

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фіз.-мат. наук,
професора **Симулика Володимира Михайловича**
на дисертаційну роботу **Майданюка Сергія Петровича**
«Квантова теорія гальмівного випромінювання фотонів у ядерних процесах»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

У дисертаційній роботі Майданюка Сергія Петровича «Квантова теорія гальмівного випромінювання фотонів у ядерних процесах» суттєво розвинуто квантові моделі гальмівного випромінювання фотонів у ядерних реакціях та процесах, а також декілька основних допоміжних методів, які застосовуються у відповідних теоретичних дослідженнях. Автор аргументовано переконує у необхідності розробки самоузгодженої, перевіреної експериментально моделі гальмівного випромінювання фотонів у ядерній фізиці та методів квантової механіки надвисокої точності для визначення перерізів реакцій і періодів розпадів ядер та представляє значний особистий доробок у вказаних напрямках. Дисертація приємно вражає кількістю та якістю отриманих результатів.

Актуальність обраної теми не викликає жодних сумнівів. Теоретичні дослідження гальмівного випромінювання необхідні для пояснення та аналізу перш за все наявних експериментальних даних, отриманих при розсіянні альфа-частинок на ядрах, альфа-розпаді важких ядер, злитті ядер, а також у процесах випромінювання фотонів у ядерно-ядерних зіткненнях при проміжних та високих енергіях. Не менш важливим є розвиток існуючих теоретичних моделей. Даний напрямок активно обговорюється у сучасній науковій літературі, особливо у провідних міжнародних журналах та монографіях у відомих міжнародних видавництвах. Автор посилається у дисертації на чотири сотні таких публікацій при аналізі лише найближчих до власних досліджень результатів. Окрім того, розроблювані автором моделі опису гальмівного випромінювання, застосовуються ним не лише для вдалого опису експериментів, але й для поглиблення розуміння ядерної взаємодії, властивостей ядер та фізики реакцій. У перспективі даний напрямок важливий для існуючої ядерної енергетики та пошуку нових джерел енергії.

Характеристика структури і змісту дисертації. Дисертація дещо відрізняється від традиційної побудови наявністю великої кількості розділів. У іншому, як зазвичай, робота складається зі вступу, тринадцяти розділів, висновків, одинадцяти додатків і списку використаних джерел, що включає 471 найменування. Обсяг дисертації — 566 стор. (основна частина — 283 стор.), включаючи 78 рисунків та 17 таблиць.

Тринадцять розділів не часто зустрічаються у дисертаціях, але такий вибір автором структури роботи є виправданим. Кожен з розділів представляє собою розгляд окремої проблеми, містить один основний результат, який полягає у певному вирішенні задачі, яка стояла перед автором, а також кілька супутніх результатів меншої ваги. Наявність тринадцяти розділів є наслідком того факту, що дисертаційна робота містить не меншу кількість важливих результатів.

Додатки автор використовує по суті, тобто для відображення деталей доведень. Таким чином, матеріал представлений у основних розділах є більш компактним і легшим для розуміння та аналізу.

Отже, за певним винятком великої кількості розділів, виклад матеріалу не відрізняється від стандартного.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, приведено огляд літератури, сформульована мета та відображена наукова новизна і практичне цінність отриманих результатів, описана структура дисертаційного дослідження, визначено особистий внесок здобувача, представлено зв'язок роботи з науковою діяльністю інституту, а також приведена апробація дисертації.

Перші два розділи містять розроблений автором формалізм розрахунків параметрів гальмівного випромінювання фотонів, яке супроводжує альфа-розпад сферичних та деформованих ядер. Кожен з розділів 1–8 має за основу рівняння типу Шредінгера зі специфікацією гамільтоніана та оператора ядерної взаємодії.

У розділі 1 для досліджень сферичних ядер автор використовує дипольне наближення. На цій основі розроблено кутову квантову модель, де при опису хвильової функції фотонів враховувались подальші корекції й використовувався реалістичний потенціал взаємодії між α -частинкою і ядром, запропонований іншими співробітниками ІЯД НАН України. У рамках такої моделі в дисертації реалізовано два підходи, засновані на різних розкладах хвильової функції фотонів: мультипольному і розкладанні по сферичних хвилях. У другому підході досягнуто хорошого узгодження з новими експериментальними даними для ядер ^{210}Po , ^{214}Po , ^{226}Ra . Показано переваги мультипольного підходу у коректності і точності опису, особливо у розрахунках абсолютних значень ймовірностей випромінювання без нормування на експериментальні дані. Відмічено, що аналіз всіх особливостей мультипольного підходу потребує подальших досліджень. Результати обчислень представлено у вигляді формул для ймовірностей гальмівного випромінювання при α -розпаді, 8 рисунків з графіками і двох таблиць.

У розділі 2 розроблений у розділі 1 формалізм опису гальмівного випромінювання фотонів застосовано до альфа-розпаду деформованих ядер. Гамільтоніан деформованого ядра представлено як суму гамільтоніана сферичного ядра та корекції що враховує квадрупольну деформацію. Покращено згоду між теорією й експериментом для ядра ^{226}Ra . Результати подано у вигляді формул для ймовірностей гальмівного випромінювання при α -розпаді і одного рисунку з графіками.

У розділі 3 побудовано модель гальмівного випромінювання фотонів, яке супроводжує спонтанний поділ ядер. Формалізм включає динамічну деформацію ядра за допомогою стандартного фолдінг-підходу. Запропоновано потенціал взаємодії між двома фрагментами з довільними масовими і зарядовими числами, на які ділиться ядро. Для розрахунку хвильової функції фотонів застосовується розклад за сферичними хвилями. Розрахунки порівнюються з існуючими у літературі експериментальними даними по вимірах ймовірностей гальмівного випромінювання фотонів при спонтанному поділі ядра ^{252}Cf . Результати представлено у вигляді відповідних формул і дев'яти рисунків з графіками.

У розділі 4 вперше описано випромінювання гальмівних фотонів при потрійному поділі важких ядер. Підхід автора є подальшим розвитком моделі гальмівного випромінювання при поділі ядер. Запропоновано удосконалення фолдінг-підходу, який розвинуто у попередньому розділі для спонтанного поділу. Для покращення опису експериментальних даних розроблено спеціальний сценарій динаміки потрійного поділу. На прикладі ядра ^{252}Cf досягнуто згоди між розрахованими спектрами фотонів та експериментальними даними для енергій фотонів до 500 кеВ. Результати представлено як відповідні формули, так і як п'ять рисунків з графіками.

Розділ 5 представляє модель гальмівного випромінювання фотонів, що супроводжує протонний розпад ядер і зіткнення протонів з ядрами у діапазоні майже від нуля до проміжних енергій. Модель базується на рівнянні Паулі і включає спіновий формалізм та потенціальний підхід до опису взаємодії протонів з ядрами, а оператор випромінювання має магнітну компоненту. Досліджено магнітне випромінювання, що входить у повний спектр при протонному розпаді ядра ^{146}Tm . Показано, що запропонована модель успішно описує випромінювання фотонів проміжних енергій при розсіянні протонів на ядрах ^9Be , ^{12}C і ^{208}Pb при енергії протонів $T_{\text{lab}} = 140$ МеВ для енергій фотонів до 120 МеВ, та ядрах ^9C , ^{64}Cu і ^{107}Ag при енергії протонів $T_{\text{lab}} = 72$ МеВ для енергій фотонів до 60 МеВ. Відповідні формули доповнюють дев'ять рисунків з графіками і одна таблиця.

Розділі 6 присвячено моделі гальмівного випромінювання фотонів при розсіянні протонів на ядрах при низьких та проміжних енергіях фотонів. Розвинуто формалізм гальмівного випромінювання у ядерних реакціях представлений у попередньому розділі.

Оператор випромінювання фотонів записано з врахуванням багатонуклонного розгляду ядра-мішені. Використовується багатонуклонний гамільтоніан розсіяння протона на ядрі. Розрахунки успішно порівняно з експериментальними даними, зокрема з даними групи Клайтона та ін. для процесу $p + {}^{208}\text{Pb}$ при $E_p = 145$ MeV, а також з даними колаборації TAPS для $p + {}^{12}\text{C}$, $p + {}^{58}\text{Ni}$, $p + {}^{107}\text{Ag}$ та $p + {}^{197}\text{Au}$ при $E_p = 190$ MeV. Результуючі формули доповнюють вісім рисунків з графіками.

У розділі 7 вивчалась можливість здобуття інформації про багатонуклонну структуру ядер при альфа-розпаді з аналізу гальмівного випромінювання. Проведено дослідження багатонуклонної структури α -розпадаючогося ядра у експериментальних спектрах гальмівного випромінювання фотонів, що супроводжує такий α -розпад. Розроблено нову модель гальмівного випромінювання, яка враховує розподіл нуклонів у α -розпадаючійся ядерній системі. Узагальнено формалізм випромінювання розділу 6 для системи α -частинка та ядро. Як і у кількох попередніх розділах важливу роль відіграє належний вибір хвильової функції. Ймовірність випромінювання фотонів у α -розпаді визначається відповідно до формалізму розділів 1 та 2, але тепер вона залежить від розподілу нуклонів у α частинці (розподіл нуклонів в ядрі не враховувався). Виявлено достатньо слабкий прояв багатонуклонних ефектів у спектрах гальмівного випромінювання при α розпаді. Результати у вигляді формул доповнюються трьома рисунками з графіками.

У розділі 8 представлено модель гальмівного випромінювання фотонів при розсіянні заряджених π^+ -мезонів (у пучках) на ядрах. Досліджувалося припущення, що такі фотони можуть бути використані в якості незалежного тесту не кулонівської (ядерної) частини піон-ядерної взаємодії. Викладено формалізм гальмівних фотонів у такій реакції. Некулонівська взаємодія між піонами і ядрами визначається на основі двох ядерних потенціалів Кісслінгера з доповненням Джонсона-Сатчлера та Вудса-Саксона. Формалізм випромінювання фотонів у розсіянні піонів на ядрах визначається подібно розділу 5 для протон-ядерного розсіяння, але хвильові функції розраховуються чисельно. На основі моделі встановлено, що випромінювання фотонів, сформоване за рахунок ядерної частини потенціалу Джонсона-Сатчлера, вносить істотний внесок у повний спектр. Таким чином, доведено, що ядерна взаємодія відіграє важливу роль у формуванні випромінювання гальмівних фотонів. Таку взаємодію можна вивчати експериментально за допомогою вимірювань гальмівних фотонів. Продемонстровано, що спектри гальмівного випромінювання є чутливими до параметрів кулонівської і ядерної взаємодій в області високих енергій фотонів. Зроблено висновок, що вимірювання гальмівного випромінювання фотонів може бути інструментом для отримання нової інформації про взаємодію між піонами та ядрами. Формулярна частина доповнена двома рисунками з графіками.

У розділі 9 розпочато представлення допоміжних (до основної задачі дисертації) методів та формалізмів. Введено у розгляд квантовий метод багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ) для визначення ширин розпаду ядра з вильотом протона у сферично симетричному наближенні та з реалістичним радіальним бар'єром. Підхід БВВ дає точний аналітичний розв'язок хвильової функції, та коефіцієнтів проникності. Така властивість не має особливого значення для бар'єра прямокутної форми, але вона робить метод БВВ застосовним до задач з реалістичними бар'єрами (які можна апроксимувати через довільне скінчене число прямокутних сходинок). Формалізм використано у задачі розпаду ядра з вильотом протона. Результати представлено у вигляді формул, двох рисунків з графіками та таблиці.

У розділі 10 викладено узагальнення методу багаторазових внутрішніх відбиттів для опису захоплення α -частинок ядрами ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{44}\text{Ca}$ та ${}^{46}\text{Ca}$. Показано, що метод БВВ є найбільш точним в описі експериментальних даних α -захоплення у порівнянні з іншими методами. Результати представлено у вигляді формул, дев'яти рисунків з графіками та двох таблиць.

У розділі 11 досліджено квазізв'язані стани складеної системи при захопленні α -частинок ядрами. Розглянуто захоплення α -частинки ядром за допомогою метода БВВ з додатковим включенням внутрішньої межі у початку координат при $r=0$. На прикладі

захоплення $\alpha+^{44}\text{Ca}$ показано переваги формалізму методу БВВ у визначенні квазізв'язаних станів у порівнянні з теорією квазістаціонарних станів з комплексними енергіями (КСКЕ) у визначенні квазістаціонарних станів у α -захопленні. Результати представлено у вигляді формул, семи рисунків з графіками та трьох таблиць.

Розділ 12 представляє застосування методу БВВ до деяких задач квантової космології. Метод БВВ апробовано для визначення ймовірності проходження пакету з внутрішньої ями назовні з його тунелюванням через одномірний радіальний бар'єр довільної форми у задачах, що досліджуються у квантовій космології на основі тунелювання. У космологію уведено коефіцієнт, що описує ймовірність проходження пакету з внутрішньої ями назовні з його тунелюванням через бар'єр та враховує внутрішні осциляції пакету у ямі (його названо коефіцієнтом проходження). Коефіцієнт розділено на коефіцієнт проникності та інший новий коефіцієнт, який характеризує осциляторну поведінку пакету у внутрішній ямі (його названо коефіцієнтом осциляцій). Метод застосовано для дослідження властивостей пакету, що описує еволюцію Всесвіту на першому етапі у закритій моделі Фрідманна-Робертсона-Уолкера з квантуванням та позитивною космологічною сталою, компонентою випромінювання та компонентою узагальненого газу Чаплигіна. Результати розрахунків представлено у вигляді відповідних формул та графіках у п'яти рисунках.

У **розділі 13** розглянуто тунелювання крізь бар'єри Альбрехта з дисипативними компонентами. Тут побудовано новий метод знаходження хвильової функції для тунелювання частинки з масою m у полі одномірного потенціалу Альбрехта з дисипативною компонентою, що визначається на основі хвильових пакетів. Задача основана на одномірному рівнянні Шредінгера зі специфічним гамільтоніаном. На прикладі захоплення α -частинки ядром ^{44}Ca проаналізовано загальні властивості дисипативних ефектів при тунелюванні. Виявлено, що включення дисипативної компоненти у потенціал Альбрехта послаблює проникність бар'єра, вплив таких дисипативних сил на тунелювання має осциляційний характер у залежності від енергії ^{44}Ca α частинки. Результуючі формули доповнені графіками, представленими на рисунку.

Основні висновки та наукова новизна дисертаційної роботи.

Побудовано нову узагальнену модель гальмівного випромінювання фотонів в ядерних процесах з застосуванням до α -розпаду сферичних та деформованих ядер, розпадів ядер з вильотом протонів, розсіяння протонів та π -мезонів на ядрах, спонтанного та потрійного поділу ядер.

Запропонована модель дозволяє вперше вивчати експериментально деформації ядер у розпадах через аналіз спектрів випромінювання фотонів.

Розроблений метод провідної гармоніки суттєво підвищує точність розрахунків матричних елементів випромінювання у задачах, де виникають труднощі у збіжності розрахунків при визначенні спектрів (наприклад, у задачах поділу важких ядер).

Досліджено динаміку та геометрію вильоту фрагментів при потрійному поділу ядер через аналіз гальмівних фотонів.

Вперше пояснено суттєву роль некогерентного випромінювання фотонів при розсіянні протонів на ядрах та відсутність такого випромінювання при альфа-розпадах ядер (що підтверджується експериментами).

Започатковано вивчення багатонуклонної структури ядер у альфа-розпадах на основі аналізу гальмівних фотонів.

Досліджено випромінювання гальмівних фотонів при розсіянні піонів (у пучках) на ядрах.

Побудовано квантово-механічний метод багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ) для опису одномірного тунелювання під бар'єром загальної форми та проходження над ним, а також для досліджень гальмівного випромінювання фотонів в різних задіяних тут ядерних процесах: процесів вильоту протона з ядра (протонний розпад), α -розпаду, α -захоплення, дослідження особливостей злиття ядер.

Розроблено новий метод визначення хвильової функції для тунелювання частинки у полі одномірного потенціалу Альбрехта з дисипативною компонентою, що визначається на основі хвильових пакетів. Проаналізовано властивості дисипативних ефектів при тунелюванні на прикладі захоплення α -частинки ядром ^{44}Ca .

Висновки відображають основні наукові та практичні результати дисертації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій. Запропоновані у дисертації моделі і методи розроблені на основі сучасних досягнень теоретичної фізики і коректного математичного апарату. Усі отримані результати порівняні і добре узгоджуються з відомими експериментальними даними, а у кількох випадках відсутності експериментів – з теоретичними дослідженнями інших наукових груп. Теоретичні побудови та розрахунки, що виносяться на захист, отримані на основі досліджень, виконаних в Інституті ядерних досліджень НАН України, пройшли всебічне обговорення у наукових групах, на семінарах відділів та інституту. Усі отримані результати апробовані на конференціях в Україні й за кордоном та опубліковані у вітчизняних і міжнародних наукових виданнях, що входять у міжнародні науково-метричні бази, у тому числі – у провідних міжнародних журналах з фізики. Роботи Майданюка С.П. цитуються іншими незалежними авторами. Таким чином, достовірність отриманих результатів не викликає сумнівів.

Практичне значення отриманих результатів. Методи досліджень гальмівного випромінювання, які розвинуті у дисертації, можуть бути використані для вивчення ядерних реакцій у надрах Сонця, фізичних процесів у сонячній короні (зрозуміло, що і для інших зірок), моніторингу та аналізу стабільності зірок. Універсальна модель гальмівного випромінювання може бути застосована до аналізу експериментальної інформації про випромінювання гальмівних фотонів у ядерних реакціях та вивчення природи ядерної матерії на сучасних ядерних установках. Широке застосування до задач дослідження ядерних реакцій, періодів напіврозпадів, перерізів захоплення може мати розроблений у дисертації метод багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ). Після застосування такого методу, існуючі теоретичні значення перерізів реакцій, періодів напіврозпадів, деформацій ядер та інших характеристик ядер у базах ядерно-фізичних даних будуть скоректовані. Запропонований метод розрахунку хвильової функції у задачах тунелювання з дисипативними компонентами може бути застосований для розв'язання ще не вирішених задач тунелювання з дисипацією у актуальних задачах ядерної фізики.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях. Результати дисертаційної роботи у повному обсягу викладено у сорока публікаціях, з яких двадцять вісім у відомих реферованих журналах, сім – за матеріалами конференцій у реферованих (рецензованих) вітчизняних та закордонних журналах, чотири глави у колективних монографіях, а також у одна книга (без співавторів). Текст дисертації повністю базується на опублікованих працях. Слід відмітити як якісну, так і кількісну апробацію результатів у журнальних статтях і на міжнародних наукових конференціях в Україні та за її межами.

Однак є і **ДЕЯКІ ЗАУВАЖЕННЯ**.

1. Дисертацію можна було зробити меншою за об'ємом.
2. Автор називає свої дослідження в цілому «ною квантовою теорією гальмівного випромінювання». Слова «нова теорія» дещо дивно звучать серед результатів кваліфікаційної роботи (дисертації). Більш вдалим може бути «нова універсальна модель гальмівного випромінювання», «узагальнена модель». Слово «модель» тут здається більш доречним. Порівняймо «загальна теорія відносності», «квантова теорія поля», «релятивістська теорія поля» і «стандартна модель».
3. Дисертаційна робота містить три, на перший погляд, різні теми: нову узагальнену модель гальмівного випромінювання фотонів в ядерних процесах (розділи 1–8), побудову квантово-механічного методу багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ) для опису одномірного тунелювання під бар'єром загальної форми та проходження над ним (розділи 9–12) і розділ 13, де розроблено новий метод визначення хвильової

функції для тунелювання частинки у полі одновимірного потенціалу Альбрехта з дисипативною компонентою. Було б доречно приділити більше уваги поясненню зв'язку цих частин дисертації між собою, інакше такий зв'язок зрозумілий лише вузьким спеціалістам.

4. У твердженні автора «квантова механіка включає лише 12 форм потенціалів, для яких існують точні аналітичні розв'язки хвильових функцій в одновимірній та сферично-симетричній задачах» слід апелювати до конкретного рівняння, а не до квантової механіки у цілому. У відомій статті описано дев'ять формулювань квантової механіки і цей список не є повним. Навіть якщо зупинитись/звизитись на рівнянні Шредінгера, то це рівняння може бути як для однокомпонентної хвильової функції, так і для багатокомпонентних хвильових функцій, що збільшує кількість форм потенціалів.
5. Згадка про можливість досліджень на основі узагальненої моделі гальмівного випромінювання ядерних реакцій у надрах Сонця, процесів у сонячній короні, стабільності Сонця та зірок, «проситься» у представлення актуальності та практичного застосування результатів дисертації. Відсутність такої згадки є певним упущенням.

Помічені описки, опечатки, русизми.

Стор. 38. *розкладаннях, розкладанні* – розкладах, розкладі.

Стор. 40. *Загальне рішення* – Загальний розв'язок.

Стор. 187. Помилка програми Word.

Стор. 259. *кожної межі, відносно межі* – межі.

Стор. 306. *перетворення енергії колективному руху*.

Стор. 328. *осциляції во внутрішній області ядра*.

Проте висловлені зауваження не є вирішальними і жодним чином не применшують основних здобутків дисертанта. Загалом дисертація є завершеною науковою роботою, цілісним науковим дослідженням, яке містить цілу низку нових наукових результатів.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертаційної роботи.

З матеріалів, представлених у дисертаційній роботі, можна зробити висновок, що С.П. Майданюк є кваліфікованим науковцем, який досконало володіє сучасними методами теоретичної фізики.

Підсумовуючи вищевикладене, вважаю, що дисертаційна робота «Квантова теорія гальмівного випромінювання фотонів у ядерних процесах» повністю відповідає вимогам Міністерства Освіти і Науки України, що ставляться перед докторськими дисертаціями, а її автор, Майданюк Сергій Петрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Офіційний опонент –
доктор фізико-математичних наук, професор,
провідний науковий співробітник
відділу фотоядерних процесів
Інституту електронної фізики НАН України

В.М. Симулик

15 січня 2021 р.

Підпис доктора фіз.-мат. наук В.М. Симулика засвідчую:

Вчений секретар
Інституту електронної фізики НАН України
кандидат хімічних наук



Л.Г. Романова