

В І Д Г У К

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук,
старшого наукового співробітника відділу теорії ядра і квантової теорії поля
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України
Нестерова Олександра Володимировича
на дисертаційну роботу
Майданюка Сергія Петровича
«Квантова теорія гальмівного випромінювання фотонів у ядерних процесах»,
поданої до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра та елементарних
частинок і високих енергій

Актуальність теми

Дисертаційна робота С. П. Майданюка «Квантова теорія гальмівного випромінювання фотонів у ядерних процесах» присвячена актуальній темі теоретичної та експериментальної ядерної фізики – дослідженню випромінювання фотонів в ядерних процесах та розробці нових підходів в межах квантової механіки для визначення перерізів реакцій та періодів розпадів ядер.

Як відомо, кожна ядерна реакція супроводжується випромінюванням гальмівних фотонів, які вивчаються вже впродовж довгого часу. У теоретичних дослідженнях найбільш глибоко розглянуто випромінювання таких фотонів у зіткненнях протонів з протонами та протонів з нейтронами, розсіянні протонів на ядрах та спонтанному поділі важких ядер. Також вивчалися процеси випромінювання фотонів для розсіяння альфа-частинок на ядрах, альфа- та протонного розпадів ядер, злитті ядер. Особливої уваги приділено дослідженням випромінювання фотонів у ядерно-ядерних зіткненнях при проміжних та високих енергіях. Практично для всіх зазначених вище реакцій випромінювання вивчалось також і експериментально, крім випромінювання при розпаді ядра з вильотом протона. Як правило, для опису реакцій кожного типу розроблялись свої моделі з використанням наближень, відповідних обраному діапазону енергій, тоді як не вистачало більш менш універсального формалізму, який би міг бути відтестованим на основі існуючої експериментальної інформації та пов'язав би спектри випромінювання фотонів у ядерних реакціях з параметрами взаємодій та механізмами, що існують у таких реакціях. Можна зазначити, що підхід до вивчення гальмівного випромінювання, викладений у дисертації С. П. Майданюка, в значній мірі відповідає зазначеному побажанням, що підтверджує її актуальність. Підсилює позитивне значення цієї роботи ще те, що тут представлено перші дослідження гальмівного випромінювання фотонів при розсіянні пі-мезонів (у пучках) на ядрах та вперше проведено початковий теоретичний аналіз випромінювання при потрійному поділі важких ядер.

Властивості ядерних систем неможливо досліджувати без розвитку нових методів з різними видами наближень та зусиль на максимальне підвищення

точності розрахунків. Гальмівне випромінювання фотонів виникає внаслідок змін у відносному русі ядерних об'єктів, тому точність його опису базується на тому, наскільки акуратно він описується з точки зору квантової механіки. Саме розробці одного такого методу високої точності присвячена друга частина дисертаційної роботи. Досягненням такого методу є визначення коефіцієнтів проникності бар'єрів при довільній енергії відносного руху в задачах розсіяння, розпадів, захоплення, а також застосування відомих тестів квантової механіки, що дозволяє перевірити досягнуту точність результату. Зазначене вказує на актуальність проведення такого роду досліджень та важливість результатів як для розв'язання задач ядерної фізики, так і для розв'язання квантовомеханічних задач в інших розділах фізики.

Новизна та практична цінність роботи

У процесі виконання дисертаційної роботи було отримано такі нові результати.

- Запропоновано новий теоретичний підхід до визначення деформацій ядер при альфа-розпаді на основі аналізу експериментальних спектрів випромінювання гальмівних фотонів.
- Вперше зроблена спроба теоретично проаналізовано випромінювання гальмівних фотонів у потрібному поділі важких ядер на його початковому етапі.
- Побудовано новий формалізм для розсіяння протонів на ядрах, що з єдиних позицій описує когерентне та некогерентне гальмівне випромінювання фотонів та оцінює внески цих типів випромінювання у повний спектр.
- Вперше оцінено гальмівне випромінювання фотонів у захопленні протонів ядрами у p -реакціях в зірках.
- Вперше визначено параметри потенціалу Вудса-Саксона для розсіяння протонів на ядрах на основі аналізу спектрів гальмівного випромінювання фотонів (у області високих енергій фотонів).
- Вперше оцінено гальмівне випромінювання фотонів при розсіянні пі-мезонів на ядрах;
- Розроблено новий квантовомеханічний підхід, названий методом багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ), для опису тунелювання при довільній енергії через одномірний бар'єр загальної форми.
- Використано метод БВВ для визначення проникливостей бар'єрів до задач квантової космології, спрямованих на аналіз еволюції Всесвіту на її першій стадії.
- Розроблено новий квантовомеханічний метод для розгляду тунелювання через одномірний бар'єр з дисипативною компонентою Альбрехта з визначенням коефіцієнтів проникності та відбиття.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у використанні теорії гальмівного випромінювання в аналізі як існуючої експериментальної

інформації випромінювання фотонів у ядерних реакціях, так і для розуміння найбільш перспективних напрямків майбутніх експериментів. Аналіз є корисним для більш глибокого розуміння природи випромінювання фотонів у ядерних реакціях, для більш акуратного визначення параметрів взаємодії ядер у таких реакціях, властивостей ядер (таких як деформації ядер та ін.). Метод БВВ може бути застосований для підвищення точності визначення параметрів взаємодії у розсіянні протонів на ядрах, розпадів ядер, більш глибокого розуміння їх злиття.

Достовірність результатів, викладених в дисертаційній роботі С. П. Майданюка, підтверджується їх хорошою узгодженістю з експериментальними даними, використанням та удосконаленням сучасних методів теорії розсіяння, квантової механіки, квантової електродинаміки і застосуванням найбільш точних методів числових розрахунків.

Дисертаційна робота складається зі вступу, тринадцяти розділів, висновків, списку використаних джерел з 471 найменувань та додатків. У перших восьми розділах викладено теорію гальмівного випромінювання у різних ядерних процесах. У першому розділі описано формалізм випромінювання при α -розпаді сферичних ядер. Тут викладено мультипольний і дипольний підходи до опису випромінювання фотонів, формалізм кутового розподілу випромінювання, запропоновано формулу ймовірності випромінювання для швидких оцінок. Показано точність визначення спектрів в описі експериментальних даних для ^{210}Po , ^{214}Po , ^{226}Ra і ^{244}Cm . У другому розділі до моделі попереднього розділу включено формалізм деформації ядра при α -розпаді. В такому підході проаналізовано вплив деформації ядра ^{226}Ra на форму спектра фотонів з порівнянням з експериментальними даними. У третьому розділі розвинуто формалізм гальмівного випромінювання фотонів при спонтанному поділі ядер. У такому підході оцінено внески випромінювання при вильоті легких, середніх і важких уламків при поділі ядра ^{252}Cf та повний спектр. У четвертому розділі узагальнено модель попереднього розділу до опису випромінювання на початковій стадії потрійного поділу з вильотом альфа частинки та двох важких уламків. Визначено залежність спектру випромінювання фотонів від геометрії та динаміки потрійного поділу ядра ^{252}Cf . У п'ятому розділі розвинуто формалізм гальмівного когерентного випромінювання фотонів при розсіянні протонів на ядрах та розпаді ядер з вильотом протона. Основна увага приділяється аналізу випромінювання електричного та магнітного типів. Проведено аналіз випромінювання у залежності від кута між напрямками випромінювання фотона та розсіяння (або вильоту) протона, також інтенсивність випромінювання у залежності від відносної відстані між протоном та ядром. Модель досить вдало описала експериментальні перерізи фотонів для розсіяння протонів на ядрах ^9Be , ^{12}C і ^{208}Pb при енергії протонів $T_{\text{lab}} = 140 \text{ MeV}$ та ядрах ^9C , ^{64}Cu і ^{107}Ag при енергії протонів $T_{\text{lab}} = 72 \text{ MeV}$. У шостому розділі формалізм попереднього розділу узагальнено через введення некогерентного випромінювання. На основі цього

підходу показано, що врахування некогерентного випромінювання спричиняє появу плато опуклої форми у спектрах фотонів, які мали форму логарифмічного типу для середніх енергій, які спадають до кінематичної межі енергій фотонів. Таким чином вдалося описати експериментальні дані випромінювання, отримані колаборацією TAPs для $p + {}^{208}\text{Pb}$ при енергіях протонів $T_p = 145$ MeV, $p + {}^{12}\text{C}$, $p + {}^{58}\text{Ni}$, $p + {}^{107}\text{Ag}$ та $p + {}^{197}\text{Au}$ при енергії протонів $T_p = 190$ MeV. У сьомому розділі за допомогою розробленої моделі гальмівного випромінювання, що враховує розподіл нуклонів у ядерній системі, виявлено слабку чутливість спектрів фотонів від такої структури у крайньому разі для важких ядер. У восьмому розділі представлено новий підхід до опису гальмівного випромінювання фотонів, яке супроводжує розсіяння піонів на ядрах. В рамках такого формалізму взаємодію між піонами та ядрами описано як в релятивістському підході (через формалізм Джонсона-Сетчлера), так і в нерелятивістському підході (через потенціал Вудса-Саксона оптичної моделі). Вказано на суттєву чутливість спектрів гальмівних фотонів в області високих енергій фотонів до параметрів потенціалу піон-ядерної взаємодії. У дев'ятому розділі сформульовано квантовомеханічний метод [названий методом багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ)] для визначення коефіцієнтів проникності та відбиття для реалістичних радіальних бар'єрів у задачах розпаду ядер з вильотом протона у сферично симетричному наближенні. Виконано порівняння з ВКБ-підходом та двухпотенціальним підходом на прикладі протонного розпаду ядра ${}^{157}\text{Ta}$. У десятому розділі розвинуто формалізм методу БВВ для процесу захоплення α -частинки ядром з метою отримання нової інформації про ймовірності злиття та параметри альфа-ядерного потенціалу. У такому підході визначено перерізи захоплення для ядер ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{44}\text{Ca}$ та ${}^{46}\text{Ca}$. Проведено порівняння з експериментальними даними. Оцінюється точність методу БВВ у порівнянні з ВКБ-підходом, підходом різкого обрізання кутових моментів, запропонованим Гласом і Моселом, формулою Вонга та підходом Хілла-Уілера. Запропоновано формулу ймовірностей злиття для швидких розрахунків. За допомогою запропонованої формули злиття пояснюється відмінність між перерізами $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ і $\alpha + {}^{44}\text{Ca}$ та даються передбачення перерізу захоплення $\alpha + {}^{46}\text{Ca}$. Розглянута роль ядерних деформацій у визначенні ймовірностей злиття для $\alpha + {}^{44}\text{Ca}$. У одинадцятому розділі досліджено захоплення α -частинки ядром за допомогою методу БВВ з додатковим врахуванням внеску від квантових потоків у ядерній області. Такий розгляд передбачає появу нових станів (названих квазізв'язаними), а також нового множника, що описує просторовий розподіл α -частинки у ядерній області. Проведено порівняння квазізв'язаних станів формалізму БВВ з квазістаціонарними станами теорії квазістаціонарних станів з комплексними енергіями. У дванадцятому розділі за допомогою метода БВВ розглянуті властивості тунелювання через одновимірний радіальний бар'єр, що використовуються у задачах квантової космології для аналізу еволюції Всесвіту на її першій стадії для моделі Фрідманна-Робертсона-Уолкера. Визначено ймовірності проходження пакету з внутрішньої ями назовні за рахунок

тунелювання, розраховано коефіцієнти проникності та відбиття. В останньому тринадцятому розділі запропоновано новий підхід до опису тунелювання у полі одномірного потенціалу Альбрехта з дисипативною компонентою, що визначається через хвильові пакети. За допомогою метода проаналізовано властивості впливу дисипації на тунелювання на прикладі захоплення α -частинки ядром ^{44}Ca з бар'єром прямокутної форми. Виявлено, що дисипативна компонента Альбрехта послаблює проникність бар'єра та вона має осциляційну залежність від енергії α -частинки.

Дисертація в цілому справляє хороше враження, але не позбавлена недоліків, на які, як я вважаю, необхідно звернути увагу.

1) Дисертаційна робота добре оформлена. Написана хорошою мовою. Але думки автора, на мій погляд, іноді сформульовані не зовсім чітко. При цьому, є досить багато друкарських помилок в формулах, особливо в перших розділах (дивись, наприклад, (1.29), (2.9), ...).

2) При застосуванні мультипольного розкладу автор не наводить оцінок можливого вкладу в кінцеві результати відкинутих доданків. Вважаю, що це треба було зробити незважаючи на те, що у більшості випадків було отримано хороше узгодження його теоретичних результатів з експериментальними.

3) В розділі 7 розвивається багатонуклонний формалізм для опису випромінювання гальмівних фотонів в ядерних реакціях. Не зовсім зрозуміло які модельні багаточастинкові функції застосовано для опису ядер що беруть участь у реакції. До того ж, було б цікаво, щоб автор порівняв свій формалізм з формалізмом розробленим Беєм (Baye) та Десковемонтом (Descouvemont) з співавторами (наприклад, див. роботи [Nucl. Phys. **A443**, 302 (1985); Nucl. Phys. **A529**, 467 (1991)]).

4) Метод фазових функцій виглядає альтернативним по відношенню до метода багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ) [див. книгу В. В. Бабікова «Метод фазових функцій в квантовій механіці» (Наука, Москва, 1976)]. Ця монографія була процитована у дисертації (див. цитування [269]). Цікаво було б провести хоча б якісне порівняння методів.

5) У розділі 11 обговорюється існування квазізв'язаних станів системи ядро + α -частинка. Природа цих станів не зовсім зрозуміла. Чи не є їх існування артефактом підходу БВВ?

6) Існує підхід “*capture barrier distributions*” для опису злиття ядер (див. наприклад, N. Rowley, et al., Phys. Rev. **C76**, 044612 (2007)). За допомогою цього підходу вдається досягти досить вдалого опису існуючих експериментальних перерізів злиття ядер і більш важких ніж альфа-частинка. Чи дозволить метод БВВ досягти хорошої точності в описі тих самих експериментальних даних злиття у порівнянні з вказаним підходом?

Вказані вище зауваження не знижують загальної позитивної оцінки досліджень, що отримані в дисертаційній роботі С. П. Майданюка, та не ставлять під сумнів наукові та практичні результати та значення цієї роботи для

розвитку ядерної фізики, квантової механіки. Автором дисертації проведені цікаві і оригінальні теоретичні дослідження. Положення і висновки дисертації повно і вчасно викладені у 40 наукових працях здобувача. Матеріали дисертаційної роботи неодноразово доповідалися на наукових конференціях в Україні та за кордоном. Результати можуть бути використані в інших наукових центрах і лабораторіях при дослідженні взаємодії атомних ядер, властивостей гальмівного випромінювання в ядерних процесах. Вважаю, що за актуальністю, обсягом проведених досліджень, рівнем та новизною отриманих результатів дисертаційна робота «Квантова теорія гальмівного випромінювання фотонів у ядерних процесах» цілком відповідає встановленим вимогам МОН України, що ставляться перед докторськими дисертаціями, а її автор, Майданюк Сергій Петрович, заслуговує присудження йому вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Офіційний опонент

Доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
відділу теорії ядра і квантової теорії поля
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України



О. В. Нестеров

20 січня 2021 р.

Підпис доктора фіз.-мат. наук О. В. Нестерова засвідчую:

Вчений секретар

Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України
кандидат фізико-математичних наук



С.М. Перепелиця