

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Саврасова Андрія Миколайовича

«Вивчення механізмів реакцій з гамма-квантами та легкими частинками за допомогою активаційного методу»,

подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

Обґрунтування вибору теми досліджень

Дисертаційна робота Саврасова А.М. «Вивчення механізмів реакцій з гамма-квантами та легкими частинками за допомогою активаційного методу» присвячена актуальній уже багато десятиліть темі отримання інформації про механізми перебігу ядерних реакцій в широкому діапазоні енергій. В його роботі вивчається слабо досліджена область реакцій під дією альфа-частинок середніх енергій та низько енергетичних протонів при біля порогових величинах енергії. Досліджується також напрацювання високоспінового ізомерного стану в ^{179}Hf для нейтронів реакторного енергетичного спектру. Для отримання висновків щодо механізмів перебігу реакцій слід проводити порівняння експериментальних та теоретичних перерізів, розрахованих в рамках відкритих програмних кодів. Також необхідно виміряти з високою точністю енергії перших збуджених станів окремих ядер для більш глибокого розуміння окремих атомно-ядерних процесів та бета-розпадів з пороговими величинами енергій. Не дивлячись на те, що коефіцієнти внутрішньої конверсії експериментально визначаються уже багато років, існує багато «білих плям», зокрема у їх визначенні для низько енергетичних γ -переходів, які супроводжують розпади високоспінових К-ізомерів.

Дисертаційна робота виконувалась у рамках 7 науково-дослідних робіт відділу структури ядра Інституту ядерних досліджень, що підтверджує важливість та актуальність роботи.

Загальна характеристика структури та змісту роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та І додатку.

У **Вступі** викладено 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, сформульовано особистий внесок здобувача, представлено апробацію

результатів на наукових конференціях та семінарах, приведено перелік робіт, в яких вони опубліковані.

У **першому розділі** наведено огляд літературних даних за темою досліджень. Наголошується на тому, що при значному об'ємі експериментальних даних щодо напрацювання ядер $^{178}\text{Hf}^{m2}$ слабо дослідженими залишаються реакції з альфа-частинками середніх енергій на танталі. Цей ізомер має тривалий період напіврозпаду та високу енергію збудження і є перспективним для створення нових джерел енергії. Вказується також на відсутність експериментальних перерізів реакції $^{93}\text{Nb}(p,n)^{93m}\text{Mo}$ для біля порогової області енергій протонів. Дана реакція важлива також у ракетобудуванні, оскільки ніобій входить до складу космічної техніки. Дисертантом підкреслюється, що для альфа-частинок середніх енергій існує мало експериментальних даних щодо $(\alpha, \alpha n)$ -реакцій, особливо на ядрах рідкоземельних елементів. Наголошується на тому, що для окремих атомно-ядерних процесів та точного визначення енергії бета-розпаду з найнижчою величиною енергії необхідно визначити з високою точністю енергії перших збуджених станів окремих ядер.

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

У **другому розділі** аналізуються методи вивчення збуджених станів ядер та механізмів перебігу ядерних реакцій, наводяться характеристики спектроскопічних систем і методик вимірювання, які використовуються в наступних дослідженнях. Наголошується, що експерименти, виконані в межах даної роботи, проводились на HPGe-спектрометрах, а також на антикомптонівському спектрометрі на базі детектора з надчистого германію оточеного активним захистом на основі сцинтиляційних детекторів з NaI(Tl). Вимірювання деяких коефіцієнтів внутрішньої конверсії та енергії першого збудженого стану ^{197}Au здійснювались у режимі $\gamma\gamma$ -збігів. Описано можливості програми Winspectrum для обробки рентгенівських і гамма-спектрів. Наголошується на тому, що для опису форми піків використовувалася функція Гаусу з експоненціальними "хвостами". Для моделювання фону використовувались експоненціальна, квадратична та східцеподібна функції. Приводяться формули, за допомогою яких у програмі Winspectrum виконується розрахунок абсолютної та відносної ефективності.

Третій розділ дисертації присвячено дослідженню збудження ізомерних та основних станів ядер в реакціях з гальмівними гамма-квантами в широкому діапазоні їх граничних енергій. Дисертантом після порівняння експериментальних та теоретичних даних продемонстровано існування другого резонансу у функції збудження реакції $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179}\text{Hf}^{m2}$ та підтверджено його існування в реакції $^{180}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{180}\text{Hf}^m$ в околі граничної енергії гальмівних γ -квантів 20 МеВ. Показано, що для реакцій $^{184}\text{W}(\gamma, \alpha)^{180m}\text{Hf}$ та $^{186}\text{W}(\gamma, \alpha)^{182m}\text{Hf}$ при граничних енергіях гальмівних

гамма-квантів вищих енергій гігантського дипольного резонансу теоретичні виходи значно нижчі експериментальних величин. Проте, якщо вважати, що альфа-частинка вилітає за допомогою напівпрямого механізму, а залишкові ядра $^{180,182}\text{Hf}$ зі збуджених станів розпадаються аналогічно, як і (γ, γ') -реакції, то вдається досягти непоганого узгодження між експериментальними та теоретичними виходами при моделюванні в коді TALYS-1.9.

У **четвертому розділі** описується дослідження ізомерних відношень перерізів та перерізів в реакціях з нейтронами, низько енергетичними протонами і дейтронами та альфа-частинками. Отримано перерізи реакції $^{175}\text{Lu}(\alpha, \alpha n)^{174m,g}\text{Lu}$ на мішенях з природного та збагаченого лютецію та після порівняння з модельованими розрахунками констатується можливий значний внесок нестатистичних механізмів для даної реакції. Автором отримано переріз реакції $^{93}\text{Nb}(p, n)^{93}\text{Mo}^m$ вперше при енергії протонів 3.85 MeV, яка належить до астрофізичного діапазону енергій протонів. При цьому енергія протонів лише на 200 keV перевищує порогову величину. Саврасовим А.М. розраховані експериментальні та теоретичні перерізи реакції $^{175}\text{Lu}(\alpha, 2n)^{177}\text{Ta}$. Вказується, що теоретичні перерізи для обох кодів для $(\alpha, 2n)$ -реакції вдвічі перевищують експериментальні величини, що може свідчити про значний вплив прямих механізмів.

П'ятий розділ дисертації присвячено комплексному вивченню уламків фотоділення важких ядер в реакціях з гальмівними гамма-квантами. Зокрема проведено дослідження фотоділення непарних трансуранових ядер ^{237}Np та ^{239}Pu при граничній енергії γ -квантів $E_{\text{гр}} = 18$ MeV. Автором показано, що при фотоділенні цих трансуранив, як і при фотоділенні ^{235}U середні кутові моменти важких уламків ділення приблизно у 3 рази вищі ніж легких та значно перевищують значень спінів ядер, які діляться. Дана обставина вказує на існування додаткового механізму формування кутового момента у важких фрагментах ділення. Виключенням є лише ^{135}Xe . Також проводилось вивчення середніх кутових моментів уламків фотоділення ^{237}Np та ^{241}Am гальмівними гамма-квантами з величинами граничних енергій 9.8 та 17 MeV. Не спостерігається зростання величини середніх кутових моментів з ростом масового числа для непарних по Z ядер ^{237}Np та ^{241}Am на відміну від парних ядер ^{235}U та ^{239}Pu . Дисертантом помічено, що має місце зниження середніх кутових моментів для ^{241}Am порівняно з ^{237}Np при $E_{\text{гр}} = 17$ MeV, 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. Автором проведено дослідження розпаду ^{177m}Lu , доведено наявність аномалії у величині коефіцієнта внутрішньої конверсії γ -лінії з енергією 55 keV, яка супроводжує розпад цього ізомерного стану. Розраховані також коефіцієнти внутрішньої конверсії для двох інших переходів з розпаду ^{177m}Lu . З використанням антикомptonівського спектрометра та схем збігів/антизбігів отримано експериментальні величини

коефіцієнтів внутрішньої конверсії для двох рідких, загальмованих E1- та E2-переходів, які супроводжують розпад ^{120}Sb . Для E1-переходу вперше виявлені аномалії в коефіцієнті внутрішньої конверсії. Дисертантом відмічається, що величина факторів загальмованості для цих γ -переходів є пороговою.

У **висновках** наводиться перелік основних наукових результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

Автореферат повністю відображає зміст дисертаційної роботи.

Вважаю, що **оригінальність та наукова новизна** результатів роботи Саврасова А.М. полягає у наступному:

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

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

Переріз реакції $^{93}\text{Nb}(p,n)^{93m}\text{Mo}$ при енергії протонів 3.85 MeV виміряно вперше. Проведено вимірювання ізомерних відношень перерізів реакцій $^{196}\text{Pt}(p,n)^{196m,g}\text{Au}$ та $^{198}\text{Pt}(p,n)^{198m,g}\text{Au}$ при енергії протонів 6.8 MeV та $^{120}\text{Sn}(p,n)^{120}\text{Sb}^{m,g}$ при енергії протонів 3.9 MeV. Висунуто гіпотезу про можливу присутність низькорозташованого, високоспінового рівня з енергією 330 keV в схемі збуджених рівнів ^{120}Sb та значний вплив нестатистичних механізмів для реакцій $^{196}\text{Pt}(p,n)^{196m,g}\text{Au}$ та $^{198}\text{Pt}(p,n)^{198m,g}\text{Au}$.

Для реакції $^{175}\text{Lu}(\alpha,\alpha n)^{174}\text{Lu}^{m,g}$ вперше проведено вимірювання перерізів та ізомерних відношень перерізів для певних значень енергії альфа-частинок в діапазоні 15.3-25.2 MeV. Показано, що при $E_\alpha=25,2$ MeV домінує статистичний механізм, а при інших енергіях можливий значний вплив структури збуджених станів.

Розрахунок перерізів реакцій $^{176}\text{Lu}(\alpha,p)^{179}\text{Hf}^{m2}$ та $^{175}\text{Lu}(\alpha,2n)^{177}\text{Ta}$ для альфа-частинок з енергією 26 MeV проведено вперше. Для ($\alpha,2n$)-реакції можливий значний внесок прямих механізмів. Для (α,p)-реакції внесок передрівноважного механізму на рівні 11%, а статистичного – 89 % дозволяє приблизно узгодити експериментальні та теоретичні перерізи.

Для альфа-частинок в енергетичному діапазоні 36-92 MeV вперше проведено вимірювання перерізів напрацювання $^{178}\text{Hf}^{m2}$ при опроміненні мішеней природного, металічного танталу.

З високою точністю виміряна енергія перших збуджених станів ядер ^{197}Au та ^{115}Sn .

Для γ -переходу з енергією 55 кеВ, який супроводжує розпад $^{177}\text{Lu}^m$ вперше показано, що розбіжності між експериментальними та теоретичними коефіцієнтами внутрішньої конверсії можна пояснити внеском внутрішньоядерної конверсії.

Практичне значення отриманих у дисертації результатів полягає у тому, що 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. 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.

Повнота викладу підтверджується тим, що наукові здобутки Саврасова А.М. пройшли апробацію на профільних вітчизняних та міжнародних конференціях по ядерній фізиці, результати представлені у провідних світових та вітчизняних журналах. Об'єм та якість наукових видань забезпечує повноту публічного викладу матеріалів дисертації. За темою докторської дисертації опубліковано 78 робіт, з яких 25 статей у фахових журналах та 53 роботи у тезах доповідей за матеріалами конференцій.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень та висновків, сформульованих у дисертації доводиться тим, що вони базуються на значному об'ємі експериментальних даних, отриманих та проаналізованих дисертантом за період з 2011 по 2021 рр. при виконанні наукових досліджень. Повнота та обґрунтованість наукових результатів та висновків досягається глибиною виконаних досліджень, використанням сучасних спектрометрів і програмних кодів для моделювання механізмів перебігу ядерних реакцій. Основні результати дисертаційного дослідження Саврасова А.М. пройшли ґрунтовне обговорення на наукових конференціях в Україні та за кордоном.

Дисертаційна робота Саврасова А.М. відповідає паспорту спеціальності 01.04.16-фізика ядра, елементарних частинок та високих енергій, напрям досліджень: прикладні та суміжні ядерно-фізичні дослідження.

Дисертаційна робота добре оформлена, матеріал подано чітко та зрозуміло. Разом з тим вважаю за потрібне зробити наступні зауваження:

1. В роботі використовуються різні теоретичні коди при моделюванні ядерних реакцій. Хотілося б щоб здобувач більш ретельно написав про них у своїй дисертації.

2. Здобувач в своїй роботі при розрахунку коефіцієнтів самопоглинання γ -квантів використовував як калібрувальні джерела, так і програмний пакет MCNP-4. Проте на нього дається лише посилання. Хотілося б щоб код MCNP-4 був більш детально описаний в роботі.
3. Дисертант в роботі при теоретичному моделюванні перерізів та виходів використовував відкриті програмні коди TALYS та EMPIRE з різними моделями для описання густин рівнів. Проте на них даються лише посилання. Бажано було б більш детально описати в роботі моделі густин рівнів, які використовуються в області неперервного спектру.
4. У дисертації поставлено 5 завдань, проте кількість висновків значно вища – 17.
5. У 3-му розділі при розрахунку потоку гальмівних γ -квантів Саврасов А.М використовував мішені танталу, лютетцію та гафнію і лише згадав про стандартні мішені в такому випадку – золото та мідь. Хотілося б щоб у дисертації були приведені також фрагменти гамма-спектрів опромінених стандартних мішеней золота та міді.

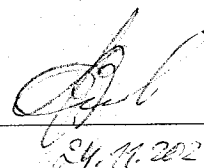
Проте вище перераховані зауваження не знижують загального позитивного враження від дисертаційної роботи Саврасова А.М. та не ставлять під сумнів наукові результати та значення його роботи для розвитку ядерної фізики та астрофізики. У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми, що полягає у отриманні нової експериментальної та теоретичної інформації щодо механізмів реакцій з гальмівними γ -квантами та легкими частинками. Вибір теми дослідження, проведений об'єм досліджень, їх повнота та обґрунтованість отриманих результатів свідчать про високу фахову підготовку дисертанта. Вважаю, що дисертаційна робота «Вивчення механізмів реакцій з гамма-квантами та легкими частинками за допомогою активаційного методу» цілком відповідає встановленим вимогам МОН України, а її автор, А.М. Саврасов заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок та високих енергій.

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
завідувач відділу ядерної фізики
Інституту фізики високих енергій і ядерної фізики
ННЦ ХФТІ НАН України



М.П. Дикий

Підпис д.ф.-м.н. Дикого М.П. засвідчую:
Вчений секретар ННЦ ХФТІ
НАН України, к.ф.-м.н.



Волобуєв О.В.

24.11.2021