

## 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

### Актуальність 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 досліджується слабо вивчена область фотоядерних реакцій з вильотом заряджених частинок та нейтронів при заселенні високоспінових ізомерних станів. Також зроблено значний внесок в отримання даних щодо середніх кутових моментів уламків фотоділення, особливо легких. Це може допомогти пролити світло на такі невирішені питання як одночасне існування двох каналів ділення: симетричного та асиметричного, динаміку процесу ділення для окремих каналів.

**Загальна характеристика структури та змісту роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 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** представлений огляд літературних даних за темою досліджень. Вказується, що залишаються слабо дослідженими реакції з заселенням ізомерних станів в ядрах  $^{179,180}\text{Hf}$  в реакціях з гальмівними  $\gamma$ -квантами як в області гігантського дипольного резонансу, так і при вищих енергіях. Наголошується на тому, що для фотоядерних реакцій з вильотом заряджених частинок очікується значний вклад нестатистичних механізмів. Підкреслюється обмеженість експериментальної інформації щодо  $(\gamma, n)$ -реакцій на р-ядерах,  $(\gamma, 3n)$ - та  $(\gamma, 4n)$ -реакцій на важких ядрах. Вказано на важливість подібних досліджень для розуміння механізмів перебігу ядерних реакцій і структури збуджених рівнів.

При огляді проведених робіт щодо ділення важких ядер підкреслюється важливість отримання інформації про середні кутові моменти фрагментів фотоділення для глибшого розуміння динаміки ділення для окремих каналів та вирішення ряду прикладних задач в ядерній та радіаційній фізиці.

Звертається увага на незначну кількість інформації про середні кутові моменти фрагментів фотоділення, особливо для легких уламків ніобію, броду та рубідію. Наголошується на тому, що дана робота є продовженням циклу попередніх досліджень.

У **другому розділі** аналізуються методи дослідження збуджених станів ядер та механізмів перебігу ядерних реакцій, наводяться характеристики спектроскопічних систем і методик вимірювання, які використовуються в дослідженнях. 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 5 сцинтиляційних детекторів з NaI(Tl). Окремі вимірювання проводились у режимі  $\gamma\gamma$ -збігів. Описано можливості програми Winspectrum для обробки рентгенівських і гамма-спектрів. В ній для описання форми піків використовувався гаусіан з експоненціальними "хвостами". Експоненціальна функція разом із квадратичною та східцеподібною також задіяні при моделюванні фону під гамма-піками. 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. Для реакцій з вильотом заряджених частинок після порівняння експериментальних та теоретичних даних показано домінування нестатистичних механізмів, а для  $(\gamma, p)$ -реакції на танталі досягнуто кількісне узгодження експериментальних та теоретичних середньозважених виходів. Продемонстрована перспективність напрацювання важливого для ядерної медицини  $^{177}\text{Lu}$ . Для реакцій  $^{181}\text{Ta}(\gamma, 4n)^{177}\text{Ta}$  при  $E_{\text{гр}} = 55 \text{ MeV}$  та  $^{180}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{178}\text{Ta}^{\text{m}}$  при  $E_{\text{гр}} = 20 \text{ MeV}$  отримано середньозважені виходи. Для зазначених реакцій відмічається кількісне узгодження експериментальних та теоретичних даних, розрахованих в рамках коду TALYS-1.9.

**Четвертий розділ** присвячено дослідженню перерізів та ізомерних відношень перерізів в реакціях з нейтронами, низькоенергетичними протонами і дейтронами та альфа-частинками. Зокрема на базі раніше розробленої моделі висувається гіпотеза про імовірне існування збудженого рівня в  $^{120}\text{Sb}$ . Його введення в схему дискретних збуджених рівнів  $^{120}\text{Sb}$  приводить до узгодження теоретичних та експериментальних ізомерних відношень перерізів реакції  $^{120}\text{Sn}(p, n)^{120}\text{Sb}^{\text{m}, \text{g}}$  при енергії протонів 3.9 MeV. Отримані перерізи напрацювання  $^{178}\text{Hf}^{\text{m}2}$  в реакціях з альфа-частинками на мішенях танталу в широкому діапазоні енергій альфа-частинок. Відмічається максимум у величині перерізу створення  $^{178}\text{Hf}^{\text{m}2}$  в околі енергії 60 MeV, що викликано внеском передрівноважного механізму. Досягнуто узгодження теоретичних та експериментальних величин перерізу реакції  $^{176}\text{Lu}(\alpha, p)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$  при  $E_{\alpha} = 26 \pm 1.2 \text{ MeV}$ . При цьому внесок статистичного механізму складає 89 % а передрівноважного – 11%.

У **п'ятому розділі** описується дослідження уламків фотоділення важких ядер в реакціях з гальмівними гамма-квантами. Зокрема проведено дослідження середніх кутових моментів ізотопів ксенону при фотоділенні  $^{238}\text{U}$  гальмівними гамма-квантами в діапазоні граничних енергій 6.25-18 MeV. Відмічається вплив оболонкових ефектів, що призводить до систематично нижчих величин середніх кутових моментів для  $^{135}\text{Xe}$  порівняно із  $^{133}\text{Xe}$ . Показано, що при фотоділенні  $^{235}\text{U}$  гальмівними гамма-квантами з граничною енергією 17 та 18 MeV середні кутові моменти важких уламків ділення приблизно у 3 рази вищі ніж легких. Констатується незначний вплив різних моделей густин рівнів та радіаційних силових функцій, які використовуються в відкритих кодах на величини середніх кутових моментів. Для середнього кутового моменту уламку  $^{135}\text{Xe}$  при фотоділенні  $^{233}\text{U}$  існує залежність його величини від  $(\gamma, \text{nf})$ -каналу ділення.

У **шостому розділі** розглядається дослідження збудження ізомерних та основних станів ядер в реакціях з гальмівними гамма-квантами, протонами, дейтронами та нейтронами. Показано, що в результаті вимірювань з використанням схеми збігів, з високою точністю енергія виміряна першого збудженого стану  $^{197}\text{Au}$ . Це дозволило уточнити граничну енергію атомно-ядерного процесу на цьому ядрі. Також після проведених вимірювань гамма-спектрів наведеної активності мішеней, опромінених з використанням фізичних установок ІЯД та різних спектрометрів, з високою точністю виміряна енергія першого збудженого стану  $^{115}\text{Sn}$ . Це дало можливість уточнити енергію бета-розпаду, який має найнижчу величину енергії серед усіх існуючих на сьогоднішній день.

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:

Експериментально доведено односторонній характер функції збудження реакції  $^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{\text{m}2}$  в області гігантського дипольного резонансу. Вперше отримано експериментальні величини ізомерних відношень виходів та середньозважених виходів при окремих значеннях енергії гальмівних гамма-квантів в ядрах  $^{179\text{m}2}\text{Hf}$ ,  $^{180\text{m}}\text{Hf}$ ,  $^{178\text{m}}\text{Ta}$ ,  $^{177}\text{Ta}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{178\text{m,g}}\text{Lu}$  та  $^{182\text{m}}\text{Hf}$ .

В реакціях з вильотом нейтронів та  $(\gamma, \gamma')$ -реакціях показано домінування статистичного механізму, а в реакціях з вильотом заряджених частинок при  $E_{\text{гр}} = 17.5$  та  $20$  MeV - нестатистичних процесів. Для  $(\gamma, p)$ -реакції та для реакцій на борі та берилії зі зростанням граничної енергії внесок статистичних та передрівноважених механізмів значно зростає і починає давати значний вклад у їх вихід.

Для реакції  $^{181}\text{Ta}(\gamma, p)^{180\text{m}}\text{Hf}$  отримано кількісне узгодження експериментальних та теоретичних виходів в широкому діапазоні величин граничної енергії при врахуванні ізоспінового розщеплення гігантського дипольного резонансу в рамках напівпрямого механізму.

Перерізи реакцій  $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$  та  $^{136}\text{Ce}(\gamma, n)^{135}\text{Ce}$  виміряні в області гігантського дипольного резонансу та встановлено статистичний механізм їх перебігу.

Вперше розраховано середні кутові моменти важких та легких уламків ділення, утворених внаслідок фотоділення трансуранових ядер  $^{237}\text{Np}$  та  $^{241}\text{Am}$  гальмівними  $\gamma$ -квантами з  $E_{\text{гр}} = 9.8$  та  $17$  MeV з виміряними ізомерними відношень виходів.

Відмічається відсутність зростання величин середніх кутових моментів з ростом масового числа для непарних по  $Z$  ядер  $^{237}\text{Np}$  та  $^{241}\text{Am}$  на відміну від парних ядер  $^{235}\text{U}$  та  $^{239}\text{Pu}$ . Показана особлива поведінка середнього кутового моменту для  $^{135}\text{Xe}$ .

Вперше отримано нові дані з ізомерних відношень виходів уламку  $^{97}\text{Nb}$ , що утворюється внаслідок фотоділення  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  гальмівним випромінюванням з граничними енергіями  $10.5$ ,  $12.0$  та  $18.0$  MeV.

При фотоподілі  $^{238}\text{U}$  гальмівними  $\gamma$ -квантами в широкому діапазоні граничних енергій вперше проведено експериментальне вимірювання ізомерних відношень виходів та розрахунок середніх кутових моментів ядер  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  та ядер  $^{95}\text{Nb}$ . З аналізу даних випливає, що на значення ізомерних відношень виходів та середніх кутових моментів первинних фрагментів ділення можливо впливають оболонкові ефекти та/чи відкриття  $(\gamma, nf)$ - і  $(\gamma, 2nf)$ -каналів поділу.

Виміряні вперше ізомерні відношення виходів важких та легких фрагментів як при фотоділенні  $^{235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  і  $^{239}\text{Pu}$  гальмівними  $\gamma$ -квантами з  $E_{\text{гр}} = 18$  MeV, так і при фотоділенні  $^{233}\text{U}$  гальмівними  $\gamma$ -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 середні кутові моменти розраховані для ядер  $^{133}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  – фрагментів фотоділення  $^{235}\text{U}$  для  $(\gamma, f)$ -,  $(\gamma, nf)$ -реакцій вперше при  $E_{\text{гр}} = 17$  MeV. Показано, що величини середніх кутових моментів слабо залежать від моделей радіаційних силових функцій і густин рівнів.

**Практичне значення отриманих у дисертації результатів полягає у оцінці можливостей напрацювання радіонуклідів з розрахованих перерізів чи виходів. В активаційному аналізі можливе використання даних з усіх досліджених реакцій. Інформація про середні кутові моменти фрагментів фотоподілу застосовна при створенні більш повної теорії ділення, а також використовуватиметься в ядерній енергетиці при розрахунках продуктів ділення на діючих АЕС.**

**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, підтверджується тим, що вони базуються на значному масиві результатів, отриманих та інтерпретованих дисертантом за період з 2011 по 2021 рр. при виконанні науково-дослідних робіт. Достовірність та обґрунтованість наукових результатів та висновків досягається глибиною проведених досліджень, використанням сучасного обладнання та сучасних програмних кодів для моделювання механізмів перебігу ядерних реакцій. Основні результати дисертаційного дослідження Саврасова А.М. пройшли всебічне обговорення на наукових конференціях.**

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.

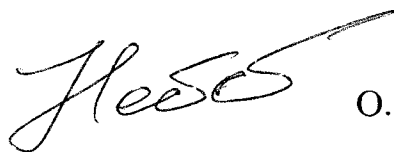
Дисертаційна робота добре оформлена, матеріал подано чітко і ясно. Разом з тим вважаю за потрібне зробити наступні зауваження:

1. В роботі використовуються умовні позначення, які не є загально відомими. Тому бажано було б додати «Перелік умовних позначень».
2. Дисертант в своїй роботі при моделюванні спектра гальмівний гамма-квантів використовує програмний пакет Geant4. Проте на нього дається лише посилання. Хотілося б, щоб код Geant4 був описаний в роботі більш детально.
3. На стор. 31 в розділі «Практичне значення отриманих результатів» стверджується, що «Експериментальні дані щодо величин енергії збудження перших збуджених рівнів ядер  $^{197}\text{Au}$  та  $^{115}\text{Sn}$  будуть корисними для окремих атомно-ядерних процесів та встановлення обмеження на масу нейтрино». Хотілось би отримати коментар з цього приводу, особливо, що стосується маси нейтрино.
4. В таблиці 3.10 на стор. 149 представлені середньозважені експериментальні виходи реакцій заселення  $^7\text{Be}$  при різних граничних енергіях гальмівних  $\gamma$ -квантів, якими опромінювались ядра  $^9\text{Be}$  та  $^{10}\text{B}$ . Порівняння експериментальних даних проводилось з результатами отриманими за допомогою кодів TALYS-1.9 та EMPIRE-3.2 на основі чого робились певні висновки. На мою думку застосування статистичних моделей для таких легких ядер є не дуже коректним.
5. На стор. 164-167 розділу 4 приводиться розгляд перерізу отримання реакції  $^{178}\text{Hf}(n,\gamma)^{179}\text{Hf}_{m2}$  на реакторних нейтронах з використанням модельованих відношень потоків. І далі приводиться порівняння отриманого перерізу з перерізом, який дає стандартний Cd-різницевий метод. Чому дисертант у своїй роботі не використав цей відомий метод?
6. В табл. 4.4. для реакції  $^{196}\text{Pt}(p,n)^{196m,g}\text{Au}$  при енергії протонів 5 MeV енергія збудження залишкового ядра складає лише 2.5 MeV. Це область дискретного спектру де не працюють статистичні моделі. Тут нема сенсу проводити моделювання для даної енергії протонів?

Але зроблені зауваження не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи Саврасова А.М. та не ставлять під сумнів наукові та практичні 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 реакцій з легкими частинками та  $\gamma$ -квантами. Була відсутня інформація щодо механізмів перебігу реакцій в біляпорогових областях енергій, в області гігантського дипольного резонансу та вище для окремих важливих ядер. Отримані нові дані про механізми перебігу реакцій з врахуванням структури збуджених станів ядер шляхом порівняння експериментальних та теоретичних результатів, модельованих у відкритих програмних кодах. Отримані відсутні дані щодо середніх кутових моментів окремих уламків ділення. Уточнено енергії збудження перших збуджених рівнів окремих ядер.

Дисертаційна робота Саврасова А.М. є закінченою науково-дослідною роботою та за обсягом і змістом, актуальністю, науковою новизною, практичним значенням, обґрунтованістю наукових положень, їх достовірністю і повнотою викладення у наукових фахових виданнях відповідає вимогам п. 9, 10, 12 і 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою КМУ від 24 липня 2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з постановами КМУ №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р. та 567 від 27.07.2016 р.), які висуваються до докторських дисертацій, а її автор Саврасов Андрій Миколайович заслуговує на 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  
Інституту теоретичної фізики  
ім. М. М. Боголюбова НАН України,  
старший науковий співробітник відділу  
теорії ядра і квантової теорії поля



О. В. Нестеров

Підпис доктора фіз.- мат. наук,  
Нестерова О. В. засвідчую,  
вчений секретар ІТФ НАНУ ім. М. М. Боголюбова,  
Перепелиця С. М.

