

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

доктора фіз.-мат. наук, старшого дослідника,
завідувача лабораторії структури атомних ядер
відділу теорії ядра і квантової теорії поля

Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України
Лашко Юлії Анатоліївни

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

Актуальність обраної теми.

В останні роки зросла кількість публікацій, присвячених ядерним реакціям у щільному середовищі, зокрема пікноядерним процесам. Провідні наукові програми (наприклад, NASA Astrophysics Roadmap, ESA Voyage 2050) прямо зазначають необхідність вивчення мікрофізичних процесів у нейтронних зорях. Тематика дослідження також відповідає пріоритетам Horizon Europe, німецького науково-дослідного товариства DFG та національного наукового фонду США NSF у секціях "Nuclear Astrophysics", "Extreme Matter", "Fundamental Interactions".

Актуальність дослідження зумовлена потребою в удосконаленні теоретичних підходів до опису ядерних процесів, що відбуваються в умовах надвисокої густини та низьких температур, характерних для компактних астрономічних об'єктів — нейтронних зір та білих карликів. Традиційні методи квантової механіки втрачають ефективність у таких екстремальних режимах, що обмежує точність розрахунків пікноядерних реакцій та супутніх процесів енергетичних втрат, зокрема гальмівного випромінювання. Розробка та застосування методу багаторазових внутрішніх відбиттів, а також кластерного підходу до моделювання гальмівного випромінювання, відкриває нові можливості для кількісного опису відповідних процесів у надщільному зоряному середовищі. Отримані результати можуть бути використані в сучасних астрофізичних моделях еволюції зір і мають практичне значення для інтерпретації спостережуваних явищ у компактних зорях.

З огляду на вищевикладене вважаю, що тема дисертаційної роботи є безумовно актуальною.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові результати, що виносяться на захист, є достатньо обґрунтованими та базуються на детальному та повному аналізі наукових джерел за проблемою, що досліджувалась у дисертації, коректно визначеній меті та постановці задач дослідження. Достовірність отриманих результатів забезпечено завдяки використанню загальновизнаних методів теоретичних досліджень із подальшим співставленням отриманих результатів, критичному аналізу результатів роботи, коректному формулюванню висновків дисертації. Усі отримані результати пройшли апробацію на конференціях в Україні та опубліковані у вітчизняних і міжнародних наукових виданнях, що індексуються основними міжнародними наукометричними базами.

Наукова новизна наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи полягає у наступних отриманих теоретичних результатах:

- 1) На відміну від термоядерного синтезу при високих температурах, у пікноядерному режимі значний внесок складають процеси тунелювання через потенціальні бар'єри, що вимагає точного квантово-механічного опису. Однак традиційні підходи, такі як ВКБ, втрачають ефективність у таких умовах, що знижує точність розрахунків астрофізичних швидкостей реакцій. Використання методу багаторазових внутрішніх відбиттів дозволяє вперше моделювати процес злиття ядер через проміжну стадію — формування складеного ядра під час синтезу — з високою точністю, особливо в енергетичному діапазоні, який відповідає умовам у нейтронних зорях.
- 2) Процеси гальмівного випромінювання супроводжують розсіяння заряджених частинок та кластерів і є суттєвим джерелом енерговтрат у надщільному зоряному середовищі. Їх точне врахування необхідне для розрахунку нейтринного охолодження, визначення теплового балансу та еволюції зір, тощо. Досі гальмівне випромінювання у протон-дейтронному та нуклон-ядерному розсіянні вивчалось здебільшого у вакуумі або в рамках спрощених моделей. Представлене дослідження вперше застосовує кластерні підходи (2-та 3-кластерні моделі) до розрахунку спектрів випромінювання; враховує вплив структури дейтрона на спектри випромінювання; досліджує вплив середовища нейтронної зорі на інтенсивність гальмівного випромінювання. Це розширює наше розуміння фізики нуклон-ядерних процесів у реалістичних астрофізичних умовах.
- 3) Окремо слід відзначити модифікацію моделі деформованих осциляторних оболонок, яка дозволила врахувати вплив щільного астрофізичного середовища на енергію зв'язку атомних ядер. Виконані в рамках цієї моделі розрахунки процесів розсіяння нуклонів на атомних ядрах у компактних зорях показали, що для білих карликів вплив середовища є незначним, тоді як для нейтронних зір він набуває визначальної ролі та суттєво змінює інтенсивність гальмівного випромінювання.

Теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження. Теоретичне та практичне значення дисертаційної роботи полягає у розширенні сучасного теоретичного апарату для опису ядерних процесів в екстремальних умовах, характерних для компактних зір. Застосований дисертантом формалізм багаторазових внутрішніх відбиттів дозволив побудувати нову модель пікноядерних реакцій у кристалічних ґратках

білих карликів та нейтронних зір. На відміну від традиційних підходів на основі квазікласичного наближення, ця модель має значно ширшу область застосування й забезпечує достовірні розрахунки швидкостей реакцій для ізотопів карбону та потенційно для інших елементів (оксигену, неону, кальцію, магнію), що становлять астрофізичний інтерес. У контексті компактних зір навіть невелика похибка у параметрах реакцій може радикально змінити сценарій еволюції. Отже, отримані результати мають не лише важливе значення для теорії ядерних процесів у щільній матерії, але й практичну цінність для астрофізичних моделей еволюції компактних зір.

Важливим результатом роботи є створення моделі для опису гальмівного випромінювання при протон-дейтронному розсіянні, у якій продемонстровано вплив параметрів, що характеризують структуру дейтрона та нуклон-нуклонну взаємодію, на спектри випромінювання. Порівняння теоретичних розрахунків із наявними експериментальними даними показало їхню добру узгодженість, що підтверджує адекватність формалізму та відкриває перспективи його подальшого уточнення при аналізі експериментів на вищих енергіях.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях. Результати дисертаційної роботи у повному обсязі викладено у 10 наукових публікаціях, серед яких 5 статей – у реферованих наукових журналах, що індексуються базами Scopus та Web of Science, 5 – в тезах наукових конференцій. Результати роботи апробовано на 5 українських та міжнародних конференціях. Внесок здобувача у наукові публікації, виконані разом із співавторами, є значним. Всі 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.

Загальна характеристика змісту дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 76 найменувань та одного додатка, в якому наведено список публікацій здобувача і описано його особистий внесок у здобуті результати, що виносяться на захист. Робота містить 20 рисунків і 7 таблиць.

У **Вступі** висвітлено актуальність обраної теми, мету, об’єкт та предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ висвітлює теоретичні принципи методу багаторазових внутрішніх відбиттів та результати його застосування до опису пікноядерних реакцій у кристалічних структурах білих карликів та нейтронних зір. Даний метод дає змогу враховувати квантові потоки у внутрішній області потенціалу, де наближені підходи не працюють. Отримані значення коефіцієнтів проникності та швидкостей пікноядерних реакцій узгоджуються за порядком величини з існуючими оцінками в літературі, що засвідчує достовірність розробленої моделі.

У **другому розділі** виконано побудову формалізму для опису процесу розсіяння протона на дейтроні з урахуванням кластерної структури дейтрона та вибору різних NN-потенціалів. Обґрунтованість моделей перевірена шляхом порівняння теоретичних спектрів гальмівного випромінювання з наявними експериментальними даними. Враховано вплив параметрів моделі, як описують структуру дейтрона (зокрема, осциляторної довжини), на спектр гальмівного випромінювання.

У **третьому розділі** запропоновано новий підхід до опису властивостей ядер у середовищі компактних зір на основі моделі деформованих осциляторних оболонок. Модель модифіковано для врахування ефектів середовища, зокрема впливу щільної матерії на енергію зв'язку ядер. Представлено аналіз спектрів гальмівного випромінювання при розсіянні протонів та нейтронів на ядрах в середовищі нейтронної зорі.

Висновки відображають основні наукові та практичні результати дисертації.

Загалом, дисертація є завершеною науковою роботою, що містить нові дані з актуальних питань ядерної фізики. Текст дисертації написаний зрозумілою науковою мовою, з використанням якісних ілюстрацій. Основні результати дисертації опубліковані в престижних наукових журналах.

Проте є і деякі зауваження.

1. Було б доцільно в першому розділі дисертації навести схематичне зображення потенціального бар'єра з позначенням ключових характеристик, що використовуються у методі багаторазових внутрішніх відбиттів, зокрема:
 - $\Gamma_{\min}$, $\Gamma_{\max}$, Γ_{cap} ;
 - внутрішніх та зовнішніх точок повороту;
 - областей тунелювання та злиття.Таке графічне представлення суттєво полегшило б розуміння реалізації методу у пікноядерних реакціях.
2. У розділі 1.1.2 використовується термін «швидке злиття ядер», однак його фізичний зміст не розкрито належним чином. Враховуючи, що такий термін не є загальноживаним у сучасній ядерно-фізичній літературі та не має чіткого визначення у стандартних джерелах, доцільно було б надати його авторське означення з чітким поясненням, які саме фізичні умови чи обмеження мають на увазі.
3. Вибрані параметри потенціалу (1.24-1.25) — глибина, дифузність, кулонівський та ядерний радіуси не мають пояснення або посилань на джерела. Такий вибір варто було обґрунтувати — або через узагальнені експериментальні дані, або через посилання на типові моделі
4. Незрозуміло, яким чином визначено значення $\Gamma_{\min}$, $\Gamma_{\max}$, Γ_{cap} , що наведені в таблиці 1.1. У тексті роботи бракує пояснень щодо фізичного або математичного критерію для вибору цих меж.
5. У формулюваннях зустрічаються некоректні або двозначні твердження.
 - i) Наприклад, на с. 17 зазначено: “нехай перша область буде мати ліву межу в точці $\Gamma_{\min}$, при цьому $\Gamma_{\min} \leq 0$ ”. Це суперечить фізичному змісту сферично-симетричної координати $r \in [0, \infty)$, і потребує уточнення.
 - ii) Подано некоректне формулювання висновків щодо резонансної природи станів із квантовими числами $J^\pi = 1/2^-$ (див. рис. 2.8). Зокрема, вказано, що “оцінка ширини таких станів *менша* за 20 МеВ”, хоча з форми залежності фазового зсуву очевидно, що ширина є *занадто великою порівняно з енергією*, що суперечить одному з базових критеріїв для резонансів. Крім того, некоректно вжито фразу про “малі амплітуди станів”, тоді як йдеться про невелику амплітуду зміни фази.

6. У роботі наведено графіки форм-факторів дейтрона в оболонковій та кластерній моделях (рис. 2.4). Водночас, було б доцільно додати фізичну інтерпретацію характерної поведінки форм-фактора в кластерній моделі, зокрема, пояснити природу спостережуваного глибокого мінімуму. Така інтерпретація дозволила б краще зрозуміти вплив внутрішньої структури дейтрона на характеристики гальмівного випромінювання.
7. Не вказано, яке значення осциляторної довжини та які параметри нуклон-нуклонних потенціалів були використані при побудові рис. 2.3–2.9. Це ускладнює інтерпретацію результатів та їх відтворення, особливо у випадку порівняння з іншими моделями або літературними даними.
8. Подано недостатньо глибоке обговорення результатів, представлених на рис. 2.10. Зокрема,
 - i) не роз'яснено фізичний зміст граничного випадку $b=0$, який, очевидно, використовується як апроксимація точкового кластеру, але потребує пояснення, оскільки не має прямого фізичного сенсу для дейтрона.
 - ii) Не простежено зв'язку між поведінкою форм-факторів на рис. 2.4 та особливостями диференціального перерізу на рис. 2.10. Варто було б проаналізувати, як особливості форм-фактора (зокрема, мінімум у кластерній моделі) впливають на енергетичний розподіл випромінювання.
 - iii) З рисунку 2.10 складається враження, що експериментальні дані порівнювали лише з результатами моделі з нульовим значенням b , а не з фізично обґрунтованим $b=1,3$ фм. Це потребує пояснень.
 - iv) Також є неузгодженість у позначеннях. А саме, у підписі до рисунка 2.10 та на графіках використовуються позначення E_{kin} та E_{beam} , які не пояснені в тексті. В результаті незрозуміло, які з цих енергій подані у лабораторній системі відліку, а які в системі центра мас.
9. Було б доцільно порівняти енергії квазізв'язаних станів, наведених у таблиці 1.2, з енергетичною залежністю ймовірності утворення складеного ядра в реакціях ізотопів карбону, зображеною на рис. 1.3. Це могло б надати додаткове фізичне пояснення особливостям поведінки цієї ймовірності.
Також заслуговує на увагу збіг деяких енергій квазізв'язаних станів для різних ізотопів, наприклад: енергія третього рівня для системи $^{10}\text{C}+^{10}\text{C}$ збігається з енергією четвертого рівня для системи $^{18}\text{C}+^{18}\text{C}$; енергія шостого рівня для $^{10}\text{C}+^{10}\text{C}$ дорівнює енергії сьомого рівня для $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$. Було б цікаво з'ясувати, чи ці збіги мають фізичну природу, пов'язану з особливостями потенціалу або симетріями систем.
10. У тексті дисертації використано термін «*взаємодія нульової відстані*» (наприклад, у розділі 2.4), тоді як у науковій літературі стандартним є термін «*потенціал нульового радіусу дії*» або «*контактна взаємодія*». Використання нетипової термінології може викликати непорозуміння.
11. Подекуди в тексті та рисунках є певні неточності та друкарські помилки. Наприклад, в підрозділі 1.2.1 потенціал, що насправді описує взаємодію двох ядер, помилково названо потенціалом взаємодії між нуклонами. Така термінологія є некоректною, оскільки потенціал, використаний у рівняннях (1.23)–(1.24), є ефективним ядро–ядерним потенціалом і не має стосунку до мікроскопічної нуклон-

нуклонної взаємодії. Така ж помилкова назва повторюється в підрозділі 1.3.1, де йдеться про взаємодію між ізотопами карбону у вузлах кристалічної ґратки (див. рис. 1.1 і таблицю 1.1).

Проте вищенаведені зауваження не є принциповими і не применшують головних результатів дисертаційної роботи. Наукові результати Шаульського К.А. є оригінальними, а зроблені висновки є достатньо обґрунтованими, їх достовірність не викликає сумніву.

З матеріалів, представлених у дисертаційній роботі, можна зробити висновок, що Шаульський К.А. є кваліфікованим науковцем, який вільно володіє сучасними аналітичними та чисельними методами у ядерній фізиці.

Вважаю, що за актуальністю обраного напрямку, рівнем визначених завдань, методами їх виконання, обсягом обробленого експериментального та теоретичного матеріалу, новизною, науковим та практичним значеннями здобутих результатів дисертація повністю 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,
Завідувач лабораторії структури атомних ядер
відділу теорії ядра і квантової теорії поля
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України
доктор фіз.-мат. наук, ст. досл.

Юлія ЛАШКО