

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Саврасов Андрій Миколайович

УДК 539.17.02:539.173.3

**ВИВЧЕННЯ МЕХАНІЗМІВ РЕАКЦІЙ З ГАММА-КВАНТАМИ ТА ЛЕГКИМИ
ЧАСТИНКАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВАЦІЙНОГО МЕТОДУ**

01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ - 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України, м. Київ.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук,
Желтоножський Віктор Олександрович,
Інститут ядерних досліджень НАН України,
провідний науковий співробітник відділу структури ядра

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Дикий Микола Петрович,
Інститут фізики високих енергій і ядерної фізики
ННЦ ХФТІ НАН України,
завідувач відділу ядерної фізики

доктор фізико-математичних наук, професор
Маслюк Володимир Трохимович,
Інститут електронної фізики НАН України,
завідувач відділу фотоядерних реакцій


доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Нестеров Олександр Володимирович,
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова
НАН України,
старший науковий співробітник відділу теорії ядра і
квантової теорії поля

Захист відбудеться 23 грудня 2021 р. о 14⁴⁵ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.167.01 в Інституті ядерних досліджень НАН України за адресою:
03028, м. Київ, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту ядерних досліджень
НАН України за адресою: 03028, м. Київ, пр. Науки 47.

Автореферат розісланий " ____ " листопада 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

 Хоменков В.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми досліджень.

Однією з найважливіших задач ядерної фізики є отримання повної інформації як про структуру збуджених рівнів ядер, так і про механізми перебігу ядерних реакцій. На сьогоднішній день ця задача далека до свого розв'язання а одним з таких джерел інформації є дослідження розпаду ізомерних та основних станів ядер, які заселяються в ядерних реакціях різного типу.

Використання різних бомбардуючих частинок дає можливість дослідити властивості збуджених станів ядер в межах неперервного спектру та механізми перебігу реакцій в залежності від енергії, спінів, кутових моментів та типу частинок. Вивчення розпадів ізомерних та основних станів у різних реакціях дозволяє розділити в часі процеси опромінення і вимірювання та покращити фонові умови під час проведення експериментів. Тому дослідження ізомерних та основних станів ядер за допомогою різних реакцій проводяться уже не один десяток років і до сьогоднішнього дня не втратили свою актуальність.

Фотоядерні реакції (ФЯР) були предметом численних досліджень, проте увага вчених була в основному зосереджена на (γ, γ') - і (γ, n) -каналах в районі енергії гігантського дипольного резонансу (ГДР). Заселення ядер в фотоядерних реакціях з вильотом заряджених частинок досліджено значно гірше, хоча в них заселяються інші збуджені стани, часто недоступні для (γ, γ') - і (γ, n) -реакцій.

Дослідження збудження високоспінових ізомерів в реакціях з низькоенергетичними дейтронами, протонами, альфа-частинками та нейтронами також викликає значний науковий інтерес. Їх заселення поблизу енергетичного порогу ядерної реакції згідно статистичного механізму може бути сильно загальмоване. Тому дослідження збудження цих ізомерів на ядрах мішеней з низькими спінами і бомбардуючими частинками, які вносять невеликий кутовий момент, дозволяє краще оцінити роль нестатистичних механізмів. Важливо також отримати експериментальну інформацію щодо напрацювання окремих довгоживучих ізомерних станів в реакціях з альфа-частинками середніх енергій.

Великий науковий інтерес викликає також вимірювання середніх кутових моментів (СКМ) уламків ділення. Вони надають корисну інформацію про конфігурацію ядерної системи ділення біля точки розриву, динаміку процесу ділення для окремих каналів, де ще залишається багато не вирішених питань. Абсолютні значення величин кутових моментів можуть бути критичними при виборі між різними механізмами формування системи, що ділиться. Необхідно відзначити, що такі експериментальні дані дуже нечисленні, а їхня достовірність в ряді випадків викликає великий сумнів.

Визначення з високою точністю величин енергії збудження окремих рівнів певних ядер може пролити світло як на слабо вивчені атомно-ядерні процеси, так і на β -розпади з низькими величинами енергетичного виходу. Ці дані потенціально можна використовувати для обмеження (чи вимірювання) маси нейтрино.

Усе це вказує на актуальність досліджень вищезгаданих процесів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є фрагментом наукових досліджень, виконаних у відділі структури ядра Інституту ядерних досліджень НАН України як складова частина державних бюджетних тем №0108U002915 "Дослідження структури збуджених атомних ядер на пучках частинок і в радіоактивному розпаді", виконаної в 2008-2012 рр., №0113U001123 "Дослідження збуджених атомних ядер і механізмів ядерних процесів в біляпорогових реакціях", виконаної в 2013-2017 рр., №0117U002847 "Дослідження структури ядер, механізмів ядерних реакцій та фізичних процесів в пучках заряджених частинок", виконаної в 2018-2022 рр., №0116U004450 "Дослідження поділу ядер в низькоенергетичній області, розробка нових методів реєстрації продуктів поділу ядер та вивчення фізичних процесів в пучках заряджених іонів", виконаної в 2017-2021 рр., №0117U002885 "Розробка нових методів реєстрації радіологічно значимих нуклідів в радіоактивних відходах АЕС", виконаної в 2018-2019 рр., №0120U100635 "Дослідження фотоядерних реакцій з вильотом заряджених частинок та гамма-квантів в області деформованих ядер", виконаної в 2020-2021 рр. та №0112U005132 "Дослідження динаміки ділення радіоактивних трансуранових ядер при енергіях збудження складеного ядра 10-12 MeV", виконаної в 2012-2016 рр. Результати роботи використано в звітах по темах.

Робота здійснювалась спільно з Ужгородським інститутом електронної фізики та Харківським фізико-технологічним інститутом.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи було одержання нових даних про збуджені ядра і механізми перебігу ядерних реакцій з різними бомбардуючими частинками і гамма-квантами, використовуючи ізомерні і/чи основні стани атомних ядер за допомогою активаційного методу.

Для досягнення мети дослідження були поставлені такі завдання:

1. Отримати експериментальні дані з ізомерних відношень перерізів(виходів) (ІВВ,ІВП) чи перерізів(виходів) для ряду ядер-продуктів реакцій за участю гальмівних γ -квантів, дейтронів, протонів, альфа-частинок та нейтронів.

2. Дослідити фрагменти фотоподілу ^{237}Np , $^{233,235,238}\text{U}$, ^{241}Am і ^{239}Pu з метою отримання інформації про ізомерні відношення виходів ядер-уламків фотоподілу.

3. З отриманих ІВВ на основі модельних припущень отримати середні кутові моменти ядер-фрагментів фотоподілу важких ядер ^{237}Np , $^{233,235,238}\text{U}$, ^{241}Am і ^{239}Pu та висунути гіпотези про їх динаміку ділення за окремими каналами.

4. Виміряти з високою точністю величини енергії перших збуджених станів ядер ^{115}Sn та ^{197}Au , розрахувати коефіцієнти внутрішньої конверсії та параметри проникнення для окремих γ -переходів в ядрах ^{120}Sn та ^{177}Hf .

5. Порівняти отримані експериментальні дані з теоретичними значеннями, розрахованими на базі існуючих модельних уявлень про механізми перебігу відповідних реакцій з врахуванням структури збуджених рівнів атомних ядер.

Об'єкт дослідження. Атомні ядра в збуджених станах.

Предмет дослідження. Ізомерні та основні стани атомних ядер.

Методи дослідження. Для експериментального визначення ізомерних відношень перерізів(виходів) та перерізів(виходів) використовувалася методика прямого

вимірювання γ -спектрів продуктів активації без попереднього радіохімічного виділення за допомогою рентгенівської і γ -спектрометрії. Здійснювалась математична обробка γ -спектрів.

Теоретичні розрахунки ізомерних відношень та середніх кутових моментів ядер-продуктів фотоділення спиралися на припущення статистичного механізму розпаду збуджених материнських ядер (використання модельного підходу Хаузера-Фешбаха). Для теоретичного моделювання використовувалися відкриті програмні коди TALYS-1.4,1.6,1.9 та EMPIRE-3.2 для розрахунків характеристик ядерних реакцій, в яких введено можливість вивчати різні реакції, досліджувати процеси дезбудження уламків фотоподілу, підраховувати ізомерні відношення, перерізи та виходи.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі вперше отримано експериментальні величини ізомерних відношень виходів та середньозважених виходів в реакціях з гальмівними гамма-квантів при окремих значеннях їх граничної енергії ($E_{\text{гр}}$) в ядрах $^{179\text{m}2}\text{Hf}$, $^{180\text{m}}\text{Hf}$, $^{178\text{m}}\text{Ta}$, ^{177}Ta , ^{177}Lu , ^7Be , $^{178\text{m,g}}\text{Lu}$ та $^{182\text{m}}\text{Hf}$. Встановлено односторонній характер функції збудження реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ в області ГДР.

В (γ, γ') -, $(\gamma, 2n)$ -, $(\gamma, 3n)$ -, $(\gamma, 4n)$ -реакціях показано домінування статистичного механізму, а в (γ, p) -, (γ, pn) -, $(\gamma, p2n)$, (γ, pxn) - та (γ, α) -реакціях при $E_{\text{гр}} = 17.5$ та 20 МеВ - нестатистичних процесів. Для (γ, p) -реакції та для реакцій на борі та берилії зі зростанням $E_{\text{гр}}$ внесок статистичних та передрівноважних механізмів зростає на 1-2 порядки і починає давати значний вклад у їх вихід.

Отримано кількісне узгодження експериментальних та теоретичних виходів реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$ в широкому діапазоні величин $E_{\text{гр}}$ за умови врахування ізоспінового розщеплення ГДР в межах напівпрямого механізму.

Отримані перерізи реакцій $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ і $^{136}\text{Ce}(\gamma, n)^{135}\text{Ce}$ в області ГДР та встановлено статистичний механізм їх перебігу.

Виміряні ізомерні відношення перерізів в ядрах $^{93}\text{Tc}^{\text{m,g}}$ в (d, n) і (p, γ) -реакціях, в ядрах $^{95}\text{Tc}^{\text{m,g}}$ в (d, n) -реакції, вперше в ядрах $^{95}\text{Nb}^{\text{m,g}}$ в (d, α) -реакції для дейтронів та протонів з величинами енергії 4.5 та 6.8 МеВ, відповідно.

Розраховано ІВП реакцій $^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134\text{m,g}}\text{Cs}$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198\text{m,g}}\text{Au}$ та $^{197}\text{Au}(n, p)^{197\text{m,g}}\text{Pt}$ при енергії нейтронів 2.9 МеВ. Показано, що реакція $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198\text{m,g}}\text{Au}$ носить статистичний характер, а для інших можливий значний вклад нестатистичних механізмів.

Вперше проведено вимірювання перерізу реакції $^{93}\text{Nb}(p, n)^{93\text{m}}\text{Mo}$ при енергії протонів 3.85 МеВ. Здійснено вимірювання ІВП реакцій $^{196,198}\text{Pt}(p, n)^{196\text{m,g}, 198\text{m,g}}\text{Au}$ при енергії протонів 6.8 МеВ та $^{120}\text{Sn}(p, n)^{120}\text{Sb}^{\text{m,g}}$ при енергії протонів 3.9 МеВ. Констатується можлива присутність низькорозташованого, високоспінового рівня з енергією 330 кеВ та спіном $(7, 8^-)$ в схемі рівнів ^{120}Sb та значний вплив нестатистичних механізмів для реакцій $^{196}\text{Pt}(p, n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ та $^{198}\text{Pt}(p, n)^{198\text{m,g}}\text{Au}$.

Вперше проведено вимірювання перерізів та ІВП реакції $^{175}\text{Lu}(\alpha, an)^{174}\text{Lu}^{\text{m,g}}$ для окремих значень енергії альфа-частинок в діапазоні 15.3-25.2 МеВ. При

$E_\alpha = 25.2$ MeV домінує статистичний механізм, а при інших енергіях можливий внесок структури збуджених рівнів та шляхів їх розпаду.

Вперше проведено вимірювання перерізів реакцій $^{176}\text{Lu}(\alpha, p)^{179}\text{Hf}^{m2}$ та $^{175}\text{Lu}(\alpha, 2n)^{177}\text{Ta}$ для 26 MeV-них альфа-частинок. Для $(\alpha, 2n)$ -реакції можливий значний вплив нестатистичних процесів. Для (α, p) -реакції внесок передрівноважного та статистичного механізмів на рівні 11% та 89%, відповідно дозволяє узгодити експериментальні та теоретичні дані.

Вперше проведено вимірювання перерізів напрацювання $^{178}\text{Hf}^{m2}$ при опроміненні мішеней природного танталу альфа-частинками в енергетичному діапазоні 36-92 MeV.

Вперше визначено середні кутові моменти (\bar{J}) уламків ділення ^{90}Rb , ^{130}Sb , ^{133}Te , ^{134}I і ^{135}Xe , утворених внаслідок фотоділення ^{237}Np та ^{241}Am гальмівними γ -квантами з $E_{\text{гр}} = 9.8$ та 17 MeV з виміряними ізомерними відношень виходів.

Встановлено як відсутність зростання величини \bar{J} з ростом A для непарних по Z ядер на відміну від парних ядер ^{235}U та ^{239}Pu , так і особлива поведінка СКМ для ^{135}Xe .

Отримано вперше нові дані з ізомерних відношень виходів ядер ^{97}Nb , що утворюються після фотоподілу ^{235}U та ^{238}U гальмівним випромінюванням з граничними енергіями 10.5, 12.0 та 18.0 MeV.

При фотоподілі ^{238}U гальмівними γ -квантами з $E_{\text{гр}} = 6.25, 12, 12.5, 14.5$ та 18 MeV вперше проведено експериментальне вимірювання IBV та розрахунок СКМ ядер ^{133}Xe та ^{135}Xe та ядер ^{95}Nb при $E_{\text{гр}} = 12$ і 12.5 MeV. Констатується можливість впливу оболонкових ефектів та відкриття (γ, nf) - і $(\gamma, 2nf)$ -каналів поділу на значення IBV та СКМ первинних фрагментів ділення.

Вперше виміряні IBV ядер ^{84}Br , ^{90}Rb , ^{131}Te , ^{132}Sb , ^{132}I , ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe при фотоділенні ^{235}U , ^{237}Np і ^{239}Pu гальмівними γ -квантами з $E_{\text{гр}} = 18$ MeV; ядер ^{90}Rb , ^{133}Te , ^{134}I і ^{135}Xe при фотоділенні ^{233}U гальмівними γ -квантами з $E_{\text{гр}} = 10.5$ і 17 MeV. Виявлено вплив непарних та парно-парних ефектів в системах, що діляться.

Ізомерні відношення виходів та СКМ розраховані для ядер ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe – фрагментів фотоподілу ^{235}U для (γ, f) -, (γ, nf) -реакцій вперше при $E_{\text{гр}} = 17$ MeV. Показано, що величини середніх кутових моментів слабо залежать від моделей радіаційних силових функцій і густин рівнів.

Виміряна з високою точністю енергія першого збудженого стану ^{197}Au . Її величина рівна 77.339 ± 0.003 keV.

Проведене з найвищою точністю вимірювання енергії γ -лінії 497 keV з розпаду ^{115}Sb . Величина енергії першого збудженого стану ^{115}Sn склала $497.342(3)$ keV і значення енергії β -розпаду ^{115}In на цей стан рівне 147 ± 10 eV.

Вперше показано, що для γ -переходу 55 keV, який супроводжує розпад $^{177}\text{Lu}^m$ розбіжності між експериментальними та теоретичними коефіцієнтами внутрішньої конверсії (КВК) можна пояснити проявом внутрішньоядерної конверсії з параметром проникнення $\lambda_1 = 5.7 \pm 0.8$.

Практичне значення отриманих результатів. Приведені в дисертаційній роботі експериментальні та теоретичні дані для реакцій за участю дейтронів, нейтронів, протонів, альфа-частинок і гальмівних γ -квантів будуть корисні при створенні

теорій ядра та ядерних реакцій. Для оцінки можливостей напрацювання радіонуклідів та в активаційному аналізі будуть використані дані з усіх досліджених реакцій. Інформація про середні кутові моменти фрагментів фотоподілу може бути корисною при створенні всебічної теорії ділення, а також використовуватись в ядерній енергетиці при розрахунках продуктів ділення на діючих АЕС. Експериментальні дані щодо величин енергії збудження перших збуджених рівнів ядер ^{197}Au та ^{115}Sn будуть корисними для окремих атомно-ядерних процесів та встановлення обмеження на масу нейтрино.

Особистий внесок здобувача. Співавторами наукових праць є науковий консультант та науковці, спільно з якими проведені дослідження. Автор приймав участь в усіх розробках, що складають зміст дисертації. Усі експерименти, на основі яких були отримані результати дисертації, проводились автором безпосередньо. Моделювання з використанням програмних кодів TALYS-1.4,1.6,1.9 та EMPIRE-3.2 здійснювалось безпосередньо дисертантом. Усі наукові узагальнення, положення, результати, висновки та рекомендації, викладені у дисертації, виконані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено та обговорено на 62, 63, 64, 67-й Міжнародних нарадах з ядерної спектроскопії та структури атомного ядра, на 4-й Міжнародній конференції «Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy», (Kyiv, September 3-7, 2012), щорічних конференціях ІЯД НАН України 2012–2020 років, семінарах відділу структури ядра та на об'єднаних семінарах відділів ІЯД.

1. LXII international conference “Nucleus 2012”. Voronezh, Russia. June 25-30, 2012 y. (усні доповіді).
2. 4 international conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (Kyiv, September 3-7, 2012 y., стендова доповідь).
3. XIX щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 24-27 січня 2012 р., усні доповіді).
4. LXIII international conference on nuclear physics “Nucleus 2013” (Moscow, October 08-12, 2013 y., усні доповіді).
5. XX щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 28 січня-1 лютого 2013 р., усні доповіді).
6. LXIV international conference on nuclear physics “Nucleus 2014” (Minsk, July 01-04, 2014 y., усна доповідь співавтором).
7. XXI щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 27-31 січня 2014 р., усні доповіді).
8. XXII щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 26-30 січня 2015 р., усні доповіді).
9. XXIII щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 01-05 лютого 2016 р., усні доповіді).
10. International conference “Nucleus 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nuclear Structure). Almaty, Republic of Kazakhstan, September 12-15, 2017 y.

11. XXIV щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 10-13 квітня 2017 р., усні доповіді).
12. XXV щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 16-20 квітня 2018 р., усні доповіді).
13. XXVI щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 8-12 квітня 2019 р., усні доповіді).
14. XXVII щорічна наукова конференція ІЯД НАН України (Київ, 21-25 вересня 2020 р.) (on-line).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 78 публікаціях, з них 25 - статті у реферованих вітчизняних та міжнародних журналах, з яких 16 статей в іноземних виданнях та 53 роботи у тезах доповідей на конференціях.

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота викладена на 320 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Обсяг основного тексту дисертації складає 290 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 53 таблицями, 111 рисунками та 2 схемами. Список використаних джерел містить 267 найменувань, з них 41 кирилицею та 226 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито обґрунтування вибору теми досліджень, сформульовано основну мету, об'єкт, предмет та методи досліджень. Показано основні наукові результати, їхнє наукове та практичне значення, наукову новизну, достовірність, зв'язок з держбюджетними темами та науково-дослідними роботами, сформульовано особистий внесок автора, представлено апробацію результатів на наукових конференціях, нарадах та семінарах, наведено список робіт, в яких вони опубліковані.

У **першому розділі** представлений огляд літературних даних за темою досліджень, вказано, які параметри ядер і характеристики ядерних реакцій можна отримати, аналізуючи реакції з різними бомбардуючими частинками. Показуються переваги заселення довгоживучих ізомерних станів при вивченні механізмів перебігу ядерних реакцій з врахуванням структури збуджених рівнів ядер в області неперервного спектру.

Під час вивчення фотоядерних реакцій вказано на переваги низькоенергетичних фотонів ($E \leq 30$ MeV) порівняно з іншими частинками; наголошено на тому, що раніше проведені дослідження зосереджувались, в основному, на білямагічних ядрах і при значеннях енергії гальмівних γ -квантів в області гігантського дипольного резонансу. Біляпорогова область досліджена значно гірше, особливо для тих ядер, які мають високоспінові ізомерні рівні. Зокрема залишається зовсім не дослідженою реакція $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$, не дивлячись на численні роботи, які вивчають заселення $^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ в інших реакціях. Дослідження збудження високоспінових ізомерів також представляє значний інтерес для розробки нових джерел енергії, а саме пошуку

резонансних перерізів їх напрацювання з наступним дезбудженням. В цьому сенсі також цікаво дослідити заселення $^{179}\text{Hf}^{\text{cm}2}$ на реакторних нейтронах. Для фотоядерних реакцій з вильотом заряджених частинок очікується значний вклад нестатистичних механізмів. Він для важких ядер може перевищувати на порядки величини внесків від процесів, які проходять через складене ядро. При цьому цікаво порівняти ядра, ізомерні стани яких мають однакову різницю спінів між основним та ізомерним станами. Наголошується на обмеженості експериментальної інформації щодо (γ, n) -реакцій на р-ядрах, які є важливими для астрофізики. Досить мало інформації про $(\gamma, 3n)$ - та $(\gamma, 4n)$ -реакції, особливо на важких ядрах. В (γ, γ') -реакціях на важких ядрах очікується існування другого резонансу у функції збудження в області енергій вищій енергії гігантського дипольного резонансу. Вказано на важливість подібних досліджень для розуміння механізмів перебігу ядерних реакцій з врахуванням структури збуджених рівнів. Також наголошено на важливості дослідження фотоядерних реакцій з вильотом заряджених частинок на ядрах перехідної області з $A=6-11$, зокрема на ядрах бору та берилію. В цьому діапазоні масових чисел ядер можуть відбуватися як прямі процеси, так і збудження через резонансні стани. Ці експериментальні дані важливі для розробки фотоактиваційної методики контролю ^{10}Be на АЕС. Вказується на те, що дані про виходи фотоядерних реакцій з випромінюванням протонів на природному гафнії та його ізотопах також мають велике прикладне значення для оцінки виходів напрацювання ^{177}Lu . Техніка лікування пухлин кісткових тканин і внутрішніх органів радіофармпрепаратами на основі радіонукліду ^{177}Lu є однією з новітніх технологій в галузі ядерної медицини, оскільки низька енергія β -випромінювання, що супроводжує розпад ^{177}Lu забезпечує неглибоке проникнення і локальність терапії.

При аналізі реакцій з протонами, дейтронами, нейтронами та альфа-частинками виявлено недостатність інформації в біляпороговій області при заселенні високоспінових ізомерних станів. Перераховано значення енергії бомбардуючих частинок та нукліди, для яких раніше вже були отримані експериментальні дані. Вказано на важливість продовження вивчення заселення згаданих нуклідів для інших значень енергії бомбардуючих частинок, особливо для р-ядер $^{92,94}\text{Mo}$. Наголошується на необхідності продовження пошуку оптимальних шляхів напрацювання $^{178\text{m}2}\text{Hf}$, акцентується увага на відносно недорогих прискорювачах альфа-частинки середніх величин енергії. Вказано на необхідність продовження вивчення зарядообмінних (n, p) - та (p, n) -реакцій, оскільки вони дозволяють селективно вивчати збуджені рівні при величинах енергії дещо нижчих кулонівського бар'єру. Привертається увага до реакцій з альфа-частинками на лютеції в околі енергії 27 MeV, які дозволять краще оцінити внесок передрівноважного механізму.

При огляді ділення важких ядер вказується на важливість отримання інформації про ізомерні відношення виходів та середні кутові моменти фрагментів ділення для глибшого розуміння динаміки ділення по окремим каналам та вирішення ряду прикладних задач в ядерній та радіаційній фізиці. Вказується на незначну кількість інформації про середні кутові моменти фрагментів фотоділення, особливо для легких уламків ніобію, брону та рубідію. Наголошується на тому, що дана робота є

продовженням циклу попередніх досліджень. Підкреслюються переваги методу ізомерних відношень виходів та прямого вимірювання γ -спектрів наведеної активності при розрахунку середніх кутових моментів фрагментів фотоділення. Акцентується увага на більш ретельному дослідженні уламків фотоділення як ізотопів урану, так і трансуранових нуклідів з метою висунення більш однозначних гіпотез щодо динаміки ділення за окремими каналами.

При визначенні енергії збуджених станів вказано на важливість точного визначення енергії першого збудженого стану ядер ^{197}Au та ^{115}Sn . В першому випадку це потрібно для уточнення граничної енергії збудження ядра при електронному переході, а в другому – для уточнення величини енергії найменш енергетичного бета-розпаду. Підкреслюється невисока точність визначення квантових виходів окремих переходів, які супроводжують розпад $^{177\text{m}}\text{Lu}$ та ^{120}Sb . Для окремих переходів в цих ядрах очікуються аномалії в коефіцієнтах внутрішньої конверсії γ -променів.

Завершує розділ обґрунтування продовження досліджень для різних бомбардуючих частинок і різних ядер.

У **другому розділі** аналізуються методи дослідження збуджених станів ядер та механізмів перебігу ядерних реакцій, наводяться характеристики спектроскопічних систем і методик вимірювання, які використовуються в наступних дослідженнях. Показано переваги та недоліки методів проведення експериментів на пучку і поза пучком. Обґрунтовується вибір методу ізомерних відношень та вказується на значно вищу точність одночасного вимірювання розпаду і основного, і ізомерного рівнів. Наголошується, що експерименти, виконані в межах даної роботи, проводились на спектрометрах з детекторами з надчистого германію, а також на антикомptonівському спектрометрі на базі детектора з надчистого германію оточеного активним захистом на основі сцинтиляційних детекторів з NaI(Tl) . Електронний тракт спектрометрів складався з блоків виробництва фірм "ORTEC" і "CANBERRA". Для керування вимірами і для обробки результатів використовувались IBM-сумісні персональні комп'ютери на базі процесорів Intel-x86 та AMD. Окремі вимірювання проводились у режимі $\gamma\gamma$ -збігів. Керування вимірами здійснювалось за допомогою програми Netspectrum.

Описано можливості програми Winspectrum для обробки рентгенівських і гамма-спектрів. Для опису форми піків використовувався гаусіан з експоненціальними "хвостами". Наводяться формули, за допомогою яких у програмі Winspectrum проводиться розрахунок абсолютної та відносної ефективності реєстрації гамма-спектрометрів.

У **третьому розділі** описується дослідження збудження ізомерних та основних станів ядер в реакціях з гальмівними гамма-квантами. Наводяться умови проведення експериментів та спектроскопічні характеристики досліджуваних ядер. Описуються формули за допомогою яких розраховуються експериментальні значення ізомерних відношень виходів та середньозважених виходів.

Результати вимірювань для реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{m2}$ приведені в табл. 1. На рис. 1 наведені фрагменти вимірних γ -спектрів. Наголошується на тому, що дана реакція вивчається вперше в діапазоні величин граничної енергії в області ГДР.

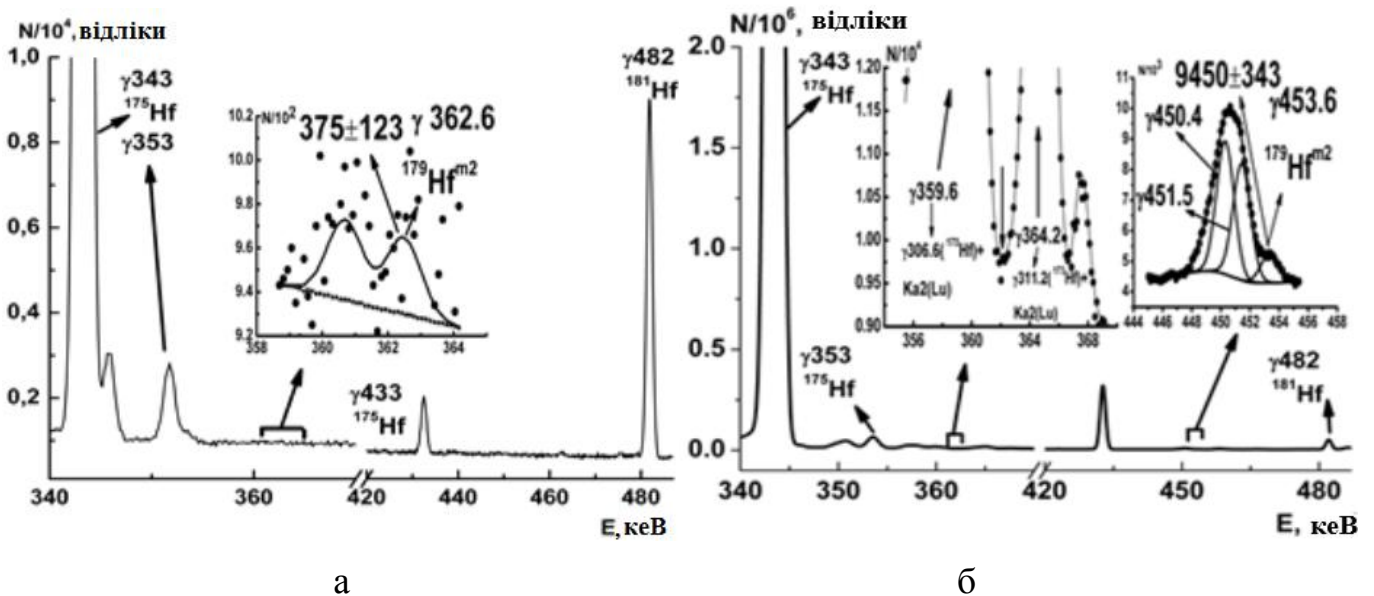


Рис. 1. Фрагменти типових γ -спектрів опромінених мішеней $^{180}\text{HfO}_2$ при $E_{\text{гр}} = 14.5$ MeV (а) та $^{\text{nat}}\text{HfO}_2$ при $E_{\text{гр}} = 14.8$ MeV (б)

Не було отримано узгодження експериментальних та теоретичних виходів як для параметрів, які задані в кодах EMPIRE-3.2 та TALYS-1.6 за умовчанням, так і при їх варіації в розумних межах. Модельовані виходи залишилися вищими за теоретичні на три порядки. Висувається гіпотеза про можливі дві причини даного перевищення: вплив напівпрямого механізму та домінування заселення збуджених рівнів ротаційної смуги основного стану ^{179}Hf .

Напівпрямий механізм не враховується в теоретичних моделях, які закладені в коди TALYS-1.6 та EMPIRE-3.2. Він призводить до зниження заселення $^{179m2}\text{Hf}$ і полягає у наступному: 1) взаємодія гамма-кванта з ядром і формування колективного дипольного вхідного стану (1^-); 2) емісія нейтрона з цього стану, який виносить значну енергію та невисокий кутовий момент (напівпрямий механізм); 3) розпад залишкового ядра до компаунд-ядра з нижчою енергією, порівняно з випаровувальною моделлю. Каскад γ -квантів, який супроводжує розпад цього компаунд-ядра має нижчу кількість переходів і отже нижчу імовірність заселення ізомерного стану. Цей механізм призводить до зниження виходу заселення $^{179m2}\text{Hf}$ порівняно з теоретичними розрахунками вже при величині енергії емітованих нейтронів до 6 MeV ($E_{\text{гр}} = 14.5$ MeV) і залишається дієвим при енергії нейтронів до 9 MeV ($E_{\text{гр}} = 17.5$ MeV).

Вказано, що додатковим механізмом зниження виходу реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179m2}\text{Hf}$ може бути домінуюче заселення рівнів ротаційної смуги основного стану ^{179}Hf . Цей механізм спостерігався при заселенні основного стану як в реакції $^{178m2}\text{Hf}(n, \gamma)^{179m2}\text{Hf}^g$, так і в (γ, n) -реакціях при напрацюванні ізомерів на мішенях із $Z = 47-50$. Вилітаючий високоенергетичний нейтрон з дипольного вхідного стану може збільшити імовірність заселення збуджених рівнів ротаційної смуги основного

стану. При зростанні граничної енергії гальмівних γ -квантів внесок напівпрямого механізму може зростати, що призводитиме до зниження імовірності заселення рівня з $J^\pi = 25/2^-$ в ^{179}Hf . Це відбувається при зростанні $E_{\text{гр}}$ з 15.1 до 17.5 MeV (див. табл. 1). Додатковою причиною зниження може бути вклад $(\gamma, 2n)$ -каналу. В той же час при зростанні $E_{\text{гр}}$ з 14.5 до 15.1 MeV спостерігається різке зростання як ІВВ, так і середньозважених виходів. Даний діапазон зміни $E_{\text{гр}}$ відповідає діапазону енергії збудження залишкового ядра ^{179}Hf від 7.1 до 7.7 MeV. Імовірно в даному енергетичному діапазоні існує набір збуджених рівнів, які переважно заселяють ротаційну смугу побудовану на ізомерному стані ^{179}Hf з $K^\pi = 25/2^-$. Вплив цього заселення може послаблювати вплив напівпрямого механізму. На жаль, схема збуджених рівнів ^{179}Hf відома лише до енергії 4.2 MeV.

Показано, що при зростанні граничної енергії гальмівних γ -квантів з 15.1 до 17.5 MeV знижуються і ізомерні відношення виходів і середньозважені виходи для $^{179}\text{Hf}^{m2}$. Це свідчить про одногорбий характер функції збудження реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{m2}$ в цій області.

Табл. 1. Експериментальні величини ізомерних відношень виходів Y_{m2}/Y_g $^{179}\text{Hf}^{m2,g}$ та середньозважені виходи ($\langle Y \rangle$) заселення $^{179}\text{Hf}^{m2,g}$

$E_{\text{гр}}, \text{MeV}$	$Y_{m2}/Y_g, \times 10^{-5}$	E^*, MeV	$\langle Y \rangle, \text{мкб}$
14.5	0.12 ± 0.05	6	0.18 ± 0.08
14.8	0.31 ± 0.025	6.3	0.49 ± 0.07
15.1	0.61 ± 0.03	6.6	1.1 ± 0.3
17.5	0.37 ± 0.02	9	0.7 ± 0.2

E^* - енергія збудження залишкового ядра.

Вказано, що вивчалися реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma, 3n)^{178m}\text{Ta}$, $^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$ при $E_{\text{гр}} = 40$ і 55 MeV та $^{180}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{178m}\text{Ta}$ при $E_{\text{гр}} = 20$ MeV. Фрагменти γ -спектрів активованих мішеней наведені на рис. 2.

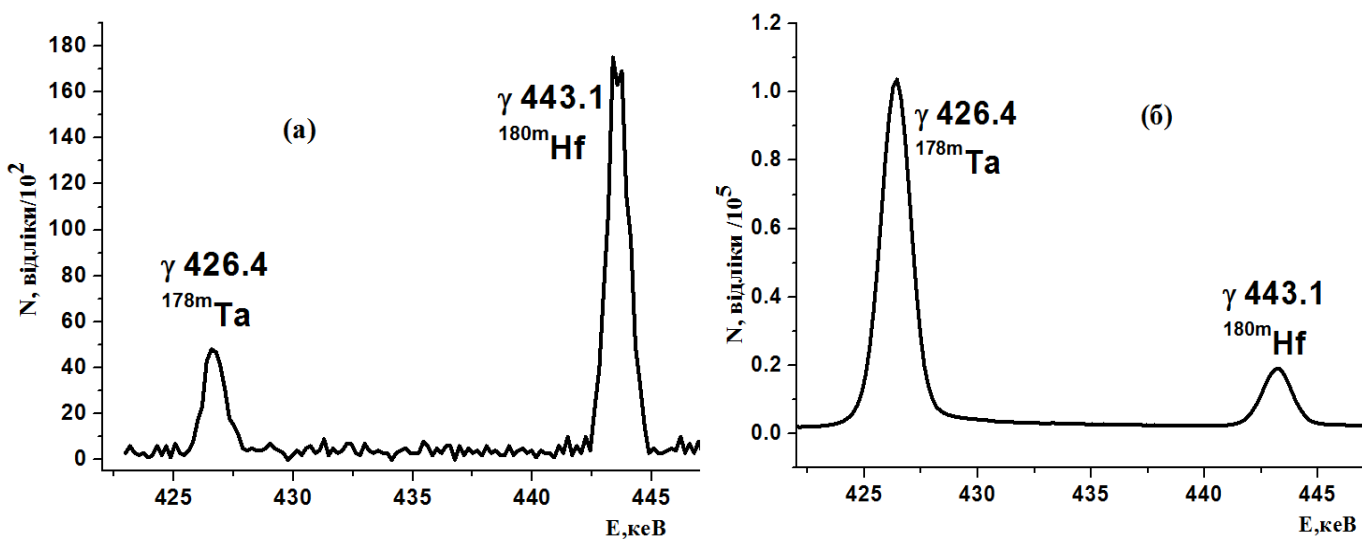


Рис. 2. Фрагменти γ -спектрів мішені природного Та опроміненого гальмівними γ -квантами з $E_{\text{гр}} = 20$ MeV (а) та $E_{\text{гр}} = 40$ MeV (б)

Слід відмітити, що вміст ^{180}Ta в природній суміші складає лише 0.012%, а поріг реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma,3n)$ рівний 22.2 MeV. Тому при опроміненні природного Ta гальмівними γ -квантами з $E_{\text{гр}} = 20$ MeV вона заборонена згідно закону збереження енергії, а при $E_{\text{гр}} = 40$ і 55 MeV повністю домінує. Розраховані середньозважені виходи наведені в табл. 2.

Табл. 2. Експериментальні і теоретичні середньозважені виходи ($\langle Y \rangle$) напрацювання $^{177,178\text{m}}\text{Ta}$

Реакція	Енергія $E_{\text{гр}}$, (MeV)	$\langle Y \rangle$, мб						
		Експеримент	TALYS-1.9, моделі густин рівнів					
			ld1	ld2	ld3	ld4	ld5	ld6
$^{180}\text{Ta}(\gamma,2n)^{178\text{m}}\text{Ta}$	20	48.5±5	61	56	61	25	73	56
	40	1.5±0.15	6.7		7	3	7	5.4
$^{181}\text{Ta}(\gamma,3n)^{178\text{m}}\text{Ta}$	55	1.3±0.1	4.5	4.6		2.5	5	3.8
	40	9.3±0.9	3.8	3.3	3.7	2.5	2.2	2.7
$^{181}\text{Ta}(\gamma,4n)^{177}\text{Ta}$	55	6.1±0.9	5.8	5.6	5.2	4.1	4.6	5.3

Для оцінки механізмів перебігу досліджуваних реакцій було проведено моделювання з використанням програмного коду TALYS-1.9.

Результати розрахунків приведені в табл. 2. Як видно в області максимальної енергії 20 MeV для $(\gamma,2n)$ -реакції досягається непогане узгодження теоретичних і експериментальних даних. Слід відмітити, що в даній реакції процеси відбуваються між високоспіновими станами з $J^\pi 9^- \rightarrow 7^-$ і спостерігається задовільне узгодження практично для усіх моделей густини рівнів. Ці дані різко контрастують з дослідженнями, в яких вивчається заселення високоспінових станів з $K = 25/2$. Середньозважені виходи для (γ,n) -реакції в даному випадку навіть якісно не описуються в коді TALYS-1.9. Дана обставина вказує на те, що статистичні переходи слабо заселяють стани, в яких відбувається значна перебудова їх структури.

Середньозважений вихід $(\gamma,4n)$ -реакції при $E_{\text{гр}} = 55$ MeV задовільно описується в програмному коді TALYS-1.9. Це вказує на домінування статистичного механізму для даної реакції. Деяка аномалія для $(\gamma,4n)$ -реакції в співвідношенні виходів при 40 та 55 MeV може бути зумовлена тим, що максимум функції збудження цієї реакції знаходиться в області 40-45 MeV і зміщення його на 5 MeV змінює вихід $(\gamma,4n)$ -реакції при $E_{\text{гр}} = 40$ MeV в рази. В той же час для 55 MeV подібне зміщення не грає такої кардинальної ролі. Для $(\gamma,3n)$ -реакції теоретичні СВ у 2-4 рази вищі за експериментальні, що говорить про значний вклад нестатистичних механізмів.

Підкреслюється, що особливий інтерес викликають дані про збудження $^{180\text{m}}\text{Hf}$ в (γ,p) -реакції в широкому діапазоні величин граничної енергії гальмівних γ -квантів з причини можливого значного впливу нестатистичних механізмів. На рис. 3 наведені фрагменти виміряних γ -спектрів реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma,p)^{180}\text{Hf}^{\text{m}}$ а в табл. 3 вказані її середньозважені виходи.

Не було досягнуто узгодження між теоретичними та експериментальними виходами при використанні параметрів за замовчуванням при моделювання в коді

TALYS-1.9. Теоретичні виходи залишалися приблизно на два порядки нижчими експериментальних величин при $E_{гр} = 20$ МеВ і на порядок при $E_{гр} = 40$ та 55 МеВ. При моделюванні враховувалась також деформована структура ядер ^{180}Hf .

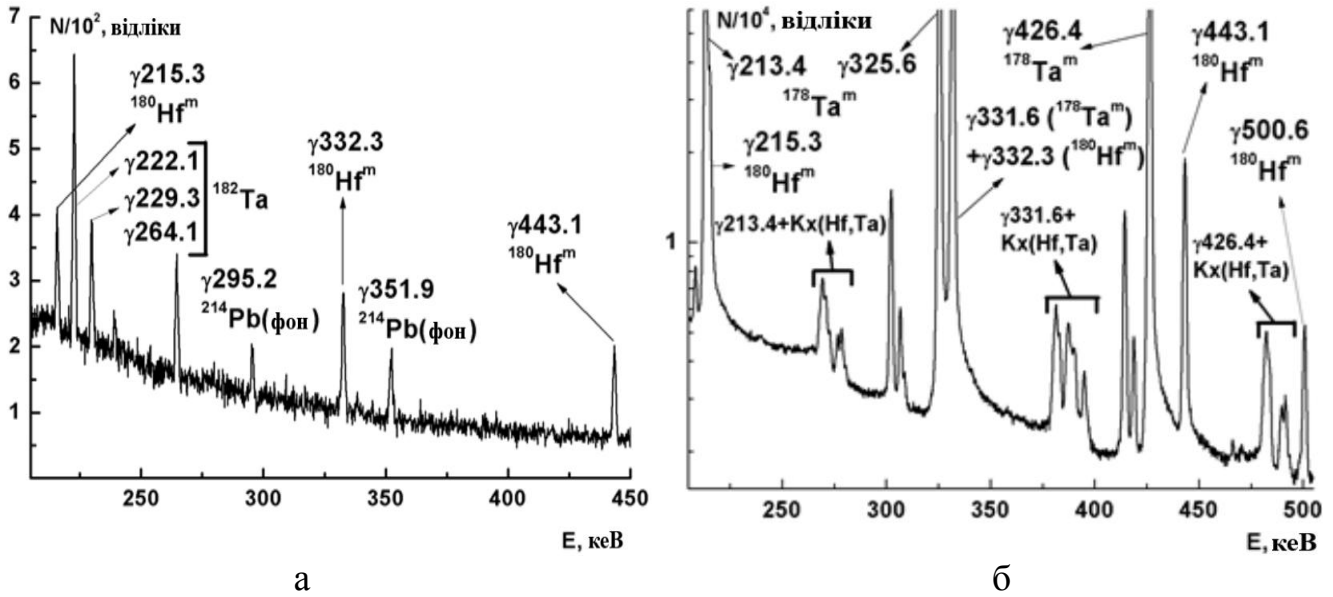


Рис. 3. Фрагменти типових γ -спектрів опромінених мішеней Та при $E_{гр} = 20$ МеВ (а) та при $E_{гр} = 40$ МеВ (б)

Отримані в результаті даного моделювання середньозважені виходи $\langle Y \rangle_{\text{стат}}^{\text{теор}}$ показані в табл. 3. При цьому теоретичні виходи залишаються значно нижчими експериментальних величин, відповідно у 51, 3.5 та 2 рази при $E_{гр} = 20, 40$ та 55 МеВ. Отже можна зробити висновок про домінування нестатистичних механізмів при даних граничних величинах енергії гальмівних γ -квантів.

Для прояснення типу нестатистичного механізму була використана теоретична модель, яка враховує ізоспінове розщеплення ГДР і базується на гіпотезі про домінування напівпрямого його розпаду в (γ, p) -реакції.

Зазначено, що в даному випадку при розрахунках експериментальних середньозважених виходів з використанням напівпрямого механізму $\langle Y \rangle_{\text{пр}}^{\text{експ}}$ впливом кулонівського бар'єру можна знехтувати. Проте при підрахунках виходів, слід врахувати енергію ізоспінового розщеплення. Отримані виходи $\langle Y \rangle_{\text{пр}}^{\text{експ}}$ також показані в табл. 3.

Табл. 3. Експериментальні та теоретичні виходи реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$

Енергія $E_{гр}$, (МеВ)	$\langle Y \rangle$, мкБн			
	$\langle Y \rangle$	$\langle Y \rangle_{\text{стат}}^{\text{теор}}$	$\langle Y \rangle_{\text{пр}}^{\text{експ}}$	$\langle Y \rangle_{\text{пр}}^{\text{теор}}$
20	51±5	1(1d3)	23±3	21
40	69±9	20(1d3)	55±6	57
55	56±6	28(1d3)	50±5	59

Теоретичні розрахунки для напівпрямого процесу ($\langle Y \rangle_{\text{пр}}^{\text{теор}}$) показані в табл. 3 в останній колонці і те ж враховують ізоспінове розщеплення ГДР. Отже врахування ізоспінового розщеплення для напівпрямого механізму при розрахунках середньозважених виходів для реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$ демонструє гарне кількісне узгодження експериментальних і теоретичних величин.

Наголошується, що при вивченні середньозважених виходів реакцій $^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180\text{m}}\text{Hf}$ і $^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182\text{m}}\text{Hf}$ при $E_{\text{гр}} = 40$ та 55 MeV для моніторингу потоку гальмівних γ -квантів використовувалась реакція $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$. Фрагменти γ -спектрів (γ, α) -реакції приведені на рис. 4. Для інших фотоядерних реакцій використовувались моніторні реакції $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$, $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174}\text{Lu}$, $^{175}\text{Lu}(\gamma, 2n)^{173}\text{Lu}$.

Результати проведених розрахунків наведені в табл. 4. Як видно для обох граничних величин енергії не досягається узгодження теоретичних та експериментальних даних, як при використанні параметрів за замовчуванням, так і при їх варіації в розумних межах. Теоретичні виходи залишаються нижчими експериментальних величин приблизно на 3 порядки.

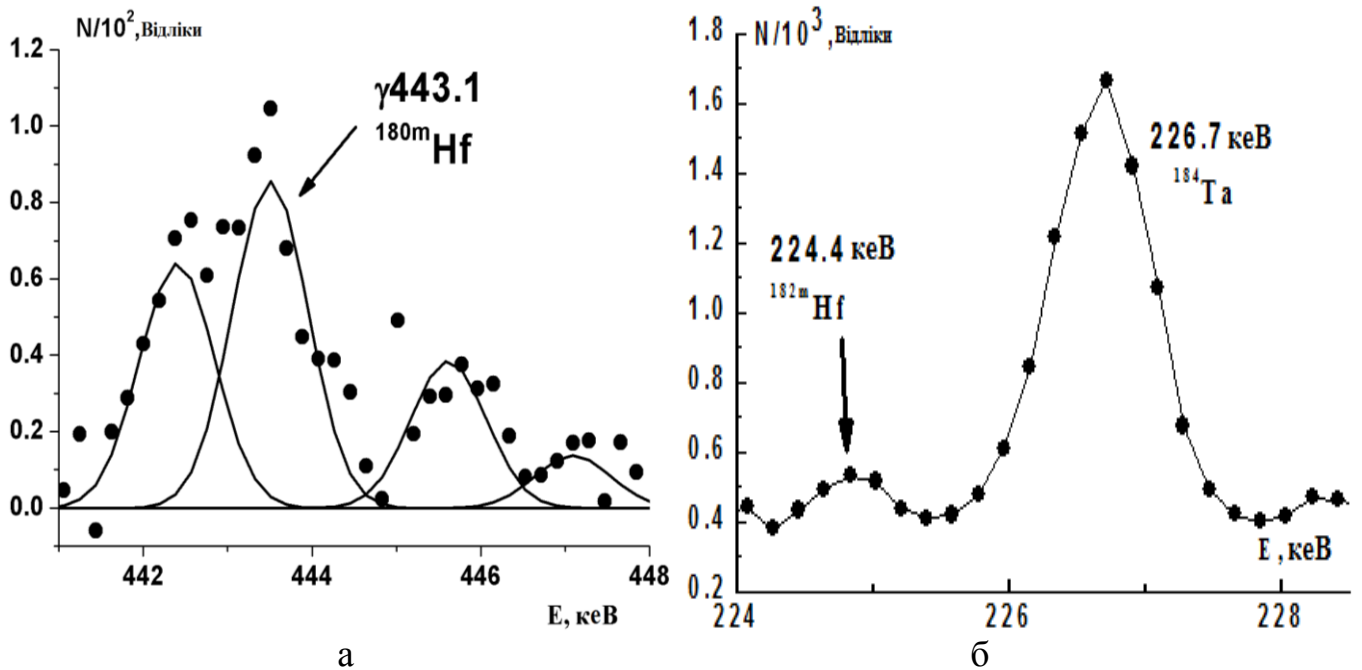


Рис. 4. Фрагменти γ -спектрів опромінених мішеней $^{\text{nat}}\text{W}$. $E_{\text{гр}} = 55$ MeV. Реакції $^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180\text{m}}\text{Hf}$ (а) та $^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182\text{m}}\text{Hf}$ (б)

Табл. 4. Експериментальні і теоретичні середньозважені $\langle Y \rangle$ виходи напрацювання $^{180}\text{Hf}^{\text{m}}$ та $^{182}\text{Hf}^{\text{m}}$

Реакція	$E_{\text{гр}}$, MeV	$\langle Y \rangle$, експ, мкб	$\langle Y \rangle$, TALYS-1.9, мкб
$^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180\text{m}}\text{Hf}$	40	1.0(2)	0.004
$^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180\text{m}}\text{Hf}$	55	2.5(3)	0.005
$^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182\text{m}}\text{Hf}$	40	5.7(17)	0.001
$^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182\text{m}}\text{Hf}$	55	2.8(9)	0.003

Розглядався напівпрямий виліт α -частинки з наступним розпадом залишкового ядра за допомогою звичайних статистичних переходів. В даному випадку розпадаються залишкові ядра $^{180,182}\text{Hf}$ аналогічно, як і для (γ, γ') -реакцій. Розраховані середньозважені виходи в коді TALYS-1.9 для моделі густини рівнів за замовчуванням дають для $^{180,182}\text{Hf}$ величини $\langle Y \rangle \approx 2-3$ мкбн, тобто перебувають в задовільному узгодженні з експериментальними даними.

Підкреслюється, що вивчалися реакції на борі та берилії при $E_{\text{тр}} = 20, 40$ та 55 MeV. Так при $E_{\text{тр}} = 20$ MeV була досліджена реакція $^{10}\text{B}(\gamma, t)^7\text{Be}$, енергетичний поріг якої складає 18.7 MeV а кулонівський бар'єр ~ 1.5 MeV. Таким чином, дана реакція

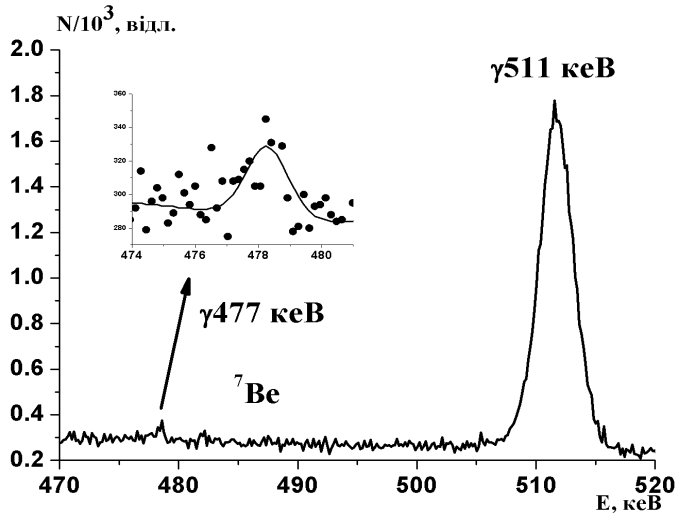


Рис. 5. Фрагменти γ -спектру опроміненої мішені $^{\text{nat}}\text{B}$ при $E_{\text{тр}} = 20$ MeV

Підтвердженням повністю прямого механізму реакції (γ, t) є те, що модельовані виходи на 3 порядки нижчі експериментальних величин. Подібна поведінка характерна для перехідної області ядер з $A = 6 - 11$.

Підкреслюється, що проводилось дослідження $(\gamma, \text{рхп})$ -реакцій на ядрах гафнію з заселенням $^{177,178}\text{Lu}$ в широкому діапазоні величин граничної енергії гальмівних γ -квантів на мішенях як збагачених, так і природного ізотопного складу. Фрагменти деяких γ -спектрів показані на рис. 6.

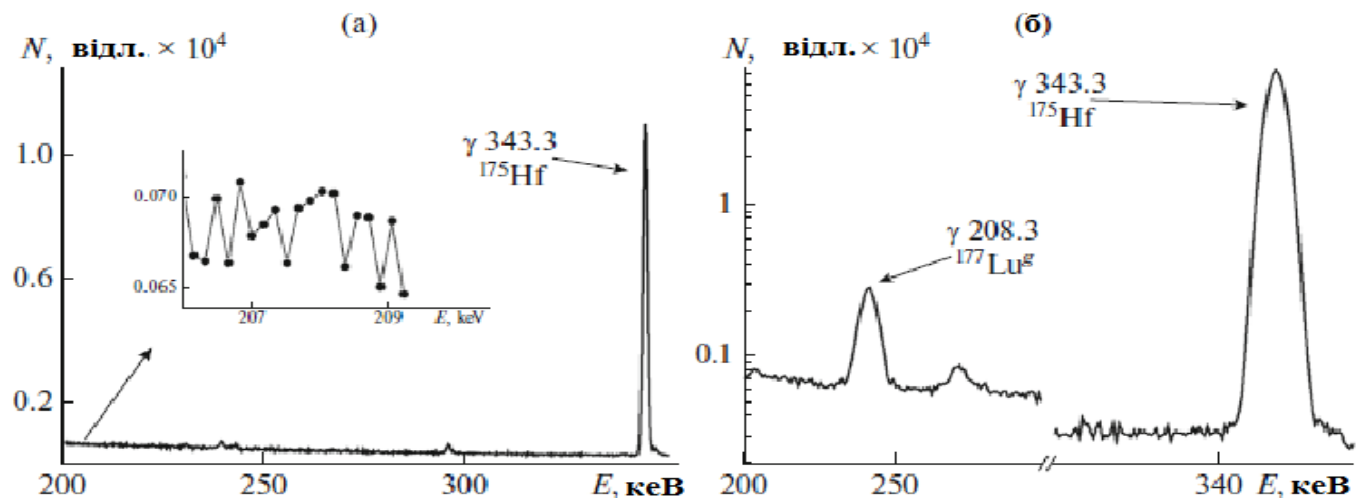


Рис. 6. Фрагменти типових γ -спектрів ^{179}Hf , опроміненого гальмівними γ -квантами з $E_{\text{тр}} = 20$ MeV (а) та $E_{\text{тр}} = 55$ MeV (б)

можлива лише через прямий механізм, в якому ігнорується кулонівський бар'єр. З точністю 15-20 % реєструється активація ^7Be (див. рис. 5). Середньозважений вихід реакції $^{10}\text{B}(\gamma, t)^7\text{Be}$ складає $11(2)$ мкбн. Важливим результатом даних досліджень є те, що в області величин енергії γ -квантів $30-40$ MeV співвідношення середньозважених виходів реакцій $(\gamma, 2n)$ та $(\gamma, p2n)$ приблизно однакове. Це дозволяє розробляти методи ідентифікації ^{10}Be , який активується в (n, γ) - і (n, p) -реакціях на базі єдиного підходу.

Розраховані виходи напрацювання ^{177}Lu приведені у табл. 5. Як впливає з порівняння експериментальних та теоретичних даних, внесок статистичних та передрівноважних механізмів у вихід (γ, p) -реакції в області граничної енергії 20 MeV не перевищує 0.1-0.2 % і прямий механізм домінує. Ситуація кардинально відрізняється в області вищих енергій. В цьому випадку внесок статистичних та передрівноважних механізмів зростає і досягає для (γ, pn) -реакції 60% (див. табл. 5). Дана обставина вказує на більший внесок високоспінових станів в цій області енергій гальмівних γ -квантів, оскільки нестатистичні реакції, як правило приводять до збудження низькоспінових рівнів.

Табл. 5. Експериментальні та модельовані середньозважені ($\langle Y \rangle$) виходи напрацювання ^{177}Lu

Реакція	Енергія $E_{\text{тр}}$, (MeV)	$\langle Y \rangle$, мкб		
		Експеримент	TALYS-1.9	EMPIRE-3.2
$^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$	17.5	590±60	0.9	0.6
	20	1360±190	1.5	1.9
$^{\text{nat}}\text{Hf}(\gamma, pxn)^{177}\text{Lu}$	37	450±70	41	-
	55	200±30	44	-
$^{179}\text{Hf}(\gamma, pn)^{177}\text{Lu}$		120±20	79	-
$^{180}\text{Hf}(\gamma, p2n)^{177}\text{Lu}$	55	1.7±0.5	0.06	0.02

З наших даних отримано, що при опроміненні мішені вагою 10 г з природного Hf струмом 0.1 mA на протязі 10 діб напрацюється 650 мКи активності ^{177}Lu . В теперішній час в ядерній медицині використовуються джерела ^{177}Lu з активністю біля 27 мКи. Наведені дані демонструють перспективність використання мікротронів та лінійних прискорювачів для виробництва ^{177}Lu , особливо при використанні збагачених мішеней гафнію.

Отримані експериментальні середньозважені виходи та ІВВ реакцій на мішенях танталу та гафнію в області енергій вище ГДР наведені в табл. 6.

Для оцінки механізмів перебігу реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, pn)^{178}\text{Lu}^{\text{m,g}}$ було проведено її дослідження у рамках коду EMPIRE-3.2. Отримані теоретичні величини ІВВ та середньозважених виходів (СВ) наведені в табл. 6. Не було досягнуто узгодження між експериментом і теорією для ІВВ при використанні набору параметрів за замовчуванням (levden0). Теоретичні величини ізомерних відношень виходів залишалися в 15.3 рази нижчими від експериментальних значень, незважаючи на досить непогане узгодження між теорією та експериментом при заселенні основного стану ^{178}Lu . Це зумовлено тим, що виміряний середньозважений вихід заселення $^{178}\text{Lu}^{\text{m}}$ більш ніж на порядок перевищує теоретичне значення для реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, pn)^{178}\text{Lu}^{\text{m,g}}$ при використанні моделі густини рівнів за замовчуванням. Варіювання моделями для опису густини рівнів не призвели до узгодження між експериментальними та теоретичними значеннями для ІВВ та середньозважених виходів при заселенні $^{178}\text{Lu}^{\text{m}}$. Тому можна сказати, що в даному випадку домінуючим є нестатистичний механізм.

Для оцінки механізмів перебігу реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma,\alpha)^{177}\text{Lu}^{\text{m,g}}$ було проведено дослідження її СВ у рамках коду EMPIRE-3.2. Отримані теоретичні результати з IBV та середньозважених виходів наведені в табл. 6. Не було досягнуто узгодження між експериментом і теорією для IBV при використанні набору параметрів за замовчуванням. Теоретичні величини ізомерних відношень виходів залишалися в 2.1 рази нижчими від експериментальних значень. Однак, якщо використовувати модель густини рівнів (levden1), яка є узагальненою надтекучою моделлю (GSM), то досягається узгодження між теорією та експериментом (див. табл. 6). При цьому теоретичні середньозважені виходи заселення основного та ізомерного станів ^{177}Lu є приблизно в 2 рази нижчими експериментальних величин.

Табл. 6. Експериментальні, теоретично розраховані середньозважені виходи та IBV для (γ,pn) - і (γ,α) -реакцій

Реакція	Енергія $E_{\text{гр}}$ (MeV)	$Y_{\text{h}}/Y_{\text{l}}$ експ.	$Y_{\text{h}}/Y_{\text{l}}$ теор.	$\langle Y \rangle$, мкбн	
				Експ.	EMPIRE 3.2
$^{181}\text{Ta}(\gamma,\alpha)^{177}\text{Lu}^{\text{m}}$	37	$(2.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$ (levden0)	2.2±4	0.63(levden0)
$^{181}\text{Ta}(\gamma,\alpha)^{177}\text{Lu}^{\text{g}}$			$1.9 \cdot 10^{-2}$ (levden1)		1.1(levden1)
$^{180}\text{Hf}(\gamma,\text{pn})^{178}\text{Lu}^{\text{m}}$	55	$(2.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$ (levden0)	315±25	17.9(levden0)
$^{180}\text{Hf}(\gamma,\text{pn})^{178}\text{Lu}^{\text{g}}$	55			1370± 140	1210(levden0)

Отже можна зробити висновок, що у і даному випадку домінують нестатистичні механізми.

У **четвертому розділі** описується дослідження перерізів та ізомерних відношень перерізів в реакціях з нейтронами, низькоенергетичними протонами і дейтронами та альфа-частинками. Наводяться умови проведення експериментів та спектроскопічні характеристики досліджуваних ядер. Описується порівняння експериментальних та теоретичних даних, робляться висновки про механізми перебігу вищезгаданих реакцій.

Зокрема отримано IBP реакції $^{120}\text{Sn}(\text{p},\text{n})^{120}\text{Sb}^{\text{m,g}}$ при енергії протонів 3.9 MeV, фрагменти спектра опроміненої мішені олова приведені на рис. 7.

Розраховане ізомерне відношення перерізів для реакції $^{120}\text{Sn}(\text{p},\text{n})^{120}\text{Sb}^{\text{m,g}}$ склало $(9.1 \pm 2.3) \cdot 10^{-4}$. Моделювання цього відношення в рамках програмних кодів EMPIRE-3.2 та TALYS-1.9 не привело до заселення ізомерного стану. Причиною цього є те, що енергія збудження залишкового ядра рівна 2 MeV і перебуває в

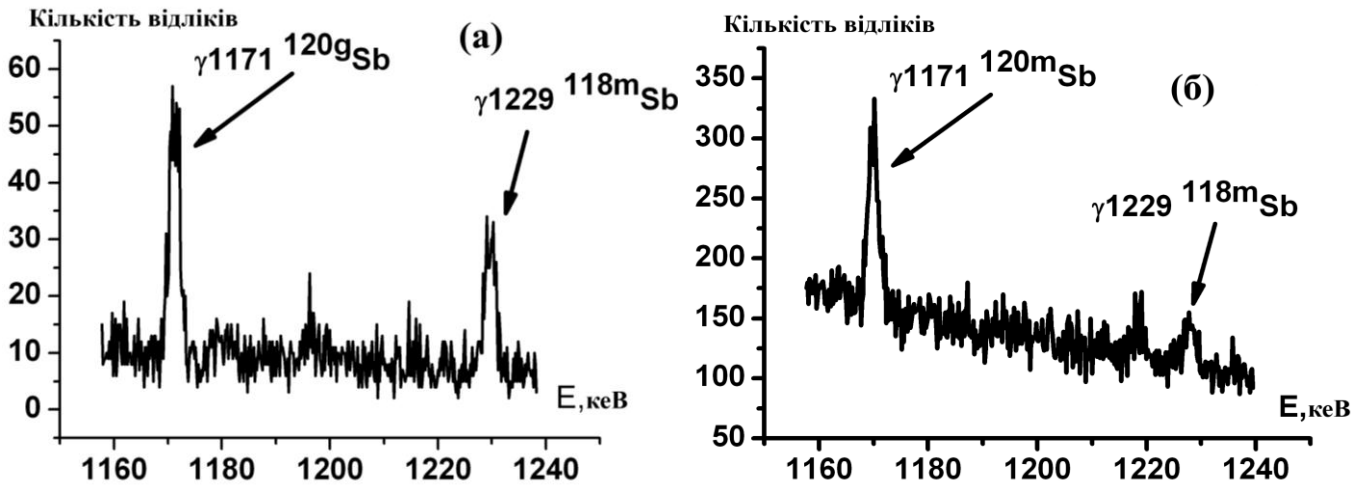


Рис. 7. Фрагменти γ -спектра опроміненої мішені олова виміряні відразу після опромінення (а) та через добу (б)

області дискретного спектра, де не працюють статистичні механізми. В той же час випаровування нейтрона з компаунд-ядра може відбуватися за допомогою статистичних моделей. Висунення гіпотези про присутність низькорозташованого, високоспінового збудженого рівня з енергією 330 кеВ та спіном (7,8) в схемі дискретних рівнів ^{120}Sb призводить до непоганого узгодження експериментальних та теоретичних результатів. Методика, яка аргументує можливу наявність низькоенергетичних, високоспінових, збуджених рівнів в ядрах ^{120}Sb описана в наших попередніх дослідженнях.

Підкреслюється, що вперше проведено вимірювання перерізів напрацювання $^{178}\text{Hf}^{m2}$ при опроміненні мішеней природного танталу альфа-частинками в енергетичному діапазоні 36-92 МеВ. Отримані перерізи наведені в табл. 7. Проведено моделювання цих перерізів у відкритому коді TALYS-1.4 з якого випливає, що основний внесок в заселення $^{178}\text{Hf}^{m2}$ дають реакції $(\alpha, \alpha p 2n)$, $(\alpha, 3p 4n)$ та $(\alpha, ^3\text{He} p 3n)$. В діапазоні енергій α -частинок 58-92 МеВ теоретичні результати гарно співпали з модельованими і базуючись на цьому було зроблено оцінку перерізу напрацювання основного стану ^{178}Hf . З цієї оцінки отримано величини ІВП $\sigma(^{178m2}\text{Hf})/\sigma(^{178g}\text{Hf})$ (див. табл. 8). Ці величини знаходяться у непоганому узгодженні з тенденцією зміни ІВП у інших реакціях з альфа-частинками нижчих енергій на інших мішенях.

Табл. 7. Перерізи напрацювання $^{178m2}\text{Hf}$ при опроміненні альфа-частинками з енергіями 100 та 80 МеВ мішеней з товщинами 200 та 100 мкм, відповідно

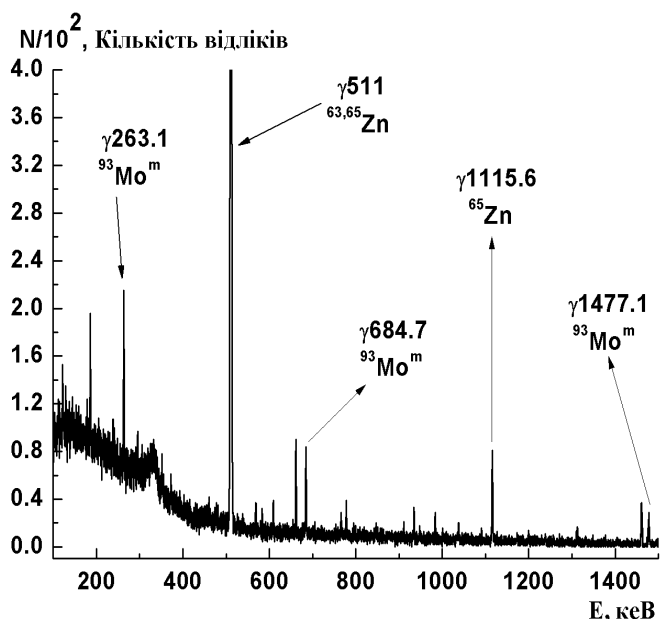
№п/п	E_{α} (МеВ)	$\sigma^{178m2\text{Hf}}$ (мкб)	$\sigma^{178m2\text{Hf}}$ (мкб)	
			E_{α} (МеВ)	
	200 мкм		100 мкм	
1	92(8)	5.70(57)	77(3)	7.8(8)
2	77(7)	8.2(8)	68(5)	12.4(13)
3	61(9)	17.5(26)	58(5)	16.7(25)
4	39(13)	2.40(48)	48(6)	7.1(11)
5			36(7)	1.10(22)

Показано, що головною особливістю при напрацюванні ізомерного стану $^{178m2}\text{Hf}$ є максимум у функції збудження при енергії альфа-частинок в околі 60 МеВ. Таку поведінку перерізу можна пояснити врахуванням вкладу передрівноважного механізму, який в околі даної енергії починає домінувати. В ньому при зростанні енергії бомбардуючих альфа-частинок вилітаючі частинки виносять все більший кутовий момент. Отже при цьому знижуються спіни збуджених станів залишкового ядра і як наслідок стає нижчим переріз напрацювання $^{178m2}\text{Hf}$. Дані експериментальні результати підтверджують цю гіпотезу.

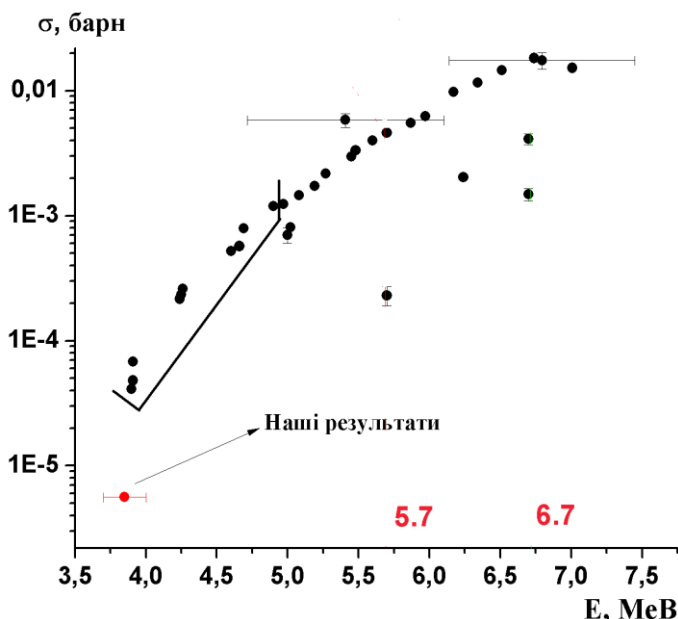
Розраховано переріз реакції $^{93}\text{Nb}(p,n)^{93m}\text{Mo}$ при енергії протонів 3.85 МеВ, фрагменти спектра опроміненої мішені ніобію наведені на рис. 8(а). При цьому величина енергії збудження залишкового ядра складає лише 200 кеВ. Це діапазон

Табл. 8. ІВП $\sigma(^{178m2}\text{Hf})/\sigma(^{178g}\text{Hf})$ при різних енергіях альфа-частинок

Реакція	Енергія, МеВ	Ізомерне відношення (%)
$^{181}\text{Ta}(\alpha,\text{total})$	92(8)	18.3(22)
$^{181}\text{Ta}(\alpha,\text{total})$	77(3)	42.4(44)
$^{181}\text{Ta}(\alpha,\text{total})$	68(5)	61.6(78)
$^{181}\text{Ta}(\alpha,\text{total})$	58(5)	43.2(50)



а



б

Рис. 8. Фрагмент γ -спектру активованої мішені ніобію (а) та порівняння експериментальних значень перерізів реакції $^{93}\text{Nb}(p,n)^{93m}\text{Mo}$ (б)

дискретних рівнів, де не працюють статистичні механізми. Отримана величина перерізу складає $\sigma^{\text{експ}} = 5.6(5)$ мкб. Слід зазначити, що вимірювання перерізу реакції $^{93}\text{Nb}(p,n)^{93m}\text{Mo}$ при даній величині енергії протонів проведено вперше. При вищих енергіях протонів існують роботи декількох груп. На рис. 8(б) показані перерізи, отримані в цих роботах разом із розрахованими тут даними. Як видно існує неузгодженість між експериментальними перерізами як в області порогових значень

енергії протонів, так і при енергії 5-6 MeV, що стимулює продовження експериментальних досліджень даної реакції.

Підкреслюється, що на мішенях з природного та збагаченого лютецію виміряні перерізи реакції $^{175}\text{Lu}(\alpha, \alpha n)^{174\text{m,g}}\text{Lu}$ для окремих значень енергій альфа-частинок. Збиралася збірка з семи мішеней, зображена на рис. 9(а). Фрагменти γ -спектру активованої мішені лютецію показані на рис. 9(б).

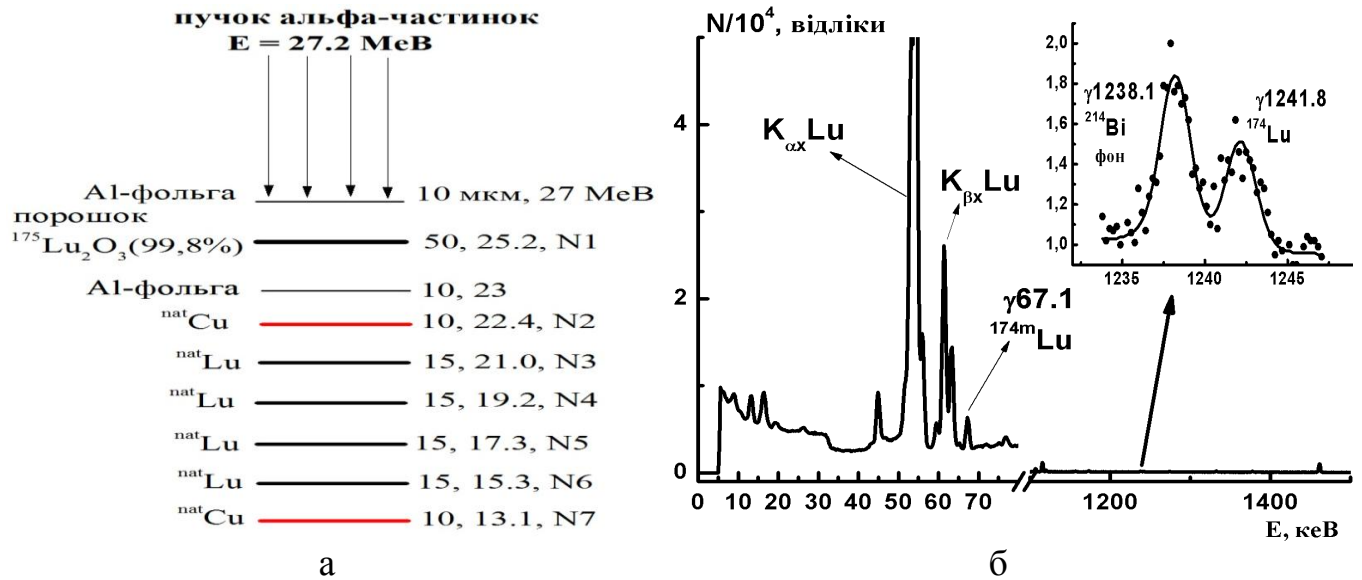


Рис. 9. Блок-схема проведення експерименту (а) та фрагменти γ -спектру активованої мішені лютецію (б)

Результати розрахунку перерізів реакції $^{175}\text{Lu}(\alpha, \alpha n)^{174}\text{Lu}^{\text{m,g}}$, з використанням моніторної реакції $^{nat}\text{Cu}(\alpha, x)^{66}\text{Ga}$ приведені в табл. 9.

Табл. 9. Експериментальні та теоретичні перерізи заселення ізомерного/основного станів реакції $^{175}\text{Lu}(\alpha, \alpha n)^{174}\text{Lu}^{\text{m,g}}$

E, MeV		15.3	17.3	19.2	21.0	25.2
$\sigma_{\text{m}}^{\text{експ}}$, МКБН		180(25)	109(15)	76(10)	67(10)	60(9)
$\sigma_{\text{g}}^{\text{експ}}$, МКБН		439(50)	273(40)	181(20)	163(20)	128(20)
$\sigma_{\text{m}}/\sigma_{\text{g}}^{\text{теор}}$, EMPIRE-3.2, МКБН	levden0	-	0.017/0.046	1.0/1.1	7.4/6.2	244/133
	levden1	-	0.005/0.02	0.7/1.6	6/11.2	70/106
	levden3	-	0.007/0.028	0.45/1.1	3.6/7.4	241/368
$\sigma_{\text{m}}/\sigma_{\text{g}}^{\text{теор}}$, TALYS-1.4, МКБН	ld1	-	-	0.08/0.17	2.5/6.1	145/200
	ld2	-	-	0.09/0.2	2.9/7	174/244
	ld3	-	-	0.2/0.29	5.9/8.2	206/351
	ld4	-	-	0.13/0.22	1.8/4.9	121/198
	ld5	-	-	0.07/0.16	3/6	226/295

Як видно з табл. 9, експериментальні перерізи на 1-4 порядки вищі теоретичних величин при енергії альфа-частинок 17.3-21.0 MeV. Розумною варіацією параметрів на вдається узгодити експериментальні та теоретичні дані, що свідчить про

можливий значний внесок нестатистичних механізмів і/чи структури збуджених рівнів залишкового ядра.

Розраховані експериментальні та теоретичні перерізи реакцій $^{176}\text{Lu}(\alpha, p)^{179}\text{Hf}^{\text{cm}2}$ та $^{175}\text{Lu}(\alpha, 2n)^{177}\text{Ta}$ приведені в табл. 10. Як видно з результатів моделювання код TALYS-1.4 непогано описує експериментальні результати (α, p) -реакції, особливо для зворотно-зміщеної моделі Фермі-газу для моделювання густини рівнів (ldmodel 2). При цьому механізм даної реакції є статистичним з внеском 11 % передрівноважного механізму. На відміну від цих даних код EMPIRE-3.2 дає значно

Табл. 10. Порівняння теоретичних та експериментальних величини перерізів для (α, p) - та $(\alpha, 2n)$ -реакції

Реакція/Модель густини рівнів	$^{176}\text{Lu}(\alpha, p)^{179}\text{Hf}^{\text{cm}2}$ $E_\alpha = 26 \pm 1.2 \text{ MeV}$ $\sigma^{\text{експ}} = 1.1(1) \text{ мбн}$		$^{175}\text{Lu}(\alpha, 2n)^{177}\text{Ta}$ $E_\alpha = 26 \pm 1.2 \text{ MeV}$ $\sigma^{\text{експ}} = 366(18) \text{ мкбн}$	
	$\sigma^{\text{теор}}$, мбн	Внесок перед рівноважного механізму, %	$\sigma^{\text{теор}}$, мкбн	Внесок перед рівноважного механізму, %
levden 0	0.048	2	1021	10
levden 1	0.208	2	1009	10
levden 3	0.106	2	1013	10
ldmodel 1	0.67	11	790	9
<i>ldmodel 2</i>	<i>0.89</i>	<i>11</i>	780	10
ldmodel 3	0.67	11	792	7
ldmodel 4	0.41	11	793	9
ldmodel 5	0.8	11	784	9

занижені результати порівняно з експериментом.

Як видно з табл. 10 теоретичні перерізи для обох кодів для $(\alpha, 2n)$ -реакції вдвічі перевищують експериментальні величини, що може свідчити про значний вплив нестатистичних механізмів.

У **п'ятому розділі** описується дослідження уламків фотоділення важких ядер в реакціях з гальмівними гамма-квантами. Наводяться умови проведення експериментів та спектроскопічні характеристики досліджуваних ядер. Описуються формули за допомогою яких розраховуються експериментальні значення ізомерних відношень виходів та середні кутові моменти. Наголошується на необхідності вивчення уламків ділення в широкому діапазоні граничних енергій гальмівних γ -квантів.

Зокрема, опромінення мішеней ^{238}U проводилось гальмівними γ -квантами з $E_{\text{гр}} = 6.25, 12.5, 14.5$ та 18 MeV . Характерні фрагменти γ -спектрів цих мішеней приведені на рис. 10(а). Ізомерні відношення виходів (R_γ) уламків фотоділення були обчислені за допомогою програмного коду IZOMER (далі для усіх IBB). Для теоретичного розрахунку середніх кутових моментів використовувалася узагальнена статистична модель Хьюзенгі-Ванденбоша з дельтаподібним спіновим

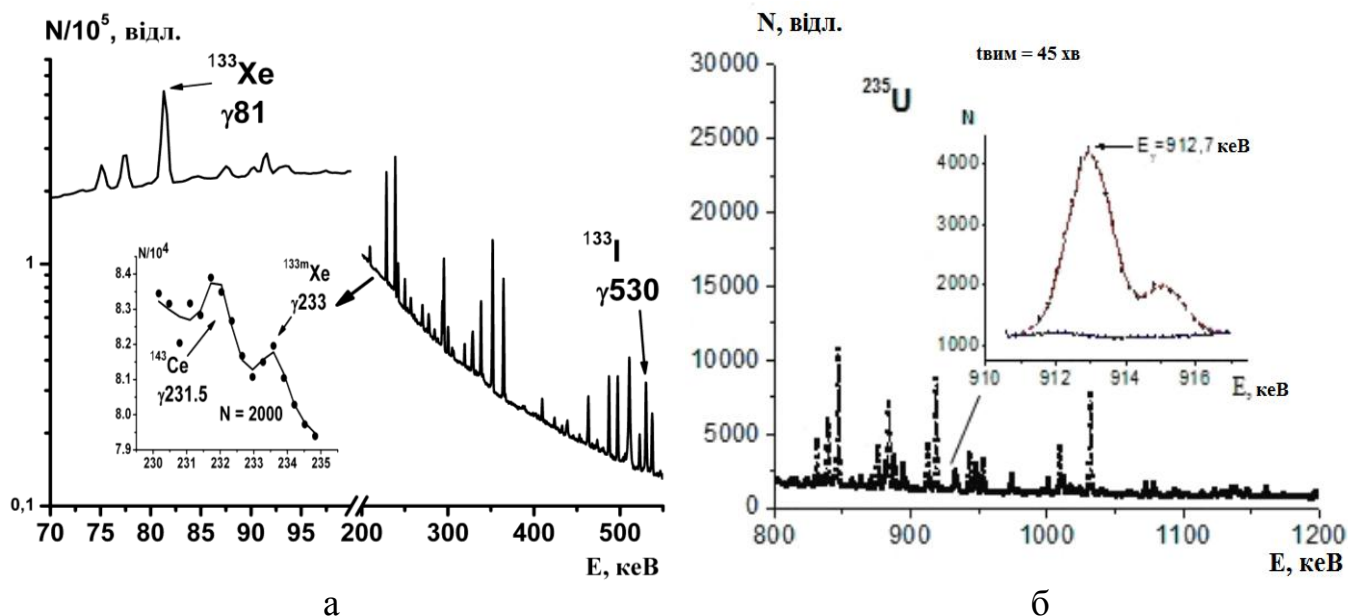


Рис. 10. Фрагменти спектра фотоподілу ^{238}U ($E_{\text{гр}} = 14.5 \text{ MeV}$), що використовувався для обчислення ізомерного відношення ^{133}Xe (а) та ядра-уламка ^{133}Te при фотоділенні ядер ^{235}U (б)

розподілом та використанням кодів TALYS-1.6 та EMPIRE-3.2 (далі при розрахунку усіх середніх кутових моментів). Вхідні параметри брались у відповідності з RIPL-3. Розраховані величини СКМ наведені в табл. 11.

Табл. 11. Порівняння середніх кутових моментів ізомерів ксенону при фотоподілі ^{238}U з раніше опублікованими даними

Ізомерна пара	Гранична енергія гамма-квантів $E_{\text{гр}}$ (MeV)					
	6.25	12.0	12.5	14.5	16[Bessheiko,2005]	18
$^{133\text{m,g}}\text{Xe}$	1.6(5)		2.4(5)	1.8(5)		2.8(5)
$^{135\text{m,g}}\text{Xe}$	1.2(5)	1.5(5)	1.5(5)	1.4(5)	2.8(5)	1.3(5)

З табл. 11 випливає, що для обох ізомерів ксенону спостерігається немонотонна поведінка середніх кутових моментів при зміні енергії γ -випромінювання $E_{\text{гр}}$ від 6.25 до 18 MeV. В діапазоні величин енергії від 6.25 до 12.5 MeV має місце значне зростання \bar{J} для ^{133}Xe та незначне для ^{135}Xe . Це можна пояснити тим, що зі зростанням граничної енергії гальмівних γ -квантів імовірність заселення високоспінового стану зростає швидше ніж низькоспінового. Відмітимо також, що в цій області величин енергії енергетично можлива лише реакція фотоділення (γ, f). В енергетичному діапазоні 12.5-14.5 MeV величини \bar{J} починають вести себе по різному для різних ізомерів Хе. Якщо для ^{133}Xe відбувається їх зниження, що можливо може свідчити про домінування впливу фотоподілу після вильоту нейтрона, тобто (γ, nf)-поділу, ($E_{\text{пор.}} \approx 12.3 \text{ MeV}$) над зростанням $E_{\text{гр}}$, то для ^{135}Xe обидва впливи порівняні, оскільки величина \bar{J} в межах похибки не змінюється.

Надалі для ядер ^{135}Xe спостерігається зростання середніх кутових моментів при зростанні $E_{\text{тр}}$ від 14.5 до 16 MeV та зниження при подальшому зростанні $E_{\text{тр}}$ до 18 MeV. На жаль, при $E_{\text{тр}} = 16$ MeV IBV та \bar{J} не визначались для ^{133}Xe , а величина СКМ при $E_{\text{тр}} = 18$ MeV для даного ядра зростає на 50% порівняно з величиною середнього кутового моменту при $E_{\text{тр}} = 14.5$ MeV. При $E_{\text{тр}} = 16.7$ MeV відкривається $(\gamma, 2n\text{f})$ -канал поділу, який імовірно впливає на зниження \bar{J} для ^{135}Xe . Висувається гіпотеза, що така поведінка \bar{J} є проявом оболонкових ефектів, оскільки ^{133}Xe має 79 нейтронів і виліт 2-3 нейтронів при утворенні цього ядра не змінює оболонку, замкнену при $N=82$. В той же час для ^{135}Xe $N=81$, тобто при вильоті уже 1 нейтрона оболонка заповнена, а при вильоті 2-3 нейтронів відбувається переміщення в іншу нейтронну оболонку.

З порівняння значень \bar{J} у парі ізотопів $^{79}_{54}\text{Xe}^{133}$ та $^{81}_{54}\text{Xe}^{135}$, можна відмітити, що ця величина систематично нижча для другого нукліду. Це також можна пояснити наближенням кількості нейтронів до магічного числа 82, що відповідає заповненню оболонки.

Підкреслюється, що вивчалось фотоділення ^{235}U при $E_{\text{тр}} = 18$ MeV, розраховані величини IBV та СКМ наведені в табл. 12., а фрагмент γ -спектра на рис. 10(б).

В цілому, можна зробити висновок, що середні кутові моменти важких фрагментів ділення приблизно у 3-5 разів вищі, ніж \bar{J} легкого уламку ділення, і значно відрізняються від значень спінів ядер, що діляться. Остання обставина вказує на присутність додаткового механізму формування кутового моменту в важких уламках. Регулярним виключенням з цього правила є ^{135}Xe для котрого середні кутові моменти як в реакції (γ, f) , так і в реакціях $(\gamma, \text{f}) + (\gamma, \text{nf})$ складають величину порядку $\sim 1.5h$. Це вказує на те, що в цьому фрагменті при фотоділенні ^{235}U додатковий механізм формування кутового моменту, імовірно, відсутній.

Слід відмітити, що значення спіну $J_m = 6$ ізомерного стану ядер фрагмента ^{84}Br визначено недостатньо надійно. Тому була проаналізована зміна імовірностей заселення гамма-квантами основного та ізомерного станів, а також величини ізомерного відношення від зміни спіну ізомерного стану ^{84}Br . Крім найбільш імовірного значення $J_m = 6$ для $^{84}\text{Br}^m$ використовувалась також і величина $J_m = 8$; стан також вважався непарним.

З аналізу випливає, що зміна спіну ізомерного стану на $\sim 30\%$ (з 6 на 8) може привести до зміни ймовірностей заселення основного і ізомерного станів на порядок. Проте в обох випадках для фрагмента ^{84}Br можна підігнати експериментальне значення ізомерного відношення. При цьому значення середнього кутового моменту змінюються на $\sim 20\%$ (з $\bar{J}=1.9$ при $J_m = 6$ до $\bar{J}=2.3$ для $J_m = 8$) і в межах похибки узгоджуються між собою: $\bar{J}=1.9 \pm 0.5 [J_m=6]$; $\bar{J}=2.3 \pm 0.5 [J_m=8]$.

Акцентується увага на тому, що опромінення мішені з ^{233}U проводилось γ -квантами гальмівного спектра з енергією 17 та 10.5 MeV. Гранична енергія 10.5 MeV вибрана з метою виключення як (γ, nf) -каналу, який відкривається при $E_{\text{тр}} > 11$ MeV, так і (γ, n) -реакції на матеріалах контейнера, в якому знаходився ^{233}U . Розраховані значення IBV та СКМ приведені в табл. 13, 14., відповідно.

Відмічається зниження \bar{J} для ^{135}Xe при зниженні величини максимальної енергії гальмівних γ -квантів при опроміненні ядер ^{233}U . Зниження енергії $E_{\text{тр}}$ на 6.5 MeV на

Табл. 12. Виміряні ІВВ та \bar{J} ядер ^{84}Br , ^{90}Rb , ^{131}Te , ^{132}Sb , ^{132}I , ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe , які є фрагментами фотоділення ^{235}U

Ядро	R_Y		\bar{J}	
	18 MeB	9.8 MeB	18 MeB	9.8 MeB
^{84}Br	0.14(1)	-	1.8(5)	-
^{131}Te	2.6(5)	-	6.8(8)	-
^{132}Sb	1.46(22)	0.58(6)	8.0(7)	5.6(5)
^{132}I	2.2(4)	-	9.6(9)	-
^{133}Te	4.3(3)	2.3(3)	7.6(6)	5.7(6)
^{134}I	0.58(9)	0.49(5)	5.6(6)	5.3(5)
^{135}Xe	0.056(7)	0.142(14)	1.4(5)	2.0(5)

Табл. 13. Ізомерні відношення виходів уламків фотоділення ^{233}U

$E_{\text{гр}}, \text{MeB}$	10.5	17
$^{90\text{m,g}}\text{Rb}$	0.9(3)	0.7(3)
$^{133\text{m,g}}\text{Te}$	3.2(8)	3.2(9)
$^{134\text{m,g}}\text{I}$	1.33(14)	1.8(5)
$^{135\text{m,g}}\text{Xe}$	0.14(2)	0.38(4)

фоні 200 MeB, яка виділяється в процесі ділення навряд чи впливає на зміну \bar{J} . Більш імовірним фактором є те, що при енергії 17 MeB домінуючим є фотоділення після вильоту швидкого нейтрона (γ, nf). В цьому випадку домінує фотоділення на парно-парному нукліді ^{232}U . Можливо, це вказує на більшу роль парно-парних ефектів в системах ^{232}U та ^{233}U , що діляться і утворюють ^{135}Xe . Для інших уламків ІВВ та \bar{J} в межах похибки експерименту не змінюються при зростанні $E_{\text{гр}}$.

Табл. 14. Середні кутові моменти уламків ділення ^{233}U

$E_{\text{гр}}, \text{MeB}$	10.5	17
Нуклід/Ізом. пара	^{233}U	
$^{90\text{m,g}}\text{Rb}$	2.2(3)	2.0(3)
$^{133\text{m,g}}\text{Te}$	6.6(8)	6.6(8)
$^{134\text{m,g}}\text{I}$	8.2(3)	8.4(4)
$^{135\text{m,g}}\text{Xe}$	2.4(1)	3.5(1)

Вивчення фотоділення ^{235}U при $E_{\text{гр}} = 17 \text{ MeB}$ проводилось на мішені урану збагаченій ^{235}U (90%), ^{238}U (10%) вагою близько 0.5 г. Типові гамма-спектри продуктів фотоділення ^{235}U наведені на рис. 11.

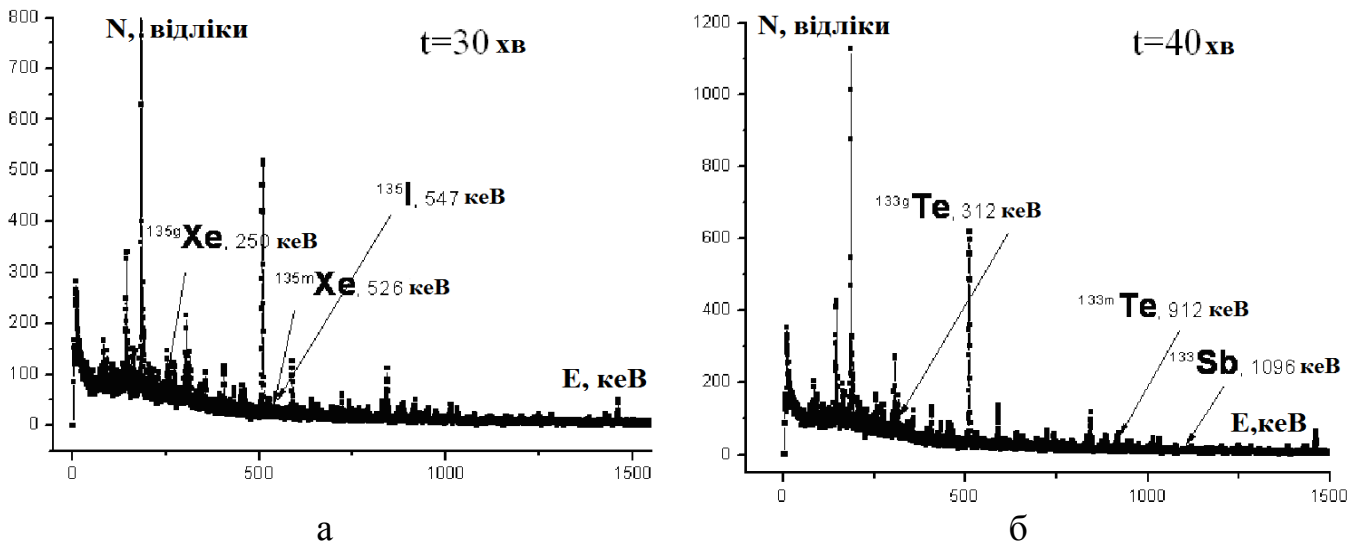


Рис. 11. Типовий загальний γ -спектр продуктів фотоділення ^{235}U для різних часових інтервалів його набору: а – $t = 30$ хв; б – $t = 40$ хв. Спостерігаються гамма-лінії з розпаду ^{133}Te ($T_{1/2}(^{133\text{m}}\text{Te})=55.4$ хв) та ^{135}Xe ($T_{1/2}(^{135\text{m}}\text{Xe})=15.3$ хв)

Розраховані ізомерні відношення виходів показані на рис. 12. Різниця в величинах ІВВ для $E_{\text{гр}} = 9.6$ та 17 МеВ, імовірно, викликана залежністю R_{γ} від енергії збудження ядра, що ділиться. При $E_{\text{гр}} = 17$ МеВ відкривається додатковий канал ділення (γ, nf). Слід також відмітити що в даних дослідження не використовується радіохімічна методика для початкового виділення ^{134}I , на відміну від роботи Thierens, 1982.

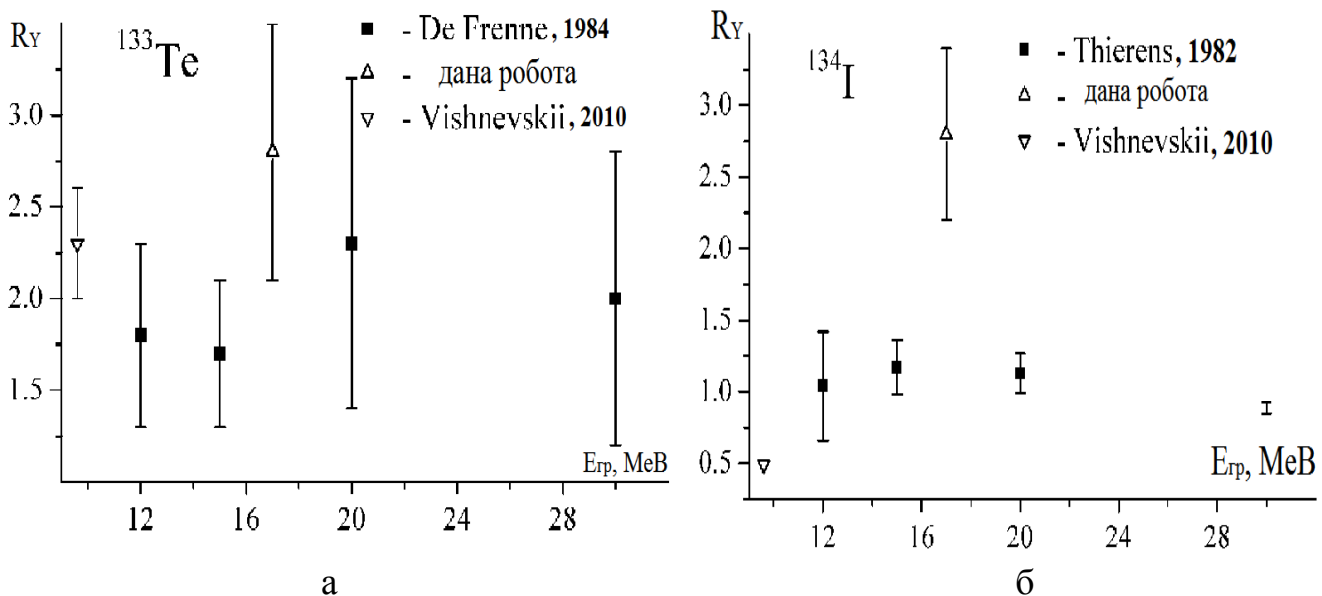


Рис. 12. Ізомерні відношення виходів R_{γ} фрагментів ^{133}Te (а) та ^{134}I (б), як наслідок фотоділення ядер ^{235}U гальмівними γ -квантами з різними $E_{\text{гр}}$

Зазначено, що проводилось дослідження фотоділення непарних трансуранових ядер ^{237}Np та ^{239}Pu при граничній енергії γ -квантів $E_{\text{гр}} = 18$ МеВ. Такий вибір енергії зумовлений тим, що в даному випадку при фотоділенні очікується максимальний вихід реакції (γ, nf) та дана $E_{\text{гр}}$ нижча порогу реакції ($\gamma, 2\text{nf}$) на цих ядрах.

Для опромінення використовувались збагачені ізотопами мішені з Pu (^{239}Pu — 95.5%, ^{240}Pu — 4.5%) та Np (^{237}Np — 100%) вагою 400 мг і 853 мг, відповідно. Мішені були упаковані в контейнери з нержавіючої сталі.

Характерні γ -спектри продуктів фотоділення ^{237}Np і ^{239}Pu приведені на рис. 13.

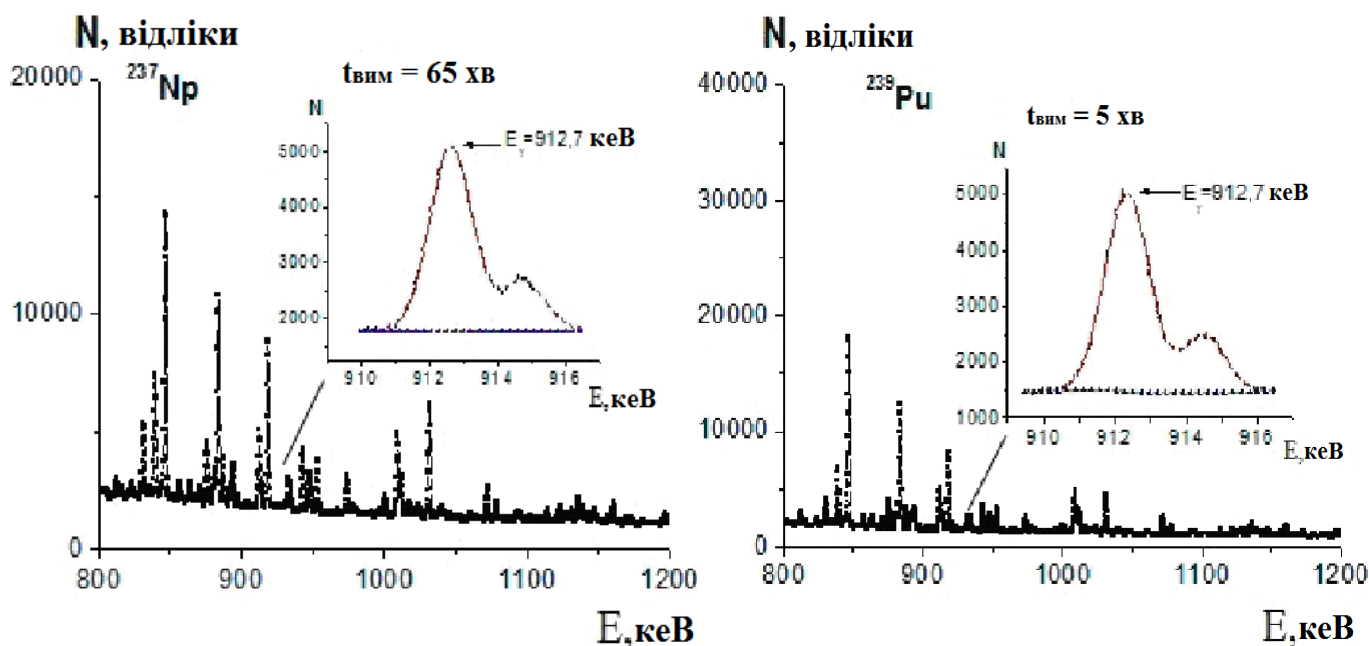


Рис. 13. Характерні спектри ядра-уламка ^{133}Te після фотоділення ядер ^{237}Np та ^{239}Pu

Розраховані середні кутові моменти показані на рис. 14.

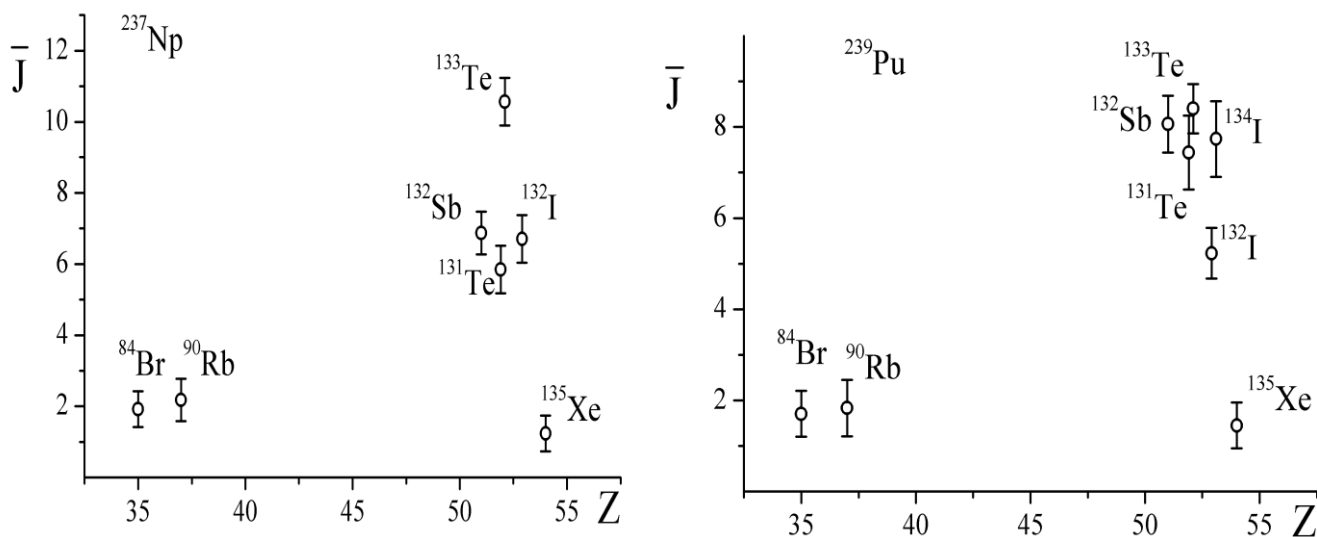


Рис. 14. Середні кутові моменти \bar{J} уламків фотоділення ядер ^{237}Np та ^{239}Pu гальмівним випромінюванням з граничною енергією $E_{\text{гр}} = 18 \text{ MeV}$ в залежності від заряду уламка

З рис. 14 випливає, що середні кутові моменти важких фрагментів ділення приблизно в 3 рази вищі, ніж СКМ легких уламків ділення, і вони значно відрізняються від значень спінів ядер, які діляться. Остання обставина вказує на

існування додаткового механізму формування кутового момента в важких фрагментах. Регулярним виключенням як і для $^{235,238}\text{U}$ є ^{135}Xe для котрого середні кутові моменти як в реакції (γ, f) , так і в реакціях $(\gamma, f) + (\gamma, nf)$ складають величини порядку $\sim 1.5h$. Це вказує на те, що в даному уламку і для ядер ^{237}Np та ^{239}Pu , що діляться, додатковий механізм формування кутового момента, імовірно, відсутній.

Підкреслюється, що опромінення зразків з ^{237}Np та ^{241}Am проводилось γ -квантами гальмівного спектру з величинами енергії 9.8 та 17 МеВ. Мішені були упаковані в сталеві герметичні контейнери. Характерні фрагменти γ -спектрів продуктів фотоділення ^{241}Am і ^{237}Np приведені на рис. 15.

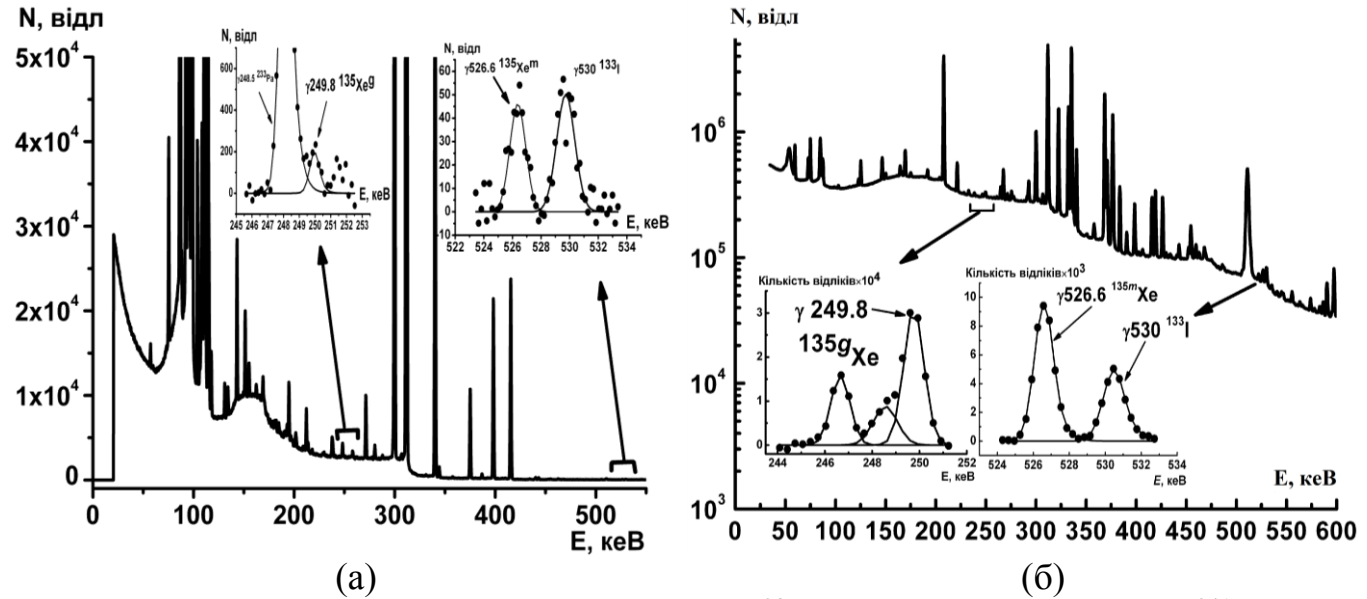


Рис. 15. Фрагменти спектрів фотоділення ^{237}Np ($E_{\text{гр}} = 9.8$ МеВ) (а) та ^{241}Am ($E_{\text{гр}} = 17$ МеВ) (б)

Значення \bar{J} , отримані з експериментальних величин ізомерних відношень виходів для різних фрагментів, приведені в табл. 15.

Табл. 15 Середні кутові моменти

Ізом. пара	ΔI	\bar{J}			
		^{237}Np		^{241}Am	
		9.8 МеВ	17 МеВ	9.8 МеВ	17 МеВ
$^{90\text{m,g}}\text{Rb}$	3	1.5(3)	2.5(3)	2.5(3)	2.0(3)
$^{130\text{m,g}}\text{Sb}$	3	3.3(4)	4.3(3)	-	4.4(2)
$^{133\text{m,g}}\text{Te}$	4	6.0(8)	6.2(12)	6.2(12)	5.1(12)
$^{134\text{m,g}}\text{I}$	4	8.8(2)	8.7(2)	8.8(3)	8.2(2)
$^{135\text{m,g}}\text{Xe}$	4	2.9(1)	4.2(1)	2.9(1)	4.5(1)

Зростання величини \bar{J} з ростом A для непарних по Z ядер на відміну від парних ядер ^{235}U та ^{239}Pu не спостерігається. Більш того має місце зниження \bar{J} для ^{241}Am порівняно з ^{237}Np при $E_{\text{гр}} = 17$ МеВ, хоча ця різниця знаходиться в межах похибки вимірювань та розрахунків.

У шостому розділі описується дослідження збудження ізомерних та основних станів ядер в реакціях з гальмівними гамма-квантами, протонами, дейтронами та нейтронами. Наводяться умови проведення експериментів та спектроскопічні характеристики досліджуваних ядер. Описуються формули за допомогою яких розраховуються експериментальні та теоретичні значення коефіцієнтів внутрішньої конверсії та ефектів проникнення.

Зазначається, що при визначенні з високою точністю енергії першого збудженого стану ^{197}Au досліджувалась реакція $^{197}\text{Au}(d,2n)^{197}\text{Hg}$ після опромінення мішені золота на електростатичному генераторі дейтронами з величиною енергії 7.6 МеВ. Використовувалась схема збігів, фрагменти γ -спектрів збігів приведені на рис. 16.

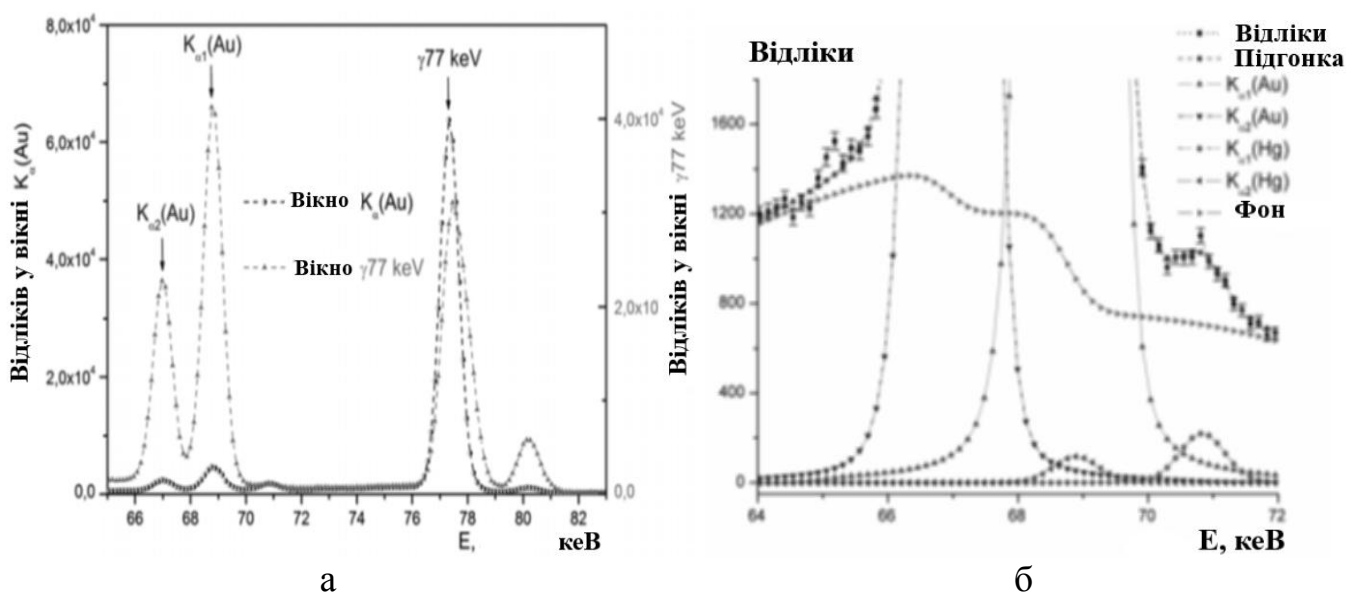


Рис. 16. Фрагменти спектрів збігів, які включають збіги з $K_{\alpha}(Au)$ та $\gamma 77 \text{ keV}$ (а) та γ -спектру збігів $\gamma 77 \text{ keV}$ з $K_{\alpha}(Au)$ - та $K_{\alpha}(Hg)$ -лініями, які використовувались для калібрування за енергією в усіх γ -спектрах (б)

Враховуючи майже повне накладання ліній $K_{\beta}(Au)$ та $K_{\beta}(Hg)$ та те що увесь енергетичний діапазон в якому знаходились K_{β} -переходи контролювався за положенням та інтенсивністю усіх присутніх у ньому рентгенівських та γ -піків, усі параметри узгоджувались з табульованими величинами в межах похибки. Це дозволило отримати наступну величину енергії першого збудженого стану ^{197}Au : $77.3390 \pm 0.0027 \text{ keV}$. Враховуючи похибку енергетичної калібровки рівну 1.4 eV величина похибки зростає до 3 eV: $77.339 \pm 0.003 \text{ keV}$. Отримане значення енергії співпадає з табульованою величиною енергії першого збудженого стану ^{197}Au , яка рівна $77.339 \pm 0.002 \text{ keV}$.

З метою точного визначення енергії 497 кеВних γ -квантів з розпаду ^{115}Sb використовувались наступні калібрувальні γ -лінії, величини енергії яких знаходились недалеко від досліджуваної лінії і були відомі з високою точністю. Це γ -переходи з величинами енергії $E_{\gamma} = 477.6035(20) \text{ keV}$ з розпаду ^7Be , $E_{\gamma} = 602.7260(23) \text{ keV}$, який супроводжує розпад ^{124}Sb та $E_{\gamma} = 661.657(3) \text{ keV}$, з розпаду ^{137}Cs . До того ж γ -лінії які супроводжують розпад ^{115}Cd як з енергією

492.351(4) кеВ, яка є найближчою до досліджуваної 497 кеВної γ -лінії, так і з енергією $E_\gamma = 527.901(7)$ кеВ використовувались в дослідженнях.

Акцентується увага на тому, що вимірювання проводились з використанням змішаного джерела ${}^7\text{Be} + {}^{115}\text{Cd} + {}^{124}\text{Sb} + {}^{137}\text{Cs} + {}^{115}\text{Sb}$. Через кожні 30 хвилин до цієї збірки додавалася нова активність ядер ${}^{115}\text{Sb}$ з метою підтримання на сталому рівні як швидкості ліку γ -піку 497 кеВ, так і мертвого часу спектрометра. Три серії опроміненнь мішеней олова було виконано і після кожного опромінення 4 серії вимірювань проводилось. Усього було набрано 12 гамма-спектрів в кожному з яких інтенсивність γ -піку з енергією 497 кеВ складала $(3-4) \times 10^4$ подій.

Після кожної серії були проведені вимірювання тривалістю 4-6 годин з метою оцінки нелінійності енергетичної шкали. Фрагменти отриманих γ -спектрів в околі енергії 497 кеВ показані на рис. 17., виміряні протягом 30 хвилин (а) та 12 годин (б).

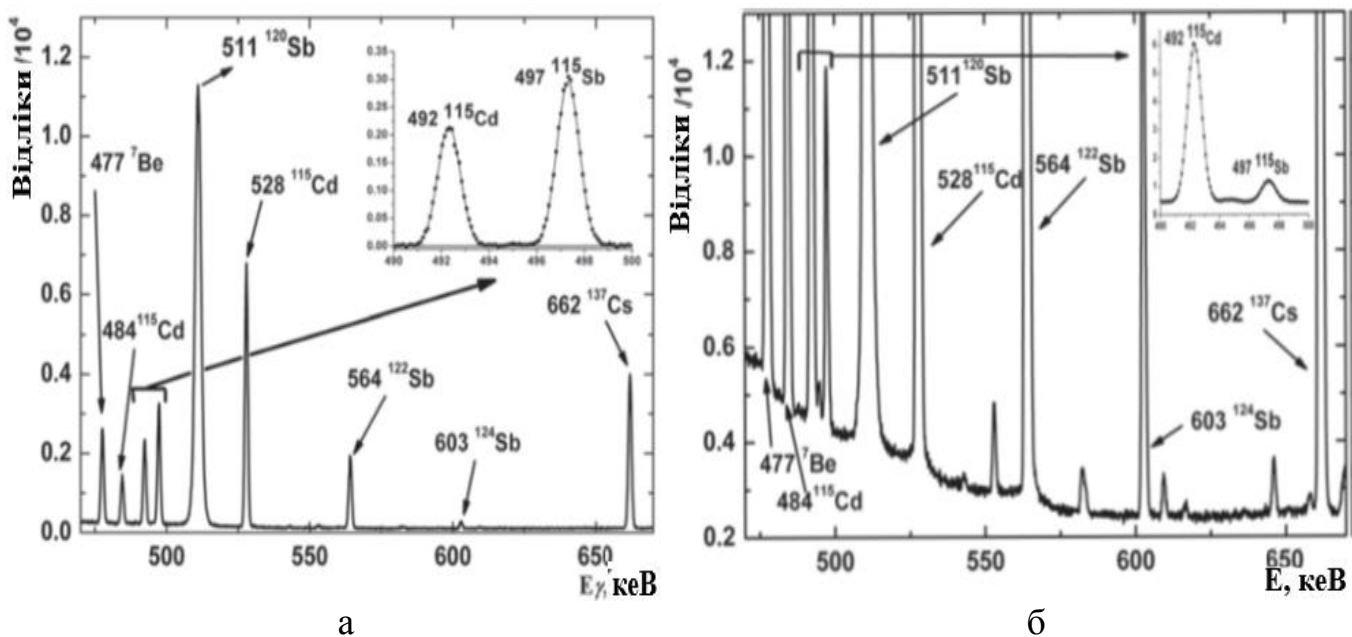


Рис. 17. Фрагменти γ -спектра активованого зразка олова в околі 497 кеВ, виміряного протягом 30 хвилин (а) та 12 годин (б)

Повна похибка визначення енергії першого збудженого стану ${}^{115}\text{Sn}$ розраховувалась як корінь квадратний із суми квадратів похибок визначення енергії γ -лінії $E_\gamma = 477.6035$ кеВ – 2 еВ з розпаду ${}^7\text{Be}$, енергетичного калібрування – 2 еВ та зваженого середнього статистичної похибки – 1.1 еВ. Отже результуюча підсумкова величина похибки складала 3 еВ.

Отримана величина енергії γ -лінії з $E_\gamma = 497.3$ кеВ складала $E_\gamma = 497.341(3)$ кеВ. Врахування енергії віддачі ядра ${}^{115}\text{Sn}$ призводить до величини енергії першого збудженого стану ${}^{115}\text{Sn}$ рівної $E_{z6} = 497.342(3)$ кеВ.

Враховуючи різницю атомних мас ${}^{115}\text{In} - {}^{115}\text{Sn}$ та отриману величину енергії першого збудженого стану ${}^{115}\text{Sn}$ розрахована експериментальна Q величина β розпаду ${}^{115}\text{In} \rightarrow {}^{115}\text{Sn}$ складала $Q_\beta = 147 \pm 10$ еВ. Ця величина призводить до кращого узгодження експериментальної величини періоду напіврозпаду цього β -розпаду з теоретичними оцінками.

Вказується, що досліджено К-заборонений E1-перехід з енергією 55 кеВ в ^{177}Hf . Вимірювання проводились на γ -спектрометрах з чотирма різними типами HPGe-детекторів, фрагмент γ -спектра одного з них показано на рис. 18. Використання різних типів детекторів дозволило розрахувати відносні інтенсивності γ -ліній точніше ніж в раніше проведених роботах. Були визначені інтенсивності 52 рентгенівських та γ -переходів, які супроводжують розпад $^{177\text{m}}\text{Lu}$.

Був розрахований повний коефіцієнт внутрішньої конверсії E1-переходу з енергією 55 кеВ $\alpha(55)_{\text{експ}} = 0.54 \pm 0.04$. Теоретична величина КВК цього переходу набагато нижча і рівна $\alpha(55)_{\text{теор}} = 0.337$.

Найбільш імовірною причиною аномалії в КВК для E1-переходу з енергією 55 кеВ є існування внутрішньоядерної конверсії з параметром проникнення $|\lambda_1| = 5.7 \pm 0.8$.

З балансу інтенсивностей відповідних рівнів в ^{177}Lu та ^{177}Hf були розраховані КВК також для двох інших К-заборонених γ -переходів електричної мультипольності, які збуджуються при розпаді ізомерного стану в ^{177}Lu .

Експериментальні ($\alpha_{\text{експ}}$) та теоретичні ($\alpha_{\text{теор}}$) значення коефіцієнтів внутрішньої конверсії, фактори заборони відносно оцінок Вайскопфа (F_w), а також інші характеристики цих γ -переходів наведено

в табл. 16.

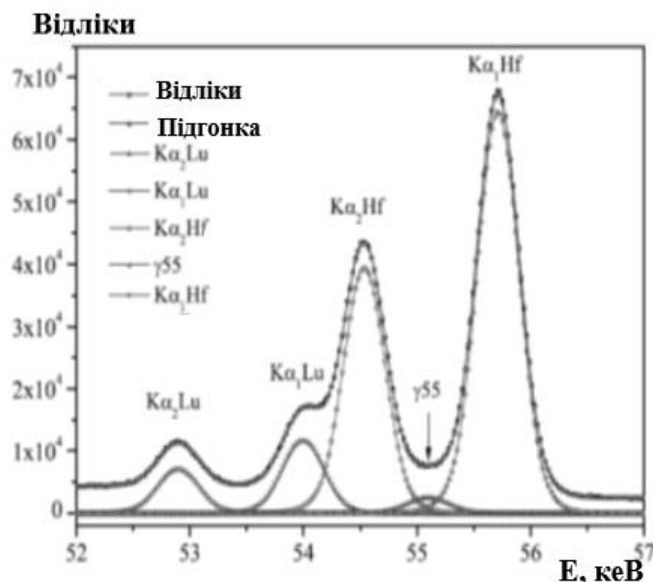


Рис. 18. Фрагмент гамма-спектру в діапазоні 52-57 кеВ з розпаду $^{177\text{m}}\text{Lu}$, набраний з використанням планарного детектора SLP-04160

Табл. 16. Коефіцієнти внутрішньої конверсії К-заборонених γ -переходів в ^{177}Lu та ^{177}Hf

E_γ , кеВ	Мультипольність, L	$\Delta K = K_i - K_f$	F_w	$\alpha_{\text{експ}}$	$\alpha_{\text{теор}}$
55.1684(16)	E1	8	3.7×10^{13}	0.54 ± 0.04	0.337
115.8682(23)	E3	8	9.1×10^8	33.7 ± 1.1	30.7
228.4838(6)	E2	7	1.5×10^8	0.174 ± 0.028	0.185

Отримані в даній роботі значення інтенсивностей γ -променів були проаналізовані на узгодженість та відсутність систематичних похибок вимірювань. Для цього були розраховані баланси інтенсивностей для 12 рівнів ротаційних смуг ^{177}Lu та ^{177}Hf .

Відмічається, що для усіх без винятку рівнів повні інтенсивності γ -ліній, які підживлюють дані рівні та гамма-квантів, які їх розряджають непогано узгоджуються між собою в межах експериментальних похибок. Отже, систематичні похибки вимірювань незначні і інтенсивності γ -квантів, які супроводжують розпад $^{177\text{m}}\text{Lu}$ визначені коректно.

Зазначається, що при вивченні розпаду ^{120}Sb вимірювання інтенсивностей γ -ліній (I_γ) одиночного спектру дозволяє визначити повні КВК ($\alpha_{\text{пов}}$) загальмованих E1- та E2-переходів з енергією 89.9 кеВ та 197.3 кеВ, відповідно (рис. 19(а)) з рівняння балансу інтенсивностей. При таких вимірюваннях вирішальним фактором є калібрування спектрометра в низькоенергетичній та високоенергетичній областях.

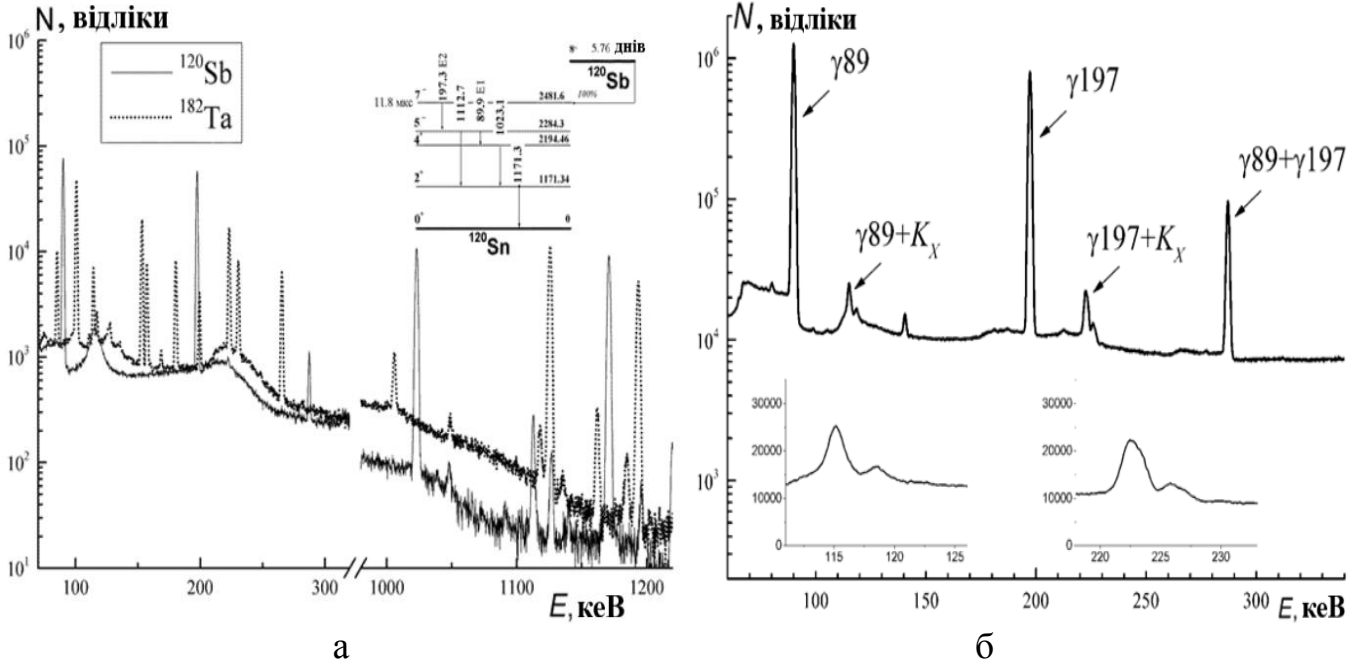


Рис. 19. Фрагменти одиночних γ -спектрів з розпаду ^{120}Sb і ^{182}Ta (а), спектрів збігів та піків сумування (нижня частина фрагментів спектрів) при розпаді ^{120}Sb (б)

При вирішенні цього завдання практично ідеальним є калібрувальний спектр, отриманий з розпаду ^{182}Ta . Гамма-спектр ^{182}Ta , як і ^{120}Sb , складається з двох подібних фрагментів, причому похибка в величинах інтенсивностей потрібних γ -переходів у ^{182}Ta складає (0.3-0.6)% (рис. 19(а)).

Отримані інтенсивності γ -ліній, які супроводжують розпад ^{120}Sb наведені в табл. 17, а повні КВК переходів з енергією 89 кеВ та 197 кеВ та їх відносні відхилення від табличних значень – в табл. 18.

Табл. 17. Значення величин енергій та інтенсивностей γ -ліній з розпаду ^{120}Sb

E_γ , кеВ	89.9	197.3	1112.7	1171.3
I_γ , %	78.1(5)	86.2(5)	1.09(5)	100

Табл. 18. КВК та їх відносні відхилення від табличних значень

E_γ , кеВ	I_γ , %	α_K	$\delta\alpha_K$, %	$\alpha_{\text{пов}}$	$\Delta\alpha_{\text{пов}}$, %
89	78.1(5)	0.232(9)	8.9(42)	0.268(8)	8.5(32)
197	86.2(5)	0.136(7)	13.8(58)	0.161(7)	9.9(48)

Визначення α_K здійснювалось через відносні вимірювання інтенсивностей γ - та K_X -переходів. З цією метою були виміряні спектри збігів (див. рис. 19.(б)). Вимірювання $\gamma\gamma$ - та $K_X\gamma$ -співпадань проводились на антикомptonівському спектрометрі. Для схеми розпаду, зображеної на рис. 19(а) (див. вкладку) з вимірювань відносних інтенсивностей окремих γ -переходів та рентгенівських квантів, які їм відповідають можна визначити α_K як для E2-, так і для E1-переходів.

В табл. 18 приведені отримані дані про КВК та їх відносні відхилення від табличних значень $\delta\alpha = |\alpha_{\text{експ}} - \alpha_{\text{табл}}| / \alpha_{\text{табл}}$. Як випливає з отриманих даних, в E1- та E2-переходах спостерігаються значні аномалії.

Отримані значення ядерних параметрів проникнення наведені в табл. 19.

Табл. 19. Отримані значення ядерних параметрів проникнення

E_γ , кеВ	Мультипольність	F_W	λ_1	λ_2
89	E1	18000	3.6 ± 1.6	~ 100
197	E2	260	6 ± 2	$\sim (100 - 200)$

Результати даних досліджень про внесок ефектів проникнення у E2-перехід знаходяться в непоганому узгодженні з даними роботи [Zheltonozhsky, 1998], де $\lambda_1 = 5 \pm 1$. Слід відмітити, що вклад конвекційних струмів у E2-переходи для L- і M-оболонок значно відрізняється від внеску K-оболонки. В той же час не спостерігається в межах похибки вимірювань відмінностей величин λ_1 з даних про КВК на K-оболонці та повних.

Для E1-переходу в даній роботі вперше виявлені аномалії в КВК. Табличні значення електронних параметрів для K-оболонки і повних КВК співпадають в межах 5%. Як видно з таблиці 18, відносні відхилення $\delta\alpha$ співпадають значно краще, ніж похибки проведених вимірювань. Тому визначення параметру проникнення λ_1 для E1-переходу проводилось з припущенням зміни внеску конвекційних струмів в діапазоні $\lambda_2 \sim 100$.

Для оцінки внеску спінових струмів K_γ в матричний елемент γ -випромінювання зручно використовувати параметри проникнення, які використовуються в моделі Войханського-Лістенгартена. В цій моделі параметр проникнення $\lambda^{(2)}$ прямо пропорційний вкладу спінових струмів. Він пов'язаний з λ_1 та λ_2 виразом $\lambda^{(2)} = 12.2 A^{1/3} \lambda_1 + 2.5 \cdot 10^{-5} A^{2/3} \lambda_2$. З цього виразу добре видно, що величина $\lambda^{(2)}$ слабо залежить від λ_2 .

Величина $K_\gamma = 2.5 \cdot 10^{-7} E_\gamma \lambda^{(2)}$, де E_γ – енергія γ -переходу в кеВ. З проведених вимірювань випливає, що $K_\gamma = -(0.5 \pm 0.2)\%$. Слід відмітити, що дану величину отримати з інших експериментів неможливо.

В загальному, з теоретичних оцінок випливає, що це порогова область для таких факторів загальмованості.

У **висновках** сформульовані основні результати дисертації.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана наукова проблема, яка виникає при створенні теорій ядра, ядерних реакцій та ділення і полягає у відсутності інформації щодо механізмів перебігу реакцій з гальмівними гамма-квантами та легкими частинками в широкому діапазоні їх енергій при заселенні високоспінових ізомерних станів. Ці дані були отримані разом із новими даними про уламки фотоділення важких ядер, аномалії в коефіцієнтах внутрішньої конверсії для окремих ядер та визначені з високою точністю енергії перших збуджених станів двох ядер. Отримані в дисертаційній роботі дані будуть використані в активаційному аналізі, при побудові вищезгаданих теорій, при уточненні маси нейтрино.

Виконані у ході дисертаційної роботи дослідження дозволяють сформулювати такі основні висновки:

1. В реакціях з гальмівними γ -квантами при окремих значеннях їх граничної енергії вперше отримані експериментальні величини ізомерних відношень виходів та середньозважених виходів в ядрах $^{179m2}\text{Hf}$, ^{180m}Hf , ^{178m}Ta , ^{177}Ta , ^{177}Lu , ^7Be , $^{178m,g}\text{Lu}$ та ^{182m}Hf . Встановлено односторонній характер функції збудження реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{m2}$ в області ГДР. Проведені теоретичні розрахунки ІВВ та СВ за допомогою програмних пакетів TALYS-1.6, 1.9 та EMPIRE-3.2 і здійснено порівняння з експериментальними значеннями. В реакціях (γ, γ') -, (γ, xn) - показано домінування статистичного механізму, а в реакціях (γ, pxn) - та (γ, α) при $E_{\text{гр}} = 17.5$ та 20 МеВ - нестатистичних механізмів. Для (γ, p) -реакцій та реакцій на борі та берилії зі зростанням $E_{\text{гр}}$ внесок статистичних та передрівноважених механізмів зростає на 1-2 порядки і починає давати значний внесок у їх вихід. Отримано кількісне узгодження експериментальних та теоретичних виходів реакції $^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180m}\text{Hf}$ в широкому діапазоні величин $E_{\text{гр}}$ за умови врахування ізоспінового розщеплення ГДР в межах напівпрямого механізму.

2. Підтверджено існування другого резонансу у функції збудження реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{180}\text{Hf}^m$ та вперше відкрито для реакції $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179}\text{Hf}^{m2}$ в околі енергій гальмівних γ -квантів 20 МеВ. Вперше виміряний середньозважений вихід реакції $^{10}\text{B}(\gamma, t)^7\text{Be}$ при $E_{\text{гр}} = 20$ МеВ. Для цієї реакції результати моделювання демонструють домінування нестатистичних механізмів.

3. Отримані перерізи реакцій $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$, $^{136}\text{Ce}(\gamma, n)^{135}\text{Ce}$ в області ГДР. Їхні функції збудження мають односторонню форму характерну для сферичних ядер. В рамках програмного пакету TALYS-1.9 проведені теоретичні розрахунки перерізів реакцій $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$, $^{136}\text{Ce}(\gamma, n)^{135}\text{Ce}$ і $^{142}\text{Nd}(\gamma, n)^{141}\text{Nd}$. Задовільне узгодження теоретичних і експериментальних результатів свідчить про домінуючу роль статистичного механізму перебігу (γ, n) -реакції на досліджуваних ядрах.

4. Виміряні ізомерні відношення перерізів в ядрах $^{93}\text{Tc}^{m,g}$ в (d, n) і (p, γ) -реакціях, в ядрах $^{95}\text{Tc}^{m,g}$ в (d, n) -реакції, вперше в ядрах $^{95}\text{Nb}^{m,g}$ в (d, α) -реакції для дейтронів та протонів з максимальними величинами енергій 4.5 та 6.8 МеВ, відповідно. Обидва коди погано описують експериментальні значення ІВП, хоча в цілому пакет TALYS-1.4 дає ближчі до експериментальних результати, ніж EMPIRE-3.2. Загальною можливою причиною неузгодженостей є малочисельна інформація про

шляхи розпаду високозбуджених дискретних рівнів, особливо для ^{95}Nb . Додатковою причиною розходження для усіх реакцій можуть бути внески нестатистичних ефектів.

5. Виміряні ізомерні відношення перерізів реакцій $^{133}\text{Cs}(n,\gamma)^{134\text{m,g}}\text{Cs}$, $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198\text{m,g}}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(n,p)^{197\text{m,g}}\text{Pt}$ при енергії нейтронів 2.9 MeV та переріз реакції $^{178}\text{Hf}(n,\gamma)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ на реакторних нейтронах. Проведено їх моделювання в кодї TALYS-1.9 з якого випливає, що реакція $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198\text{m,g}}\text{Au}$ носить повністю статистичний характер, реакція $^{178}\text{Hf}(n,\gamma)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ йде на швидких нейтронах реакторного спектру і при цьому домінує статистичний механізм (95%) з внеском біля 5% передрівноважного механізму. Для інших реакцій можливий значний вклад нестатистичних процесів.

6. Вперше проведені вимірювання перерізу реакції $^{93}\text{Nb}(p,n)^{93\text{m}}\text{Mo}$ при енергії протонів 3.85 MeV та її моделювання в кодї TALYS-1.9. Здійснено вимірювання ІВП реакцій $^{196}\text{Pt}(p,n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ і $^{198}\text{Pt}(p,n)^{198\text{m,g}}\text{Au}$ при енергії протонів 6.8 MeV та $^{120}\text{Sn}(p,n)^{120}\text{Sb}^{\text{m,g}}$ при енергії протонів 3.9 MeV. Результати порівняння експериментальних та теоретичних даних вказують на можливу присутність низькорозташованого, високоспінового збудженого рівня з енергією 330 keV та спіном (7,8⁻) в схемі дискретних рівнів ^{120}Sb та значний вплив нестатистичних механізмів для реакцій $^{196}\text{Pt}(p,n)^{196\text{m,g}}\text{Au}$ та $^{198}\text{Pt}(p,n)^{198\text{m,g}}\text{Au}$.

7. Вперше проведено вимірювання перерізів та ізомерних відношень перерізів реакцій $^{175}\text{Lu}(\alpha,\text{an})^{174}\text{Lu}^{\text{m,g}}$, $^{176}\text{Lu}(\alpha,p)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ та $^{175}\text{Lu}(\alpha,2n)^{177}\text{Ta}$ при опроміненні мішеней природного і збагаченого лютецію для окремих значень енергії альфа-частинок в діапазоні 15.3-26 MeV. Проведено їх моделювання, з якого випливає, що при $E_\alpha = 17.3\text{-}21$ MeV для (α,an) -реакції теоретичні перерізи на 1-4 порядки нижчі експериментальних величин а при енергії 15.3 MeV ні основний ні ізомерний стани ^{174}Lu не заселяються, що говорить про можливий внесок структури збуджених рівнів в їх заселення. При $E_\alpha = 25.2$ та 26 MeV статистичні механізми домінують, оскільки теоретичні перерізи перевищують приблизно вдвічі експериментальні величини як для (α,an) -, так і для $(\alpha,2n)$ -реакцій, відповідно. В той же час для (α,p) -реакції внесок передрівноважного механізму на рівні 11%, а статистичного в околі 89% дозволяє узгодити експериментальні та теоретичні дані.

8. Вперше проведено вимірювання перерізів напрацювання $^{178}\text{Hf}^{\text{m}2}$ при опроміненні мішеней природного танталу альфа-частинками в енергетичному діапазоні 36-92 MeV. Проведено моделювання цих перерізів у кодї TALYS-1.4 з якого випливає, що основний внесок в напрацювання $^{178}\text{Hf}^{\text{m}2}$ дають реакції $(\alpha,\alpha p 2n)$, $(\alpha,3p 4n)$ та $(\alpha,^3\text{He} p 3n)$. В діапазоні енергій α -частинок 58-92 MeV теоретичні результати гарно співпали з модельованими і базуючись на цьому було зроблено оцінку перерізу напрацювання основного стану ^{178}Hf . З цієї оцінки отримано величини ІВП $\sigma(^{178\text{m}2}\text{Hf})/\sigma(^{178\text{g}}\text{Hf})$. Вони знаходяться у непоганому узгодженні з тенденцією зміни ІВП у інших реакціях з альфа-частинками нижчих енергій на інших мішенях.

9. Вперше визначені середні кутові моменти уламків ділення ^{90}Rb , ^{130}Sb , ^{133}Te , ^{134}I і ^{135}Xe , утворені в результаті фотоділення ^{237}Np та ^{241}Am гальмівними γ -квантами з величинами граничної енергії 9.8 та 17 MeV за допомогою вимірювання ізомерних відношень виходів. Експериментальні значення ІВВ розраховувались з врахуванням

внеску від бета-розпаду ізобарних ядер у виходи досліджуваних нуклідів. Спостерігається відсутність зростання величини \bar{J} з ростом A для непарних по Z ядер на відміну від парних ядер ^{235}U та ^{239}Pu та особлива поведінка середнього кутового моменту для ^{135}Xe .

10. Отримано нові дані з ізомерних відношень виходів ядер ^{97}Nb , що утворюється в результаті фотоподілу ядер ^{235}U та ^{238}U гальмівним випромінюванням з граничними енергіями 10.5, 12.0 та 18.0 MeV. Продемонстровано відмінність значень ізомерних відношень при $E_{\text{гр}} = 10.5$ та $E_{\text{гр}} = 12$ MeV від $E_{\text{гр}} = 18$ MeV, що може свідчити про суттєву залежність ізомерних відношень виходів від типу вхідного каналу. Визначено теоретичні значення середніх кутових моментів уламків поділу із використанням кодів TALYS-1.6 та EMPIRE-3.2 та дельтаподібного спінового розподілу первинних фрагментів.

11. При фотоподілі ^{238}U гальмівними γ -квантами з $E_{\text{гр}} = 6.25, 12, 12.5, 14.5$ та 18 MeV вперше проведено експериментальне вимірювання ізомерних відношень виходів ядер ^{133}Xe та ^{135}Xe та ядер ^{95}Nb при $E_{\text{гр}} = 12$ і 12.5 MeV. Визначені середні кутові моменти досліджуваних фрагментів поділу в рамках статистичної моделі розпаду. Результати вимірів вказують на можливість впливу оболонкових ефектів та відкриття (γ, nf) - і $(\gamma, 2\text{nf})$ -каналів поділу на значення IBV та СКМ первинних фрагментів ділення.

12. Вперше виміряні IBV фрагментів фотоділення ядер ^{235}U , ^{237}Np і ^{239}Pu гальмівними γ -квантами з граничною енергією 18 MeV. Отримані нові дані для виходів ізомерних пар ядер ^{84}Br , ^{90}Rb , ^{131}Te , ^{132}Sb , ^{132}I , ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe . Визначені їх СКМ в рамках статистичної моделі з використанням коду EMPIRE-3.2. Проведені вимірювання ізомерних відношень виходів та визначені середні кутові моменти для ядер ^{90}Rb , ^{133}Te , ^{134}I і ^{135}Xe при фотоділенні ^{233}U гальмівними γ -квантами з граничною енергією 10.5 та 17 MeV. Виявлено вплив непарних та парно-парних ефектів в системах, що діляться.

13. Ізомерні відношення виходів розраховані для ядер ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe – фрагментів фотоділення ^{235}U для (γ, f) -, (γ, nf) -реакцій при граничній енергії гальмівних γ -квантів 17 MeV. За допомогою статистичної моделі розраховані середні кутові моменти вищезгаданих уламків. Показано, що величини СКМ слабо залежать від моделей радіаційних силових функцій і густин рівнів.

14. Виміряна з високою точністю енергія першого збудженого стану ^{197}Au . Її величина рівна 77.339 ± 0.003 кеВ і енергетичне неспівпадання для подій збудження ядра при електронному переході в золоті рівне 39 ± 3 еВ.

15. Проведене з найвищою точністю вимірювання енергії γ -лінії 497 кеВ, яка супроводжує розпад ядер ^{115}Sb . Отримана величина енергії першого збудженого стану ядер ^{115}Sn склала: $E_{\text{збуд}} = 497.342(3)$ кеВ. Звідси розрахована величина енергії β -розпаду ядер ^{115}In на перший збуджений рівень ядер ^{115}Sn склала: $Q_{\beta} = 147 \pm 10$ еВ. Ця величина призводить до кращого узгодження експериментальної величини $T_{1/2}$ цього β -розпаду з теоретичними оцінками.

16. Уточнено схему розпаду $^{177\text{m}}\text{Lu}$, підвищена точність визначення інтенсивностей K_{X} - та γ -променів в усьому діапазоні енергій. Визначені інтенсивності гілок γ - та β -розпаду ізомерного стану, а також коефіцієнти внутрішньої конверсії для трьох К-заборонених γ -переходів. Вперше показано, що

для γ -переходу 55 кеВ з розпаду $^{177}\text{Lu}^m$ розбіжності між експериментальними та теоретичними КВК можна пояснити проявом внутрішньоядерної конверсії з параметром проникнення $\lambda_1 = 5.7 \pm 0.8$.

17. З високою точністю виміряні відносні інтенсивності γ -переходів з розпаду ^{120}Sb . З отриманих даних визначені повні КВК та КВК на К-оболонці загальмованих E1- та E2-переходів з енергією 89.9 кеВ та 197.3 кеВ, відповідно. Вперше виявлений внесок ефектів проникнення в цьому E1-переході, уточнений внесок ефектів проникнення у дослідженому E2-переході. Вперше визначений вклад спінових струмів для E1-переходу.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. M., Zheltonozhskaya M. V. and Chernyaev A. P. Excitation of $^{180}\text{Hf}^m$ with (γ, p) -reaction. *The European Physical Journal*. 2021. Vol. A57. P. 121-126 (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та написанні статті).
2. Желтоножский В. А., Желтоножская М. В., Саврасов А. М., Черняев А. П., Яценко В. Н. Исследование возбуждения К-изомеров $^{180,182}\text{Hf}$ и ^{177}Lu в (γ, α) -реакциях. *Физика Элементарных частиц и атомного ядра*. 2021. Т. 18. № 3(235). С. 255-260. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та написанні статті).
3. Zheltonozhsky V. A., Zheltonozhskaya M. V., Savrasov A. N., Varzar S. V. and Kobets V. V. Studying the Population of $^{178m,177}\text{Ta}$ in (γ, xn) Reactions. *Physics of elementary particles and atomic nuclei*. 2021. Vol. 18. № 3. P. 315-318. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту, теоретичному моделюванні та написанні статті).
4. Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. M., Zheltonozhskaya M. V., Chernyaev A. P. Excitation of $^{177,178}\text{Lu}$ in reactions with bremsstrahlung with escaping of charged particles. *Nuclear Instruments and Methods*. 2020. Vol. B476. P. 68-72. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту, теоретичному моделюванні та написанні статті).
5. Zheltonozhsky V. A., Zheltonozhskaya M. V., Savrasov A. M., Belyshev S. S., Chernyaev A. P. and Yatsenko V. N. Studying the Activation of ^{177}Lu in (γ, pxn) Reactions. *Bulletin Russian Academy of Science. Physics*. 2020. Vol. 84. P. 923–928. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту, теоретичному моделюванні та написанні статті).
6. Zheltonozhsky V. A., Zheltonozhskaya M. V., Savrasov A. N., Chernyaev A. P. and Yatsenko V. N. Investigation of Excitation of K Isomers $^{179m2}\text{Hf}$ and ^{180m}Hf in (γ, γ') Reactions. *Physics of Atomic Nuclei*. 2020. V. 83. P. 539–544. (Особистий внесок – брав участь в проведенні експерименту, теоретичному моделюванні та написанні статті).
7. Желтоножський В. О., Мизніков Д. Є., Саврасов А. М., Слісенко В. І. Дослідження заселення ^7Be в реакціях з гальмівними γ -квантами в широкому діапазоні величин енергії. *Ядерна фізика та енергетика*. 2020. Т. 21. № 4.

- С. 302-307. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту, теоретичному моделюванні та написанні статті).
8. Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. M. Population cross-section of $^{179m2}\text{Hf}$ from the reactions on hafnium and tantalum targets. *Nuclear Instruments and Methods*. 2019. Vol. B438. P. 20-25. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту, теоретичному моделюванні та написанні статті).
 9. Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. M. Excitation of $^{179}\text{Hf}^{m2}$ with (γ, n) -reaction. *Nuclear Instruments and Methods*. 2019. Vol. B456. P. 116-119. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, теоретичному моделюванні даних експерименту та написанні статті).
 10. Мазур В. М., Біган З. М., Деречкей П. С., Желтоножський В. О., Саврасов А. М. Дослідження перерізів (γ, n) -реакцій на р-ядрах ^{120}Te , ^{136}Ce в області енергії гігантського Е1-резонансу. *Ядерна фізика та енергетика*. 2019. Т. 20. № 3. С. 228-234. (Особистий внесок – брав участь в проведенні експерименту, теоретичному моделюванні та написанні статті).
 11. Желтоножський В. О., Саврасов А. М., Плюйко В. А., Горбаченко О. М., Солодовник К. М. Фотоподіл ^{238}U гальмівним випромінюванням у широкому інтервалі значень граничної енергії. *Ядерна фізика та енергетика*. 2019. Т. 20. С. 126-130. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та їх аналізі).
 12. Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. M., Strilchuk N. V., Tretyak V. I. Precise measurement of energy of the first excited state of ^{115}Sn ($E_{\text{exc}} \sim 497.3$ keV). *Europhysical Letters*. 2018. Vol. 121. 12001. P. 1-5. (Особистий внесок – брав участь у проведенні експерименту, вимірюванні γ -спектрів та теоретичному моделюванні).
 13. Вишневецький І. М., Желтоножський В. О., Саврасов А. М., Плюйко В. А., Горбаченко О. М., Солодовник К. М. Середні кутові моменти фрагментів фотоподілу ^{238}U гальмівним випромінюванням. *Ядерна фізика та енергетика*. 2018. Т. 19. № 1. С. 5–13. (Особистий внесок – брав участь в проведенні та обробці даних експерименту).
 14. Желтоножський В. О., Саврасов А. Н., Солодовник К. М., Плюйко В. А., Горбаченко А. Н., Давидовська О. И. Ізомерні відношення та середні кутові моменти первинних фрагментів ^{97}Nb при фотоподілі ^{235}U та ^{238}U . *Український фізичний журнал*. 2017. Т. 62. № 4. С. 285–293. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та їх аналізі).
 15. Vishnevsky I. N., Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. N., Mazur V. M. Study of $^{179}\text{Hf}^{m2}$ Excitation. *Physics of Atomic Nuclei*. 2016. Vol. 79. No. 9-10. P. 1381–1385. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та написанні статті).
 16. Savrasov A. M. Isomeric cross-section ratios for $^{93,95}\text{Tc}$ and ^{95}Nb nuclei. *Ukrainian Journal of Physics*. 2016. Vol. 61. No. 4. P. 283–290.
 17. Вишневецький І. Н., Желтоножський В. А., Саврасов А. Н., Хоменков В. П., Плюйко В. А., Ровенских Е. П. Измерение изомерных отношений в фотоделении ^{235}U , ^{237}Np и ^{239}Pu . *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных*

- реакторов.* 2015. Вып. 1. С. 790-794. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та написанні статті).
18. Вишне夫斯基 И. Н., Желтоножский В. А., Плюйко В. А., Саврасов А. Н., Горбаченко А. Н., Давидовская О. И., Ровенских Е. П. Изомерные отношения и средние угловые моменты фрагментов фотоделения ^{235}U , ^{237}Np и ^{239}Pu . *Ядерна фізика та енергетика.* 2015. Т. 16. № 1. С. 5–12. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та написанні статті).
19. Лашко А. П., Лашко Т. Н., Саврасов А. М., Желтоножский В. А. Исследование низкоэнергетической области гамма-спектра $^{177\text{m}}\text{Lu}$. *Известия РАН. Серия физическая.* 2014. Т. 78. №7. С. 795-801. (Особистий внесок – брав участь в проведенні та обробці даних експерименту).
20. Вишне夫斯基 И. Н., Драпей С. С., Желтоножский В. А., Саврасов А. Н., Хоменков В. П. Распад ^{120}Sb . *Известия РАН. Серия физическая.* 2014. Т. 78. №7. С. 790-794. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, теоретичному моделюванні даних експерименту, вимірюванні γ -спектрів та написанні статті).
21. Vyshnevskiy I. M., Zheltonozhskii V. O., Savrasov A. M., Rovenskykh E. P., Plujko V. A., Davydovska O. I., Gorbachenko O. M. Isomer yield ratios of ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe in photofission of ^{235}U with 17 MeV bremsstrahlung. *Ядерна фізика та енергетика.* 2014. Т. 15. № 2. С. 111–118. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та написанні статті).
22. Вишне夫斯基 И. Н., Желтоножский В. А., Саврасов А. Н., Ровенских Е. П. Исследование фрагментов фотоделения ^{233}U и ^{241}Am . *Ядерна фізика та енергетика.* 2014. Т. 15. №3. С. 215-221. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту, теоретичному моделюванні та написанні статті).
23. Lashko A. P., Lashko T. M., Savrasov A. M. and Zheltonozhsky V. O. Anomalous internal conversion of the K-forbidden 55 keV E1-transition in ^{177}Hf . *European Physical Journal A.* 2013. Vol. 49. 32001. P. 21-27. (Особистий внесок – брав участь в проведенні та обробці даних експерименту).
24. Kirischuk V., Savrasov A., Strilchuk N., Zheltonozhsky V. Precise energy measurements of the first-excited state in ^{197}Au . *European Physical Letters.* 2012. Vol. 97. 32001. P. 1-4. (Особистий внесок – брав участь в проведенні та обробці даних експерименту).
25. Вишне夫斯基 И. Н., Желтоножский В. А., Саврасов А. Н. Исследование фотоделения ^{237}Np и ^{241}Am . *Известия РАН. Серия физическая.* 2012. Т. 76. № 8. С. 1017-1020. (Особистий внесок – брав участь в проведенні, обробці даних експерименту та написанні статті).

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ ЇЇ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Желтоножський В. О., Саврасов А. М., Ровенських Є. П. Дослідження $^{178\text{m}}\text{Ta}$ та $^{180\text{m}}\text{Hf}$ у фотоядерних реакціях. Тези доповідей XXVII щорічної наукової

- конференції ІЯД НАНУ. До 50-річчя ІЯД НАН України. 2020. Київ, 21-25 вересня 2020 р. С. 67 (on-line).
2. Желтоножський В. О., Мизніков Д. Є., Саврасов А. М., Слісенко В. І. Фотоядерні реакції на мішенях бору та берилію. Тези доповідей ХХVI щорічної наукової конференції ІЯД НАН України. Київ, 8-12 квітня 2019 р. С. 49.
 3. Желтоножський В. О., Саврасов А. М., Ровенських Є. П., Желтоножська М. В. Ізомерні відношення в ядрах $^{133,135}\text{Xe}$ при фотоділенні ^{238}U . Тези доповідей ХХV щорічної наукової конференції ІЯД НАН України. Київ, 16-20 квітня 2018 р. С. 55.
 4. Желтоножский В. А., Вишнеvский И. Н., Давидовская О. И., Саврасов А. Н., Солодовник Е. Н., Плюйко В. А., Горбаченко А. Н. Исследование изомерных отношений $^{95m,g}\text{Nb}$ и $^{133m,g}\text{Xe}$ при фотоделении ^{238}U . Тези доповідей ХХIV щорічної наукової конференції ІЯД НАН України. Київ, 10-13 квітня 2017 р. С. 66.
 5. Желтоножский В. А., Саврасов А. Н., Солодовник Е. Н., Плюйко В. А., Горбаченко А. Н., Давидовская О. И. Исследование изомерных отношений $^{97m,g}\text{Nb}$ при фотоделении ^{235}U и ^{238}U . Тези доповідей ХХIII щорічної наукової конференції ІЯД НАН України. Київ, 01-05 лютого 2016 р. С. 51-52.
 6. Вишнеvський І. М., Желтоножський В. О., Саврасов А. М., Кирищук В. І., Гладковська О. В. Ізомерні відношення в ядрах $^{174m,g}\text{Lu}$ в реакціях з біляпороговими альфа-частинками. Тези доповідей ХХII щорічної наукової конференції ІЯД НАН України. Київ, 26-30 січня 2015 р. С. 29.
 7. Вишнеvський І. М., Желтоножський В. О., Саврасов А. М., Кирищук В. І. Напрацювання $^{179m2}\text{Hf}$ в реакціях з альфа-частинками та гамма-квантами при біляпорогових енергіях. Тези доповідей ХХII щорічної наукової конференції ІЯД НАН України. Київ, 26-30 січня 2015 р. С. 29.
 8. Vishnevsky I. N., Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. N., Rovenskikh E. P. Isomeric yields ratios of ^{238}U photofission fragments at end-point energy of bremsstrahlung photons about 18 MeV. *Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies*. Book of Abstracts of the LXIV international conference on nuclear physics "Nucleus 2014". Minsk, July 01-04, 2014 y. P. 88.
 9. Vishnevsky I. N., Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. N., Kirischuk V. I. Investigation of $^{178m2,179m2}\text{Hf}$ isomers creation in reactions with alpha-particles. *Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies*. The book of Abstracts of the LXIV international conference on nuclear physics "Nucleus 2014". Minsk, July 01-04, 2014 y. P.89.
 10. Вишнеvський І. М., Желтоножський В. О., Саврасов А. М., Ровенських Є. П., Применко Г. І. Вивчення реакцій з протонами та нейтронами на ядрах ^{133}Cs , ^{196}Pt та ^{197}Au . Тези доповідей ХХI щорічної наукової конференції ІЯД НАН України. Київ, 27-31 січня 2014 р. С. 27.
 11. Lashko A. P., Lashko T. N., Savrasov A. N., Zheltonozhsky V. A. The study of the low-energy range of the ^{177m}Lu gamma-spectrum. *Fundamental problems of nuclear physics and atomic power engineering*. Book of Abstracts of the LXIII international conference on nuclear physics "Nucleus 2013". Moscow, October 08-12, 2013 y. St.-Petersburg. 2013. P. 93.

12. Vishnevsky I. N., Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. N Investigation of high-spin isomeric states in $^{196,198}\text{Au}$ nuclei in (p,n)-reactions. *Fundamental problems of nuclear physics and atomic power engineering*. Book of Abstracts of the LXIII international conference on nuclear physics “Nucleus 2013”. Moscow, October 08 -12, 2013 y. St.-Petersburg. 2013. P.103.
13. Vishnevsky I. N., Zheltonozhsky V. A., Savrasov A. N., Rovenskykh E. P. Measurements of isomeric yields ratios at ^{235}U photofission. *Fundamental problems of nuclear physics and atomic power engineering*. Book of Abstracts of the LXIII international conference on nuclear physics “Nucleus 2013”. Moscow, October 08-12, 2013 y. St.-Petersburg. 2013. P. 104.

АНОТАЦІЇ

Саврасов А. М. Вивчення механізмів реакцій з гамма-квантами та легкими частинками за допомогою активаційного методу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок та високих енергій. - Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена експериментальному дослідженню реакцій з гамма-квантами та легкими частинками за допомогою активаційного методу. В роботі вперше отримані середньозважені виходи реакцій з гальмівними γ -квантами для десяти ядер, як в області гігантського дипольного резонансу, так і вищих енергій. Показано домінування статистичних механізмів у більшості фотоядерних реакцій з вильотом нейтронів і гамма-квантів та нестатистичних механізмів в реакціях з вильотом заряджених частинок. Вперше отримані перерізи та ізомерні відношення перерізів для тринадцяти ядер в реакціях с зарядженими частинками та нейтронами. Отримані ізомерні відношення виходів для дванадцяти фрагментів фотоділення шести важких актинидів. На базі статистичної моделі, яка використовується у відкритих програмних кодах, отримані середні кутові моменти. Встановлено відсутність зростання величин середніх кутових моментів з ростом масового числа для непарно-парних важких ядер на відміну від парно-непарних. З високою точністю визначені величини енергій збудження перших збуджених рівнів двох ядер, які є важливими як для визначення енергії бета-розпаду з найнижчою енергією, так і для уточнення граничної енергії атомно-ядерного процесу.

Ключові слова: основні та ізомерні стани атомних ядер, рентгенівська та гамма спектрометрія, перерізи, середньозважені виходи, коди TALYS-1.4,1.6,1.9 та EMPIRE-3.2.

Savrasov A. M. Study of reactions mechanism with γ -rays and light particles by using of activation method. - Manuscript.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Sciences in physics and mathematics by speciality 01.04.16 – physics of nucleus, elementary particles and high energies. – Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

This thesis is devoted to the experimental investigation of reactions with γ -rays and light particles by activation method. Flux-weighted average yields have been obtained for the first time for the reactions with bremsstrahlung γ -rays at ten nuclei both in the giant dipole resonance region and for higher energies. The domination of the statistical mechanism has been shown for the most of the photonuclear reactions with escaping of neutrons and γ -rays and nonstatistical mechanisms for reactions with escaping of charged particles. For the first time the cross-sections and isomeric cross-section ratios have been measured for the thirteen nuclei in reactions with light particles and neutrons. The measurement of isomeric yields ratios has been performed for the twelve photofission fragments, created in reactions on six heavy actinides. For these fragments the average angular moments have been obtained based on the statistical model which is used in the free codes. There is no increasing of the average angular moments values at increasing of atomic number for odd-even heavy nuclei as opposed to even-odd ones. The precise measurement of the excitation energy of the first excited levels has been obtained for two nuclei. It is important both for defining of the lowest beta-decay energy value and for more accurate definition of the end-point energy for atomic-nuclei process.

Keywords: ground and isomeric states of atomic nuclei, X-ray and gamma-spectrometry, cross-sections, flux-weighted average yields, the TALYS-1.4,1.6,1.9 and EMPIRE-3.2 codes.

Саврасов А. Н. Изучение механизмов реакций с гамма-квантами и легкими частицами с помощью активационного метода. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика ядра, элементарных частиц и высоких энергий. - Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому изучению реакций с гамма-квантами и легкими частицами с помощью активационного метода. Продукты активации измерялись с помощью γ -спектрометров на базе сверхчистых германиевых детекторов. Использовались как оригинальные, так и стандартные программы для набора и анализа γ -спектров. В отдельных случаях использовались схемы совпадений и антикомптоновский спектрометр. Источниками тормозных гамма-квантов и частиц являлись физические установки исследовательских центров Киева, Харькова и Ужгорода. Для сравнения теоретических и экспериментальных результатов использовались открытые программные коды TALYS-1.4,1.6,1.9 и EMPIRE-3.2, в которых доминируют статистический и предравновесный механизмы.

В работе впервые получены средневзвешенные выходы реакций с тормозными γ -квантами для десяти ядер, как в области энергий гигантского дипольного резонанса, так и выше. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических выходов, рассчитанных в рамках общедоступных кодов. Показано доминирование статистических механизмов для большинства фотоядерных реакций с вылетом нейтронов и гамма-квантов и нестатистических механизмов в реакциях с вылетом

заряженных частиц при энергиях тормозных γ -квантов в области гигантского дипольного резонанса. Для энергий выше этого резонанса в реакциях с вылетом протонов, как на тяжелых, так и на легких ядрах вклад статистического и предравновесного механизмов увеличивается на порядок и становится значительным в общем механизме протекания этих реакций.

Получено количественное согласование экспериментальных и теоретических выходов реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$ в широком диапазоне величин граничной энергии тормозных γ -квантов при условии учета изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса в рамках полупрямого механизма. Для отдельных р-ядер получено хорошо согласие экспериментальных и теоретических сечений, рассчитанных в коде TALYS-1.6 в широком диапазоне граничных энергий тормозных γ -квантов. Экспериментальные данные про относительный выход $^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ указывают на одnogорбый вид функции возбуждения реакции $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ в области гигантского дипольного резонанса.

Показана перспективность наработки необходимого для ядерной медицины ^{177}Lu на мишенях гафния естественного изотопного состава на пучках тормозных гамма-квантов. Важным прикладным результатом данных исследований на ядрах бора и бериллия является то, что в области величин граничной энергии тормозных γ -квантов 30–40 MeV соотношение средневзвешенных выходов $(\gamma, 2n)$ - и $(\gamma, p2n)$ -реакций приблизительно одинаковое. Это позволяет разрабатывать методы идентификации ^{10}Be , который активируется в (n, γ) - и (n, p) -реакциях в конструкционных материалах АЭС.

В работе впервые получены сечения и изомерные отношения сечений для тринадцати ядер в реакциях с заряженными частицами и нейтронами. Для отдельных ядер в перехресных реакциях с протонами и дейтронами показано сильное влияние нестатистических механизмов и/или структуры возбужденных уровней остаточного ядра. В реакциях с альфа-частицами средних энергий констатируется значительный вклад предравновесных процессов.

Оценена возможность наработки важного долгоживущего, высокоэнергетического изомера $^{178}\text{Hf}^{\text{m}2}$ в реакциях с альфа-частицами средних энергий в диапазоне 36-92 MeV. В зарядообменных реакциях с протонами и нейтронами отмечается значительное влияние структуры возбужденных уровней остаточных ядер. Для реакции $^{176}\text{Lu}(\alpha, p)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$ вклад предравновесного механизма на уровне 11% и статистического в пределах 89% позволяет согласовать экспериментальные и теоретические сечения.

Получены изомерные отношения выходов для двенадцати фрагментов фотоделения шести тяжелых актинидов. На базе статистической модели, используемой в открытых програмных кодах и дельтаподобного спинового распределяя фрагментов деления, получены средние угловые моменты. При фотоделении исследовалась широкая область граничных энергий тормозных γ -квантов. Установлено отсутствие увеличения величины средних угловых моментов с ростом массового числа для нечетно-четных тяжелых ядер в отличии от четно-нечетных.

Показано, что величины средних угловых моментов слабо зависят от моделей радиационных силовых функций и плотностей уровней, которые используются в

кодах. Констатируется возможность влияния оболочечных эффектов фрагментов фотоделения и открытие дополнительных каналов фотоделения актинидов после вылета одного(двух) нейтронов на величины изомерных отношений сечений и средних угловых моментов.

С высокой точностью определены величины энергий возбуждения первых возбужденных уровней двух ядер, которые важны для определения энергии самого низкоэнергетического бета-распада и уточнения граничной энергии атомно-ядерного процесса.

Получены коэффициенты внутренней конверсии для пяти гамма-переходов, для двух из них рассчитаны аномалии в этих коэффициентах и показан значительный вклад эффектов проникновения в E1-переходах.

Внесено уточнение в схему распада ^{177m}Lu , которое позволило увеличить точность определения интенсивностей K_{α} - и γ -лучей во всем диапазоне энергий. Определены интенсивности веток γ - и β^{-} -распада изомерного состояния.

Получена величина энергии β -распада ядер ^{115}In на первый возбужденный уровень ядер ^{115}Sn , которая составила 147 ± 10 эВ. Эта величина приводит к лучшему согласованию экспериментальной величины периода полураспада этого β -распада с теоретическими оценками.

Измеренная величина энергии первого возбужденного состояния ядер ^{197}Au составила 77.339 ± 0.003 кэВ. Исходя из этого энергетическое несоответствие для событий возбуждения ядра после электронного перехода в золоте равно 39 ± 3 эВ.

Ключевые слова: основные и изомерные состояния атомных ядер, рентгеновская и гамма-спектрометрия, сечения, средневзвешенные выходы, коды TALYS-1.4,1.6,1.9 и EMPIRE-3.2.

Підписано до друку 16.11.2021 р. Формат А5/48
Друк цифровий. Папір офсетний. Гарнітура Таймс Нью Роман.
Тираж 100. Зам. №-ПФ-00164

Надруковано ФОП "Власов В.С."
Свідоцтво В03 №621566 від 03.03.2011 р.
м. Київ, вул. Ярославська, 14
тел.: 0800 332 042

