

О. О. Белюскіна, 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

ЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗПОДІЛИ ПРОТОНІВ У $D(d, p)$ РЕАКЦІЇ

На прискорювачі У-240 ІЯД НАН України при енергії дейтронів $E_d = 36,9$ МеВ отримано інклюзивні спектри протонів із реакції $D(d, p)$ для вивчення енергетичного розподілу протонів у континуумі. Теоретичний аналіз проведено за спрощеною мікроскопічною дифракційною теорією, розробленою В. К. Тартаковським для тричастинкових реакцій розщеплення, та за моделями, що враховують механізми взаємодії в кінцевому стані пар «нейтрон - протон» у синглетному й триплетному спінових станах. Виявлено, що на кутах вильоту протонів $\theta_p \sim 15^\circ$ процеси дифракційного розщеплення та процеси взаємодії в кінцевому стані практично рівноймовірні. Зі збільшенням кута вильоту протонів переважає процес дифракційного розщеплення дейтрона пучка. Теоретичні розподіли, що враховують дифракційне розщеплення та взаємодію в кінцевому каналі реакції, задовільно узгоджуються з експериментальними.

Ключові слова: дейтрон, $d + d$ -реакція, енергетичні спектри, мікроскопічна дифракційна модель, розщеплення, взаємодія в кінцевому стані.

Вивченню процесів, що відбуваються при взаємодії двох дейтронів, присвячено немало робіт. В основному досліджувалися бінарні процеси та кореляції між продуктами тричастинкових реакцій. Чотиричастинкові реакції $D(d, d^*)d^*$ і $D(d, 2p)2n$ вивчалися в поодиноких роботах. Однак важливу інформацію про процеси взаємодії дейтронів можна отримати з інклюзивних спектрів, вимірюванню яких присвячені одиничні роботи. Коротко зупинимося на роботах, в яких експериментально досліджувалися інклюзивні спектри продуктів розщеплення дейтронів при їхньому зіткненні.

Інклюзивний спектр нейтронів із реакції $D(d, n)$ під кутом $\theta_n = 0^\circ$ досліджено при енергії дейтронів $E_d = 18,6$ МеВ [1]. Енергетичний спектр являє собою широкий, практично симетричний максимум з невеликим зсувом піка максимуму в бік високих енергій. Намагання описати спектр за допомогою множника фазового простору для тричастинкової реакції з використанням нульового кутового моменту не привело до задовільного узгодження з експериментом. Автори вказують на необхідність формування пари частинок із ненульовим кутовим моментом у кінцевому стані.

У широкому діапазоні кутів спектри нейтронів із реакції $D(d, n)$ досліджувалися при енергіях $E_d = 10$ МеВ [2] та $11,3$ МеВ [3]. Знайдено, що інтенсивність максимумів швидко зменшується зі збільшенням кута вильоту нейтрона. Для кутів $\theta_n > 30^\circ$ змінюється також форма спектра: максимуми згладжуються та зникають. Автори

відзначають, що форму нейтронного спектра можна пояснити, якщо враховувати утворення пари частинок у станах із ненульовим кутовим моментом.

Інклюзивні спектри протонів із реакції $D(d, p)$ отримано при енергії $E_d = 25,3$ МеВ у роботі [4]. Спектри протонів вимірювалися в діапазоні кутів $\theta_p = 7 - 50^\circ$ для 37 різних лабораторних кутів. Енергетичні розподіли протонів подібні до енергетичних розподілів нейтронів, отриманих при $E_d = 10 - 18,6$ МеВ у роботах [1 - 3]. Зі збільшенням кута вильоту протона спектри стають усе більш пологими, як і спектри нейтронів. Кутові розподіли, отримані шляхом інтегрування спектрів, указують на швидке зростання перерізів під малими кутами. Теоретичний аналіз спектра проведено для кута $\theta_p = 20^\circ$ за допомогою фактора фазового простору для три- та чотиричастинкових реакцій з $l = 0$ та комбінації $l = 0$ і $l = 1$. Отримано задовільне узгодження з експериментальними даними.

Дослідження енергетичних спектрів протонів та дейтронів, що утворюються при зіткненні двох дейтронів при $E_d = 60$ МеВ, проведено в роботі [5]. Розподіли протонів та дейтронів отримано в широкому енергетичному діапазоні. Спостерігається різке збільшення перерізів під малими кутами як для спектрів протонів, так і для дейтронів. Однак форма спектрів протонів і дейтронів істотно відрізняється. Спектри протонів майже симетричні відносно центра максимуму. Спектри дейтронів, навпаки, асиметричні, максимум перерізу зсувається в бік високих

енергій, а з боку низьких енергій спостерігається плавне зменшення перерізу. Значення перерізів у максимумах, що відповідають спектрам дейтронів, швидко зменшуються з ростом кута. Максимуми практично щезають на кутах $\theta > 30^\circ$. Автори наводять кутові залежності перерізів у максимумах для протонів та дейтронів. Теоретичний аналіз проведено з використанням чотиричастинкової моделі, яка виявилася придатною для описування кутових розподілів, але задовільного описування спектрів не досягнуто.

Енергетичні розподіли дейтронів із реакції $d + D \rightarrow p + n + d$ при $E_d = 36,9$ MeV досліджено експериментально та теоретично в наших роботах [6, 7]. Теоретичний аналіз проведено за мікроскопічною дифракційною моделлю з використанням простих виразів для внутрішніх хвильових функцій та за наближеннями, що враховують інші квазібінарні механізми. Отримано задовільне узгодження теоретичних розрахунків з експериментом.

Ця робота є продовженням дослідження процесів розщеплення дейтронів при їхньому зіткненні. Отримані експериментальні енергетичні розподіли протонів із реакції $D(d, p)$ досліджу-

ються теоретично з метою визначення ролі різних механізмів у формування енергетичного розподілу протонів у континуумі. Аналіз проведено за розробленою В. К. Тартаковським спрощеною мікроскопічною дифракційною моделлю (формалізм якої публікується вперше), що дозволяє кількісно розрахувати перерізи квазівільного розсіювання, а також за моделями, що враховують механізми взаємодії в кінцевому стані пар «нейтрон - протон» у синглетному та триплетному спінових станах.

Експериментальні результати

Вимірювання інклюзивних спектрів протонів проведено на прискорювачі У-240 при енергії дейтронів $E_d = 36,9$ MeV на мішенях CD_2 (дейтерований поліетилен) і ^{12}C (плівка вуглецю) під кутами $\theta_p = 15, 20, 25$ та 30° в енергетичному діапазоні $5 \leq E_p \leq 40$ MeV. Рис. 1 ілюструє отримані результати. Статистична похибка вимірювання 1 - 3%. Експериментальну установку та методику проведення вимірювань було опубліковано раніше в роботах [8, 9].

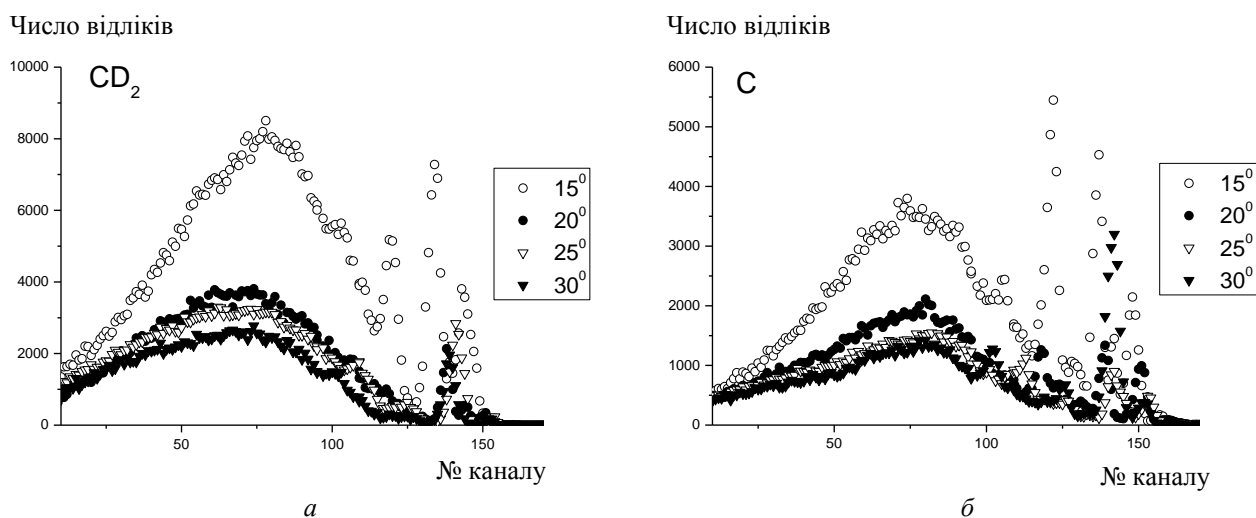


Рис. 1. Інклюзивні спектри протонів на мішенях CD_2 (а) та C (б) при енергії дейтронів $E_d = 36,9$ MeV під кутами $\theta_p = 15, 20, 25$ і 30° .

Інклюзивні спектри протонів із реакції $D(d, p)$ визначалися шляхом віднімання зі спектра, отриманого на мішені CD_2 , спектра на мішені вуглецю. Енергетичні розподіли протонів у лабораторній системі (л.с.) показано на рис. 2. Вони являють собою широкі, практично симетричні максимуми, що лежать осторонь від піків бінарних реакцій, положення яких указано на горизонтальних стрілках.

Отримані нами спектри протонів із реакції $D(d, p)$ подібні за формою до спектрів, наведених раніше в роботах при енергіях $E_d = 25,3$ MeV [4] та $E_d = 60$ MeV [5], а також до спектрів нейтронів

із реакції $D(d, n)$, що вимірювалися при енергіях $E_d = 10$ [2], $11,3$ [3] і $18,6$ MeV [1].

Аналіз, проведений у моделі квазівільного розсіювання для тричастинкової реакції в імпульсному наближенні, дає змогу визначити положення максимумів перерізів, що відповідають розщепленню дейтрона мішені та дейтрона пучка, які позначено на рис. 2 вертикальними стрілками з позначками 1 та 2 відповідно. Проведено порівняння з результатами наших розрахунків за мікроскопічною дифракційною моделлю розщеплення дейтронів у тричастинкових реакціях $d + D \rightarrow p + n + d$, формалізм якої викладено нижче.

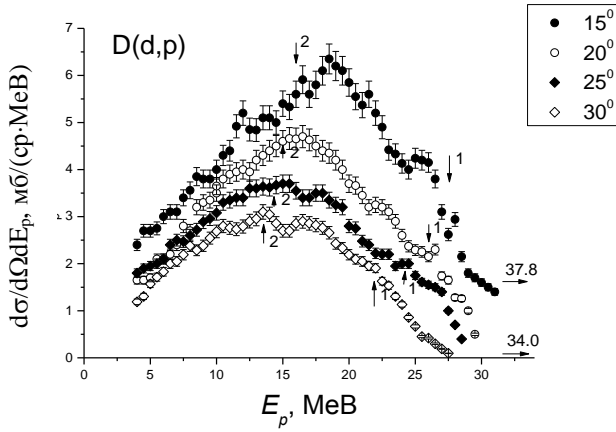


Рис. 2. Енергетичні розподіли протонів із реакції $D(d, p)$ при енергії $E_d = 36,9$ МеВ під кутами $\theta_p = 15, 20, 25$ і 30° . Вертикальні стрілки вказують енергію протонів, що відповідає максимумам перерізів, розрахованих у моделі квазівільного розсіювання для тричастинкової реакції: \uparrow^1 – розщеплення дейтрона мішені і \uparrow^2 – розщеплення дейтрона пучка. На горизонтальних стрілках вказано енергії протонів із бінарної $D(d, p)$ реакції для кутів $\theta_p = 15^\circ$ і $\theta_p = 30^\circ$.

Мікроскопічна дифракційна модель

Формалізм дифракційної моделі процесів розщеплення в малонуклонних системах (у тому числі й для системи $d + D$) було розроблено В. К. Тартаковським [10 - 15]. У цій роботі ми використовуємо мікроскопічну дифракційну ядерну модель для аналізу енергетичного розподілу протонів, отриманих у реакції $D(d, p)nd$ при енергії дейтронів $E_d = 36,9$ МеВ.

Зіткнення ядер у л.с. розглядається, виходячи спочатку із взаємодії кожного з нуклонів дейтрона пучка з кожним із дейтронів мішені з використанням нуклон-нуклонних профільних функцій гауссівського типу:

$$\omega_{ij} = a \exp(-b^2 \bar{\rho}_{ij}^2), \quad (1)$$

де $\bar{\rho}_{ij}$ – перпендикулярна до імпульсу падаючого дейтрона \vec{k}_d складова вектора $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$, \vec{r}_i і \vec{r}_j – радіуси-вектори i -го та j -го нуклонів взаємодіючих дейтронів. Значення параметрів a і b бралися близькими до значень у роботах [11, 13, 14] та наведені в тексті.

Усі наступні розрахунки виконано в системі одиниць $\hbar = c = 1$.

Розщеплення дейтрона мішені

Розглянемо процес $d + D \rightarrow p + n + d'$, в якому d' – розсіяний дейтрон пучка. Енергетичний розподіл протонів у дифракційному наближенні в л.с. можна записати в такому вигляді [10 - 12, 16]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_p dE_p} = \frac{M \sqrt{E_d E_p}}{8\sqrt{2}\pi^5} \int_0^{\infty \rightarrow 100\lambda} dk k^2 \int_0^\pi d\theta \sin\theta \int_0^\pi d\phi |A^M(\vec{q}, \vec{u})|^2 \delta_\Delta(E), \quad (2)$$

де λ – структурний параметр дейтронної хвильової функції, $\lambda = 0,267$ фм $^{-1}$; $A^M(\vec{q}, \vec{u})$ – амплітуда процесу; M – маса протона; E_d – енергія дейтрона пучка; E_p – енергія утвореного протона.

Переданий імпульс \vec{q} та відносний \vec{u} визначаються через змінну \vec{k} :

$$\vec{q} = \vec{k}_d - \vec{k}_p - \vec{k}_n = \sqrt{2}\vec{k}_d - \vec{k}, \quad (3)$$

$$\vec{u} = \frac{\vec{k}_n - \vec{k}_p}{2} = \frac{1 - \sqrt{2}}{2} \vec{k}_d + \frac{\vec{k}}{2} - \vec{k}_p, \quad (4)$$

\vec{k}_d , \vec{k}_p та \vec{k}_n – імпульси дейтрона пучка, протона та нейтрона, що утворюються при його розщепленні.

Останній множник у виразі (2) запишемо як

$$\delta_\Delta(E) = \frac{1}{\Delta\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{E^2}{\Delta^2}\right). \quad (5)$$

Значення енергетичної невизначеності Δ у виразі (5) для нашого експерименту приблизно 1 МеВ, а E визначається формулою

$$E = E_d + \varepsilon_d + \frac{3k^2}{4M} + 2E_p - 2\sqrt{\frac{E_d}{M}} k \cos\theta - 2\sqrt{2E_d E_p} \cos\theta_p + \sqrt{\frac{2E_p}{M}} k \cos\theta \cos\theta_p + \sqrt{\frac{2E_p}{M}} k \sin\theta \sin\theta_p \cos\phi, \quad (6)$$

де ε_d – енергія розщеплення дейтрона; θ_p – кут між векторами \vec{k}_p і \vec{k}_d ; θ – кут між векторами \vec{k} і \vec{k}_d ; ϕ – азимутальний кут.

Хвильові функції дейтрона та відносного руху нейтрона й протона, що утворюються при розщепленні дейтрона мішені, було вибрано в гауссівському вигляді [11], що дозволяє аналітично розрахувати амплітуду розщеплення дейтрона [3]. Амплітуда $A^M(\vec{q}, \vec{u})$ в лабораторній системі буде мати вигляд

$$A^M(\vec{q}, \vec{u}) = -\frac{(2\pi)^{7/4} a}{b^2 \lambda^{3/2}} \exp\left[-q^2 \left(\frac{1}{4b^2} + \frac{3}{32\lambda^2}\right)\right] \exp\left(\frac{u^2}{4\lambda^2}\right) \times \left[\exp\left(\frac{\vec{u}_\perp \vec{q}}{4\lambda^2}\right) + \exp\left(-\frac{\vec{u}_\perp \vec{q}}{4\lambda^2}\right) - 2 \exp\left(\frac{q^2}{32\lambda^2}\right) \right] + k \sqrt{2ME_p} \cos \theta \cos \theta_p, \quad (11)$$

$$\vec{u}_\perp \vec{q} = -\frac{1}{2} k^2 \sin^2 \theta + k \sqrt{2ME_p} \sin \theta_p \sin \theta \cos \varphi. \quad (12)$$

Розщеплення дейтрона пучка

Величини, що входять у вираз (7), у дифракційному наближенні визначаються як

$$q^2 = 4ME_d + k^2 - 4\sqrt{ME_d} k \cos \theta, \quad (8)$$

$$u^2 = u_\perp^2 + u_z^2, \quad (9)$$

$$u_\perp^2 = \frac{1}{4} k^2 \sin^2 \theta + 2E_p M \sin^2 \theta_p + k \sin \theta \sqrt{2ME_p} \sin \theta_p \cos \varphi, \quad (10)$$

$$u_z^2 = ME_d + \frac{1}{4} k^2 \cos^2 \theta + 2ME_p \cos^2 \theta_p - \sqrt{ME_d} k \cos \theta - 2\sqrt{ME_d} \sqrt{2ME_p} \cos \theta_p +$$

Розглянемо реакцію $d + D \rightarrow p + n + \bar{d}$. Дейтрон пучка (d) розщеплюється, а дейтрону мішені (D) передається імпульс \vec{k}_d і його позначимо як \bar{d} . Тоді інклюзивні перерізи протонів у дифракційному наближенні в л. с. можна записати як [10 - 12, 16]

$$\frac{d\sigma_p^1}{d\Omega_p dE_p} = \frac{\sqrt{2M^3 E_p}}{(2\pi)^5} \int_0^\infty dq q \int_0^{2\pi} d\varphi |A^P(\vec{q}, \vec{u})|^2, \quad (13)$$

де $A^P(\vec{q}, \vec{u})$ – амплітуда процесу. Інші позначення такі ж, як у попередньому розділі.

Параметризація функцій, що описують $A^P(\vec{q}, \vec{u})$ [14] здійснювалася аналогічно попередньому розділу. У результаті отримуємо амплітуду $A^P(\vec{q}, \vec{u})$ в явному вигляді

$$A^P(\vec{q}, \vec{u}) = \frac{(2\pi)^{7/4} a}{b^2 \lambda^{3/2}} \exp\left(-\frac{u_z^2}{4\lambda^2}\right) \exp\left[-q^2 \left(\frac{1}{4b^2} + \frac{3}{32\lambda^2}\right) - \frac{\left(\frac{1}{2}\vec{q} - \vec{k}_{p\perp}\right)^2}{4\lambda^2}\right] \times \left[\exp\left(-\frac{\left(\frac{1}{2}\vec{q} - \vec{k}_{p\perp}\right)\vec{q}}{4\lambda^2}\right) + \exp\left(\frac{\left(\frac{1}{2}\vec{q} - \vec{k}_{p\perp}\right)\vec{q}}{4\lambda^2}\right) - 2 \exp\left(\frac{q^2}{32\lambda^2}\right) \right]. \quad (14)$$

Величини, що входять у вираз (14), мають такі значення:

$$u_z^2 = \frac{M}{E_d} \left(E_p - \frac{1}{2} E_d\right)^2, \quad (15)$$

$$\left(\frac{1}{2}\vec{q} - \vec{k}_{p\perp}\right)^2 = \frac{q^2}{4} - qk_p \sin \theta_p \cos \varphi + k_p^2 \sin^2 \theta_p, \quad (16)$$

$$\left(\frac{1}{2}\vec{q} - \vec{k}_{p\perp}\right)\vec{q} = \frac{q^2}{2} - qk_p \sin \theta_p \cos \varphi, \quad (17)$$

де $\vec{k}_{p\perp}$ – перпендикулярна складова вектора \vec{k}_p .

Аналіз експериментальних даних

Результати розрахунків енергетичних спектрів протонів із реакції $D(d, p)$, отриманих у нашому експерименті, за мікроскопічною дифрак-

ційною моделлю для кутів вильоту протонів $\theta_p = 15^\circ$ і $\theta_p = 30^\circ$ показано на рис. 3. Кривими Ia позначено перерізи протонів $d^2\sigma_p^1/d\Omega_p dE_p$, що утворюються при розщепленні дейтрона пучка і розраховані за формулами (13 - 17) при значенні параметрів $a = 2,0$, $b = 0,32$ фм⁻¹ ($\theta_p = 15^\circ$); $a = 2,5$, $b = 0,32$ фм⁻¹ ($\theta_p = 30^\circ$). Кривими Ib позначено перерізи $d^2\sigma_p^2/d\Omega_p dE_p$ протонів, що є продуктами розщеплення дейтрона мішені і розраховані за формулами (2 - 12) при значенні параметрів $a = 0,6$, $b = 0,32$ фм⁻¹ ($\theta_p = 15^\circ$); $a = 0,23$, $b = 0,32$ фм⁻¹ ($\theta_p = 30^\circ$). Як видно з рис. 3, під кутом $\theta_p = 15^\circ$ процеси розщеплення взаємодіючих дейтронів відбуваються майже з однаковою ймовірністю.

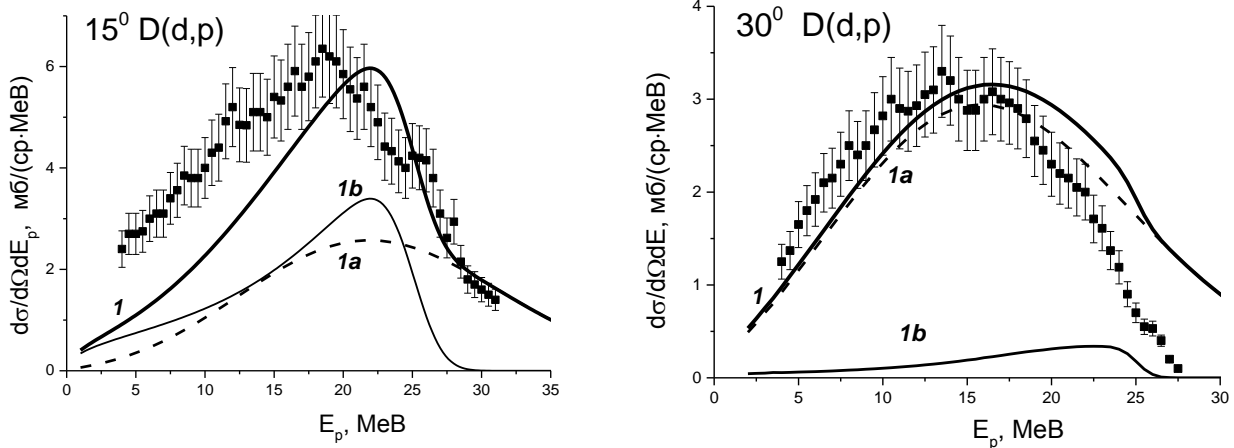
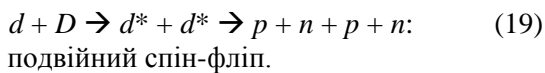
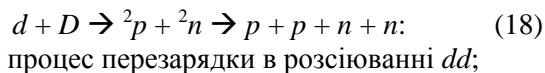


Рис. 3. Порівняння теоретичних розподілів, розрахованих за мікроскопічною дифракційною моделлю, з експериментальними при енергії $E_d = 36,9$ MeV. $1a$ – переріз утворення протонів із розщеплення дейтрона пучка; $1b$ – переріз утворення протонів із розщеплення дейтрона ядра мішені, 1 – сумарний теоретичний розподіл.

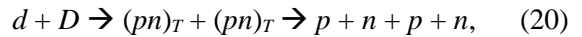
Зі збільшенням кута θ_p до 30° імовірність розщеплення дейтрона мішені різко зменшується. Сумарний переріз $d^2\sigma/d\Omega_p dE_p = d^2\sigma_p^1/d\Omega_p dE_p + d^2\sigma_p^2/d\Omega_p dE_p$ показано на рис. 3 суцільною кривою 1 . Як видно з рисунка, тричастинкові реакції розщеплення дають суттєвий внесок у переріз утворення протонів для кута $\theta_p = 15^\circ$ (~ 65 - 70 %), який збільшується зі збільшенням кута до ~ 85 % ($\theta_p = 30^\circ$). Аналіз, проведений у моделі квазівільного розсіяння для тричастинкової реакції в імпульсному наближенні, визначає положення максимумів при менших енергіях E_p (див. рис. 2), особливо для кута $\theta_p = 15^\circ$. Для кута $\theta_p = 30^\circ$ різниця в положенні максимумів незначна. Сумарна крива, що враховує процеси розщеплення дейтронів пучка і мішені, указує на істотну роль цих процесів у формуванні експериментального розподілу протонів, але не в змозі пояснити низькоенергетичну частину спектра, особливо на малих кутах.

Відомі допоки результати теоретичних та експериментальних досліджень 4-частинкової реакції $d + d$ указують на істотну роль процесів перезарядки та спин-фліпу обох дейтронів, при цьому у вихідному каналі утворюються незв'язані пари нуклонів – двох протонів та двох нейтронів, або два синглетні дейтрони відповідно [17 - 23]:



Окрім цих двох процесів можливий також розпад обох дейтронів з утворенням незв'язаних

пар «нейтрон - протон» у триплетному спіновому стані



а також «статистичний» розпад. Як показують експериментальні дослідження реакцій $d + d$ імовірність цього процесу мала при наших енергіях [21].

У нашій роботі ми враховували лише механізми (19) і (20).

Амплітуди взаємодії в кінцевому стані синглетних і триплетних пар $F_S(\vec{k})$ і $F_T(\vec{k})$ обчислювалися в наближенні Ватсона - Мігдала [24, 25]:

$$F_{S(T)}(\vec{k}) \propto \frac{r(k^2 + \alpha^2)}{2(rk^2/2 - 1/a - ik)}, \quad (21)$$

де \vec{k} – імпульс відносного руху в підсистемах «нейтрон - протон»,

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 - 2r/a}}{r}, \quad (22)$$

a – довжина np розсіювання, а r – ефективний радіус.

Ми розраховали перерізи процесів утворення двох пар «нейтрон - протон» у синглетному стані 1S_0 - $d^2\sigma^s/d\Omega_p dE_p$ з параметрами $a = 23,75$ фм і $r = 2,75$ фм та у триплетному стані 3S_1 - $d^2\sigma^t/d\Omega_p dE_p$ з параметрами $a = 5,42$ фм і $r = 1,75$ фм [26]. Їхні внески в енергетичний спектр під кутами $\theta_p = 15^\circ$ і $\theta_p = 30^\circ$ показано на рис. 4 кривими σ^s і σ^t .

Для кута $\theta_p = 15^\circ$ внесок $\sigma^s + \sigma^t$ досягає ~ 40 %, а для кута $\theta_p = 30^\circ$ він зменшується до ~ 20 %, причому для кута $\theta_p = 15^\circ$ внесок σ^s

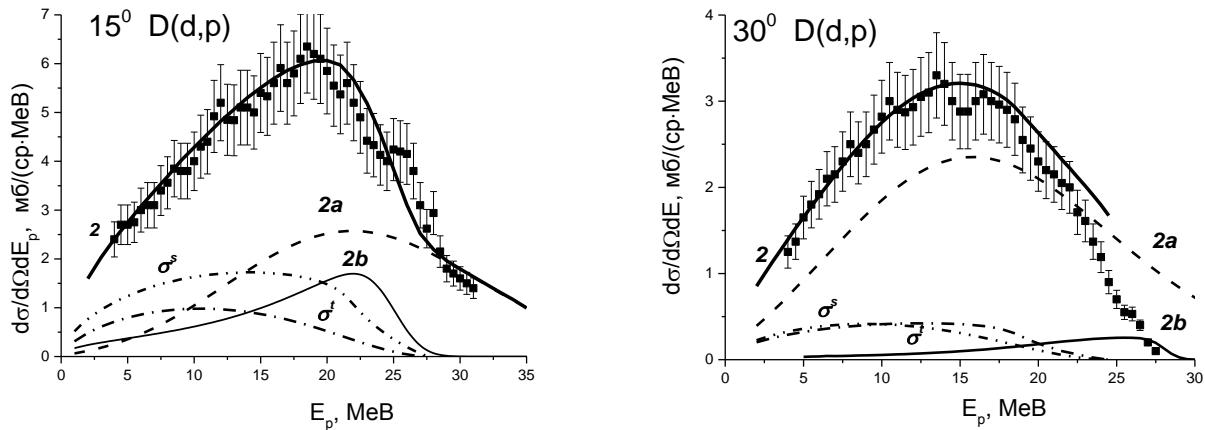


Рис. 4. Порівняння теоретичних розподілів з експериментальними для кутів $\theta_p = 15^\circ$ і $\theta_p = 30^\circ$ при $E_d = 36,9$ MeV. 2a – перерізи протонів із розщеплення дейтрона пучка, розраховані з параметрами $a = 2,0$, $b = 0,32$ фм $^{-1}$ ($\theta_p = 15^\circ$), $a = 2,19$, $b = 0,32$ фм $^{-1}$ ($\theta_p = 30^\circ$); 2b – перерізи протонів із розщеплення ядра мішені, розраховані з параметрами $a = 0,43$, $b = 0,32$ фм $^{-1}$ ($\theta_p = 15^\circ$), $a = 0,19$, $b = 0,32$ фм $^{-1}$ ($\theta_p = 30^\circ$); σ^s – перерізи утворення двох пар «нейтрон - протон» у синглетному спіновому стані; σ^t – перерізи утворення двох пар «нейтрон - протон» у триплетному спіновому стані; 2 – енергетичний розподіл протонів з урахуванням зазначених вище процесів.

перевищує внесок σ^t більше, ніж у два рази. Урахування процесів взаємодії нуклонів у кінцевому стані приводить до відносного зменшення ($\sim 45\%$) внеску від розщеплення дейтронів мішені для кута $\theta_p = 15^\circ$ та до незначного зменшення ($\sim 20\%$) внеску від розщеплення дейтрона пучка для кута $\theta_p = 30^\circ$.

Із проведеного аналізу можна зробити висновок, що процеси дифракційного розщеплення двох взаємодіючих дейтронів та процеси взаємодії в кінцевому стані під малими кутами практично рівноймовірні. Зі збільшенням кута розсіяння переважає процес дифракційного розщеплення дейтрона пучка.

Теоретичні енергетичні розподіли (суцільна крива 2), що враховують процеси дифракційного розщеплення дейтронів та взаємодію в кінцевому стані, задовільно узгоджуються з експериментальними.

Висновки

1. Отримано енергетичні розподіли протонів із реакції $D(d, p)$ під кутами $\theta_p = 15, 20, 25$ та 30° при $E_d = 36,9$ MeV. Енергетичні спектри протонів являють собою широкі, практично симетричні максимуми. Одержані нами спектри за формою подібні до спектрів протонів із реакції $D(d, p)$ та спектрів нейтронів із реакції $D(d, n)$ при енергіях пучка $E_d = 10 - 60$ MeV.

2. Аналіз енергетичних розподілів протонів із реакції $D(d, p)nd$ проведено за мікроскопічною

дифракційною ядерною моделлю для тричастинкової реакції розщеплення. Показано, що перерізи протонів із розщеплення дейтронів пучка збільшуються зі збільшенням кута вильоту протона, а перерізи протонів із розщеплення ядра мішені, навпаки, зменшуються при енергії, що розглядається. Теоретичний розподіл, що враховує процеси розщеплення дейтронів пучка і мішені, указує на істотну роль цих процесів у формуванні експериментального розподілу, але потребує розгляду інших механізмів для пояснення розподілу в низькоенергетичній частині спектра.

3. Розраховано перерізи утворення пар «нейтрон - протон» у синглетному та триплетному спінових станах для кутів $\theta_p = 15^\circ$ і 30° при енергії $E_d = 36,9$ MeV. За даними аналізу внесок $d\sigma^s / d\Omega_p dE_p + d\sigma^t / d\Omega_p dE_p$ в переріз реакції $D(d, p)$ досягає $\sim 40\%$ для кута $\theta_p = 15^\circ$, а для кута $\theta_p = 30^\circ$ він зменшується до $\sim 20\%$.

4. Процеси дифракційного розщеплення взаємодіючих дейтронів та процеси взаємодії в кінцевому стані під малими кутами $\theta_p = 15^\circ$, практично, рівноймовірні. Зі збільшенням кута вильоту протонів переважає процес дифракційного розщеплення дейтрона пучка.

5. Задовільне узгодження теоретичних і експериментальних розподілів протонів із реакції $D(d, p)$ при $E_d = 36,9$ MeV отримано завдяки врахуванню квазівільних процесів та взаємодії нуклонів у вихідному каналі реакції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Rybakov B.V., Sidorov V.A., Vlasov N.A.* Break of deuterons on H, D, ^3He and ^4He // Nucl. Phys. - 1961. - Vol. 23. - P. 491 - 498.
2. *Lefevre H.W., Borchers R.R., Poppe C.H.* Neutrons from deuteron breakup on D, T and ^4He // Phys. Rev. - 1962. - Vol. 128, No. 3. - P. 1328 - 1335.
3. *Pope C., Buget N., Blyth C.O. et al.* A search for spin dependent effects in the three body final state from the $^2\text{H}(d, n)\text{pd}$ reaction at 11.3 MeV incident deuteron energy // J. Phys. A: Gen. Phys. - 1972. - Vol. 5. - P. L33 - L37.
4. *Van Oers W.T.H., Brockman K.W.* Proton spectra from d + d breakup at 25.3 MeV // Nucl. Phys. - 1965. - Vol. 74. P. - 73 - 80.
5. *Fukunaga K, Ohsawa T., Kakigi S. et al.* Energy spectra of deuterons and protons for the d + d reaction at 60 MeV // Nucl. Phys. - 1982. - Vol. A390. - P. 19 - 28.
6. *Белюска О.О., Гранцев В.И., Кисурин К.К. и др.* Энергетические и угловые распределения дейтронов в реакции d + d \rightarrow p + n + d // Известия РАН. Сер. физ. - 2013. - Т. 77, №7. - С. 981 - 987; Bull RAS. - 2013. - Vol. 77, No. 7. - P. 893 - 899.
7. *Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Kisurin K.K. et al.* Distribution of deuterons in the three-body break-up reactions in d+d collisions // ВАНТ. - 2013. - Т. 85, №. 3. - С. 162 - 167.
8. *Белюска О.О., Бердниченко С.В., Гранцев В.И. та ін.* Дослідження ядерних реакцій у системі D + T // Ядерна фізика та енергетика. - 2007. - № 3 (21). - С. 54 - 59.
9. *Белюска О.О., Гранцев В.И., Давидовський В.В. та ін.* Пружне розсіяння дейтронів на тритонах // Укр. фіз. журн. - 2009. - Т. 54, № 7. - С. 658 - 668.
10. *Тартаковський В.К.* О рассеянии ультрарелятивистских дейтронов ядрами // Изв. вузов СССР. Физика (Томск). - 1980. - № 9. - С. 3 - 8.
11. *Тартаковський В.К., Фурсаев А.В., Сидоренко Б.И.* Дифракционное расщепление тритонов падающими протонами // Ядерная физика. - 2005. - Т. 68. - С. 35.
12. *Тартаковський В.К., Ковальчук В.И.* Розщеплення дейтронів з енергіями 23 та 26 MeV з ядрами ^{64}Cu , ^{197}Au // Журнал фізичних досліджень (Львів). - 2006. - Т. 10. - С. 29 - 34.
13. *Белюска О.О., Гранцев В.И., Давидовський В.В. и др.* Квазисвободные инклюзивные процессы при двухчастичном расщеплении тритонов дейтронами с энергией 37 МэВ // Изв. РАН. Сер. физ. - 2011. - Т. 75, № 7. - С. 988 - 993; *Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Davydovskyy V.V. et al.* Quasi-Free Inclusive Processes in the Two-Particle Splitting of Tritons by Deuterons with an Energy 37 MeV // Bull RAS. - 2011. - Vol. 75, No. 7. - P. 925 - 930.
14. *Белюска О.О., Гранцев В.И., Кисурин К.К. и др.* Развал дейтронов на тритонах // Ядерная физика. - 2012. - Т. 75, № 12. - С. 1532 - 1543; *Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Kisurin K.K. et al.* Breakup of deuterons on tritons // Physics of Atomic Nuclei. - 2012. - Vol. 75, No. 12. - P. 1454 - 1465.
15. *Белюска О.О., В.И. Гранцев., В.В. Давидовский и др.* Реакции t(d,p)tn при энергии дейтронов 37 МэВ // Изв. РАН. Сер. физ. - 2010. - Т. 74, № 6. - С. 798; *Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Davydovskyy V.V. et al.* T(d, p)tn reactions at a deuteron energy of 37 MeV // Bull. Russ. Acad. Sci. - 2010. - Vol. 74, No. 6. - P. 761.
16. *Ахієзер О.І., Ситенко О.Г.* Дифракційні ядерні процеси при високих енергіях // УФЖ. - 1958. - Т. 3. - С. 16 - 34.
17. *Warner R. E., Di Cenzo S. B., Ball G. G. et al.* Final-state interactions in the $^2\text{H}(d, pp)nn$ reaction // Nucl. Phys. - 1975. - Vol. A243. - P. 189 - 201.
18. *Leeman B. Th., Pugh H.G., Chant N.S., Chang C.C.D* + D four-body breakup at 80 MeV // Phys. Rev. - 1978. - Vol. C17. - P. 410.
19. *Warner R.E.* Reinterpretation of the $^2\text{H}(d, pp)nn$ reaction at 80 MeV // Phys. Rev. - 1981. - Vol. C24. - P. 2759.
20. *Конфедератенко В.І., Пірнак В.М., Пилипченко В.А. та ін.* Дослідження 4-частинкового каналу реакції d + d при 46,7 MeV // Укр. фіз. журн. - 1997. - Т. 42. - С. 1175 - 1181.
21. *Struzhko B.* FSI and QFS in the four-body d + d reaction at 46,7 MeV // Journal of Physical Studies. - 1999. Vol. 3, No. 4. - P. 431 - 436.
22. *Struzhko B.* Four-body d + d reaction at 46,7 MeV // Acta Physica Polonica B. - 1999. - Vol. 30, No. 5. - P. 1487 - 1492.
23. *Lebedev V.M., Neudatchin V.G., Struzhko B.G.* Reactions Involving the Flip of the Deuteron Spin and Iso-spin and Supermultiplet Potential Model for the Interaction of Extremely Light Clusters // Physics of Atomic Nuclei. - 2002. - Vol. 65, No. 3. - P. 462 - 477.
24. *Watson K.M.* The effect of final state interactions on reaction cross section // Phys. Rev. - 1952. - Vol. 88. - P. 1163 - 1170.
25. *Мигдал А.Б.* Теория ядерных реакций с образованием медленных частиц // ЖЭТФ. - 1955. - Т. 28. - С. 3 - 10.
26. *Machleidt R.* The meson theory of nuclear forces and nuclear structure // Advances in nuclear physics. - 1989. - Vol. 19. - P. 189 - 376.

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

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТОНОВ В $D(d, p)$ РЕАКЦИИ

Измерены инклюзивные спектры протонов в реакции $D(d, p)$ на ускорителе У-240 Института ядерных исследований НАН Украины при энергии дейтронов $E_d = 36,9$ МэВ для изучения энергетического распределения протонов в континууме. Теоретический анализ выполнен по упрощенной микроскопической дифракционной модели, разработанной В. К. Тартаковским для трехчастичных реакций развала, и по моделям, учитывающим взаимодействие в конечном состоянии пар «нейтрон - протон» в синглетном и триплетном спиновых состояниях. Результаты проведенного анализа показывают, что на углах вылета протонов $\theta_p \sim 15^\circ$ процессы дифракционного развала и процессы взаимодействия в конечном состоянии практически одинаковы. С увеличением угла вылета протонов дифракционный развал преобладает. Удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных распределений протонов достигается благодаря учету процессов дифракционного развала и взаимодействия в выходном канале реакций пар «нейтрон - протон».

Ключевые слова: дейтрон, d + d-реакция, энергетические спектры, микроскопическая дифракционная модель, расщепление, взаимодействие в конечном состоянии.

**O. O. Beiyuskina, V. I. Grantsev, K. K. Kisurin, S. E. Omelchuk, Yu. S. Roznyuk,
B. A. Rudenko, L. I. Slusarenko, B. G. Struzhko**

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

ENERGY DISTRIBUTIONS OF PROTONS IN $D(d, p)$ REACTION

Energy distributions of protons in continuum from $D(d, p)$ reaction were obtained with 36.9 MeV deuteron beam of the U240 cyclotron accelerator of Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine. Analysis of energy distributions of protons in three-body break-up reactions were carried out according to the microscopic diffraction theory, developed by V. K. Tartakovsky. It is important that proposed model takes into account the contribution of final state interactions of np couples in singlet and triplet spin states. It was shown that for angle $\theta_p \sim 15^\circ$ processes of contributions of diffraction break-up and processes of interaction in final state are equally probable. For greater angles the contribution of deuteron diffraction break-up process becomes more important. Satisfactory matching of experimental and theoretical distributions of diffraction break-up is achieved by taking into account the final state interactions in exit reaction channel.

Keywords: deuteron, d + d-reactions, energy spectra, microscopic diffraction model, break-up, final state interaction.

REFERENCES

1. Rybakov B.V., Sidorov V.A., Vlasov N.A. Break of deuterons on H, D, ^3He and ^4He // Nucl. Phys. - 1961. - Vol. 23. - P. 491 - 498.
2. Lefevre H.W., Borchers R.R., Poppe C.H. Neutrons from deuteron breakup on D, T and ^4He // Phys. Rev. - 1962. - Vol. 128, No. 3. - P. 1328 - 1335.
3. Pope C., Buget N., Blyth C.O. et al. A search for spin dependent effects in the three body final state from the $^2\text{H}(d, n)p$ reaction at 11.3 MeV incident deuteron energy // J. Phys. A: Gen. Phys. - 1972. - Vol. 5. - P. L33 - L37.
4. Van Oers W.T.H., Brockman K.W. Proton spectra from d + d breakup at 25.3 MeV // Nucl. Phys. - 1965. - Vol. 74. P. - 73 - 80.
5. Fukunaga K, Ohsawa T., Kakigi S. et al. Energy spectra of deuterons and protons for the d + d reaction at 60 MeV // Nucl. Phys. - 1982. - Vol. A390. - P. 19 - 28.
6. Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Kisurin K.K. et al. // Izvestiya RAN. Ser. fiz. - 2013. - Vol. 77, No. 7. - P. 981 - 987; Bull RAS. - 2013. - Vol. 77, No. 7. - P. 893 - 899. (Rus)
7. Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Kisurin K.K. et al. Distribution of deuterons in the three-body break-up reactions in d+d collisions // VANT. - 2013. - Vol. 85, No. 3. - P. 162 - 167.
8. Beliuskina O.O., Berdnychenko S.V., Grantsev V.I. et al. // Nucl. Phys. At. Energy. - 2007. - No. 3 (21). - P. 54 - 59. (Ukr)
9. Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Davydovskiy V.V. et al. // Ukr. fiz. zhurn. - 2009. - Vol. 54, No. 7. - P. 658 - 668. (Ukr)
10. Tartakovskij V.K. // Izv. vuzov SSSR. Fizika (Tomsk). - 1980. - No. 9. - P. 3 - 8. (Rus)
11. Tartakovskij V.K., Fursaev A.V., Sidorenko B.I. // Yadernaya fizika. - 2005. - Vol. 68. - P. 35. (Rus)
12. Tartakovskiy V.K., Koval'chuk V.I. // Zhurnal fizychnykh doslidzhen' (L'viv). - 2006. - Vol. 10. - P. 29 - 34. (Ukr)
13. Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Davydovskyy V.V. et al. // Izv. RAN. Ser. fiz. - 2011. - Vol. 75, No. 7. - P. 988 - 993. (Rus); Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Davydovskyy V.V. et al. Quasi-Free Inclusive Processes in the Two-Particle Splitting of Tritons by Deuterons with an Energy 37 MeV // Bull RAS. - 2011. - Vol. 75, No. 7. - P. 925 - 930.
14. Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Kisurin K.K. et al. //

- Yadernaya fizika. - 2012. - Vol. 75, No. 12. - P. 1532 - 1543. (Rus); *Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Kisurin K.K. et al.* Breakup of deuterons on tritons // *Physics of Atomic Nuclei*. - 2012. - Vol. 75, No. 12. - P. 1454 - 1465.
15. *Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Davydovskyy V.V. et al.* // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 2010. - Vol. 74, No. 6. - P. 798. (Rus); *Beliuskina O.O., Grantsev V.I., Davydovskyy V.V. et al.* T(d, p)tn reactions at a deuteron energy of 37 MeV // *Bull. Russ. Acad. Sci.* - 2010. - Vol. 74, No. 6. - P. 761.
16. *Akhiyev O.I., Sytenko O.G.* // *UFZh.* - 1958. - Vol. 3. - P. 16 - 34. (Ukr)
17. *Warner R. E., Di Cenzo S. B., Ball G. G. et al.* Final-state interactions in the $^2\text{H}(d, pp)nn$ reaction // *Nucl. Phys.* - 1975. - Vol. A243. - P. 189 - 201.
18. *Leeman B. Th., Pugh H.G., Chant N.S., Chang C.C.D* + D four-body breakup at 80 MeV // *Phys. Rev.* - 1978. - Vol. C17. - P. 410.
19. *Warner R.E.* Reinterpretation of the $^2\text{H}(d, pp)nn$ reaction at 80 MeV // *Phys. Rev.* - 1981. - Vol. C24. - P. 2759.
20. *Konfederatenko V.I., Pirnak V.M., Pylypchenko V.A. et al.* // *Ukr. fiz. zhurn.* - 1997. - Vol. 42. - P. 1175 - 1181. (Ukr)
21. *Struzhko B.* FSI and QFS in the four-body $d + d$ reaction at 46,7 MeV // *Journal of Physical Studies.* - 1999. Vol. 3, No. 4. - P. 431 - 436.
22. *Struzhko B.* Four-body $d + d$ reaction at 46,7 MeV // *Acta Physica Polonica B.* - 1999. - Vol. 30, No. 5. - P. 1487 - 1492.
23. *Lebedev V.M., Neudatchin V.G., Struzhko B.G.* Reactions Involving the Flip of the Deuteron Spin and Isospin and Supermultiplet Potential Model for the Interaction of Extremely Light Clusters // *Physics of Atomic Nuclei.* - 2002. - Vol. 65, No. 3. - P. 462 - 477.
24. *Watson K.M.* The effect of final state interactions on reaction cross section // *Phys. Rev.* - 1952. - Vol. 88. - P. 1163 - 1170.
25. *Migdal A.B.* // *ZhETF.* - 1955. - Vol. 28. - P. 3 - 10. (Rus)
26. *Machleidt R.* The meson theory of nuclear forces and nuclear structure // *Advances in nuclear physics.* - 1989. - Vol. 19. - P. 189 - 376.

Надійшла 02.07.2015

Received 02.07.2015