

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ НА ВАРШАВСЬКОМУ ЦИКЛОТРОНІ U-200P

В. К. Чернієвський¹, К. Русек², А. Будзановські³, А. Т. Рудчик¹, Я. Дворські⁴,
Л. Земло⁴, В. М. Кир'янчук¹, С. Клічевські³, Є. І. Кошій⁵, С. Ю. Межевич^{1,2},
В. Мельчарек², І. Сквірчинська³, Р. Сюдак³, Б. Чех³

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Інститут ядерних досліджень ім. А. Солтана, Варшава

³ Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків

⁴ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава

⁵ Харківський державний університет, Харків

Описано експериментальну установку, створену для дослідження ядерних реакцій під дією важких іонів на Варшавському циклотроні U-200P. Наведено конструктивні дані обладнання установки, методи та контроль за формуванням пучка іонів на мішені, характеристики детекторної, електронної та накопичувально-аналізуючої систем вимірювань, дані про зарядову, ізотопну та енергетичну роздільні здатності установки.

На циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету українсько-польською науковою групою проводиться комплекс досліджень ядерних реакцій під дією важких іонів з метою вивчення ядро-ядерної взаємодії в каналах реакцій з радіоактивними та нестабільними ядрами, одно- і багатоступінчастих механізмів передачі кластерів, оболонкової та кластерної структури ядер, а також здійснюються пошуки нових збуджених станів ядер. Для цього проводиться вимірювання кутових розподілів реакцій у повному кутовому діапазоні. Отримані експериментальні дані комплексно аналізуються в рамках методу зв'язаних каналів реакцій (МЗКР). Одночасний аналіз багатьох каналів експериментальних даних забезпечує зменшення невизначеностей параметрів теоретичних моделей.

Для реалізації вищезазначеної програми досліджень на циклотроні U-200P Лабораторії важких іонів Варшавського університету створено експериментальну установку SYRENA (рис. 1). До установки належать:

- а) реакційна камера 13, в центрі якої розміщується мішень;
- б) система формування пучка іонів на мішені за допомогою квадрупольних лінз 1, 2 та колімаційних діафрагм 10 - 12;
- в) система візуального контролю пучка за допомогою телекамери 3;
- г) система моніторингу пучка іонів з використанням накопичуваного в циліндрі Фарадея 14 заряду.

На рис. 2. показано схему реакційної камери. Камера діаметром 800 і висотою 400 мм виготовлена з нержавіючої сталі, усередині має дві (верхню та нижню) кругові поворотні детекторні платформи 2 і 3 для розміщення спектрометрів. У центрі камери на штоку 4 кріпиться рамка з мішенями 5. Шток може рухатись вертикально й обертатись навколо своєї осі. Положення штока визначається за допомогою шкали 7. Поворот детекторних платформ здійснюється дистанційно або вручну з точністю до 10'. Лімби 8 і 9 служать для контролю за положенням детекторних платформ. Спостереження лімбів проводиться через спеціальні оглядові вікна. Встановлення експериментального обладнання в реакційну камеру проводиться зверху при відкритій верхній кришці реакційної камери.

Розміщення спектрометрів у реакційній камері та діафрагмування пучка іонів показано на рис. 3. Пучок іонів формувався на мішені за допомогою антифонової діафрагми діаметром 10 мм, формуючої діафрагми діаметром 2,9 мм та антирозсіювальної діафрагми діаметром 4,5 мм. Відстані між діафрагмами на рисунку вказано в міліметрах. Пучок іонів поглинався в циліндрі Фарадея, розміщеному зовні на корпусі реакційної камери, і монітору-

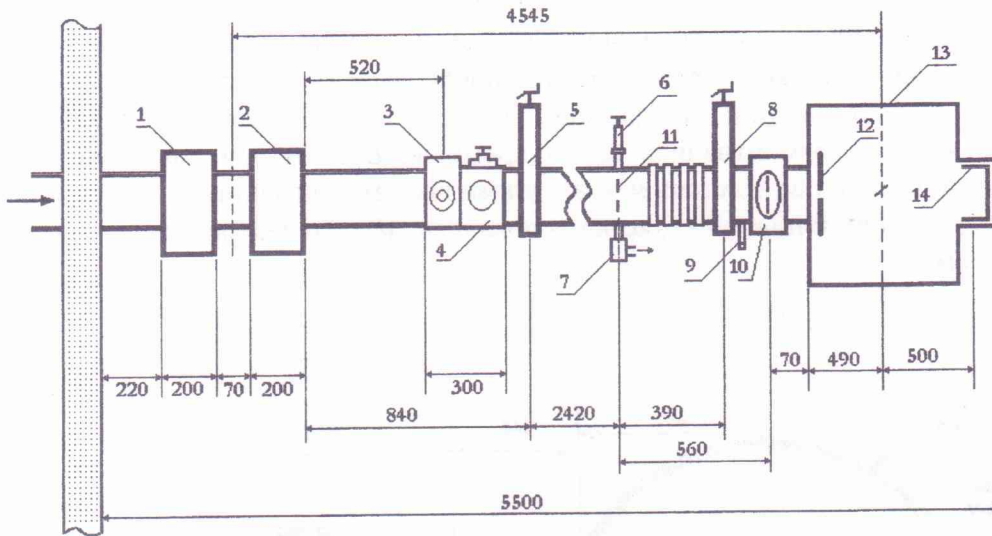


Рис. 1. Схема розміщення експериментальної установки SYRENA на іонопроводі:
 1, 2 – квадрупольна лінза; 3 – телекамера; 4 – система діагностики пучка; 5, 8 – шибери; 6 – шток антифонової діафрагми; 7, 9 – вентиля напуску повітря; 10 – формуюча діафрагма; 11 – антифонова діафрагма; 12 – антирозсіювальна діафрагма; 13 – камера розсіювання; 14 – циліндр Фарадея. Відстані між обладнанням установки наведено в міліметрах.

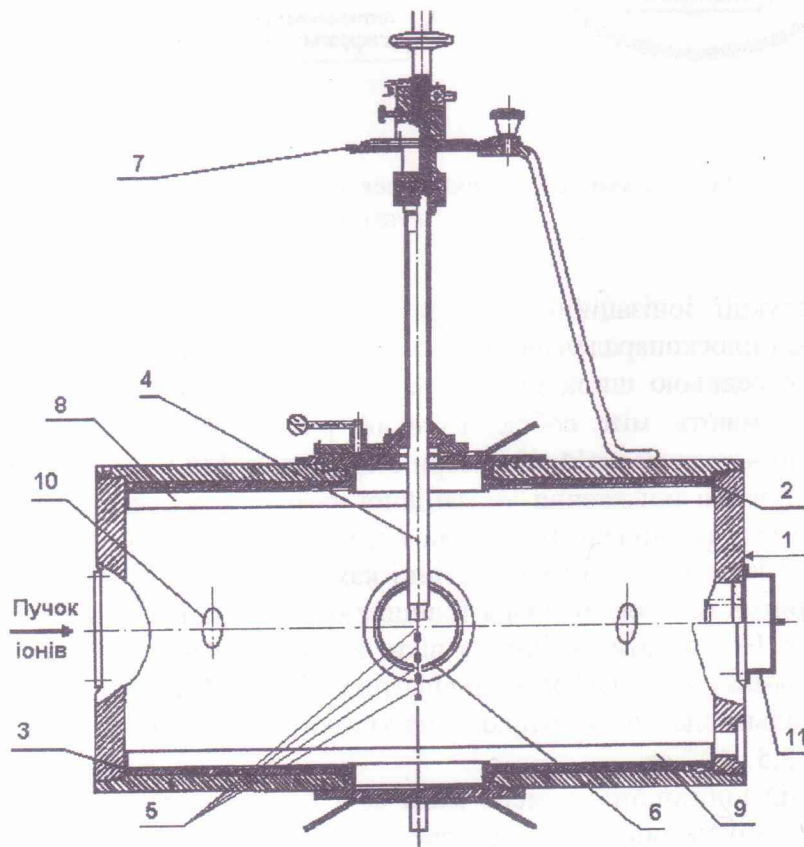


Рис. 2. Реакційна камера:
 1 – корпус реакційної камери; 2 і 3 – верхня і нижня детекторні платформи; 4 – шток для кріплення мішеней; 5 – набір мішеней; 6 – оглядове вікно; 7 – шкала визначення кута повороту мішені відносно напрямку пучка іонів; 8 і 9 – лімби верхньої і нижньої детекторних платформ; 10 – вікно для контролю вакуумної системи; 11 – циліндр Фарадея.

вався за допомогою інтегратора заряду, що накопичувався в циліндрі Фарадея. Додаткове моніторування пучка іонів здійснювалось за допомогою спектрометра з кремнієвим детектором, розміщеного у вертикальній площині під кутом 15° до напрямку пучка іонів. У реакційній камері на нижній платформі встановлювався триканальний $\Delta E - E$ -спектрометр, оснований на використанні іонізаційної камери як ΔE -детектора. На задній стінці іонізаційної камери розміщувались товсті кремнієві E -детектори для повного поглинання продуктів реакцій. Кутова відстань між вхідними вікнами іонізаційної камери становила $9,5^\circ$. На верхній детекторній платформі встановлювались $\Delta E - E$ -спектрометри з кремнієвими ΔE - і E -детекторами.

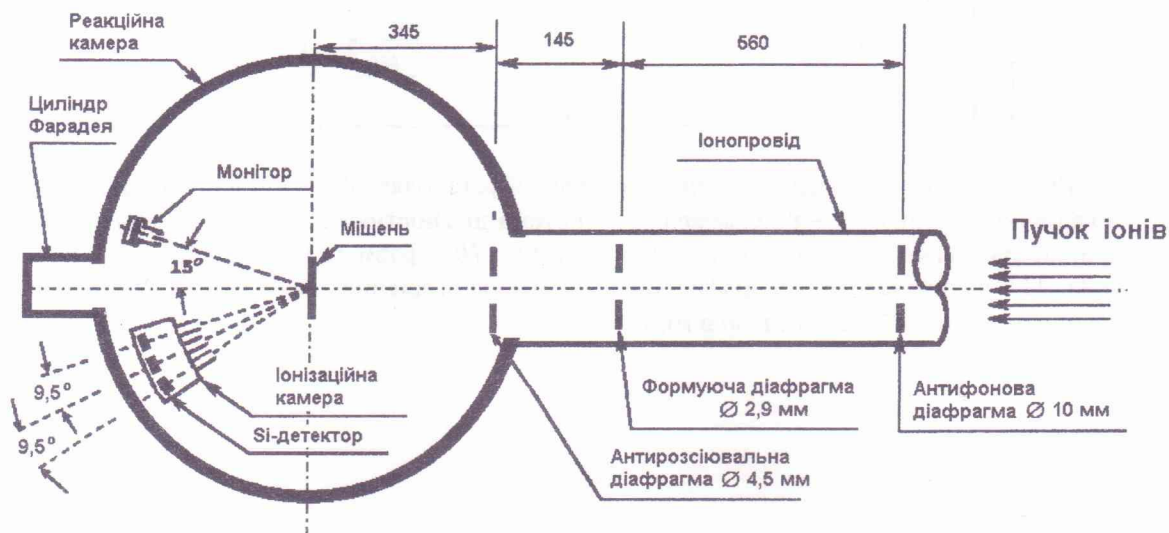


Рис. 3. Схема розміщення спектрометрів в реакційній камері та діафрагмування пучка іонів.

Схему конструкції іонізаційної камери показано на рис. 4. Іонізаційну камеру виготовлено у вигляді плоскопаралельної призми, основа якої складається з трьох трапецій довжиною 79 мм і середньою шириною 40 мм, осі яких спрямовані на вертикальну вісь реакційної камери і мають між собою кутівий розхил $9,5^\circ$. Відстань від середини іонізаційної камери до центру реакційної камери становила $\sim 246,5$ мм. Ця відстань незначно змінювалась при юстуванні положення іонізаційної камери в реакційній камері. На задній стінці іонізаційної камери розміщено три гнізда 4 для встановлення кремнієвих E -детекторів 9 товщиною більше 500 мкм. На передній стінці камери розташовано три вхідних вікна 8 діаметром 6 мм, закритих плівкою майлара товщиною 0,5 мкм, яка витримує тиск робочого газу до 760 мм рт. ст. На кожному вхідному вікні встановлювався трубчастий коліматор 3 довжиною 40 мм з прямокутною діафрагмою висотою 3 і шириною 1 - 1,75 мм. Таким чином забезпечувалась роздільна здатність вимірювання кутівих розподілів $0,3 - 0,5^\circ$, а тілесні кути становили $1,5 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-4}$ ср.

Кожна із секцій іонізаційної камери мала свій анод 5 і катод 6. Катод іонізаційної камери заземлявся, а імпульсний сигнал знімався з анода. На анод подавалась напруга 80 - 120 В. Для регулювання збору заряду іонізації робочого газу в камері використовувалась сітка Фріша 7, напруга на якій регулювалась у межах 5 - 15 В. Контакти від анода, катода, сітки Фріша та анода кремнієвого E -детектора виведено на високочастотні (ВЧ) контактні гнізда 10 - 13, встановлені на окремій панелі, закріпленій зверху на іонізаційній камері.

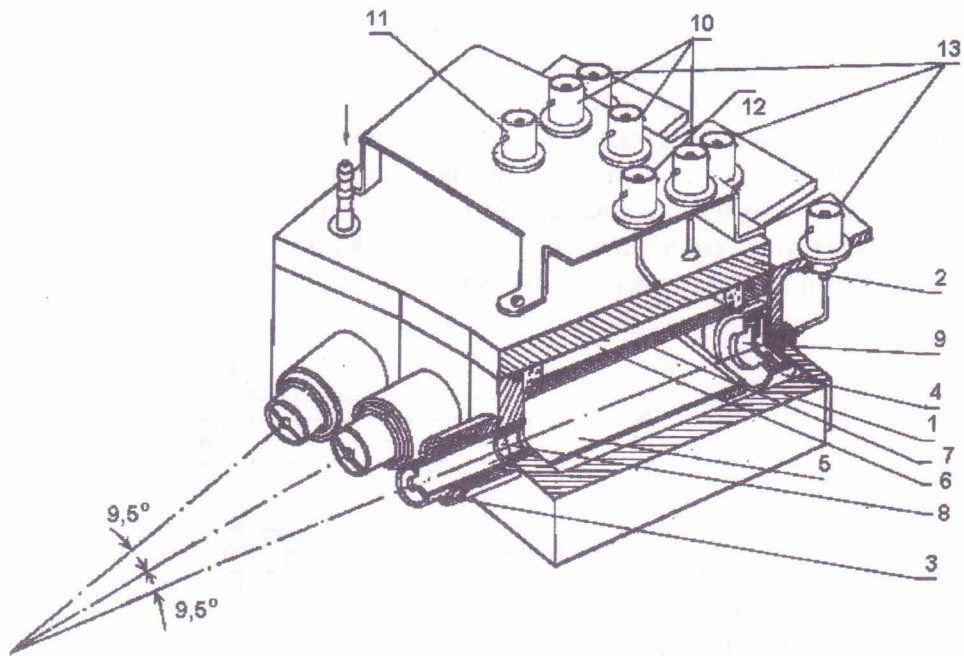


Рис. 4. Схема іонізаційної камери:

1 – корпус; 2 – верхня стінка камери; 3 – коліimator; 4 – гніздо кремнієвого детектора; 5 – анод; 6 – катод; 7 – сітка Фріша; 8 – вхідне вікно камери; 9 – кремнієвий детектор; 10 – ВЧ контактні гнізда анодів іонізаційної камери; 11 – ВЧ контактне гніздо катода; 12 – ВЧ контактне гніздо сітки Фріша; 13 – ВЧ контактні гнізда кремнієвих детекторів.

В іонізаційній камері робочим газом служив регульований потік аргону з тиском ~ 200 мм рт. ст., що відповідало товщині ~ 15 мкм кремнієвого детектора. Швидкість потоку газу в іонізаційній камері становила ~ 1 л/г. Схему газообміну в іонізаційній камері показано на рис. 5.

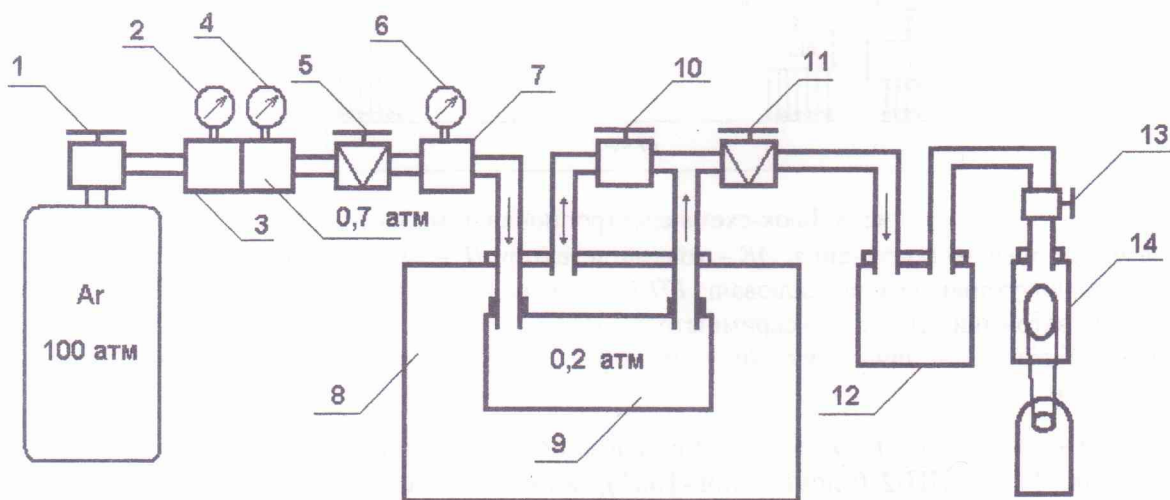


Рис. 5. Схема газової системи іонізаційної камери:

1 – вентиль; 2 – манометр високого тиску; 3 – редуктор; 4 – манометр низького тиску; 5 – мікрогвинт напуску; 6 – манометр низького тиску; 7 – трійник; 8 – реакційна камера; 9 – іонізаційна камера; 10 – вентиль; 11 – мікрогвинт випуску газу; 12 – балон; 13 – кран; 14 – форвакуумний насос.

Чистий аргон містився під високим тиском у спеціальному балоні і при частково відкритому вентилі 1 поступав в газообмінну систему. Тиск у балоні та газообмінній системі вимірювався манометрами високого тиску 2 та низького тиску 4 і 6. За допомогою мікрогвинта 5 аргон напускався в іонізаційну камеру при закритому вентилі 10. Відкриттям мікрогвинта 11 здійснювався регульований випуск газу в балон 12, вакуум в якому підтримувався форвакуумним насосом 14 при відкритому крані 13. При виконанні монтажних робіт у реакційній камері 8 потік аргону перекривався вентилями 1, 5, 11 і 13, відкривався вентиль 10 і залишки аргону випускались в реакційну камеру, яка наповнювалась також через спеціальний вентиль повітрям.

У вимірюваннях використовувалась електроніка стандарту CAMAC. Блок-схему електронної системи вимірювань показано на рис. 6.

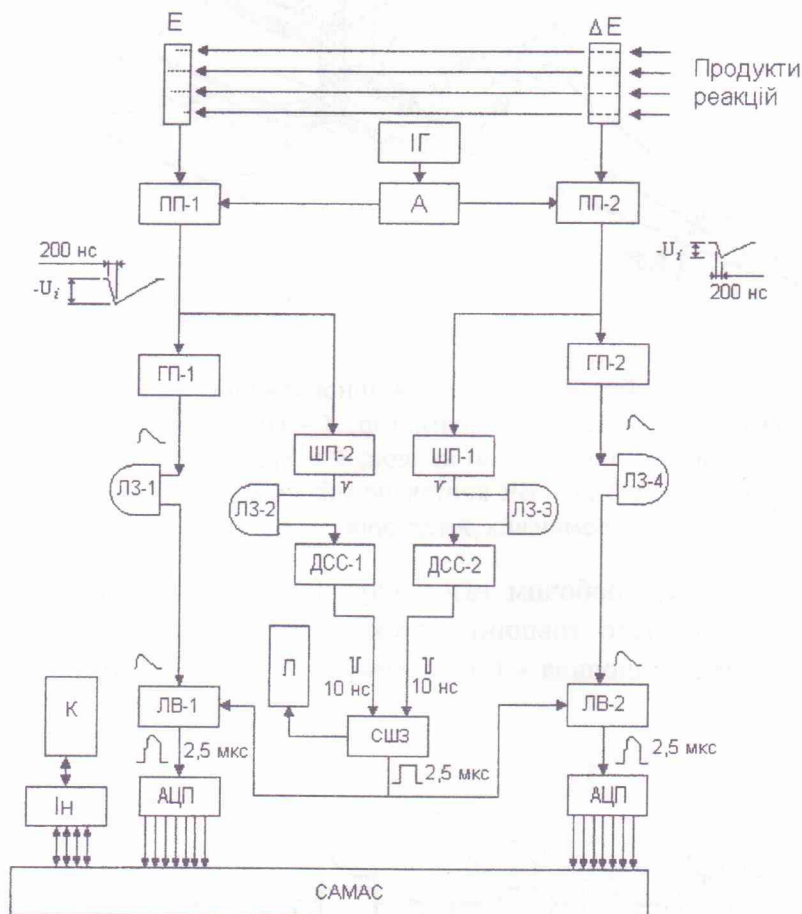


Рис. 6. Блок-схема електронної системи вимірювань:

E – детектор повного поглинання; ΔE – тонкий детектор; *ІГ* – імпульсний генератор; *A* – атенюатор; *ПП-і* – зарядочутливі передпідсилювачі; *ГП-і* – головні підсилювачі; *ШП-і* – швидкі підсилювачі; *ЛЗ-і* – лінії затримки; *ДСС-і* – дискримінатори сталої складової; *ЛВ-і* – лінійні ворота; *СШЗ* – схема швидких збігів; *Л* – лічильник; *ІН* – інтерфейс; *К* – комп'ютер; *АЦП* – аналого-цифровий перетворювач.

Сигнали з ΔE - і *E*-детекторів спочатку підсилювались блоками попереднього підсилення *ПП-1* і *ПП-2* (блоки Polon-1001), встановленими безпосередньо біля реакційної камери, і поступали у вимірювальний центр на входи головних підсилювачів *ГП-1* і *ГП-2* (блоки ORTEC-452) та швидких підсилювачів *ШП-1* і *ШП-2* (блоки ORTEC ETO 420 або Polon Logic Shape and Delay) відповідно. З передніх фронтів ΔE - і *E*-імпульсів швидкі підсилювачі формували короткі (10 нс) прямокутні сигнали. Ці сигнали через лінії затримки *ЛЗ-2* і *ЛЗ-3* (блоки Polon Delay Amplifier) поступали на входи дискримінаторів *ДСС-1* і

ДСС-2 (блоки ORTEC CF4000), в яких відгиналась їх стала компонента. Вихідні сигнали стандарту NIM цих дискримінаторів поступали на схему швидких збігів СШЗ, вихідний сигнал (стандарт TTL тривалістю 2,5 мкс) якої керував проходженням імпульсів E - і ΔE -трактів через лінійні ворота ЛВ-1 і ЛВ-2 (блоки Polon Line Gate 1105) на входи аналого-цифрових перетворювачів АЦП (блоки Polon ADC-712). Лінійні ворота формували із спектрометричних імпульсів сигнали тривалістю 2,5 мкс, зберігаючи при цьому їх амплітуду. Час проходження сигналів в E - і ΔE -трактах регулювався лініями затримки ЛЗ-1 і ЛЗ-4 (блоки Polon Delay Amplifier). З АЦП сигнали через інтерфейс Ін (блок Polon PC-111) поступали в комп'ютер К, роботою якого керувала система SMAN [1].

На початку вимірювань вищеописана електронна система налагоджувалась з використанням коротких сигналів від імпульсного генератора ІГ. Під час експерименту проводився контроль за кількістю збігів в E - і ΔE -трактах за допомогою лічильника ЛІ (блок Polon Scaler-1403), на який поступали сигнали зі схеми швидких збігів СШЗ.

У комп'ютері цифрована спектрометрична інформація за допомогою системи SMAN послідовно накопичувалась у робочому буфері у вигляді слів E - ΔE - $N_{\text{АЦП}}$ ($N_{\text{АЦП}}$ – номер місцезнаходження АЦП у крейті САМАС) і періодично пересилалась електронною мережею в серверний комп'ютер із великою дисковою пам'яттю для довгострокового збереження. Крім того, у системі SMAN передбачено аналіз інформації під час вимірювань (on-line-режим) з показом одно- та двовимірних спектрів на дисплеї (рис. 7). Накопичену в сервері інформацію можна було також аналізувати після вимірювань (off-line-режим).

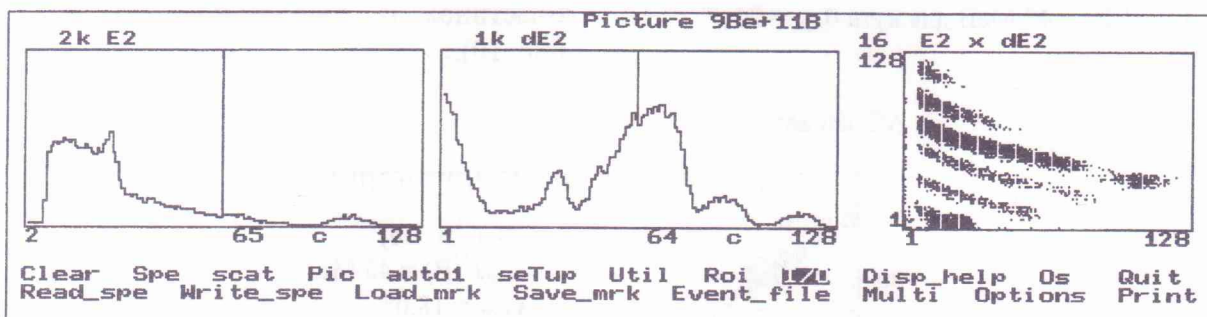


Рис. 7. Вигляд екрана дисплея при роботі системи SMAN в multi-режимі під час дослідження реакцій ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, X)$ при енергії 45 MeV. На рисунку показано спектри другого ΔE - E -спектрометра.

Керування аналізом інформації здійснювалось у системі SMAN за допомогою діалогового меню користувача, розміщеного на дисплеї. На рис. 7 це меню подано внизу робочого екрана директивами "Clear", "Spe", ..., "Print", якими передбачено такі основні операції:

1) робота в режимах візуалізації одного спектра (single-режим) та багатьох спектрів (multi-режим); на рис. 7 представлено вигляд робочого екрана при аналізі спектрометричної інформації в multi-режимі від одного ΔE - E -спектрометра в дослідженні реакцій ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, X)$; можлива візуалізація всіх трьох ΔE - E -спектрометрів;

2) запуск та зупинка вимірювань із записом спектрів у файли;

3) сервіс керування візуалізацією спектрів;

4) первинна обробка спектрів у single-режимі (виділення маркерами окремих ділянок спектрів, їх опис за методом найменших квадратів стандартними функціями, знаходження сум відліків у виділених ділянках спектрів тощо).

Інші можливості системи SMAN детально описано в інструкції [1].

Вищеописана експериментальна методика застосовувалась на Варшавському циклотроні U-200P при дослідженні реакцій ${}^{12}\text{C}({}^{12}\text{C}, X)$, ${}^{12}\text{C}({}^{11}\text{B}, X)$ [2], ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, X)$, ${}^{13}\text{C}({}^{11}\text{B}, X)$, ${}^{14}\text{C}({}^{11}\text{B}, X)$, ${}^7\text{Li}({}^{11}\text{B}, X)$.

Про можливість методики в ідентифікації продуктів реакцій за зарядом можна судити із рис. 8, на якому представлено двовимірний спектр продуктів реакцій ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб.}}({}^{11}\text{B}) = 45$ MeV, зареєстрований на куті $\theta_{\text{лаб.}} = 21,5^\circ$ ΔE - E -спектрометром,

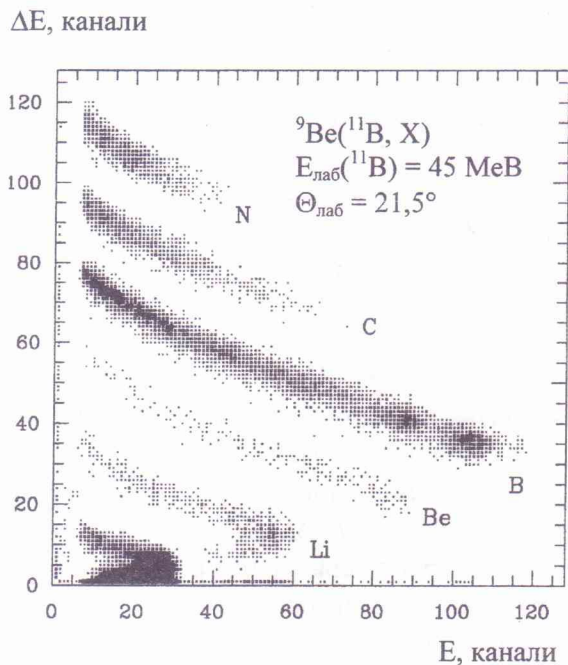


Рис. 8. Двовимірний $E - \Delta E$ -спектр продуктів реакції ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, X)$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ для кута $\theta_{\text{лаб}} = 21,5^\circ$.

сконструйованим на базі вищеписаної іонізаційної камери. Видно, що експериментальна методика уможливила надійну ідентифікацію продуктів реакцій із $Z = 3 - 7$.

Можливості методики з ідентифікації продуктів реакцій за масою проілюстровано на рис. 9, де показано двовимірний $\Delta E - E$ -спектр ізотопів берилію із реакції ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, \text{Be})$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ для кута $\theta_{\text{лаб}} = 18^\circ$. Цей спектр зареєстровано $\Delta E - E$ -спектрометром з двома кремнієвими детекторами. Товщина ΔE -детектора становила $\sim 40 \text{ мкм}$. Видно, що при такій товщині ΔE -детектора можна досягти розділення ізотопів ${}^9\text{Be}$ та ${}^{10}\text{Be}$. Подібне розділення спостерігалось і для ізотопів ${}^6\text{Li}$ та ${}^7\text{Li}$.

Про енергетичну роздільну здатність $\Delta E - E$ -спектрометра, в якому ΔE -детектором є іонізаційна камера, свідчать одно- та двовимірні спектри, отримані при реєстрації α -частинок із стандартного джерела ${}^{226}\text{Ra}$ (рис. 10).

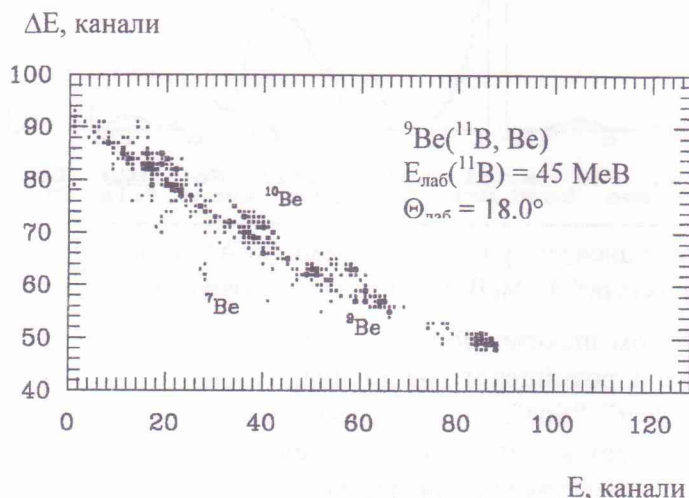


Рис. 9. Двовимірний $E - \Delta E$ -спектр продуктів реакції ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, \text{Be})$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ для кута $\theta_{\text{лаб}} = 18^\circ$.

Видно, що цей спектрометр та електроніка спектрометричного тракту забезпечує розділення груп α -частинок з енергіями 5,239 і 5,455 MeV. З аналізу даних розсіяння α -частинок було встановлено, що енергетична роздільна здатність цього спектрометра дорівнювала $\sim 1,5 \%$. У вимірюваннях енергетична роздільна здатність для спектрів продуктів реакцій була гіршою, що пов'язано з розкидом енергії в пучку іонів, який становив $\sim 1 \%$. Найгірша енергетична здатність методики спостерігалась у малоінтенсивних спектрах, прикладом чого може бути типовий енергетичний спектр для ізотопів берилію з реакції ${}^9\text{Be}({}^{11}\text{B}, \text{Be})$ при енергії $E_{\text{лаб}}({}^{11}\text{B}) = 45 \text{ MeV}$ (рис. 11). Видно, що в цьому випадку енергетична роздільна здатність методики становила $\sim 4,5 \%$. Погіршенню розділення піків у спектрі в даному випадку сприяли як розкид енергії в пучку іонів, так і кінематичний розкид енергії продуктів реакцій у межах тілесного кута спектрометра. Проте, як видно з рис. 11, така

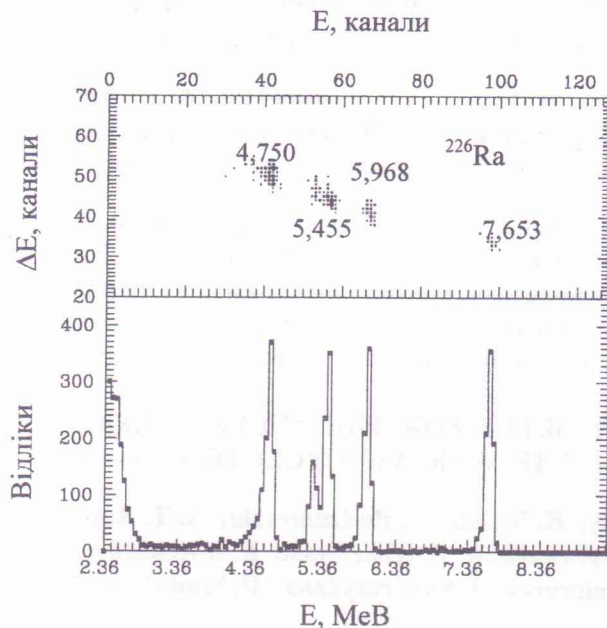


Рис. 10. Дво- та одновимірний спектри α -частинок із стандартного джерела ^{226}Ra .

енергетична роздільна здатність методики уможливила дослідження непружного розсіяння іонів ^{11}B ядрами ^9Be для багатьох переходів у збуджені стани ядра ^{11}B .

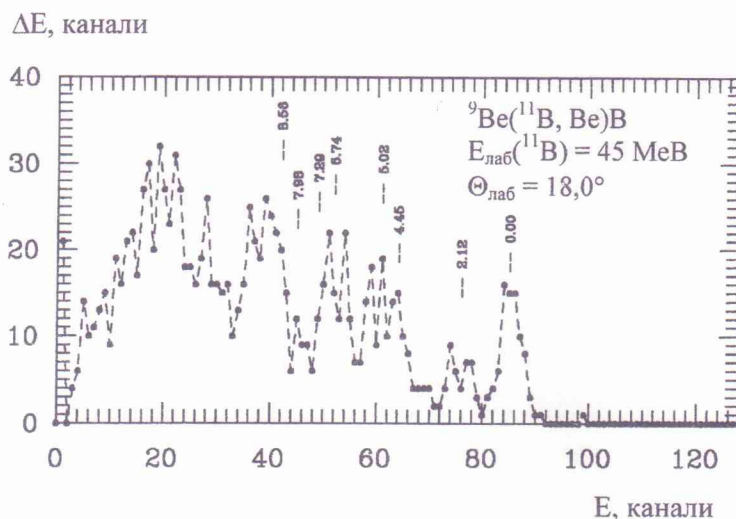


Рис. 11. Типовий спектр ізотопів $^{7,9,10}\text{Be}$ для кута $\theta_{\text{лаб}} = 18,0^\circ$.
На рисунку показано положення рівнів ^{11}B .

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що створена експериментальна методика може забезпечити вимірювання кутових розподілів реакцій з використанням пучків іонів Варшавського циклотрона U-200P.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kowalczyk M. SMAN: Oprogramowanie zbierania danych dla pomiarów wieloparametrycznych w standardzie CAMAC // Uniwersytet Warszawski. – Warszawa, 1997. - P. 1 - 32.
2. Rudchik A.T., Budznowsky A., Chernievsky V.K. et al. The $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ elastic and inelastic scattering at $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 49 \text{ MeV}$ and energy dependence of the $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ interaction // Nuclear Physics. - 2001. - Vol. A695. - P. 51 - 68.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ВАРШАВСКОМ ЦИКЛОТРОНЕ U-200P**

**В. К. Черниевский, К. Русек, А. Будзановски, А. Т. Рудчик, Я. Дворски,
Л. Земло, В. Н. Кирьянчук, С. Кличевски, Е. И. Коший, С. Ю. Межевич,
В. Мельчарек, И. Сквирчиньска, Р. Сюдак, Б. Чех.**

Описана экспериментальная установка, созданная на Варшавском циклотроне U-200P для исследования ядерных реакций при взаимодействии тяжелых ионов с атомными ядрами. Приведены конструктивные данные оборудования установки, методы и контроль за формированием пучка ионов на мишени, характеристики детекторной, электронной и накопительно-анализирующей систем измерений, данные о зарядовой, изотопной и энергетической разрешающих способностях установки.

**EXPERIMENTAL SETUP FOR THE NUCLEAR REACTION STUDIES
AT THE WARSAW CYCLOTRON U-200P**

**V. K. Chernievsky, K. Rusek, A. Budzanowski, A. T. Rudchik, J. Dworsky,
L. Zemlo, V. M. Kyryanchuk, S. Kliczewski, E. I. Koshchy, S. Yu. Mezhevych,
V. Melczarek, I. Skwirczyńska, R. Siudak, B. Czech**

The experimental setup for the heavy ion nuclear reaction research at the Warsaw cyclotron U-200P is described. Setup construction, method and control for beam formation on the target, parameters of spectrometers, electronics and computer acquisition system as well as isotope and energy resolutions of the setup are represented in this article.

Надійшла до редакції 12.07.02,
після доопрацювання – 15.10.02.