

**МЕТОДИКА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ  
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ**

**Ю. М. Павленко, В. О. Кива, І. М. Коломісць, В. М. Добріков, А. П. Войтер,  
І. О. Мазний, Б. А. Руденко, О. К. Горпинич, Ю. Я. Карлишев, А. А. Шведов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Розроблено методику для досліджень ядерних реакцій у багатопараметричних кореляційних експериментах. Комп'ютеризована вимірювальна система дозволяє визначати енергії продуктів реакцій, їх заряди та маси, реєструвати й аналізувати часові та енергетичні кореляції подій збігів двох чи трьох продуктів багаточастинкових реакцій. Методику апробовано в експериментах по дослідженню бінарних та тричастинкових каналів реакцій  $d + {}^6\text{Li}$  та  $\alpha + {}^7\text{Li}$ .

**Вступ**

У результаті ядерних реакцій у більшості випадків утворюється більше двох частинок у кінцевому стані. Умовою адекватності аналізу таких багаточастинкових реакцій є повне визначення їх кінематики, що забезпечується шляхом вимірювання часових та енергетичних кореляцій кількох продуктів взаємодії, які потрібно також ідентифікувати за зарядом та масою. Це зумовлює необхідність одночасного визначення багатьох параметрів. Оскільки швидкість реєстрації часових збігів продуктів реакцій в кореляційних експериментах досить низька, для підвищення ефективності використання прискорювачів застосовуються багатоканальні системи реєстрації, що також веде до збільшення кількості вимірюваних параметрів.

Можливості експериментальних досліджень ядерних реакцій значно зросли з комп'ютеризацією процесів накопичення та аналізу багатопараметричних даних. Раніше розроблені [1] вимірювальні комплекси були побудовані на основі комп'ютерів, що на сьогоднішній день морально та фізично застаріли [2].

У даній роботі наведено опис методики багатопараметричних експериментів, в якій для керування процесом вимірювань, збереження та аналізу експериментальних даних використовуються сучасні персональні комп'ютери. Розроблену методику було застосовано для вимірювань диференціальних перерізів бінарних та тричастинкових каналів реакцій  $d + {}^6\text{Li}$  та  $\alpha + {}^7\text{Li}$  на циклотроні У-120 Інституту ядерних досліджень НАН України.

**Реакційна камера та система детектування продуктів реакцій**

У проведених експериментах реєстрація продуктів реакцій здійснювалась за допомогою детекторів, установлених на двох рухомих платформах у камері "Д" (рис. 1), що розміщена в реакційному приміщенні № 1 циклотрона У-120. Завдяки великому розміру (діаметр 1600 мм, висота 800 мм), наявності вузла мішеней та чотирьох платформ, що незалежно обертаються навколо мішені, камера "Д" може використовуватись у багатьох ядерно-фізичних експериментах, у тому числі й кореляційних. Досить великий діаметр камери "Д" дозволяє також застосувати метод часу прольоту для визначення маси частинок.

Розмір пучка на мішені (діаметр  $\sim 3$  мм) визначався діафрагмами Д1 та Д2. Між цими діафрагмами встановлювалась захисна стінка із свинцю, а перед мішенями – свинцева діафрагма Д3 діаметром 30 мм та антирозсіювальна діафрагма Д4 діаметром 7 мм. Периферійна частина пучка прискорених частинок поглиналась діафрагмами, розташованими в магнітному залі циклотрона. Така система колімації пучка та радіаційного захисту дозволяла суттєво зменшити фонове навантаження на детектори. Моніторингування пучка здійснювалось за допомогою циліндра Фарадея та телескопа детекторів, встановленого під фіксованим кутом  $\Theta_{\text{мон}} = 20^\circ$ .

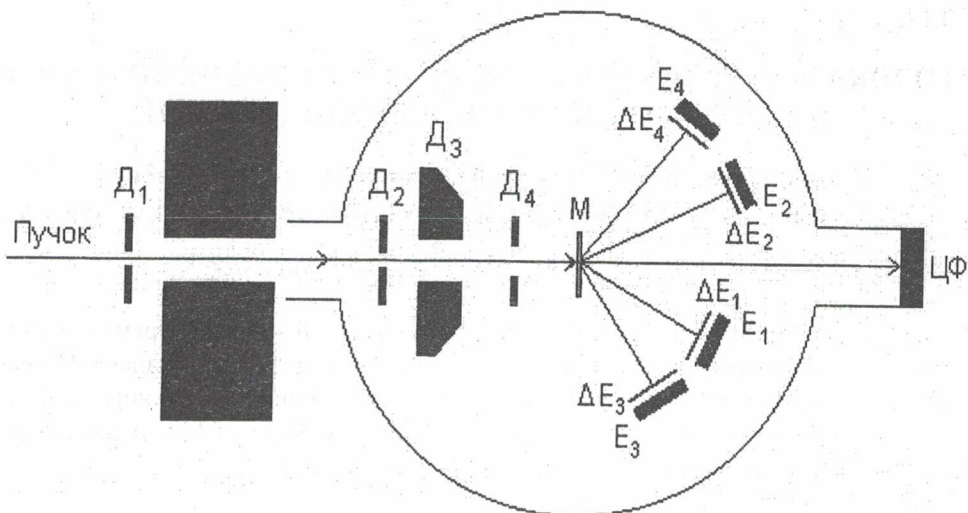


Рис. 1. Реакційна камера та схема колімації пучка прискорених частинок.

В якості мішеней використовувались тонкі плівки LiF товщиною 200 - 300 мкг/см<sup>2</sup> з природним вмістом ізотопів <sup>6,7</sup>Li та ізотопно-збагаченим вмістом (до 95 %) <sup>6</sup>Li. Мішені виготовлялись напилюванням <sup>6,7</sup>LiF на нікелеву підкладку товщиною 80 - 100 мкг/см<sup>2</sup>.

Для реєстрації, вимірювання енергії та ідентифікації продуктів ядерних реакцій за зарядом та масою використовувались телескопи напівпровідникових ΔE- та E-детекторів. Товщина E-детекторів вибиралася, виходячи з умови повного гальмування в них пружно розсіяних дейтронів та α-частинок, і становила ~ 600 мкм. Товщина ΔE-детекторів (30 - 50 мкм) визначалась енергетичним діапазоном реєстрації продуктів реакції та умовою їх розділення за масою.

Тілесні кути реєстрації частинок становили 10<sup>-2</sup> - 10<sup>-3</sup> ср. Енергетична роздільна здатність напівпровідникових детекторів визначалась за допомогою радіоактивного джерела <sup>226</sup>Ra і становила ~ 40 - 50 кеВ для α-частинок з енергією 4,8 - 7,7 МеВ.

З метою підвищення ефективності використання прискорювачів методикою передбачено застосування багатоканальних систем детектування. У даному експерименті реєстрація продуктів реакцій здійснювалась за допомогою чотирьох телескопів детекторів (рис. 1). Принципи побудови блок-схеми електроніки та програм накопичення даних дають змогу без принципових змін збільшувати кількість каналів реєстрації.

### Блок-схема вимірювальної системи для багатопараметричних експериментів

Розроблена методика забезпечує багатовимірний аналіз подій збігів від різних пар телескопів детекторів  $E_i \times \Delta E_i \times E_j \times \Delta E_j \times t_{ij} \times N_D$ , де  $i, j$  – номери ввімкнених у схему збігів телескопів,  $E_i, E_j$  – енергії продуктів реакції, що реєструються цими телескопами;  $\Delta E_i, \Delta E_j$  – втрати енергії частинок у ΔE-детекторах;  $N_D$  – код-ідентифікатор пари телескопів детекторів;  $t_{ij}$  – часовий спектр збігів (спектр амплітуд на виході конвертора „час - амплітуда”). Блок-схему електроніки вимірювальної системи для однієї з пар телескопів ( $i = 1$  та  $j = 2$ ) подано на рис. 2.

Спектрометричні сигнали від ΔE- та E-детекторів, підсилені зарядово-чутливими попередніми підсилювачами (ПП) [3] і спектрометричними підсилювачами (СП), через блоки лінійних стробованих змішувачів (ЛСЗ) поступають на блоки аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП). ЛСЗ стробуються сигналами кодувача НД, на вхід якого приходять сигнали часових збігів (у наносекундному діапазоні) відповідної пари телескопів.

Наносекундні сигнали з ПП підсилюються в часових підсилювачах (ЧП) [4] та стандартизуються за амплітудою і формою у формувачах Ф. На один із входів часових воріт (ЧВ) сигнали подаються через лінію затримки ЛЗ (для вирівнювання часів приходу сигналів

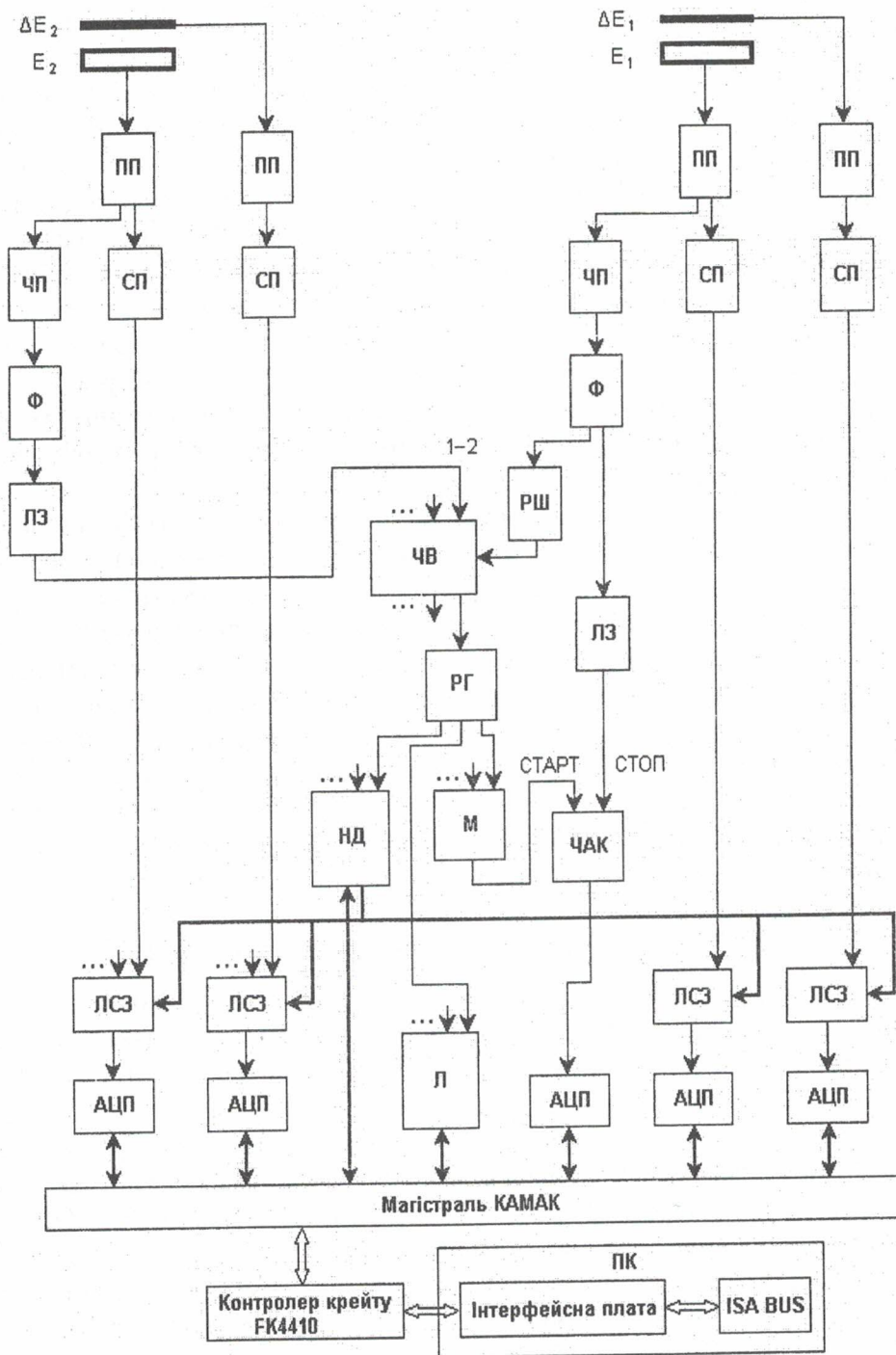


Рис. 2. Блок-схема електроніки для багатопараметричних вимірювань.

з телескопів 1 і 2). Розширювач (РШ) призначений для формування сигналів необхідної тривалості (400 нс) для керування блоком ЧВ. Сигнали збігів з ЧВ на блок НД подаються через розгалужувач (РГ). З РГ сигнали збігів подаються також на лічильник (Л) та мультиплексор (М), вихідний сигнал якого є сигналом „старт” для конвертора „час - амплітуда” (ЧАК). Сигналами „стоп” є часові сигнали від одного з телескопів (на рис. 2 це сигнал від телескопа 1). Модулі ЛСЗ та НД мають по вісім каналів, що дає змогу вимірювати вісім незалежних амплітудних розподілів за допомогою одного АЦП. Змішування сигналів на вхід „старт” конвертора ЧАК також дає можливість вимірювання часових розподілів сигналів збігів від восьми пар телескопів детекторів за допомогою одного АЦП. Електронні модулі Ф, ЛЗ, РШ, РГ, М, ЧАК, НД, ЛСЗ, Л, АЦП виготовлено в стандарті КАМАК. Принципи побудови деяких з цих модулів викладено в [5 - 7]. Майже всі електронні блоки

вимірювальної системи, окрім НД та ЛСЗ, можуть замінятись на інші, що мають аналогічні функціональні можливості.

Вимірювальна система може бути доповнена ще кількома блоками ЛСЗ та АЦП. Зокрема, це необхідно при реєстрації збігів трьох продуктів реакцій. У цьому випадку аналізуються такі параметри подій:  $E_1 \times \Delta E_1 \times E_2 \times \Delta E_2 \times E_3 \times \Delta E_3 \times t_{12} \times t_{23} \times N_D$ . По два додаткових ЛСЗ і АЦП потрібні для аналізу сигналів  $\Delta E$ - та  $E$ -детекторів третього телескопа, а ще один АЦП – часових спектрів збігів сигналів пари телескопів 2 - 3. Кореляційні вимірювання в режимі потрібних збігів забезпечуються шляхом одночасної реєстрації збігів сигналів пар телескопів 1-2 та 2-3. З відповідних схем подвійних збігів сигнали подаються на змішувач, вихідний сигнал якого подається на один з входів НД. У цьому блоці формується код-ідентифікатор подій реєстрації пари подвійних (1-2, 2-3) та потрібних (1-2-3) збігів. Розділити між собою подвійні збіги можна вибіркою подій у відповідних часових спектрах, що реєструються окремими АЦП, а для відбору потрібних збігів необхідно аналізувати двовимірний часовий спектр  $t_{12} - t_{23}$ .

Багатоканальні лічильники використовуються для підрахунку: сумарної кількості накопичуваних подій; кількості подій по кожному з восьми кодів НД, що відповідають збігам різних пар телескопів детекторів; кількості подій, що реєструються встановленими під фіксованими кутами детекторами (або телескопами), які призначені для контролювання інтенсивності пучка та ефективної товщини мішені; кількості вихідних імпульсів зарядових інтеграторів, які з'єднані з елементами системи колімації пучка та циліндром Фарадея. За допомогою останнього контролюється кількість бомбардуючих мішень частинок.

Подальший аналіз спектрометричних сигналів здійснюється за допомогою персонального комп'ютера (ПК). Для обміну даних між функціональними модулями крейта КАМАК і ПК використовується контролер крейта КАМАК ФК4410-1, який сполучається з ПК за допомогою інтерфейсної плати.

### Програма накопичення експериментальних даних

Для керування процесом накопичення експериментальних даних та їх аналізу було розроблено спеціальний пакет програм з використанням мови програмування С. Традиційно програмне забезпечення системи автоматизації вимірювань на пучках прискорювачів функціонально розбивається на кілька підсистем, призначених для: безпосереднього збору даних з вимірювальної апаратури; відображення отриманої інформації у вигляді гістограм; організації файлової підтримки для збереження даних; обробки отриманих результатів.

Програмою накопичення даних функціональні модулі крейта КАМАК АЦП, НД та лічильники налаштовуються на реєстрацію сигналів. Коли надходить сигнал на НД, той посилає на ПК сигнал запиту на обслуговування, яким інформує, що потрібно зчитувати дані з АЦП і НД. Після того як дані прочитані, АЦП і НД готові реєструвати нові сигнали. Зчитування даних з АЦП, НД і лічильників забезпечується за допомогою контролера КАМАК ФК4410-1 через інтерфейсну плату ПК, доступ до якої здійснюється через 16 регістрів на шині ISA (на відміну від комп'ютерів типу СМ, де здійснювався прямий доступ на весь адресний простір крейта). Ця обставина накладає обмеження на час виконання і, у зв'язку з цим, на обсяг програмного коду для обміну даними з крейтом. Для мінімізації втрат часу було застосовано лінійну конвейерну технологію переробки даних, що дало змогу звести до мінімуму використання операторів розгалуження, циклів і умовних переходів. Виявляти сигнал запиту на обслуговування можна двома способами: за допомогою традиційного апаратного переривання від ФК4410-1 з наступною ідентифікацією запиту або безпосереднього сканування певних функціональних модулів. Хоча другий спосіб менш раціональний, зате дозволяє збільшити пропускну здатність системи в 1,5 - 2 рази. При малій інтенсивності (3 - 5 кГц) краще використовувати режим переривань, тому що він дозволяє крім набору даних, робити візуалізацію й попередню обробку в реальному часі впродовж вимірювань.

У систему також включено кілька сервісних програм: текстовий редактор для запису в текстовий блок супровідної інформації по експерименту; програму налагодження системи накопичення та керування електронними модулями; програму діалогу з оператором і відображення поточного стану системи; програми візуалізації в режимі "on line" одновимірних і двовимірних гістограм.

Перед початком вимірювань необхідно задати входні параметри, а саме: кількість АЦП; кількість лічильників; час накопичення подій або їх максимальну кількість, досягнувши яку експозиція буде зупинена; ім'я файла для запису даних. Можна також записати в текстовий блок файлу супровідну інформацію (дату виконання експерименту, тип досліджуваної реакції, енергію пучка прискорених частинок, товщину мішені та кут між її площиною та напрямком пучка, кути розміщення детекторів тощо).

Для контролю процесу вимірювань передбачено можливість у режимі "on line" відображати на екрані ПК поточну кількість зареєстрованих подій, інтенсивність реєстрації, кількість подій, що реєструються кожним лічильником, а також можливість сортування і візуалізації одновимірних і двовимірних гістограм по заздалегідь заданих параметрах накопичуваних даних.

Збереження даних здійснюється з використанням механізму так званого віртуального каналу передачі даних. Такий канал являє собою буфер у пам'яті комп'ютера, який характеризується об'ємом, ознаками поточного стану та описом дій на момент його наповнення. Цей метод дає змогу організувати набір даних по чергово в кілька буферів з наступним їх записом на локальний або мережевий диск.

### **Програма сортування експериментальних даних**

Основний аналіз експериментальних даних, зважаючи на багатопараметричність вимірювань, здійснюється в режимі "off line". Для цього створена спеціальна програма, що дає змогу виконувати ряд послідовних процедур сортування одновимірних та двовимірних гістограм, що відповідають енергетичним та часовим розподілам накопичених подій. Керування процесом сортування здійснюється шляхом вибору необхідних процедур, перелік яких відображається на екрані ПК при запуску програми.

Для отримання одновимірних гістограм необхідно у відповідних вікнах на екрані ПК задати параметри сортування даних, а саме: номер АЦП; розмірність гістограми ( $n \cdot 128$  каналів, де  $n = 1 - 8$ ); кількість та діапазон каналів амплітудного розподілу, що включаться в аналіз (повний діапазон амплітуд відповідає 1024 каналам). При сортуванні двовимірних гістограм вказані параметри задаються для двох АЦП. Усі процедури сортування здійснюються за заданим кодом НД (від 0 до 7), за допомогою якого вибирається один з телескопів детекторів (у випадку реєстрації одного з продуктів реакції) або пара ввімкнених у схему збігів телескопів. Потрібний файл, що містить накопичені дані, вибирається зі списку, який подається в окремому вікні на екрані ПК. В одне з вікон заноситься також ім'я файлу гістограми, що буде отримана в результаті сортування. Кожна процедура закінчується графічним відображенням двовимірної чи одновимірної гістограми.

При сортуванні на параметри подій можуть бути накладені певні обмеження. Для цього передбачено виконання підготовчих процедур: створення обмежувальних масок в одній або кількох попередньо отриманих двовимірних гістограмах та обмежувальних вікон в одновимірних гістограмах. У наступних процедурах сортування відбираються тільки ті події, що відповідають заданим маскам та вікнам. Всього може бути використано по вісім масок та вікон. Режими сортування з вказаними обмеженнями необхідні, зокрема для забезпечення ідентифікації типу зареєстрованих частинок та досліджуваного каналу реакції, визначення фону випадкових збігів тощо.

Програмою передбачено також можливості різних перетворень накопичених амплітудних розподілів, наприклад сумування амплітуд сигналів з  $\Delta E$ - та  $E$ -детекторів з метою визначення повної енергії частинок. Сумарні амплітуди  $U_{\Sigma}$ , які повинні бути пропорційні повним енергіям частинок, визначаються як

$$U_{\Sigma} = U_{E-\Delta E} + C \cdot U_{\Delta E},$$

де  $U_{\Delta E}$  – амплітуда, пропорційна енергетичним втратам в  $\Delta E$ -детекторах;  $U_{E-\Delta E}$  – амплітуда, пропорційна енергетичним втратам в  $E$ -детекторах;  $C = K_E/K_{\Delta E}$  – відношення коефіцієнтів підсилення  $K_E$ ,  $K_{\Delta E}$  у спектрометричних трактах  $E$ - та  $\Delta E$ -детекторів відповідно. У деяких випадках доцільно сортувати дані в режимі випрямлення локусів, що відповідають у  $\Delta E$ - $E$ -спектрах різним типам частинок. Це забезпечується перетворенням амплітуд сигналів з  $\Delta E$ -детекторів згідно з виразом

$$U'_{\Delta E} = [U_{E-\Delta E} + C \cdot U_{\Delta E}]^{\alpha} - (U_{E-\Delta E})^{\alpha},$$

де значення коефіцієнта  $\alpha \sim 1,7$  підбирається окремо для кожного з телескопів детекторів.

Після калібрування (перетворення амплітудних розподілів в енергетичні) та їх нормування на коефіцієнт, який враховує загальну кількість бомбардуючих мішень частинок, товщину мішені, тілесні кути детекторів та дискретність вимірювання енергій частинок, з отриманих у результаті сортування одновимірних та двовимірних гістограм (спектрів) визначаються відповідні диференціальні перерізи реакцій.

### Результати тестування методики в інклюзивних та кореляційних експериментах

Методику апробовано в експериментах по дослідженню процесів збудження та розпаду незв'язаних станів ядер  ${}^6,7\text{Li}^*$  в реакціях  ${}^6\text{Li}(d, d){}^6\text{Li}^*$ ,  ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}^*$  та  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha){}^7\text{Li}^*$ . Експерименти виконано на пучках прискорених дейтронів ( $E_d = 13,6$  МеВ) та  $\alpha$ -частинок ( $E_{\alpha} = 27,2$  МеВ) циклотрона У-120.

Типові енергетичні  $\Delta E$ - $E$ -спектри продуктів взаємодії дейтронів з ядрами мішені  ${}^6\text{LiF}$  та  $\alpha$ -частинок з  ${}^7\text{LiF}$  наведено на рис. 3. З цих рисунків видно, що методика забезпечує надійне розділення за масою ізотопів водню та гелію у всьому енергетичному діапазоні. Верхня межа вимірювання енергії протонів (9 МеВ) визначалась сумарною товщиною  $\Delta E$ - та  $E$ -детекторів. Відсутність у спектрі на рис. 3, б помітного внеску реакцій  $(\alpha, {}^3\text{He})$  обумовлена високим порогом цих ендоенергетичних реакцій.

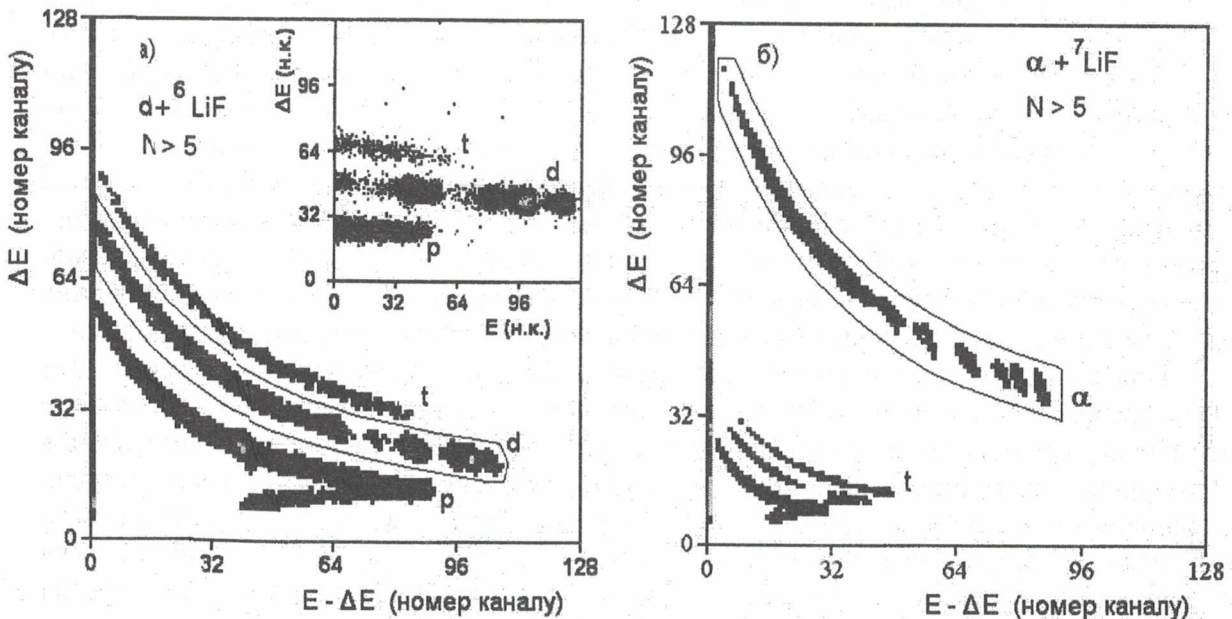


Рис. 3.  $\Delta E$ - $E$ -спектри продуктів реакцій: а –  $d + {}^6\text{LiF}$ ,  $E_d = 13,6$  МеВ,  $\Theta = 45^\circ$ ; б –  $\alpha + {}^7\text{LiF}$ ,  $E_{\alpha} = 27,2$  МеВ,  $\Theta = 34^\circ$ . Суцільні лінії – контури обмежувальних масок для сортування спектрів дейтронів (а) та  $\alpha$ -частинок (б).

Розмірність усіх накопичених амплітудних розподілів становить 1024 канали на діапазон 0 - 5 чи 0 - 10 В. Програмою сортування передбачено відображення двовимірних гістограм з розмірністю  $128 \times 128$  каналів, тобто в режимі 8-кратного стиснення повного діапазону амплітуд кожного з розподілів. При необхідності двовимірні гістограми можна сортувати з максимальною розмірністю ( $1024 \times 1024$  канали) та відобразити потрібні ділянки спектрів у режимі  $128 \times 128$  каналів (див., наприклад, фрагмент  $\Delta E$ -E-спектра у верхній правій частині рис. 3, а).

Енергетичні спектри продуктів реакцій отримували шляхом відбору тільки тих зареєстрованих подій, що відповідають тому чи іншому типу частинок (наприклад, дейтронів на рис. 3, а та  $\alpha$ -частинок на рис. 3, б). Результати сортування із вказаними обмеженнями на параметри накопичених подій та сумуванням амплітуд сигналів з  $\Delta E$ - та E-детекторів наведено на рис. 4. У спектрах на цих рисунках чітко видно піки, що відповідають процесам пружного та непружного розсіяння дейтронів та  $\alpha$ -частинок ядрами  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{19}\text{F}$  та Ni. При низьких енергіях спостерігається континуум, обумовлений реєстрацією дейтронів (рис. 4, а) та  $\alpha$ -частинок (рис. 4, б) як продуктів розпаду ряду незв'язаних станів ядер, що збуджуються при непружному розсіянні та в інших супутніх каналах реакцій [8].

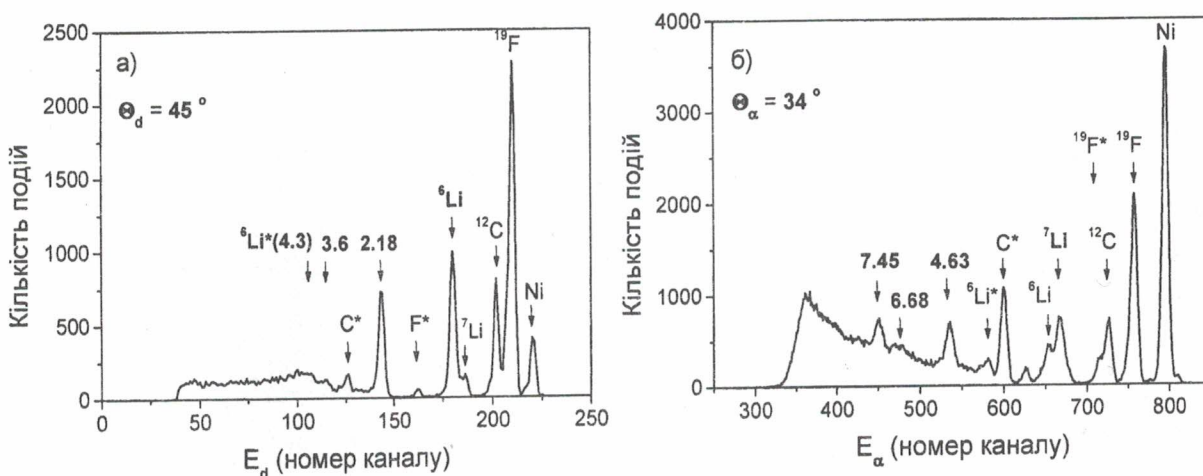


Рис. 4. Енергетичні спектри дейтронів та  $\alpha$ -частинок з реакцій: а -  $d + {}^6\text{LiF}$ ,  $E_d = 13,6$  MeV,  $\Theta = 45^\circ$ ; б -  $\alpha + {}^7\text{LiF}$ ,  $E_\alpha = 27,2$  MeV,  $\Theta = 34^\circ$ . Стрілками показано енергії дейтронів та  $\alpha$ -частинок, які відповідають внескам пружного та непружного розсіяння цих частинок ядрами  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{19}\text{F}$  та Ni.

Сумарна енергетична роздільна здатність реєстрації дейтронів з енергією  $E_d = 11$  MeV та  $\alpha$ -частинок з енергією  $E_\alpha = 24$  MeV становила  $\Delta E_d = 150$  keV та  $\Delta E_\alpha = 240$  keV і визначалась, в основному, немонохроматичністю пучків прискорених частинок.

Завантаження кожного зі спектрометричних трактів у ході експерименту не перевищували 1 кГц. Це забезпечувало незначну кількість прорахунків (2 - 3 %) подій при вимірюванні інклюзивних спектрів продуктів реакцій та задовільне значення співвідношення дійсних та випадкових збігів у кореляційних спектрах. Для забезпечення вимірювань інклюзивних спектрів при значно більших завантаженнях детекторів та збереження мінімальних прорахунків водночас вимірювальну систему в майбутньому доцільно доповнити буферами, що підключаються до кожного з АЦП [2]. У цьому випадку час зчитування кожної багатопараметричної події не буде залежати від кількості АЦП.

Інклюзивні спектри продуктів досліджуваних реакцій вимірювалися в діапазоні кутів  $\Theta = 25 - 50^\circ$  (у лабораторній системі координат). З аналізу цих спектрів було визначено диференціальні перерізи  $d\sigma/d\Omega$ , що характеризують імовірність збудження незв'язаних станів ядер  ${}^{6,7}\text{Li}^*$ . Отримані значення перерізів реакцій були необхідні, зокрема для визначення оптимальних умов вимірювання в кореляційних експериментах імовірностей розпаду біляпорогового резонансу  ${}^7\text{Li}^*$  (7,45 MeV) [9].

Аналіз даних кореляційних експериментів полягав у виконанні ряду процедур сортування багатопараметричних подій ( $E_1 \times \Delta E_1 \times E_2 \times \Delta E_2 \times t \times N_D$ ), які було накопичено для чотирьох ввімкнених попарно у схему часових збігів (див. рис. 1 і 2) телескопів  $\Delta E$ - та  $E$ -детекторів. Відбір необхідного типу частинок, як і у випадку інклюзивних експериментів, здійснювався шляхом сортування (для кожного з телескопів детекторів)  $\Delta E$ - $E$ -спектрів та виділення в них відповідних обмежувальних масок.

Важливим елементом кореляційних експериментів є аналіз часових розподілів подій. Приклад часового спектра збігів продуктів багаточастинкових каналів реакцій  $\alpha + {}^7\text{LiF}$  показано на рис. 5, а. З метою визначення фону випадкових збігів діапазон вимірювання часових спектрів було розширено до  $\Delta t = 300$  нс. Форма спектра на рис. 5, а відображає імпульсний характер розподілу пучка прискорених  $\alpha$ -частинок. Величина часових проміжків ( $\Delta t = 92$  нс) між сусідніми згустками циклотронного пучка визначається частотою ВЧ-генератора. Область спектра, що позначена на рис. 5, а цифрою 1, відповідає реєстрації двох продуктів реакцій, які утворюються при взаємодії з ядрами мішені  $\alpha$ -частинок з одного згустка. Ця частина спектра містить як події дійсних часових збігів, так і фонові події випадкових збігів. Внесок останніх можна визначити по кількості збігів в областях спектра, позначених на рис. 5, а цифрою 2. Ці події відповідають реєстрації двох продуктів взаємодії з ядрами мішені бомбардуючих  $\alpha$ -частинок з різних згустків.

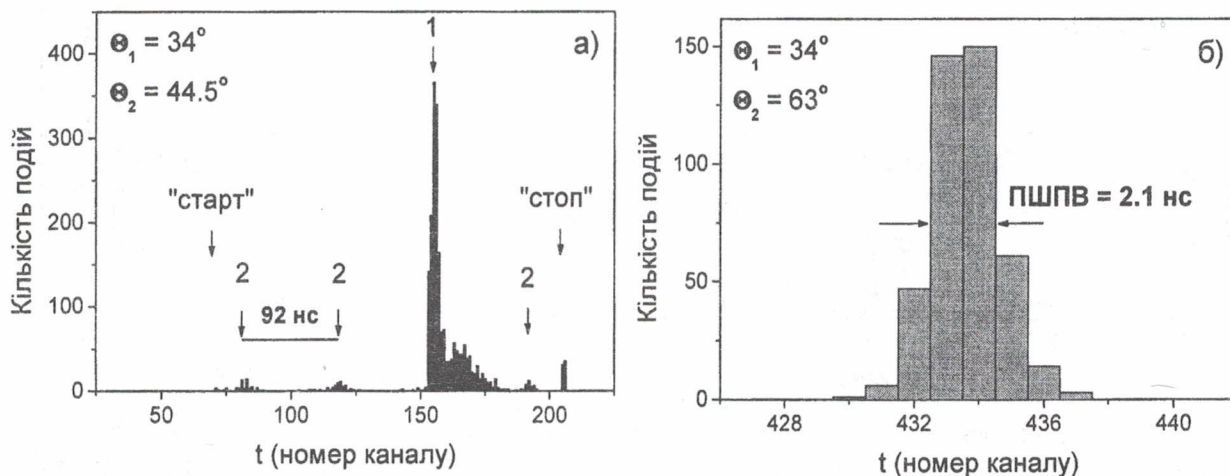


Рис. 5. а – часовий спектр збігів продуктів багаточастинкових каналів реакцій  $\alpha + {}^7\text{LiF}$ , що реєструвались під кутами  $\Theta_1 = 34^\circ$ ,  $\Theta_2 = 44,5^\circ$ ,  $\varphi_1 - \varphi_2 = 180^\circ$ , б – часовий спектр збігів  $\alpha$ -частинок ( $\Theta_1 = 34^\circ$ ) з ядрами  ${}^7\text{Li}$  ( $\Theta_{\text{Li}} = 63^\circ$ ) з реакції  $\alpha + {}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$ .

Такий метод визначення фону випадкових збігів є достатньо обґрунтованим за умови рівномірного розподілу частинок у сусідніх згустках, що і спостерігалось у даному експерименті. Крім того, кількість дійсних збігів у часовому спектрі значно перевищує фон випадкових збігів, що свідчить про сприятливі умови для проведення кореляційних вимірювань.

У спектрі, зображеному на рис. 5, а, спостерігається досить складний розподіл подій, що пов'язано з реєстрацією збігів різного типу частинок з різною енергією. Тому часова роздільна здатність ( $\Delta t = 2,1$  нс) визначалась вимірюванням спектрів збігів продуктів бінарних реакцій, наприклад  $\alpha + {}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$  (рис. 5, б). У цьому випадку пружно розсіяна  $\alpha$ -частинка та ядро віддачі  ${}^7\text{Li}$ , що реєструються під кутами  $\Theta_1$  та  $\Theta_2$  відповідно, мають фіксовані значення енергії.

Подальші процедури сортування виконувались з урахуванням вибраних обмежень на параметри зареєстрованих подій у  $\Delta E$ - $E$ -спектрах та спектрах ЧАК. В останніх з метою врахування фону випадкових збігів виділялись вікна, що відповідають областям 1 і 2 (див. рис. 5, а).



Двовимірний енергетичний спектр збігів заряджених частинок, що є продуктами тричастинкових реакцій  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha\alpha)t$  та  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha{}^6\text{Li})n$ , наведено на рис. 6. Ідентифікація  $\alpha$ -частинок, які реєструвались під кутом  $\Theta_1 = 34^\circ$ , здійснювалась попереднім сортуванням  $\Delta E$ - $E$ -спектрів та виділенням у них відповідних подій. Основна мета експерименту полягала у визначенні співвідношення гілок розпаду збудженого стану ядра  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$  по каналах  $\alpha + t$  та  ${}^6\text{Li} + n$ . Важливою умовою такого дослідження є ідентифікація каналу реакції  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha{}^6\text{Li})n$  [9]. Енергія ядер  ${}^6\text{Li}$  як продукту розпаду  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$  є досить низькою (3 - 5 MeV) і вимірювалась за допомогою  $\Delta E$ -детектора телескопа, встановленого під кутом  $\Theta_2$ . Для відбору подій, що відповідають реєстрації низькоенергетичних ядер  ${}^6\text{Li}$ , від інших, пов'язаних з реєстрацією частинок з меншою масою, застосовано метод антизбігу сигналів з  $\Delta E$ - та  $E$ -детекторів. Режим антизбігу цих сигналів забезпечувався без залучення додаткових електронних модулів, оскільки такі події записувались у нульовий канал на виході АЦП спектрометричного тракту  $E$ -детектора і відбирались сортуванням з вікном, що відповідає нульовому каналу.

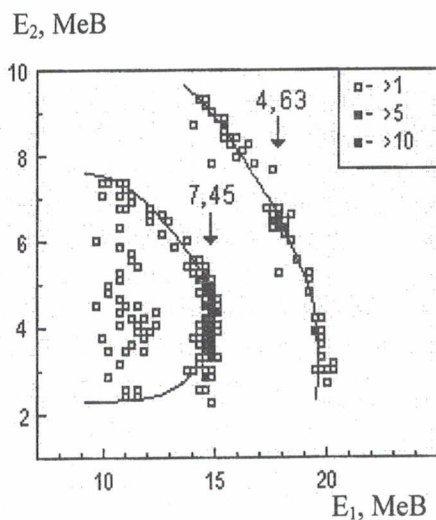


Рис. 6. Спектр збігів  $\alpha$ -частинок, що реєструвались під кутом  $\Theta_1 = 34^\circ$ , з ядрами  ${}^6\text{Li}$  та  ${}^4\text{He}$  ( $\Theta_2 = 44,5^\circ$ ) в області енергій, які відповідають збудженню та розпаду незв'язаних станів  ${}^7\text{Li}^*(4,63 \text{ MeV})$  та  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$ . Лініями показано кінематичні криві для каналів реакцій  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha\alpha)t$  (справа) та  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha{}^6\text{Li})n$  (зліва).

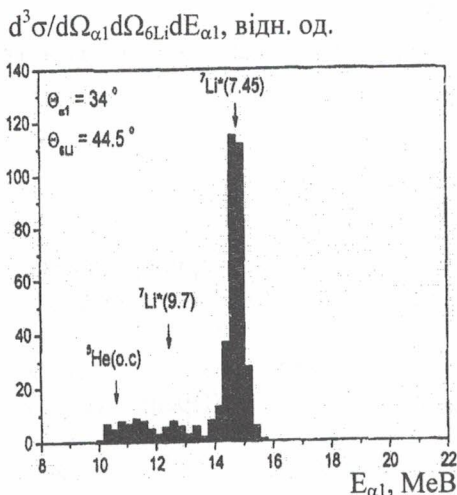


Рис. 7. Кореляційний спектр  $\alpha$ -частинок із реакції  $\alpha + {}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^6\text{Li} + n$  ( $\Theta_\alpha = 34^\circ$ ,  $\Theta_{6\text{Li}} = 44,5^\circ$ ,  $\varphi_\alpha - \varphi_{6\text{Li}} = 180^\circ$ ).

Завдяки різниці енергетичних балансів реакцій  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha\alpha)t$  та  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha{}^6\text{Li})n$  ( $Q = -2,47$  та  $-7,25 \text{ MeV}$  відповідно), їх внески спостерігаються в різних областях  $E_1$ - $E_2$ -спектра (див. рис. 6). Кореляційний спектр  $\alpha$ -частинок з реакції  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha{}^6\text{Li})n$  (рис. 7) отримано в результаті сортування подій з усіма вказаними вище обмеженнями на їх параметри та з обмежувальною маскою, що відповідає в  $E_1$ - $E_2$ -спектрі (дав. рис. 6) цьому каналу реакції.

На рис. 7 стрілками позначено значення енергій  $\alpha$ -частинок, при яких згідно з розрахунками повинні спостерігатись внески процесів збудження та розпаду незв'язаних

станів ядер  ${}^7\text{Li}^*$ ,  ${}^5\text{He}$ . Найбільш інтенсивний пік у спектрі відповідає внеску процесу збудження та розпаду в реакції  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha'{}^6\text{Li})n$  стану ядра  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$  в канал  ${}^6\text{Li} + n$ . Для визначення ймовірності розпаду в цей канал вимірювались кутові кореляції непружно розсіяних під кутом  $\Theta_1 = 34^\circ = \text{const}$   $\alpha$ -частинок з ядрами  ${}^6\text{Li}$ . З метою охопити практично увесь просторовий конус розпаду ядра  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$  ядра  ${}^6\text{Li}$  реєструвались в діапазоні кутів  $\Delta\Theta = \Delta\varphi = 12^\circ$  навколо напрямку емісії ядра  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$ . Повний переріз процесу розпаду ядра  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$  у канал  ${}^6\text{Li} + n$  ( $d\sigma_{\text{dec}}/d\Omega_{6\text{Li}}$ ) визначався інтегруванням кутових кореляційних розподілів, а ймовірність збудження (переріз  $d\sigma_{\text{exc}}/d\Omega_\alpha$ ) – зі спектрів непружно розсіяних  $\alpha$ -частинок (див. рис. 4, б).

Отримане значення відношення диференціальних перерізів  $(d\sigma_{\text{dec}}/d\Omega_{6\text{Li}})/(d\sigma_{\text{exc}}/d\Omega_\alpha) = 0,49 \pm 0,06$  характеризує повну ймовірність розпаду ядра  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$  в канал  ${}^6\text{Li} + n$ . Це значення суттєво відрізняється від даних, отриманих для бінарних реакцій, що може бути пояснено як результат впливу кулонівського поля супутньої  $\alpha$ -частинки на розпад короткоживучих незв'язаних ядер [9].

### Висновки

Розроблено та тестовано методику багатопараметричних вимірювань для досліджень ядерних реакцій у кінематично повних та неповних експериментах, яка дає змогу вимірювати енергію продуктів реакцій та ідентифікувати їх за зарядом та масою, реєструвати енергетичні та часові розподіли подій збігів двох чи трьох продуктів взаємодії, що забезпечує повне визначення кінематики три- та чотиричастинкових реакцій.

Методику було використано для досліджень процесів збудження та розпаду незв'язаних станів ядер  ${}^6,7\text{Li}^*$  в тричастинкових каналах реакцій  ${}^6\text{Li}(d, d){}^6\text{Li}^*$ ,  ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}^*$  та  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha){}^7\text{Li}^*$ . У виконаних на циклотроні У-120 кінематично повних та неповних експериментах визначено диференціальні перерізи цих реакцій та отримано нові дані про співвідношення гілок розпаду ядра  ${}^7\text{Li}^*(7,45 \text{ MeV})$ .

Розроблені система реєстрації, програми накопичення та аналізу даних можуть бути використані для досліджень ядерних реакцій у багатопараметричних експериментах на інших прискорювачах, зокрема на циклотроні У-240 (як елементи вимірювального комплексу [10]) та тандем-генераторі ЕГП-10К ІЯД НАН України.

Робота виконувалась за фінансовою підтримкою Міністерства освіти і науки (грант Фонду фундаментальних досліджень 02.07/00244).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Зеркин В.З.* MANY – программная система интерактивной обработки ядерно-физической экспериментальной информации. - Киев, 1990. - 17 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-90-7).
2. *Зеркин В.З.* Состояние и пути развития систем автоматизации ядерно-физического эксперимента в Институте ядерных исследований НАН Украины. - Киев, 2001. - 11 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-01-5).
3. *Ткач Н.М., Анин А.А., Шидлык А.М., Скляренко В.Д.* Предусилитель для полупроводниковых детекторов большой емкости. - Киев, 1978. - 8 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-78-2).
4. *Ткач Н.М.* Предусилители и усилители сигналов от кремниевых поверхностно-барьерных детекторов для исследования заряженных частиц. - Киев, 1976. - 11 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-76-15).
5. *Марченков В.В., Циунелис В.Г.* Наносекундная задержка с повышенной стабильностью на интегральных элементах // VIII Междунар. симпоз. по ядерной электронике (Дубна, 1975 г.). - С. 65 - 68.
6. *Левченко П.М., Марченков В.В.* Время - амплитудный конвертер // Там же. - С. 69 - 72.

7. Грашин В.А., Литваковская Е.Д., Любанский Г.Б. и др. Набор модулей КАМАК широкого применения с пониженной потребляемой мощностью. - Киев, 1986. - 11 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-86-19).
8. Немец О.Ф., Павленко Ю.Н., Пугач В.М. Структура инклюзивных спектров трехчастичных ядерных реакций // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1989. - Т. 53, № 11. - С. 2183 - 2187.
9. Nemets O.F., Pavlenko Yu.N., Shablov V.L. et al. Decay of  ${}^7\text{Li}^*$  (7,45 MeV) unbound state in reaction  ${}^7\text{Li}(\alpha, \alpha){}^7\text{Li}^*$  // Программа и тез. докл. 54 Междунар. совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Белгород, 22 - 25 июня 2004 г.). - С.-П., 2004. - С. 171.
10. Гранцев В.І., Грашин В.О., Дей Ю.О. та ін. Модернізований експериментальний комплекс для дослідження ядерних реакцій на прискорювачі У-240 // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2004. - №1 (12). - С. 108 - 113.

### МЕТОДИКА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Ю. Н. Павленко, В. А. Кива, И. Н. Коломиец, В. Н. Добриков, А. П. Войтер,  
И. А. Мазный, Б. А. Руденко, О. К. Горпинич, Ю. Я. Карлышев, А. А. Шведов

Разработана методика для исследований ядерных реакций в многопараметрических корреляционных экспериментах. Компьютеризированная измерительная система позволяет определять энергии продуктов реакций, их заряды и массы, регистрировать и анализировать временные и энергетические корреляции событий совпадений двух или трех продуктов многочастичных реакций. Методика апробирована в экспериментах по исследованию бинарных и трехчастичных каналов реакций  $d + {}^6\text{Li}$  и  $\alpha + {}^7\text{Li}$ .

### THE METHODS OF MULTIPARAMETER CORRELATION MEASUREMENTS FOR THE STUDY OF NUCLEAR REACTIONS

Yu. N. Pavlenko, V. O. Kyva, I. N. Kolomiets, V. N. Dobrikov, A. P. Vojter,  
I. O. Mazny, B. A. Rudenko, O. K. Gorpnich, Yu. Ya. Karlyshev, A. A. Shvedov

The methods and procedures of multi-parameter correlation experiments for the study of nuclear reactions are developed. Computerized measurement system allows to determine the energy of reaction products, their charge and mass, to register and analyze the time and energy correlations of two- or three-particle coincident events. Developed system was tested and used in the experiments for the study of binary and three particle reactions  $d + {}^6\text{Li}$  and  $\alpha + {}^7\text{Li}$ .

Надійшла до редакції 11.03.05,  
після доопрацювання – 06.04.05.