

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Майданюка Сергія Петровича

“Квантова теорія гальмівного випромінювання фотонів у ядерних процесах”,

що представлена до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико–математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра та елементарних частинок і високих енергій.

Гальмівні фотони, що випромінюються в ядерних реакціях, вивчалися впродовж довгого періоду та є традиційним напрямком досліджень у ядерній фізиці. Але намагання безпосередньо отримати нову інформацію про ядерні взаємодії та механізми реакцій із спостереження гальмівних фотонів є достатньо складною задачею і тому є цікавими і актуальними є дослідження в цій області.

Гальмівні фотони можна виміряти в експериментах. А саме, такі експериментальні дослідження проводилися при розсіянні протонів та α -частинок на ядрах, α -розпаду, спонтанного поділу, злиття, зіткнень важких іонів. Оскільки теоретичний підхід об’єднує ядерні і електромагнітні процеси, то аналіз гальмівних фотонів може давати більш багату інформацію, ніж дослідження без фотонів. І тут виникає проблема у значних труднощах, що виникають при реалізації такого напрямку досліджень. Таким чином, виникла потреба мати універсальний працездатний підхід. Саме таким дослідженням і присвячена основна частина дисертаційної роботи С. П. Майданюка.

Випромінювання фотонів виникає внаслідок прискореного руху зарядів, що можна описати методами квантової механіки. Розвитку квантово-механічного методу надвисокої точності для опису таких систем і була присвячена друга частина дисертації. Тому можна говорити про безсумнівну *актуальність* таких досліджень та важливість результатів дисертаційної роботи Майданюка С. П. як для фізики атомного ядра, ядерних реакцій, так і квантової механіки в цілому.

Достовірність результатів роботи С. П. Майданюка забезпечена використанням сучасних методів квантової механіки, квантової електродинаміки, теорії багаточастинкових систем, теорії розсіяння. Висновки досліджень в достатній мірі обґрунтовані та узгоджуються з експериментальними даними в тих випадках, коли такі існують.

Дисертація складається зі вступу, тринадцяти розділів, висновків, списку використаної літератури і одинадцяти додатків. У *першому розділі* детально описано нову модель гальмівного випромінювання фотонів, яке супроводжує α -розпад сферичних ядер. Продемонстровано високу ефективність моделі і точність розрахунку спектрів на порівнянні з існуючими експериментальними даними для ядер ^{210}Po , ^{214}Po , ^{226}Ra і ^{244}Cm . Окрему увагу приділено до різних

підходів при описі випромінювання фотонів (мультипольний і дипольний формалізми, розкладання за сферичними хвилями). На основі кутового формалізму випромінювання пояснена різниця між експериментальними даними для ядра ^{210}Po , що отримані різними групами для кутів 25° та 90° (між напрямками вильоту α -частинки та фотону).

У *другому розділі* викладено новий формалізм опису гальмівного випромінювання фотонів, що супроводжує α -розпад деформованих ядер. На прикладі аналізу такого випромінювання для ядра ^{226}Ra , де ядро раніше розглядалося сферичним, модель за рахунок врахування деформації ядра покращує згоду між теорією й експериментом. .

У *третьому розділі* сформульовано нову модель гальмівного випромінювання фотонів, яке супроводжує спонтанний поділ ядер. Тут, при визначенні хвильових функцій потенціал взаємодії між фрагментом з довільним масовим і зарядовим числами та залишковим ядром визначається на основі стандартної фолдинг-процедури. Оцінено внески випромінювання фотонів, що виникає при вильоті легких, середніх і важких фрагментів, які формуються при поділі ^{252}Cf . Результати по визначенню повних спектрів випромінювання фотонів при спонтанному поділі ^{252}Cf по цій моделі виявляються у гарній згоді з існуючими експериментальними даними.

У *четвертому розділі* узагальнена модель, що викладена у попередньому розділі, застосована до опису гальмівного випромінювання при потрійному поділі важких ядер. Вперше виявлено, що форма спектру випромінювання суттєво залежить від геометрії та динаміки проходження потрійного поділу. На такій основі, при порівнянні розрахунків спектру з експериментальними даними для ядра ^{252}Cf запропоновано сценарій динаміки проходження потрійного поділу.

У *п'ятому розділі* викладено нову модель когерентного гальмівного випромінювання фотонів при протонному розпаді ядер і розсіянні протонів на ядрах у діапазоні від найменших до проміжних енергій. Основними елементами моделі є спіновий формалізм, потенціальний підхід до опису взаємодії протонів з ядрами, включення магнітного випромінювання в оператор випромінювання фотонів. На основі моделі досліджено роль електричного та магнітного типів випромінювання, залежність від кута (між напрямками випромінювання фотона та вильоту або розсіяння протона), випромінювання з області тунелювання. Модель успішно описує експериментальні дані випромінювання при розсіянні протонів на ядрах ^9Be , ^{12}C і ^{208}Pb при енергії протонів $T_{\text{lab}} = 140$ MeV (для енергій фотонів до 120 MeV), та ядрах ^9C , ^{64}Cu і ^{107}Ag при енергії протонів $T_{\text{lab}} = 72$ MeV (для енергій фотонів до 60 MeV).

У *шостому розділі* сформульовано новий формалізм некогерентного гальмівного випромінювання при розсіянні протонів на ядрах. На основі моделі проаналізовано властивості випромінювання для $p + ^{208}\text{Pb}$ при енергіях протонів $T_p = 140$ та 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. Показано, що розрахунки когерентного випромінювання дають спектри логарифмічного типу, тоді як врахування некогерентного

випромінювання спричиняє появу плато опуклої форми у спектрах фотонів для середніх енергій (що спадає до кінематичної межі енергій фотонів). Це підтверджується через гарне співпадіння розрахунків у практично всій області енергій фотонів з даними для $p + {}^{208}\text{Pb}$ при $T_p=145$ MeV та даними для $p + {}^{12}\text{C}$, $p + {}^{58}\text{Ni}$, $p + {}^{107}\text{Ag}$ та $p + {}^{197}\text{Au}$ при $T_p=190$ MeV (такий результат покращує розрахунки фотонів для $p + {}^{208}\text{Pb}$ у попередньому розділі). Тобто, роль динаміки нуклонів у ядрі та їх зв'язок зі спіном розсіяного протона є суттєвими. Визначено параметри протон-ядерного потенціалу розсіяння.

У *сьомому розділі* проведено дослідження питання, чи можна побачити багатонуклонну структуру α -розпадаючого ядра у експериментальних спектрах випромінювання фотонів, що супроводжує α -розпад цього ядра. Визначено, що після включення формалізму нуклонної структури у модель розрахункові спектри випромінювання змінюється дуже слабо для більшості α -розпадних ядер (такий ефект практично не помітний для всіх експериментальних даних). Однак, помітні зміни відбуваються для ядра ${}^{106}\text{Te}$ навіть для енергії випромінених фотонів до 1 MeV. З метою виявити ядро, для якого спектр випромінювання є більш чутливим до нуклонної структури, знайдено наступні тенденції: (а) напрямок до ядер з меншим числом Z , (б) напрямок до ядер з більшим Q -значенням.

У *восьмому розділі* викладено результати перших досліджень випромінювання гальмівних фотонів при розсіянні піонів (у пучках) на ядрах. Розроблено новий формалізм гальмівних фотонів, що випромінюються у цій реакції. Взаємодія між піонами і ядрами описана у двох підходах — релятивістському (потенціал Кісслінгера відповідно до формалізму Джонсона-Сатчлера) та нерелятивістському (потенціал Вудса-Саксона на основі оптичної моделі). Встановлено, що випромінювання фотонів, сформоване за рахунок ядерної частини потенціалу Джонсона-Сатчлера, вносить істотний внесок у повний спектр. Результати для піон-ядерного розсіяння показують, що спектри гальмівного випромінювання є чутливими до параметрів ядерної взаємодії в області високих енергій фотонів.

У *дев'ятому розділі* представлено новий метод багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ) для визначення ширин розпаду ядра з вильотом протона у сферично симетричному наближенні та з реалістичним радіальним бар'єром. Проаналізовано основні властивості метода, продемонстровано тести і точність, дано порівняння з ВКБ-наближенням, двопотенціальним підходом у визначенні проникностей бар'єрів та періодів.

У *десятому розділі* узагальнено метод БВВ для опису захоплення α -частинок ядрами, на його основі проаналізовано захоплення α -частинок ядрами ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{44}\text{Ca}$ та ${}^{46}\text{Ca}$. Порівнюючи перерізи захоплення, отримані за допомогою методу БВВ, з експериментальними даними, визначено нові ймовірності злиття α -частинки з ядрами ${}^{40}\text{Ca}$ і ${}^{44}\text{Ca}$, нові параметри α -ядерного потенціалу. Показано, що включення процесів злиття у формалізм суттєво покращує узгодження розрахунків перерізів захоплення з експериментальними даними. У розрахунках різних характеристик для α -захоплення ядрами ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{44}\text{Ca}$

проаналізовано ефективність (точність, тести, збіжність розрахунків) методу БВВ у порівнянні з підходом різкого обрізання кутових моментів, запропонованим Гласом і Моселом, ВКБ-підходом, формулою Вонга та підходом Хілла-Уілера. Знайдено нову формулу ймовірностей злиття. За допомогою цієї формули пояснюється відмінність між перерізами $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ і $\alpha + {}^{44}\text{Ca}$, запропоновано перерізи $\alpha + {}^{46}\text{Ca}$ для експериментального підтвердження.

У *одинадцятomu розділі* узагальнено метод БВВ для захоплення α -частинки ядром через врахування внеску від квантових процесів у внутрішній ядерній області. Виявлено нові стани (т. зв. квазізв'язані), що описують найбільш ймовірне формування складеного ядра під час цієї реакції. У формалізмі БВВ єдиним шляхом описуються тунелювання через бар'єр та осциляції у внутрішній області ядра. Тут також виникає один новий множник, що описує просторовий розподіл α -частинки у внутрішній ядерній області. Всі такі властивості методу БВВ оцінено для захоплення $\alpha + {}^{44}\text{Ca}$. Виконано порівняння методу БВВ у визначенні квазізв'язаних станів з теорією квазістаціонарних станів з комплексними енергіями у визначенні резонансних та квазістаціонарних станів.

У *дванадцятomu розділі* метод БВВ застосовано для визначення ймовірності проходження пакету з внутрішньої ями назовні з його тунелюванням через одновимірний радіальний бар'єр довільної форми, що використовуються у задачах квантової космології в аналізі еволюції Всесвіту на першій стадії. Показано високу точність визначення проникнення бар'єрів у таких задачах за допомогою метода БВВ, продемонстровано узгодження розрахунків та тестів (для розрахунків обрано модель Фрідмана-Робертсона-Уолкера з квантуванням та позитивною космологічною сталою, компонентою випромінювання та компонентою узагальненого газу Чаплигіна).

У *тринадцятomu розділі* розроблено новий метод знаходження хвильової функції для квантових систем у полі одномірного потенціалу Альбрехта з дисипативною компонентою, що визначається на основі хвильових пакетів. Метод та властивості впливу дисипації такого типу проаналізовано на прикладі захоплення α -частинки ядром ${}^{44}\text{Ca}$.

Вважаю, що *оригінальність* та *наукова новизна* результатів роботи С. П. Майданюка полягає у наступному.

- Розроблено новий метод визначення деформації ядер під час їх альфа-розпаду з аналізу експериментальних спектрів випромінювання фотонів, що супроводжує такий розпад;
- На основі розробленої моделі випромінювання фотонів при спонтанному поділі ядер оцінено випромінювання, що виникає від вильоту уламків;
- Вперше теоретично досліджено гальмівне випромінювання при потрійному поділі, виявлено суттєву залежність спектрів фотонів від геометрії та динаміки поділу;
- Розроблено нову модель випромінювання фотонів при розсіянні протонів на ядрах, що у єдиному підході описує когерентне та некогерентне випромінювання фотонів;

- Отримано перші оцінки випромінювання фотонів при захопленні протонів ядрами (p -реакція) у зірках;
- Для розсіяння протонів на ядрах виявлено, що найбільш сильна залежність спектрів випромінювання від параметрів потенціалу взаємодії знаходиться у області високих енергій фотонів, що дозволяє знаходити значення параметрів цих потенціалів;
- Проведено перші дослідження випромінювання фотонів у розсіянні π -мезонів (у пучках) на ядрах, побудовано модель, знайдено сильну залежність спектрів випромінювання від піон-ядерної взаємодії;
- Побудовано формалізм методу багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ) для тунелювання через одномірний бар'єр загальної форми з визначенням амплітуд хвильової функції, коефіцієнтів проникності і відбиття, введено тести квантової механіки для перевірок таких характеристик;
- Вперше застосовано метод БВВ до задач квантової космології, де аналізується тунелювання;
- Розроблено новий метод визначення хвильової функції для тунелювання через одновимірний бар'єр з дисипативною компонентою Альбрехта та визначення коефіцієнтів проникності і відбиття.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у наступному. Теорія гальмівного випромінювання може бути використана в аналізі експериментальної інформації випромінювання фотонів у ядерних реакціях для більш глибокого розуміння механізмів реакцій, властивостей взаємодії. Метод БВВ може бути застосований для підвищення точності визначення параметрів ядерної взаємодії у розсіянні протонів на ядрах, α -частинок на ядрах, різних видів розпадів ядер, для більш глибокого розуміння злиття на основі аналізу існуючих експериментальних даних для цих реакцій. Така інформація полягає в основі ядерно-фізичних даних.

Наукові здобутки С. П. Майданюка пройшли апробацію на профільних вітчизняних та міжнародних конференціях по фізиці ядерних реакцій, їх результати представлені у провідних світових журналах. Об'єм та якість наукових видань, забезпечує повноту публічного викладу матеріалу дисертації. За темою докторської дисертації опубліковано 40 робіт, з яких 28 статей у фахових журналах, 7 робіт за матеріалами конференцій у реферованих вітчизняних та рецензованих журналах, 4 глави та одну книгу.

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

1. Некогерентне випромінювання вивчалось іншими авторами у ядерній фізиці. Так, Бертч (G. F. Bertsch) зі співавторами розвинули модель ВМЕ (Boltzmann master equation model) для зіткнень важких іонів (див. роботу [Phys. Rev. **C35**, 1720 (1987)] та цитування). Див., також роботи Накаями. Разом з тим не розкрито на належному рівні, чи має переваги теорія С. П. Майданюка у порівнянні з тими підходами. Чим саме запропонована теорія більш ефективна?

2. Метод БВВ у визначенні квазізв'язаних станів у α -захопленні не використовує комплексних енергій, на відміну до теорії квазістаціонарних станів з комплексними енергіями в описі квазістаціонарних станів [наприклад, див. книгу А.И. Базь, Я.Б. Зельдович, А.М. Переломов «Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике» (Наука, Москва, 1971)]. Чим саме можна пояснити таку різницю, та наявність таких станів навіть при пружному розсіянні методом БВВ? Слід розкрити більш ясно метод БВВ у порівнянні з цією теорією у визначенні таких станів.
3. Суттєвий прогрес у розвитку методів квантової механіки було досягнуто Б. М. Захар'євим зі співавторами [наприклад, див. книгу Б.М. Захар'єв, А.О. Сузько, «Потенциалы и квантовое рассеяние» (Москва, 1985)]. Чи є переваги метода БВВ у порівнянні з такими методами?
4. Існують дослідження Гурвіца (S. A. Gurvitz) зі співавторами, в яких також описане тунелювання та внутрішні осциляції в описі розпаду ядер [наприклад, див. роботу [Phys. Rev. **A69**, 042705 (2004)] та посилання]. Чим саме відрізняється формалізм метода БВВ від таких підходів та чи має він перспективи якщо вони є? Слід також вказати найбільш перспективні підходи інших авторів по цій темі.

Але зроблені зауваження не впливають на загальне добре враження від дисертаційної роботи С. П. Майданюка та не ставлять під сумнів наукові та практичні результати та значення його роботи для розвитку ядерної фізики, квантової механіки, астрофізики. Вибір теми дослідження, проведений об'єм досліджень, їх комплексність та обґрунтованість отриманих результатів свідчать про високу фахову підготовку дисертанта. Вважаю, що дисертаційна робота «Квантова теорія гальмівного випромінювання фотонів у ядерних процесах» цілком відповідає встановленим вимогам МОН України, а її автор, Майданюк С. П. заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Доктор фіз.-мат. наук,
професор кафедри фізики металів
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка, професор


 М. Єжов

Відгук проф. Єжова С.М. за результатами:
проф. фахівця Каша Ч.А.