

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Саврасова Андрія Миколайовича

«ВИВЧЕННЯ МЕХАНІЗМІВ РЕАКЦІЙ З ГАММА-КВАНТАМИ ТА ЛЕГКИМИ ЧАСТИНКАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВАЦІЙНОГО МЕТОДУ», представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Актуальність теми

Вивчення процесів збудження та поділу атомних ядер формує основний напрямок досліджень сучасної ядерної фізики, встановлюючи параметри елементарних та колективних процесів взаємодії між нуклонами. Ядерна гамма-спектроскопія є потужним інструментом вивчення енергетичної структури збуджених та основних нуклідних станів, потребує для свого розвитку якісні теоретичні моделі та прецизійні умови ядерного експерименту. Як правило, така інформація отримується у активаційних експериментах, об'єктом дослідження яких є спектроскопічні характеристики розпаду ізомерних та основних станів ядер, які заселяються в ядерних реакціях різного типу. Натепер, теорія не може запропонувати *ab initio* методики розрахунку схеми енергетичних рівнів атомних ядер різного нуклонного складу. Експериментальні ж дослідження енергетичної структури збуджених станів ядер, зокрема, гамма-спектроскопічні, ставлять високі вимоги як до якості їх апаратного забезпечення, так і методики проведення таких робіт.

Дисертаційна робота Саврасова А. М. представляє результати досліджень збудження та перетворення атомних ядер, таких як актиніди ^{237}Np , $^{233,235,238}\text{U}$, ^{241}Am і ^{239}Pu , численних уламків їх поділу, а також ролі статистичних та нестатистичних процесів заселення їх енергетичних рівнів у цих процесах. У фотоядерних експериментах вивчено результати (γ, γ') -, $(\gamma, 2n)$ -, $(\gamma, 3n)$ -, $(\gamma, 4n)$ -, (γ, p) -, (γ, pn) -, $(\gamma, p2n)$ -, (γ, pxn) - та (γ, α) -реакцій. Представлено також дані (p, n) -, (p, γ) -, (n, γ) -, (n, p) -, (d, n) -, (d, α) -реакцій, виконаних на різних ядрах, які доповнюють дослідження на гальмівних пучках. Комплексний характер досліджень, його висока інформативність для фізики ядерних перетворень, широкий діапазон сортів взаємодіючих частинок, їх енергій, спінів та кутових моментів дозволяє говорити про важливість та актуальність проведеної роботи та цінність отриманих результатів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків сформульованих в дисертації

Наукові положення і висновки, приведені в роботі Саврасова А.М. базуються на застосуванні активаційних методів, ідентифікації та дослідженні ізомерних станів ядер, апробованого гамма-спектроскопічного методу та розрахункових кодів TALYS і EMPIRE, що містять всю доступну інформацію про енергетичну структуру основного та збуджених станів досліджуваних нуклідів, перебіг ядерних реакцій.

Висновки про превалювання статистичних, чи не статистичних (прямих, напівпрямих) процесів заселення збуджених, чи основних станів як при фотоядерних, так і в реакціях із легкими ядрами зроблені на основі співставлення експериментальних даних із результатами теоретичного моделювання. Такі співставлення дисертантом проведено при інтерпретації ядерних реакцій: $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$, $^{136}\text{Ce}(\gamma, n)^{135}\text{Ce}$ і $^{142}\text{Nd}(\gamma, n)^{141}\text{Nd}$, $^{10}\text{B}(\gamma, t)^7\text{Be}$, $^{nat}\text{B}(\gamma, x)^7\text{Be}$, $^9\text{Be}(\gamma, 2n)^7\text{Be}$; $^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134m, g}\text{Cs}$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198m, g}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(n, p)^{197m, g}\text{Pt}$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198m, g}\text{Au}$, $^{178}\text{Hf}(n, \gamma)^{179}\text{Hf}^{m2}$; $^{93}\text{Nb}(p, n)^{93m}\text{Mo}$, $^{196}\text{Pt}(p, n)^{196m, g}\text{Au}$, $^{198}\text{Pt}(p, n)^{198m, g}\text{Au}$, $^{120}\text{Sn}(p, n)^{120}\text{Sb}^{m, g}$; $^{175}\text{Lu}(\alpha, \alpha n)^{174}\text{Lu}^{m, g}$, $^{176}\text{Lu}(\alpha, p)^{179}\text{Hf}^{m2}$ та $^{175}\text{Lu}(\alpha, 2n)^{177}$ та вимірюванні ізомерних відношень виходів уламків поділу актинідів ^{235}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{237}Np та ^{241}Am . При поясненні результатів останніх експериментів до уваги приймався вплив непарних та парно-парних ефектів в ядрах-актинідів.

Постановка активаційних експериментів, енергія ядерних частинок, час опромінення/«охолодження» та виміру, інтерпретація отриманих результатів проведено із врахуванням ядерно-фізичних констант досліджуваних ядер: порогів реакцій їх збудження та поділу, множинній емісії нейтронів/протонів, періодів напіврозпаду та життя ізомерних станів, реалізації гілок γ - та β^- -розпаду ізомерного стану, а також внутрішньої конверсії;

Обґрунтованим є використання середньозважених величин, що стосуються виходів заселення основного та ізомерного станів досліджуваних ядер. Це дозволяє значно покращити достовірність оцінки отриманих експериментальних даних. В роботі використовуються різні модельні представлення, що відображають розуміння дисертантом умов активаційних експериментів: через складене ядро, статистичний механізм, резонансна взаємодія, тощо.

І, нарешті, обґрунтування вибору дисертантом об'єктів дослідження - атомних ядер, важливих для встановлення фундаментальних ядерно-фізичних констант, характеру процесів збудження/розпаду та ролі ядерних оболонок. Інший клас досліджуваних ядер має значення для задач нуклеосинтезу, ядерміток стану палива АЕС, ядерної медицини та радіоекології довкілля;

Отже, отримані дисертантом результати, їх передбачуваність та підтвердження при порівнянні із експериментальними даними, отриманими іншими авторами, показали обґрунтованість та продуктивність вибраних методик дослідження.

Достовірність, новизна та практична цінність роботи

Достовірність отриманих експериментальних результатів забезпечується надійністю спектрометричних експериментів, а також шляхом порівняння отриманих експериментальних даних із наявними, що містять відомі бібліотеки ядерно-фізичних констант та по результатах подібних досліджень.

Ряд наукових результатів отриманих Саврасовим А.М. по встановленню енергій збуджених станів ^{197}Au , ^{115}Sn , γ -лінії 497 кеВ переходу з розпаду ядер ^{115}Sb , відносних інтенсивностей γ -переходів та K_{α} -випромінювання з розпаду ^{120}Sb отримані із найвищою точністю на межі можливостей електронних блоків

фірм EG&G ORTEC та CANBERRA і можуть претендувати на роль метрологічних стандартів. З метою мінімізації можливих систематичних похибок дисертантом проводились вимірювання на різних типах детекторів та геометріях вимірів, налаштуваннях підсилення та ширинах каналів АЦП. Використовувалися АЦП на 8192 та 16384 канали.

Слід виділити наступні результати дисертаційної роботи Саврасова А.М. у розумінні їх новизни та оригінальності:

- Цілий ряд ядерно-фізичних характеристик процесів ядерних перетворень отримано дисертантом вперше. В першу чергу це значення величин ізомерних відношень виходів та середньозважених виходів у фотоядерних реакціях для ізотопів Hf, Ta, Lu та Вe;
- Зроблено висновок про домінування нестатистичних процесів у фотоядерних процесах з вильотом заряджених частинок як у (γ, p, n) - та (γ, α) -реакції. Для фотонейтронних реакцій - (γ, xn) , показано домінування статистичного механізму;
- Вперше отримано нові дані ізомерних відношень ядра ^{97}Nb , отриманих при фотоподілу ізотопів $^{235,238}\text{U}$ в широкому діапазоні енергій γ -квантів. Показано, що ізомерні відношення суттєво залежать від типу вхідного каналу і можуть бути мітками ядерного палива;
- На прикладі дослідження ізомерних відношень ядер-уламків ^{84}Br , ^{90}Rb , $^{131,133}\text{Te}$, ^{132}Sb , $^{132,134}\text{I}$, ^{135}Xe при фотоподілі ізотопів $^{233,235}\text{U}$, ^{237}Np і ^{239}Pu досліджено роль ядерних оболонок, а також непарних та парно-парних ефектів подільних ядер у формуванні ізомерних станів;
- Фотоядерні експерименти у дисертації доповнені активаційними дослідженнями процесів збудження ядер під дією заряджених частинок. Так, представлено перерізи взаємодії та ізомерні відношення реакцій $^{175}\text{Lu}(\alpha, an)$, $^{174}\text{Lu}^{m, g}$, $^{176}\text{Lu}(\alpha, p)$, $^{179}\text{Hf}^{m2}$ та $^{175}\text{Lu}(\alpha, 2n)$, ^{177}Ta отримані вперше. Вони поставили нові завдання теорії ядерних перетворень для такого роду експериментів, зокрема, по вивченню прямих процесів збудження;
- Цікавими і оригінальними є результати по збудженню ізомерних станів у реакціях на протонних пучках. Дослідження перерізу реакцій $^{93}\text{Nb}(p, n)$, ^{93m}Mo , $^{196}\text{Pt}(p, n)$, $^{196m, g}\text{Au}$, $^{120}\text{Sn}(p, n)$, $^{120}\text{Sb}^{m, g}$ та $^{198}\text{Pt}(p, n)$, $^{198m, g}\text{Au}$ в діапазоні енергій протонів 3.9 - 6.8 MeV вказують на значний вплив нестатистичних механізмів та можливу наявність високоспінових збуджених станів (^{120}Sb);
- Дослідження ізомерних відношень виходів уламків фотоподілу ізотопів ^{237}Np та ^{241}Am вперше використано для оцінки середніх кутових моментів ^{90}Rb , ^{130}Sb , ^{133}Te , ^{134}I і ^{135}Xe в рамках узагальненої статистичної моделі Хьюзенга-Ванденбоша;
- Оригінальним є використання представлення про ізоспінове розщеплення гігантського дипольного резонансу як природу нестатистичного механізму реакцій гігантського дипольного резонансу. Така модель використана дисертантом для пояснення реакції із вильотом протона: $^{181}\text{Ta}(\gamma, p)$, $^{180}\text{Hf}^m$;
- Цікавим є припущення дисертанта про додатковий механізм формування кутового моменту у важких уламках фотоподілу ядер. Це слідує із того,

що останні мають у 3-6 раз більші кутові моменти як легкі уламки.

Практичне значення роботи Саврасова А.М. полягає в тому, що встановлені в ній ядерні константи важливі для оцінки можливості напрацювання таких радіоізоотопів як ^{177}Lu для ядерної медицини, для задач радіоекології (^{10}B) та середовища для γ – лазерів ($^{178}\text{Hf}^{m2}$). Ряд досліджуваних радіонуклідів можуть бути використані як мітки якості ядерного палива для АЕС. Всі ядерні константи, отримані експериментально будуть впроваджені у міжнародних базах ядерно-фізичних констант.

Отримані результати дисертанта дають цінну інформацію про характер протікання реакції збудження та поділу атомних ядер та стимулюють розробку нових теоретичних представлень про їх енергетичну структуру та природу елементарних взаємодій.

Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку.

Перший розділ роботи має оглядовий характер і містить літературні дані за темою дослідження, зокрема процесів збудження та перетворення атомних ядер під дією гамма-квантів та легких частинок. Показана важливість дослідження біля порогових реакцій в околі гігантського дипольного резонансу, особливо для ядер із високоспіновими ізомерними станами без та при врахуванні вильоту нуклонів. Показана перспективність активаційних експериментів, вимірювання наведеної активності, гамма-спектрометричних методів дослідження, вибору довгоживучих ізомерних станів як об'єктів для вивчення перебігу процесів збудження ядер. Аналізуються сучасні теоретичні представлення про перебіг ядерних реакцій у фотоядерних експериментах, зарядообмінних та атомно-ядерних процесах.

Другий розділ присвячений апаратурним можливостям дослідження збуджених станів ядер і механізмів протікання ядерних реакцій. Проведена детальна характеристика спектроскопічних систем гамма-випромінювання із використання детекторів із надчистого германію, без та при наявності методик антикомptonівського захисту, використання схем співпадіння у режимі (γ, γ) збігів. Інша частина стосується методів обробки апаратурних рентгенівських та гамма-спектрів, встановлення абсолютної та відносної ефективності реєстрації спектроскопічної лінійки.

Третій розділ дисертації є найбільшим по об'єму і стосується фотоядерних реакцій збудження ізомерних та основних станів ядер в класичних (γ, γ') , $(\gamma, n\gamma)$ реакціях та із множинним вильотом нейтронів та протонів. Об'єктами дослідження є як легкі (B, Be), так і доактинідні (Ta, Hf, Lu) ядра. Отримані результати аналізуються з точки зору статистичних та прямих механізмів заселення збуджених станів, обговорюються можливості розрахункових пакетів TALYS і EMPIRE для пояснення даних експериментів, перебігу ядерних реакцій, їх здатності описати отримані результати. В роботі використовується представлення про середньозважені виходи реакцій, які для більшості досліджуваних ядер краще враховують умови експерименту. Проте, у випадку ізотопу ^{180}Hf для максимальних енергій гальмівного випромінювання в діапазоні 20 – 55 MeV експериментальні дані по заселенню збуджених станів потребують нових теоретичних підходів, зокрема із залученням нестационарних

процесів. Показано, що врахування ізоспінового розщеплення гармонізує теоретичні та експериментані результати.

Четвертий розділ присвячений дослідження перерізів та ізомерних відношень в реакціях з легкими ядрами - нейтронами, низькоенергетичними протонами і дейтронами та альфа-частинками. Такі експерименти були проведені на вітчизняних прискорювачах –циклотронах У120, 240, тандем-генераторі ЕГП-10К, джерелах нейтронів – реакторі ВВР-М та генераторі НГ-300 кафедри ядерної фізики КНУ ім. Т.Г. Шевченка. Як і фотоядерних експериментах, дослідження стосувалися перерізів збуджених станів ядер Hf, Ta, Lu, Nb, Au, Pt, Sn, Hf, Mo і Cs при взаємодії із різними бомбардуючими частинками. Характеристики такої взаємодії як перерізи реакцій, ізомерні відношення для даних умов експерименту були отримані вперше. Показано, що інтерпретація отриманих даних потребує нових модельних підходів для пояснення, наприклад, процесів збудження ядер-мішеней, розуміння фізики нестатистичних механізмів реакцій із залученням енергетичних рівнів, ще не встановлених теоретично. Прикладний аспект досліджень пов'язаний із можливістю напрацювання ізотопів, важливих для ядерної медицини та наукових досліджень.

П'ятий розділ дисертації досліджує процеси збудження ізомерних відношень ядер-уламків при фотоподілі актинідів в діапазоні енергій 6-18 MeV. Статистичний метод дозволяє провести оцінку середніх кутових моментів як легких, так і тяжких уламків поділу. Показано, що такі моменти важких фрагментів ділення понад у 3 рази вищі, ніж у легких і відрізняються від спінів ядер, що діляться. За думкою дисертанта, це може свідчити про наявність додаткового механізму формування кутових моментів.

I, нарешті, **шостий розділ** роботи присвячений вивченню атомно-ядерних процесів та ідентифікації перших збуджених станів ядер ^{115}Sn , ^{197}Au та енергії β -розпаду ядер. Оскільки дослідження в основному стосувалися рентгенівських та γ -переходів у низькоенергетичній області спектру, вони вимагали прецизійних умов експерименту. Детально описано умови експерименту, використання схем (γ - γ) співпадання, організації антикомptonівського захисту, врахування статистичних та систематичних похибок. Отримані результати дозволяють оцінити значення коефіцієнтів внутрішньої конверсії та ефектів проникнення. Показано, що отримані спектрометричні методики можуть бути використані для встановлення обмежень на масу нейтрино.

Таким чином, дисертаційна робота Саврасова А.М. має цілісний характер, зміст та структура викладу логічно представляє проведений об'єм досліджень. Оформлена дисертація відповідає вимогам МОН України, робота написана доступною мовою з належним обґрунтуванням та численними порівняннями із результатами інших авторів та містить багатий ілюстративний матеріал.

Повнота викладу підтверджується тим, що наукові здобутки Саврасова А.М. пройшли апробацію на профільних вітчизняних та міжнародних конференціях по фізиці ядерних реакцій, та представлені у провідних світових наукових журналах. Кількість та якість наукових видань, забезпечує повноту публічного викладу матеріалу дисертації.

За темою докторської дисертації Саврасовим А.М. опубліковано 78 робіт, з яких 25 статей у реферованих вітчизняних та міжнародних журналах, з яких 16 статей в іноземних виданнях та 53 роботи у тезах доповідей на конференціях.

Разом з тим вважаю за потрібне зробити наступні зауваження:

- Хотілось би більше інформації про ядерно-фізичні установки, на яких виконувалися дослідження, відсутній опис їх характеристик. Це, - моноенергетичність пучка ядерних частинок, його стохастичні та частотні характеристики. Наскільки їх врахування може вплинути на систематичну похибку експерименту?
- Це ж саме щодо умов експерименту: час опромінення, флюенс, час охолодження, час виміру. Як вони співставимі із спектрометричними характеристиками досліджуваних ядер?
- Відсутні дані моделювання, наприклад, спектру гальмівного гамма-випромінювання для даних умов експерименту. Коли мікротрон генерує практично моноенергетичні пучки електронів, то спектр лінійних прискорювачів такої властивості не має. Наскільки відхилення реального гальмівного спектру від спектру Шиффа може вплинути на встановлення виходів ізомерних станів досліджуваних ядер?
- В роботі присутні посилання на різні варіанти розрахункового коду TALYS, - від варіанту 1.4 до 1.9. Яка в цьому необхідність? Здавалося б, що більш пізніша версія має включати здобутки усіх попередніх?
- Дослідження стосуються значного числа ядер, задіяних у активаційних експериментах на пучках гальмівного гамма-випромінювання та легких частинок. Чи є відповідь на питання, - яким чином різні ядерні фактори впливають на процеси збудження/розпаду ізомерних станів для одного типу ядер? Чи є можливість встановити це на основі результатів, приведених у роботі дисертанта?
- Унікальні та цікаві результати, представлені в Розділі 4, що стосуються коштовних експериментів на пучках легких ядер представлені лише у матеріалах тез. У вигляді побажання вважаю за доцільність поширення отриманих даних у вагомих ядерних виданнях.
- В дисертації частково дублюється інформація, наведена в таблицях 3.1, 4.1, 5.1 та на рисунках, де показані фрагменти схем розпаду певних ядер. Наприклад, в табл. 3.1 в першій стрічці вказано період напіврозпаду ядр $^{179m2}\text{Hf}$. І ця ж інформація повторюється на рис. 3.2.
- Серед нечисленних описок роботи є «Ужгородський інститут електронної фізики ...», слід «Інститут електронної фізики в м. Ужгород»; таблиця 6.3 містить англійський сполучник.

Зроблені зауваження не впливають на хороше враження від дисертаційної роботи Саврасова А.М. та не ставлять під сумнів наукові та практичні результати його роботи, які важливі для розвитку напрямку фізики ядерних реакцій. Вибір напрямку наукового дослідження, теми дисертаційної роботи, виконаного об'єму робіт, його комплексність та обґрунтованість отриманих результатів свідчать про високу фахову підготовку дисертанта.

Вважаю, що дисертаційна робота на тему: **«ВИВЧЕННЯ МЕХАНІЗМІВ РЕАКЦІЙ З ГАММА-КВАНТАМИ ТА ЛЕГКИМИ ЧАСТИНКАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВАЦІЙНОГО МЕТОДУ»** цілком відповідає встановленим вимогам МОН України, і її автор, Саврасов Андрій Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Завідувач відділом фотоядерних процесів
Інституту електронної фізики НАН України,
д. фіз.-мат. н., проф.

Маслюк В.Т.

Підпис Маслюка В.Т. засвідчую:

Вчений секретар

Інституту електронної фізики НАН України



Романова Л.Г.

2.12.2021 р.