

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Інституту ядерних досліджень НАН України
доктору фізико-математичних наук,
завідувачу відділу теорії ядра
Інституту ядерних досліджень НАН України
Іванюку Федору Олексійовичу

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата фізико-математичних наук, старшого дослідника,
старшого наукового співробітника відділу фізики важких іонів

Інституту ядерних досліджень НАН України

Улещенка Володимира Васильовича

на дисертацію

Шаульського Костянтина Андрійовича

«Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях»,
подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань “10 Природничі науки”
за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”

Актуальність теми дисертації.

Представлена дисертаційна робота Шаульського К.А. «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях» присвячена дослідженням взаємодії ядер і нуклонів, що перебувають у певному, досить екстремальному середовищі. В роботі розробляються нові моделі для опису процесів, що відбуваються за участі атомних ядер в білих карликах чи нейтронних зірках, де можуть створюватись середовища з характеристиками, що сильно відрізняються від земних.

В наш час дослідженням таких астрономічних об'єктів та процесів, що можуть мати місце в них, присвячена велика кількість наукових публікацій. На сьогодні розроблено вже досить багато моделей для опису структури атомних ядер у екстремальних умовах всередині зір. Використовуються різні підходи як релятивістські так і нерелятивістські, будуються як потенціальні моделі так моделі квантово-польового типу, з врахуванням ефектів сильної гравітації і без врахування таких ефектів.

Однією з задач представленої роботи є вивчення процесів тунелювання через потенціальний бар'єр без застосування квазікласичного наближення, у підході, що спирається на метод багаторазових внутрішніх відбиттів. Такий підхід є повністю квантовомеханічним і тому більш точним, а значить повинен

дати достовірніші результати. Ще однією задачею є вивчення гальмівного випромінювання. Йдеться про модифікацію моделей, розроблених для опису гальмівного випромінювання в земних умовах, і оцінку впливу середовища зір на процеси взаємодії ядер та на гальмівне випромінювання, що їх супроводжує. Крім впливу на спектри гальмівного випромінювання, щільне середовище змінюватиме також і характеристики внутрішньої структури ядер, що в нього занурені, і ці зміни також є предметом досліджень дисертації.

Безсумнівно, представлена робота відноситься до актуальної тематики.

1. Оцінка структури дисертації, її наукового рівня та достовірності положень, що в ній сформульовані

Представлена дисертаційна робота має 113 сторінок друкованого тексту, містить структурно оформлені анотації українською та англійською мовами, вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел з 76 найменувань, а також один додаток з вказаними окремо працями, що ілюструють публікацію та апробацію основних результатів, представлених у дисертації. Список публікацій з виписаним особистим внеском дисертанта до кожної з них наведений також відразу після анотацій, перед загальним вступом.

Структура роботи і викладення матеріалу є логічними і зрозумілими

У **вступі** обґрунтовується актуальність тематики досліджень, представлено їх загальну мету та сформульовано конкретні завдання, описано застосовані методи, винесено основні результати і підкреслено їх наукову новизну та значення для подальших досліджень.

У **першому розділі** детально описуються виконані дослідження пікноядерних реакцій на основі методу багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ).

Описується сам метод БВВ, його застосування для розрахунку коефіцієнтів проникнення і відбиття при тунелюванні через бар'єр довільної форми, зв'язок даних коефіцієнтів з ймовірністю злиття ядер. Формулюються тести для перевірки розрахунків.

З використанням методу БВВ розраховуються характеристики інтенсивності пікноядерних реакцій, тобто реакцій злиття ядер у кристалічній ґратці щільного середовища компактних зір. Окремо враховується плазмове екранування в таких реакціях. Аналізується застосовність БВВ-методу до розгляду систем і процесів, що розглядаються, порівнюються умови застосовності для методу БВВ і квазікласичного наближення, показується ширша застосовність БВВ порівняно з квазікласичним наближенням. Наводяться результати розрахунків інтенсивності пікноядерних реакцій, які, як

виявляється істотно відрізняються від квазікласичних розрахунків, тобто істотно їх покращують.

Другий розділ присвячено опису гальмівного випромінювання при зіткненні протонів з дейтронами. Будується модель, що описує випромінювання гама-кванта у зіткненні з врахуванням ядерної взаємодії між нуклонами, наявними в системі.

Хвильова функція системи протон-дейтрон будується як у двокластерному так і трикластерному підході. В побудованій моделі параметр, який характеризує внутрішню структуру дейтрона, має прямий вплив на спектр гальмівного випромінювання, а тому при певних умовах з аналізу такого спектру можна отримати відомості про структуру найлегшого ядра.

Побудована модель успішно застосовується до опису наявних експериментальних даних для гальмівного випромінювання у дейтрон-протонних зіткненнях з енергією пучка 145 MeV.

Третій розділ присвячено дослідженню впливу середовища компактних зір на характеристики структури ядер та на процеси їх зіткнень з випромінюванням гальмівних гама-квантів.

На основі моделі деформованих осциляторних оболонок будується модель, яка за допомогою умови рівноваги тиску речовини та гравітації, ефективно враховує вплив середовища зорі. Тиск розраховується за допомогою рівняння стану. Результати виконаних розрахунків показують, що у нейтронних зорях поправка до енергії зв'язку ядра є істотною, і існує гранична глибина, глибше якої ядра вже не можуть існувати як зв'язані системи. Крім цього у середовищі нейтронної зірки істотно зменшуються характеристичні радіуси ядер. У білих карликах даним ефектом можна знехтувати.

У цьому розділі також представлено дослідження впливу середовища зорі на спектр гальмівного випромінювання. Показано, що як і у випадку впливу на енергію зв'язку, в середовищі білого карлика не відмічається помітних ефектів. В той самий час вплив середовища нейтронної зірки є драматичним: у певних енергетичних діапазонах переріз випромінювання при зіткненні нуклона з ядром може зрости на порядки. Цікаво відмітити, що велику роль у випромінюванні гальмівних фотонів у таких умовах грає магнітний момент нуклона. Тому випромінювання при зіткненнях з нейтронами також є вартим уваги.

У **висновках** підбито підсумки всіх трьох викладених досліджень, підкреслено наукову новизну отриманих результатів, а також можливості їх застосування у подальших дослідженнях.

Високий науковий рівень та достовірність положень, що сформульовані в роботі забезпечуються використанням сучасних теоретичних моделей, сучасної

комп'ютерної техніки, що дозволяє виконати розрахунки необхідної точності у прийнятих наближеннях, і підтверджуються апробацією результатів на 5-ти наукових конференціях, публікацією результатів у 5-ти престижних наукових журналах з анонімним рецензуванням.

2. Наукова новизна одержаних результатів

Вперше застосовано метод багаторазових внутрішніх відбиттів для опису пікноядерних реакцій між ізотопами карбону в кристалічних ґратках компактних зір. Розроблена модель дозволяє рахувати інтенсивності пікноядерних реакцій при енергіях взаємодії ($E \leq 3,5$ MeV), при яких квазікласичне наближення не може бути коректно застосоване.

Розроблено нову модель випромінювання гальмівних фотонів при розсіянні протона на дейтроні при енергіях відносного руху між протоном та дейтроном від нульових до 1,0 GeV. Вперше такий процес досліджено у кластерному підході в описі розсіяння, а саме розроблено дво- та три-кластерний варіанти моделі. Виявлено, що переріз гальмівного випромінювання має залежність від параметрів кластерної моделі. Потенційно, модель дозволяє з аналізу спектрів гальмівного випромінювання визначити значення осциляторної довжини – параметра, що характеризує будову дейтрона. Модель застосовано до аналізу наявних експериментальних даних випромінювання, які отримано на циклотроні Університету Індіана у Блумінгтоні, США (cyclotron at the Indiana University Cyclotron Facility, IUCF) при енергії пучка дейтронів 145 MeV.

Розроблено нову мікроскопічну модель, що описує властивості парно-парних атомних ядер в щільному середовищі компактних зір – білих карликів та нейтронних зір. Новим елементом моделі, що спирається на модель деформованих осциляторних оболонок, є механізм, розроблений на основі політропного рівняння стану для виродженого електронного та нейтронного газу, що дозволяє описати вплив зоряного середовища на ядро у мікроскопічному підході. Модель дозволяє розрахувати енергії зв'язку, розміри і деформації ядер, що перебувають у середовищі виродженого електронного або нейтронного газу.

3. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Отримані в роботі результати мають значення перш за все для подальшого розвитку теорії ядерної взаємодії, для побудови моделей, за якими можна буде розраховувати кількісні характеристики ядер, що перебувають у екстремальному середовищі, характеристики процесів взаємодії ядер в таких середовищах. На сьогодні поки що не видно можливості, щоб розраховані в роботі величини проявили себе в даних сучасних експериментів, але

поступовий розвиток моделей опису взаємодії ядер та нуклонів в середовищах нейтронних зір та білих карликів, по перше покращує якісне розуміння процесів, що можуть мати місце всередині таких астрономічних об'єктів, а по друге може таки з часом привести до розрахунку ефектів, які будуть видимі в астрономічних спостереженнях.

Також, показаний в роботі вплив параметрів моделі опису дейтрона на спектр гальмівного випромінювання протона в полі дейтрона, може потенційно бути використаний для уточнення характеристик внутрішньої структури дейтрона.

4. Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях.

Основні положення досліджень, виконаних в рамках дисертаційної роботи, викладені у 5 статтях у високо рейтингових наукових виданнях відповідної проблематики. Чотири статті опубліковані у журналах першого-другого квартилю, одна – у журналі четвертого квартилю. Статті досить повно висвітлюють наукові результати, покладені в основу дисертації та шляхи їх отримання.

Наукові публікації відповідають вимогам пп. 8-9 “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого Постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. з наступними змінами.

Також положення роботи пройшли апробацію на 5 наукових конференціях, що підтверджується публікацією 5 тез доповідей у відповідних збірниках.

5. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Хоча дослідження належать до досить невивченої області, де важко перевірити кількісні характеристики, постановка конкретних завдань для роботи могла б бути аргументованішою. Наприклад, при розгляді пікноядерних реакцій потенціал взаємодії між ядрами в середовищі компактної зорі вибирається без жодного обґрунтування. Просто декларується, що в розрахунках буде використовуватись потенціал такої-то форми з такими-то параметрами (стор. 23-24). Не зайвою була б все таки якась аргументація, що вибраний потенціал може адекватно описувати взаємодію між ядрами в умовах, що розглядаються.
2. Аналіз розсіяння протона на дейтроні у розділі 2.3 є неповним. Недостатньо при такому широкому діапазоні енергій відносного руху обмежуватись

аналізом тільки найнижчих кутових моментів. З ростом енергії вклад хвиль з вищим J зростатиме істотно.

3. Можна відмітити недосконалість термінології, що використовується в роботі. Наприклад використаний термін «швидкість реакції», мабуть, краще було б замінити на «інтенсивність реакції».
4. Є зауваження до представлення матеріалу в тексті дисертації. Наведення в багаточисленних таблицях результатів розрахунків з точністю до 8 чи навіть 15 значущих цифр, в той час як наведені числа відрізняються вже в першому-другому знаку, є відверто зайвим і тільки утруднює сприйняття. В той самий час при описі тунелювання через бар'єр довільної форми, поділі цього бар'єру на велику кількість коротких прямокутних відрізків з наскрізною нумерацією, а всієї області взаємодії на окремі зони, бракує рисунку з наочною ілюстрацією такого потенціалу, чітким означенням відповідних зон, відображенням потоків, що падають, відбиваються, тунелюють. Особливо коли в тексті обговорюються вказівники «вліво», «вправо».

Трапляються також в поданні матеріалу і помилки. Наприклад, на стор. 27 перше речення в розділі 1.3.3 стверджує, що «коефіцієнти проникності та відбиття збільшуються монотонно з енергією налітаючого ядра». При цьому, названі коефіцієнти, очевидно, не можуть збільшуватись одночасно, адже відповідно до нормування хвильової функції їх сума має дорівнювати одиниці, що й записано раніше у формулі (1.13) на сторінці 20. Або, у таблиці 1.1 на сторінці 26 одиниця вимірювання максимальної глибини потенціальної ями $V_{\min}$ позначена як «В», хоча явно має бути «MeV».

Всі наведені зауваження не є критичними і не змінюють загальну позитивну оцінку роботи.

6. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертація оформлена відповідно до вимог, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40, містить всі необхідні структурні елементи, написана державною мовою, усі використані матеріали, результати і висновки мають відповідні літературні посилання. Ознаки порушення автором вимог академічної доброчесності не спостерігаються.

7. Загальний висновок.

Представлена дисертація є самостійною, цілісною і завершеною науковою працею з коректною постановкою задачі, описом методів досліджень, та викладенням проміжних і остаточних результатів. Робота відзначається

належним науковим рівнем, а сформульовані в ній положення є обґрунтованими і достовірними. Зміст дисертації відповідає поставленим меті і завданням дослідження. Отримані результати достатньо значущі, мають наукову новизну, відносяться до актуальної тематики, пройшли необхідну апробацію та опубліковані належним чином.

Вважаю, що дисертаційна робота Шаульського Костянтина Андрійовича на тему «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях» відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах) затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року № 261 з наступними змінами; пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 з наступними змінами, а її автор – Шаульський Костянтин Андрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент:

к. ф.-м. н., ст. досл.,
старший науковий співробітник
відділу фізики важких іонів
Інституту ядерних досліджень
НАН України



Володимир УЛЕЩЕНКО