

**ПРО МОЖЛИВІСТЬ КІНЕМАТИЧНО ПОВНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВЗАЄМОДІЇ  
ДВОХ ПРОДУКТІВ У КІНЦЕВОМУ СТАНІ З РОЗЩЕПЛЕННЯ ДЕЙТРОНА  
ПРОТОНАМИ З ЕНЕРГІЄЮ 5,5 МеВ**

**І. П. Дряпаченко, В. В. Жук, Л. П. Кацубо, Е. М. Можжухін, А. А. Шведов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Мета роботи – отримання даних для виділення параметрів амплітуди двочастинкового розсіяння і взаємодії в енергетичному інтервалі 0 – 400 кеВ, що практично неможливо в прямих експериментах “пучок – мішень”. Обрані геометричні умови реєстрації на збігах двох продуктів реакції  $p + d \rightarrow p + p + n$  дають змогу з великою вірогідністю спостерігати їх взаємодію в кінцевому стані (ВКС), коли частинки в  $pp$ - чи  $pn$ - парах рухаються в одному напрямку. У роботі обговорюються вимоги й наявні умови підготовки та проведення кінематично повного експерименту з реєстрації на збігах двох протонів з розщеплення дейтрона протонами. Наводяться дані для декількох наборів кінематичних умов експерименту.

**Вступ**

Незаперечним є, що для розуміння процесів розсіяння заряджених частинок низької енергії, особливо на малі кути, процесів злиття легких ядер при низькій енергії та реакцій різних типів за участю легких ядер необхідно враховувати екранування кулонівського поля частинок атомними чи молекулярними електронами. Екрануюча дія електронів у реакції може бути значною і переріз реакцій в лабораторній системі координат буде відрізнятися від перерізу розсіяння на голих ядрах. Знання параметрів такого екранування (фактора підсилення та астрофізичного параметра) у практично недоступній у звичайному експерименті області енергій  $E = 0 \div 10$  кеВ необхідне для правильного розуміння й пояснення різноманітних явищ астрофізики. Значення перерізів розсіяння на голих ядрах необхідні й для оцінки виходу продуктів реакції синтезу легких ядер в умовах гарячої плазми, коли також може виявитися суттєвим процес екранування іонів електронами.

Для детального дослідження особливостей амплітуд розсіяння та реакцій за участю частинок з малим числом нуклонів при дуже малих енергіях відносного руху частинок пропонується використовувати реакції з утворенням трьох частинок у кінцевому стані [1]. Подібного типу реакції широко використовувалися раніше для визначення низькоенергетичних параметрів розсіяння нейтрона на нейтроні (абсолютно неможливі прямі дослідження типу “пучок – мішень”) [2]. Характерною особливістю реакцій з трьома частинками в кінцевому стані є велика вірогідність при деяких умовах (ділянках фазового простору) механізмів квазівільного розсіяння та ВКС (механізм Мігдала - Ватсона). Ще задовго до експериментального дослідження трьохчастинкового каналу реакцій Мігдал і Ватсон запропонували модель реакції ступінчатого розвалу, обумовленого наявністю в матриці двочастинкового розсіяння полюсів віртуального розсіяння або найближчого зв’язаного стану. Для реакції  $a + A \rightarrow 1 + (2 + 3)^* \rightarrow 1 + 2 + 3$  пропонується дві стадії: на першій утворюється частинка 1 та підсистема взаємодіючих частинок  $(2 + 3)^*$ , яка на другій стадії розпадається. Взаємодія двох частинок на другій стадії реакції і є ВКС. Ця модель припускає можливість факторизації матричного елемента в два множники:  $|T_{fi}^o|^2 = |T_{fi}^o|^2 F(E)$ , де  $T_{fi}^o$  - амплітуда, яка описує утворення ВКС-пари, а множник  $F(E)$  описує розпад цієї пари й пов’язаний з  $S$ -матрицею вільного розсіяння частинок 2 і 3. Особливості цього множника легко простежуються на прикладі протон-протонного розсіяння (ВКС) та нейтрон-протонного розсіяння (той же механізм), що проявляються в добре досліджуваній реакції  $p + d \rightarrow p + p + n$ . Особливості коефіцієнтів  $F(E)$  для пари нейтрон-протон пов’язані з

поллюсами  $S$ -матриці, які проявляються в тому, що  $F(E)$  максимальний при енергії відносного руху  $E_{np} = 0$ . Для системи протон-протонного розсіяння полюсна поведінка множника  $F_{pp}$  при нульовій енергії “з’їдається” кулонівським відштовхуванням практично до нуля і зростає із збільшенням енергії, досягаючи максимуму при  $E \approx 400$  кеВ. Дослідження продуктів виходу реакцій для легких ядер, що знаходяться в різних зовнішніх умовах (молекули чи молекулярні іони, тверді розчини тощо), при дуже малих, до нульових, відносних енергіях і дають відомості щодо радіуса електронного екранування. Теоретичні оцінки очікуваного ефекту вказують на високу чутливість перетинів взаємодії до цього параметра [3].

### Експериментальна частина

Як підхід до дослідження ефектів екранування у розглянутій вище концепції ми обрали реакції  $p + d \rightarrow p + p + n$  та  $d + d \rightarrow p + n + d$ . На рис. 1 відображено принципові вузли експериментальної установки. Колімований пучок протонів тандема ЕГП-10К з енергією 5,5 МеВ й інтенсивністю до 0,1 мкА бомбардував мішень ( $CD_2$ ) завтовшки 1,5 мГ/см<sup>2</sup>, розташовану в центрі реакційної камери діаметром 75 см. Заряджені частинки реєструвалися по різні боки від напрямку пучка двома напівпровідниковими детекторами завтовшки 500 мк. Для абсолютизації перерізів струм пучка через досліджувану мішень інтегрувався на циліндрі Фарадея. Накопичення двопараметричної статистичної інформації в координатах  $E_{p1} \times E_{p2}$  виконувалось з використанням у режимі “на лінії” комп’ютеризованої блок-схеми швидких збігів, спектрометричного аналізу й буферної пам’яті об’ємом 16К. “Поза лінією” сортувалася й оброблялася накопичена інформація, яка довела можливість вимірювання функції збудження взаємодії двох кінцевих продуктів з кроком у декілька кеВ. Цю схему експерименту, традиційну й відпрацьовану в кореляційних вимірюваннях на пучку прискорювача [4], ми вважаємо за потрібне доповнити описом принципових “ключових” складових частин, методичних засобів, необхідних вимог та умов реалізації.

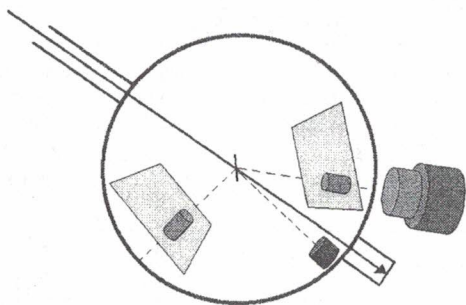


Рис. 1. Схема експерименту.

Повнота експерименту для конкретної реакції  $p+d \rightarrow p+p+n$  з трьома нуклонами в кінцевому стані зводиться до вимірювання енергій двох кінцевих продуктів під обраними кутами розсіяння ( $\theta_1$  і  $\theta_2$ ) та азимутальними ( $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ ). Таким чином будуть визначені шість з дев’яťох кінематичних параметрів повного опису кінцевого стану реакції (для цього достатньо п’ятьох, інші визначаються за законами збереження енергії та імпульсу). Модельному механізму ВКС двох нуклонів у нашому випадку відповідають співпадаючі кути вильоту саме для цієї пари (дві частинки “довгий” час летять поруч), тому абсолютно виконати вимогу реєстрації, наприклад

двох протонів під одним кутом, неможливо. Для  $np$ -пари є така можливість, якщо розмістити детектор нейтронів безпосередньо за детектором протонів та врахувати ефекти проходження нейтронів через конструкційні матеріали і т. ін. Інша можливість дослідження взаємодії двох частинок з нульовою відносною енергією - реєстрація однієї з цієї пари на збігах з третьою, яка відповідно до кінематики реакції зазвичай летить по іншій бік від напрямку пучка, що зручно для експериментатора. Таким чином, реєструючи за методичних умов даної роботи на збігах два протони по різні боки від напрямку пучка, ми отримуємо дані про  $np$ -ВКС для відповідних енергій відносного руху нейтрона і протона. Надалі ми плануємо підключити до методики детектор швидких нейтронів, розміщений прямо за детектором заряджених частинок (див. рис. 1), що набагато розширить можливості експерименту. По-перше, у цьому випадку реалізуються умови реєстрації двох частинок, які летять під одним кутом - протон у напівпровідниковий детектор і нейтрон у сцинтиляційний детектор поза реакційною

камерою. Це надасть можливість точного порівняння даних для  $np$ -пари, отриманих різними методичними заходами в ході одного експерименту, однієї експозиції. По-друге, зрозуміло, що при цьому (реєстрації на збігах нейтрона і протона по різні боки від напрямку пучка) ми отримаємо можливість  $pp$ -ВКС, коли два протони летять точно під одним кутом, що практично неможливо реалізувати.

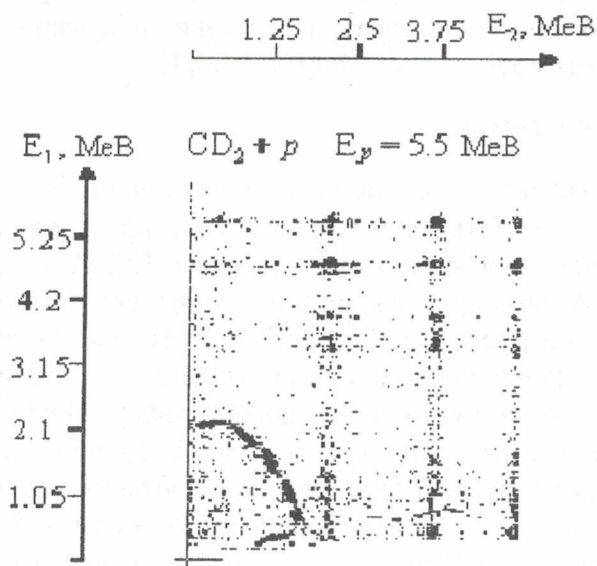


Рис. 2. Кінематичні параметри й умови ідентифікації  $pp$ -збігів з розщеплення дейтронів протонами 5,5 MeV.  $\theta_1 = 50^\circ$ ,  $\theta_2 = -30^\circ$ .

Вимоги та умови реєстрації конкретного вихідного каналу розщеплення дейтрона протонами з енергією 5,5 MeV визначають вимоги до спектрометричних трактів методики. На рис. 2 лінією представлено кінематичний локус збігів двох протонів для обраних нами кутів реєстрації в координатах  $E_{p1} \times E_{p2}$ . Найвні їх максимальні енергії знаходяться в межах до 1,5 - 2 MeV залежно від каналу реєстрації. Розрахунковий локус нанесено на площину з експериментальними даними відповідно до енергетичного калібрування цих спектрів  $E_{p1}$  та  $E_{p2}$  по піках пружного розсіяння протонів на  $^{12}\text{C}$ , D та  $^1\text{H}$  при різних енергіях бомбардуючого пучка протонів (табл. 1). Визначені "швидкі" пороги реєстрації за обома трактами виявились нижче 150 кеВ.

Таблиця 1

Енергетичне калібрування площини $E_{p1} - E_{p2}$									
Вісь "x" - $E_{p2}$					Вісь "y" - $E_{p1}$				
Реакція	Енергія частинок пучка, MeV	Кут детектора, град	Енергія продукту, MeV	Положення на осі, номер каналу	Реакція	Енергія частинок пучка, MeV	Кут детектора, град	Енергія продукту, MeV	Положення на осі, номер каналу
$^{11}\text{B} + p$	5,0	30	4,88	480	$^{12}\text{C} + p$	5,6	70	5,012	366
$^9\text{Be} + p$	5,6	90	4,47	456	$^{12}\text{C} + p$	5,0	50	4,7	336
D + p	5,0	30	4,36	440	D + p	5,0	45	3,69	272
H + p	5,34	30	4,0	400	D + p	5,0	50	3,44	248
H + p	5,0	30	3,75	376	H + p	5,0	45	2,5	176
D + p	5,0	45	3,69	360	H + p	5,34	50	2,5	152
H + p	5,0	45	2,5	248					
Ціна каналу: 10 кеВ/канал					Ціна каналу: 14 кеВ/канал				

Щодо ідентифікації ефекту, то для його кількісного визначення необхідні такі ж самі ідентифікація й визначення фізичного фону, фону випадкових збігів. Безперервний режим роботи тандема надає дуже добрі можливості для максималізації співвідношення ефекту до фону (це можна побачити, наприклад, та тому ж рис. 2). Ідентифікація фізичного фону не тільки випадкових, але й істинних збігів від інших, "не цікавих" зараз, процесів чи каналів взаємодії пучка з мішенню робиться окремою експозицією з виключенням досліджуваного каналу. Для цього ми, наприклад, скористалися мішенню  $\text{CH}_2$ . На рис. 3 представлено дані, накопичені у двох послідовних експозиціях з мішенями  $\text{CD}_2$  (зліва) і  $\text{CH}_2$  (справа). Для кількісного визначення фону випадкових збігів використовуються різні підходи, які тим чи іншим засобом враховують "форму" та інтенсивність фону випадкових збігів у ділянках спектра з наявною відсутністю досліджуваного ефекту.

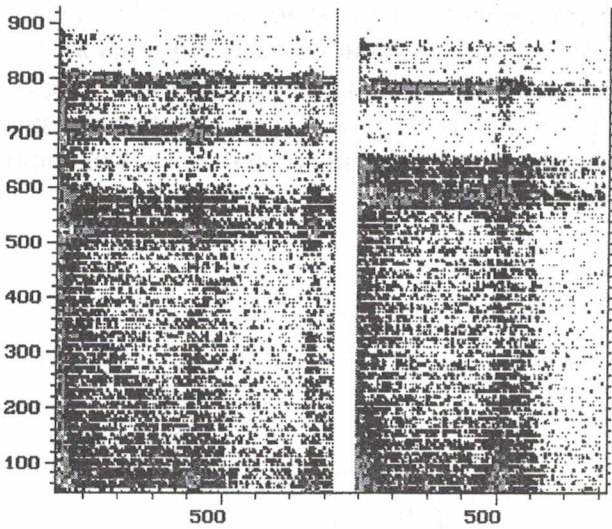


Рис. 3. Спектри pp-збігів при бомбардуванні протонами з енергією 5,5 MeV мішеней CD<sub>2</sub> (зліва) і CH<sub>2</sub> (справа).

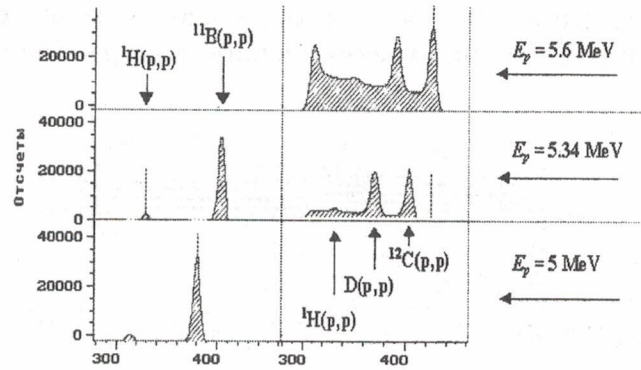


Рис. 4. Спектри моніторингу заряджених частинок з різних мішеней.

Нарешті, для контролю за ходом експерименту, отримання кількісних даних, відносних або абсолютних значень виходів продуктів та перерізів досліджуваної реакції ми використовували окремий нерухомий детектор заряджених частинок та інтегратор струму, приєднаний до циліндра Фарадея, в якому гальмувався пучок після проходження мішені. На рис. 4 наведено спектри заряджених частинок з різних мішеней, зареєстровані моніторуючим детектором. Ці спектри накопичувались у повному об'ємі під час робочих експозицій. У табл. 2 наведено результати кількісної обробки різних ділянок цих спектрів для мішені CD<sub>2</sub> у двох експозиціях, розділених у часі, для двох наборів кореляційної кінематики. Спостерігається відтворюваність умов експерименту в межах декількох відсотків статистичної похибки не тільки ділянок спектрів монітора, але й їх співвідношень до інтегрованого під час експозиції струму пучка.

Таблиця 2

№ експозиції	I (відліки інтегратора)	M (відліки монітора)	C (сума в піку <sup>12</sup> C(p,p))	D (сума в піку D(p,p))	H (сума в піку <sup>1</sup> H(p,p))	С/І	Д/І	Н/І	Д/Н
58	311446928								
59	44617382	1000000	526829	335413	33772	0.0118	0.00752	0.000757	9.93
62	284751996	6401724	3365592	1958740	191947	0.0118	0.00688	0.000674	10.2
$(I_{58} + I_{59})/I_{62} = 1,250$					$(M_{58} + M_{59})/M_{62} = 1,247$				

### Результати та обговорення

Розглянуті вище можливості дали нам змогу отримати кількісні дані про pp-збіги з реакції розщеплення дейтрона протонами з енергією 5,5 MeV для декількох пар кутів детекторів протонів. На рис. 5 наведено двовимірні спектри статистичної інформації в координатах E<sub>p1</sub> - E<sub>p2</sub> для кутів  $\theta_1 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = -42^\circ$  (а) і  $\theta_1 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = -49^\circ$  (б). Знак “-” для кута  $\theta_2$  говорить про розміщення відповідного детектора з іншого боку від напрямку пучка ( $\phi_1 = 0^\circ$ ,  $\phi_2 = 180^\circ$ ). Не викликає сумніву як однозначна ідентифікація локусу pp-збігів, так і низький фон випадкових збігів у ділянках двовимірних спектрів за межами локусів. Тривалість відповідних експозицій при струмі пучка протонів крізь мішень до 50 нА була 6 і 10 год. На рис. 6 наведено результати виділення, сумування і проектування статистичної інформації в межах локусів на вісь E<sub>p2</sub> площини відповідно до енергетичного калібрування по піках пружного розсіяння й бінарним збігам з pp-розсіяння на мішені CH<sub>2</sub>. Вісь “у” на цьому рисунку відповідає тричі диференційним перерізам  $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dE_1$  у відносних одиницях.

Дані для двох наборів кінематичних умов експерименту нормовані на струм пучка, проінтегровані під час відповідних експозицій. Статистична похибка наведених даних від 12 до 20 %. Стрілками показано ділянки спектрів, що відповідають нульовій енергії відносного руху в  $np$ -парі. Наведені результати роботи доводять можливість ідентифікації такого механізму ( $np$ -ВКС) в умовах даного експерименту як за енергетичною роздільною здатністю, так і за ефективністю реєстрації збігів.



Рис. 5. Спектри  $pp$ -збігів з реакції  $p + d \rightarrow p + p + n$  для двох наборів кінематичних умов:  $\theta_1 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = -42^\circ$  (а) і  $\theta_1 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = -49^\circ$  (б).

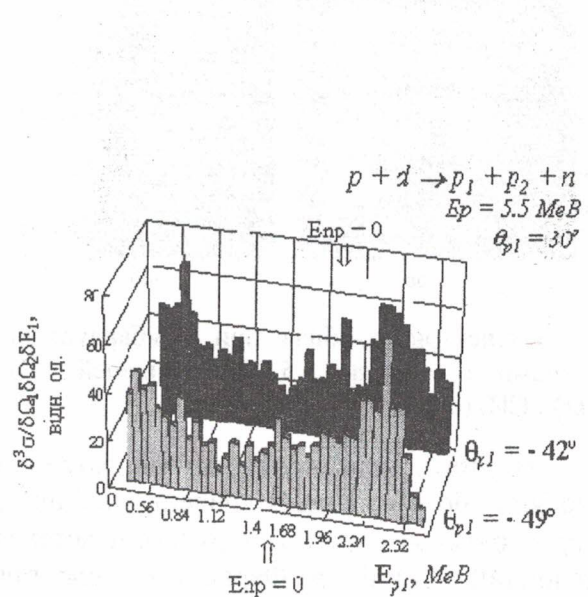


Рис. 6. Проекція статистичної інформації в межах локусу  $pp$ -збігів на вісь  $E_{p1}$ .

Отримані дані можуть бути використані не тільки для заявлених досліджень двочастинкової взаємодії при дуже низькій, до нульовій, енергії відносного руху. Вони мають і самостійне значення для наповнення глобальної бази даних з експериментального дослідження тринуклонної системи.

Автори висловлюють щирю подяку персоналу ЕГП-10К за великий обсяг підготовчих робіт і забезпечення виведеного пучка.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дмитренко В. Н., Дряпаченко І. П., Соколов М. В. О возможности изучения электронного экранирования в трехчастичных ядерных реакциях // УФЖ. - 1991. - Т. 36, № 7. - С. 993 - 999.
2. Дряпаченко І. П., Затекин В. В., Комаров В. В., Попова А. М. Об уточнении параметров нейтрон-нейтронного рассеяния // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1986. - Т. 50. - С. 993 - 995.
3. Matthäy H., Zeh H. D. // Nucl. Phys. A. - 1972. - Vol. 192, No. 1. - P. 39 - 45.
4. Гранцев В. И., Дряпаченко І. П., Корнилов В. А. и др. Исследование механизмов реакции  $^{11}\text{B} + p \rightarrow 3\alpha$  и  $^{10}\text{B} + d \rightarrow 3\alpha$  при  $E_p > 2.5$  МэВ,  $E_d < 3.4$  МэВ // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1976. - Т 40. - С. 203 - 210.

### О ВОЗМОЖНОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКИ ПОЛНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ПРОДУКТОВ В КОНЕЧНОМ СОСТОЯНИИ ИЗ РАСЩЕПЛЕНИЯ ДЕЙТРОНА ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 5,5 МэВ

И. П. Дряпаченко, В. В. Жук, Л. П. Кацубо, Э. Н. Можжухин, А. А. Шведов

Цель работы – получение данных для выделения параметров амплитуды двухчастичного рассеяния и взаимодействия в энергетическом интервале 0 – 400 кэВ, что практически невозможно в прямых экспериментах “пучок – мишень”. Выбранные геометрические условия регистрации на

совпадениях двух продуктов реакции  $p + d \rightarrow p + p + n$  позволяют с большой достоверностью наблюдать их взаимодействие в конечном состоянии, если нуклоны в  $pp$ - или  $pn$ - парах движутся в одном направлении. В работе обсуждаются требования и имеющиеся условия подготовки и проведения кинематически полного эксперимента для регистрации на совпадениях двух протонов из расщепления дейтрона протонами. Приводятся данные для нескольких наборов кинематических условий эксперимента.

**APPROACH TO KINEMATICALLY COMPLETE MEASUREMENTS OF THE FINAL STATE INTERACTIONS FOR TWO PRODUCTS OF DEUTERON BREAKUP BY PROTRONS WITH ENERGY 5,5 MeV**

**I. P. Dryapachenko, V. V. Zhuk, L. P. Kacubo, E. M. Mozhzhuhin, A. A. Shvedov**

The purpose of this paper is to obtain the data for separation of parameters of the two body scattering amplitude and interaction in energy range 0 - 400 keV, that is practically impossible in direct experiments "beam - target". Chosen geometric conditions of registration on coincidences of two reaction products  $p + d \rightarrow p + p + n$  allow to observe their interaction with the large validity if nucleons in  $pp$ - or  $pn$ - pairs move in the same direction. Requirements and available conditions of preparation and undertaking kinematically complete experiment for registration on coincidences of two protons from deuteron breakup are discussed. The data for several sets of kinematic conditions of experiment are presented.

Надійшла до редакції 31.01.02,  
після доопрацювання – 05.04.02.