

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 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 ${}^3\text{He}$ р 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/см² відповідно, а також мішень з дейтерованого поліетилену (CD₂) щільністю 6 мг/см², 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 ΔE 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 ΔE 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.

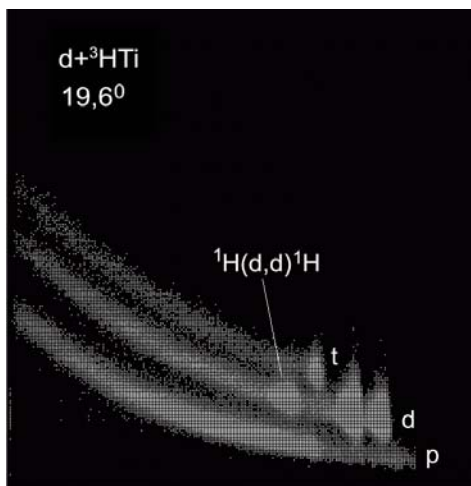


Рис. 1. Двовимірний спектр $\Delta E - E$, зареєстрований телескопом заряджених частинок при опроміненні тритій-титанової мішені дейтронами з енергією 36,9 MeV під кутом 19,6°. Символами p , d , t помічено локуси протонів, дейтронів та тритонів, а стрілкою – пік дейтронів, пружно розсіяних на домішках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

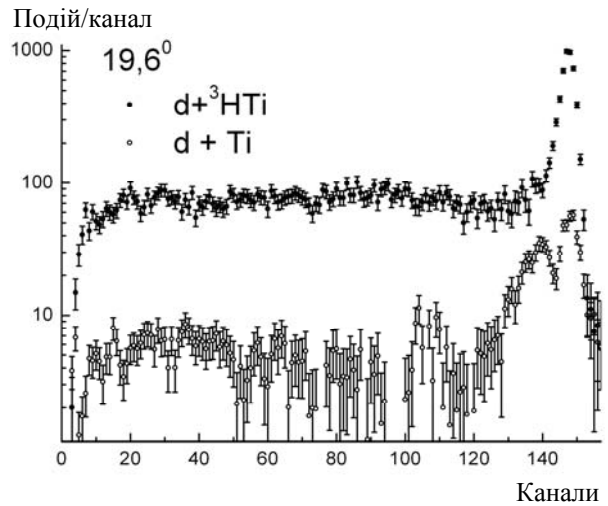


Рис. 2. Проекції локусу тритонів, отримані під кутом 19,6 град з тритій-титанової («ефект + тло») і титанової («тло») мішеней.

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 σ_{tot} і коефіцієнти при поліномах обчислювалися інтерполяцією значень, отриманих у роботі [22] при енергіях 34,92 і 39,95 MeV.

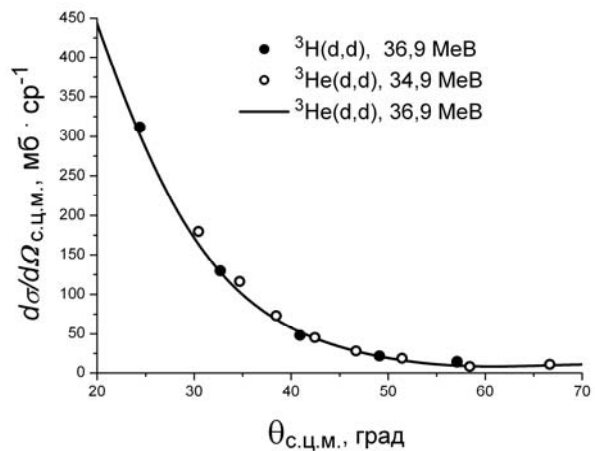


Рис. 3. Кутовий розподіл диференціальних перерізів пружного розсіювання dt (точки), отриманих при енергії пучка дейтронів 36,9 MeV (лабораторна система), $d^3\text{He}$ при енергії 34,9 MeV (незаповнені кільця) і $d^3\text{He}$ при енергії 36,9 MeV (лінія) з роботи [22].

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; ΔE_T і ΔE_{Si} – втрати енергії тритоном відповідно в мішені та ΔE 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.

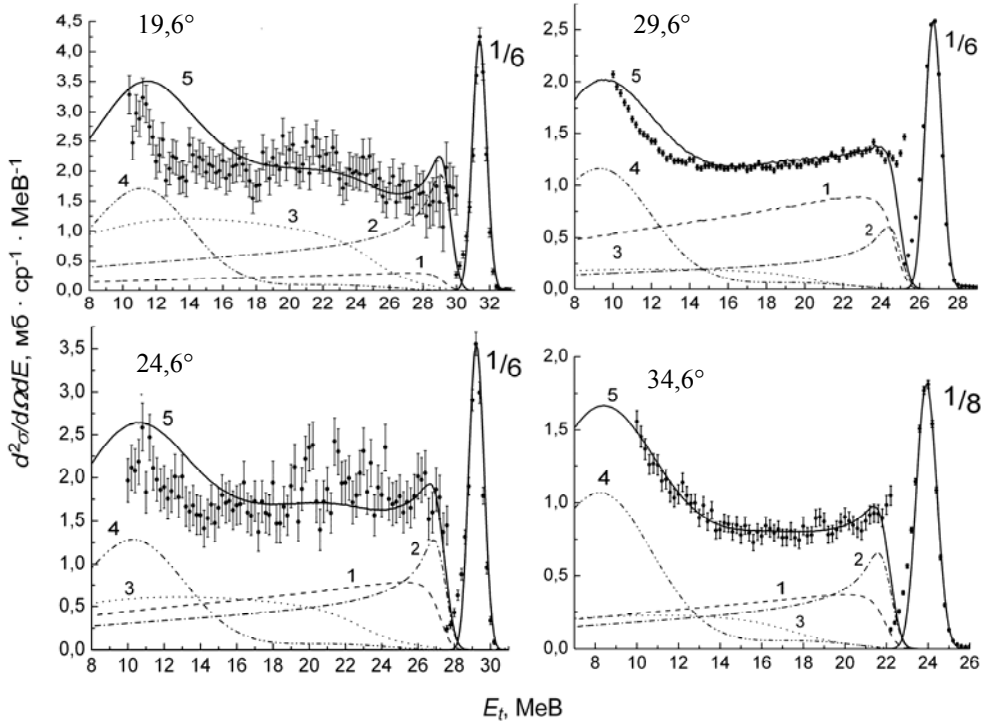


Рис. 4. Інклюзивні спектри тритонів з реакції ${}^3\text{H}(d, t)$ при енергії пучка дейтронів 36,9 MeV та модельні спектри: 1 - розподіли Ватсона - Мігдала для ВКС триплетних пар np ; 2 - розподіли Ватсона - Мігдала для ВКС синглетних пар np ; 3 - внески послідовного розпаду через резонанс ${}^4\text{H}^*$;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

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

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

ρ_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.; ϵ_{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

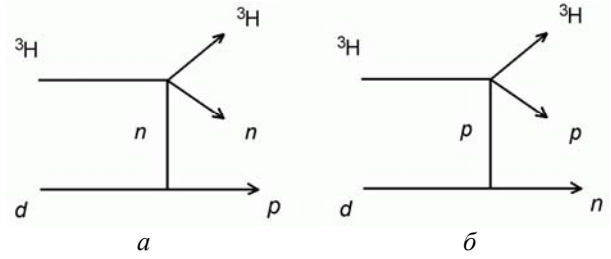


Рис. 5. Квазівільне розсіювання нейтрон-тритон (а) і протон-тритон (б) у реакції ${}^3\text{H}(d, t)$.

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.

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

25. Хюльтен Л., Сугавара М. Проблема взаимодейст-

**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 $^3\text{He}(d, ^3\text{He} p)\text{n}$ and the $^3\text{He}(d, t p)\text{p}$ 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 $^2\text{H}(^3\text{He}, ^3\text{He} p)\text{n}$ reaction with 33-MeV polarized ^3He ions. // *Nucl. Phys. A.* - 1988. - Vol. 486(2) - P. 285 - 305.
16. *Bruno M., Cannata F., D'Agostino M. et al.* ^3He -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 $^2\text{H}(^3\text{He}, ^3\text{He} p)\text{n}$ and $^2\text{H}(^3\text{He}, ^3\text{H} p)\text{p}$ 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.* ^4H nucleus and the $^2\text{H}(t, \text{tp})\text{n}$ 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 $^3\text{He}(d, d)^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$ 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. *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