

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАУКОВИЙ ЦЕНТР "ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ"

На правах рукопису

ЛАШКО ТАМАРА МИКИТІВНА

УДК 539.163

**ДОСЛІДЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ІЗОМЕРІВ І ВТОРИННИХ ПУЧКІВ
В РЕАКЦІЯХ З ЛЕГКИМИ ЗАРЯДЖЕНИМИ ЧАСТИНКАМИ**

01.04.16 - фізика ядра та елементарних частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1997



Робота виконана в НЦ "Інститут ядерних досліджень" НАН України

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук
Гаврилюк Віктор Іванович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Купряшкін Володимир Тихонович
(НЦ "Інститут ядерних досліджень", м. Київ)
кандидат фізико-математичних наук
Скакун Євген Олександрович
(ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут",
м. Харків)

Провідна установа: Київський державний університет (м. Київ)

Захист відбудеться *29* травня 1997 р.
о 14¹⁵ год. на засіданні Спеціалізованої Ради Д 01.68.01
при НЦ "Інститут ядерних досліджень" НАН України
за адресою: 252028, м. Київ, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці НЦ "Інститут ядерних досліджень" НАН України

Автореферат розіслано *23* квітня 1997 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої Ради
кандидат фізико-математичних наук

В.Д. Чеснокова

ДВ 37.567

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Дослідження взаємодії легких заряджених частинок середніх енергій (10-100 MeV) з атомними ядрами є не простою, але в той же час актуальною й цікавою задачею.

Різноманітність і складність процесів, які відбуваються в ядрі при таких енергіях налітаючих частинок, ускладнює дослідження, але зате дає можливість спостерігати ряд унікальних явищ і процесів не доступних для вивчення при більш низьких енергіях. При достатньо високих енергіях взаємодії стає можливим дослідження таких високоінформативних явищ як збудження високоспінових ізомерів. Вивчення відношень утворення високоспінових ізомерів до низькоспінових (ізомерні відношення) в процесі ядерних взаємодій дають цінну інформацію як про властивості збуджених станів атомних ядер, так і про механізми ядерних реакцій.

Інтерес з боку експериментаторів до вивчення ізомерних відношень значно посилюється після створення і вдосконалення моделей для їх розрахунків. Порівняння теоретично розрахованих і експериментально помірених ізомерних відношень дозволяє отримувати інформацію про енергетичні і спінові розподіли збуджених рівнів. В деяких випадках, використовуючи зв'язок моменту інерції ядра з параметром спінової залежності в виразі густини ядерних рівнів, можна зробити висновок про величину моменту інерції ядра в збудженому стані.

Крім чисто наукового, існує і прикладний аспект вивчення збудження ізомерів в різноманітних ядерних процесах. Він пов'язаний з застосуванням ізомерів в медицині, а також з використанням в реакторобудуванні матеріалів, здатних при опроміненні переходити в збуджені ізомерні стани.

Не менш цікавим і інформативним явищем для цього діапазону енергій взаємодії заряджених частинок з атомними ядрами є явище випромінювання кластерів і утворення вторинних пучків частинок, ініційованих пучком частинок, які повністю гальмуються в товстій мішені.

Мета роботи. Метою дисертаційної роботи було два аспекти досліджень процесів, які відбуваються при ядерних взаємодіях в діапазоні енергій до 100 MeV:

1. Експериментальне дослідження відношення збудження високоспінових ізомерних станів до низькоспінових і їх залежність від енергії налітаючих частинок.

3
ЛНБ ім. В. Стефаника
АЧ України

2. Вивчення випромінювання кластерів високозбудженими атомними ядрами і утворення вторинних пучків ініційованих первинним пучком прискорених частинок в товстій мішені.

Наукова новизна.

1. Створений низькофононий гама-спектрометричний комплекс, який дозволяє проводити прецизійні дослідження процесів які відбуваються з малою вірогідністю на фоні великовірогідних процесів, коли досліджуваний процес на 3-4 порядки менший фонового.

2. Вперше досліджено енергетичну залежність ізомерних відношень для 7 ізомерних пар.

3. На базі прискорювача У-240 створена установка для одержання інтенсивних пучків нейтронів з енергіями до 70 МеВ.

4. Методом детектуючих реакцій вперше виявлено випромінювання ядрами U при опроміненні товстої мішені α -частинками з $E_{\alpha} = 100$ МеВ кластерів, які приводять до утворення в детектуючій мішені нейтронозбагачених нуклідів.

Практична цінність роботи:

Створений низькофононий гама-спектрометричний комплекс успішно використовується як для наукових, так і для прикладних досліджень.

Одержані експериментальні результати досліджень ізомерних відношень занесені в банк даних Центру по атомним і ядерним даним ДКАЕ СРСР (м. Москва). Вони можуть бути корисні для практичного використання в активаційному аналізі, при розрахунках радіаційного захисту а також для вдосконалення теоретичних моделей.

Установка для одержання пучків нейтронів високих енергій може бути використана в нейтронних дослідженнях.

На захист виносяться:

1. Результати вимірювань енергетичної залежності відношення виходів ізомерних пар $^{44m}_g\text{Sc}$, $^{93m}_g\text{Tc}$, $^{110m}_g\text{Ag}$, $^{116m}_g\text{Sb}$, $^{104m}_g\text{Ag}$ в реакціях з α -частинками і $^{44m}_g\text{Sc}$, $^{93m}_g\text{Tc}$, $^{94m}_g\text{Tc}$, $^{108m}_g\text{In}$ і $^{110m}_g\text{In}$ в реакціях з протонами.

2. Результати аналізу експериментальних даних в рамках статистичної, касадно-випаровувальної і передрівноважної моделей.

3. Методику дослідження, експериментальні результати й аналіз процесів, які відбуваються при опроміненні товстої мішені α -частинками з енергією 100 МеВ при повному поглинанні первинного пучка.

Об'єм і структура роботи. Дисертація складається із вступу, трьох розділів та висновків, що викладені на 104 сторінках, включаючи 15

таблиць і 22 рисунка. Перелік використаної літератури містить 153 найменування.

Апробація роботи. Основні матеріали дисертації і їх окремі положення були представлені і доповідались на 33-39 Всесоюзних нарадах з ядерної спектроскопії і структури атомного ядра, Міжнародних нарадах по мультинейтронним системам, на семінарах ІЯД і ІТФ НАН України, в КДУ та ІАЕ ім. Курчатова. Основні результати дослідження опубліковані в 19 наукових роботах.

Зміст дисертації.

У вступі сформульовано мету роботи, обґрунтовано актуальність вибору досліджуваних процесів, науковий і практичний інтерес теми досліджень, приведено короткий зміст дисертації, вказані основні положення, які виносяться на захист.

У першому розділі викладено методики, використані в дисертаційній роботі. В ній наведено короткий опис низькофонового гама-спектрометричного комплексу для прецизійних вимірювань, виконаних в дисертаційній роботі. Описано конструкцію і принцип дії основних частин комплексу, який складається з:

- 1) пневмотранспортного пристрою для транспортування радіоактивних мішеней;
- 2) гама-спектрометра на базі напівпровідникового детектора великої ефективності і високої роздільної здатності, обладнаного спеціальною комбінованою багатоплощинною захисною конструкцією;
- 3) блоків автоматики, керованих ЕОМ, для управління процесами опромінення і транспортування мішеней;
- 4) ЕОМ з пакетом програм для керування експериментом, накопичення, обробки і видачі гама-спектрометричної інформації.

Приведена принципова блок-схема пневмотранспортного пристрою для дослідження короткоживучих ядер.

В залежності від конкретних умов і мети експериментів в даному комплексі були використані напівпровідникові детектори об'ємом від 100 до 230 см³ з роздільною здатністю 1.8-2.0 кеВ на γ 1333 кеВ ⁶⁰Со.

Накопичення спектрів проводилося за допомогою аналізаторів ІСА-70 і NOKIA LP 4900. Ці спектри потім передавалися в зовнішню ЕОМ СМ-1420 для подальшої обробки.

Описано пакет програм для накопичення і первинної обробки гама-спектрів, визначення енергій та інтенсивностей гама-ліній, розрахунку ізомерних відношень та деяких сервісних програм.

У цьому ж розділі описано три методики опромінення мішеней, які були використані в даній роботі.

Другий розділ присвячено дослідженню ізомерних відношень в реакціях з легкими зарядженими частинками в діапазоні середніх енергій.

В ньому наведено короткий огляд експериментальних даних по ізомерним відношенням опублікованих в наукових виданнях, проведено аналіз найбільш важливих попередніх робіт, показана актуальність дослідження ізомерів в реакціях з α -частинками і протонами.

В цьому розділі описана методика вимірювань і розрахунків експериментальних ізомерних відношень, методи виготовлення зразків мішеней і способи їх опромінення. В таблиці 1 приведені товщини мішеней та ізотопний склад матеріалів, які використовувалися для їх виготовлення.

На рисунках 1-5 представлені результати енергетичної залежності ізомерних відношень, одержані в реакціях з α -частинками.

Експериментальні результати порівнюються з розрахунками. Теоретичні розрахунки були виконані в рамках статистичних моделей, які враховували передрівноважну емісію частинок.

Для ізомерної пари ^{44m}Sc (рис. 1) спостерігається задовільне узгодження експериментальних і порохованих по моделі каскадного випаровування значень ізомерних відношень в діапазоні енергій від порога реакції до 55 MeV. В області більш високих енергій експериментальні ізомерні відношення, на відміну від передбачуваних статистичною теорією, зменшуються, хоча це зменшення і незначне. На нашу думку, перевищення в 1.5-2 рази розрахованих значень $v(E)$, в порівнянні з експериментальними для реакції $(\alpha, p3n)$ може бути пов'язано зі збільшенням частки прямих процесів з ростом енергії α -частинок. Аналогічна картина спостерігається і для ядер в області $N=50$.

На рис. 2, 3 представлені дані для ^{93m}Tc і ^{94m}Tc відповідно. Наші результати для більш високої області енергій узгоджуються з даними інших авторів для більш низької області енергій. Як показано на мал. 3, ізомерне відношення плавно збільшується з ростом енергії α -частинок приблизно до 50 MeV. Це збільшення добре узгоджується з моделлю випаровування, якщо враховувати великий кутовий момент, який вносить в ядро α -частинка з збільшенням енергії.

Відмічається, що при енергіях $E \geq 50$ MeV в експериментах спостерігається максимум в σ_b/σ_n , який може бути пояснений в моделі каскадного випаровування з врахуванням ролі іраст-лінії і вибором відповідного коефіцієнта проходу іраст-настки.

Відмічається, що залежність σ_b/σ_n від енергії α -частинок у випадку вильоту чотирьох нейтронів (для ^{93m}Tc) аналогічна зміні відношення

σ_n/σ_n при вильоті трьох нейтронів ($^{94m,g}Tc$). Це вказує на те, що збільшення числа вилітаючих частинок призводить до перерозподілу спінів ядра-залишку, а вклад різних механізмів в реакцію суттєво не змінюється.

Більш плавна залежність σ_n/σ_n від енергії для реакції ($\alpha,4n$) порівняно з реакцією ($\alpha,3n$), очевидно пов'язана із зменшенням частки швидких нейтронів відносно загальної кількості частинок які вилетіли.

Далі в цьому ж розділі розглянуто збудження ізомерів для ядер з $Z \approx 50$. Показано, що до енергій близько 60 MeV для ізомерів $^{110m,g}In$ і $^{110m,g}Sb$ також спостерігається якісне узгодження експериментальних ізомерних відношень з розрахованими по програмі GROGI-2. Однак, в області енергій вище 60 MeV відбувається систематичне зменшення $\nu_{експ}$, в той же час, розраховані величини $\nu_{теор}$ (без урахування проходу траєкторії) мають тенденцію збільшуватись з ростом енергії. Введення ж коефіцієнта, який враховує можливість траєкторій, приводить до того, що при великих енергіях $\nu_{теор}$ стає постійною величиною, незалежною від енергії налітаючих частинок.

На прикладі порівняння ізомерних відношень для ядер $^{110m,g}In$ і $^{110m,g}Sb$ (рис. 4, 5) показано, що за допомогою простої квазічастинкової моделі можна коректно врахувати вплив структури дискретних станів в низькій області на заселення ізомерів.

Для ядра $^{110m,g}In$ продемонстровано вплив каналу реакції ($\alpha,3n$) (рис. 4) на величину σ_n/σ_n в області високих енергій.

Аналіз даних, одержаних в реакціях з протонами (табл. 2, 3) показує, що якісна картина виходу ізомерів така ж, як і для реакцій з α -частинками. Відмінність числових значень ізомерних відношень, очевидно, викликана збільшенням привнесеного спіну.

Детальніше розглянуто випадок для $^{110m,g}In$, в якому явно спостерігається резонансна структура енергетичної залежності σ_n/σ_n (рис. 6). Показано, що така залежність $\nu(E)$ може бути пояснена тільки врахуванням ролі внутрішньоядерного каскаду в механізмі реакції.

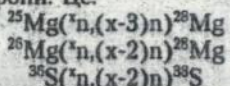
Показано також, що аналіз ізомерних відношень в деяких випадках дає інформацію про якісний і кількісний вклад тих чи інших механізмів реакції в загальну картину.

Третій розділ присвячено дослідженням вторинних пучків на виході товстої мішені, які виникають в результаті розщеплення важких ядер, ініційованого пучком первинних частинок. Ці експерименти проводились з метою виявлення нейтронних кластерів серед продуктів розпаду U під дією пучка прискорених α -частинок.

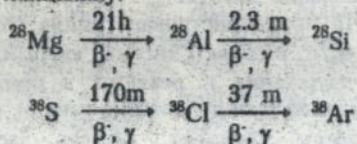
В цьому розділі проведено короткий огляд теоретичних і експериментальних робіт присвячених проблемам дослідження ядер поблизу границі нуклонної стабільності і можливості існування чисто нейтронних ядер (мультинейтронів). Розглянуто найбільш значні роботи, як з позиції ствердження існування таких ядер, так і з позиції категоричного їх заперечення.

Виходячи з критичного аналізу попередніх експериментальних робіт, обгрунтовано вибір і розробку методики досліджень. Наводяться міркування, виходячи з яких у вторинних пучках серед продуктів розпаду опроміненого U можна очікувати появу ядер з великим надлишком нейтронів і, ймовірно, навіть нейтронних кластерів. Розглянуто існуючі методи, за допомогою яких можна було б в разі появи виявити мультинейтрони.

Обгрунтовано вибір активаційного методу для детектування продуктів вторинних пучків як найбільш ефективного і чутливого. Вказано детектуючі мішені і реакції, за допомогою яких можна зареєструвати мультинейтрони. Це:



які розпадаються по ланцюжку:



Описано суть цього методу, яка полягала в пошуках радіоактивних ядер ^{28}Mg і ^{38}S в детектуючих мішенях після опромінення урану α -частинками. Ізотоп ^{28}Mg може бути надійно ідентифікований по гамма-лініям 1342 кеВ з розпаду ^{28}Mg і 1778 кеВ з розпаду ^{28}Al , який знаходиться в рівновазі з ^{28}Mg , а ^{38}S по гамма-лінії 1942 кеВ, яка належить розпаду ^{38}S а також по лініях 1642 і 2167 кеВ генетично зв'язаного з нею ^{38}Cl .

Представлена схема пробника, який використовувався для генерації і детектування мультинейтронів, (рис. 7), де вказані розміри і матеріали конструктивних деталей. Пучок α -частинок з енергією 100 МеВ з циклотрона У-240 потрапляв на мішень з природного урану. В результаті взаємодії вилітала, велика кількість нейтронів та інших продуктів реакції, серед яких очікувався виліт нейтронних кластерів $^n(x - \text{кількість нейтронів в кластері})$. Товщина уранової мішені і мідного

екрану були розраховані таким чином, щоб загальмувати всі заряджені частинки як безпосередньо первинного пучка, так і утворені ним в урановій мішені р, t, α і т. п. За мідним екраном розміщувались детектуючі мішені, наведена активність яких служила для визначення утворення 2n в урановій мішені. Для зменшення фоновой активності в магнієвих мішенях (яка була на п'ять порядків більше досліджуваної) виконувалось радіохімічне видалення Na.

Наведено фрагменти гама-спектрів для детектуючих мішеней ^{26}Mg , ^{25}Mg і ^{36}S після опромінення їх вторинним пучком з уранової пластини де присутні лінії, що вказують на утворення в детектуючих мішенях ізотопів ^{28}Mg і ^{38}S , які мають на 2 і на 3 нейтрони більше від початкових, рис. 8-10.

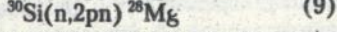
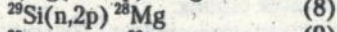
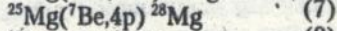
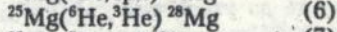
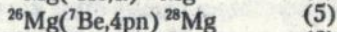
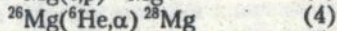
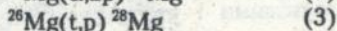
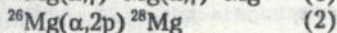
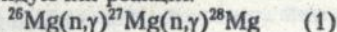
Продемонстровано надійне визначення цих ядер, що здійснювалось за періодом напіврозпаду і співвідношенням інтенсивностей їх основних гама-ліній. Значна увага приділена дослідженню процесів, які могли б в даних умовах експерименту призвести до появи вказаних ізотопів. З цією метою зроблено оцінку нейтронного спектру методом порогових реакцій на ^{127}I і всіх можливих компонент вторинного пучка, яким опромінюються детектуючі мішені. Враховуючи досить великі потоки нейтронів, які могли б призводити до появи всередині магнієвої мішені заряджених частинок від реакцій типу (n,p), (n, α), (n,t) і т. п., було проаналізовано такі варіанти утворення ^{28}Mg :

а) послідовний захват двох (трьох) нейтронів;

б) реакції з ядрами мішені заряджених частинок, утворених в самій мішені потоком швидких нейтронів;

в) реакції на мікродомішках під дією нейтронів.

Приводиться аналіз слідуєчих реакцій:



Виходячи з експериментальних даних про перерізи відповідних реакцій і оцінок нейтронного спектру, було визначено можливий вклад кожного каналу в утворення ^{28}Mg . При цьому, враховуючи складний

нейтронний спектр, всі оцінки конкуруючих каналів були зроблені в сторону завищення.

Так, імовірність утворення ^{28}Mg за рахунок послідовного захвату двох нейтронів в 10^5 раз менша від зареєстрованої. Для послідовного захвату трьох нейтронів (у випадку з мішенню ^{25}Mg) ця цифра, природно, буде ще менша. Ці розрахунки дають право знехтувати даними каналами.

Вклад ^{28}Mg за рахунок каналу $^{26}\text{Mg}(\alpha,2p)^{28}\text{Mg}$ з α -частинками, які утворилися внаслідок (n, α)-реакції на ядрах мішені, було пораховано, як на основі оцінок нейтронного спектру і експериментальних перерізів, так і в контрольному експерименті по реакції $^{65}\text{Cu}(\alpha,2n)^{67}\text{Ga}$. Пороги цих реакцій практично співпадають, а переріз реакції $\sigma(\alpha,2n)$ для ^{65}Cu набагато перевищує $\sigma(\alpha,2p)$ для ^{26}Mg (перерізи в максимумах функції збудження для ^{65}Cu і ^{26}Mg становлять $\sigma(\alpha,2n)_{\text{max}} \approx 600$ мбарн і $\sigma(\alpha,2p)_{\text{max}} \approx 2$ мбарн, відповідно). Таким чином, для визначення потоку α -частинок разом з мішенню ^{26}Mg опроміювалась також мішень ^{65}Cu . Наявність ^{67}Ga визначалась по гама-лінії 300 кеВ. Оскільки ця лінія не була зареєстрована, то ми отримали верхню границю вкладу реакції ($\alpha,2p$) в утворення ^{28}Mg за рахунок даного каналу реакції. Він становить менш ніж 0.5% від отриманої нами активності ^{28}Mg .

Для оцінки вкладу реакції (3) в утворення активності ^{28}Mg ми використали дані, одержані методом порогових реакцій на йоді. По потоку швидких нейтронів обчислювався вихід тритонів з реакції (n,t), а потім, знаючи потік тритонів, визначали вихід ^{28}Mg , з реакції (t,p), переріз якої згідно з експериментальними даними становив 100 мбарн. Одержане значення складало менше 5% від активності ^{28}Mg , яку ми спостерігали в нашому експерименті.

Наводиться непрямої доказ відсутності впливу цього каналу, який дає аналіз сукупності результатів для мішеней ^{25}Mg і ^{26}Mg . Якби наші оцінки виявилися помилковими і утворення ^{28}Mg було б зв'язано з реакцією (t,p), то співвідношення активностей для мішеней ^{25}Mg і ^{26}Mg відповідало б вмісту ізоотопу ^{26}Mg в мішені ^{25}Mg (~1%), оскільки на ^{25}Mg така реакція не призводить до утворення ^{28}Mg , тобто було б 1:100. Але співвідношення утворення ^{28}Mg для наших експериментів складало 1:6, що свідчить на користь наших оцінок.

Незважаючи на те, що утворення ^6He і ^7Be набагато менше ніж α - і t- частинок, ми визначили вплив і цих каналів реакцій в наших експериментах. Описано спосіб визначення утворення ^6He з реакції $^{27}\text{Al}(n,^6\text{He})^{22}\text{Na}$ по накопиченню радіоактивного ^{22}Na , припустивши, що

виходи ${}^6\text{He}$ для ядер магнію і алюмінію не відрізняються більш ніж на порядок. Імовірності каналів $(n, {}^6\text{He})$ і $(n, \alpha 2n)$, розраховані згідно статистичної моделі, склали: $p(n, {}^6\text{He})/p(n, \alpha 2n) \sim 10^{-5}$. Таким чином, розрахувавши потік ${}^6\text{He}$ з активності ${}^{22}\text{Na}$ і покладаючи перерізи реакцій $\sigma({}^6\text{He}, {}^3\text{He})$ і $\sigma({}^6\text{He}, \alpha)$ рівними 100 мбарн, ми визначили вихід ${}^{28}\text{Mg}$ в цих процесах. Він виявився в 10^4 раз меншим, ніж одержаний нами експериментально.

У всіх експериментах були використовували магнієві мішені збагачених ізотопів ${}^{25}\text{Mg}$ і ${}^{26}\text{Mg}$. Представлено ретельний аналіз всіх домішок з концентрацією більш ніж $10^{-4}\%$. Відмічено, що достатньо обмежитися розрахунком вкладу кремнію, в реакціях (8), (9) з яким може утворюватися ${}^{28}\text{Mg}$. Згідно проведеній перевірі, верхня границя вмісту Si в ізотопних мішенях не перевищувала 0.012%, що могло дати вклад не більше 3% активності ${}^{28}\text{Mg}$.

Приведено дані для мішені ${}^{36}\text{S}$, які ще раз підтвердили утворення на вторинному пучку ізотопу ${}^{38}\text{S}$ з числом нейтронів більшим на 2 від вихідного. Використання ${}^{36}\text{S}$ для детектуючої мішені на відміну від ${}^{26}\text{Mg}$ має дві суттєві переваги. По перше - нема потреби використовувати радіохімічне виділення, по друге - що особливо важливо - є можливість в процесі експерименту контролювати конкуруючі реакції з зарядженими частинками, оскільки при їх наявності протікали б реакції (названі нами контрольними), переріз яких значно більший (табл. 4).

Оскільки контрольні реакції йдуть з значно більшими перерізами, то реакції з зарядженими частинками призводили б до значно більшого утворення ${}^{38}\text{Cl}$, що порушило б генетичний зв'язок ліній 1942 кеВ - 1642 і 2167 кеВ.

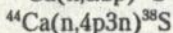
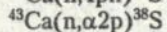
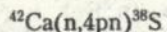
Проводячи короткі і довгі серії опромінення і експозицій, ми, в межах похибки експерименту не виявили утворення ${}^{38}\text{Cl}$. На підставі цього ми робимо висновок, що реакції з зарядженими частинками не мають відношення до утворення ${}^{38}\text{S}$.

Те ж саме можна сказати і відносно реакцій з ${}^6\text{He}$. Хоча відношення перерізів для цих реакцій не настільки контрастне, але і вихід ${}^6\text{He}$ значно менший виходів α -частинок і тритонів.

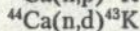
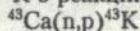
Як і у випадку ${}^{28}\text{Mg}$, проаналізовано утворення ${}^{38}\text{S}$ на мікродрішках.

1. На домішці аргону, який входить до складу повітря, можлива реакція ${}^{40}\text{Ar}(n, 2pn){}^{38}\text{S}$. Провівши контрольний експеримент з мішенню повітря і роблячи перерахунок по лінії 1294 кеВ ${}^{41}\text{Ar}$ з реакції ${}^{40}\text{Ar}(n, \gamma){}^{41}\text{Ar}$ ми визначили, що її вклад становить < 5%.

2. На мікродомішках Ca (~ 0.05%, паспортні дані), де можливі реакції:



При контрольному опроміненні 100 мг CaO (разом з сіркою) ліній ^{38}S не було. Верхня фонова границя дала нам величину вкладу від домішки Ca < 0.3%. Вміст в ізотопній мішені Ca (відповідність паспортним даним) перевірялась по лінії 373 кеВ ^{43}K з реакцій:



Для того, щоб одержати ^{38}S з інших мікродомішок, потрібні реакції розщеплення, які мають дуже високий поріг, що не дає можливості для їх утворення.

У Висновках перераховано основні результати роботи, які більш коротко можна сформулювати таким чином:

1. Створений низькофоновий високоефективний гамаспектрометричний комплекс, який дав змогу провести прецизійні дослідження збудження ізомерів в широкому діапазоні періодів напіврозпаду, а також виконати ряд досліджень продуктів ядерних реакцій і охорони навколишнього середовища.

2. Розроблена і створена методика і програмне забезпечення, яке дозволило провести дослідження ізомерних відношень для ряду ядер від Ca до Ag.

3. Вперше в даному діапазоні енергій налітаючих частинок було дослідження збудження ізомерів в реакціях з протонами і α -частинками:

$^{44}\text{Ca}(\alpha,p3n)^{44m.g}\text{Sc}$	$E_{\alpha}=50+95 \text{ МэВ}$
$^{51}\text{V}(p,\alpha p3n)^{44m.g}\text{Sc}$	$E_p=50, 70 \text{ МэВ}$
$^{96}\text{Mo}(p,4n)^{93m.g}\text{Tc}$	$E_p=30+70 \text{ МэВ}$
$^{93}\text{Nb}(\alpha,4n)^{93m.g}\text{Tc}$	$E_{\alpha}=65+100 \text{ МэВ}$
$^{96}\text{Mo}(p,3n)^{94m.g}\text{Tc}$	$E_p=30+70 \text{ МэВ}$
$^{93}\text{Nb}(\alpha,3n)^{94m.g}\text{Tc}$	$E_{\alpha}=65+100 \text{ МэВ}$
$^{110}\text{Cd}(p,3n)^{108m.g}\text{In}$	$E_p=45+70 \text{ МэВ}$
$^{110}\text{Cd}(p, n)^{110m.g}\text{In}$	$E_p=9+70 \text{ МэВ}$
$^{109}\text{Ag}(\alpha,3n)^{110m.g}\text{In}$	$E_{\alpha}=45+100 \text{ МэВ}$
$^{115}\text{In}(\alpha,3n)^{116m.g}\text{Sb}$	$E_{\alpha}=45+100 \text{ МэВ}$
$^{107}\text{Ag}(\alpha,\alpha 3n)^{104m.g}\text{Ag}$	$E_{\alpha}=80+100 \text{ МэВ}$

4. Проведено порівняння одержаних експериментальних даних з розрахунками по передрівноважній моделі і моделі каскадного

випаровування. Показано, що при енергіях 50-60 MeV хід кривої ізомерних відношень не можна описати в рамках простих статистичних і моделі каскадного випаровування. Одержані експериментальні результати вказують, що при даних енергіях значна роль належить прямим і передрівноважним процесам.

5. Виявлена квазірезонансна структура в залежності величини ізомерних відношень від енергії налітаючих частинок в області енергій збудження 50-70 MeV.

6. Розроблена методика і виконано цикл досліджень випромінювання нейтральних частинок високозбудженими атомними ядрами.

7. Методом детектуючих реакцій вперше зареєстровано виліт з товстої уранової мішені при опроміненні її α -частинками з $E_\alpha = 100$ MeV кластерів, які призводять до утворення нейтронозбагачених нуклідів, які містять на 2-3 нейтрони більше, ніж початкові.

8. Із сукупності експериментальних даних встановлено, що при опроміненні уранової мішені пучком α -частинок в детектуючих мішенях утворюється 12 ядер ^{28}Mg за секунду на грам мішені ^{26}Mg , 2 ядра ^{28}Mg за секунду на грам мішені ^{25}Mg і 4 ядра ^{38}S за секунду на грам мішені ^{36}S .

9. Аналіз всієї сучасної інформації показав, що цими кластерами можуть бути нейтральні ядра ^xn з $x \geq 4$.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

- 1 Борозенец Г.П., Вишнеvский И.Н., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н., Маковецкий Ю.В., Свято В.П., Ткачук И.П., Тришин В.В. Исследование распадов короткоживущих ядер $^{110,111,112}\text{Sb}$ и ^{109}Sn //Киев, 1982.- 46 с.- (Препр. /АН УССР. Ин-т. ядерных исслед.; КИЯИ-82-13).
- 2 Вишнеvский И.Н., Головач Л.А., Желтоножский В.А., Ключников А.А., Кумшаев С.Б., Лашко Т.Н., Патлань Ю.В., Тришин В.В. Измерительный комплекс для исследования короткоживущих ядер на циклотроне У-240//Киев, 1983.- 24 с.- (Препр. /АН УССР. Ин-т. ядерных исслед.; КИЯИ-83-6).
- 3 Вишнеvский И.Н., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н., Тришин В.В. Отношение сечений образования ядер и изомеров в (p,xn)-реакциях с $E_p = 72$ МэВ//Киев, 1983.- 32 с.- (Препр. /АН УССР. Ин-т. ядерных исслед.; КИЯИ-83-12).
- 4 Лашко Т.Н., Свято В.П. Электроны внутренней конверсии распада ^{109}In //В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тез. докл. 33 Совещания. -Л.: Наука, 1983.- с. 79.

- 5 Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н., Степаненко В.А. Возбуждение изомеров $^{44m,g}\text{Sc}$ в реакции $(\alpha, p3n)$ // В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тез. докл. 34 Совещания. - Л.: Наука, 1984.-с. 60.
- 6 Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н. Измерение изомерных отношений в ядрах $^{110m,g}\text{In}$ и $^{106m,g}\text{In}$ в (p, xn) -реакциях// В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тез. докл. 34 Совещания. - Л.: Наука, 1984.-с. 95.
- 7 Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н., Степаненко В.А. Возбуждение изомеров $^{110m,g}\text{In}$ и $^{116m,g}\text{Sb}$ в $(\alpha, 3n)$ -реакциях// В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тез. докл. 35 Совещания. - Л.: Наука, 1985.-с. 329.
- 8 Агеев В.А., Вишневский И.Н., Гаврилюк В.И., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н., Стрильчук Н.В. О существовании связанного состояния p^4 // В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тез. докл. 35 Совещания. - Л.: Наука, 1985.-с. 331.
- 9 Вишневский И.Н., Дей Ю.А., Лашко Т.Н. и др. Автоматизированная корреляционная установка на линии с ЭВМ// Киев, 1985.- 31 с.- (Препр. /АН УССР. Ин-т. ядерных исслед.; КИЯИ-85-3).
- 10 Агеев В.А., Вишневский И.Н., Гаврилюк В.И., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н., Стрильчук Н.В. О существовании легких нейтронных ядер// Киев, 1985.- 11 с.- (Препр. /АН УССР. Ин-т. ядерных исслед.; КИЯИ-85-4).
- 11 Агеев В.А., Вишневский И.Н., Гаврилюк В.И., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н., Стрильчук Н.В. Эксперименты по поиску нейтронных кластеров// УФЖ.- 1986.- т. 31, №12.- с. 1771-1773.
- 12 Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н. Измерение изомерных отношений для изотопов $^{93,94}\text{Tc}$ в реакциях с протонами и α -частицами// ЯФ.- 1985.- т. 41, вып. 6.- с. 1435-1439.
- 13 Агеев В.А., Вишневский И.Н., Гаврилюк В.И., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н., Стрильчук Н.В. Новые данные экспериментов по поиску нейтронных кластеров// В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тез. докл. 37 Совещания. - Л.: Наука, 1987.-с. 333.
- 14 Гаврилюк В.И., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н. Возбуждение изомеров $^{44m,g}\text{Sc}$ в реакциях с заряженными частицами// В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тез. докл. 39 Совещания. - Л.: Наука, 1989.-с. 367.
- 15 Борисюк Л.Г., Гаврилюк В.И., Доценко И.С., Лашко Т.Н. и др. "Горячие" частицы в биосфере// Весці АН БССР. Сер. физ.-эн.

- наук.- 1990.- №4.- с. 38-41.
- 16 Казаков С.В., Лашко Т.Н., Музалев П.Н. и др. Измерение уровней загрязнения 30-км зоны ЧАЭС// Весті АН БССР. Сер. физ.-эн. наук.- 1990.- №4.- с. 69-73.
 - 17 Бернадина Л.И., Гаврилюк В.И., Зеркин В.В., Лашко Т.Н. и др. Автоматизированный комплекс для спектральных измерений и анализа содержания гамма-радионуклидов в объектах внешней среды//Весті АН БССР. Сер. физ.-эн. наук.- 1990.- №4.- с. 98-105.
 - 18 Богила Е.А., Гаврилюк В.И., Желтоножский В.А., Коломиец В.М., Лашко Т.Н., Харланов В.Б. Исследование выходов изомеров ^{44m}Sc в реакциях с протонами и α -частицами//Изв. АН СССР. Сер. физ.- 1991.- т. 55, №5.- с. 921-923.
 - 19 Гаврилюк В.И., Желтоножский В.А., Лашко Т.Н. Исследование сильновозбужденных ядер ^{104}Ag , ^{110}In и ^{116}Sb методом изомерных отношений// Киев, 1995.- 11 с.- (Препр. /НАН Украины. Ин-т. ядерных исслед.; КИЯИ-95-1).

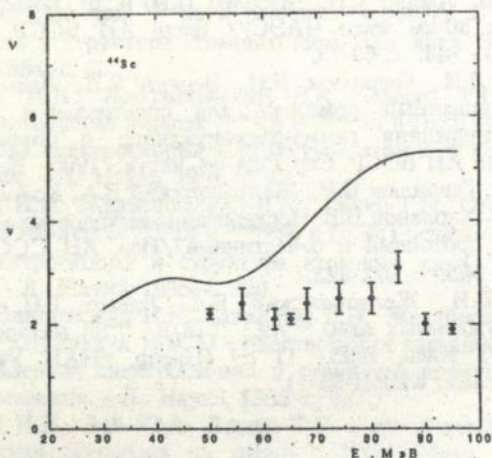


Рис. 1. Залежність ізомерних відношень для реакції $^{44}\text{Ca}(\alpha, p3n)^{44m}\text{Sc}$.

Таблиця 1. Основні характеристики мішеней.

Мішень	Товщина, мг/см ²	Вид	Вміст основного ізоотопу, %
^{44}Ca	1-6	$^{44}\text{CaCO}_3$ +полістирол	83.4
^{44}Ca	10-15	$^{44}\text{CaCO}_3$ +поліетилен	83.4
^{51}V	2-6	фольга	99.75
^{96}Mo	5-8	порошкоподібний ^{96}Mo +поліетилен	78.3
^{93}Nb	10-15	фольга	100
^{110}Cd	4-6	фольга	93.2
Ag	5-8	фольга	^{107}Ag - 51.8 ^{109}Ag - 48.2
^{113}In	3-5	фольга	95.7
^{25}Mg	200	MgO, порошкоподібна	96.9
^{26}Mg	200	MgO, порошкоподібна	95.5
^{36}S	~300	порошкоподібна	74.5

Таблиця 2. Ізомерні відношення для $^{93m,g}\text{Tc}$ і $^{94m,g}\text{Tc}$ із реакцій $^{96}\text{Mo}(p,xn)$.

E_p , MeV	σ_p/σ_n , ^{94}Tc	E_p , MeV	σ_p/σ_n , ^{94}Tc	σ_p/σ_n , ^{93}Tc
30	1.15(12)	45	2.17(35)	9.1(12)
35	1.01(10)	50	1.82(25)	10.0(13)
40	1.56(20)	60	1.92(55)	12.0(15)
		70	1.47(32)	

Таблиця 3. Ізомерні відношення для $^{108m,g}\text{In}$ і $^{110m,g}\text{In}$ із реакцій $^{110}\text{Cd}(p,xn)$.

E_p , MeV	^{110}In $\sigma(7^+)/\sigma(2^+)$	E_p , MeV	^{110}In $\sigma(7^+)/\sigma(2^+)$	^{108}In
9	0.046(3)	48	0.62(4)	0.68(4)
14	0.14(1)	52	1.11(2)	0.88(5)
19	0.21(1)	56	0.38(8)	1.03(6)
24	0.37(2)	60	0.45(8)	0.88(5)
34	0.48(3)	70	0.83(14)	0.81(5)

Таблиця 4. Перерізи реакцій з зарядженими частинками на ізоні ^{36}S .

Конкуруючі реакції	Переріз σ_{max} , мбарн	Контрольні реакції	Переріз σ_{max} , мбарн
$^{36}\text{S}(\alpha,2p)^{38}\text{S}$	2	$^{36}\text{S}(\alpha,d)^{38}\text{Cl}$	200
$^{36}\text{S}(t,p)^{38}\text{S}$	12	$^{36}\text{S}(t,n)^{38}\text{Cl}$	680
$^{36}\text{S}(^6\text{He},\alpha)^{38}\text{S}$	3	$^{36}\text{S}(^6\text{He},n)^{41}\text{Ar}$	9

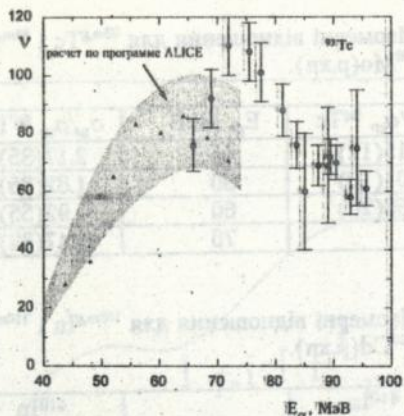


Рис. 2. Енергетична залежність ізомерного відношення для ^{93m}Tc , отриманого в реакції $^{93}\text{Nb}(\alpha,4n)^{93m}\text{Tc}$.

Точки: Δ -експериментальні дані Vranquinho C.L., 1979; \bullet - дана робота.

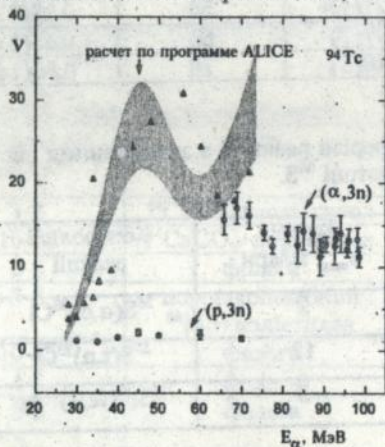


Рис. 3. Залежність відношення перерізів утворення високоспінового і низькоспінового ізомерів від енергії налітаючих частинок для ^{94m}Tc із реакцій $^{93}\text{Nb}(\alpha,3n)^{94m}\text{Tc}$ і $^{96}\text{Mo}(p,3n)^{94m}\text{Tc}$.

Точки: Δ -експериментальні дані Vranquinho C.L., 1979; \bullet - дана робота.

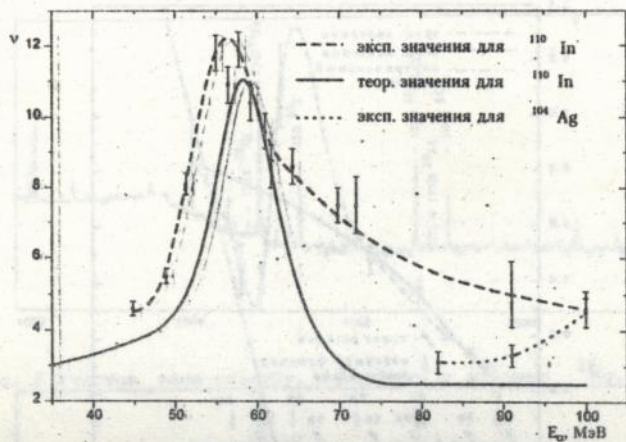


Рис. 4. Енергетична залежність ізомерних відношень ^{110m}In і ^{104g}Ag із реакції з α -частинками на мішені срібла.

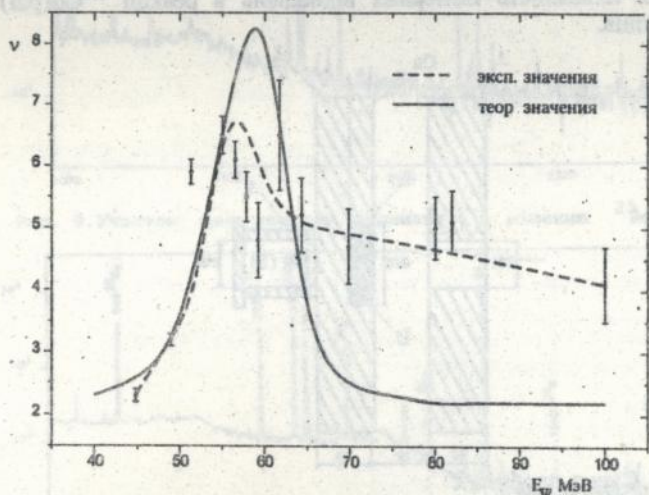


Рис. 5. Залежність ізомерних відношень в реакції $^{115}\text{In}(\alpha, n)$ від енергії α -частинок.

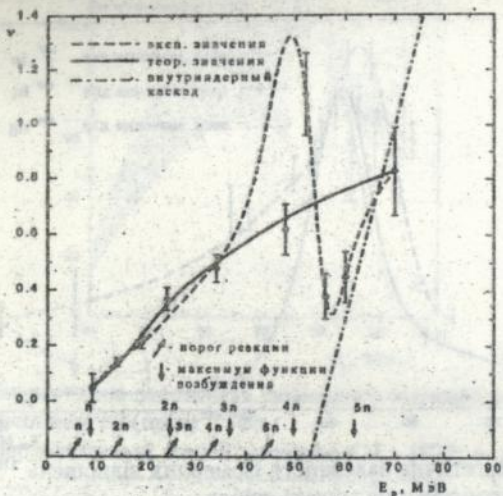


Рис. 6. Залежність ізомерних відношень в реакції $^{110}\text{Cd}(p,n)$ від енергії протонів.

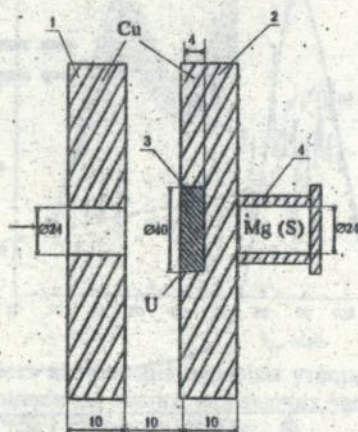


Рис. 7. Схема пробника:

- 1- діафрагма;
- 2- мішенетримач;
- 3- уранова мішень;
- 4- стакан для детектуючих мішеней.

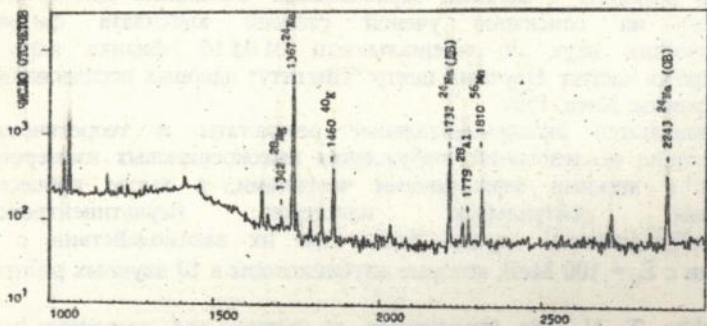


Рис. 8. Участок гама-спектра, отриманого з мішенню ²⁶Mg.

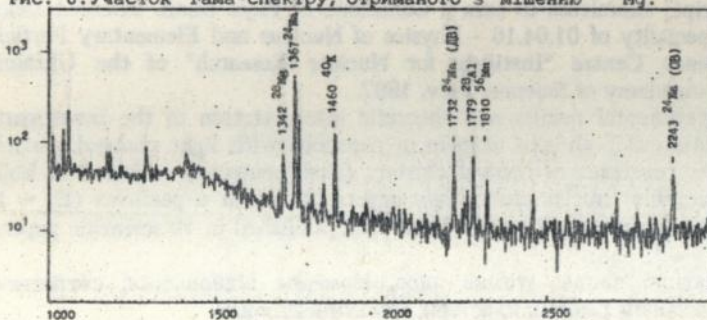


Рис. 9. Участок гама-спектра, отриманого з мішенню ²⁵Mg.

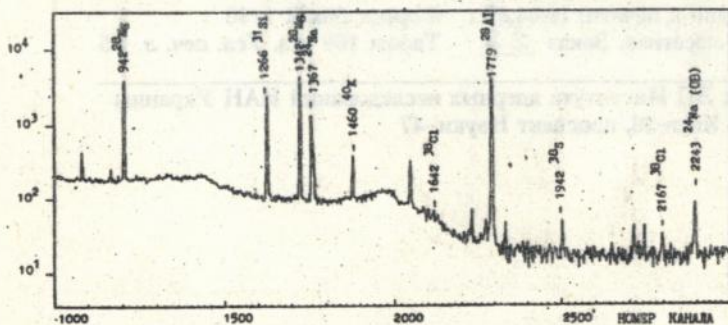


Рис. 10. Участок гама-спектра, отриманого з мішенню ³⁶S.

Лашко Т. Н. Исследование образования изомеров и вторичных пучков в реакциях с легкими заряженными частицами. Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц. Научный центр "Институт ядерных исследований" НАН Украины, Киев, 1997.

Защищаются экспериментальные результаты и теоретическая интерпретация исследований возбуждения высокоспиновых изомеров в реакциях с легкими заряженными частицами, а также процессов испускания нейтральных кластеров (мультинейтронов) высоковозбужденными ядрами урана при их взаимодействии с α -частицами с $E_{\alpha} = 100$ MeV, которые опубликованы в 19 научных работах.

Lashko T. N. The investigation of isomers and secondary beam formation in the reactions with light charged particles. The dissertation (manuscript) submitted to earn a Candidate of Phys.-Math. Sciences Degree on the speciality of 01.04.16 - Physics of Nucleus and Elementary Particles, The Science Centre "Institute for Nuclear Research" of the Ukrainian National Academy of Science, Kiev, 1997.

Experimental results and theoretic interpretation of the investigation on excitation of high-spin isomers in reactions with light charged particles, as well as processes of neutral clusters (multineutrons) emission of highly excited uranium nuclei under their interaction with α -particles ($E_{\alpha} = 100$ MeV) are represented. The data have been published in 19 scientific papers.

Ключові слова: атомне ядро, ізомерне відношення, статистична теорія, механізм реакції, кластери, мультинейтрони.

Подписано к печати: 16.04.97 г. Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Заказ 22 Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1.5

СКТБ с ЭП Института ядерных исследований НАН Украины
252028, Киев-28, проспект Науки, 47

435203

AB 37.561