

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Інституту ядерних досліджень НАН України
старшому науковому співробітнику,
завідувачу відділу теорії ядра
Інституту ядерних досліджень НАН України
Федору Олексійовичу Іванюку

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

кандидата фіз.-мат. наук,
наукового співробітника НДЛ «Ядерної спектроскопії»
фізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Горбаченко Олександра Миколайовича
на дисертацію Шаульського Костянтина Андрійовича на тему:
«Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань “10 Природничі науки”
за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”

1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота К.А. Шаульського присвячена дослідженню ядерних процесів та властивостей ядер таких як пікноядерні реакції у кристалічних ґрадках та гальмівне випромінювання в надщільному середовищі компактних зірок де ядра перебувають в екстремальних умовах. Дослідження властивостей ядерних сил є дуже актуальним напрямком на сьогодні, де застосовується багато різних моделей для опису ядерних процесів. Дисертація присвячена дослідженню цих сил в екстремальних умовах, а також можливості дослідити ядерні сили через гальмівне випромінювання. Розуміння поведінки ядерних сил в екстремальних умовах може як покращити наше розуміння в еволюції зірок, так і виявитися корисним в експериментах на Землі при високих енергіях зіткнень. Тому дослідження, представлені в дисертації є актуальними.

2. Оцінка структури дисертації, її наукового рівня та обґрунтованості/достовірності положень, що в ній сформульовані

Дисертаційна робота складається з 110 сторінок, з яких на основну частину припадає 107 сторінок (5 сторінок додаток зі списком публікацій здобувача). Структура дисертації: анотація українською та англійською мовами, список публікацій здобувача за темою дисертації, вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел, що складається з 76 джерел, та одного додатку

зі списком публікацій здобувача. В дисертації представлені 30 рисунків та 7 таблиць з результатами розрахунків за розробленими моделями.

У **вступі** дисертації коротко описано обґрунтування теми наукового дослідження, виділено мету, завдання, об'єкт та предмет, методи наукового дослідження, наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дослідження, присвяченого розробці теоретичних моделей для опису ядерних процесів та ядерних процесів, а саме швидкостей пікноядерних реакцій для ізотопів карбону ${}^A\text{C} + {}^A\text{C}$, де A – парне число від 10 до 24 та спектрів гальмівного випромінювання від протонів в компактних зірках (нейтронних зорях та білих карликах).

У **першому розділі** дисертації представлено застосування методу багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ) для опису пікноядерних реакцій – реакцій, що відбуваються при малих низьких температурах в щільних кристалічних структурах компактних зірок таких як нейтронні зорі та білі карлики. Продемонстровані розрахунки із застосуванням методу БВВ для оцінки швидкостей пікноядерних реакцій для ізотопів карбону та ймовірності їх злиття. Наведені результати порівняні з попередніми дослідженнями, які використовували квазікласичне ВКБ-наближення для розрахунків. Представлені переваги методу БВВ над ВКБ-наближенням.

Другий розділ дисертації присвячений дослідженню розсіяння протона на дейтроні. Для цього використано дво- та три-кластерну моделі для опису системи протон-дейтрон. Проведені розрахунки з різними нуклон-нуклонними потенціалами та продемонстровано їх вплив на хвильові функції дейтрону та системи протон-дейтрон. Також досліджено гальмівне випромінювання та визначений його переріз та вплив «структури дейтрона» на переріз гальмівного випромінювання. Проведені розрахунки спектрів гальмівного випромінювання при різних енергіях протонів у двохкластерній моделі протон-дейтрон та представлено порівняння розрахунків з наявними експериментальними даними де спостерігається узгодження розрахунків в межах похибок експериментальних даних.

У **третьому розділі** розглянуто властивості та поведінку ядер в надщільному середовищі компактних зірок таких як білі карлики та нейтронні зорі. Використовувалась модель деформованих осциляторних оболонок, що була модифікована з використанням політропного рівняння стану для опису матерії компактної зорі. Наведено аргументацію такого підходу і результати розрахунків. Показано, що використані моделі для опису компактних зірок (на основі рівнянь Лейна-Емдена та Толмена-Оппенгеймера-Волкова) дають розраховані параметри зірок що узгоджуються зі спостережуваними зорями. З використанням даної моделі, розраховано вплив матерії зорі на енергію

зв'язку ядер при зануренні всередину. Представлено вплив моделювання матерії зірок шляхом теорії збурень на спектри гальмівного випромінювання у процесах розсіяння протонів, нейтронів на ядрах всередині компактних зірок.

У **висновках** описані результати кожного розділу, виписано теоретичні та практичні результати для майбутніх досліджень. Перераховано результати та переваги розроблених моделей.

Дослідження проведені на високому рівні, з перевіркою розроблених моделей з наявними експериментальними даними та з іншими теоретичними моделями та їх розрахунками. Результати наукового дослідження підтверджуються публікацією в п'ятьох наукових журналах, що входять у базу SCOPUS (з квантилями 3-Q1, 1-Q2, 1-Q4(українське видання)) та апробацією на п'яти наукових конференціях з відповідними публікаціями тез та матеріалами конференцій.

3. Наукова новизна одержаних результатів

В дисертації вперше досліджено пікноядерні реакції в щільному середовищі компактних зірок без застосування квазікласичних наближень за методом багаторазових внутрішніх відбиттів.

Побудовано модель розсіяння протона на дейтроні на основі дво- та три-кластерних моделей, що дозволяє вперше оцінити вплив структури дейтрона та параметрів ядерних сил на переріз гальмівного випромінювання.

Представлена нова теоретична модель на основі деформованих осциляторних оболонок дозволяє оцінити вплив надщільної зоряної матерії на енергію зв'язку атомних ядер. Це новий підхід, розроблений на теоретичному апараті квантової механіки, що дозволяє точно і швидко описати властивість атомних ядер в середовищі надщільних компактних зірок. Вперше досліджено вплив матерії зірок на гальмівне випромінювання при процесах розсіяння нуклонів(протонів, нейтронів) на ядрах що входять в склад компактних зірок.

4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Побудована модель на основі методу багаторазових внутрішніх відбиттів(БВВ) не має обмежень, які має ВКБ-наближення, яке не використовується при глибоко підбар'єрних або навпаки, при надбар'єрних енергіях. Метод БВВ дозволяє розрахувати коефіцієнт проникності через бар'єр та ймовірності злиття на всьому діапазоні енергій ядер при пікноядерних реакціях.

Використовуючи дво- та три-кластерну модель для процесу розсіяння протона на дейтроні є можливість дослідити вплив структури дейтрону на гальмівне випромінювання. Порівнюючи розраховані перерізи з

експериментальними даними, можна уточнити модель нуклон-нуклонних сил та структуру дейтрона.

Опис властивостей ядер в середовищі компактних зірок за допомогою моделі деформованих осциляторних оболонок є новим підходом, який також враховує вплив щільного середовища на ядра. Побудована модель є простою для узагальнень та дозволяє розрахувати енергію зв'язку атомних ядер в компактних зорях.

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

Здобутки наукових досліджень викладені в п'яти статтях у престижних наукових закордонних та українських виданнях, що індексуються наукометричною базою SCOPUS (з квантилями 3-Q1, 1-Q2, 1-Q4(українське видання)). Статті повністю висвітлюють наукові результати та методи їх отримані в дисертації. Наукові публікації відповідають вимогам п. 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 № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р.

6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В дисертаційній роботі представлені результати чисельних розрахунків в таблицях, які містять більше п'яти значущих цифр після коми. Так як результати стосуються чисельних розрахунків, то незрозуміло навіщо представляти результати з такою точністю, бо така кількість знаків після коми негативно впливає на сприйняття результатів.
2. В першому розділі було б доцільно проілюструвати рисунком як працює метод багаторазових внутрішніх відбиттів із зазначенням всіх використовуваних ключових характеристик, таких як: відстані $r_{\min}, r_{\max}, r_{\text{cap}}$ (точки повороту та захоплення) та кількості розбиттів сходинок у потенціалі взаємодії. Вказано, що ці параметри критично впливають на результати розрахунків за методом БВВ, але це не продемонстровано. І чи не буде варіювання цих параметрів просто підгонкою для узгодження розрахунків з експериментальними даними?
3. В другому розділі незрозуміло чому на рисунку 2.3 існує неузгодженість у поведінці хвильової функції дейтрона при розрахунку у оболонковій та кластерній моделі на великих відстанях, на рисунку 2.4 з'являється провал у форм-факторі від хвильового числа та наведено багато рисунків з хвильовими функціями системи (протон-дейтрон), але не зовсім зрозуміло, як спін системи впливає на розрахунки та який спіновий стан використовувався для отримання перерізу гальмівного випромінювання.

4. В тексті зустрічаються деякі стилістичні мовні неточності наприклад треба замінити слово «адіабатна»(с.49) на «адіабатична» або описки чи пропущені номери сторінок у посиланнях [29, 76], але це не критично для сприйняття новизни та повноти дисертації.

Вищенаведені зауваження не є принциповими та не впливають на загальну позитивну оцінку від дисертаційної роботи.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертація оформлена відповідно вимог, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40, та містить всі необхідні структурні елементи. Усі використані матеріали, результати і висновки мають відповідні посилання на список використаних джерел. Ознаки порушення автором вимог академічної доброчесності не спостерігаються. Порушення академічної доброчесності в дисертації та наукових працях, в яких подано результати дисертації, не виявлено.

8. Загальний висновок.

Враховуючи значний об'єм проведених досліджень, та актуальність одержаних результатів, вважаю, що дисертаційна робота відповідає спеціальності «104 Фізика та астрономія» та вимогам «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 р. № 44 та заслуговує на позитивну оцінку, а її автор, Шаульський Костянтин Андрійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю «104 Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

кандидат фіз.-мат. наук,

науковий співробітник НДЛ «Ядерної спектроскопії»

фізичного факультету

Київського національного університету

імені Тараса Шевченка

Олександр ГОРБАЧЕНКО