^2} \right|^2,$$

$\hbar^2\alpha^2 = mE_\alpha$ ,  $E_\alpha = 2,2245$  МеВ,  $\hbar^2\beta^2 = mE_\beta$ ,  $E_\beta = 59,8$  МеВ, а радіус обрізування  $R$  в інтегралі для  $\varphi(\vec{k})$  взято рівним 5,0 Фм. Множник  $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\vartheta)$  у розрахунках було наближено константою.

Розраховані таким чином модельні енергетичні розподіли показано на рис. 4 разом з експериментальними перерізами. Слід зауважити, що через присутність потужного піка тритонів віддачі з пружного розсіювання  $dt$  методом найменших квадратів неможливо надійно розділити

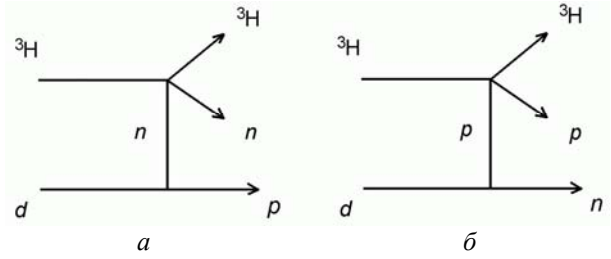


Рис. 5. Квазівільне розсіювання нейтрон-тритон (а) і протон-тритон (б) у реакції  ${}^3\text{H}(d, t)$ .

Тобто один з нуклонів у дейтроні пучка не змінює свого імпульсу в реакції («спостерігач»), а інший взаємодіє з тритоном мішені і може бути розсіяним при енергії  $\frac{E_0}{2} - Q$ .

Амплітуди КВР розраховували за формулою [18]

$$|F_{QF}|^2 = |\varphi(k)|^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}(\vartheta), \quad (6)$$

де  $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\vartheta)$  – переріз пружного розсіювання  $nt$  для діаграми (а) і  $pt$  для діаграми (б);  $\varphi(k)$  – Фур'є-образ хвильової функції дейтрона

$$\varphi(k) = (2\pi)^{-3/2} \int_R \varphi(\vec{r}) e^{-ik\vec{r}} d\vec{r},$$

$R$  – радіус обрізування. При  $R = 0$  маємо так зване просте імпульсне наближення, при  $R > 0$  – модифіковане імпульсне наближення.

З хвильовою функцією дейтрона, обраною у формі функції Гульєна [25]

$$\varphi(r) = \sqrt{\frac{\alpha\beta(\alpha + \beta)}{2\pi(\beta - \alpha)^2}} \frac{\exp(-\alpha r) - \exp(-\beta r)}{r}, \quad (7)$$

ефекти ВКС синглетних і триплетних пар  $np$  на верхній границі інклюзивного спектра, тому диференціальні перерізи ВКС  $np$  у стані  ${}^1S_0$  було взято рівними половині відповідних значень ВКС  $nn$ , визначених у роботі [2], як це передбачено моделлю СПМ і було підтверджено в експерименті [9, 10].

### Висновки

Отримані в експерименті диференціальні перерізи реакції  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{H})np$  доповнюють експе-

риментальні дані, отримані нами раніше для реакцій  ${}^3\text{H}(d, p)$ ,  ${}^3\text{H}(d, d)$ ,  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})$  та пружного розсіювання  $dt$  при енергії 36,9 МеВ. Структуру спектрів ядер тритію вдалося відтворити, моделюючи в реакції  ${}^3\text{H}(d, t)np$  процеси взаємодії нейтрона і протона в кінцевому стані, послідовний розпад через резонанс  ${}^4\text{H}^*$  та квазівільне розсіювання на ядрах тритію протона і нейтрона, що входять до складу налітаючого на мі-

шень дейтрона, при цьому диференціальні перерізи утворення синглетних дейтронів були взяті рівними половині відповідних значень для динейтронів. У такому наближенні отримано якісне погодження розрахованих спектрів з експериментальними, однак для надійної оцінки перерізів КВР  $pt$  і  $nt$  потрібні експериментальні дані з нижчим порогом реєстрації тритонів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Белюскіна О.О., Бердниченко С.В., Гранцев В.І та ін. Дослідження ядерних реакцій у системі  $D + T$  // Ядерна фізика та енергетика. - 2007. - № 3 (21). - С. 54 - 60.
2. Белюскіна О.О., Гранцев В.І., Лебедев В.М. та ін. Перерізи реакції  ${}^3\text{H}(d, {}^3\text{He})np$  при енергії пучка дейтронів 37 МеВ // Ядерна фізика та енергетика. - 2008. - № 3 (25). - С. 53 - 61.
3. Белюскіна О.О., Гранцев В.І., Давидовський В.В. и др. Elastic deuteron-triton scattering at 37 MeV // ВАНТ. - 2009. - № 5 (63). - С. 17 - 22; Белюскіна О.О., Гранцев В.І., Давидовський В.В. та ін. Пружне розсіювання дейтронів на тритонах // УФЖ. - 2009. - Т. 54. - С. 658 - 668.
4. Белюскіна О.О., Гранцев В.І., Давидовський В.В. та ін. Two-particle break-up of triton by incident deuteron with energy of 37 MeV // Ядерна фізика та енергетика. - 2010. - Т. 11, № 3. - С. 262 - 267.
5. Белюскіна О.О., Гранцев В.І., Тартаковський В. К. и др. Реакции  $T(d, p)tn$  при энергии дейтронов 37 МэВ // Изв. РАН. - 2010. - Т. 74, № 6. - С. 798 - 802.
6. Белюскіна О.О., Гранцев В.І., Тартаковський В.К. и др. Развал дейтронов на тритонах // Ядерная физика. - 2012. - Т. 75, № 12. - С. 1532 - 1543; Beliuskina O. O., Grantsev V. I., Tartakovsky V. K. et al. Breakup of Deuterons on Tritons // Physics of Atomic Nuclei. - 2012. - Vol. 75, No. 12. - P. 1454 - 1465.
7. Watson K.M. The effect of final state interactions on reaction cross section // Phys. Rev. - 1952. - Vol. 88. - P. 1163 - 1170.
8. Мигдал А.Б. Теория ядерных реакций с образованием медленных частиц // ЖЭТФ. - 1955. - Т. 28. - С. 3 - 10.
9. Конфедератенко В.І., Лацонов Б.В., Поворозник О.М., Стружко Б.Г. Пружне розсіювання й інклюзивні спектри реакції  $d+t$  при енергії пучка 13,85 МеВ // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 1999. - С. 89 - 91.
10. Стружко Б.Г. Інклюзивні спектри ядер  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$  та кутові розподіли динуклонів з реакції  $d + t$  при енергії пучка 13,85 МеВ // Укр. фіз. журн. - 2000. - Т. 45, № 10. - С. 1154 - 1158; Стружко Б.Г. Угловые распределения нуклонных пар в реакции  $d + t$  при энергии дейтронов 13,85 МэВ // Изв. РАН. - 2000. - Т. 64, № 3. - С. 466 - 470.
11. Neudachin V.G., Sakharuk A.A., Smirnov Yu.F. Generalized potential description of the interaction of very light cluster: scattering and photonuclear reactions // Fiz. Elem. Chastits At. Yadra. - 1992. - Vol. 23. - С. 479 - 541.
12. Лебедев В.М., Неудачин В.Г., Стружко Б.Г. Реакции с опрокидыванием спин-изоспина дейтрона и супермультиплетная потенциальная модель взаимодействия легчайших кластеров // ЯФ. - 2002. - Т. 65, № 3. - С. 489 - 504; Lebedev V.M., Neudatchin V.G., Struzhko B.G. // Physics of Atomic Nuclei. - 2002. - Vol. 65, No. 3. - С. 462 - 477.
13. Larson H.T., Bacher A.D., Nagatani K., Tombrello T.A. Neutron-neutron effective range parameters from the  ${}^3\text{H}({}^2\text{H}, {}^3\text{He})2n$  and  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, {}^3\text{H})^2p$  reaction // Nucl. Phys. A. - 1970. - Vol. 149. - P. 161 - 196.
14. Ayer Z., Darden S.E., Sen S., Warner R.E. Spin polarization effects in the  ${}^3\text{He}(d, {}^3\text{He})p$  and the  ${}^3\text{He}(d, t)p$  reactions at  $E_d = 17$  MeV // Nucl. Phys. A. - 1993. - Vol. 562. - P. 1 - 31.
15. Darden S.E., Karban O., Blyth C. et al. The  ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, {}^3\text{He})p$  reaction with 33-MeV polarized  ${}^3\text{He}$  ions. // Nucl. Phys. A. - 1988. - Vol. 486(2) - P. 285 - 305.
16. Bruno M., Cannata F., D'Agostino M. et al.  ${}^3\text{He}$ -induced  $d^*$  production. // Journal of Physics. G. - 1988. - Vol. 14(11) - P. L235 - L238.
17. Warner R.E., Ruyle R.L., Davies W.G. et al. Initial-state distortion and final-state interactions in the  ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, {}^3\text{He})p$  and  ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, {}^3\text{H})p$  reactions // Nucl. Phys. A. - Vol. 255. - P. 95 - 108.
18. Šlaus Ivo, Allas R.G., Beach L.A. et al. Quasifree processes in the  ${}^2\text{H}+{}^3\text{He}$  interaction // Nucl. Phys. A. - 1977. - Vol. 286 - P. 67 - 88.
19. Гранцев В.І., Зарицький В.С., Конфедератенко В.І. и др. Исследование резонансов  ${}^4\text{H}$  в реакции  $d + t$  // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1989. - Т. 53. - С. 175 - 177.
20. Blagus S., Miljanic D., Zadro M., Calvi G. et al.  ${}^4\text{H}$  nucleus and the  ${}^2\text{H}(t, tp)n$  reaction // Phys. Rev. C. - 1991. - Vol. 44(1) - P. 325 - 328.
21. Конфедератенко В.І., Поворозник О.М., Стружко Б.Г. Дослідження 3-частинкових каналів реакції  $d + t$  при енергії пучка  $E_d = 47,3$  МеВ // УФЖ. - 1994. - Т. 39, № 4. - С. 393 - 397; Конфедератенко В. І., Поворозник О.М., Стружко Б.Г. Трехчастичные каналы реакции  $d + t$  при 47,3 МэВ // Изв. РАН. Сер. физ. - 1994. - Т. 1. - С. 173 - 177.
22. 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.
23. 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.
24. Machleidt R. The meson theory of nuclear forces and

nuclear structure // Advances in nuclear physics. - 1989. - Vol. 19. - P. 189 - 376.  
25. Хюльтен Л., Сугавара М. Проблема взаимодейст-

вия двух нуклонов // Строение атомного ядра. - М.: Иностр. л-ра, 1959. - С. 9 - 165.

**О. О. Белюскина, В. И. Гранцев, К. К. Кисурич, С. Е. Омельчук, Ю. С. Рознюк,  
Б. А. Руденко, Л. И. Слюсаренко, Б. Г. Стружко**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

### СЕЧЕНИЕ РЕАКЦИИ ${}^3\text{H}(d, t)np$ ПРИ ЭНЕРГИИ ПУЧКА ДЕЙТРОНОВ 37 МэВ

В экспериментальных исследованиях, выполнявшихся с дейтронами, ускоренными до энергии 36,9 МэВ, получены инклюзивные спектры и дифференциальные сечения  $\frac{d\sigma(\vartheta, E)}{d\Omega dE}$  реакции  ${}^3\text{H}(d, t)$ . Спектры моделированы, учитывая простые квазибинарные механизмы и характеристики экспериментальной методики: немонохроматичность пучка дейтронов, разрешающую способность спектрометра, неточечную геометрию и толщину мишени. Сравнение экспериментальных и моделируемых спектров свидетельствует, что доминирующими процессами в реакции  ${}^3\text{H}(d, t)$  является взаимодействие в конечном состоянии нейтрона и протона как в синглетном, так и в триплетном состояниях, квазисвободное рассеяние нейтронов и протонов, входящих в состав дейтрона, на ядрах трития и последовательный распад через резонанс  ${}^4\text{H}^*$  ( $E_{\text{нт}} = 2,2$  МэВ,  $\Gamma = 3,4$  МэВ).

*Ключевые слова:* дейтрон, 37 МэВ, тритон, дифференциальные сечения, моделирование.

**O. O. Beljuskina, V. I. Grantsev, K. K. Kisurich, S. E. Omelchuk, J. S. Roznjuk,  
B. A. Rudenko, L. I. Sljusarenko, B. G. Struzhko**

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

### CROSS SECTIONS OF THE ${}^3\text{H}(d, t)np$ REACTION AT THE 37 MeV DEUTERON BEAM ENERGY

Inclusive  ${}^3\text{H}$  spectra and  $\frac{d\sigma(\vartheta, E)}{d\Omega dE}$  differential cross sections of the  ${}^3\text{H}(d, t)$  reaction are measured at the deuteron beam energy of 36,9 MeV. Shapes of the inclusive  ${}^3\text{H}$  spectra were reproduced by using a model that takes into account simple quasi-binary mechanisms and characteristics of the experimental method, i.e., nonmonochromaticity of the accelerated deuteron beam, target thickness, spectrometer energy resolution, beam spot size on the target, detector apertures, and target–detector distance. It is found that the most important processes in the  ${}^3\text{H}(d, t)$  reaction are the proton-neutron Final State Interactions in the singlet  ${}^1\text{S}_0$  state (singlet deuteron) and in the triplet  ${}^3\text{S}_1$  one, sequential decay via the  ${}^4\text{H}^*$  resonance ( $E_{\text{нт}} = 2,2$  MeV,  $\Gamma = 3,4$  MeV) and the proton (neutron) - triton quasifree scattering processes.

*Keywords:* deuteron, 37 MeV, triton, differential cross sections, simulation.

#### REFERENCES

1. Belyuskina O.O., Berdnichenko S.V., Grantsev V.I et al. // Nucl. Phys. At. Energy. - 2007. - No. 3 (21). - P. 54 - 60. (Ukr)
2. Belyuskina O.O., Grantsev V.I., Lyebedyev V.M. et al. // Nucl. Phys. At. Energy. - 2008. - No. 3 (25). - P. 53 - 61. (Ukr)
3. Belyuskina O.O., Grantsev V.I., Davidovskij V.V. et al. Elastic deuteron-triton scattering at 37 MeV // VANT. - 2009. - No. 5 (63). - P. 17 - 22; Belyuskina O.O., Grantsev V.I., Davidovskij V.V. et al. // UFZh. - 2009. - Vol. 54. - P. 658 - 668. (Ukr)
4. Belyuskina O.O., Grantsev V.I., Davidovskij V.V. et al. Two-particle break-up of triton by incident deuteron with energy of 37 MeV // Nucl. Phys. At. Energy. - 2010. - Vol. 11, No. 3. - P. 262 - 267.
5. Belyuskina O.O., Grantsev V.I., Tartakovskij V.K. et al. // Izv. RAN. - 2010. - Vol. 74, No. 6. - P. 798 - 802. (Rus)
6. Belyuskina O.O., Grantsev V.I., Tartakovskij V.K. et al. // Yadernaya fizika. - 2012. - Vol. 75, No. 12. - P. 1532 - 1543 (Rus); Belyuskina O. O., Grantsev V. I., Tartakovskij V. K. et al. Breakup of Deuterons on Tritons // Physics of Atomic Nuclei. - 2012. - Vol. 75, No. 12. - P. 1454 - 1465.
7. Watson K.M. The effect of final state interactions on reaction cross section // Phys. Rev. - 1952. - Vol. 88. - P. 1163 - 1170.
8. Migdal A.B. // ZhETF. - 1955. - Vol. 28. - P. 3 - 10. (Rus)
9. Konfederatenko V.I., Lashchonov B.V., Povoroznik O.M., Struzhko B.G. // Zb. nauk. prats' In-tu yadernykh dosl. - 1999. - P. 89 - 91. (Ukr)
10. Struzhko B.G. // Ukr. fiz. zhurn. - 2000. - Vol. 45, No. 10. - P. 1154 - 1158; Struzhko B.G. // Izv. RAN. - 2000. - Vol. 64, No. 3. - P. 466 - 470. (Ukr)
11. Neudachin V.G., Sakharuk A.A., Smirnov Yu.F. Generalized potential description of the interaction of very light cluster: scattering and photonuclear reactions // Fiz. Elem. Chastits At. Yadra. - 1992. - Vol. 23. - C. 479 - 541.
12. Lebedev V.M., Neudachin V.G., Struzhko B.G. // Yadernaya fizika. - 2002. - Vol. 65, No. 3. - P. 489 - 504 (Rus); Lebedev V.M., Neudachin V.G., Struzhko B.G. // Physics of Atomic Nuclei. - 2002. - Vol. 65, No. 3. - C. 462 - 477.



13. *Larson H.T., Bacher A.D., Nagatani K., Tombrello T.A.* Neutron-neutron effective range parameters from the  ${}^3\text{H}({}^2\text{H}, {}^3\text{He})2\text{n}$  and  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, {}^3\text{H})^2\text{p}$  reaction // *Nucl. Phys. A.* - 1970. - Vol. 149. - P. 161 - 196.
14. *Ayer Z., Darden S.E., Sen S., Warner R.E.* Spin polarization effects in the  ${}^3\text{He}(\text{d}, {}^3\text{He})\text{p}$ n and the  ${}^3\text{He}(\text{d}, \text{t})\text{p}$  reactions at  $E_{\text{d}} = 17$  MeV // *Nucl. Phys. A.* - 1993. - Vol. 562. - P. 1 - 31.
15. *Darden S.E., Karban O., Blyth C. et al.* The  ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, {}^3\text{He})\text{p}$ n reaction with 33-MeV polarized  ${}^3\text{He}$  ions. // *Nucl. Phys. A.* - 1988. - Vol. 486(2) - P. 285 - 305.
16. *Bruno M., Cannata F., D'Agostino M. et al.*  ${}^3\text{He}$ -induced  $d^*$  production. // *Journal of Physics. G.* - 1988. - Vol. 14(11) - P. L235 - L238.
17. *Warner R.E., Ruyle R.L., Davies W.G. et al.* Initial-state distortion and final-state interactions in the  ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, {}^3\text{He})\text{p}$ n and  ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, {}^3\text{H})\text{p}$  reactions // *Nucl. Phys. A.* - Vol. 255. - P. 95 - 108.
18. *Šlaus Ivo, Allas R.G., Beach L.A. et al.* Quasifree processes in the  ${}^2\text{H} + {}^3\text{He}$  interaction // *Nucl. Phys. A.* - 1977. - Vol. 286 - P. 67 - 88.
19. *Grantsev V.I., Zaritskij V.S., Konfederatenko V.I. et al.* // *Izv. AN SSSR. Ser. fiz.* - 1989. - Vol. 53. - P. 175 - 177. (Rus)
20. *Blagus S., Miljanic D., Zadro M., Calvi G. et al.*  ${}^4\text{H}$  nucleus and the  ${}^2\text{H}(\text{t},\text{tp})\text{n}$  reaction // *Phys. Rev. C.* - 1991. - Vol. 44(1) - P. 325 - 328.
21. *Konfederatenko V.I., Povoroznyk O.M., Struzhko B.G.* // *UFZh.* - 1994. - Vol. 39, No. 4. - P. 393 - 397 (Ukr); *Konfederatenko V.I., Povoroznyk O.M., Struzhko B.G.* // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 1994. - Vol. 1. - P. 173 - 177. (Ukr)
22. *Roy R., Seiler F., Conzett H.E., Rad F.N.* Cross section and vector analyzing power  $T_{11}$  of the process  ${}^3\text{He}(\text{d}, \text{d})^3\text{He}(\text{d}, \text{p})^4\text{He}$  between 15 and 40 MeV // *Phys. Rev.* - 1981. - Vol. C24. - P. 2421 - 2433.
23. *Ohlsen G.G.* Kinematic relations in reactions of the form  $\text{A} + \text{B} \rightarrow \text{C} + \text{D} + \text{E}$  // *Nucl. Instr. Meth.* - 1965. - Vol. 37. - P. 240 - 248.
24. *Machleidt R.* The meson theory of nuclear forces and nuclear structure // *Advances in nuclear physics.* - 1989. - Vol. 19. - P. 189 - 376.
25. *Khyul'ten L., Sugavara M.* The problem of two nucleons interaction // *The structure of the atomic nucleus.* - Moskva: Inostr. literatura, 1959. - P. 9 - 165. (Rus)

Надійшла 25.07.2014  
Received 25.07.2014